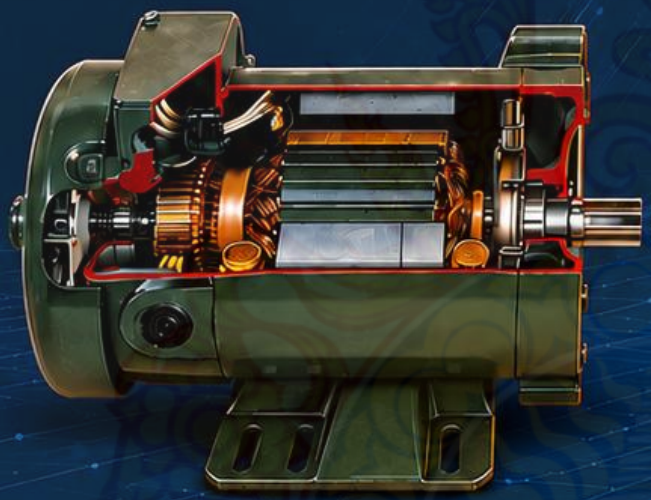
สำหรับนักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ระดับปริญญาตรี

เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1

ELECTRICAL MACHINE 1







ผศ.ดร.เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์

หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลง

การวิเคราะห์และการทดสอบ

การควบคุมและการประยุกต์ใช้งาน



ตำราเรียน

รหัสวิชา ETE 2203

เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1

(หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง)

เรียบเรียงโดย

ผศ. ดร.เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

คำนำ

ตำราเรียนวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 เล่มนี้ เรียบเรียงขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในรายวิชา ETE 2203 เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ของนักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ เนื้อหาของตำราเล่มนี้ กล่าวถึงเรื่องของการเปลี่ยนรูปพลังงาน แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก หลักการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการควบคุม พร้อมทั้งส่วนของเอกสารประกอบการทดลอง เรื่องหม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งตรงตามหัวข้อที่กำหนดไว้ในหลักสูตร ทั้งนี้เพื่อให้นักศึกษามีความรู้และทักษะปฏิบัติเพียงพอที่จะใช้ในการประกอบวิชาชีพหรือการศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้นต่อไป และผู้เขียนหวังว่านอกจากจะใช้เป็นตำราเรียนแล้วเนื้อหาของตำราเล่มนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจทั่วไปอีกด้วย

คุณความดีอันใดที่เกิดจากหนังสือเล่มนี้ผู้เขียนขอมอบให้ บิดาผู้ล่วงลับ มารดา ครู อาจารย์ ภรรยา บุตรธิดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ช่วยส่งเสริม ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจผู้เขียนด้วยดีตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข

บทที่ 1 พลังงานและแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

1.1 พลังงาน	1
1.2 พลังหรือกำลัง	1
1.3 การวัดค่าพลังงาน	2
1.4 การวัดค่ากำลังหรือพลัง	3
1.5 พลังงานไฟฟ้า	3
1.6 แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า	4
1.6.1 ไฟฟ้าที่เกิดจากการเสียดสีกันของวัตถุ	4
1.6.2 ไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี	4
1.6.3 ไฟฟ้าที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า	5
1.6.4 ไฟฟ้าที่เกิดจากแสง	5
1.6.5 ไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานความร้อนโดยตรง	5
1.7 การผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้งานจริง	6
1.7.1 โรงไฟฟ้าพลังน้ำ	6
1.7.2 โรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ	6
1.7.3 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์	7
1.8 ระบบผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย	7
1.9 การผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม	8
1.9.1 ระบบโคเจนเนอเรชันชนิดกังหันไอน้ำ	10
1.9.2 ระบบโคเจนเนอเรชันชนิดกังหันก๊าซ	10
1.9.3 ระบบโคเจนเนอเรชันชนิดเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน	11
1.9.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบโคเจนเนอเรชัน	11
สรุปท้ายบท	12
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 2 แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

2.1 สนามแม่เหล็ก 13
2.1.1 สนามแม่เหล็กรอบตัวนำกระแส 14
2.1.2 สนามแม่เหล็กรอบขดลวด 15
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กกับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก 15
2.2.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก 15
2.2.2 ความเข้มสนามแม่เหล็ก 16
2.2.3 ความต้านทานแม่เหล็ก 16
2.2.4 ค่าความซึมผ่านแม่เหล็ก 17
2.2.5 ฮิสเทอรีซิส 18
2.3 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิส 19
2.3.1 ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก 21
2.4 การคำนวณวงจรแม่เหล็ก 21
2.4.1 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลและผลของสนามแม่เหล็กบริเวณขอบ 24
2.5 แรงแม่เหล็ก 25
สรุปท้ายบท 26
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2 27

บทที่ 3 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 31
3.1.1 แกนเหล็กแบบคอร์ 31
3.1.2 แกนเหล็กแบบเชลล์ 32
3.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า 33
3.2.1 อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า 34
3.2.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 34
3.2.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 35
3.2.4 ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า 37
3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะใช้งานจริง 38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า	38
3.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลด	39
3.3.3 หม้อแปลงในสภาวะมีโหลด	43
3.3.4 ความต้านทานและรีแอคแตนซ์รั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้า	45
3.3.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	47
3.3.6 พัฒนาการของวงจรสมมูล	48
สรุปท้ายบท	51
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3	52

บทที่ 4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพ

4.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	54
4.1.1 การทดสอบแบบไม่มีโหลด หรือทดสอบแบบเปิดวงจร	54
4.1.2 การทดสอบแบบลัดวงจร	56
4.2 โวลเตจเรกูเลชัน	58
4.3 เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ	59
4.4 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า	60
4.4.1 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก	61
4.4.2 ความสูญเสียในขดลวดทองแดง	61
4.5 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	62
4.5.1 ประสิทธิภาพสูงสุด	63
4.5.2 ประสิทธิภาพตลอดวัน	64
สรุปท้ายบท	68
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4	68

บทที่ 5 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

5.1 แรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส	71
5.2 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส	72
5.2.1 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟส	72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 รูปแบบการต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 เครื่อง ร่วมกันเป็นหม้อแปลง 3 เฟส 72
5.2.3 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Y-Y 73
5.2.4 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Δ-Δ 74
5.2.5 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Y-Δ 75
5.2.6 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Δ-Y 75
5.2.7 การต่อหม้อแปลงแบบ V หรือ Open-delta 76
5.3 ความต่างเฟสของแรงดัน 77
5.4 วงจรสมมูลแบบเฟสเดียว 78
5.5 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบใช้แกนแม่เหล็กร่วม 80
5.7 เวกเตอร์กรุ๊ป 82
สรุปท้ายบท 85
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5 86

บทที่ 6 หม้อแปลงออโตและหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ

6.1 หม้อแปลงออโต 87
6.1.1 หม้อแปลงออโตแบบแปลงแรงดันลง 88
6.1.2 หม้อแปลงออโตแบบแปลงขึ้น 88
6.1.3 วาริแอค 89
6.2 หม้อแปลงเครื่องมือวัด 90
6.2.1 หม้อแปลงวัดกระแส 90
6.2.2 หม้อแปลงวัดแรงดัน 92
6.3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบหลายขดลวด (Multi-Coil Transformer) 93
6.4 แทปของหม้อแปลง (Transformer Taps) 95
สรุปท้ายบท 95
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6 96

บทที่ 7 การใช้งานและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

7.1 ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า 97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.2 หม้อแปลงจำหน่ายในระบบไฟฟ้า	98
7.3 ชนิดของหม้อแปลงจำหน่าย	99
7.3.1 หม้อแปลงแบบใช้ของเหลว	99
7.3.2 หม้อแปลงแบบแห้ง	99
7.4 วิธีระบายความร้อนของหม้อแปลง	100
7.4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกกันในวิธีระบายความร้อน	100
7.5 ฉนวนของหม้อแปลง	101
7.6 น้ำมันหม้อแปลง	102
7.7 ส่วนประกอบของหม้อแปลงระบบจำหน่าย	103
7.8 อุปกรณ์ประกอบหม้อแปลง	104
7.9 การติดตั้งใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า	104
7.9.1 การติดตั้งภายในอาคาร	105
7.9.2 การติดตั้งภายนอกอาคาร	105
7.10 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า	107
7.11 การเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า	108
7.12 การเลือกขนาดหม้อแปลงให้คุ้มค่าและมีความสูญเสียน้อยที่สุด	108
7.12.1 หลักพื้นฐานของการเลือกขนาดหม้อแปลง	108
7.12.2 การเลือกขนาดจากรูปแบบการจ่ายโหลดและการเติบโตของโหลด	110
7.12.3 การพิจารณาการสูญเสียอายุการใช้งาน	110
7.12.4 การจ่ายโหลดเชิงเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลง	110
7.12.5 ต้นทุนรวมในการเป็นเจ้าของหม้อแปลง	112
7.12.6 การใช้งานหม้อแปลงกับโหลดที่มีฮาร์มอนิก	113
7.12.7 หม้อแปลงควรจ่ายโหลดประมาณกี่เปอร์เซ็นต์	114
7.12.8 แนวทางการเลือกขนาดหม้อแปลงสำหรับงานออกแบบ	114
สรุปท้ายบท	118
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7	119

บทที่ 8 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

8.1 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	120

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.2 หลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 122
8.2.1 การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 123
8.3 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง 125
8.3.1 โครงสร้างของส่วนที่อยู่กับที่ 125
8.2.2 โครงสร้างของส่วนที่เคลื่อนที่ 126
8.4 การพันอาร์เมเจอร์ 127
8.5 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า 129
8.6 การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง 133
8.6.1 การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 133
8.6.2 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 134
สรุปท้ายบท 134
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8 135

บทที่ 9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความสูญเสีย และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

9.1 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก 136
9.1.1 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็กแยกกับอาร์เมเจอร์ 136
9.1.2 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็กกับอาร์เมเจอร์เพื่อจ่ายไฟให้ตัวเอง 137
9.2 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 138
9.2.1 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อแยก 139
9.2.2 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน 140
9.2.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม 141
9.2.4 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสม 142
9.3 ตัวประกอบที่มีผลต่อการทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 145
9.4 การสูญเสียในแกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ 146
9.4.1 การสูญเสียจากฮีสเทอรีซิส 146
9.4.2 การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก 146
9.5 การสูญเสียทั้งหมดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 147

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

9.5.1 การสูญเสียที่ขดลวดทองแดง 147
9.5.2 การสูญเสียเนื่องจากความเป็นแม่เหล็ก 147
9.5.3 การสูญเสียทางกล 147
9.6 แผนผังกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 148
สรุปท้ายบท 151
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9 151

บทที่ 10 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและอาร์เมเจอร์รีแอคชัน

10.1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 153
10.1.1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟ 154
10.1.2 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล 155
10.2 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 155
10.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามกระตุ้นต่อแยก 155
10.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน 156
10.2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม 156
10.2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสม 156
10.3 อาเมเจอร์รีแอคชัน 157
10.3.1 สนามแม่เหล็กหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 157
10.3.2 สนามแม่เหล็กของอาเมเจอร์ 158
10.3.3 ผลของการเลื่อนตำแหน่งแปรงถ่าน 159
10.3.4 ผลขององค์ประกอบดีแมกเนไตซิงและครอสแมกเนไตซิง 161
10.3.5 การชดเชยสนามแม่เหล็กที่บิดเบี้ยว 161
10.3.6 อาร์เมเจอร์ แอมแปร์-เทิร์น 162
10.3.7 ขดลวดชดเชย 164
10.3.8 จำนวนของขดลวดชดเชย 165
10.3.9 อินเตอร์โพล (Interpoles) 167
สรุปท้ายบท 168
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 10 168

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 11 หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

11.1 หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 169
11.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ 171
11.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์ 173
11.4 แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 176
11.5 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 180
11.6 ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 182
11.7 ความเร็วเรกูเลชัน 183
สรุปท้ายบท 184
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 11 184

บทที่ 12 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการใช้งาน

12.1 การสตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 186
12.2 อุปกรณ์สตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 187
12.2.1 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 3 จุด 187
12.2.2 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 4 จุด 188
12.2.3 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบใช้กับมอเตอร์แบบอนุกรม 189
12.3 การกลับทางหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 189
12.3.1 การต่อวงจรการกลับทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 190
12.4 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 191
12.4.1 ปัจจัยในการควบคุมความเร็ว 191
12.4.2 วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็ก 192
12.5 การหยุดหรือชะลอความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 198
12.5.1 เบรกแบบกลไกไฟฟ้า 198
สรุปท้ายบท 203
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 12 204

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 13 การสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

13.1 การสูญเสียและประสิทธิภาพ 205
13.1.1 การสูญเสียทางไฟฟ้าหรือการสูญเสียในขดลวดทองแดง 206
13.1.2 การสูญเสียเชิงกลจากการหมุน 206
13.2 แผนผังกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 207
13.3 การเกิดประสิทธิภาพสูงสุด 207
13.3.1 เส้นโค้งประสิทธิภาพ 208
สรุปท้ายบท 214
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 13 214

บทที่ 14 เอกสารประกอบการทดลองหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดลองที่ 1 การหาอัตราส่วนและการหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า 216
การทดลองที่ 2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร 222
การทดลองที่ 3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร 227
การทดลองที่ 4 การทดสอบหาค่าโวลเตจเรกูเลชันของหม้อแปลง 232
การทดลองที่ 5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส เป็น 3 เฟส 236

บทที่ 15 เอกสารประกอบการทดลองเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

การทดลองที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก 247
การทดลองที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 253
การทดลองที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 259
การทดลองที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม 263
การทดลองที่ 5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก 273
การทดลองที่ 6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 279
การทดลองที่ 7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 285
การทดลองที่ 8 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม 289
บรรณานุกรม **300**
ดัชนีคำศัพท์ทางเทคนิค **302**

1 พลังงานและแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

Energy and Electrical Energy Sources

พลังงาน เป็นปริมาณพื้นฐานอย่างหนึ่งของกระบวนการในระบบกายภาพทุกอย่าง พลังงานที่สภาวะหนึ่ง ๆ นิยามว่า เท่ากับงานที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนจากสภาวะแรกเริ่มไปยังสภาวะนั้น ๆ ตัวอย่างของพลังงาน ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ พลังงานเคมีในอาหาร พลังงานความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อน หรือพลังงานศักย์ของน้ำที่อยู่เหนือเขื่อน เป็นต้น พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่นได้ โดยกฎการอนุรักษ์พลังงานระบุว่า ในระบบปิดนั้น พลังงานทั้งหมดที่ประกอบขึ้นจากพลังงานของส่วนย่อย ๆ จะมีค่าคงที่เสมอ พลังงานที่ว่านี้ไม่สามารถจะทำให้สูญสลายไปได้ เว้นแต่ว่าจะแปรเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานในรูปแบบอื่น ยกตัวอย่าง เช่น การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ การเปลี่ยนพลังงานสะสมของน้ำที่เก็บไว้ในเขื่อนมาเป็นพลังงานกลเพื่อใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า เป็นต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึง นิยามของพลังงาน การวัดค่าพลังงานและหน่วย แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ วิธีการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งาน การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม

1.1 พลังงาน (Energy)

พลังงาน หมายถึง ความสามารถในการทำงานได้ (The capacity for doing work) สิ่งต่าง ๆ ที่เคลื่อนที่ได้ หรือสิ่งใด ๆ ก็ตามที่เคลื่อนไหว เจริญเติบโต หรือทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง ย่อมมีพลังงานทั้งสิ้น ความร้อนก็เป็นพลังงานรูปหนึ่ง เราอาจมองไม่เห็นความร้อนเคลื่อนที่แต่ความร้อนทำให้โมเลกุลของสสารเคลื่อนที่เร็วขึ้น พลังงานนั้นอาจถูกเก็บไว้ได้ เช่น พลังงานที่อยู่ในถ่านหิน ในน้ำมันเบนซิน หรือในผลไม้ พลังงานที่ถูกเก็บไว้นั้นสามารถนำมาใช้ได้ พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้แต่ไม่สามารถถูกทำลายหรือสูญหายไปได้ มันเพียงแค่ถูกเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปอีกรูปหนึ่งเท่านั้น พลังงานมีหน่วยวัดเป็น จูล (Joules) หรือ กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) พลังงานมีหลายชนิด ได้แก่ พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ พลังงานเคมี พลังงานความร้อน พลังงานเสียง พลังงานแสงหรือรังสี และพลังงานไฟฟ้า

1.2 พลังหรือกำลัง (Power)

พลัง หรือ กำลัง คือ อัตราการทำงานหรืออัตราที่พลังงานถูกใช้หรือเปลี่ยนรูปไป เช่น เครื่องยนต์ใช้พลังงานจากน้ำมันดีเซล เครื่องปิ้งขนมปังใช้พลังงานไฟฟ้า หรือกังหันลมใช้พลังงานจากลม อัตรากำลังนี้มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) หรือ กิโลวัตต์ (kW)

1.3 การวัดค่าพลังงาน (Energy measurement)

พลังงานนั้นสามารถวัดได้หลายรูปแบบ การวัดปริมาณของพลังงานแบบพื้นฐานอย่างหนึ่งก็คือ วัดเป็นบีทียู (BTU) ซึ่งย่อมาจากคำว่า British thermal unit โดยที่ 1 BTU คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 $^{\circ}$F ที่ระดับน้ำทะเล พลังงานความร้อน 1 BTU นั้นประมาณค่าจากความร้อนที่ได้จากไม้ขีดหนึ่งก้าน เราต้องใช้พลังงานประมาณ 2,000 BTU เพื่อต้มกาแฟหนึ่งกา เมื่อพลังงาน 1,000 J หรือ 1 kJ เท่ากับ 1.055 BTU ดังนั้นเราจึงต้องใช้พลังงานถึง 2.11 MJ ในการต้มกาแฟหนึ่งกา

จูล (Joule; J) เป็นหน่วยวัดพลังงาน เขียนย่อด้วยตัวอักษร J ใช้ชื่อนี้เพื่อเป็นเกียรติแก่นักฟิสิกส์ที่ชื่อ เจมส์ เพรสคอตต์ จูล (James Prescott Joule, 1818 – 1889) เขาค้นพบว่าความร้อนเป็นพลังงานชนิดหนึ่ง พลังงานขนาด 1 J ก็คือ พลังงานที่ใช้ยกสิ่งของน้ำหนัก 1 ปอนด์ ให้ได้ความสูงประมาณ 9 นิ้ว ดังนั้นถ้าคุณยกถุงน้ำตาลหนัก 5 ปอนด์ จากพื้นขึ้นไปวางบนโต๊ะที่สูง 27 นิ้ว คุณจะต้องใช้พลังงานทั้งหมดประมาณ 15 J

ขนมปัง 1 แผ่นให้พลังงาน ประมาณ 250-400 kJ ด้วยพลังงานปริมาณเท่านี้ เราสามารถจะดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ได้ ดังต่อไปนี้

- วิ่งเหยาะ ๆ ได้นาน 6 นาที
- ขี่จักรยานนาน 10 นาที
- เดินเล่นนาน 15 นาที
- นอนหลับ 1 ชั่วโมง 30 นาที
- ทำให้หลอดไฟขนาด 60 W สว่างประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที

โดยปกติเราจะวัดค่าพลังงานไฟฟ้าเป็น วัตต์-ชั่วโมง (Wh) หรือ กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) ทั้งนี้เพราะ J (จูล) เป็นหน่วยเล็กเกินไปสำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ เมื่อ 1 kWh เท่ากับ 3.6 MJ (3.6 ล้านจูล) เมื่อ MJ คือ เมกกะจูล (Mega joule)



รูปที่ 1.1 เจมส์ เพรสคอตต์ จูล นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ

ที่มา: Alfred Brothers, James Prescott Joule, c. 1875, The Metropolitan Museum of Art, via Wikimedia Commons, Public Domain.

1.4 การวัดกำลังหรือพลัง

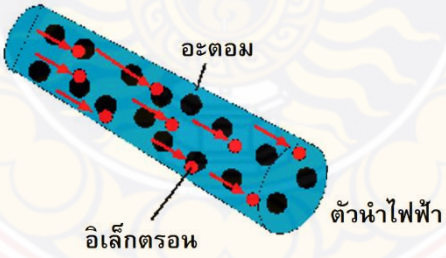
พลังหรือกำลังมีหน่วยวัดเป็นวัตต์ (Watt) เรียกตามชื่อวิศวกรที่ชื่อ เจมส์ วัตต์ (James Watt, 1736-1819) ซึ่งเป็นผู้ผลิตเครื่องจักรไอน้ำได้สำเร็จ วัตต์ (W) เป็นหน่วยวัดกำลังที่มีค่าเท่ากับพลังงาน 1 J ถูกส่งไปเป็นเวลา 1 วินาที (1 W = 1 J/sec) เนื่องจาก W เป็นหน่วยที่เล็กมาก พลังหรือกำลังจึงนิยมวัดกันเป็นกิโลวัตต์ (1 kW = 1,000 W) ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่วัดบริเวณเส้นศูนย์สูตรเป็น 1 kW/m^2 ดังนั้น ถ้าแสงอาทิตย์ส่องอยู่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะส่งพลังงาน 1 kWh ต่อ 1 m^2

1.5 พลังงานไฟฟ้า (Electricity)

ไฟฟ้านั้นมีให้เราเห็นได้ในทุก ๆ ที่ในชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้าทำให้บ้านสว่างไสว ใช้เป็นพลังงานในการปรุงอาหาร ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ โทรทัศน์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้ เครื่องมือเครื่องใช้เกือบทุกอย่างรอบตัวเราใช้พลังงานไฟฟ้า แต่ทราบหรือไม่ว่าไฟฟ้าคืออะไร มาจากไหน ทำงานอย่างไร และก่อนที่จะเข้าใจเรื่องทั้งหมดนั้น เราต้องรู้เรื่องของสิ่งเล็ก ๆ ที่เรียกว่า อะตอม เสียก่อน

สสารทุกอย่างมีอะตอมเป็นส่วนประกอบและอะตอมประกอบไปด้วยองค์ประกอบเล็ก ๆ 3 ส่วน คือ โปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน ในอะตอมอิเล็กตรอนนั้นเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ แกนกลาง หรือนิวเคลียส โดยนิวเคลียสเกิดจากการรวมตัวของโปรตอนและนิวตรอน อิเล็กตรอนเป็นประจุลบ โปรตอนเป็นประจุบวก ส่วนนิวตรอนนั้นเป็นกลางไม่มีทั้งประจุลบและประจุบวก อะตอมของสสารแต่ละชนิดจะมีจำนวนของอิเล็กตรอน โปรตอนและนิวตรอนจำเพาะ โดยส่วนใหญ่แล้วจำนวนของอิเล็กตรอนมักจะเท่ากับจำนวนของโปรตอน ถ้าจำนวนของอิเล็กตรอนและโปรตอนเท่ากัน อะตอมนั้นจะอยู่ในภาวะสมดุล เช่น ถ้าอะตอมของสสารชนิดหนึ่งมีโปรตอน 6 ตัว มันก็ควรจะมีอิเล็กตรอน 6 ตัว เช่นเดียวกัน สสารที่มีจำนวนของอิเล็กตรอน 6 ตัวและโปรตอน 6 ตัวนี้ คือ คาร์บอน (carbon) คาร์บอนพบได้ในดวงอาทิตย์ ดวงดาว อุกาบาต ในชั้นบรรยากาศของดวงดาวต่าง ๆ ในอาหารที่เรากินเข้าไป ถ่านและเพชรก็เป็นองค์ประกอบของคาร์บอน

อะตอมของสสารบางชนิดสามารถสูญเสียอิเล็กตรอนได้ อะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปจะมีจำนวนโปรตอนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนและมีสภาพเป็นประจุบวก อะตอมที่มีจำนวนของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นก็จะมีสภาพเป็นประจุลบ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากอะตอมหนึ่งไปอีกอะตอมหนึ่งได้ และเมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ระหว่างอะตอม จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น



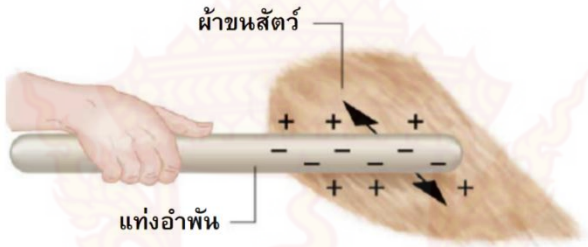
รูปที่ 1.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากอะตอมหนึ่งไปอีกอะตอมหนึ่ง

1.6 แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้านั้นสามารถเกิดขึ้นหรือผลิตขึ้นได้จากแหล่งกำเนิดหลายชนิดแตกต่างกันออกไปซึ่งสามารถแบ่งแยกได้ ดังนี้

1.6.1 ไฟฟ้าที่เกิดจากการเสียดสีกันของวัตถุ

การนำวัตถุ 2 ชนิดมาเสียดสีกันจะเกิดไฟฟ้า เรียกว่า ไฟฟ้าสถิต (static electricity) ผู้ศึกษาปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิตในยุคแรก คือ นักปราชญ์กรีกโบราณท่านหนึ่ง ชื่อ เธลีส แห่ง มิเลทัส (Thales of Miletus, 640-546 ปี ก่อนคริสต์ศักราช) แต่ยังไม่ทราบอะไรเกี่ยวกับไฟฟ้ามากนัก จนถึงสมัยเซอร์วิลเลี่ยมกิลเบอร์ท (Sir William Gilbert) ได้ทดลองนำเอาแท่งอำพันถูกับผ้าขนสัตว์ ปรากฏว่าแท่งอำพันและผ้าขนสัตว์สามารถดูดผงเล็ก ๆ ได้ปรากฏการณ์นี้ คือการเกิดไฟฟ้าสถิตบนวัตถุทั้งสองนั่นเอง

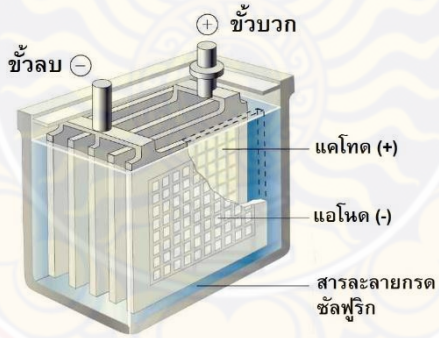


รูปที่ 1.3 การเกิดไฟฟ้าสถิต

ที่มา: หนังสือเรียนวิทยาศาสตร์, รูปที่ 1.3 การเกิดไฟฟ้าสถิต, บริษัท สำนักพิมพ์เอมพันธ์ จำกัด.

1.6.2 ไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี

ไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานทางเคมีจะเป็นไฟฟ้าชนิดกระแสตรง (direct current) โดยอุปกรณ์ที่ผลิตไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมีที่เรารู้จักกันทั่วไปก็คือ แบตเตอรี่ ในแบตเตอรี่ทุกชนิดสิ่งที่เหมือนกัน ก็คือ ปฏิกิริยาเคมีจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่ง แผ่นโลหะหรือแผ่นธาตุและสารละลายอิเล็กโตรไลท์เป็นตัวทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแบตเตอรี่ และปฏิกิริยาเคมีที่แตกต่างกันของแบตเตอรี่แต่ละชนิดนั้นเป็นตัวกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

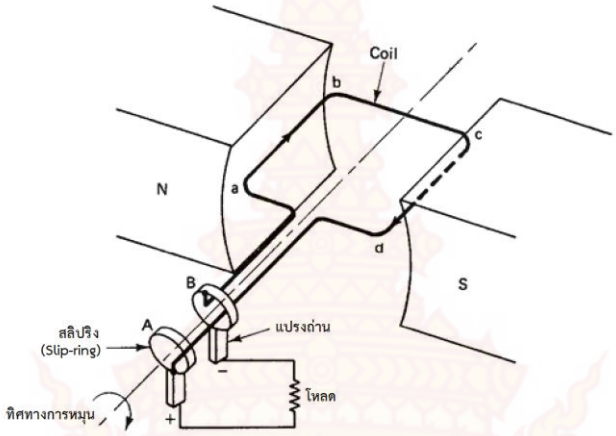


รูปที่ 1.4 โครงสร้างของแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด

ที่มา: สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, “แบตเตอรี่สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว.”

1.6.3 ไฟฟ้าที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า

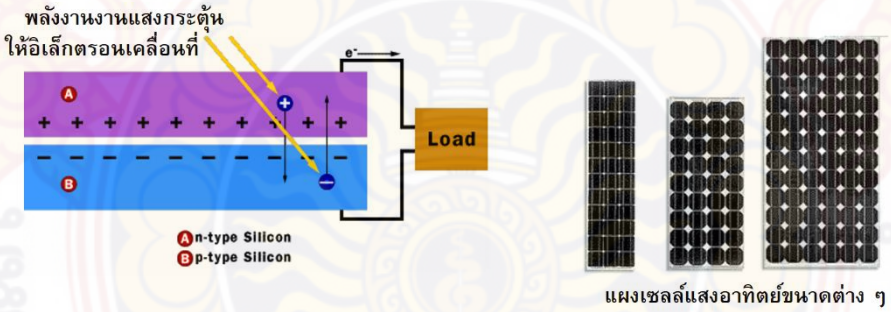
การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแม่เหล็ก ทำได้โดยการนำขดลวดตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก หรือการนำสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดตัวนำไฟฟ้า อย่างใดอย่างหนึ่ง ทั้งสองวิธีนี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดตัวนำนั้น ซึ่งสามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้



รูปที่ 1.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.6.4 ไฟฟ้าที่เกิดจากแสง

หลักการทำงาน คือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบกับเซลล์ วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะดูซับพลังงานไว้ พลังงานแสงที่ตกกระทบและถูกดูดซับเอาไว้ จะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำหลุดออกจากวงโคจรและเคลื่อนที่อย่างอิสระ การเคลื่อนที่หรือการไหลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ก็คือ การไหลของกระแสไฟฟ้า นั่นเอง

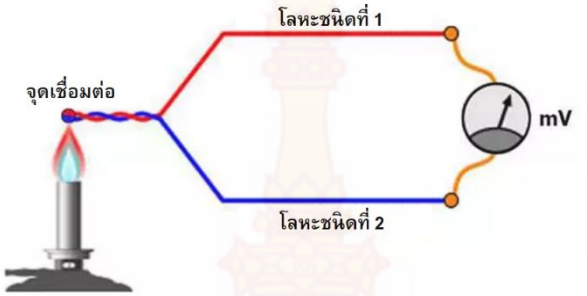


รูปที่ 1.6 โครงสร้างและการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.6.5 ไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานความร้อนโดยตรง

กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นจากพลังงานความร้อนโดยตรงได้ โดยการนำโลหะ 2 ชนิด ที่แตกต่างกันมายึดติดกัน แล้วให้ความร้อนตรงรอยต่อของโลหะทั้งสองชนิดนั้น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในแท่งโลหะทั้งสอง

หลักการนี้นำไปใช้ในอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ ที่เรียกว่า เทอร์โมคัปเปิล และยังสามารถนำหลักการนี้ไปสร้างเป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไฟฟ้า ที่เรียกว่า เทอร์โมอิเล็กตริก ได้อีกด้วย



รูปที่ 1.7 หลักการของเทอร์โมคัปเปิล

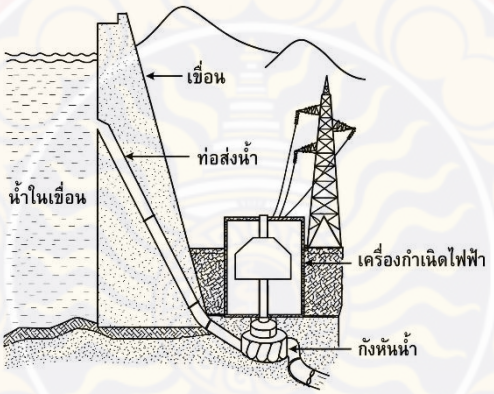
ที่มา: ดัดแปลงจาก นวภัทรา หนูนาค และทวีพล ซื่อสัตย์, การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร, 2555.

1.7 การผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับการใช้งานจริง

การผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับการใช้งานจริงนั้น ผลิตมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่อยู่ในโรงจักรไฟฟ้า โดยพลังงานที่ใช้เป็นต้นกำลังในการผลิตไฟฟ้านั้นมาจากพลังงานหลายรูปแบบ ดังนั้นโรงจักรไฟฟ้าจึงมีรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

1.7.1 โรงไฟฟ้าพลังน้ำ

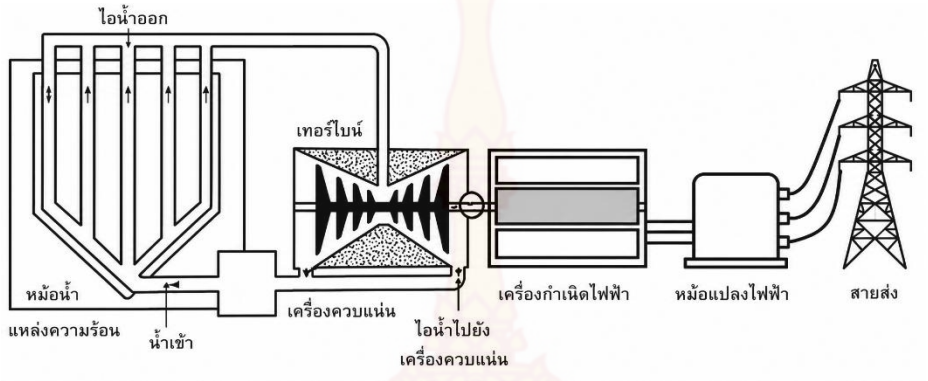
โรงไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นโรงไฟฟ้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานศักย์จากน้ำที่เก็บกักไว้ในเขื่อนมาหมุนกังหันน้ำ (hydro turbine) ที่ต่ออยู่กับแกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้



รูปที่ 1.8 โรงไฟฟ้าพลังน้ำ

1.7.2 โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ

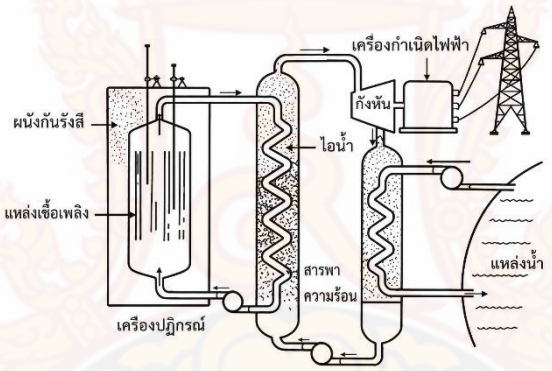
โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงต้มน้ำให้เดือดกลายเป็นไอแห้ง (superheated steam) แล้วไปหมุนกังหันไอน้ำ (steam turbine) ที่ต่ออยู่กับแกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้อาจเป็น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ



รูปที่ 1.9 โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ

1.7.3 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์

โรงไฟฟ้าแบบพลังงานนิวเคลียร์ ใช้ความร้อนที่ได้จากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไปต้มน้ำทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอและไอแห้ง เพื่อส่งไปขับกังหันไอน้ำหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในลักษณะเดียวกันกับโรงไฟฟ้าแบบอื่น ๆ ในปัจจุบันยังไม่มีโรงไฟฟ้าแบบนี้ในประเทศไทย



รูปที่ 1.10 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์

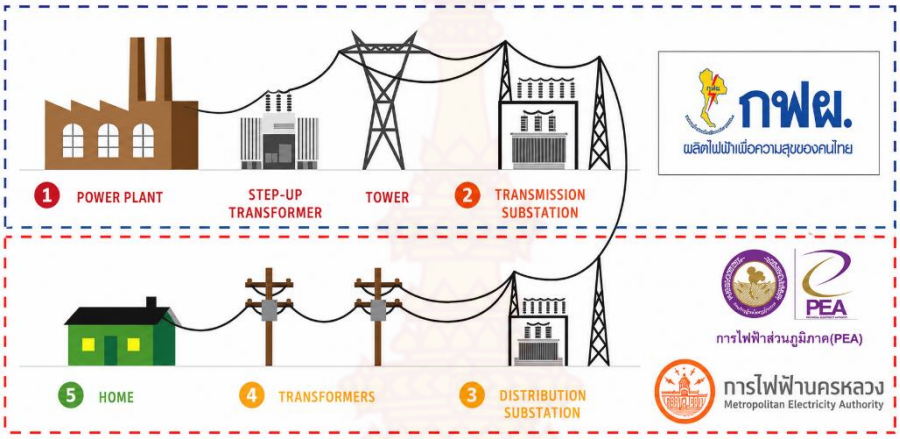
1.8 ระบบผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย

โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย แบ่งออกเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนจะมีหน่วยงานรัฐวิสาหกิจสังกัดกระทรวงมหาดไทย เป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการ ดังนี้

1. ระบบผลิต (generating system) การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) เป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการ
2. ระบบส่งจ่าย (transmission system) การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) เป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการ
3. ระบบจำหน่าย (distribution system) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) เป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการ

รูปที่ 1.11 แสดงโครงสร้างของระบบผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยที่เริ่มต้นจากการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแล้วใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแปลงแรงดันไฟฟ้าขึ้นเป็นแรงดันสูงเพื่อส่งจ่ายมาในระบบสายส่งไฟฟ้า เมื่อเข้าใกล้ชุมชนก็จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย (substation) ลดแรงดันไฟฟ้าลงเพื่อส่ง

เข้าสู่ระบบจำหน่าย และใช้หม้อแปลงจำหน่ายลดแรงดันไฟฟ้าลงให้เหลือ 400 V ในระบบ 3 เฟส หรือ 230 V ในระบบ 1 เฟส เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟต่อไป

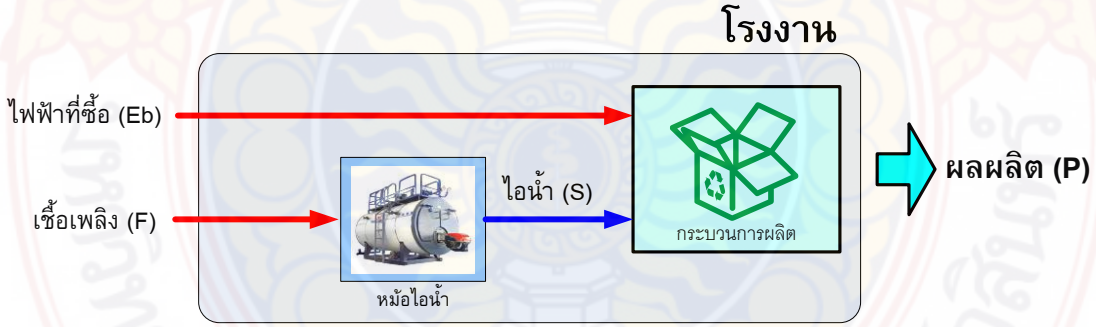


รูปที่ 1.11 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าในประเทศไทย

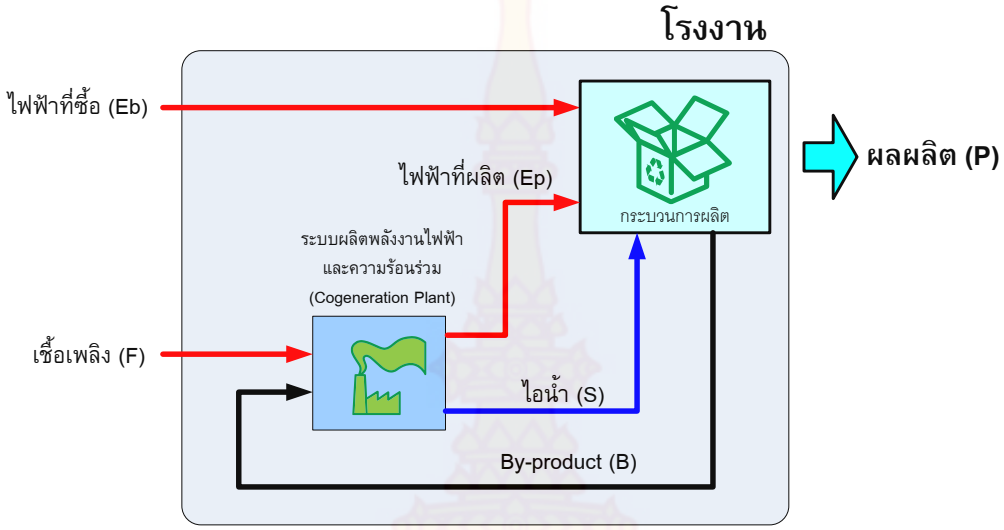
ที่มา: ผู้เขียนดัดแปลงจากแผนภาพระบบผลิต ส่ง และจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง

1.9 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม

ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม หรือระบบโคเจนเนอเรชัน (cogeneration) คือ ระบบที่ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานกล และมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนควบคู่ไปด้วยในขณะเดียวกัน โดยอาศัยเชื้อเพลิงแหล่งเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมนั้นสูงถึง 80% เมื่อเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าอย่างเดียวที่มีประสิทธิภาพเพียง 40% เท่านั้นเนื่องจากพลังงานความร้อนที่เหลือจากการผลิตไฟฟ้าจะถูกปล่อยทิ้งให้กับบรรยากาศโดยไม่ได้นำไปใช้งาน ภาพความแตกต่างระหว่างการใช้พลังงานแบบทั่วไปและแบบพลังงานความร้อนร่วม แสดงดังรูปที่ 1.12 และ รูปที่ 1.13



รูปที่ 1.12 การใช้พลังงานแบบทั่วไปของโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.13 การใช้พลังงานแบบระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม

เทคโนโลยีระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมสามารถแบ่งลักษณะการทำงานเป็น 2 รูปแบบ โดยพิจารณาจากลำดับการนำพลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์ว่าก่อน หรือหลังการผลิตพลังงานกล ถ้าหากระบบผลิตพลังงานกลก่อนแล้วนำพลังงานความร้อนที่เหลือไปใช้ประโยชน์ แบบนี้จะเรียกว่า “ระบบโคเจนเนอเรชันวัฏจักรบน (topping cycle cogeneration) ” และในทางตรงกันข้าม ถ้านำพลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์ก่อนที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานกล เรียกว่า “ระบบโคเจนเนอเรชันวัฏจักรล่าง (bottoming cycle cogeneration) ” ซึ่งความเหมาะสมของแต่ละรูปแบบนั้นขึ้นอยู่กับประเภทอุตสาหกรรม โดยระบบ โคเจนเนอเรชันวัฏจักรบนเหมาะกับอุตสาหกรรมอาหาร กระดาษ สิ่งทอและโรงกลั่นน้ำมัน ส่วนระบบโคเจนเนอเรชันวัฏจักรล่างเหมาะกับ อุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิและความดันสูง เช่น อุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ อุตสาหกรรมผลิตเหล็ก อุตสาหกรรมผลิตแก้ว และ อุตสาหกรรมเคมี

ระบบโคเจนเนอเรชันวัฏจักรบนสามารถผลิตพลังงานกลได้จากเครื่องต้นกำลัง 3 ชนิด คือ

1) ระบบกังหันไอน้ำ (steam turbine)
2) ระบบกังหันก๊าซ (gas turbine)
3) ระบบเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน (internal combustion engine)

ข้อพิจารณาว่าจะเลือกใช้ระบบโคเจนเนอเรชันชนิดใดต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนความต้องการความร้อนต่อไฟฟ้า (heat to power ratio, H/P) ของสถานประกอบการนั้นก่อน เนื่องจากระบบโคเจนเนอเรชันจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออัตราส่วน H/P ของระบบโคเจนเนอเรชันมีค่าใกล้เคียงกับค่า H/P ของสถานประกอบการ ชนิดของเชื้อเพลิงที่หาได้ คุณภาพของพลังงานความร้อนที่ต้องการ ลักษณะการใช้ความร้อนและไฟฟ้าของโรงงานและเวลาการใช้งาน ต้นทุนการก่อสร้าง และเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบระบบโคเจนเนอเรชันแบบต่างๆ

รายละเอียด	กังหันไอน้ำ (ชนิด back pressure)	กังหันก๊าซ	เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน
ขนาดของระบบ	500 kW – 100 MW	500 kW – 100 MW	100 kW-10 MW
ประสิทธิภาพรวมของระบบ	สูงสุด 80 %	55-75 %	50-80 %
Heat to Power Ratio (H/P)	5-20	2-5	1-3
ความร้อนที่ออกจากระบบ	ไอน้ำอุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส	ก๊าซร้อน 450-550 องศาเซลเซียส	น้ำร้อน 50 % ก๊าซร้อนที่ 450 องศาเซลเซียส 50%
เชื้อเพลิง	ก๊าซ ของเหลว ของแข็งขึ้นอยู่กับ Boiler	ก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว	ก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว

ที่มา: United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Evaluation of Industrial Energy Efficiency Project for Financial Institutes, 2015.

1.9.1 ระบบโคเจนเนอเรชันชนิดกังหันไอน้ำ

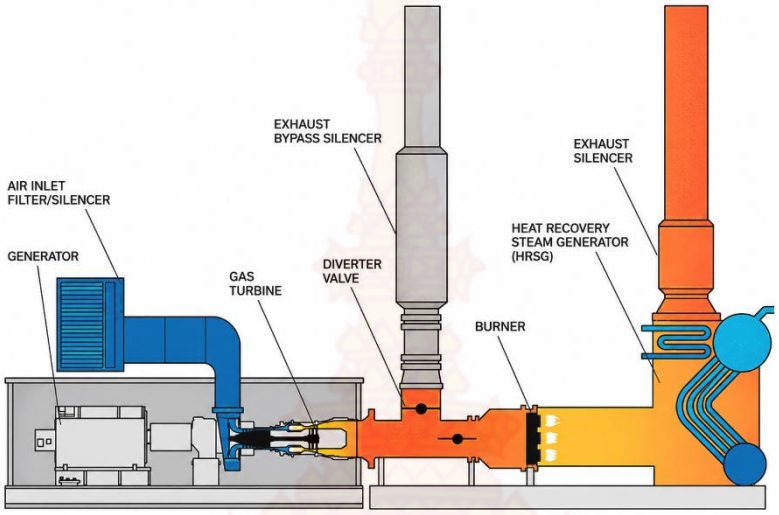
ระบบชนิดนี้ประกอบด้วย หม้อไอน้ำ เครื่องกังหันไอน้ำ โดยใช้เชื้อเพลิงเหลว ก๊าซหรือเชื้อเพลิงแข็ง หลักการทำงานคือ เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำในหม้อไอน้ำ ซึ่งได้ไอน้ำยวดยิ่งที่อุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำจะไปขับเครื่องกังหันไอน้ำได้กำลังงานที่เพลา ซึ่งสามารถนำไปขับเครื่องมือกลต่าง ๆ เช่น ปั๊ม คอมเพรสเซอร์ หรือเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าโดยนำไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่ออกจากเครื่องสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

ระบบโคเจนเนอเรชันชนิดกังหันไอน้ำนี้ หากพิจารณาตามชนิดของเครื่องกังหัน จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ กังหันชนิด back pressure และกังหันชนิด extraction ซึ่งหลักการทำงานแตกต่างกัน ตรงที่กังหันชนิด back pressure ไอน้ำที่ผ่านกังหันไอน้ำจะถูกปล่อยออกจากตัวกังหัน และมีความดันเหลืออยู่ประมาณ 3-20 บาร์ สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไปได้ ส่วนกังหันชนิด extraction ไอน้ำบางส่วนถูกปล่อยออกมาในช่วงกลางของกังหัน และไอน้ำที่ปล่อยออกมานี้จะมีความดันหลายขนาดให้เลือกตามความเหมาะสมกับจุดใดจุดหนึ่งของกระบวนการผลิต ไอน้ำที่เหลือจะถูกปล่อยให้ขยายตัวผ่านกังหัน เพื่อผลิตไฟฟ้าจนมีความดันต่ำแล้วจึงออกจากกังหัน

1.9.2 ระบบโคเจนเนอเรชันชนิดกังหันก๊าซ

มีหลักการทำงานคือ คอมเพรสเซอร์จะอัดอากาศจากภายนอก และนำเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้ามาผสมกับอากาศและจุดระเบิด เกิดก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งจะไปขยายตัวผ่านเครื่องกังหันก๊าซ ทำให้กังหันก๊าซหมุนแกนของเครื่องกังหันก๊าซจะต่อไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนก๊าซร้อนที่ปล่อยจากกังหันก๊าซจะมีอุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส ก๊าซร้อนนี้สามารถนำไปใช้เป็น

แหล่งให้ความร้อน โดยใช้อุปกรณ์เสริม คือ waste heat boiler เพื่อผลิตไอน้ำที่ความดันต่ำ ๆ หรือนำไปใช้ในกระบวนการผลิตโดยตรง



รูปที่ 1.14 ระบบโคเจนเนอเรชันแบบกังหันก๊าซ

ที่มา: U.S. Department of Energy, Combined Heat and Power System: Combustion Gas Turbine.

1.9.3 ระบบโคเจนเนอเรชันชนิด เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน

ระบบนี้สามารถแบ่งได้ตามประเภทเครื่องยนต์เป็น 2 ชนิด คือ เครื่องยนต์ Spark-ignition engine จะใช้เชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง และเครื่องยนต์ Compression-ignition engines จะใช้น้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง พลังงานที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 100 kW ถึง 10 MW พลังงานความร้อนที่ออกมาอยู่ในรูปของก๊าซไอเสีย น้ำหล่อเย็นเสื้อสูบและน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งการนำพลังงานความร้อนไปใช้อาจใช้คู่กับ Waste heat boiler ในการผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อน

1.9.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบโคเจนเนอเรชัน

การใช้งานระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วมนั้นมีทั้งข้อดีที่เป็นประโยชน์ และข้อเสียที่ก่อให้เกิดความยุ่งยากในการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

ข้อดี

1. ประหยัดพลังงาน สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลง โดยการผลิตพลังงานด้วยระบบโคเจนเนอเรชันมีประสิทธิภาพประมาณ 50-90% สามารถประหยัดเชื้อเพลิงลงได้ 10-30% ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบแยกผลิตในการผลิตความร้อนโดยทั่วไป จะมีประสิทธิภาพประมาณ 75% และถ้าเป็นระบบที่ผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว จะมีประสิทธิภาพเพียง 35%
2. เงินลงทุนเริ่มแรกของระบบโคเจนเนอเรชันต่ำกว่าเงินลงทุนในการสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่มาก
3. ระบบโคเจนเนอเรชันช่วยลด peak load ของการไฟฟ้า ทำให้ช่วยลดภาระของการไฟฟ้าในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่

ข้อเสีย

1. ระบบโคเจนเนอเรชันเป็นระบบที่ยุ่งยากซับซ้อนต่อการออกแบบติดตั้งและควบคุม จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์มาดำเนินงาน
2. ต้นทุน ค่าติดตั้งและค่าบำรุงรักษาค่อนข้างสูง
3. ถ้าติดตั้งระบบโคเจนเนอเรชันที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าหรือความร้อนเกินความต้องการใช้ อาจมีไอน้ำหรือไฟฟ้าเหลือ อาจเกิดความยุ่งยากในการจัดการกับพลังงานส่วนเกินนี้

สรุปท้ายบท

บทนี้กล่าวถึงพื้นฐานของ พลังงาน กำลัง และพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานหมายถึงความสามารถในการทำงาน สามารถเปลี่ยนรูปจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งได้แต่ไม่สูญหาย ส่วนกำลังเป็นอัตราการใช้หรือการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อหน่วยเวลา พลังงานไฟฟ้านิยมวัดเป็นวัตต์-ชั่วโมง (Wh) หรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) และการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

พลังงานไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้หลายวิธี ได้แก่ การเสียดสีของวัตถุ ปฏิกิริยาเคมี แม่เหล็กไฟฟ้า แสง และพลังงานความร้อนโดยตรง สำหรับการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้งานจริงจะอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า โดยนำพลังงานจากแหล่งต่าง ๆ มาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ และโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์

ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย ระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย มีการปรับระดับแรงดันด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการส่งกำลังและการใช้งาน ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม หรือโคเจนเนอเรชัน คือระบบที่นำพลังงานความร้อนที่เกิดจากกระบวนการผลิตไฟฟ้ากลับมาใช้ประโยชน์ ทำให้ใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แบ่งเป็นวัฏจักรบนและวัฏจักรล่าง และสามารถใช้กังหันไอน้ำ กังหันก๊าซ หรือเครื่องยนต์เป็นต้นกำลัง การเลือกระบบที่เหมาะสมต้องพิจารณาความต้องการพลังงาน ความร้อน เชื้อเพลิง ต้นทุน และลักษณะการใช้งานของสถานประกอบการ

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1

1. หากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นพลังงานหลักหมดไปจากโลกนี้ ในมุมมองของนักศึกษาคิดว่าจะสร้างพลังงานไฟฟ้าขึ้นใช้งานได้ด้วยวิธีการอย่างไร จงแสดงความคิดเห็นพร้อมเขียนคำอธิบาย
2. พลังงานทดแทนแบบใดที่นักศึกษาคิดว่าน่าจะได้รับการสนับสนุนให้พัฒนาขึ้นใช้งานอย่างจริงจัง และเพราะเหตุใด
3. โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย แบ่งเป็นกี่ส่วน และแต่ละส่วนมีหน่วยงานใดเป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการ
4. ระบบโคเจนเนอเรชันควรติดตั้งใช้งานกับอุตสาหกรรมประเภทใด
5. เพราะเหตุใดเราจึงต้องส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าเข้ามาในชุมชนด้วยแรงดันสูงก่อนลดระดับแรงดันลงเพื่อใช้งาน

2 แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

Electromagnetics and Magnetic Circuit

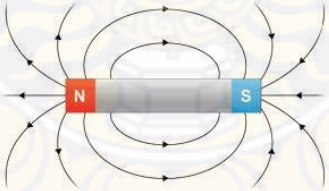
เครื่องจักรกลไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็กซึ่งทำงานร่วมกัน โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรไฟฟ้าที่เป็นขดลวดตัวนำที่ถูกพันเอาไว้ในเครื่องและสนามแม่เหล็กก็จะไหลในวงจรแม่เหล็กซึ่งก็คือแกนเหล็กของเครื่องนั่นเอง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กเป็นพื้นฐานสำคัญของกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเราพิจารณาในแง่ของการถ่ายโอนพลังงาน โดยเราสามารถแบ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าตามลักษณะของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ได้ 3 ประเภทด้วยกัน คือ

- ประเภทเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
- ประเภทเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
- ประเภทถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าโดยทำให้ระดับความต่างศักย์และกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลง

ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในวงจรแม่เหล็กนั้นจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับองค์ประกอบในวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 สนามแม่เหล็ก

จากหลักการเบื้องต้นทางฟิสิกส์พบว่าจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ แท่งแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นการเดินทางของสนามแม่เหล็กและแสดงให้เห็นว่าในสนามแม่เหล็กมีแรงแม่เหล็กคงที่ที่ทุกจุด แรงแม่เหล็กนี้จะเดินทางเป็นเส้นโค้งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ เส้นที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “เส้นแรงแม่เหล็ก” เส้นที่เห็นในรูปที่ 2.1 นี้เป็นเส้นจากจินตนาการแต่เป็นการช่วยให้เข้าใจถึงรูปร่างตามธรรมชาติของสนามแม่เหล็กได้ โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะพุ่งออกจากขั้วเหนือและวกกลับเข้าทางขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กและจะเห็นได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่ข้ามหรือรวมตัวกับเส้นแรงแม่เหล็กเส้นอื่น วิธีที่จะแสดงให้เห็นภาพของเส้นแรงแม่เหล็กในความเป็นจริงได้เป็นอย่างดีก็คือการนำเอาผงตะไบเหล็กมาโรยรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก ผงตะไบเหล็กจะจัดเรียงตัวในรูปลักษณะเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.1 เส้นแรงแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก

ที่มา: ดัดแปลงจาก L. Van Rompaey, “Bar magnet with magnetic field lines,” Wikimedia Commons, 2009.

ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดรอบ ๆ แท่งแม่เหล็ก เรียกว่า “ฟลักซ์แม่เหล็ก” สัญลักษณ์ที่ใช้คือ ϕ มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Wb) การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นอยู่กับรูปร่างและคุณสมบัติของแม่เหล็ก การวัดเส้นแรงแม่เหล็กที่ดีที่สุด ก็คือ การวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) นั่นก็คือการวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งเราสามารถเขียนสูตรได้ ดังนี้

$$B = \frac{\phi}{A} \qquad (2.1)$$

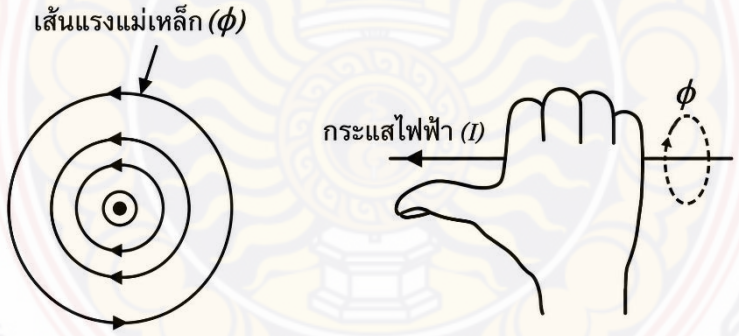
หน่วยของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก คือ เวเบอร์/ตารางเมตร (Wb/m^2) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เทสลา (Tesla)

เมื่อ 1 Wb/m^2 คือ 1 เทสลา

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่มีเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

2.1.1 สนามแม่เหล็กรอบตัวนำกระแสไฟฟ้า

เมื่อตัวนำไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น โดยจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำนั้น สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะมีศูนย์กลางอยู่ที่ตัวนำและจะอ่อนลงเมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากตัวนำ เมื่อกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในตัวนำก็จะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการเกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำกระแสไฟฟ้า ถ้าทิศทางของกระแสพุ่งเข้าไปในกระดาษใช้สัญลักษณ์ $\otimes$ ถ้าทิศทางของกระแสพุ่งออกจากกระดาษใช้สัญลักษณ์ $\odot$ สัญลักษณ์จุดและกากบาทนี้ใช้ลูกศรแทนได้เมื่อมีการกำหนดกระแสให้มีทิศทางไปตามแนวของกระดาษ การกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กอย่างง่ายทำได้โดยอาศัย กฎกำมือขวา (right-hand grip rule) ในการหาความสัมพันธ์ของกระแสและสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ เมื่อเราชูนิ้วหัวแม่มือขวายื่นออกไปแล้วจินตนาการว่าตัวนำจะขนานอยู่กับนิ้วหัวแม่มือและเป็นทิศทางของกระแส นิ้วทั้งสี่ที่กำอยู่จะเป็นทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น

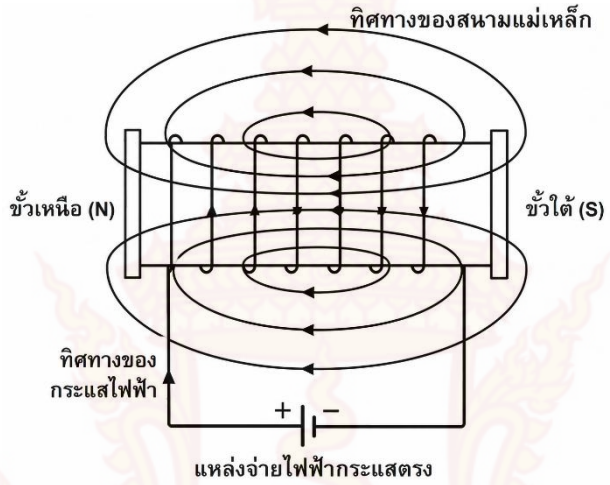


รูปที่ 2.2 ทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบตัวนำกระแสและกฎกำมือขวา

ที่มา: ดัดแปลงจาก N. Watjanatepin, เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง, บทที่ 2 หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.

2.1.2 สนามแม่เหล็กรอบขดลวด

สนามแม่เหล็กรอบ ๆ ขดลวดตัวนำสามารถทำให้เพิ่มความเข้มขึ้นได้ด้วยการนำลวดตัวนำมาพันรวมกันหลาย ๆ รอบ รูปที่ 2.3 คือ ภาพการพันขดลวดตัวนำรอบแท่งทรงกระบอกทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ทิศทางของสนามแม่เหล็ก สามารถอธิบายได้โดยใช้ กฎของแอมแปร์ โดยจินตนาการว่านิ้วมือขวาทั้งสี่ที่กำรอบขดลวดเป็นทิศทางการไหลของกระแส ส่วนนิ้วหัวแม่มือขวาที่ยื่นออกไปเป็นทิศทางของขั้วเหนือ (N)



รูปที่ 2.3 สนามแม่เหล็กรอบขดลวดตัวนำ

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กกับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

2.2.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force)

ความสามารถในการผลิตเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดตัวนำเราเรียกว่า “แรงเคลื่อนแม่เหล็ก” หรือ *MMF* มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A) การหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กสามารถทำได้โดยใช้สมการดังนี้

$$MMF = N \cdot I \qquad (2.2)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแกน

I คือ กระแสที่ไหลในขดลวดมีหน่วยเป็น แอมแปร์-รอบ (At)

ในการพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็กนั้น ต้องนำเอาแรงดันไฟฟ้า (electromotive force; *EMF*) มาพิจารณาด้วยเนื่องจากในวงจรไฟฟ้านั้น *EMF* เป็นตัวทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้านี้ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force; *MMF*) ส่วนในวงจรแม่เหล็กนั้น *MMF* ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลในวงจร

2.2.2 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Field Intensity)

ความเข้มสนามแม่เหล็ก (*H*) คือปริมาณของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (*MMF*) ต่อหน่วยความยาวของทางเดินแม่เหล็ก ดังสมการต่อไปนี้

$$H = \frac{MMF}{l} \qquad (2.3)$$

เมื่อ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น แอมแปร์/เมตร (A/m)

l คือ คือค่าความยาวเฉลี่ยของทางเดินแม่เหล็กซึ่งมีหน่วยเป็น เมตร (m)

2.2.3 ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance)

ความต้านทานแม่เหล็ก ($\Re$) เป็นองค์ประกอบตัวหนึ่งของวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น At/Wb ในวงจรแม่เหล็กนั้นถ้าให้กระแสที่ไหลในขดลวดคงที่แล้ว เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวงจรเป็นผลมาจากค่าความต้านทานแม่เหล็กของวงจร ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่เป็นทางเดินแม่เหล็กเราสามารถจำแนกประเภทของวัสดุได้เป็น 2 ประเภทคือ วัสดุที่เป็นตัวนำแม่เหล็กก็คือโลหะต่าง ๆ เช่น เหล็ก โคบอลต์ อัลลอย นิเกิล เป็นต้น และวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำแม่เหล็ก คือ พวกอโลหะต่าง ๆ เช่น อากาศ ฉนวนไฟฟ้า กระดาษแข็ง ไม้ พลาสติก เป็นต้น เราสามารถหาค่าความต้านทานแม่เหล็ก ได้จากสมการ

$$\Re = \frac{l}{\mu A} \qquad (2.4)$$

เมื่อ l คือ ความยาวเฉลี่ยของทางเดินแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

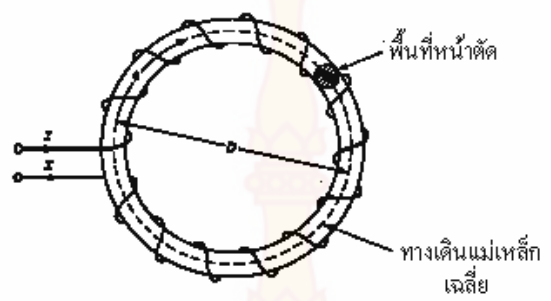
A คือ พื้นที่หน้าตัดที่มีเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

μ คือ ค่าความซึมผ่านแม่เหล็กได้ของวัสดุที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเฮนรี่ต่อเมตร (H/m) และ $\mu = \mu_0\mu_r$

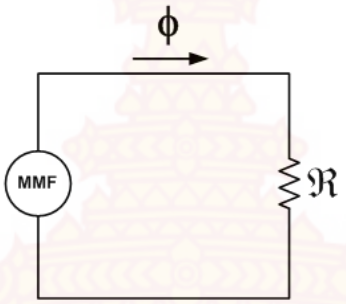
μ_0 คือ ค่าความซึมผ่านแม่เหล็กได้ของอากาศ = $4\pi \times 10^{-7}\ \frac{Wb/m^2}{A/m}$

μ_r คือ ค่าความซึมผ่านแม่เหล็กได้สัมพัทธ์ (มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับอากาศและสุญญากาศ)

ด้วยเหตุนี้ค่าความต้านทานของวงจรแม่เหล็กจึงคล้ายคลึงกับความต้านทานของวงจรไฟฟ้าซึ่งค่าความต้านทานแปรผันตรงกับความยาว l และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด A ดังนั้นสมการ $MMF = \phi.\Re$ จึงเป็นสมการที่มีลักษณะเทียบเคียงกับกฎของโอห์มของวงจรแม่เหล็ก ในรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างวงจรแม่เหล็ก และรูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลของวงจรแม่เหล็ก ในรูปที่ 2.4 สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากคุณสมบัติของวัสดุ ความยาว และพื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก ค่าความต้านทานแม่เหล็กจะมีค่าแปรผกผันกับค่า μ ของวัสดุซึ่งค่า μ ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน วัสดุที่ไม่เป็นตัวนำแม่เหล็กจะมีค่า $\Re$ สูงมากในขณะที่วัสดุที่เป็นตัวนำแม่เหล็กจะมีค่า μ มากแต่มีค่า $\Re$ น้อย



รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กที่ใช้แกนแบบเทอรอยด์



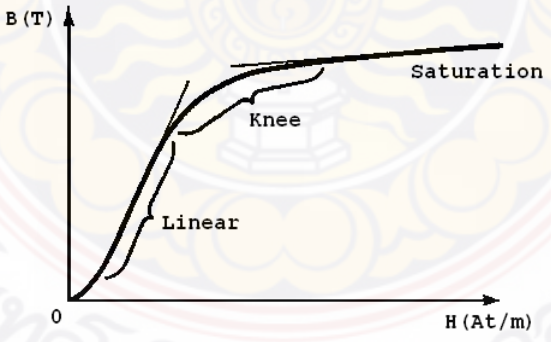
รูปที่ 2.5 วงจรแม่เหล็กสมมูลของรูป 2.4

2.2.4 ค่าความซึมผ่านแม่เหล็ก

วัสดุที่ไม่เป็นตัวนำแม่เหล็กจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสในขดลวดเป็นเส้นตรง ซึ่งเรียกว่าค่าคงที่ของความซึมผ่านแม่เหล็ก ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำแม่เหล็กนั้นจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่เป็นเชิงเส้น เหล็กบริสุทธิ์จะมีค่า B_{max} อิ่มตัวที่ประมาณ 2 เทสลา เส้นโค้งความอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็กในรูป 2.6 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่า B กับค่า H ได้ดังนี้

$$B = \mu H = \mu_o \mu_r H \qquad (2.5)$$

เมื่อ μ_r คือ ค่าความซึมผ่านแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ

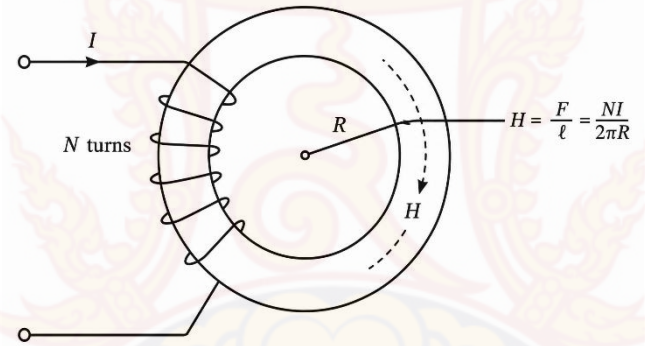


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่า *B-H* ในสารแม่เหล็ก

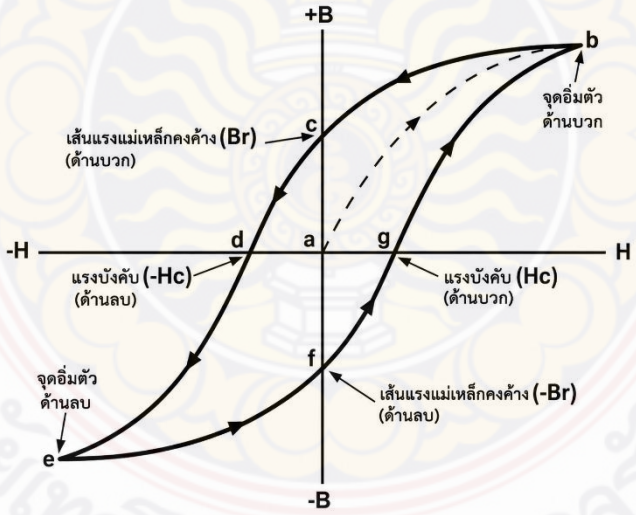
2.2.5 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

จากรูปที่ 2.7 ถ้าเราเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (*H*) ขึ้น โดยการปรับกระแส (*I*) ให้เพิ่มขึ้น สภาพความเป็นแม่เหล็กของแกนก็จะเพิ่มขึ้น จากกราฟรูปที่ 2.8 สภาพความเป็นแม่เหล็กเริ่มต้นจากจุดกำเนิด (จุด a) แล้วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเส้นประจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวด้านบวก (จุด b) ถ้ากระแส (*I*) ที่ไหลในขดลวดรูปที่ 2.7 ลดลงจะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กลดลงด้วย เส้นกราฟที่ลดลงนี้จะไม่ซ้ำในแนวเดิม และเมื่อ *H* ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ (*I=0)* จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (B_r) จะไม่ลดลงเป็น 0 เพราะจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Residual Flux) ในแกนเหล็กที่มีขนาดเป็น B_r ซึ่งปริมาณของ B_r นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ผลที่ได้ก็คือเราสามารถสร้างแม่เหล็กถาวรขึ้นได้

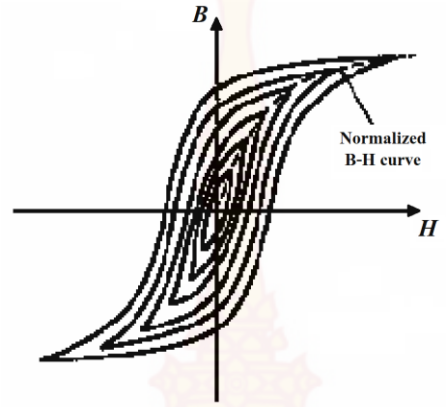
การลดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก *(B)* ลงให้เป็นศูนย์นั้นจะต้องทำให้ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น $-H_c$ โดยการกลับทิศทางของ H ด้วยการกลับทิศทางของกระแสในขดลวด ถ้าป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้ขดลวดจะได้วงรอบฮิสเทอรีซิส ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างแกนเหล็กที่ใช้ในการหาค่า *B-H*



รูปที่ 2.8 วงรอบฮิสเทอรีซิสของแกนแบบเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic)



รูปที่ 2.9 แผนภาพ *B-H* แบบปกติ

พื้นที่ของวงรอบฮิสเทอรีซิส คือ พลังงานที่สูญเสียในรูปของความร้อนต่อวงรอบ ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแผ่กระจายออกไปในวัสดุ ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบเป็นแกนเหล็กและขดลวดทองแดงจึงเกิดความร้อนขึ้นขณะใช้งานนั่นเอง

2.3 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิส

เมื่อเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส จะทำให้เกิดการความร้อนกระจายไปในวัสดุทำให้เกิดค่าความสูญเสียขึ้นในแกนเหล็ก จากรูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ก็คือ การเปลี่ยนแปลงค่า *H* จาก 0 ถึง *H* ซึ่งต้องการพลังงานที่จะทำให้กระแสในขดลวดเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้ความเป็นแม่เหล็กของแกนเหล็กเพิ่มขึ้น จำนวนพลังงานส่วนนี้สามารถอธิบายได้จากพื้นที่ระหว่างเส้นกราฟ *B-H* กับแกน *B* เมื่อลดค่า *H* ลงให้กลับเป็นศูนย์ อีกครั้งพลังงานจำนวนหนึ่งจะไหลกลับไปสู่แหล่งจ่าย ซึ่งสามารถดูได้จากพื้นที่ระหว่าง *B-H* กับแกน B ในรูปที่ 2.12 (ข) ถ้าทำการเปรียบเทียบขนาดของพื้นที่ทั้งสอง พลังงานสุทธิที่เกิดขึ้นจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของพื้นที่ในวงรอบฮิสเทอรีซิส วัฏจักรของแม่เหล็กที่สมบูรณ์จะต้องใช้พลังงาน ดังที่แสดงในกราฟแบบครบทั้งวงรอบ ในวัสดุตัวนำแม่เหล็กที่ใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า พื้นที่ของวงรอบฮิสเทอรีซิส ก็คือ ส่วนของกำลังที่สูญเสียไปในวัสดุนั่นเอง เราสามารถคำนวณหาพลังงานที่สูญเสียไปจากวงรอบฮิสเทอรีซิส ได้จากสมการ

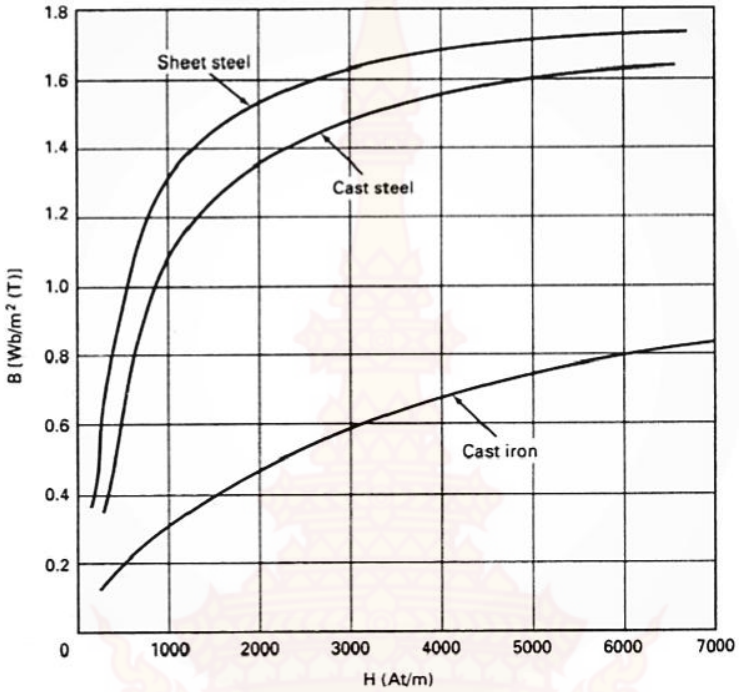
$$P_h = k_h \cdot V \cdot f \cdot B_{\max}^{n} \qquad \text{(W)} \qquad (2.6)$$

เมื่อ k_h คือ ค่าคงที่ Hysteresis

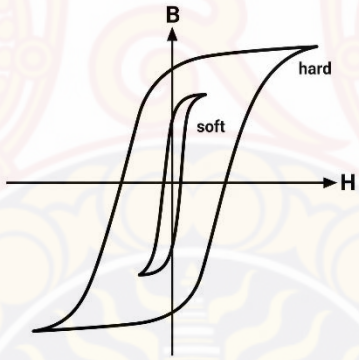
n คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 1.5-2.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้

f คือ= ความถี่ของแหล่งจ่าย

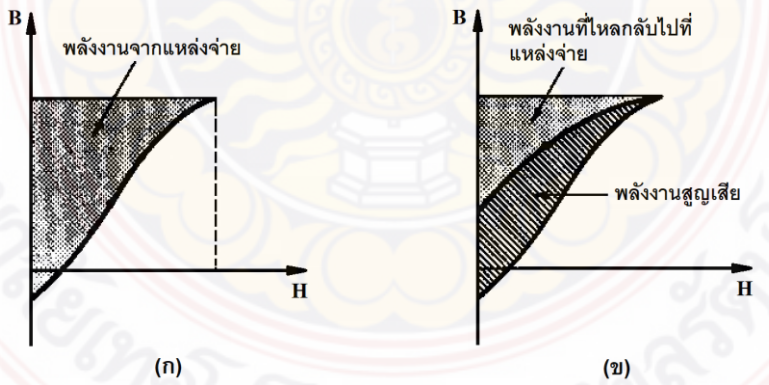
B_{max} คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด



รูปที่ 2.10 กราฟความเป็นแม่เหล็กของวัสดุที่เป็นตัวนำแม่เหล็ก



รูปที่ 2.11 กราฟ *B-H* ของวัสดุแม่เหล็กแบบอ่อนและแข็ง



รูปที่ 2.12 ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส

2.3.1 ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss)

นอกจากความสูญเสียจากวงรอบฮิสเทอรีซิสแล้ว ยังมีความสูญเสียที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เราเรียกว่าความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss) เนื่องจากเหล็กเป็นตัวนำไฟฟ้าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อน (EMF) และกระแสในมวลของเหล็ก ทำให้เกิดกระแสไหลวน ความสัมพันธ์ของกระแสไหลวนกับค่าความต้านทานในแกนเหล็กจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในรูปของความร้อน ในทางการค้าเราใช้เหล็กแผ่นลามิเนต (laminate) บาง ๆ ในการสร้างแกนเหล็กทำให้ลดกระแสไหลวนลงได้

การวางตัวของแผ่นเหล็กแผ่นลามิเนตที่ใช้ทำแกนนั้นจะอยู่ในระนาบที่ขนานกับเส้นแรงแม่เหล็กทำให้ทางเดินของกระแสไหลวนถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ทำให้เกิดความต้านทานสูง แผ่นเหล็กที่ใช้จะเป็นฉนวนเนื่องจากใช้กระดาษบางๆ รองระหว่างแผ่นเหล็กหรือเคลือบด้วยวานิช (Varnish) โดยทั่วไปแล้วเหล็กยิ่งบางจะยิ่งทำให้เกิดค่าความสูญเสียต่ำ สมการความสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก คือ

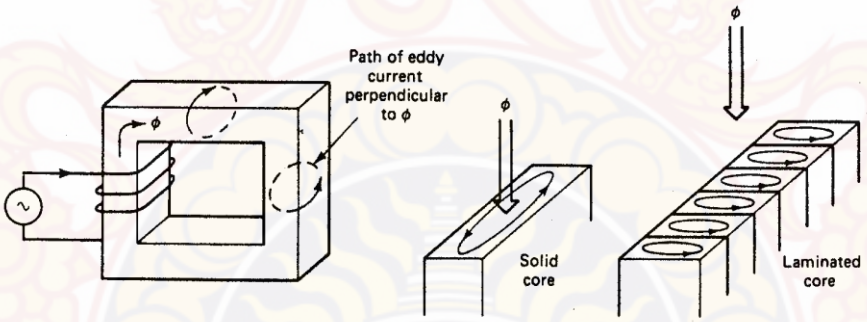
$$P_e = k_e(B_{\max} \cdot t \cdot f)^2 \qquad (\text{W/m}^3) \qquad (2.7)$$

เมื่อ k_e คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

B_{max} คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

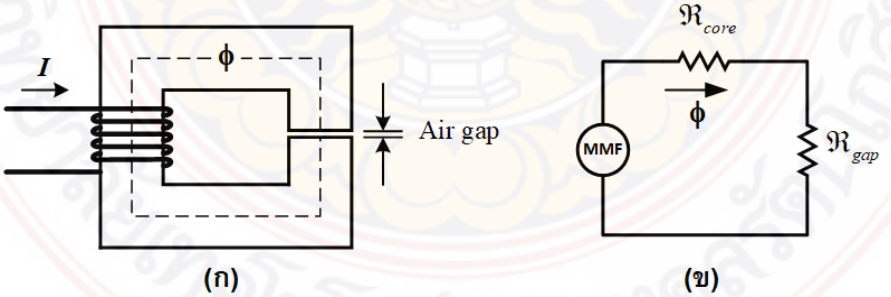
f คือ ความถี่ของแหล่งจ่าย

t คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก



รูปที่ 2.13 การใช้เหล็กแผ่นลามิเนตทำแกนจะทำให้ลดกระแสไหลวนในแกนเหล็กลงได้

2.4 การคำนวณวงจรแม่เหล็ก



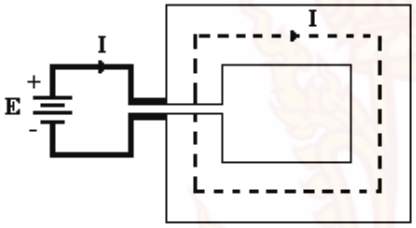
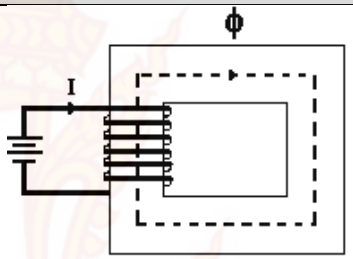
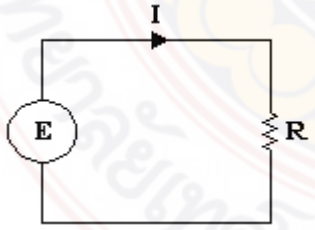
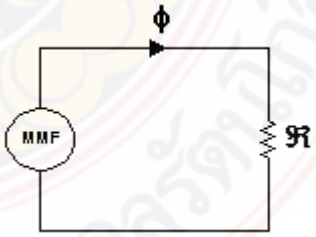
รูปที่ 2.14 วงจรแม่เหล็กและวงจรสมมูล

รูปที่ 2.14 เป็นรูปของวงจรแม่เหล็กซึ่งประกอบด้วย แกนเหล็กรูปสี่เหลี่ยมทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก และแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ซึ่งเป็นตัวผลิตเส้นแรงแม่เหล็กให้เดินทางไปในแกนเหล็ก ที่แกนเหล็กมีช่องว่าง (Air gap) มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับขนาดของแกนเหล็ก วงจรแม่เหล็กรูป 2.14 (ก) เขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูล รูปที่ 2.14 (ข) โดยรูปที่ 2.14 (ข) ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานแม่เหล็ก 2 ตัว คือ $\mathcal{R}_{core}$ และ $\mathcal{R}_{gap}$ เมื่อ

$\mathcal{R}_{core}$ คือ ความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็ก

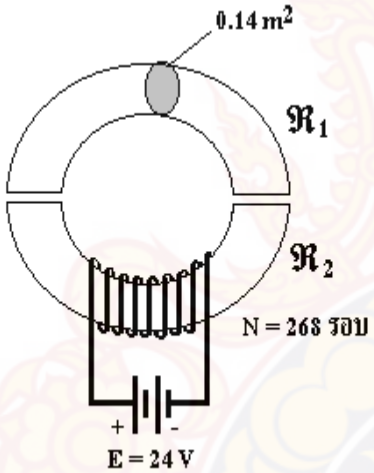
$\mathcal{R}_{gap}$ คือ ความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ (Air gap)

เราสามารถเปรียบเทียบการคำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ในวงจรแม่เหล็กกับปริมาณต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้าได้ดังนี้

วงจรไฟฟ้า	วงจรแม่เหล็ก
 1 ทองแดงรูปสี่เหลี่ยมปลายเปิดต่ออยู่กับแบตเตอรี่ เกิดกระแส I ไหลในทองแดงรูปสี่เหลี่ยมนี้	 แกนเหล็กรูปสี่เหลี่ยมพันด้วยขดลวดตัวนำ N รอบ มีกระแสไหลในขดลวดตัวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMF) ขึ้นและทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไหลในแกนเหล็กนี้
แรงดันไฟฟ้าของวงจร คือ E	แรงเคลื่อนแม่เหล็กของวงจร คือ MMF
ผลตอบสนอง $I = \frac{E}{R}$	ผลตอบสนอง $\phi = \frac{MMF}{\Re}$
ความต้านทาน $R = \rho\frac{l}{A}$	ความต้านทาน $\Re = \frac{l}{\mu A}$
วงจรสมมูล 	วงจรสมมูล 

วงจรไฟฟ้า	วงจรแม่เหล็ก
ความเข้มสนามไฟฟ้า $\varepsilon = \frac{E}{l}$	ความเข้มสนามแม่เหล็ก $H = \frac{MMF}{l}$
ความต่างศักย์ไฟฟ้า $V = I \cdot R$	ความต่างศักย์แม่เหล็ก $U = \phi \cdot \Re$
ความหนาแน่นกระแส $J = \frac{I}{A} = \frac{\varepsilon}{\rho}$	ความหนาแน่นของเส้นแรง $B = \frac{\phi}{A} = \mu H$

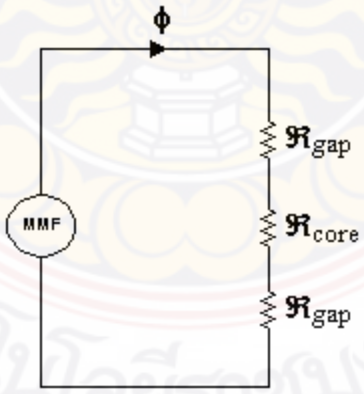
ตัวอย่างที่ 2.1 วงจรแม่เหล็กดังรูป ประกอบไปด้วยแกนเหล็ก 2 ชนิดต่อกันเป็นรูปวงแหวน มีความกว้างของช่องว่างอากาศ (Air gap) เท่ากับ 0.12 cm พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ 0.14 m^2 มีค่าความต้านทานแม่เหล็กของแกนเหล็กส่วนแรก ($\Re_1$) เท่ากับ 650 A-t/Wb ค่าความต้านทานของแกนเหล็กส่วนที่สอง ($\Re_2$) เท่ากับ 244 A-t/Wb ความต้านทานคอยล์ เท่ากับ 5.2 Ω จงหาค่าต่อไปนี้



1. ความต้านทานแม่เหล็กรวมทั้งวงจร
2. เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นในวงจร
3. ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กใน Air gap
4. แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตกคร่อม (drop) ที่ช่องว่างอากาศ (Air gap)

วิธีทำ

1) หาความต้านทานแม่เหล็กรวมของทั้งวงจร



$$\Re_{core} = \frac{l_c}{\mu_o \mu_r A_c} = \Re_1 + \Re_2$$
$$\Re_{core} = 650 + 244 = 894 \quad \text{At/Wb}$$
$$\Re_{gap} = \frac{l_a}{\mu_o A_a} = \frac{0.0012}{4\pi \times 10^{-7} \times 0.14} = 6,821.13 \quad \text{At/Wb}$$
$$\Re_{eq} = \Re_{gap1} + \Re_{core} + \Re_{gap2} = 6,821.13 + 894 + 6,821.13$$
$$= 14,536.26 \quad \text{At/Wb}$$

2) หาเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นในวงจร

$$MMF = N \cdot I = \phi \cdot \Re$$
$$I = \frac{E}{R} = \frac{24}{5.2} = 4.62 \quad \text{A}$$
$$\phi = \frac{N \cdot I}{\Re} = \frac{268 \times 4.62}{14,536.26} = 0.085 \quad \text{Wb}$$

3) หาความหนาแน่นของเส้นแรงใน Air gap

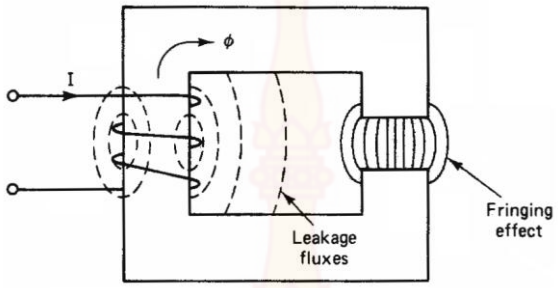
$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.085}{0.14} = 0.607 \quad \text{Wb/m}^2$$

4) หาแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ drop ใน Air gap

$$MMF = \phi \cdot \Re_{gap} = 0.085 \times (6,821.13 \times 2) = 1,159.59 \quad \text{A}$$

2.4.1 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล และผลของสนามแม่เหล็กบริเวณขอบ (Leakage Flux and Fringing Effect)

ในวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างของอากาศนั้นจะเกิดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กจากทางเดินแม่เหล็กหรือเกิดการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างของอากาศรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึง 2 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลออกมาทำให้เส้นแรงที่ผลิตขึ้นจากขดลวดตัวนำลดลงไป ซึ่งสามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นอีก การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กออกไปในช่องว่างของอากาศ เราเรียกว่า Fringing Effect เป็นปรากฏการณ์ที่โดยทั่วไปไม่เป็นผลดีต่อการออกแบบวงจรแม่เหล็ก เพราะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายออกไปทำให้เกิดพื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างของอากาศลดลง การออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องออกแบบให้มีการลดการสูญเสียของวงจรมากที่สุด ซึ่งเป็นที่มาว่าทำไมในมอเตอร์จึงมีช่องว่างของแผ่นเหล็กน้อยมาก



รูปที่ 2.15 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลและ Fringing effect ในช่องว่างของอากาศ

2.5 แรงแม่เหล็ก

พิจารณารูป 2.16 ประกอบไปด้วยแกนเหล็กที่อยู่กับที่มีขดลวดตัวนำพันอยู่และแกนเหล็กที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งเรียกว่า "อาร์เมเจอร์" สมมติให้แกนเหล็กทั้งคู่มีพื้นที่หน้าตัด A ตารางเมตรเท่ากัน มีระยะห่างเท่ากับ l เมตร ถ้ามีกระแสไหลในขดลวดทำให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B ในช่องว่างของอากาศ เราสามารถเขียนสมการของแรงที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเหล็กทั้งสองได้ดังนี้

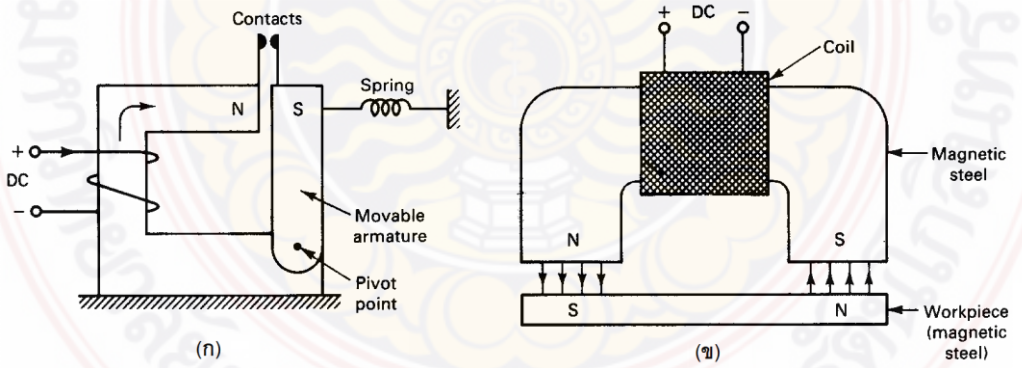
$$F_M = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_o} \qquad (2.8)$$

เมื่อ

F_M คือ แรงที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเหล็ก มีหน่วยเป็น นิวตัน (Newton)

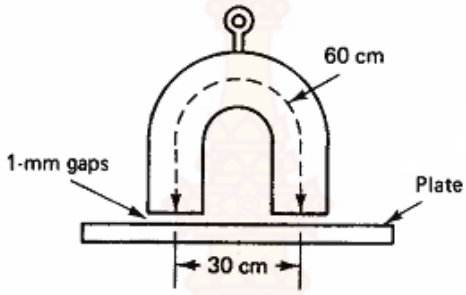
แรงที่เกิดขึ้นนี้จะดึงอาร์เมเจอร์ให้เคลื่อนที่เข้ามาหาแกนเหล็กที่อยู่กับที่ แรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้ เช่น การใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในการยกแผ่นเหล็กขนาดใหญ่ การดูดเศษเหล็กชิ้นเล็กๆ การแยกธาตุเหล็กออกจากสินแร่ รีเลย์ และคอนแทคเตอร์

สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดูดขึ้นนั้นเนื่องจากขั้วแม่เหล็กแต่ละข้างของช่องว่างของอากาศเป็นขั้วตรงข้ามกัน ซึ่งแรงแม่เหล็กนี้จะพยายามดูดเพื่อปิดช่องว่างของอากาศ ซึ่งเป็นเป็นเหตุผลว่าทำไมรีเลย์ในรูปที่ 2.16 (ก) จึงปิดและแม่เหล็กไฟฟ้าในรูป 2.16 (ข) จึงสามารถยกแผ่นเหล็กได้



รูปที่ 2.16 (ก) รีเลย์ (ข) แม่เหล็กไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ 2.2 แม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปมีพื้นที่หน้าตัดของผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 200 cm^2 มีทางเดินแม่เหล็กยาว 60 cm ทำจากเหล็ก Cast steel ขั้วทั้งสองห่างกัน 30 cm จงหากระแสที่ไหลในคอยล์ที่ทำให้แม่เหล็กไฟฟ้าสามารถยกแผ่นเหล็ก Cast iron ขนาด 600 ปอนด์ ให้ได้ระยะห่าง 1 mm จากขั้วแม่เหล็ก



วิธีทำ แรงที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 600 ×4.45 = 2670 N (1 ปอนด์ เท่ากับ 4.45 นิวตัน)

ขั้วแม่เหล็กมี 2 ขั้ว เพราะฉะนั้นแรงที่เกิดขึ้นทั้งหมด คือ

$$F = 2\frac{B^2A}{2\mu_o} = \frac{B^2A}{\mu_o}$$

$$B^2 = \frac{F\mu_o}{A} = \frac{2,670\times 4\pi\times 10^{-7}}{200\times 10^{-4}} = 0.168$$

$$B = 0.41 \quad T$$

ใช้ข้อมูลของเหล็กจากกราฟรูปที่ 2.10 (หน้า 20)

$$NI = H_{cs}l_{cs} + 2H_gl_g + H_{ci}l_{ci}$$

$$NI = (350\times 0.6) + (2\frac{0.41\times 1\times 10^{-3}}{4\pi\times 10^{-7}}) + (1,600\times 0.3)$$

$$NI = 210 + 653 + 480 = 1,343 \text{ At}$$

สมมติให้มีจำนวนขดลวดตัวนำ 500 รอบ

$$I = \frac{1,343}{500} = 2.686 \text{ A}$$

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึงพื้นฐานของ แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก ซึ่งเป็นหลักสำคัญของการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำหรือขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ด้วยกฎมือขวา

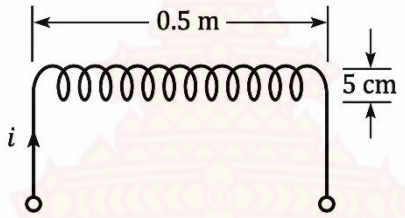
ปริมาณสำคัญในวงจรแม่เหล็กประกอบด้วย ฟลักซ์แม่เหล็ก ความหนาแน่นฟลักซ์ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็ก ความซึมผ่านแม่เหล็ก และความต้านทานแม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับปริมาณในวงจรไฟฟ้า และสามารถนำมาใช้วิเคราะห์และคำนวณวงจรแม่เหล็ก รวมถึงวงจรที่มีช่องว่างอากาศ การรั่วไหลของฟลักซ์ และผลของสนามแม่เหล็กบริเวณขอบ

นอกจากนี้ คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง B-H และวงรอบฮิสเทอรีซิส ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยความสูญเสียหลักประกอบด้วย ความสูญเสียฮิสเทอรี

ซิสและความสูญเสียจากกระแสไหลวน ทั้งสองส่วนก่อให้เกิดความร้อนและลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้า การใช้แกนเหล็กแผ่นบางแบบลามิเนตจึงช่วยลดกระแสไหลวนและความสูญเสียในแกนเหล็กได้

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2

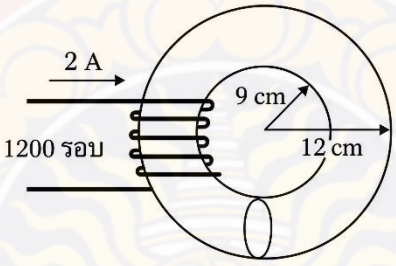
1. ขดลวดทองแดงแกนอากาศ ดังรูป มีจำนวนรอบเท่ากับ 250 รอบ มีกระแสไหลในขดลวด 100 A ดังรูป ถ้าความยาวของขดลวดมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลาง มีเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดสม่ำเสมอ และไม่คิดผลของสนามแม่เหล็กภายนอก จงหา



ก) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Field Intensity; H) (ตอบ 50,000 A/m)

ข) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด (Flux density; B) (ตอบ 50,000 Wb/m^2)

2. เหล็กกลมรูปวงแหวน ดังรูป มีค่าความต้านทานแม่เหล็ก 5 x 10^6 At/Wb มีขดลวดตัวนำพันอยู่ 1,200 รอบ วัดระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบนอกสุดเท่ากับ 12 cm จากจุดศูนย์กลางถึงขอบในสุดได้ 9 cm จงคำนวณหาค่าต่อไปนี้



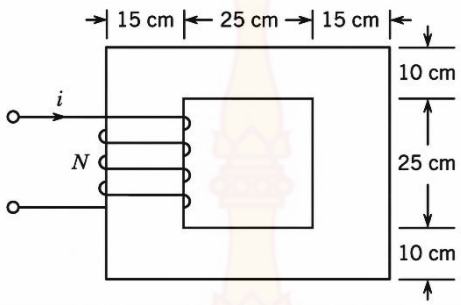
ก) แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMF) (ตอบ 2,400 A)

ข) ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) (ตอบ 0.66 A/m)

ค) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (ϕ) (ตอบ 0.48 x 10^{-3} Wb)

ง) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) (ตอบ 0.4 Wb/m^2)

3. วงจรแม่เหล็กดังรูปมีค่าความซึมผ่านแม่เหล็กสัมพัทธ์ของแกนเหล็กเท่ากับ 2,000 แกนเหล็กหนา 10 cm จำนวนรอบของขดลวดตัวนำที่พันอยู่เท่ากับ 300 รอบ กระแสไหลในขดลวดตัวนำ 1 A จงหา

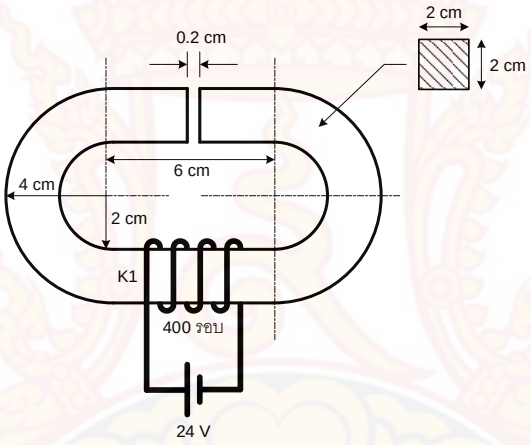


ก) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (ตอบ 0.503 Wb/m^2)

ข) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (ตอบ 6.25 x 10^{-3} Wb)

ค) กระแสที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กเท่ากับ 0.012 Wb (ตอบ 1.91 A)

4. วงจรแม่เหล็กดังรูป แกนเหล็กมีความหนา 2 cm กว้าง 2 cm Air gap กว้าง 0.2 cm มีค่าความซึมผ่านแม่เหล็กได้สัมพัทธ์ (μr) เท่ากับ 4,000 ความต้านทานของขดลวดเท่ากับ 4 Ω จงหา



ก) ความยาวของทางเดินแม่เหล็กในหน่วยเมตร (ตอบ 0.37 m)

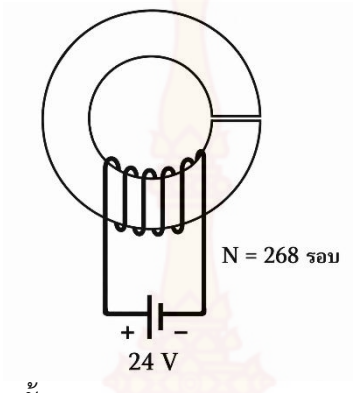
ข) ค่าความต้านทานของแกนเหล็กและความต้านทานของ Air gap (ตอบ 184,116.24 At/Wb, 3,980,891.72 At/Wb)

ค) แรงเคลื่อนแม่เหล็กและเส้นแรงแม่เหล็ก (ตอบ 2,400 A)

ง) เส้นแรงแม่เหล็กในวงจร (ตอบ 0.5762x10^{-3} Wb)

จ) ความเข้มของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (ตอบ 6,486.49 A/m)

5. วงจรแม่เหล็กดังรูปมีความกว้างของ Air gap เท่ากับ 0.12 cm พื้นที่หน้าตัดของแกนเท่ากับ 0.14 m^2 มีค่าความซึมผ่านแม่เหล็กสัมพัทธ์ของแกนเหล็กเท่ากับ 4000 แกนเหล็กมีทางเดินแม่เหล็กยาว 50 cm ความต้านทานของคอยล์เท่ากับ 5.2 Ω จงหา



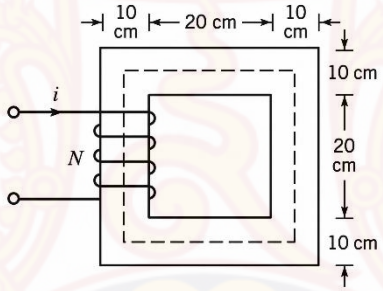
ก) ค่าความต้านทานแม่เหล็กรวมทั้งวงจร (ตอบ 1396.73 At/Wb)

ข) แรงแม่ดันเหล็กในวงจร (ตอบ 1,608 A)

ค) เส้นแรงแม่เหล็กใน Air gap (ตอบ 1.15 Wb)

ง) แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMF) ที่ Drop ใน Air gap (ตอบ 784.81 A)

6. วงจรแม่เหล็กดังรูป มีค่าความซึมผ่านแม่เหล็กได้สัมพัทธ์เท่ากับ 2,000 แกนเหล็กหนา 5 cm มีขดลวดตัวนำพันอยู่ 400 รอบ กระแสไหลในขดลวด 1.5 A จงหา

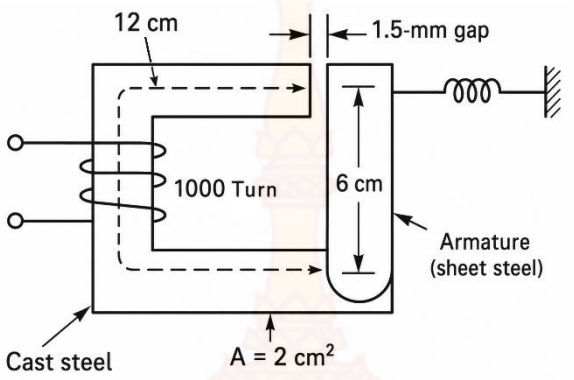


ก) เขียนวงจรสมมูลของวงจรแม่เหล็กนี้

ข) เส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก (ตอบ 600 AT, 1.257 Wb/m^2)

ค) ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (ตอบ 1.675 H)

7. รีเลย์ดังรูป มีแกนเหล็กทำด้วยเหล็ก cast steel ส่วนที่เคลื่อนที่ได้ทำจากเหล็ก sheet steel ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็ก 0.8 Tesla ใน Air gap ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นและทำให้ส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ จงหา



ก) กระแสที่ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในส่วนที่เคลื่อนที่ (ตอบ 1.10 A)

ข) แรงที่เกิดขึ้นในส่วนที่เคลื่อนที่ (ตอบ 50.9 N)

3 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

The Principle of Transformers

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้า มีหลายชนิด และหลายขนาด หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังบางเครื่องอาจมีขนาดใหญ่เท่าบ้านมีน้ำหนักเป็นร้อยตัน แต่ในทางกลับกันหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์บางเครื่องอาจมีขนาดเล็กเท่ากับน้ำตาลก้อนเท่านั้น โดยปกติแล้วหน้าที่ของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

- ใช้เปลี่ยนค่าแรงดันและกระแสในระบบไฟฟ้า เช่น ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จะต้องเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อส่งเข้าระบบสายส่ง และใช้หม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้าลงเมื่อส่งเข้าระบบจำหน่าย ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีระดับแรงดันใช้งานที่ต่างกันไป
- ใช้ทำให้อิมพีแดนซ์ของโหลดและสายส่งมีค่าเท่ากันในวงจรสื่อสาร
- ทำหน้าที่แยกวงจรไฟฟ้า กันสัญญาณไฟตรง กำจัดการรบกวนของแม่เหล็กไฟฟ้าและให้ความปลอดภัยในเครื่องใช้ไฟฟ้า

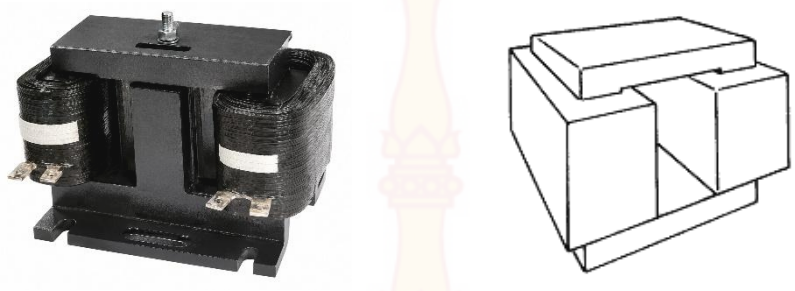
เราเรียกหม้อแปลงที่ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าต่ำเป็นแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นว่า หม้อแปลงแบบแปลงขึ้น (step-up transformer) และเรียกหม้อแปลงที่ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าสูงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำลงว่า หม้อแปลงแบบแปลงลง (step-down transformer)

3.1 โครงสร้างของหม้อแปลง

โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นประกอบด้วยขดลวดและแกนเหล็กเป็นอุปกรณ์หลัก ลวดตัวนำที่ใช้พันเป็นขดลวดของหม้อแปลงนั้นจะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้า ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกเรียกว่าขดลวดปฐมภูมิ (Primary) คือ ขดลวดชุดที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟ อีกชุดหนึ่งเรียกว่าขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) คือ ขดลวดชุดที่ต่ออยู่กับโหลด ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมินั้นจะไม่มีการต่อถึงกันทางไฟฟ้าแต่จะพันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกันโดยแกนเหล็กนี้จะทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดปฐมภูมิให้มาเหนี่ยวนำขดลวดทุติยภูมิ แกนเหล็กที่ใช้ในหม้อแปลงมี 2 แบบ คือ

3.1.1 แกนเหล็กแบบคอร์ (core type)

แกนเหล็กแบบนี้มีวงจรแม่เหล็กวงจรเดียว ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิพันอยู่แยกกันคนละด้าน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หม้อแปลงที่ใช้แกนเหล็กแบบคอร์ (core type)

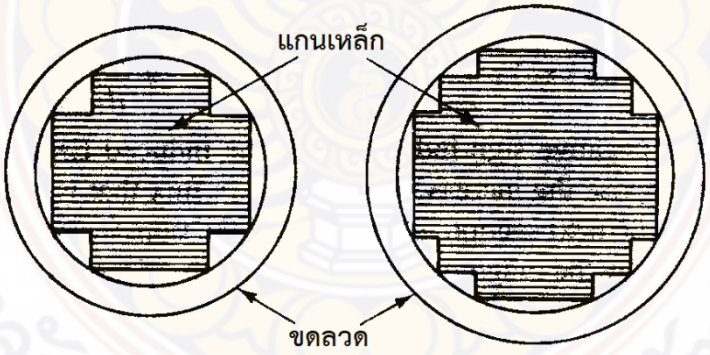
3.1.2 แกนเหล็กแบบเชลล์ (shell type)

แกนเหล็กแบบนี้จะมีวงจรแม่เหล็ก 2 วงจร ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะพันทับกันและวางอยู่บนแกนเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หม้อแปลงที่ใช้แกนเหล็กแบบเชลล์ (shell type)

แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะใช้เหล็กลามิเนตแผ่นบาง ๆ เรียงซ้อนกันให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ โดยแกนเหล็กจะถูกตัดแบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามลักษณะรูปร่างของแกน เนื่องจากขดลวดของหม้อแปลงถูกพันในลักษณะเป็นวงกลม ในการจัดวางแกนเหล็กนั้นจึงจำเป็นต้องจัดวางให้มีขนาดที่ลดหลั่นกันลงไปในแต่ละชั้น ดังรูปที่ 3.3 ทั้งนี้เพื่อลดช่องว่างของอากาศที่เกิดขึ้น

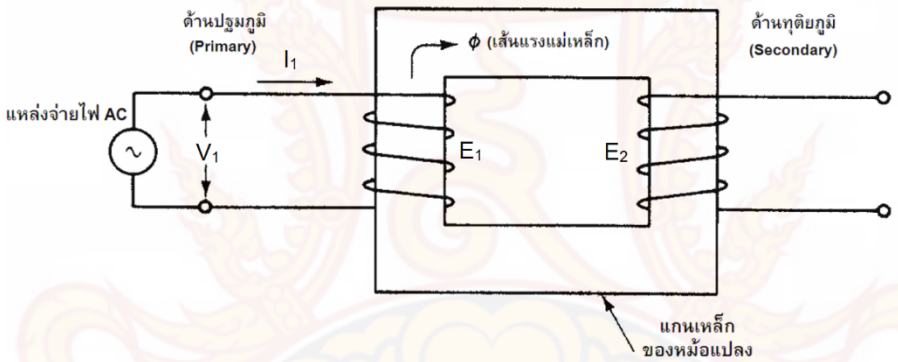


รูปที่ 3.3 การวางแกนเหล็กเป็นลำดับขั้นเพื่อลดช่องว่างของอากาศ

ขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงจะพันด้วยลวดทองแดงที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนรอบมาก ส่วนทางด้านแรงต่ำจะพันด้วยขดลวดที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนรอบน้อย

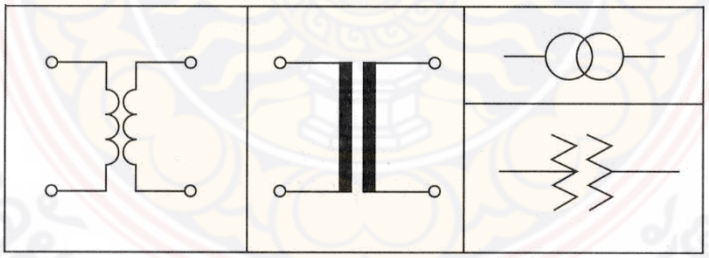
3.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า ประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด คือ ขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) กับขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) ที่พันอยู่บนแกนเหล็กแกนเดียวกัน เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_1 ที่ขดลวดปฐมภูมิ และทางขดลวดทุติยภูมิเปิดวงจรอยู่ ดังรูปที่ 3.4 ในขณะนี้ยังไม่มีการถ่ายเทพลังงาน จะเกิดจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ E_1 ขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิ และเกิดกระแส I_1 ไหลในขดลวด กระแส I_1 ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเดินทางไปในแกนเหล็ก ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นรูปคลื่นไซน์ (sine wave) และเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่ เดินทางตัดผ่านขดลวดทุติยภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_2 ขึ้นในขดทุติยภูมิ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's law of induction)



รูปที่ 3.4 หม้อแปลงแบบมีขดลวด 2 ชุด

กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ เป็นกฎพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำนายว่าสนามแม่เหล็กจะมีอันตกิริยากับวงจรไฟฟ้าเพื่อผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นหลักการทำงานพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าอีกหลายชนิด รูปที่ 3.5 แสดงสัญลักษณ์แบบต่าง ๆ ของหม้อแปลงที่เขียนในวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 สัญลักษณ์แบบต่าง ๆ ของหม้อแปลง

3.2.1 อัตราส่วนของหม้อแปลง (transformer ratio; *a*)

อัตราส่วนของหม้อแปลง (Transformer ratio) คือ อัตราส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ของ แรงดันกระแส และจำนวนรอบของขดลวด ระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าว คือ

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (3.1)$$

เมื่อ a คือ อัตราส่วนของหม้อแปลง

E_1 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

E_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ

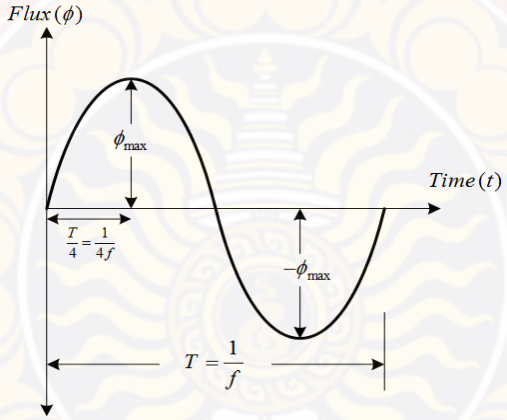
N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ

I_1 คือ กระแสทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

I_2 คือ กระแสทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

3.2.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced emf)

พิจารณาจากรูปที่ 3.6 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงก็จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เป็นรูปคลื่นไซน์ (sine wave) ในลักษณะเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับ และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง ค่าสูงสุด (ϕ_{max}) ในช่วงเวลา $\frac{1}{4}$ ของรูปคลื่น หรือ $\frac{T}{4}$ หรือ $\frac{1}{4 \cdot f}$ นั่นเอง



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

ดังนั้น เส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลง $= \frac{\phi_{\max}}{\frac{1}{4 \cdot f}} = 4 \cdot f \cdot \phi_{\max}$ Wb/sec หรือ โวลต์

หรือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฉลี่ย (E_{av}) $= 4 \cdot f \cdot \phi_{\max}$ โวลต์

แต่เนื่องจากค่าของเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นไซน์ ดังนั้น ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจึงต้องคูณด้วยค่าฟอร์มแฟคเตอร์ (form factor) ซึ่งสามารถหาได้จาก ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วัดได้ซึ่งเป็นค่าประสิทธิผล (E_{rms}) หารด้วยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฉลี่ย (E_{av})

$$\text{Form Factor} = \frac{E_{rms}}{E_{av}} = \frac{0.707}{0.636} = 1.11 \qquad (3.2)$$

ซึ่งสมการที่ 3.2 สามารถหาได้ ดังต่อไปนี้

$$E_{rms} = 0.707 \cdot E_m$$
$$E_{av} = 0.637 \cdot E_m$$
$$E_m = \frac{E_{rms}}{0.707}$$
$$\therefore\ E_{av} = 0.637 \times \frac{E_{rms}}{0.707}$$
$$E_{rms} = E_{av} \times \frac{0.707}{0.637}$$
$$E_{rms} = 1.11 \cdot E_{av}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดของหม้อแปลงคิดต่อรอบ (1 รอบ) เมื่อนำมาคูณด้วยค่าฟอร์มแฟคเตอร์ จะได้ตามสมการดังนี้

$$E_{rms} = 1.11 \times 4 \cdot f \cdot \phi_{\max}$$
$$E_{rms} = 4.44 \cdot f \cdot \phi_{\max} \qquad (3.3)$$

3.2.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced EMF equation)

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงทั้ง 2 ด้านนั้น จะแปรผันตามปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็ก ค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ และจำนวนรอบของขดลวด ดังนั้นจึงต้องนำสมการที่ 3.3 มาคูณด้วยจำนวนรอบของขดลวด จึงจะได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ ดังสมการ

$$E_1 = 4.44 \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \phi_{\max} \qquad (3.4)$$

เมื่อ

E_1	คือ	แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
f_1	คือ	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ มีหน่วยเป็น (Hz) ซึ่งเท่ากับ f_2
N_1	คือ	จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
ϕ_{max}	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Wb)

สำหรับขดลวดด้านทุติยภูมิก็เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขณะเดียวกันด้วย ดังสมการ

$$E_2 = 4.44 \cdot N_2 \cdot f_2 \cdot \phi_{\max} \qquad (3.5)$$

<u>ตัวอย่างที่</u> 3.1 หม้อแปลงแบบ 1 เฟส มีจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ 500 รอบ และทุติยภูมิ 1,000 รอบ เมื่อจ่ายไฟ 500 V 50 Hz ให้กับขดลวดปฐมภูมิ และถ้าหม้อแปลงเครื่องนี้มีพื้นที่หน้าตัด 50 cm^2 จงคำนวณหา

(ก) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้น

(ข) แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ

วิธีทำ

(ก) หาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้น

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.44 \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot \phi_{\max} \\ 500 &= 4.44 \times 500 \times 50 \times \phi_{\max} \\ \phi_{\max} &= \frac{500}{111,000} = 0.0045 = 4.5 \times 10^{-3} \ \text{Wb} \end{aligned}$$

$$B_{\max} = \frac{4.5 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-4}} = 0.9 \ \text{Wb/m}^2$$

(ข) หาแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{500}{E_2} = \frac{500}{1,000}$$

$$E_2 = \frac{500 \times 1,000}{500} = 1,000 \ \text{V}$$

<u>ตัวอย่างที่</u> 3.2 หม้อแปลงแบบ 1 เฟส 2,000/200 V ขนาด 20 kVA มีจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ 50 รอบ จงคำนวณหา

(ก) กระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิขณะหม้อแปลงจ่ายโหลดเต็มพิกัด

(ข) จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

วิธีทำ

(ก) กระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิขณะหม้อแปลงจ่ายโหลดเต็มพิกัด

$$I_1 = \frac{kVA}{E_1} = \frac{20 \times 10^3}{2,000} = 10 \ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{kVA}{E_2} = \frac{20 \times 10^3}{200} = 100 \ \text{A}$$

(ข) จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

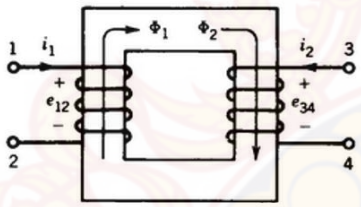
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$N_1 = \frac{I_2 \times N_2}{I_1} = \frac{50 \times 100}{10} = 500 \ \text{Turn}$$

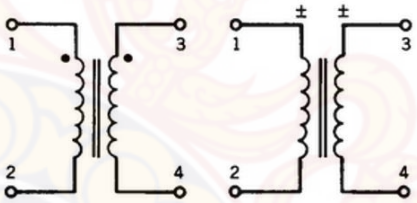
3.2.4 ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer polarity)

หม้อแปลงไฟฟ้าหรือเครื่องกลไฟฟ้าชนิดอื่นที่มีขดลวดตัวนำ จะใช้สัญลักษณ์ในการกำหนดขั้วของขดลวดที่เหมือนกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 3.7 (ก) จุดต่อที่ 1 และ 3 เป็นขั้วที่เหมือนกันเพราะเป็นจุดที่กระแสไหลเข้าเหมือนกัน ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีทิศทางการไหลเดียวกันในแกนเหล็ก ในทำนองเดียวกันจุดต่อที่ 2 และ 4 ก็เป็นขั้วที่เหมือนกัน ถ้าขดลวดทั้งสองนี้เชื่อมต่อกันด้วยเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดทั้งสอง ในขณะที่จุดต่อที่ 1 เป็นขั้วบวกจุดต่อที่ 2 ก็จะเป็นขั้วลบและถ้าจุดต่อที่ 3 เป็นขั้วบวกจุดต่อที่ 4 ก็จะเป็นขั้วลบเช่นเดียวกัน แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ e_{12} และ e_{34} จะอินเฟสกัน โดยส่วนใหญ่แล้วเราจะใช้เครื่องหมายจุด (●) หรือ $\pm$ แสดงขั้วที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 3.7 (ข) การกำหนดขั้วของขดลวดนั้นทำให้เราทราบถึงลักษณะการพันขดลวด

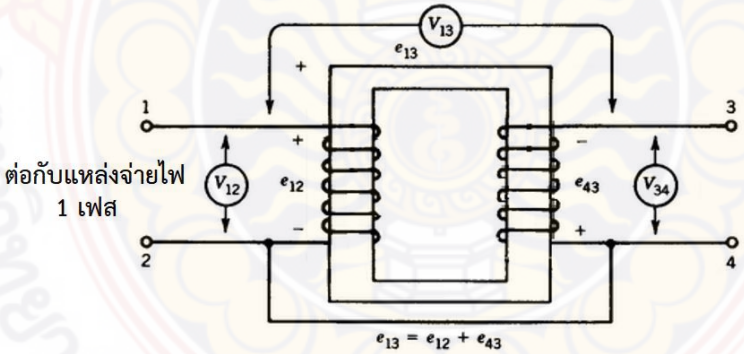
ถ้าเราไม่สามารถมองเห็นลักษณะการพันของขดลวดได้เนื่องจากขดลวดอยู่ภายในหม้อแปลงนั้น การกำหนดขั้วสามารถทำได้ด้วยการทดลอง วิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.7 (ค) จากรูปเราต่อจุดต่อที่ 2 และ 4 เข้าด้วยกันและต่อจุดต่อที่ 1 และ 2 เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า วัดแรงดันตกคร่อมที่จุด 1-2, 3-4 และ 1-3 ด้วยโวลต์มิเตอร์ กำหนดให้เป็น V_{12}, V_{34} และ V_{13} ตามลำดับ ถ้าแรงดัน V_{13} ที่อ่านได้เป็นผลรวมของ V_{12} กับ V_{34} ($V_{13} = V_{12} + V_{34}$) แสดงว่าจุดต่อที่ 1 และ 3 จะเป็นขั้วที่แตกต่างกันทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ e_{12} และ e_{34} อินเฟสกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ค) แต่ถ้าแรงดัน V_{13} ที่อ่านได้เป็นผลลบของ V_{12} และ V_{34} ($V_{13} = V_{12} - V_{34}$) แสดงว่าจุดต่อที่ 1 และ 3 เป็นขั้วที่เหมือนกัน



(ก) จุดต่อที่ 1 และ 3 เป็นขั้วที่เหมือนกันทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางเดียวกัน



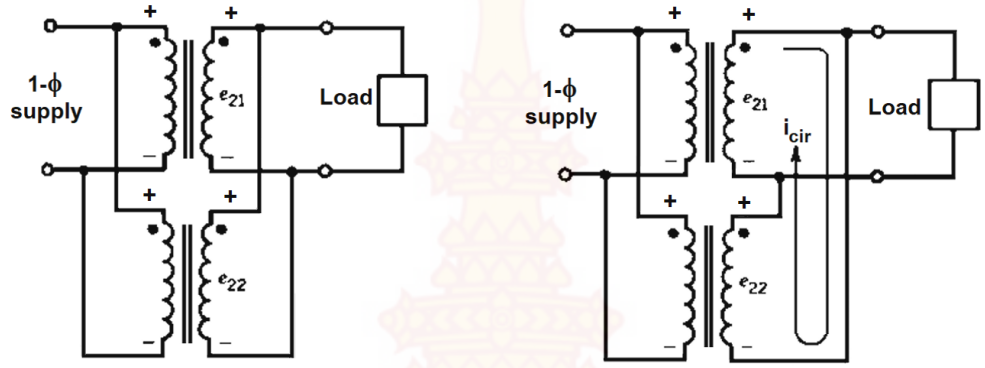
(ข) สัญลักษณ์แสดงขั้วที่เหมือนกัน



(ค) การทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง

รูปที่ 3.7 สัญลักษณ์ของขั้วหม้อแปลงและการทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง

ในการขนานหม้อแปลงเพื่อให้หม้อแปลงช่วยกันจ่ายโหลดนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบขั้วของหม้อแปลงเพื่อทำการต่อขนานได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) ในกรณีรูป 3.8 (ข) นั้นเป็นการต่อขนานที่ไม่ถูกต้องจะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรไหลวนในขดลวดทุติยภูมิทำให้เกิดความเสียหายกับหม้อแปลงได้



(ก) การต่อขนานหม้อแปลงแบบขั้วถูกต้อง (ข) การต่อขนานหม้อแปลงแบบผิดขั้วทำให้ลัดวงจร

รูปที่ 3.8 การต่อขนานหม้อแปลงเฟสเดียว 2 เครื่อง

3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะใช้งานจริง (actual transformer)

ในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของหม้อแปลงในอุดมคตินั้นเราสมมติว่าไม่มีการเกิดค่าความสูญเสียใด ๆ ขึ้นในหม้อแปลงเลย แต่ในความเป็นจริงแล้วในขณะที่หม้อแปลงทำงานทั้งในกรณีที่มีโหลดและไม่มีโหลดนั้นจะเกิดความสูญเสียขึ้นในหม้อแปลง ทำให้ในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในหม้อแปลงต้องคำนึงถึงค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นด้วยจึงจะทำให้ผลการคำนวณที่ได้นั้นถูกต้องตามความเป็นจริง

3.3.1 พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer rating)

หม้อแปลงไฟฟ้านั้นจ่ายกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power ใช้ตัวย่อ S) ให้กับโหลด ดังนั้นหม้อแปลงจึงมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเป็นกิโลโวลต์-แอมป์ (kVA) และมีพิกัดแรงดันเป็นโวลต์ ซึ่งเราสามารถดูได้จากแผ่นป้าย (Nameplate) ของหม้อแปลง ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลที่อ่านได้จากแผ่นป้ายของหม้อแปลงเครื่องหนึ่งคือ 10 kVA 1,100/110 V. จากพิกัดแรงดันแสดงให้เห็นว่าขดลวด 2 ชุดของหม้อแปลงนั้นชุดหนึ่งมีพิกัดแรงดัน 1,100 โวลต์ อีกชุดหนึ่งมีพิกัดแรงดัน 110 โวลต์ แรงดันนี้เป็นสัดส่วนกันตามจำนวนรอบของขดลวดที่พันอยู่ เรียกว่า อัตราส่วนของหม้อแปลง (Voltage Ratio (a) = 1,100/110 = 10) พิกัดกำลัง 10 kVA หมายความว่าขดลวดแต่ละขดของหม้อแปลงออกแบบให้ทนกำลังไฟฟ้าได้ 10 kVA

ดังนั้นพิกัดกระแสทางด้านขดลวดแรงดันสูง คือ

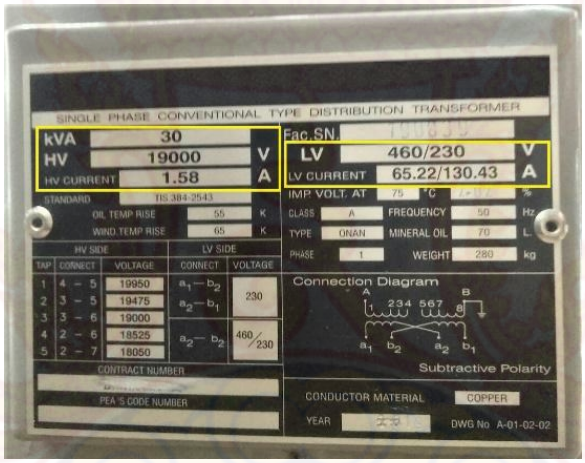
$$I_1 = \frac{10\,\text{kVA}}{1{,}100\,\text{V}} = \frac{10{,}000\,\text{VA}}{1{,}100\,\text{V}} = 9.09\,\text{A}$$

และทางด้านแรงดันต่ำ คือ

$$I_2 = \frac{10\,\text{kVA}}{110\,\text{V}} = \frac{10{,}000\,\text{VA}}{110\,\text{V}} = 90.9\,\text{A}$$

หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าทางด้านขดลวดแรงดันต่ำมีกระแสไหล 90.9 A ขดลวดทางด้านแรงดันสูงจะมีกระแสไหล 9.09 A แต่ในความเป็นจริงแล้วกระแสในขดลวดด้านที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟ (ด้านปฐมภูมิ) จะมีองค์ประกอบของกระแสอีกส่วนหนึ่งรวมอยู่ด้วย ซึ่งถ้านำกระแสในส่วนนี้มาเปรียบเทียบกับขนาดกระแสที่พิกัดแล้วถือว่ามีค่าน้อยมาก

ภาพที่ 3.9 เป็นภาพของแผ่นป้ายของหม้อแปลง 1 เฟส ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 30 kVA มีพิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิซึ่งเป็นด้านแรงดันสูง เท่ากับ 19,000 V ขดลวดด้านทุติยภูมิมี 2 ชุด มีพิกัดแรงดันขดละ 230 V สามารถต่อได้ 2 แบบ คือ ถ้าต่ออนุกรมกันจะได้พิกัดแรงดัน 460 V แต่ถ้าต่อขนานกันจะได้พิกัดแรงดัน 230 V ขดลวดทางด้านแรงดันสูงจะมีกระแสไหล 1.58 A ที่พิกัด ขดลวดแรงดันต่ำมีกระแสไหล 65.22 A เมื่อต่ออนุกรม และ 130.43 A เมื่อต่อขดลวดแบบขนานกัน



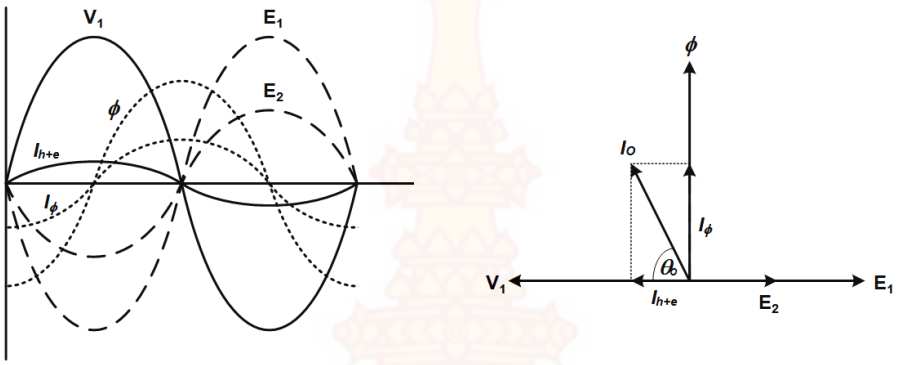
รูปที่ 3.9 แผ่นป้าย (nameplate) ของหม้อแปลงแบบ 1 เฟส

3.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลด (no-load transformer)

เมื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงสิ่งหนึ่งที่จะเกิดขึ้นตลอดเวลาไม่ว่าหม้อแปลงจะจ่ายโหลดหรือไม่ก็ตามก็คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (core loss) ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กนี้ประกอบไปด้วยค่าความสูญเสียจากฮิสเตอรีซีส (hysteresis loss) และความสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss) โดยไม่คิดค่าของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ ในขดลวดเพราะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากกระแสในขณะที่หม้อแปลงไม่มีโหลด (I_O) มีค่าน้อย กระแส I_O นี้เกิดจากกระแส 2 ส่วนที่ตั้งฉากกันอยู่ คือ

1) **กระแสส่วนที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetizing current)** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ I_ϕ โดยกระแสส่วนนี้ จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่เปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาภายในแกนเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_1 และ E_2 ขึ้นที่ขดลวดของหม้อแปลง

2) **กระแสส่วนที่ทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก (core-loss current)** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ I_{h+e} โดยกระแสส่วนนี้ทำให้เกิดการสูญเสียฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (hysteresis and eddy current losses) ดังแสดงในรูปที่ 3.10



(ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิ (ข) เวกเตอร์ของแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 3.10 รูปคลื่นและเวกเตอร์ของแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ในภาพที่ 3.10 สามารถขยายความได้ดังสมการที่ (3.6) – (3.10)

$$\bar{I}_O = \bar{I}_\phi + \bar{I}_{h+e} \quad (3.6)$$

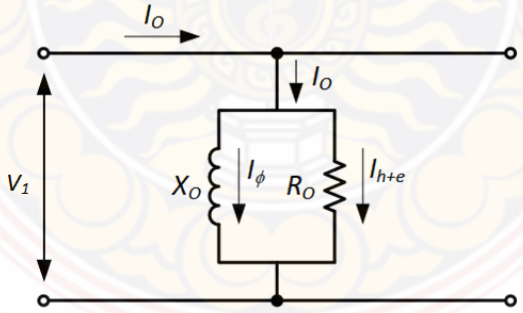
$$I_O = \sqrt{I_\phi^2 + I_{h+e}^2} \quad (3.7)$$

$$I_{h+e} = I_O \cos\theta_O \quad (3.8)$$

$$I_\phi = I_O \sin\theta_O \quad (3.9)$$

$$\theta_O = \tan^{-1}\frac{I_\phi}{I_{h+e}} \quad (3.10)$$

กระแส I_{h+e} ที่เกิดขึ้นจะมีเฟสเดียวกัน (in phase) กับแรงดันไฟฟ้า V_1 ที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมิ กระแส I_ϕ จะล้าหลังไปเป็นมุม 90° เมื่อรวมกันทางเวกเตอร์แล้วจึงทำให้กระแส I_O ล้าหลังจาก V_1 ไปเป็นมุม θ_O โดยปกติแล้วขนาดของกระแส I_ϕ จะมากกว่า I_{h+e} หลายเท่าจึงทำให้มุม θ_O มีค่าเกือบเท่ากับ 90° วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะไม่มีโหลด สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลของหม้อแปลงในสภาวะไม่มีโหลด

จากวงจรสมมูลรูปที่ 3.11 กระแส I_O แยกไหลออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่กระแส I_{h+e} ไหลผ่านนั้นถูกแทนด้วยค่าความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Resistance) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ R_O และส่วนที่กระแส I_ϕ ไหลผ่านถูกแทนด้วยค่ารีแอกแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Reactance) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ X_O ซึ่งทั้งสองค่านี้ต่อขนานกันและต่อเข้ากับแหล่งจ่าย V_1 และหาค่าได้ดังนี้

$$R_O = \frac{V_1}{I_{h+e}} \tag{3.11}$$

$$X_O = \frac{V_1}{I_\phi} \tag{3.12}$$

จากสมการที่ 3.8 นำ ค่าของแรงดัน V_1 มาคูณทั้ง 2 ข้าง จะได้

$$V_1 \cdot I_{h+e} = V_1 \cdot I_O \cdot \cos\theta \tag{3.13}$$

ซึ่งผลคูณของ V_1 และ I_{h+e} ก็คือค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก กำหนดให้เป็น P_{core} ดังนั้น

$$P_{core} = V_1 \cdot I_O \cdot \cos\theta \tag{3.14}$$

เมื่อ

P_{core}	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (W)
V_1	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (V)
I_O	คือ	กระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (A)
I_{h+e}	คือ	กระแสที่สูญเสียในแกนเหล็ก (A)
I_ϕ	คือ	กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (A)
R_O	คือ	ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก (Ω)
X_O	คือ	รีแอกแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก (Ω)
θ_O	คือ	มุมเฟสระหว่างแรงดัน V_1 กับกระแส I_O (deg)

<u>ตัวอย่างที่</u> 3.3 หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 1600/240 V เมื่อต่อวงจรด้านปฐมภูมิเข้ากับแรงดัน 1,600 V มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าหม้อแปลง 3 A และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 1,400 W ถ้าไม่คิดผลของแรงดันตกคร่อมจากความต้านทานและแรงดันตกคร่อมจากรีแอคแตนซ์รั่วไหล จงคำนวณหา

(ก) กระแสที่สูญเสียในแกนเหล็ก *(I_{h+e})*

(ข) กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก *(I_ϕ)*

(ค) ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก *(R_O)*

(ง) รีแอคแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก *(X_O)*

(จ) เขียนวงจรสมมูลในสภาวะไม่มีโหลด

วิธีทำ

$$P_{core} = V_1 \cdot I_O \cdot \cos\theta_O$$

$$\cos\theta_O = \frac{P_{core}}{V_1 \cdot I_O} = \frac{1,400}{1,600 \times 3} = 0.29$$

$$\theta_O = \cos^{-1} 0.29 = 73.14$$

(ก) กระแสที่สูญเสียในแกนเหล็ก

$$I_{h+e} = I_O \cdot \cos\theta_O$$

$$I_{h+e} = 3 \times 0.29 = 0.87 \text{ A}$$

(ข) กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_ϕ)

$$I\phi = I_O \cdot \sin\theta_O$$

$$I\phi = 3 \cdot \sin 73.14° = 2.87 \text{ A}$$

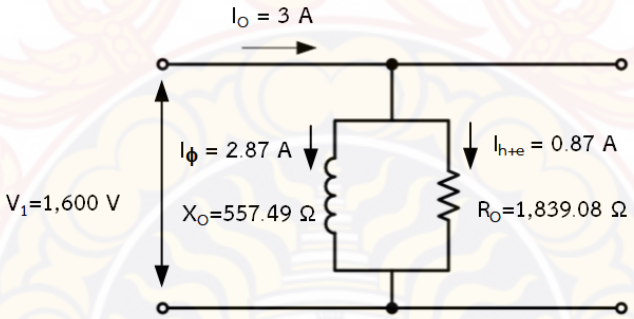
(ค) ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก (R_O)

$$R_O = \frac{V_1}{I_{h+e}} = \frac{1,600}{0.87} = 1,839.08 \ \Omega$$

(ง) รีแอคแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก (X_O)

$$X_O = \frac{V_1}{I_\phi} = \frac{1,600}{2.87} = 557.49 \ \Omega$$

(จ) เขียนวงจรสมมูลในสภาวะไม่มีโหลด

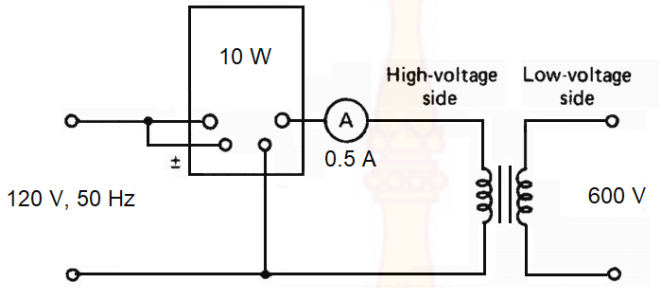


<u>ตัวอย่างที่</u> 3.4 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 2 kVA เครื่องหนึ่ง มีค่าพิกัด 120/600 V, 50 Hz ถ้านำวัตต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์วัดที่ขดลวดปฐมภูมิขณะไม่มีโหลด อ่านค่าได้ 10 W และ 0.5 A ตามลำดับ จงหา

(ก) เพาเวอร์แฟคเตอร์ของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด *($\cos\theta_O$)*

(ข) กระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก *(I_ϕ)*

(ค) กระแสที่สูญเสียในแกนเหล็ก *(I_{h+e})*



วิธีทำ

(ก) หาเพาเวอร์แฟคเตอร์ของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

$$P = V \times I_O \times \cos\theta_O$$

$$\cos\theta_O = \frac{P}{V \times I_O} = \frac{10}{120 \times 0.5} = 0.167$$

(ข) หากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

$$I\phi = I_O \times \sin\theta_O$$

$$\theta_O = \cos^{-1} 0.167 = 80.39°$$

$$I\phi = 0.5 \times \sin 80.39° = 0.493\ \text{A}$$

(ค) หากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก

$$I_{h+e} = I_O \times \cos\theta_O$$

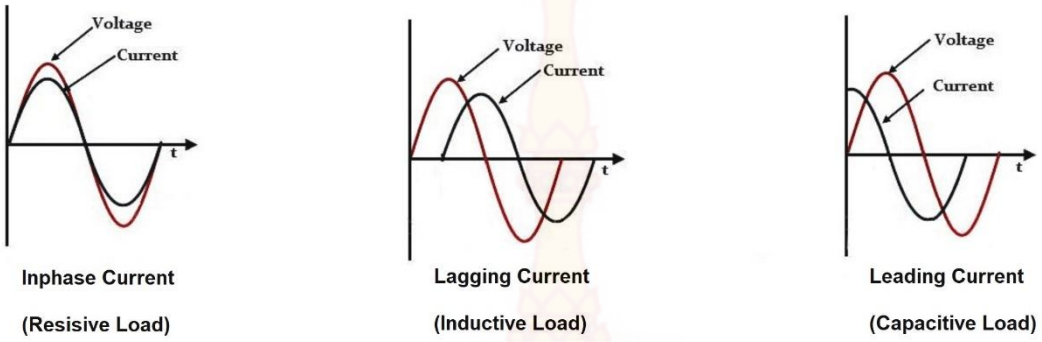
$$I_{h+e} = 0.5 \times 0.167 = 0.0835\ \text{A}$$

3.3.3 หม้อแปลงในสภาวะมีโหลด (on-load transformer)

เมื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงแล้วต่อโหลดให้กับขดลวดทุติยภูมิ หม้อแปลงก็จะครบวงจรทำให้เกิดกระแส I_s หรือ I_2 ไหลในขดลวดทุติยภูมิ ขนาดและเฟสของกระแส I_S นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโหลดที่นำมาต่อ ดังนี้

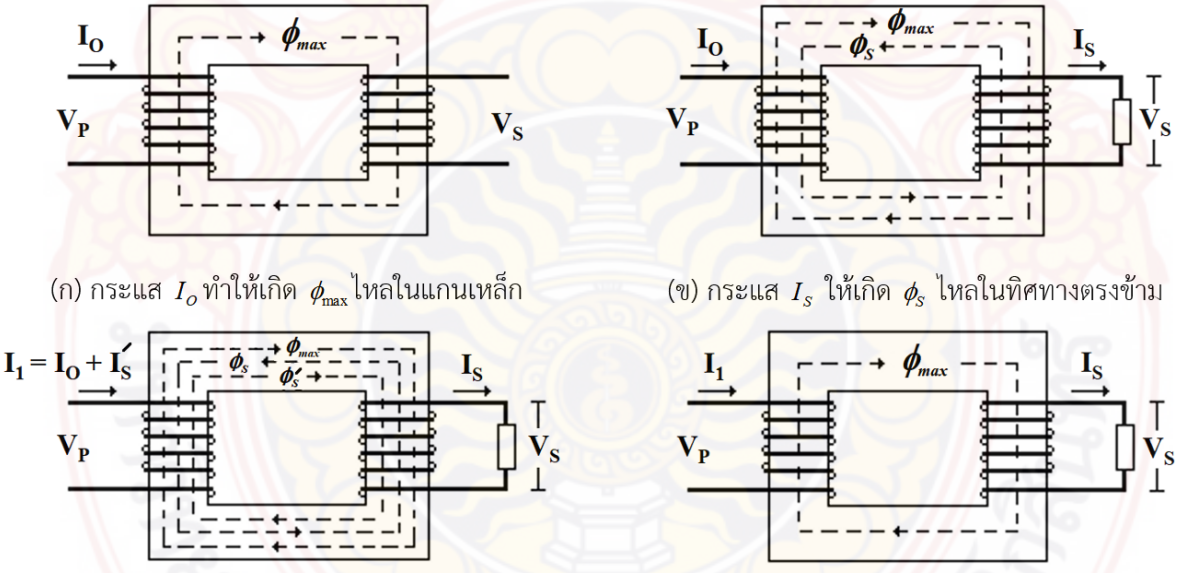
- ถ้าโหลดที่นำมาต่อเป็น ความต้านทาน (resistive load) กระแสที่เกิดขึ้นจะมีเฟสตรงกัน (in phase) กับแรงดันไฟฟ้า
- ถ้าโหลดที่นำมาต่อเป็น ตัวเหนี่ยวนำ (inductive load) กระแสที่เกิดขึ้นจะล้าหลัง (lagging) แรงดันไฟฟ้า
- ถ้าโหลดที่นำมาต่อเป็น ตัวเก็บประจุ (capacitive load) กระแสที่เกิดขึ้นจะนำหน้า (leading) แรงดันไฟฟ้า

พฤติกรรมของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง เมื่อต่อโหลดชนิดต่าง ๆ ให้กับหม้อแปลง แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 พฤติกรรมของกระแสและแรงดันในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเมื่อต่อโหลดชนิดต่าง ๆ

จากการเกิดกระแส I_S ไหลในขดลวดทุติยภูมิทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_s ขึ้นใหม่อีกค่าหนึ่ง ซึ่ง ϕ_s มีทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กหลัก (ϕ_{max}) ที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิและจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหลักมีค่าลดลงไปชั่วขณะหนึ่ง ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (E_1) ลดลงตามไปด้วย ผลต่างระหว่าง V_P กับ E_1 จึงมากขึ้นทำให้มีกระแส I'_S ไหลเพิ่มขึ้นทางด้านปฐมภูมิ กระแสที่เพิ่มขึ้นทางปฐมภูมินี้จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กหลักขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับ ϕ_s แต่จะมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นจึงเกิดการหักล้างกับ ϕ_s พอดี ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กคงที่ นั่นคือจะเหลือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก I_ϕ เท่านั้น แต่กระแสทางด้านรับไฟจะเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งส่วนคือ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.13



(ก) กระแส I_O ทำให้เกิด ϕ_{max} ไหลในแกนเหล็ก

(ข) กระแส I_S ให้เกิด ϕ_S ไหลในทิศทางตรงข้าม

(ค) ขดลวดปฐมภูมิดึงกระแส I'_S เข้ามาเพิ่ม ทำให้เกิด ϕ'_S หักล้างกับ ϕ_S

(ง) คงเหลือเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_{max} ในแกนเหล็กเท่าเดิม

รูปที่ 3.13 ปรากฏการณ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กที่เปลี่ยนไปในช่วงหม้อแปลงได้รับโหลด

จากปรากฏการณ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กที่เปลี่ยนไปในช่วงหม้อแปลงได้รับโหลด รูปที่ 3.13 สามารถสรุปได้ว่า

1) ไม่ว่าโหลดที่ต่ออยู่ทางด้านจ่ายไฟจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม ก็จะไม่ทำให้ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลในแกนเหล็กทั้งหมดแตกต่างไปจากตอนไม่มีโหลดมากนัก นั่นคือเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดมีค่าเท่ากับตอนไม่มีโหลดโดยประมาณ

2) ปรากฏการณ์นี้ทำให้การสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) มีค่าคงที่ตลอดไม่ว่าโหลดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม

3) เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าได้รับโหลด จึงทำให้กระแสทางด้านปฐมภูมิมีสองส่วนคือ I_0 และ I'_S โดย I'_S มีทิศทางของเฟสตรงข้ามกับ I_S และมีขนาด I_S หารด้วย a กระแสทั้งหมดทางด้านรับไฟ (I_1) ก็คือ ผลบวกตามเวกเตอร์ของ I_0 กับ I'_S

จากรูปที่ 3.13 (ค)

เพราะว่า $\phi_S = \phi'_S$

ดังนั้น $N_2 \cdot I_S = N_1 \cdot I'_S$

เพราะฉะนั้น $I'_S = \frac{N_2}{N_1} \times I_s = \frac{I_S}{a}$

<u>ตัวอย่างที่</u> 3.4 หม้อแปลงเฟสเดียว 440/110 V เครื่องหนึ่ง ขณะไม่จ่ายโหลดกินไฟ 5 A ที่ 0.2 PF จงหากระแสทางด้านปฐมภูมิ ถ้าทางทุติยภูมิจ่ายโหลด 120 A ที่ 0.8 PF lagging

วิธีทำ

$$\cos\theta_O = 0.2$$
$$\theta_O = \cos^{-1} 0.2 = 78.46^\circ$$
$$\cos\theta_S = 0.8$$
$$\theta_S = \cos^{-1} 0.8 = 36.87^\circ$$
$$\bar{I}_1 = \bar{I}_O + \bar{I}'_2$$
$$I_0 = 5\angle 78.46^\circ \text{ A}$$
$$I'_2 = \frac{I_2\angle\theta_S}{a} = \frac{120\angle\theta_S}{4} = 30\angle -36.87^\circ \text{ A}$$
$$I_1 = 5\angle 78.46^\circ + 30\angle -36.87^\circ$$
$$= 1 + j4.89 + 24 - j18$$
$$= 25 - j13.15$$
$$= 28.25\angle -27.74^\circ \text{ A}$$

3.3.4 ความต้านทานและรีแอคแตนซ์รั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้า (resistance and leakage reactance of transformer)

ในทางปฏิบัติขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในแต่ละด้านจะมีค่าความต้านทานอยู่และค่าความต้านทานนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปริมาณความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับขดลวดได้ ดังรูปที่ 3.14 (ก) เมื่อ

กระแสไหลในขดลวดจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กร่วม (mutual flux) ขึ้นในแกนเหล็กและจะมีเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) จำนวนเล็กน้อยที่ไม่ได้เดินทางไปคล้องกับขดลวดอีกด้านหนึ่งของหม้อแปลง เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลนี้มีอากาศเป็นตัวกลางและมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตามค่าของกระแสที่ไหลในขดลวด ผลของเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลนี้ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำขึ้นเรียกว่า ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance of Winding) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ต่อไปนี้

$$L_1 = \frac{N_1 \cdot \phi_1}{I_1} \tag{3.15}$$

$$L_2 = \frac{N_2 \cdot \phi_2}{I_2} \tag{3.16}$$

เมื่อ

L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ขดลวดปฐมภูมิ

L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลที่ขดลวดทุติยภูมิ

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

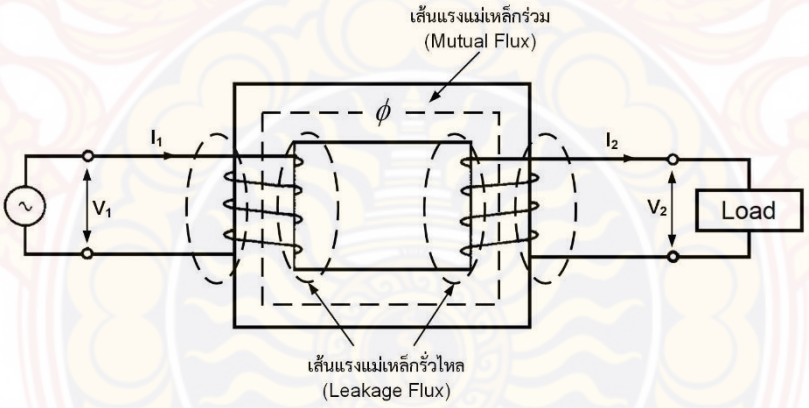
N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

ϕ_1 คือ เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ขดลวดปฐมภูมิ

ϕ_2 คือ เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลที่ขดลวดทุติยภูมิ

I_1 คือ กระแสที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิ

I_2 คือ กระแสที่ไหลในขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 3.14 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กร่วมและเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลในหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่าความเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 ของขดลวดทั้ง 2 ด้าน ก่อนนำมาคำนวณต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของค่ารีแอคแตนซ์ (Inductive reactance; X_L) เสียก่อน โดยค่า X_L ของขดลวดทั้งสองนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับและมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) กำหนดให้ X_1 เป็นค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดปฐมภูมิ และ X_2 เป็นค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งมีค่าดังนี้

ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลขดลวดปฐมภูมิ คือ

$$X_1 = 2\pi \cdot f \cdot L_1 \qquad (3.17)$$

ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลขดลวดทุติยภูมิ คือ

$$X_2 = 2\pi \cdot f \cdot L_2 \qquad (3.18)$$

เมื่อ

X_1 คือ ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลที่ขดลวดปฐมภูมิ

X_2 คือ ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลที่ขดลวดทุติยภูมิ

f คือ ค่าความถี่ไฟฟ้า

3.3.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (Equivalent Circuit of Transformer)

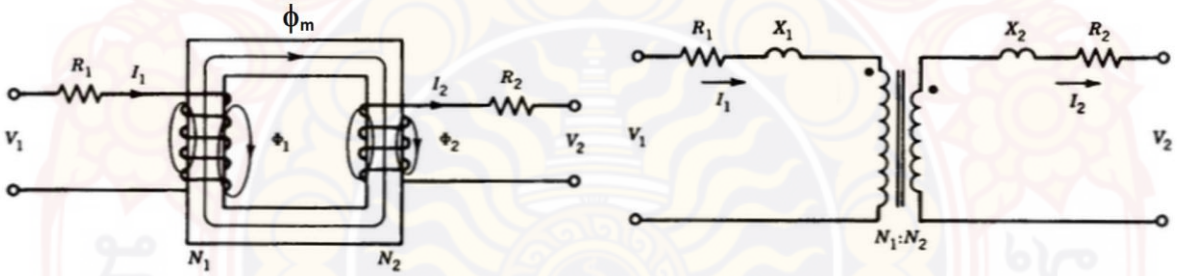
เนื่องจากหม้อแปลงในสภาวะใช้งานจริง ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะมีค่าความต้านทาน และยังมีค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลเทียบเท่าของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิแทนด้วยค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ต่ออนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหล X_1 และ X_2 ดังรูปที่ 3.15 (ข)

- อิมพีแดนซ์สมมูลด้านปฐมภูมิ คือ

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

- อิมพีแดนซ์สมมูลด้านทุติยภูมิ คือ

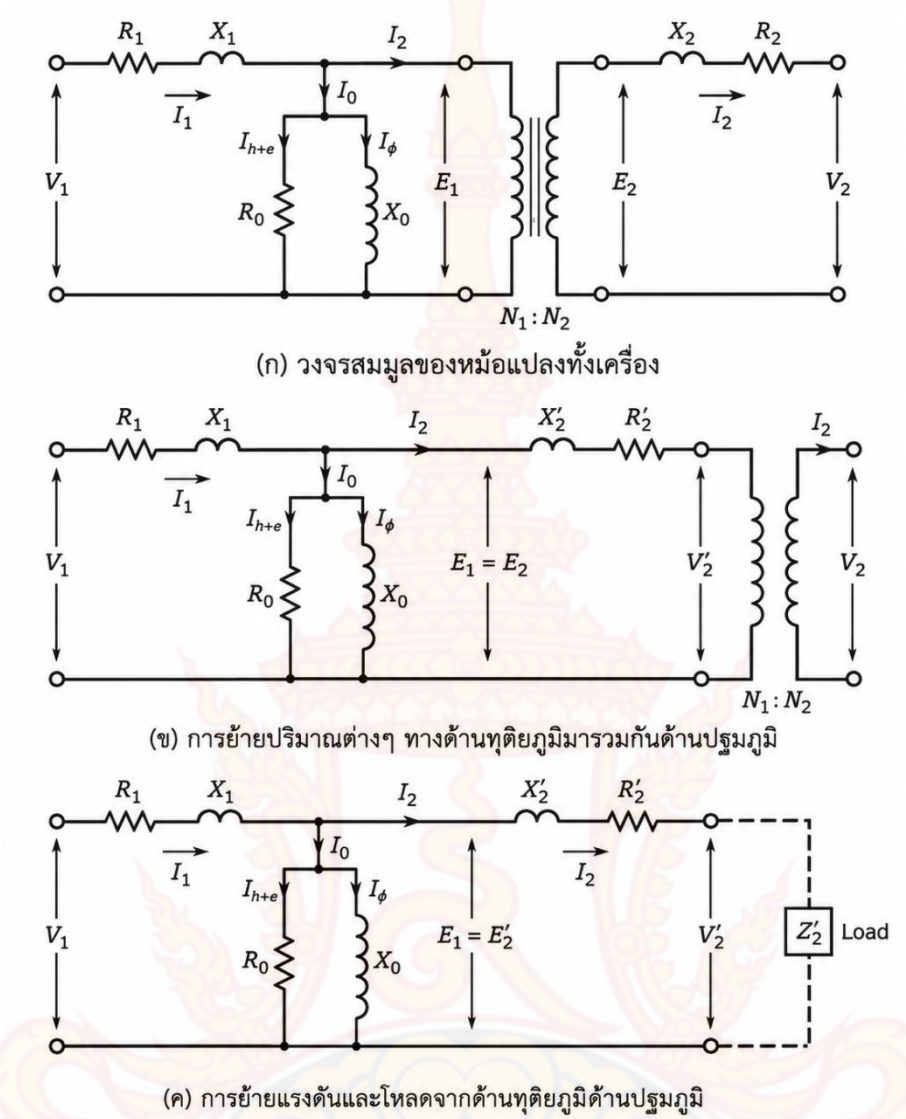
$$Z_2 = R_2 + jX_2$$



(ก) วงจรของหม้อแปลงที่แสดงค่าความต้านทานของขดลวดทั้ง 2 ด้าน (ข) วงจรสมมูลที่แสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล

รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากภาพที่ 3.15 (ข) หากนำค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลงที่เขียนอยู่ในรูปของค่าความต้านทาน (R_O) และผลกระทบของกระแสที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ที่เขียนอยู่ในรูปของค่ารีแอคแตนซ์ (X_O) มาเขียนรวมในวงจรเดียวกันก็จะได้วงจรสมมูลของหม้อแปลงทั้งเครื่อง ดังภาพที่ 3.16 (ก)



รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลทั้งหมดของหม้อแปลง

3.3.6 พัฒนาการของวงจรสมมูล (Development of Equivalent Circuit)

เราสามารถย้ายปริมาณต่าง ๆ ในวงจรสมมูลของหม้อแปลงในอุดมคติรูปที่ 3.16 (ก) ให้ไปอยู่รวมกันทางด้านปฐมภูมิหรือทางด้านทุติยภูมิด้านใดด้านหนึ่งได้ โดยจะไม่ทำให้ค่าหรือคุณสมบัติของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลง รูปที่ 3.16 (ข) แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงที่ย้ายปริมาณต่าง ๆ ไปอยู่รวมกันทางด้านปฐมภูมิ และเพื่อความสะดวกในการเขียนรูปวงจร รูปที่ 3.16 (ค) แสดงการย้ายค่าแรงดันและโหลดที่ต่ออยู่ทางด้านทุติยภูมิมาทางด้านปฐมภูมิซึ่งเมื่อย้ายข้างแล้วจึงไม่ต้องแสดงสัญลักษณ์ของขดลวดหม้อแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ย้ายไปรวมกันด้านใดด้านหนึ่งนั้นสามารถคำนวณหาได้ ถ้าเราทราบค่าอัตราส่วนของหม้อแปลง การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงที่ย้ายไปรวมกันด้านใดด้านหนึ่ง สามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

1. กรณีย้ายค่าความต้านทาน R_1 จากด้านปฐมภูมิไปด้านทุติยภูมิ ค่าความต้านทาน R_1 ที่ย้ายไปจะถูกเรียกใหม่เป็น R_1' และสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 3.19 – 3.21

$$I_1^2 R_1 = I_2^2 R_1' \quad (3.19)$$

$$R_1' = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 R_1 \quad (3.20)$$

$$R_1' = \frac{R_1}{a^2} \quad (3.21)$$

2. กรณีย้ายค่าความต้านทาน R_2 จากด้านทุติยภูมิไปด้านปฐมภูมิ ค่าความต้านทาน R_2 ที่ย้ายไปจะถูกเรียกใหม่เป็น R_2' และสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 3.22 – 3.24

$$I_1^2 R_2' = I_2^2 R_2 \quad (3.22)$$

$$R_2' = \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 R_2 \quad (3.23)$$

$$R_2' = R_2 a^2 \quad (3.24)$$

3. กรณีย้ายค่ารีแอคแตนซ์ X_1 จากด้านปฐมภูมิไปด้านทุติยภูมิ ค่ารีแอคแตนซ์ X_1 ที่ย้ายไปจะถูกเรียกใหม่เป็น X_1' และสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 3.25

$$X_1' = \frac{X_1}{a^2} \quad (3.25)$$

4. กรณีย้ายค่ารีแอคแตนซ์ X_2 จากด้านทุติยภูมิไปด้านปฐมภูมิ ค่ารีแอคแตนซ์ X_2 ที่ย้ายไปจะถูกเรียกใหม่เป็น X_2' และสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ 3.26

$$X_2' = X_2 a^2 \quad (3.26)$$

ความต้านทานและรีแอคแตนซ์ที่ย้ายไปรวมอยู่ข้างเดียวกันนั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความต้านทานและรีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัวได้ ดังนี้

1. กรณีย้ายจากด้านปฐมภูมิไปรวมกันด้านทุติยภูมิ ความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัวจะถูกเรียกใหม่เป็น R_{02} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.27 – 3.28

$$R_{02} = R_2 + R_1' \quad (3.27)$$

$$R_{02} = R_2 + \frac{R_1}{a^2} \quad (3.28)$$

2. กรณีย้ายจากด้านทุติยภูมิไปรวมกันด้านปฐมภูมิ ความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัว จะถูกเรียกใหม่เป็น R_{01} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.29 – 3.30

$$R_{01} = R_1 + R_2' \quad (3.29)$$

$$R_{01} = R_1 + R_2 a^2 \quad (3.30)$$

3. กรณีย้ายจากด้านปฐมภูมิไปรวมกันด้านทุติยภูมิ รีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัว จะถูกเรียกใหม่เป็น X_{02} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.31 – 3.32

$$X_{02} = X_2 + X_1' \tag{3.31}$$

$$X_{02} = X_2 + \frac{X_1}{a^2} \tag{3.32}$$

4. กรณีย้ายจากด้านทุติยภูมิไปรวมกันด้านปฐมภูมิ รีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัว จะถูกเรียกใหม่เป็น X_{01} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.33 - 3.34

$$X_{01} = X_1 + X_2' \tag{3.33}$$

$$X_{01} = X_1 + X_2 a^2 \tag{3.34}$$

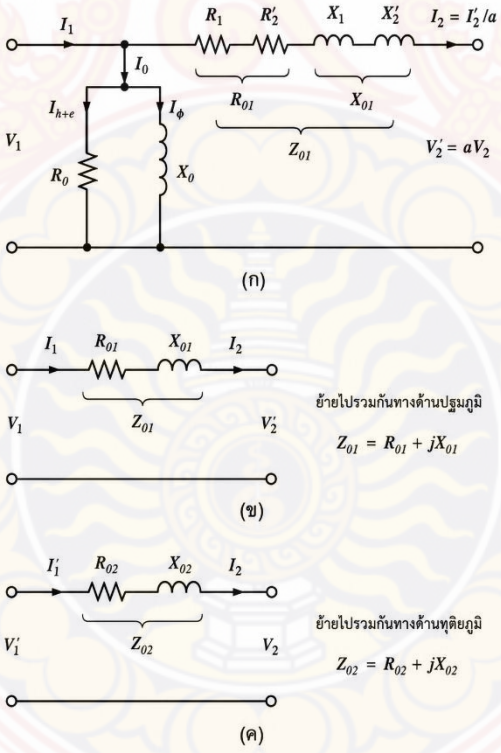
เราสามารถรวมค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัวได้ ดังนี้

1. กรณีรวมกันทางด้านปฐมภูมิ อิมพีแดนซ์สมมูลที่ได้ คือ

$$Z_{01} = R_{01} + jX_{01} \tag{3.35}$$

2. กรณีรวมกันทางด้านทุติยภูมิ อิมพีแดนซ์สมมูลที่ได้ คือ

$$Z_{02} = R_{02} + jX_{02} \tag{3.36}$$



รูปที่ 3.17 พัฒนาการของวงจรสมมูล

ที่มา: ดัดแปลงจาก M. A. Salam, Fundamentals of Electrical Power Systems Analysis, Springer, 2020.

รูปที่ 3.17 คือขั้นตอนการรวมค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทั้งเครื่องให้อยู่ในรูปของค่าอิมพีแดนซ์สมมูล รูปที่ 3.17 (ก) แสดงค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทั้งเครื่อง รูปที่ 3.17 (ข) คือ การลดรูปค่าพารามิเตอร์ลงจนเหลือเพียงค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงโดยย้ายมารวมกันทางด้านปฐมภูมิ และรูปที่ 3.17 (ค) คือ การลดรูปค่าพารามิเตอร์ลงจนเหลือเพียงค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงโดยย้ายมารวมกันทางด้านทุติยภูมิ

ตัวอย่างที่ 3.5 หม้อแปลงเครื่องหนึ่งมีจำนวนรอบทางปฐมภูมิ 600 รอบ ทุติยภูมิ 150 รอบ ความต้านทานทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เท่ากับ 0.25 โอห์ม และ 0.02 โอห์ม ตามลำดับ รีแอคแตนซ์ทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เท่ากับ 1.0 และ 0.04 โอห์ม ตามลำดับ จงหา

ก) ความต้านทานสมมูลที่ย้ายไปคิดทางปฐมภูมิ (R_{01})

ข) รีแอคแตนซ์สมมูลที่ย้ายไปคิดทางทุติยภูมิ (X_{02})

ค) อิมพีแดนซ์สมมูลที่ย้ายไปคิดทางทุติยภูมิ (Z_{02})

วิธีทำ

ก) หาค่าความต้านทานสมมูลที่ย้ายไปคิดทางปฐมภูมิ (R_{01})

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{600}{150} = 4$$

$$R_{01} = R_1 + R_2' = R_1 + R_2 \cdot a^2$$

$$R_{01} = 0.25 + (0.02 \times 4^2) = 0.57\ \Omega$$

ข) หาค่ารีแอคแตนซ์สมมูลที่ย้ายไปคิดทางทุติยภูมิ (X_{02})

$$X_{02} = X_2 + X_1' = X_2 + \frac{X_1}{a^2}$$

$$X_{02} = 0.04 + \frac{1.0}{4^2} = 0.1\ \Omega$$

ค) หาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่ย้ายไปคิดทางทุติยภูมิ (Z_{02})

$$R_{02} = R_2 + R_1' = R_2 + \frac{R_1}{a^2}$$

$$R_{02} = 0.02 + \frac{0.25}{4^2} = 0.04\ \Omega$$

$$Z_{02} = R_{02} + jX_{02}$$

$$Z_{02} = 0.04 + j0.1\ \Omega$$

สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ตั้งแต่โครงสร้างที่ประกอบด้วยแกนเหล็ก ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ รวมถึงหม้อแปลงแบบแกนคอร์และแกนเชลล์ โดยหม้อแปลงทำงานตามหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงในแกนเหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดทั้งสองด้าน

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และจำนวนรอบของขดลวดสามารถอธิบายได้ด้วย อัตราส่วนของหม้อแปลง และสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับจำนวนรอบ ความถี่ และฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด นอกจากนี้ การกำหนดขั้วของหม้อแปลงมีความสำคัญต่อการต่อใช้งานและการต่อขนานหม้อแปลงอย่างถูกต้อง

สำหรับหม้อแปลงในสภาวะใช้งานจริง จะต้องพิจารณากระแสสร้างสนามแม่เหล็ก ความสูญเสียในแกนเหล็ก ความต้านทานและรีแอคแตนซ์ของขดลวด รวมถึงการแทนค่าต่าง ๆ ด้วย วงจรสมมูลของหม้อแปลง ซึ่งสามารถย้ายค่าความต้านทานและรีแอคแตนซ์ไปรวมทางด้านปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และคำนวณคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลง

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 440/110 V ขณะที่ไม่มีภาระกินไฟ 5 A 0.2 PF จงหากระแสทางด้านปฐมภูมิ ถ้าทางด้านทุติยภูมิจ่ายภาระ 120 A 0.8 PF lagging (ตอบ $28.23\angle -27.67^{\circ}$A)
2. หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 500 kVA 22,000/2,200 V ทางด้านปฐมภูมิต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 22,000 V, 60 Hz ถ้าปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุดในแกนเหล็กเท่ากับ 0.0683 Wb จงคำนวณหา
   ก) จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ ถ้าขดลวดปฐมภูมิเท่ากับ 5,000 รอบ (ตอบ 500 รอบ)
   ข) เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กเมื่อแรงดันทางด้านปฐมภูมิเพิ่มขึ้น 20 % และความถี่ลดลง 10 % (ตอบ 0.022 Wb)
3. หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 2,400/240 V, 50Hz มีเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด เท่ากับ 0.011 Wb จงคำนวณหาจำนวนรอบทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ (ตอบ N_1 = 983 รอบ, N_2 = 98.3 รอบ)
4. หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 40 kVA 2,400/480 V, 50 Hz มีความยาวของทางเดินแม่เหล็กเฉลี่ยเท่ากับ 1.07 m พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ 95 cm^2 ขณะใช้งานที่แรงดันเต็มพิกัดทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 352 A/m และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 1.505 T จงคำนวณหา
   ก) จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (ตอบ N_1 = 756 รอบ, N_2 = 151 รอบ)
   ข) กระแสที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อหม้อแปลงใช้งานเป็นแบบ Step-up (ตอบ 2.49 A)
5. หม้อแปลงจำหน่ายเฟสเดียวแบบระบายความร้อนด้วยน้ำมันพิกัด 200 kVA, 7200/460 V, 50 Hz มีค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 1,100 W โดยเป็นค่าความสูญเสียฮิสเตอรีซีส 74 % กระแสส่วนที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.5 % ของกระแสที่พิกัด จงคำนวณหา
   ก) กระแสส่วนที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (ตอบ 0.417 A)
   ข) กระแสขณะที่ไหลเข้าหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด (ตอบ 0.444 A)

ค) เพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะไม่มีโหลด (ตอบ 0.345 Lagging)

ง) ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (ตอบ 286 W)

6. หม้อแปลงตามอุดมคติแบบ Core Type มีขดลวดทางด้านรับไฟและจ่ายไฟเป็น 100 และ 200 รอบ ตามลำดับ ทางด้านรับไฟเข้าใช้ไฟ 220 V, 50 Hz อยากทราบว่าหม้อแปลงมีพื้นที่หน้าตัดเท่าไร หากค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในแกนเหล็กเป็น 1.2 Wb/m^2 (ตอบ 0.00826 m^2)
7. หม้อแปลงเฟสเดียว มีจำนวนรอบทางปฐมภูมิ 300 รอบ ทางทุติยภูมิ 750 รอบ มีพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเท่ากับ 64 cm^2 ถ้าแรงดันทางปฐมภูมิ เท่ากับ 440 V, 50 Hz จงหา

ก) ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (ตอบ 1.03 Wb/m^2)

ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดทุติยภูมิ (ตอบ 1,100 V)

8. หม้อแปลงเฟสเดียว ขนาด 2,200/220 V ขณะไม่จ่ายโหลดกินกระแส 0.5 A 0.3 PF ถ้าทางทุติยภูมิจ่ายโหลด 150 A 0.8 PF จงหาค่าของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กและกระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (ตอบ 0.477 A, 0.150 A)

4 การทดสอบและการหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

Transformer Tests and Transformer Efficiency

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนหลักของระบบจำหน่ายไฟฟ้า หากหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานไม่ถูกต้องก็จะส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงต้องผ่านขั้นตอนการทดสอบมากมาย การทดสอบทำขึ้นเพื่อยืนยันคุณสมบัติและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบบางอย่างสามารถทำในโรงงานที่ผลิตได้เลยก่อนส่งมอบให้กับลูกค้า ความจำเป็นในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า ก็คือ การตรวจสอบการทำงานของหม้อแปลงเพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า ความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นได้จากปัจจัยทางไฟฟ้า ความร้อน ทางกล หรืออาจเกิดขึ้นได้จากการสลายตัวของฉนวนก็เป็นได้

4.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer tests)

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นทำเพื่อหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของหม้อแปลง ซึ่งค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของหม้อแปลง ประกอบด้วย 4 ค่าหลัก ๆ ดังนี้

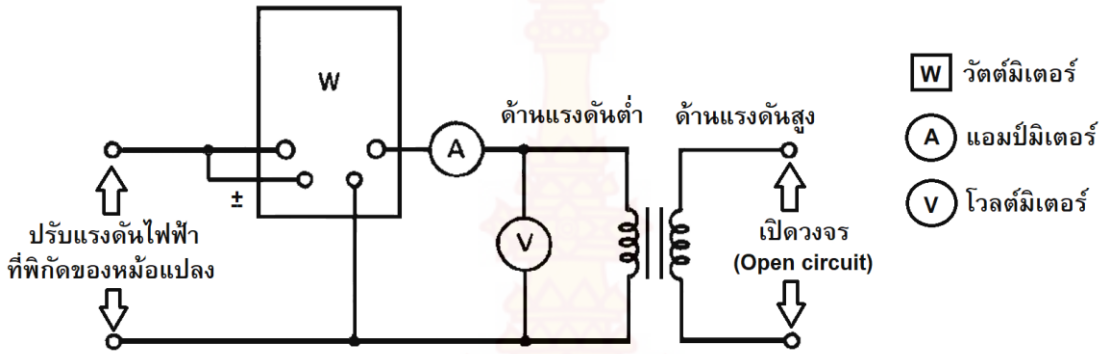
1) ค่าความต้านทานสมมูล (equivalent resistance) ที่ย้ายมาคิดรวมทางด้านปฐมภูมิ (R_{01}) หรือย้ายไปคิดรวมทางด้านทุติยภูมิ (R_{02}) ก็ได้
2) ค่ารีแอคแตนซ์สมมูล (equivalent reactance) ที่ย้ายมาคิดรวมทางด้านปฐมภูมิ (X_{01}) หรือย้ายไปคิดรวมทางด้านทุติยภูมิ (X_{02}) ก็ได้
3) ค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss resistance; R_{OL})
4) ค่ารีแอคแตนซ์ของแกนเหล็ก (magnetizing reactance; X_{OL})

ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่หาได้นี้จะใช้เป็นข้อมูลในการเขียนวงจรสมมูลของหม้อแปลงทั้งตัว และจากวงจรสมมูลเราสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลง แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ของขดลวด กำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกมา และปริมาณอื่น ๆ ได้อีกตามต้องการ การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

4.1.1 การทดสอบแบบไม่มีโหลดหรือแบบเปิดวงจร (no-load test or open circuit test)

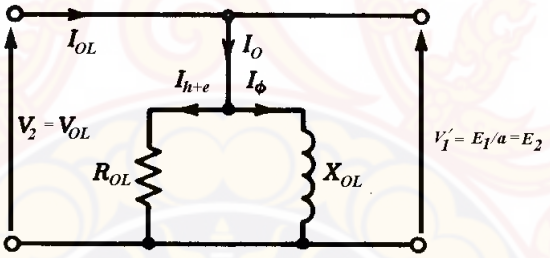
การทดสอบแบบนี้จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงด้านใดด้านหนึ่งที่พิกัดแรงดันของหม้อแปลงด้านนั้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดด้านแรงดันต่ำ เพราะสามารถหาแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดสอบได้ง่าย มีความปลอดภัยสูง และสามารถอ่านค่าจากเครื่องมือวัดได้ง่าย ทำการเปิดวงจรขดลวดอีกด้านหนึ่งไว้ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลง ก็คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก

ของหม้อแปลงนั่นเอง ซึ่งค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าคงที่ในทุก ๆ สภาวะของโหลด วงจรการทดสอบแบบไม่มีโหลดหรือแบบเปิดวงจร แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบไม่มีโหลด

จากรูปที่ 4.1 การทดสอบค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กสามารถอ่านค่าได้จากวัตต์มิเตอร์ (P_{OL}) ส่วนโวลต์มิเตอร์ต่อไว้เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ (V_{OL}) ว่าเท่ากับพิกัดหรือไม่ และค่าของกระแสขณะไม่มีโหลด (I_{OL}) อ่านได้จากแอมป์มิเตอร์ซึ่งกระแสนี้มีค่าน้อยมากจึงทำให้ในขณะที่ทำการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของขดลวดจึงมีค่าน้อยตามไปด้วย และด้วยเหตุนี้จึงอาจตัดค่านี้ทิ้งไปได้ วงจรสมมูลขณะทำการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบแบบไม่มีโหลด

จากการทดสอบแบบไม่มีโหลดหรือแบบเปิดวงจรนี้ ทำให้สามารถหาค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก (R_{OL}) ค่ารีแอคแตนซ์ของแกนเหล็ก (X_{OL}) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะทำการทดสอบ (θ_{OL}) ค่ากระแสที่ทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก (I_{h+e}) และกระแสที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (I_ϕ) ได้ ดังต่อไปนี้

จากสูตรการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า

$$P = V \cdot I \cdot \cos\theta \qquad (4.1)$$

ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ คือ

$$P_{OL} = V_{OL} \cdot I_{OL} \cdot \cos\theta_{OL} \qquad (4.2)$$

ทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ได้จาก

$$\cos\theta_{OL} = \frac{P_{OL}}{V_{OL} \cdot I_{OL}} \quad (4.3)$$

เมื่อทราบค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์แล้วก็สามารถหาค่า I_{h+e} และ I_{ϕ} ได้ ดังนี้

$$I_{h+e} = I_{OL} \cdot \cos\theta_{OL} \quad (4.4)$$

$$I_{\phi} = I_{OL} \cdot \sin\theta_{OL} \quad (4.5)$$

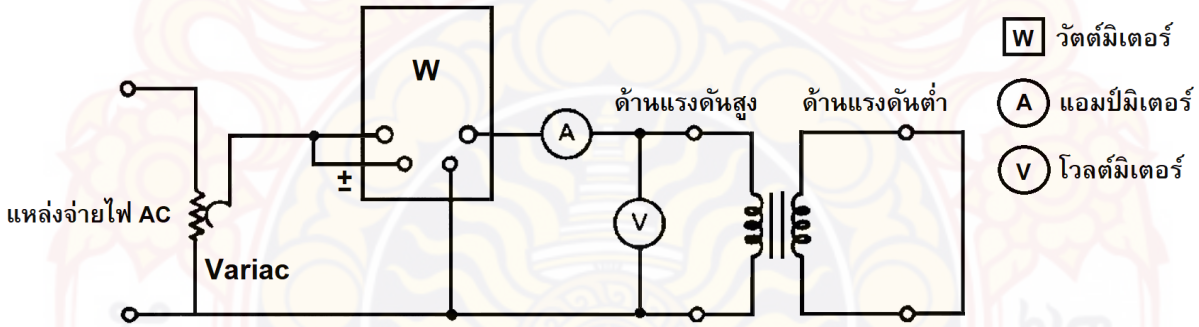
และสามารถหาค่า R_{OL}, X_{OL} ได้ จาก

$$R_{OL} = \frac{V_{OL}}{I_{h+e}} \quad (4.6)$$

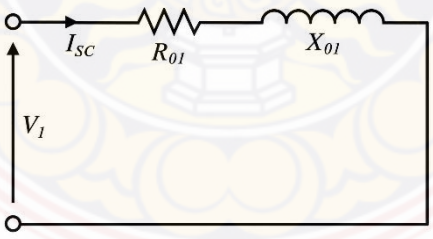
$$X_{OL} = \frac{V_{OL}}{I_{\phi}} \quad (4.7)$$

4.1.2 การทดสอบแบบลัดวงจร (short-circuit test)

การทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลง (copper loss) ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด การทดสอบแบบนี้จะทำการต่อวงจรเครื่องมือวัดและแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดแรงสูงและลัดวงจรทางด้านขดลวดแรงต่ำด้วยตัวนำขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 การทดสอบทำโดยปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแรงสูงขึ้นจนกระทั่งแอมป์มิเตอร์สามารถอ่านค่ากระแสได้เต็มพิกัดทางด้านแรงสูงของหม้อแปลง แล้วทำการอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์และวัตต์มิเตอร์ วงจรสมมูลของการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร

จากการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบ คือ กระแส (I_{SC}) แรงดัน (V_{SC}) และกำลังไฟฟ้า (P_{SC}) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดลองสามารถนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล (R_{01}) รีแอคแตนซ์สมมูล (X_{01}) และอิมพีแดนซ์สมมูล (Z_{01}) ได้ดังต่อไปนี้

ค่าที่อ่านได้จากการทดลอง คือ P_{sc}, V_{sc} และ I_{sc} ดังนั้น สมการหาค่ากำลังไฟฟ้า คือ

$$P_{SC} = I_{SC}^2 \cdot R_{01} \tag{4.8}$$

ย้ายข้างสมการหาค่า R_{01} ได้ จาก

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} \tag{4.9}$$

และสามารถหาค่า Z_{01} ได้ จาก

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \tag{4.10}$$

เมื่อ หาค่า Z_{01} ได้แล้ว ก็สามารถหาค่า X_{01} ได้ ดังต่อไปนี้

$$Z_{01}^2 = R_{01}^2 + X_{01}^2 \tag{4.11}$$

$$X_{01}^2 = Z_{01}^2 - R_{01}^2 \tag{4.12}$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} \tag{4.13}$$

ตัวอย่างที่ 4.1 ทำการทดสอบหม้อแปลงขนาด 500/250 V เครื่องหนึ่ง ได้ข้อมูลดังนี้

เครื่องมือวัด	Open Circuit Test (วัดค่าต่าง ๆ ทางด้านแรงต่ำ)	Short Circuit Test (วัดค่าต่าง ๆ ทางด้านแรงสูง)
โวลต์มิเตอร์	250 V	20 V
แอมป์มิเตอร์	1 A	12 A
วัตต์มิเตอร์	80 W	100 W

จากข้อมูลข้างต้นจงคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อเขียนวงจรสมมูลของหม้อแปลงทั้งตัวโดยคิดทางด้านแรงต่ำ

วิธีทำ ขณะทดสอบแบบ Open Circuit หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

$$P_{OL} = V_{OL} \cdot I_{OL} \cdot \cos\theta_{OL}$$

$$80 = 250 \times 1 \times \cos\theta_{OL}$$

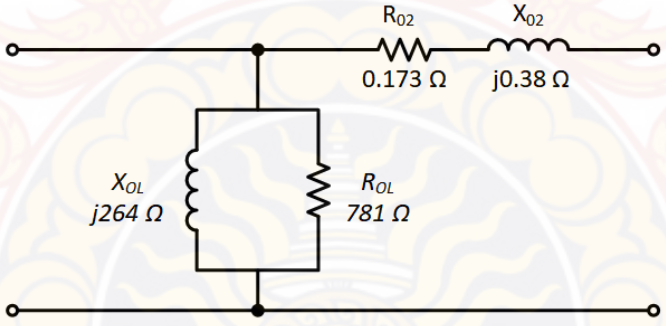
$$\cos\theta_{OL} = \frac{80}{250} = 0.32$$

$$\theta_{OL} = \cos^{-1} 0.32 = 71.337^{\circ}$$
$$\sin\theta_{OL} = \sin 71.337 = 0.947$$
$$I_{h+e} = I_{OL} \cdot \cos\theta_{OL} = 1 \times 0.32 = 0.32 \text{ A}$$
$$I_{\phi} = I_{OL} \cdot \sin\theta_{OL} = 1 \times 0.947 = 0.947 \text{ A}$$
$$R_{OL} = \frac{V_{OL}}{I_{h+e}} = \frac{250}{0.32} = 781 \ \Omega$$
$$X_{OL} = \frac{V_{OL}}{I_{\phi}} = \frac{250}{0.947} = 264 \ \Omega$$

ขณะทดสอบแบบ Short Circuit หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

$$P_{SC} = I_1^2 R_{01}$$
$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_1^2} = \frac{100}{144} = 0.69 \ \Omega$$
$$R_{02} = \frac{R_{01}}{a^2} = \frac{0.69}{4} = 0.173 \ \Omega$$
$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_1} = \frac{20}{12} = 1.67 \ \Omega$$
$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{1.67^2 - 0.69^2} = 1.52 \ \Omega$$
$$X_{02} = \frac{X_{01}}{a^2} = \frac{1.52}{4} = 0.38 \ \Omega$$

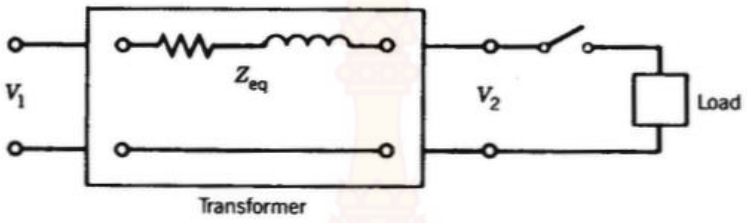
นำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มาเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ ดังนี้



4.2 โวลเตจเรกูเลชัน (voltage regulation)

ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้านั้นโหลดที่ต่ออยู่ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่ ถูกออกแบบมาให้ใช้งานในขณะที่แรงดันไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ในความเป็นจริงแล้วขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกระแสให้กับโหลด แรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ภายในของหม้อแปลงเอง จากวงจรสมมูล รูปที่ 4.5 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (Z_{eq}) ซึ่งสมมติว่าเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่ภายในหม้อแปลง ถ้ายังไม่มีการต่อโหลดให้กับหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลง คือ

$$V_{NL} = \frac{V_1}{a} \tag{4.14}$$



รูปที่ 4.5 โวลเตจเรกูเลชัน

จากรูปที่ 4.5 หากทำการปิดสวิตช์เพื่อต่อวงจรโหลดให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงจะเปลี่ยนไปเป็น

$$V_2 = V_{NL} \pm \Delta V_2 \tag{4.15}$$

แรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ขึ้นอยู่กับสภาพของโหลดที่นำมาต่อ โดยความเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกิดจากแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ภายในของหม้อแปลง ถ้าแรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงมากจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำมาต่อเกิดปัญหาขึ้นได้ ยกตัวอย่างเช่น โหลดประเภทหลอดไฟฟ้าจะมีความสว่างลดลงในขณะใช้งาน เราสามารถทำให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันลดลงได้ด้วยการออกแบบหม้อแปลงให้มีค่าอิมพีแดนซ์น้อย ๆ

เราเรียกความแตกต่างของแรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะยังไม่มีโหลดกับขณะมีโหลดว่า “โวลเตจเรกูเลชัน” ซึ่งค่าโวลเตจเรกูเลชันนี้สามารถคำนวณในรูปของเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับแรงดันขณะยังไม่มีโหลดได้ดังนี้

$$Voltage\ \ regulation\ \ (V_{reg}) = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\ \ \% \tag{4.16}$$

เมื่อ

V_{NL} คือ แรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะยังไม่มีโหลด

V_{FL} คือ แรงดันที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด

4.3 เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ (% impedance voltage; Z_k)

เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แสดงในรูปของร้อยละ (percentage; %) ของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสเต็มพิกัดของหม้อแปลง เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร ณ ความถี่ที่กำหนด โดยทำการลัดวงจรขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลง แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขดลวดแรงสูงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดแรงต่ำเต็ม 100% ของพิกัด ขนาดของแรงดันทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเต็มพิกัด (V_{SC}) ของหม้อแปลงนี้ จะเรียกว่า

อิมพีแดนซ์โวลเตจ ซึ่งเมื่อหารด้วยแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (V_{rate}) ก็จะกลายเป็นค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ (%Z_k) ดังสมการต่อไปนี้

$$\%Z_k = \frac{V_{SC}}{V_{rated}} \times 100 \qquad (4.17)$$

เมื่อ

V_{SC} คือ แรงดันที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเต็มพิกัด อ่านได้จากมิเตอร์

V_{rated} คือ พิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า

<u>ตัวอย่างที่</u> 4.2 ทำการทดสอบแบบลัดวงจรหม้อแปลง 22 kV/416-240 V อ่านค่าแรงดันลัดวงจรจากโวลต์มิเตอร์ได้ 850 V จงหาค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์

วิธีทำ

$$\%Z_k = \frac{V_{SC}}{V_{rated}} \times 100$$

$$\%Z_k = \frac{850}{22,000} \times 100 \quad = \quad 3.86\,\%$$

โดยทั่วไปการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจรนี้จะดำเนินการภายใต้สภาวะการระบายความร้อนปกติของหม้อแปลง การเลือกใช้หม้อแปลงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ สูงหรือต่ำนั้น แล้วแต่กรณี คือ

1) กรณีเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจต่ำ จะทำให้ค่าโวลเตจเรกูเลชัน (voltage regulation) ของหม้อแปลงดี เวลาใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันจะไม่ตกมาก เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ภายในของหม้อแปลงต่ำ แต่กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะสูง ทำให้อุปกรณ์ป้องกันต้องมีความสามารถในการตัดวงจรสูง หมายถึงต้องทนกระแสลัดวงจรได้สูง ซึ่งจะมีราคาจะแพง เราควรติดตั้งหม้อแปลงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจต่ำในระบบจำหน่ายที่มีระยะทางไกล ๆ

2) กรณีเลือกใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจสูง จะทำให้ค่าโวลเตจเรกูเลชัน (voltage regulation) ของหม้อแปลงไม่ดี จะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกมาก เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ภายในของหม้อแปลงสูง แต่กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการตัดกระแสลัดวงจรสูงมาก ซึ่งราคาก็จะไม่แพง การติดตั้งหม้อแปลงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจสูง ค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงจะทำให้การสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่อาจมีปัญหาแรงดันตกเกิดขึ้น

4.4 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer losses)

ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (iron losses or core losses) และค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper losses)

4.4.1 ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (iron losses or core losses)

การสูญเสียนี้เป็นการรวมกันระหว่างค่าความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss)

(1) การสูญเสียอีสเทอรีซีส เกิดขึ้นเนื่องจากการกลับไปกลับมาของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กของหม้อแปลง เพราะว่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของหม้อแปลงนี้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจึงเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตลอดเวลาด้วยเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้โมเลกุลของแกนเหล็กเกิดการเสียดสีกัน เป็นเหตุให้เกิดความร้อนขึ้น การสูญเสียนี้เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซีส การสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาตร เกรดของแกนเหล็ก ค่าความหนาแน่นสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็ก และความถี่ของการกลับไปกลับมาของเส้นแรงแม่เหล็ก การสูญเสียเนื่องจากฮีสเทอรีซีสนั้นสามารถทำให้ลดลงได้ โดยการเลือกใช้แกนเหล็กของหม้อแปลงเป็นเหล็กที่มีสัมประสิทธิ์ของฮีสเทอรีซีสต่ำ (low hysteresis coefficient) โดยทั่วไปแล้วจะเลือกใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนพิเศษ (special silicon steel)

(2) การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้ขดลวดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับไฟฟ้ากระแสสลับนั้น เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับแกนเหล็กของหม้อแปลง ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแกนเหล็ก และมีกระแสไหลวนอยู่ในแกนเหล็ก เนื่องจากแกนเหล็กมีความต้านทาน กระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้น เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน การสูญเสียนี้จะมีมากถ้าใช้แกนเหล็กแบบตัน การลดการสูญเสียทำได้โดยการใช้แผ่นเหล็กบาง ๆ เคลือบฉนวนแล้วอัดซ้อนเข้าด้วยกันเพื่อตัดทางเดินของกระแสไฟฟ้า

4.4.2 ความสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper losses)

ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงนั้นเกิดจากค่าความต้านทานของขดลวดของหม้อแปลง ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานของขดลวดที่เราทราบค่าและจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสที่จ่ายให้กับโหลด

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (4.18)$$

$$P_{cu} = I_1^2 R_{01} \quad (4.19)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_{02} \quad (4.20)$$

1. กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดที่พิกัด

$$P_{cu} = I_2^2 R_{02} \quad (4.21)$$

2. กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร้อยละ 50 ของพิกัด แสดงว่าจ่ายกระแส I_2 ลดลงครึ่งหนึ่ง ค่าความสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงจะลดลงเหลือเพียง 1/4 เท่าจากเดิม หรือเหลือเพียงร้อยละ 25 ของความสูญเสียในขดลวดที่เกิดขึ้นขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด

$$P_{cu} = \left[\frac{I_2}{2}\right]^2 R_{02} \quad (4.22)$$

$$P_{cu} = \left[\frac{1}{2}\right]^2 \cdot I_2^2 \cdot R_{02} \quad (4.23)$$

$$P_{cu} = \left[\frac{1}{2}\right]^2 \cdot P_{cu} \quad (4.24)$$

$$P_{cu} = \frac{P_{cu}}{4} \quad (4.25)$$

3. กรณีหม้อแปลงจ่ายโหลดร้อยละ 75 ของพิกัด ความสูญเสียในขดลวดที่เกิดขึ้นขณะจ่ายโหลดสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$P_{cu} = \left[\frac{3}{4} I_2\right]^2 \cdot R_{02} \quad (4.26)$$

$$P_{cu} = \left[\frac{3}{4}\right]^2 \cdot I_2^2 \cdot R_{02} \quad (4.27)$$

$$P_{cu} = \left[\frac{3}{4}\right]^2 \cdot P_{cu} \quad (4.28)$$

ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนี้เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงได้รับ ถ้าหม้อแปลงต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กก็จะเป็นค่าคงที่ด้วย

4.5 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer efficiency)

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง เนื่องจากมีค่าความสูญเสียน้อย เพราะว่าหม้อแปลงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ไม่มีการเคลื่อนที่จึงทำให้ไม่มีค่าความสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนที่ เช่น แรงเสียดทาน และแรงต้านของลมเหมือนในเครื่องกลไฟฟ้าแบบที่มีการเคลื่อนที่แบบอื่น เช่น มอเตอร์, เจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น หม้อแปลงที่มีการออกแบบที่ดีอาจมีประสิทธิภาพสูงได้ถึงร้อยละ 99 โดยประสิทธิภาพของหม้อแปลงสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{output \quad power\ (P_{out})}{input \quad power\ (P_{in})} \quad (4.29)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + losses} \quad (4.30)$$

ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้า ก็คือ ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (core loss; P_{core}) และค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (copper loss; P_{cu}) ดังนั้น

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{core} + P_{cu}} \quad (4.31)$$

4.5.1 ประสิทธิภาพสูงสุด (maximum efficiency)

การเกิดประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาวะที่ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง เท่ากับ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ($P_{cu} = P_{core}$) ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จาก

วิธีพิสูจน์

พิจารณาด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ $P_{in} = V_1 I_1 \cos\theta_1$

$$\eta = \frac{P_{in} - losses}{P_{in}} = \frac{V_1 I_1 \cos\theta_1 - losses}{V_1 I_1 \cos\theta_1}$$

$$= \frac{V_1 I_1 \cos\theta_1 - \left[I_1^2 R_{01} + P_{core} \right]}{V_1 I_1 \cos\theta_1}$$

$$= \frac{V_1 I_1 \cos\theta_1}{V_1 I_1 \cos\theta_1} - \frac{I_1^2 R_{01}}{V_1 I_1 \cos\theta_1} - \frac{P_{core}}{V_1 I_1 \cos\theta_1}$$

$$\therefore \eta = 1 - \frac{I_1 R_{01}}{V_1 \cos\theta_1} - \frac{P_{core}}{V_1 I_1 \cos\theta_1}$$

ทำการ Differentiate ทั้งสองด้านโดยเปรียบเทียบกับ I_1 ซึ่งเป็นตัวแปร ได้

$$\frac{d\eta}{dI_1} = 0 - \frac{R_{01}}{V_1 \cos\theta_1} + \frac{P_{core}}{V_1 I_1^2 \cos\theta_1}$$

ประสิทธิภาพจะสูงสุดได้ต่อเมื่อ $\frac{d\eta}{dI_1} = 0$ ดังนั้นสมการข้างต้นจึงลดรูปลงเป็น

$$\therefore \quad \frac{R_{01}}{V_1 \cos\theta_1} = \frac{P_{core}}{V_1 I_1^2 \cos\theta_1}$$

$$\frac{R_{01}}{V_1 \cos\theta_1} \times V_1 I_1^2 \cos\theta_1 = P_{core}$$

$$\therefore \quad I_1^2 R_{01} = P_{core}$$

นั่นคือ $P_{cu} = P_{core}$

เมื่อ $P_{cu} = I_1^2 R_{01} = I_2^2 R_{02}$

กระแสที่หม้อแปลงจ่ายให้กับโหลด คือ I_2 ดังนั้นประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ

$$P_{core} = I_2^2 R_{02}$$

$$\therefore I_2 = \sqrt{\frac{P_{core}}{R_{02}}} \qquad (4.32)$$

หรือ $$I_1 = \sqrt{\frac{P_{core}}{R_{01}}} \qquad (4.33)$$

4.5.2 ประสิทธิภาพตลอดวัน (all-day efficiency)

การใช้งานหม้อแปลงจำหน่าย (distribution transformer) นั้น ในช่วงเวลาหนึ่งวันอาจมีการใช้งานเพียงไม่กี่ชั่วโมง แต่การสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงนั้นเกิดขึ้นตลอดเวลาที่มีการต่อไฟให้กับหม้อแปลง ไม่ว่าหม้อแปลงจะจ่ายโหลดหรือไม่ก็ตาม การคำนวณค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ก็คือ การคิดประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าที่คิดเฉพาะช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งหรือคิดที่การจ่ายไฟเฉพาะค่าใดค่าหนึ่ง โดยไม่คำนึงถึงช่วงเวลาที่หม้อแปลงไม่ได้ใช้งานจึงทำให้ประสิทธิภาพที่คำนวณได้มีค่าสูง

แต่เมื่อพิจารณาการใช้งานหม้อแปลงในความเป็นจริงแล้วจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงนั้นไม่ได้ถูกใช้งานตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงจากการใช้งานจริงในช่วงเวลาตลอดวันที่หม้อแปลงถูกใช้งาน ซึ่งประสิทธิภาพตลอดวันของหม้อแปลงก็คือ อัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ไปจริง ๆ ในแต่ละวันต่อค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ได้รับในหนึ่งวัน โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_d = \frac{P_{out} \times h}{(P_{out} \times h) + (P_{core} \times 24) + (P_{cu} \times h)} \qquad (4.34)$$

เมื่อ

P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงจ่ายออก

h คือ จำนวนชั่วโมงที่ใช้งานในหนึ่งวัน

<u>ตัวอย่างที่</u> 4.3 ทำการทดสอบหม้อแปลง 1 เฟส 10 kVA, 2,200/220 V, 60 Hz ได้ผลดังนี้

Instrument	Open-Circuit Test (high-voltage side open)	Short-Circuit (low-voltage side shorted)
Voltmeter	220 V	150 V
Ammeter	2.5 A	4.55 A
Wattmeter	100 W	215 W

จากข้อมูลข้างต้นจงหาค่าต่อไปนี้

(ก) คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆเพื่อนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลโดยประมาณคิดทางด้านแรงต่ำและด้านแรงสูง

(ข) คำนวณหากระแสที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับกระแสที่พิกัด

(ค) คำนวณหาค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะทดสอบแบบไม่มีโหลดและขณะทดสอบแบบลัดวงจร

วิธีทำ

$$I_1 = \frac{10,000}{2,200} = 4.55 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{10,000}{220} = 45.5 \text{ A}$$

(ก) หาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบแบบไม่มีภาระ

$$P_{OL} = \frac{V_{OL}^2}{R_{OL}}$$

$$R_{OL} = \frac{220^2}{100} = 484 \ \Omega$$

$$I_{h+e} = \frac{V_{OL}}{R_{OL}} = \frac{220}{484} = 0.45 \text{ A}$$

$$I_\phi = \sqrt{I_{OL}^2 - I_{h+e}^2} = \sqrt{2.5^2 - 0.45^2} = 2.46 \text{ A}$$

$$X_{OL} = \frac{V_{OL}}{I_\phi} = \frac{220}{2.46} = 89.4 \ \Omega$$

กรณีเขียนวงจรสมมูลทางด้านแรงสูง

$$a = \frac{2,200}{220} = 10$$

$$R_{OL} = 10^2 \times 484 = 48,400 \ \Omega$$

$$X_{OL} = 10^2 \times 89.4 = 8,940 \ \Omega$$

ใช้ข้อมูลจากการทดสอบแบบลัดวงจร

$$P_{SC} = I_{SC}^2 R_{01}$$

$$R_{01} = \frac{215}{4.55^2} = 10.4 \ \Omega$$

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{150}{4.55} = 32.97 \ \Omega$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} = \sqrt{32.97^2 - 10.4^2} = 31.3 \ \Omega$$

กรณีเขียนวงจรสมมูลทางด้านแรงต่ำ

$$R_{02} = \frac{R_{01}}{a^2} = \frac{10.4}{10^2} = 0.104 \ \Omega$$

$$X_{02} = \frac{X_{01}}{a^2} = \frac{31.3}{10^2} = 0.313 \ \Omega$$

(ข) จากการทดสอบแบบไม่มีภาระกระแสที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก คือ

$$I_\phi = 2.5 \text{ A}$$

$$\frac{2.5}{45.5} \times 100 = 5.5\% \quad \text{ของกระแสที่พิกัด}$$

(ค) หาเพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะทำการทดสอบแบบไม่มีโหลด

$$\cos\theta = \frac{P}{V \cdot I}$$
$$= \frac{100}{220 \times 2.5} = 0.182$$

เพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร

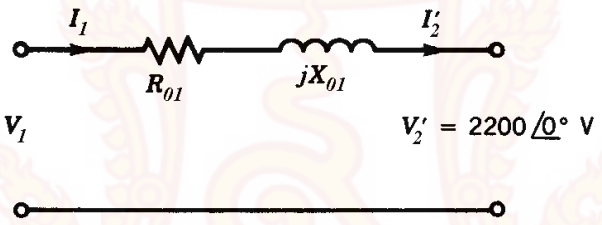
$$\cos\theta = \frac{P}{V \cdot I}$$
$$= \frac{215}{150 \times 4.55} = 0.315$$

<u>ตัวอย่างที่</u> 4.4 จากหม้อแปลงในตัวอย่างที่ 4.3 จงหาค่าโวลต์เตจเรกูเลชัน ตามเงื่อนไขของการจ่ายโหลดต่อไปนี้

(ก) จ่ายโหลดร้อยละ 75 ของพิกัด ที่ 0.6 PF Lagging

(ข) จ่ายโหลดร้อยละ 75 ของพิกัด ที่ 0.6 PF Leading

(ค) เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเงื่อนไขทั้งสอง



วิธีทำ พิจารณาวงจรสมมูลที่คิดทางปฐมภูมิ จ่ายโหลดร้อยละ 75 ของพิกัดจะได้

$$I_1 = I_2' = 0.75 \times 4.55 = 3.41 \text{ A}$$
$$\cos\theta_S = 0.6$$
$$\theta_S = 53.13^\circ$$

(ก) จ่ายโหลดที่ร้อยละ 75 ของพิกัด 0.6 PF Lagging, $\theta_S = -53.13^\circ$

$$I_1 = 3.41\angle -53.13^\circ$$
$$V_1 = V_2' + I_2' Z_{01}$$
$$= 2,200 + 3.41\angle -53.13^\circ (10.4 + j31.3)$$
$$= 2,200 + 3.41\angle -53.13^\circ \times 32.98\angle 71.62^\circ$$
$$= 2,200 + 112.46\angle 18.49^\circ$$
$$= 2,200 + 106.65 + j35.67$$
$$= 2,306.65 + j35.67$$
$$= 2,306.93\angle 0.89^\circ \text{ V}$$

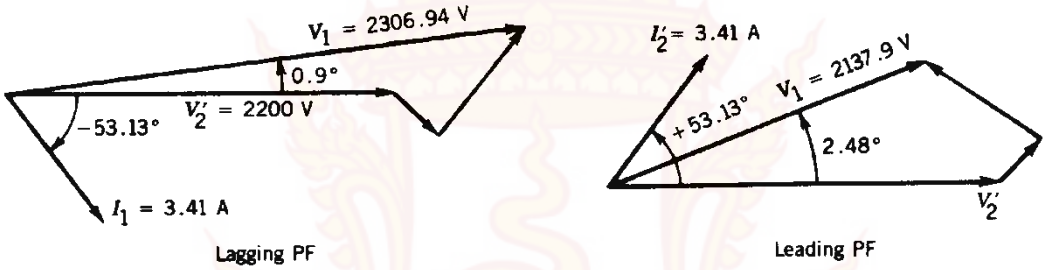
$$\textit{Voltage regulation} = \frac{2,306.93 - 2,200}{2,200} \times 100\% = 4.86 \%$$

(ข) จ่ายโหลดที่ร้อยละ 75 ของพิกัด 0.6 PF Leading, $\theta_S = 53.13^\circ$

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2' + I_2' Z_{01} \\ &= 2,200 + 3.41\angle 53.13^\circ (10.4 + j31.3) \\ &= 2,200 + 3.41\angle 53.13^\circ \times 32.98\angle 71.62^\circ \\ &= 2,200 + 112.46\angle 124.75^\circ \\ &= 2,200 - 64.10 + j92.40 \\ &= 2,135.9 + j92.40 \\ &= 2,137.89\angle 2.48^\circ \quad \text{V} \end{aligned}$$

$$Voltage \quad regulation = \frac{2,137.9 - 2,200}{2,200} \times 100\% = -2.82 \quad \%$$

(ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรม



ตัวอย่างที่ 4.4 จากข้อมูลของหม้อแปลง ในตัวอย่างที่ 3.6 จงหา

(ก) ประสิทธิภาพของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดที่ร้อยละ 75 ของพิกัด 0.6 PF

(ข) ขณะเกิดประสิทธิภาพสูงสุดกำลังไฟฟ้าส่งออกของหม้อแปลงเป็นเท่าไร และประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงเท่ากับกี่เปอร์เซ็นต์

วิธีทำ

(ก) หาประสิทธิภาพของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดที่ร้อยละ 75 ของพิกัด 0.6 PF

$$\begin{aligned} P_{out} &= V_2 I_2 \cos\theta_2 \\ &= 0.75 \times 10,000 \times 0.6 \\ &= 4,500 \quad \text{W} \\ P_{core} &= 100 \quad \text{W} \\ P_{cu} &= I_1^2 R_{01} = (0.75 \times 4.55)^2 \times 10.4 = 121 \quad \text{W} \\ \eta &= \frac{4,500}{4,500 + 100 + 121} \times 100\% \\ &= 95.32 \quad \% \end{aligned}$$

(ข) หากำลังไฟฟ้าขาออกที่ประสิทธิภาพสูงสุด และค่าประสิทธิภาพสูงสุด

$$P_{core} = P_{cu}, \quad PF = \cos\theta = 1$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_{core}}{R_{02}}} = \sqrt{\frac{100}{0.104}} = 31 \text{ A}$$

$$P_{out} = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\theta_2$$

$$= 220 \times 31 \times 1 = 6{,}820 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu} + P_{core}} \times 100\%$$

$$= \frac{6{,}820}{6{,}820 + 100 + 100} \times 100\%$$

$$= 97.15 \%$$

สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การทดสอบและการหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทำงานและเขียนวงจรสมมูลของหม้อแปลง โดยการทดสอบหลักประกอบด้วย การทดสอบแบบไม่มีโหลดหรือเปิดวงจร ซึ่งใช้หาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กและพารามิเตอร์ของแขนงกระตุ้น และ การทดสอบแบบลัดวงจร ซึ่งใช้หาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง รวมถึงค่าความต้านทาน รีแอคแตนซ์ และอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลง

ผลจากการทดสอบสามารถนำไปใช้คำนวณ โวลเตจเรกูเลชัน เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ และค่าความสูญเสียของหม้อแปลง ซึ่งความสูญเสียหลักแบ่งเป็นความสูญเสียในแกนเหล็กและความสูญเสียในขดลวดทองแดง โดยค่าดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออกกับกำลังไฟฟ้าขาเข้า และจะมีค่าสูงสุดเมื่อ ความสูญเสียในขดลวดทองแดงเท่ากับความสูญเสียในแกนเหล็ก นอกจากนี้ สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายยังควรพิจารณา ประสิทธิภาพตลอดวัน (all-day efficiency) ซึ่งคำนึงถึงพลังงานที่จ่ายจริงและความสูญเสียตลอดช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อสะท้อนการใช้งานจริงได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4

1. หม้อแปลงไฟฟาเฟสเดียว มีอัตราสวนของขดลวด เทากับ 6 : 1 ความต้านทานและรีแอคแตนซรั่วไหลทางด้านแรงดันสูงเป็น 0.9 Ω และ 5 Ω ด้านแรงดันต่ำเป็น 0.03 Ω และ0.13 Ω ตามลำดับ หากป้อนแรงดัน 330 V 50 Hz ที่ด้านแรงดันสูง จงหากระแสลัดวงจรของทั้งสองด้านและกำลังสูญเสียเนื่องจากขดลวด (ตอบ 33.4 A, 100.4 A, 2,208.8 W)
2. หม้อแปลงไฟฟาเฟสเดียว มีอัตราสวนแรงดัน 10 : 1 ค่าอิมพีแดนซสมมูลเมื่อพิจารณาด้านแรงดันสูง 11.98 Ω จะต้องป้อนแรงดันที่ด้านแรงดันสูงเทาใด เพื่อให้ได้กระแสลัดวงจรด้านแรงดันต่ำ 200 A โดยไม่คิดคากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (ตอบ 239.6 V)

3. หม้อแปลงเฟสเดียวเครื่องหนึ่ง ใช้กับความถี่ 50 Hz มีอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวด เท่ากับ 5 มีค่าความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากับ 0.8 Ω และ 0.12 Ω รีแอคแตนซ์ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากับ 4 Ω และ 0.12 Ω ตามลำดับ จงหา
   ก) แรงดันด้านปฐมภูมิที่ทำให้กระแสไหลในด้านทุติยภูมิ 180 A เมื่อลัดวงจร (ตอบ 36 A)
   ข) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะลัดวงจร (ตอบ 0.1825)
4. หม้อแปลงเฟสเดียว 5 kVA 220/1,000 V 50 Hz มีพารามิเตอร์ R_O = 3,800 Ω, X_O = 263 Ω หากนำไปทดสอบแบบเปิดวงจรด้วยค่าแรงดันพิกัด แอมมิเตอร์และวัตตมิเตอร์จะอานคาได้เทาใด (ตอบ 0.8385 A, 12.74 W)
5. จากการทดสอบหม้อแปลงเฟสเดียวพิกัด 10 kVA 2,200/220 V 50 Hz ได้ข้อมูลดังนี้

เครื่องมือวัด	**Open-Circuit Test (เปิดวงจรทางด้านแรงสูง)**	**Short-Circuit Test (ลัดวงจรทางด้านแรงต่ำ)**
Voltmeter	220 V	150 V
Ammeter	2.5 A	4.55 A
Wattmeter	100 W	215 W

จากข้อมูลข้างต้นจงหา
   ก) กระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิที่พิกัด
   ข) R_O และ X_O เมื่อทำการทดสอบแบบ Open-Circuit
   ค) R_{02} และ X_{02} เมื่อทำการลัดวงจรทางด้านแรงต่ำ
   ง) เขียนวงจรสมมูลของหม้อแปลงทั้งตัว
   จ) เปอร์เซ็นต์ของกระแสที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (I_ϕ) เมื่อเทียบกับกระแสที่พิกัด
   ฉ) เพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะทำการทดสอบแบบ Short-Circuit และ Open-Circuit
6. หม้อแปลงเฟสเดียวขนาด 20 kVA 2,000/250 V มีค่า core loss เท่ากับ 300 W มีค่า copper loss ที่พิกัดเท่ากับ 320 W จงหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลดเต็มพิกัดและครึ่งหนึ่งของพิกัดที่
   ก) Unity PF (ตอบ 96.34 %)
   ข) 0.8 PF Lagging (ตอบ 95.47 %)
7. หม้อแปลง 12 kVA 4,000/400 V มีค่าความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากับ 13 Ω และ 0.15 Ω ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล 20 Ω และ 0.25 Ω ตามลำดับ ค่ารีแอคแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็กเท่ากับ 6,000 Ω ค่าความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก เท่ากับ 12,000 Ω จงหา
   ก) ค่าความต้านทานและรีแอคแตนซ์สมมูลที่ย้ายไปคิดทางด้านปฐมภูมิ (ตอบ 28 Ω, 45 Ω)
   ข) กระแสไหลเข้าหม้อแปลงเมื่อขดลวดด้านทุติยภูมิเปิดวงจร (ตอบ $0.75\angle -63.5^\circ$A)

ค) กระแสไหลเข้าหม้อแปลงเมื่อขดลวดทุติยภูมิจ่ายกระแสโหลด 30 A ที่ 0.8 PF lagging

(ตอบ $3.68\angle -42.07^\circ$ A)

8. หม้อแปลงไฟฟ้า 2,200/250 V 1 เฟส 25 kVA มีค่าความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิเป็น 1.5 Ω และ 0.019 Ω ตามลำดับ เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดที่ 0.8 PF Lagging และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 260 W จงคำนวณหา

ก) กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด (ตอบ 381.1 W)

ข) กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (ตอบ 647.1 W)

ค) ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า (ตอบ 96.87 %)

9. หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 50 kVA ขนาดแรงดัน 2,400/240 V มีค่าความต้านทานสมมูลทางด้านทุติภูมิ 0.015 Ω เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 173 W จงคำนวณหา

ก) กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (ตอบ 107.39 A)

ข) ค่า kVA ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (ตอบ 25.775 kVA)

ค) ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.8 PF Lagging (ตอบ 98.35 %)

10. หม้อแปลงขนาด 5kVA เครื่องหนึ่งเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดมีการสูญเสียในแกนเหล็ก 35 W และการสูญเสียในขดลวดทองแดง 40 W จงคำนวณหาประสิทธิภาพตลอดวัน เมื่อลักษณะการจ่ายโหลดของหม้อแปลงใน 24 ชั่วโมง เป็นดังนี้

- ไม่มีโหลดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- จ่ายโหลด 50% ของพิกัดที่ 0.5 PF Lagging เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- จ่ายโหลดเต็มพิกัดที่ 0.8 PF Lagging เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

(ตอบ 97 %)

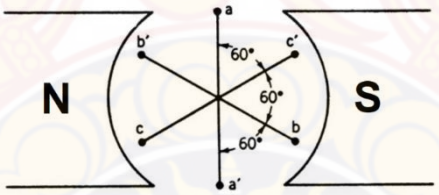
5 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

3-ϕ Transformer

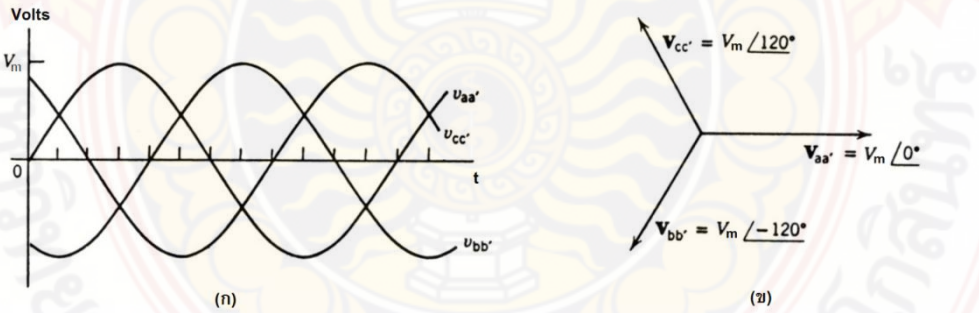
หม้อแปลง 3 เฟส หรือ 3-ϕ เป็นหม้อแปลงที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า ระบบสายส่งไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้า และใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม การใช้งานระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีข้อได้เปรียบทางไฟฟ้ามากกว่าการใช้ระบบไฟฟ้าเฟสเดียว และเมื่อพิจารณาถึงหม้อแปลง 3 เฟส ก็คือ หม้อแปลงที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดที่มีเฟสต่างกัน 120° หลักการทำงานของหม้อแปลง 3 เฟส มีดังต่อไปนี้

5.1 แรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส รูปที่ 5.1 ประกอบด้วยขดลวด 3 ชุด คือ ขดลวด aa′ ขดลวด bb′ และขดลวด cc′ วางทำมุมกัน 120 องศา หากหมุนขดลวดทั้ง 3 ขด ให้เคลื่อนที่ตัดกับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดทั้ง 3 ขด ซึ่งถ้าขดลวดมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ จะได้แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากัน แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_m) จะเกิดขึ้นในเวลาที่ต่างกัน ดังรูปที่ 5.2 (ก) การเกิดขึ้นในเวลาที่ต่างกันนั่นก็คือมีมุมเฟสที่ต่างกัน นั่นเอง



รูปที่ 5.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส



รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส และเฟสเซอร์ไดอะแกรม

เราสามารถเขียนสมการของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส รูปที่ 5.2 (ก) ในแต่ละเฟสได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{aa'} = V_m \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

$$V_{bb'} = V_m \sin(\omega t - 120°) \quad (5.2)$$

$$V_{cc'} = V_m \sin(\omega t - 240°) \quad (5.3)$$

เขียนในรูปของเฟสเซอร์ รูป 5.2 (ข) ได้เป็น

$$V_{aa'} = V_m \angle 0° \quad (5.4)$$

$$V_{bb'} = V_m \angle -120° \quad (5.5)$$

$$V_{cc'} = V_m \angle -240° = V_m \angle 120° \quad (5.6)$$

ซึ่งผลรวมของแรงดันชั่วขณะใด ๆ คือ 0

$$V_{aa'} + V_{bb'} + V_{cc'} = V_m \angle 0° + V_m \angle -120° + V_m \angle 120° = 0 \quad (5.7)$$

5.2 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส นั้นสามารถสร้างได้ 2 แบบ คือ จากการนำหม้อแปลง 1 เฟส 3 เครื่องมาต่อร่วมกัน หรือออกแบบให้ขดลวดอยู่ภายในเครื่องเดียวกันโดยมีขดลวด 3 ชุดขนาดเท่ากัน ติดตั้งอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน ประโยชน์ของการสร้างหม้อแปลง 3 เฟส แบบขดลวดอยู่ในเครื่องเดียวกันนั้นก็คือในพิกัด kVA เท่ากัน จะมีขนาดเล็กกว่า ถูกกว่าและเบากว่าการใช้หม้อแปลง 1 เฟส 3 เครื่องมาต่อร่วมกัน เพราะว่าสามารถใช้งานลวดทองแดงและแกนเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น วิธีการต่อขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงนั้นเหมือนกันไม่ว่าจะเป็นแบบ 3 เฟสเครื่องเดียว หรือแบบ 1 เฟส 3 เครื่องแยกกัน

5.2.1 การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟส

การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟส ให้เป็นแบบ สตาร์-เดลตา ก็คือ หม้อแปลง 3 เฟส 1 เครื่องจะต้องมีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ อย่างละ 3 ชุด สตาร์ (Y) หรือ เดลตา (Δ) ก็คือวิธีการเชื่อมต่อของขดลวดทั้ง 3 ชุดนี้ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่จะขึ้นอยู่กับการไหลของกระแส การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 เครื่องเข้าด้วยกันเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง จะมีมุมต่างเฟสกัน 120 องศา ขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟสจะถูกกำหนดชื่อของขดลวดปฐมภูมิทั้ง 3 ขด ด้วยอักษร A, B และ C และขดทุติยภูมิถูกกำหนดด้วยอักษร a, b และ c ซึ่งตามปกติแล้วขดลวดแต่ละขดจะมี 2 ปลาย คือด้านต้นทางและด้านปลายทาง เราใช้สัญลักษณ์กำกับที่ต้นทางของขดลวดแต่ละเฟสเป็น a, b, c และ a', b', c' คือปลายทางของขดลวด

5.2.2 รูปแบบการต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 เครื่อง ร่วมกันเป็นหม้อแปลง 3 เฟส

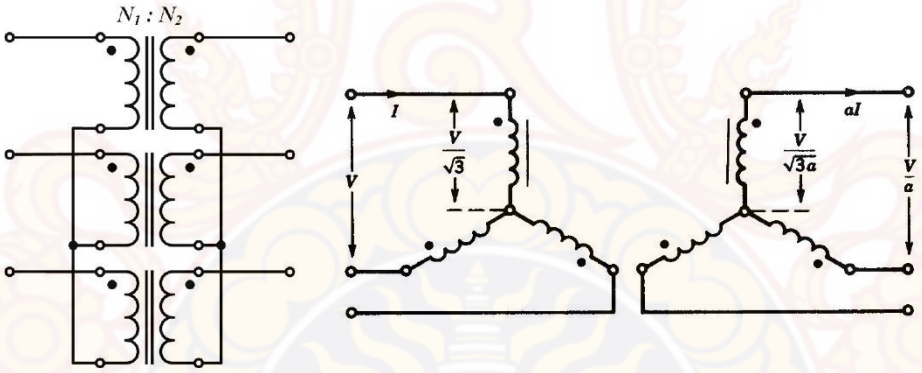
เราสามารถต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 เครื่องร่วมกันให้เป็นหม้อแปลง 3 เฟสได้ โดยสามารถต่อขดลวดของหม้อแปลงได้ 2 วิธี คือ แบบ สตาร์ (Star; Y) หรือแบบ เดลตา (Delta; Δ) ลักษณะการต่อขดลวดด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงให้เป็น 3 เฟสนั้น แบ่งเป็น 4 แบบ คือ Y-Δ , Δ-Y , Δ-Δ และ Y-

Y กำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงจ่ายออกนั้นเกิดจากการเฉลี่ยกันของหม้อแปลง 1 เฟส ทั้ง 3 เครื่อง ส่วนพิกัดของกระแสและแรงดันจะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลง การบอกชนิดของการต่อขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงนอกจากจะใช้ Y และ Δ แล้วเรายังสามารถใช้อักษรภาษาอังกฤษแทนได้ โดยทางด้านปฐมภูมิตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ Y แทนการต่อขดลวดแบบสตาร์ และ D แทนการต่อแบบเดลตา ส่วนการต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะแทนด้วยอักษรตัวพิมพ์เล็ก y และ d แทน คุณลักษณะของหม้อแปลงที่มีการต่อแบบต่าง ๆ กัน มีดังต่อไปนี้

Y-Y หรือ Yy	ขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Y และขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Y เช่นกัน
Δ-Δ หรือ Dd	ขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Δ และขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Δ เช่นกัน
Y-Δ หรือ Yd	ขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Y แต่ขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Δ
Δ-Y หรือ Dy	ขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Δ แต่ขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Y

5.2.3 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Y-Y

การต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Y-Y หรือ Yy คือ การต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์ หรือ Y ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ การต่อใช้งานแบบนี้สามารถใช้งานได้ดีในกรณีโหลดของหม้อแปลงเป็นโหลดสมดุล (Balance Load)



รูปที่ 5.3 การต่อขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Y-Y

ข้อดีของการต่อแบบแบบ Y-Y

1) การต่อขดลวดของหม้อแปลงแบบนี้ ต้องการจำนวนรอบต่อขดลวดน้อย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดแต่ละขดมีค่า $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่า ของแรงดันไฟฟ้าสาย ดังนั้นจึงมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ถูกกว่า

2) กระแสไลน์ (I_L) และกระแสเฟส (I_P) มีค่าเท่ากัน พื้นที่หน้าตัดของขดลวดมีขนาดใหญ่ ดังนั้นขดลวดจึงแข็งแรงสามารถทนทานต่อความเครียดที่เกิดขึ้นจากการรับโหลดหนัก หรือการลัดวงจรได้

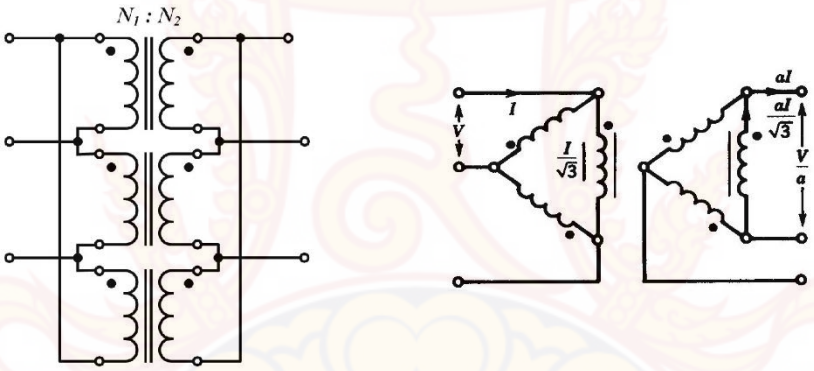
3) ขดลวดมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนน้อยเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดแต่ละขดมีค่า เพียง $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่า ของแรงดันไฟฟ้าสาย

ข้อเสียของการต่อแบบแบบ Y-Y

ในกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดไม่สมดุล และจุดต่อร่วมของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิไม่ได้ต่อลงดินจะทำให้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสได้ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน

5.2.4 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Δ-Δ

การต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Δ-Δ หรือ Dd คือ การต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลตา หรือ Δ ทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ การต่อแบบนี้โดยปกติใช้ในระบบที่มีแรงดันไม่สูงมากนัก การต่อแบบนี้มีความพิเศษ คือ เมื่อระบบสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ถึงแม้หม้อแปลงเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดความเสียหาย



รูปที่ 5.4 การต่อขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Δ-Δ

ข้อดีของการต่อแบบแบบ Δ-Δ

1) สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้คงที่มากแม้ในขณะที่จ่ายโหลดแบบไม่สมดุล

2) หากหม้อแปลงเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดความเสียหาย ก็ยังสามารถใช้งานต่อเนื่องไปได้แต่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าได้น้อยลง โดยการต่อใช้งานแบบ open-delta หรือ V-V

ข้อเสียของการต่อแบบแบบ Δ-Δ

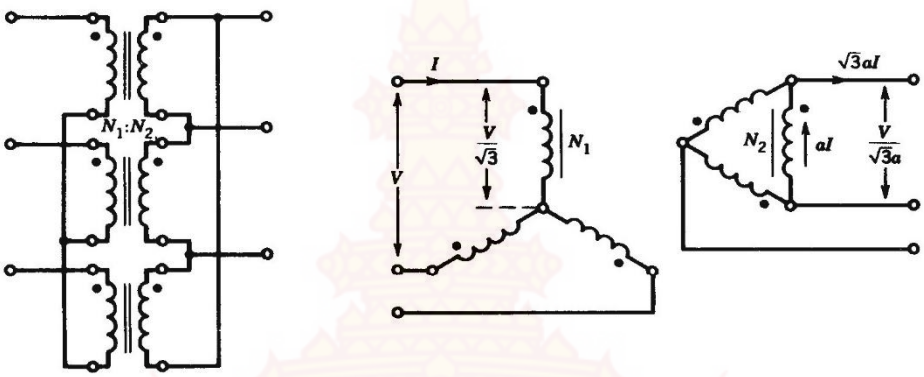
1) เมื่อเทียบกับการต่อแบบ Y-Y แล้ว ต้องใช้ฉนวนมากกว่า

2) ไม่มีจุดนิวทรัล หากไลน์ใดไลน์หนึ่งต่อลงดินจะเกิดการลัดวงจร

3) แรงดันสูงสุดระหว่างขดลวดและแกนเหล็กเท่ากับแรงดันไลน์

5.2.5 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Y-Δ

การต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Y-Δ หรือ Yd คือ การต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแบบสตาร์ หรือ Y และต่อขดลวดด้านทุติยภูมิแบบเดลตา หรือ Δ การต่อแบบนี้ใช้กับหม้อแปลงแบบแปลงแรงดันลง จุดต่อร่วม (N) ทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงสามารถต่อลงดินได้



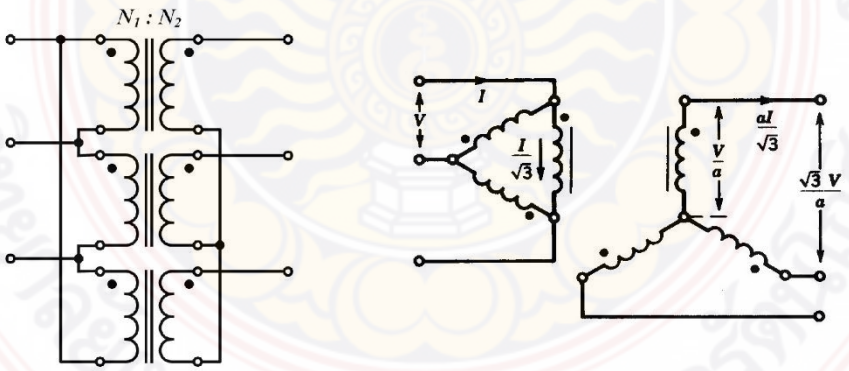
รูปที่ 5.5 การต่อขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Y-Δ

1) การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบ Y-Δ มีข้อดี คือ แรงดันเฟสทางด้านปฐมภูมิ (แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัล; V_P) มีค่าน้อยกว่าแรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ (V_L)

2) การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบ Y-Δ ทำให้เกิดความต่างเฟส (phase shift) ระหว่างแรงดันด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ เป็นมุม 30°

5.2.6 การต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Δ-Y

การต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Δ-Y หรือ Dy คือ การต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแบบเดลตา หรือ Δ และต่อขดลวดด้านทุติยภูมิแบบสตาร์ หรือ Y การต่อแบบนี้ใช้ได้ทั้งหม้อแปลงแบบแปลงแรงดันขึ้น และแปลงแรงดันลง



รูปที่ 5.6 การต่อขดลวดของหม้อแปลง 3 เฟส แบบ Δ-Y

1) จุดนิวทรัลของขดลวดด้านทุติยภูมิถูกต่อลงดิน จึงสามารถจ่ายไฟได้ทั้งระบบ 3 เฟส 3 สาย และ 3 เฟส 4 สาย การต่อแบบนี้เป็นที่นิยมใช้เพราะสามารถจ่ายไฟให้โหลดได้ ทั้งโหลดที่ต้องการไฟ 3 เฟส และโหลดที่ต้องการไฟ 1 เฟส

2) การต่อขดลวดหม้อแปลงแบบ Δ-Y ทำให้เกิดความต่างเฟส (phase shift) ระหว่างแรงดันด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ เป็นมุม 30°

5.2.7 การต่อหม้อแปลงแบบ V หรือ Open-delta (V-Connection or Open-Delta)

การต่อหม้อแปลง 1 เฟส 3 เครื่องให้เป็นหม้อแปลง 3 เฟสแบบ Δ-Δ นั้นสามารถถอดหม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งออกได้ โดยระบบยังสามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ให้กับโหลดได้ การต่อแบบนี้เรียกว่าการต่อแบบวี (v-connection) หรือ open-delta จะใช้ในกรณีฉุกเฉินเมื่อหม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งถูกถอดออกไปซ่อมแต่ระบบยังคงต้องการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง

พิจารณารูปที่ 5.7 (ก) ถ้าหม้อแปลง 1 เฟส เครื่องที่แสดงด้วยเส้นประ ถูกถอดออกและโหลดที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงต่อแบบ Y แรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.7 (ข) แรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ทางด้านปฐมภูมิ คือ V_{AB}, V_{BC} และ V_{CA} แรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ทางด้านทุติยภูมิ คือ V_{ab}, V_{bc} และ V_{ca} แรงดันเฟสของโหลด คือ V_{an}, V_{bn} และ V_{cn} ถ้าโหลดที่นำมาต่อเป็นแบบตัวเหนี่ยวนำกระแส I_a, I_b และ I_c ที่ไหลจะล้าหลังแรงดัน V_{an}, V_{bn} และ V_{cn} เป็นมุม θ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวด ab และ bc ของหม้อแปลง คือ

$$P_{ab} = V_{ab} I_a \cos(30 + \theta) \tag{5.8}$$

$$P_{bc} = V_{cb} I_c \cos(30 - \theta) \tag{5.9}$$

เมื่อ $|V_{ab}| = |V_{cb}| = V =$ แรงดันที่พิกัดของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ

$|I_a| = |I_c| = I =$ กระแสที่พิกัดของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ

กรณีที่ภาระทางไฟฟ้าเป็นความต้านทาน θ จะเท่ากับ 0 กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปที่ภาระทางไฟฟ้าเมื่อต่อหม้อแปลงแบบ V คือ

$$P_V = P_{ab} + P_{bc} = 2VI \cos 30^\circ \tag{5.10}$$

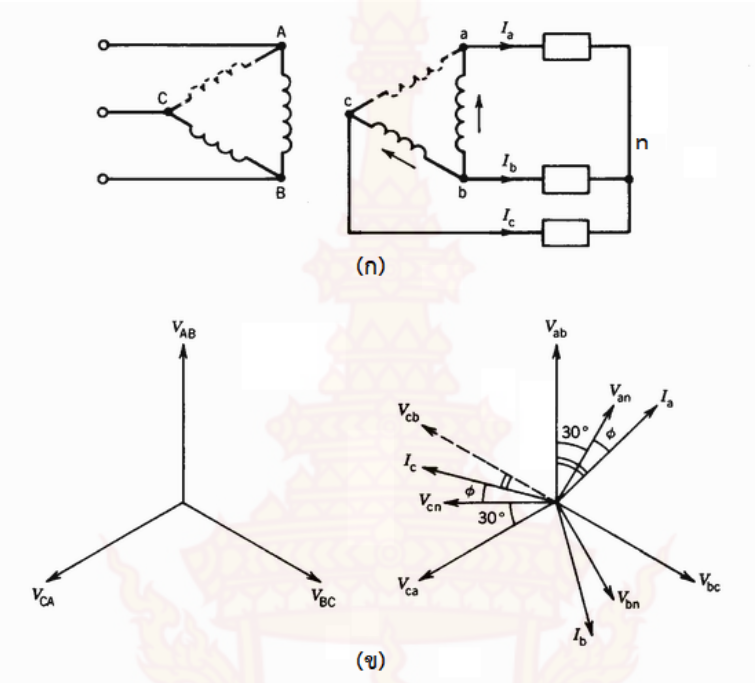
ถ้าต่อหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่องแบบ Δ กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปที่โหลด คือ

$$P_\Delta = 3 \cdot V \cdot I \tag{5.11}$$

จากสมการที่ 5.10 และ 5.11

$$\frac{P_V}{P_\Delta} = \frac{2\cos 30^\circ}{3} = 0.58 \tag{5.12}$$

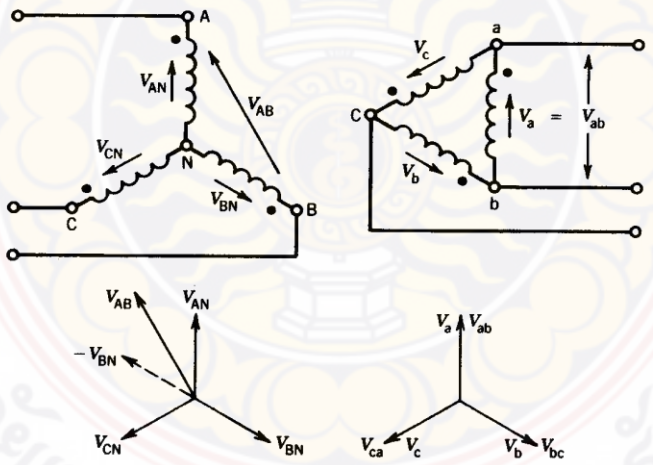
การต่อแบบ V จะทำให้กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงลดลงเหลือเพียง 58 % เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถจ่ายกระแสได้เท่ากับพิกัดของหม้อแปลง



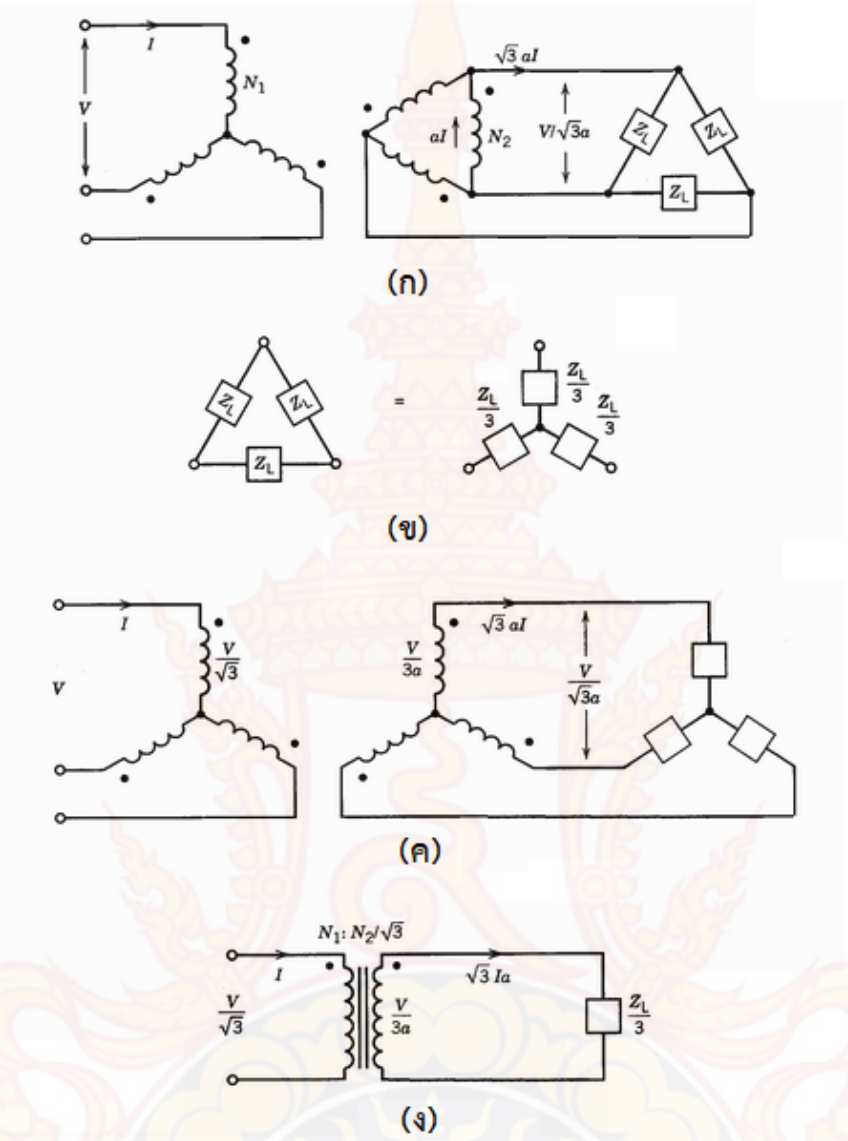
รูปที่ 5.7 การต่อหม้อแปลงแบบ v-connection

5.3 ความต่างเฟสของแรงดัน (Phase Shift Voltage)

การต่อหม้อแปลง 3 เฟส บางแบบจะทำให้ผลของแรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิมีเฟสที่ไม่ตรงกัน พิจารณาเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 5.8 การต่อแบบ Y-Δ แรงดัน V_{AN} และ V_a จะมีเฟสตรงกัน แต่แรงดัน V_{AB} ทางด้านปฐมภูมิจะนำหน้าแรงดัน V_{ab} ทางด้านทุติยภูมิอยู่ 30° แสดงว่าการต่อแบบ Δ-Y ก็จะทำให้เกิดความแตกต่างของเฟสระหว่างแรงดันไลน์กับไลน์ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ 30° เหมือนกัน การต่อแบบ Δ-Δ และ Y-Y จะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างเฟสขึ้น



รูปที่ 5.8 ความแตกต่างของเฟสของแรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ในหม้อแปลง 3 เฟส



รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลของหม้อแปลง 3 เฟส

5.4 วงจรสมมูลแบบเฟสเดียว (single-phase equivalent circuit)

ถ้าแหล่งจ่ายและภาระทางไฟฟ้าที่ต่อให้กับหม้อแปลง 3 เฟสนั้นสมดุลกัน หมายความว่าแรงดันและกระแสทั้งสองด้านสมดุลกัน แรงดันและกระแสในเฟสหนึ่งเฟสใดจะเท่ากับอีกสองเฟสที่เหลือแต่จะมีมุมเฟสต่างกัน 120° ดังนั้นการวิเคราะห์เพียงแค่เฟสเดียวก็ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหม้อแปลงทั้งสองด้านได้ วงจรสมมูลย์แบบเฟสเดียวจะสามารถคำนวณได้ง่ายขึ้นถ้าแหล่งจ่าย,ขดลวดของหม้อแปลงและภาระทางไฟฟ้าต่อแบบ Y ภาระทางไฟฟ้าที่ต่อแบบ Δ สามารถแปลงให้เป็นแบบ Y ได้ด้วยการแปลง Y-Δ ตามรูปที่ 5.9 (ข) วงจรในรูป 5.9 (ก) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของวงจรที่ 5.9 (ค) ได้โดยที่กระแสและแรงดันยังเหมือนรูปที่ 5.9 (ก) อัตราส่วน a'ของหม้อแปลงแบบ Y-Y คือ

$$a' = \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{\frac{V}{3\cdot a}} = \frac{V}{\sqrt{3}} \times \frac{3\cdot a}{V} = \frac{3\cdot a}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\cdot a \qquad (5.13)$$

สำหรับหม้อแปลงที่ต่อใช้งานจริง

$$\frac{\text{primary line to line voltage}}{\text{secondary line to line voltage}} = \frac{V}{\frac{V}{\sqrt{3}\cdot a}} = \sqrt{3}\cdot a \qquad (5.14)$$

อัตราส่วนของหม้อแปลงที่ใช้ในการคำนวณวงจรสมมูลแบบเฟสเดียวก็คืออัตราส่วนของแรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ต่อใช้งานจริง วงจรสมมูลของหม้อแปลงแบบเฟสเดียว แสดงดังรูปที่ 5.9 (ง)

<u>ตัวอย่างที่</u> 5.1 หม้อแปลง 1 เฟส ขนาด 50 kVA 2,300/230 V 60 Hz จำนวน 3 เครื่อง นำมาต่อร่วมกันเป็นหม้อแปลง 3 เฟส 4,000/230 V 1 เครื่อง อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงแต่ละตัวคิดทางด้านแรงต่ำเท่ากับ 0.012 + j0.016 Ω ขณะใช้งานหม้อแปลงจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส 120 kVA 230 V 0.85 PF lagging จงหา

ก) จงเขียนวงจรแสดงการต่อใช้งานหม้อแปลง

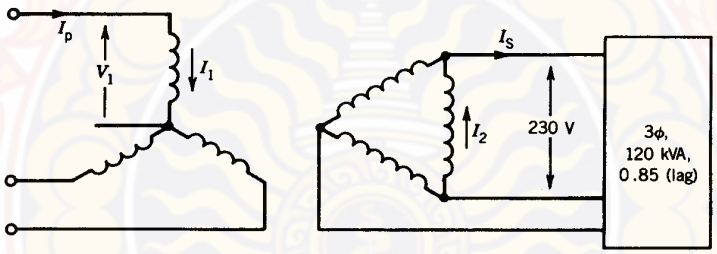
ข) กระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลง

ค) แรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ด้านปฐมภูมิ

ง) โวลเตจเรกกูเรชันของหม้อแปลง

วิธีทำ

ก) วงจรการต่อใช้งานหม้อแปลง



ข) กระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลง

$$I_S = \frac{120,000}{\sqrt{3}\times 230} = 301.24 \quad \text{A}$$

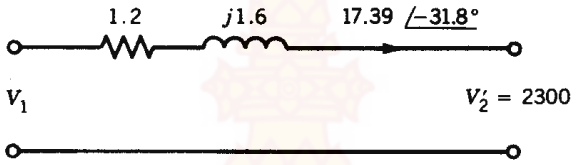
$$I_2 = \frac{301.24}{\sqrt{3}} = 173.92 \quad \text{A}$$

$$a = \frac{2,300}{230} = 10$$

$$I_1 = \frac{173.92}{10} = 17.39 \quad \text{A}$$

ค) แรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} Z_{01} &= (0.012 + j0.016)\cdot 10^2 \\ &= 1.2 + j1.6\Omega \\ \theta &= \cos^{-1} 0.85 = 31.8^\circ \end{aligned}$$



จากรูปวงจรสมมูลย์ที่คิดทางด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} V_1 &= 2,300\angle 0^\circ + 17.39\angle -31.8^\circ (1.2 + j1.6) \\ V_1 &= 2,332.4 \quad V \end{aligned}$$

แรงดันระหว่างไลน์กับไลน์ทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ $\sqrt{3}\cdot V_1 = 4,039.8$ V

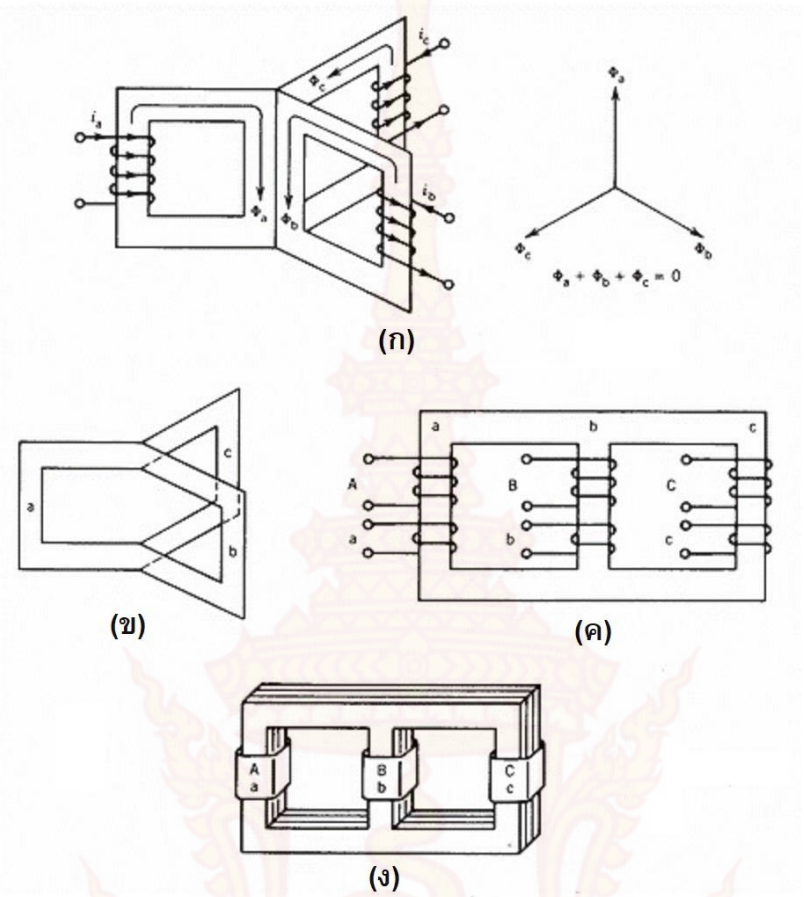
ง) โวลเตจเรกูเลชันของหม้อแปลง

$$Voltage\ regulation = \frac{2,332.4 - 2,300}{2,300}\times 100\% = 1.41\%$$

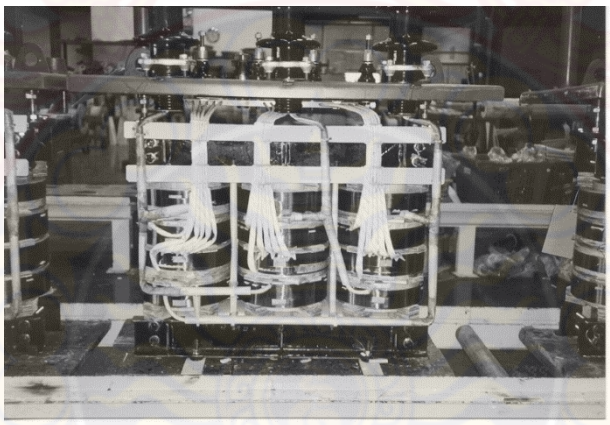
5.5 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสแบบใช้แกนแม่เหล็กร่วม

(three-phase transformer on a common magnetic core)

เราสามารถสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบให้มีขดลวดปฐมภูมิ 3 ขดและทุติยภูมิ 3 ขดบนแกนแม่เหล็กเดียวกันได้ พิจารณาหม้อแปลงเฟสเดียวแบบ Core-Type 3 เครื่องวางแกนเหล็กตามลักษณะดังรูปที่ 5.10 (ก) เพื่อความง่ายต่อการเข้าใจจึงแสดงแต่ขดลวดปฐมภูมิเท่านั้น ถ้าเราจ่ายแรงดัน 3 เฟสแบบสมดุลให้กับขดลวด ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c ที่เกิดขึ้นจะสมดุลกันด้วย ถ้านำเส้นแรงแม่เหล็กที่ขาของแกนเหล็กทั้งสามรวมกัน ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จะเท่ากับศูนย์จึงทำให้สามารถตัดขาทั้งสามที่รวมกันออกได้ดังแสดงในรูปที่ 5.10 (ข) แต่โครงสร้างแบบนี้ไม่สะดวกต่อการสร้างถ้าเรายุบ Section b ลงให้อยู่ระหว่าง Section a และ Section c ก็จะกลายเป็นแกนเหล็กรูปที่ 5.10 (ค) ซึ่งโครงสร้างของแกนเหล็กแบบนี้สามารถสร้างได้โดยใช้แผ่นเหล็กลามิเนตเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ดังรูปที่ 5.10 (ง) ทั้งขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิของแต่ละเฟสจะวางอยู่บนแกนเหล็กเดียวกันจากโครงสร้างของแกนเหล็กแบบนี้ผลของกระแสที่ใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไม่สมดุลแต่จะไม่มีผลต่อการใช้งาน



รูปที่ 5.10 การพัฒนาหม้อแปลง 3 เฟสแบบ core type

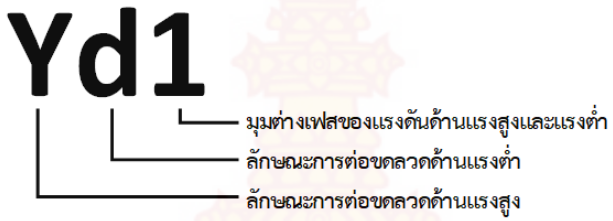


รูปที่ 5.11 หม้อแปลง 3 เฟสแบบ core type

รูปที่ 5.11 ภาพของหม้อแปลง 3 เฟสแบบใช้แกนแม่เหล็กร่วมซึ่งหม้อแปลง 3 เฟส แบบนี้ เมื่อเทียบกับการต่อร่วมหม้อแปลงเฟสเดียว 3 เครื่อง จะมีน้ำหนักน้อยกว่า ต้นทุนต่ำกว่า และต้องการพื้นที่ว่างในการติดตั้งน้อยกว่าปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือถ้าเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหายขึ้นต้องถอดหม้อแปลงทั้งเครื่องไปซ่อม

5.6 เวกเตอร์กรุ๊ป (vector group)

การต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบสตาร์และเดลตานั้น สามารถต่อได้หลายรูปแบบ การต่อแต่ละแบบทำให้เกิดเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดแรงสูงและแรงขดลวดต่ำที่แตกต่างกันออกไป เราเรียกเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละแบบนี้ว่า เวกเตอร์กรุ๊ป (vector group) ชื่อของเวกเตอร์กรุ๊ปจะกำหนดเป็นอักษรและตามด้วยตัวเลข เช่น Yy0, Yd1, Dy5, Dd6 เป็นต้น ซึ่งมีความหมายดังต่อไปนี้



- ตำแหน่งที่ 1 เป็น อักษรตัวพิมพ์ใหญ่ หมายถึง ลักษณะการต่อขดลวดด้านแรงดันสูง
- ตำแหน่งที่ 2 เป็น อักษรตัวพิมพ์เล็ก หมายถึง ลักษณะการต่อขดลวดด้านแรงดันต่ำ
- ตำแหน่งที่ 3 เป็น ตัวเลข หมายถึง มุมต่างเฟสของแรงดันด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ
- การกำหนดตัวเลขอ้างอิงจากหน้าปัดนาฬิกา โดยระบุว่าที่เฟสเดียวกัน แรงดันไลน์ (V_L) ด้านแรงต่ำจะล้าหลังแรงดันไลน์ด้านแรงสูงอยู่เท่าไร (ดูรูปที่ 5.12) การกำหนดตัวเลขนั้นเป็นการเปรียบเทียบกับหน้าปัดนาฬิกา ใน 1 รอบจากหมายเลข 1 ถึง 12 คิดเป็น 1 ไซเคิล ของแรงดันไฟฟ้า คือ 360° ทางไฟฟ้า แสดงว่าแต่ละหมายเลขของนาฬิกานั้นมีมุมแตกต่างกัน 30 °

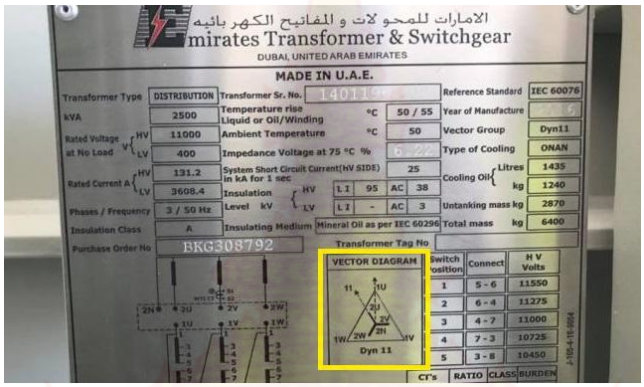


(ก) มุมระหว่างตัวเลข เท่ากับ 30° **(ข) มุมต่างเฟสของแรงดัน เท่ากับ 30° ล้าหลัง**

รูปที่ 5.12 การอ้างอิงมุมของแรงดันไฟฟ้าตามหน้าปัดนาฬิกา

- Y, y หมายถึง การต่อขดลวดแบบ สตาร์ (star) หรือ วาย (wye)
- D, d หมายถึง การต่อขดลวดแบบ เดลตา (delta)
- Z, z หมายถึง การต่อขดลวดแบบ ซิกแซก (zigzag)
- ตัวเลข หมายถึงที่เฟสเดียวกันแรงดันไลน์ (V_L) ด้านแรงต่ำจะล้าหลังแรงดันไลน์ด้านแรงสูงอยู่กี่องศา เช่น ถ้าเป็นเลข 5 ก็คือ 5 x 30° = 150°

รูปที่ 5.13 เป็น เวกเตอร์กรุ๊ป (vector group) ที่ถูกระบุไว้บนแผ่นป้าย (nameplate) ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เพื่ออธิบายถึงลักษณะของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำที่มีมุมต่างเฟสกัน เช่น Dy11 นั้น มีมุมต่างเฟสของแรงดันด้านแรงต่ำล้าหลัง (Lagging) แรงดันด้านแรงสูงอยู่ 330° หรืออีกนัยหนึ่ง ก็คือนำหน้า (Leading) ด้านแรงสูงอยู่ 30°



รูปที่ 5.13 เวกเตอร์กรุ๊ปที่ระบุบนแผ่นป้ายของหม้อแปลง

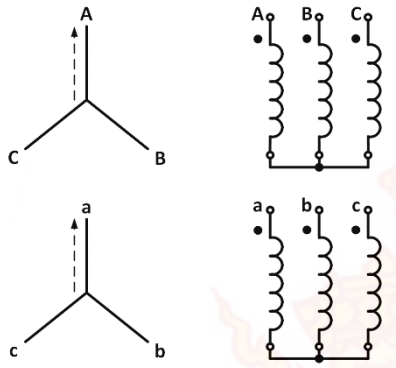
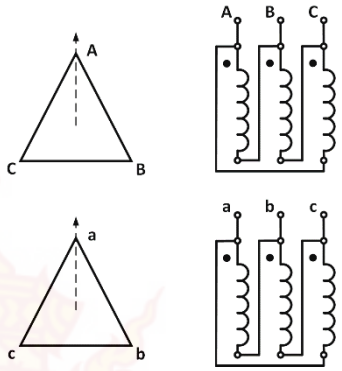
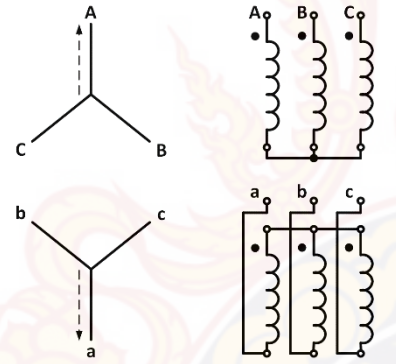
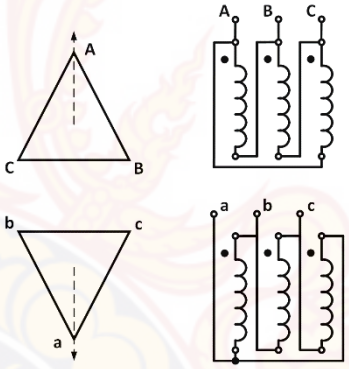
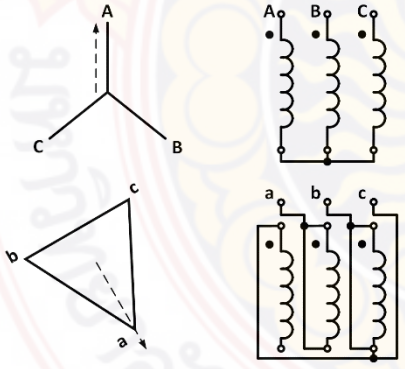
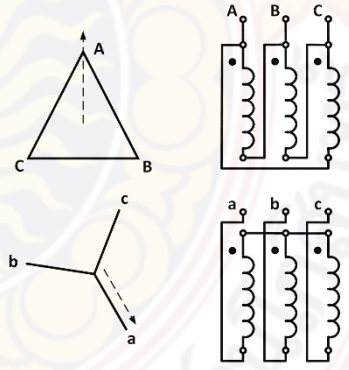
ตารางที่ 5.1 มุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงและแรงต่ำเมื่อต่อขดลวดแบบต่าง ๆ

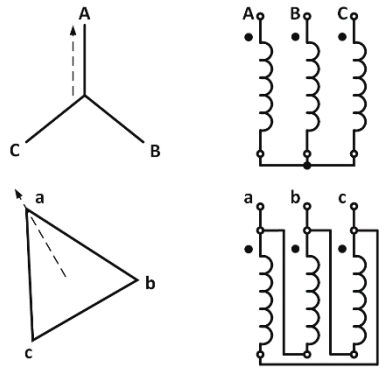
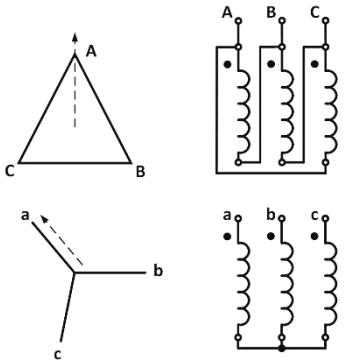
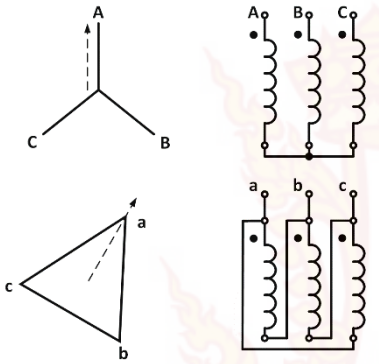
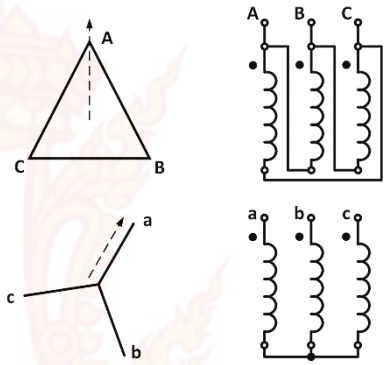
มุมต่างเฟส	ลักษณะการต่อขดลวด		
0°	Yy0	Dd0	Dz0
30° ล้าหลัง	Yd1	Dy1	Yz1
60° ล้าหลัง		DD2	Dz2
120° ล้าหลัง		DD4	Dz4
150° ล้าหลัง	Yd5	Dy5	Yz5
180° ล้าหลัง	Yy6	Dd6	Dz6
150° นำหน้า	Yd7	Dy7	Yz7
120° นำหน้า		DD8	Dz8
60° นำหน้า		DD10	Dz10
30° นำหน้า	Yd11	Dy11	Yz11

เวกเตอร์กรุ๊ปนั้นมีผลต่อการต่อขนานหม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะอินเฟส (in phase) กับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเมื่อขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีการต่อขดลวดด้วยวิธีเดียวกัน สภาวะแบบนี้เรียกว่า "ไม่มีมุมต่างเฟส" แต่ถ้าขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีการต่อที่แตกต่างกัน ก็คือมีเวกเตอร์กรุ๊ปที่ต่างกัน มุมของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิจะแตกต่างจากแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ ซึ่งเรียกว่า มีมุมต่างเฟส

ของแรงดันไฟฟ้า หากต้องการนำหม้อแปลง 3 เฟส 2 เครื่องมาต่อขนานกันเพื่อช่วยกันจ่ายโหลด ต้องคำนึงถึงเรื่องมุมเฟสของหม้อแปลงที่จะต้องเหมือนกัน นั่นคือมีเวกเตอร์กรุ๊ปเดียวกัน หากมีเวกเตอร์กรุ๊ปที่แตกต่างกัน หม้อแปลงจะเกิดการลัดวงจรเมื่อจ่ายโหลด

ตารางที่ 5.2 เวกเตอร์กรุ๊ปและการต่อขดลวดของหม้อแปลงด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ

Yy0 (มุมต่างเฟส 0°)	Dd0 (มุมต่างเฟส 0°)
	
Yy6 (มุมต่างเฟส -180°)	**Dd6 (มุมต่างเฟส -180°)**
	
Yd5 (มุมต่างเฟส -150°)	**Dy5 (มุมต่างเฟส -150°)**
	

Yd11 (มุมต่างเฟส -330°)	Dy11 (มุมต่างเฟส -330°)
	
Yd1 (มุมต่างเฟส -30°)	**Dy1 (มุมต่างเฟส -30°)**
	

ในประเทศไทยใช้หม้อแปลงเวกเตอร์กรุ๊ป Dyn11 เนื่องจากสามารถจ่ายไฟ 400/230 V ได้ เพราะมีสายนิวทรัลสำหรับโหลด 1 เฟส ลดฮาร์มอนิกอันดับ 3 รองรับโหลดไม่สมดุลได้ดี ป้องกันระบบได้ง่าย และทั้งการไฟฟ้านครหลวง (MEA) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) กำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายแรงดันปานกลางและแรงต่ำใช้การต่อแบบ Dyn11 เพื่อให้สะดวกต่อการติดตั้ง บำรุงรักษา และให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งประเทศ

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งใช้ในระบบผลิต ส่ง และจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า รวมถึงงานอุตสาหกรรม โดยแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสมีขนาดเท่ากันและมีมุมเฟสต่างกัน 120° หม้อแปลง 3 เฟสสามารถสร้างจากหม้อแปลง 1 เฟสจำนวน 3 เครื่อง หรือสร้างเป็นหม้อแปลง 3 เฟสภายในเครื่องเดียวได้

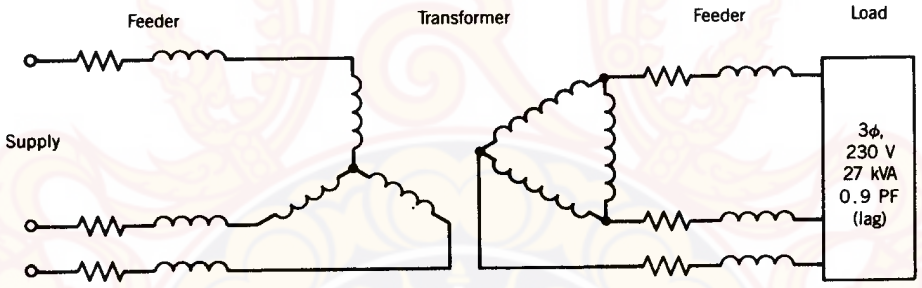
การต่อขดลวดหม้อแปลง 3 เฟสมีรูปแบบหลัก ได้แก่ Y-Y, Δ-Δ, Y-Δ และ Δ-Y ซึ่งแต่ละแบบมีความสัมพันธ์ของแรงดัน กระแส จุดนิวทรัล และคุณลักษณะการใช้งานแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการต่อแบบ Open-Delta หรือ V-V สำหรับกรณีที่ต้องการให้ระบบยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสได้เมื่อหม้อแปลงหนึ่งเครื่องไม่สามารถใช้งานได้

การต่อแบบ Y-Δ และ Δ-Y ทำให้แรงดันด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมี มุมต่างเฟส 30° ขณะที่ Y-Y และ Δ-Δ ไม่มีมุมต่างเฟส และเมื่อระบบ 3 เฟสมีความสมดุล สามารถใช้ วงจรสมมูลแบบเฟสเดียว เพื่อวิเคราะห์แรงดัน กระแส อิมพีแดนซ์ และโวลเตจเรกูเลชันได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ หม้อแปลง 3 เฟสยังมีการกำหนด เวกเตอร์กรุ๊ป (vector group) เพื่อระบุรูปแบบการต่อขดลวดและมุมต่างเฟสระหว่างด้านแรงสูงกับแรงต่ำ ซึ่งมีความสำคัญต่อการเลือกใช้งานและการต่อขนานหม้อแปลง โดยในเนื้อหายกตัวอย่างการใช้งาน Dyn11 สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

1. เราสามารถต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส ได้กี่แบบ และแต่ละแบบมีลักษณะเป็นอย่างไร จงวาดรูปประกอบ
2. นำหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวขนาด 10 kVA 1,330/230 V 50 Hz 3 เครื่อง ต่อเป็น 3 เฟสแบบ Y-Δ จ่ายโหลด 230 V, 27 kVA, 0.9 PF Lagging โดยมีอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำที่ต่อกับโหลดเท่ากับ 0.003 + j0.015 Ω ต่อเฟส หม้อแปลงได้รับไฟ 3 เฟส ผ่านสายป้อนที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 0.8 + j0.5 Ω ต่อเฟส อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงตัวเดียวคิดทางด้านแรงดันต่ำเท่ากับ 0.12 + j0.25 Ω



จงหา

ก) เขียนวงจรสมมูลของหม้อแปลงโดยรวมอิมพีแดนซ์ของสายไฟด้วย

ข) แรงดันทางด้านรับไฟเมื่อทางด้านจ่ายไฟมีแรงดัน 230 V

3. หม้อแปลง 3 เฟสต่อแบบ Δ-Y จ่ายภาระทางไฟฟ้าสมดุลทั้งสามเฟส จ่ายภาระทางไฟฟ้า 500 kVA ที่ 0.8 PF Lagging แรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงเท่ากับ 2400 V 60 Hz อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงแต่ละเครื่องเท่ากับ 6.9 จงหา
   ก) วาดวงจรการต่อหม้อแปลง
   ข) แรงดันไลน์และแรงดันเฟสทั้งสองด้าน
   ค) กระแสไลน์และกระแสเฟสทั้งสองด้าน

4. จงให้เหตุผลเพิ่มเติมเรื่องที่ประเทศไทยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเวกเตอร์กรุ๊ป Dyn11

6 หม้อแปลงออโตและหม้อแปลงชนิดอื่น ๆ

Auto Transformer and Other Transformers

นอกจากหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟสแล้ว ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ายังมีหม้อแปลงชนิดอื่น ๆ ที่ใช้งานร่วมกันอยู่อีกหลายชนิด เช่น หม้อแปลงที่ใช้สำหรับป้องกันแรงดันเกินในเครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่เหมาะสมกับการใช้งาน ใช้ในวงจรหรี่ไฟแสงสว่าง ใช้สำหรับการสตาร์ทมอเตอร์ หรือหม้อแปลงที่ใช้ในการวัดกระแส และแรงดันไฟฟ้าในระบบแรงสูง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหม้อแปลงเหล่านั้น

6.1 หม้อแปลงออโต (auto transformer)

หม้อแปลงออโตเป็นหม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิต่ออนุกรมกันและพันอยู่บนแกนตัวนำแม่เหล็กเดียวกัน ถ้าเราจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_1 ตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิแล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_2จากขดลวดทุติยภูมิให้แก่โหลด เรียกว่า หม้อแปลงออโตแบบแปลงลง (step-down auto-transformer) แต่ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_1 ตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิแล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_2 จากขดลวดปฐมภูมิให้แก่โหลด เรียกว่า หม้อแปลงออโตแบบแปลงขึ้น (step-up auto-transformer)

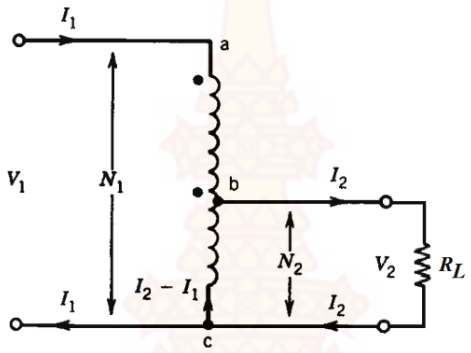


รูปที่ 6.1 หม้อแปลงออโต

หลักการทำงานของหม้อแปลงออโต มีลักษณะเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสแตกต่างกันที่ความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ กล่าวคือ หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟสทั่วไปแยกขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิออกจากกันโดยได้รับเส้นแรงแม่เหล็กร่วม (mutual flux) จากขดลวดปฐมภูมิไปเหนี่ยวนำที่ขดลวดทุติยภูมิเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าตามต้องการ แต่ในหม้อแปลงออโตเกิดการเหนี่ยวนำของเส้นแรงแม่เหล็กร่วมกัน (common flux) ในแกนตัวนำแม่เหล็กเดียวกัน ดังนั้นความสูญเสียในแกนตัวนำแม่เหล็กจึงลดลงหรืออาจกล่าวได้ว่าหม้อแปลงออโตมีประสิทธิภาพสูงกว่าหม้อแปลง 1 เฟส ทั่วไป

6.1.1 หม้อแปลงออโตแบบแปลงแรงดันลง

รูปที่ 6.2 คือ วงจรของหม้อแปลงออโตแบบแปลงแรงดันลง (step down) อัตราส่วนของหม้อแปลงเกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงดัน กระแส จำนวนรอบของขดลวด และค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด แสดงดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 6.2 หม้อแปลงออโตแบบแปลงลง

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_{ac}}{N_{bc}} = \frac{I_2}{I_1} = a$$

$$P_L = V_2 \cdot I_2$$

$$I_1 + (I_2 - I_1) = I_2$$

$$P_{ab} = V_2 \cdot I_1 = V_2 \times \frac{I_2}{a} = \frac{P_L}{a}$$

$$P_{bc} = V_2 \cdot (I_2 - I_1) = V_2 \cdot I_2 - V_2 \cdot I_1$$

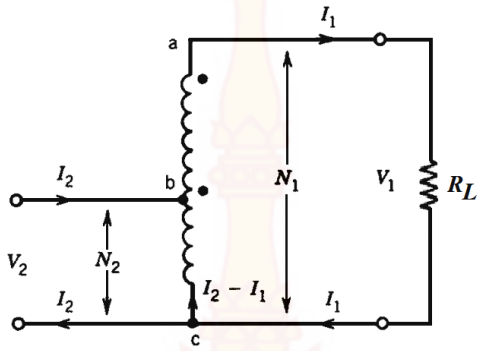
$$= P_L - \frac{P_L}{a} = P_L \cdot \left[\frac{a}{a} - \frac{1}{a}\right]$$

$$= P_L \cdot \left[\frac{a-1}{a}\right]$$

หม้อแปลงออโตแบบแปลงแรงดันลง มีค่า a>1

6.1.2 หม้อแปลงออโตแบบแปลงขึ้น

รูปที่ 6.3 วงจรของหม้อแปลงออโตแบบแปลงแรงดันขึ้น (step up) อัตราส่วนของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงดัน กระแส จำนวนรอบของขดลวด และค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด แสดงดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 6.3 วงจรของหม้อแปลงออโตแบบแปลงขึ้น

$$
\begin{aligned}
P_L &= V_1 I_1 \\
I_1 &= I_2 - (I_2 - I_1) = I_2 + (I_1 - I_2) \\
P_{ab} &= V_1 I_2 = a \cdot P_L \\
P_{bc} &= V_1 (I_1 - I_2) = V_1 I_1 - V_1 I_2 \\
&= P_L - a \cdot P_L \\
&= P_L \cdot (1 - a)
\end{aligned}
$$

step-up auto-transformer มีค่า a<1

6.1.3 วาริแอค (variac)

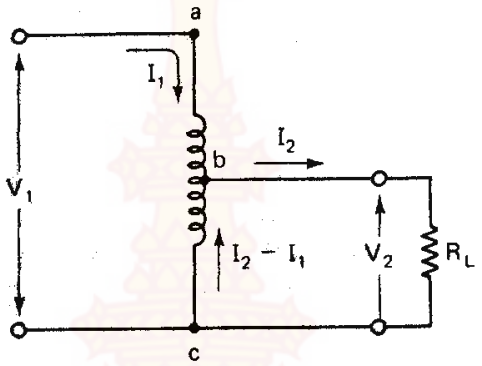
วาริแอค เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟแบบแปรผันที่ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับค่าได้ และมีแรงดันขาออกที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเหมาะสำหรับการใช้งานในห้องทดลองทางไฟฟ้า หรืองานที่ต้องการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น งานปรับแสงสว่างของหลอดไฟประเภทหลอดไส้ การปรับความเร็วมอเตอร์ จริงแล้ว วาริแอค ก็คือ หม้อแปลงออโตแบบที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของขดลวดด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิได้ด้วยเลื่อนแทปกลางของขดลวดด้วยการหมุนแกนที่ต่ออยู่กับแทปนั่นเอง วาริแอคมีการออกแบบใช้งานทั้งแบบ 1 เฟส และแบบ 3 เฟส



(ก) วาริแอคแบบ 3 เฟส (ข) วาริแอคแบบ 1 เฟส

รูปที่ 6.4 วาริแอค

ตัวอย่างที่ 6.1 หม้อแปลงออโต 5 kVA เครื่องหนึ่ง ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 2,530 V เป็น 2,300 V โดยขดลวด ab มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 230 V ขดลวด bc มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 2,300 V จงหากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวด ab และกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวด bc



วิธีทำ

$$I_1 = \frac{5,000}{230} = 21.74 \text{ A}$$

$$I_2 - I_1 = \frac{5,000}{2,300} = 2.174 \text{ A}$$

$$I_2 = (I_2 - I_1) + I_1$$

$$I_2 = 2.174 + 21.74 = 23.914 \text{ A}$$

$$a = \frac{2,530}{2,300} = 1.1$$

$$I_2 = a \cdot I_1 = 1.1 \times 21.74 = 23.914 \text{ A}$$

$$P_L = V_2 I_2 = 2,300 \times 23.914 = 55 \text{ kVA}$$

$$P_{ab} = \frac{P_L}{a} = \frac{55,000}{1.1} = 50 \text{ kVA}$$

$$P_{bc} = P_L \cdot \frac{a-1}{a} = 55,000\left(\frac{1.1-1}{1.1}\right) = 5 \text{ kVA}$$

6.2 หม้อแปลงเครื่องมือวัด (instrument transformer)

ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ หรือกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ นั้นจะต้องทำการต่อเครื่องมือวัดมาตรฐานที่มีย่านวัดไม่สูงนักเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนที่แม่นยำและแน่นอน เราเรียกหม้อแปลงไฟฟ้านี้ว่า “หม้อแปลงเครื่องมือวัด (instrument transformer)" ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ หม้อแปลงวัดกระแส (current transformer) และ หม้อแรงวัดแรงดัน (potential transformer)

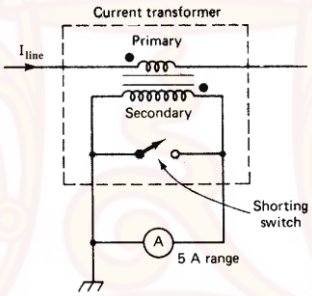
6.2.1 หม้อแปลงวัดกระแส (current transformer ตัวย่อ CT)

หม้อแปลงวัดกระแส คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ลดกระแสที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้ง่ายและปลอดภัยต่อการใช้งานในระบบไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้าแรงสูงหม้อแปลงวัดกระแสจะต่ออนุกรมอยู่ในวงจรที่

เราต้องการวัดกระแสเพื่อทำการแปลงกระแสให้ลดลงได้ตามพิกัด ดังรูปที่ 6.5 ตัวอย่าง เช่น หม้อแปลงพิกัด 100/5 A ถูกออกแบบให้ขดลวดปฐมภูมิรับกระแสได้ 100 A และเมื่อขดลวดปฐมภูมิได้รับกระแส 100 A แล้ว จะทำให้แอมป์มิเตอร์ที่ต่ออยู่ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชี้ที่ 5 A พอดี จากรูปที่ 6.6 เป็นวงจรการต่อใช้งานหม้อแปลงวัดกระแส สวิตช์ลัดวงจร (shorting switch) นั้น มีไว้เพื่อใช้ตัดวงจรของแอมป์มิเตอร์

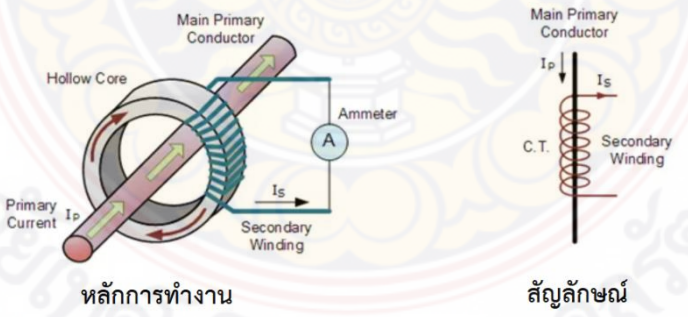


รูปที่ 6.5 หม้อแปลงวัดกระแสที่ใช้ระบบแรงสูง



รูปที่ 6.6 การต่อใช้งานหม้อแปลงวัดกระแส

ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำเช่นในตู้เมนสวิตช์จะใช้หม้อแปลงวัดกระแส ลักษณะดังรูปที่ 6.7 คือ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงวัดกระแสจะมีเพียงรอบเดียว ก็คือ สายไฟหรือบัสบาร์ที่คล้องผ่านแกนของหม้อแปลงวัดกระแสเพียงเส้นเดียว หมายความว่าหม้อแปลงวัดกระแส หนึ่งตัวจะใช้งานต่อโหลดได้เพียง 1 ตัวต่อเฟส ในส่วนของขดลวดทุติยภูมิจะมีจำนวนรอบมากกว่าด้านปฐมภูมิ หลักการทำงานและสัญลักษณ์ของหม้อแปลงวัดกระแสในระบบแรงต่ำ แสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.7 หลักการทำงานและสัญลักษณ์ของหม้อแปลงวัดกระแสในระบบแรงต่ำ



รูปที่ 6.8 หม้อแปลงวัดกระแสในระบบแรงต่ำ

การเลือกใช้งานหม้อแปลงวัดกระแส ต้องพิจารณาจากพิกัดกระแสในวงจรที่ต้องการวัด เช่น ระบบที่ต้องการวัดมีกระแสไหลในวงจรสูงสุดที่ 250 A ให้เลือกหม้อแปลงวัดกระแส ขนาด 300 A ซึ่งขนาดที่เลือกเป็น 1.2 เท่าของกระแสพิกัดของโหลดที่ใช้งาน ส่วนกระแสทางด้านทุติยภูมินั้นเป็นค่าที่ถูกกำหนดขึ้นใช้งานเป็นมาตรฐานเดียวกัน คือ 1 A และ 5 A

ตัวอย่างที่ 6.1 กระแสที่พิกัดของระบบที่ต้องการวัดเท่ากับ 500 A ถ้าเลือกใช้หม้อแปลงวัดกระแส ขนาด 600/5 อัตราส่วน (ratio) ของหม้อแปลงวัดกระแสจะเป็นเท่าใด และถ้ามีกระแสไหลผ่านด้านปฐมภูมิ 100 A กระแสทางด้านทุติยภูมิจะเป็นเท่าใด

วิธีทำ

ก) หาอัตราส่วนของหม้อแปลง

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{120}$$

ข) หากระแสทางด้านทุติยภูมิ ถ้ามีกระแสไหลผ่านด้านปฐมภูมิ 100 A

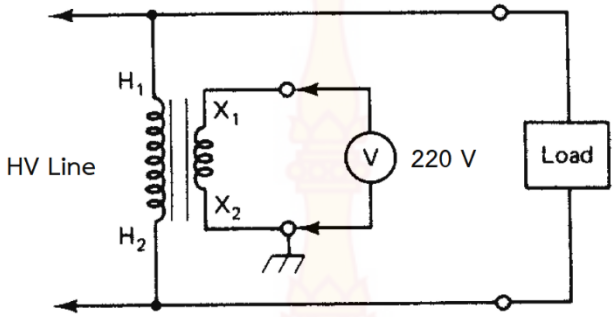
$$\frac{I_2}{I_1} = a$$

$$I_2 = I_1 \times a$$

$$I_2 = 100 \times \frac{1}{120} \quad = 0.83 \text{ A}$$

6.2.2 หม้อแปลงวัดแรงดัน (potential transformer; PT)

หม้อแปลงวัดแรงดัน คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแปลงแรงดันลงที่ถูกออกแบบให้มีอัตราส่วนที่แม่นยำในการลดทอนแรงดันลง ใช้ต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูงเพื่อลดทอนแรงดันลงให้เหมาะสมกับโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์มาตรฐาน หรือให้ได้แรงดันที่รีเลย์ หรืออุปกรณ์ควบคุมสามารถใช้งานได้ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้จะมีขนาดเล็กและมีกำลังงานต่ำ หม้อแปลงวัดแรงดันที่ใช้วัดแรงดันขนาด 22,000 V จะมีอัตราส่วนเป็น 100:1 ทางด้านทุติยภูมิจะต่ออยู่กับโวลต์มิเตอร์ความต้านทานสูงทำให้มีกระแสจำนวนน้อยมากไหลผ่านมิเตอร์ และเพื่อความปลอดภัยทางด้านทุติยภูมิควรต่อลงกราวด์เสมอ



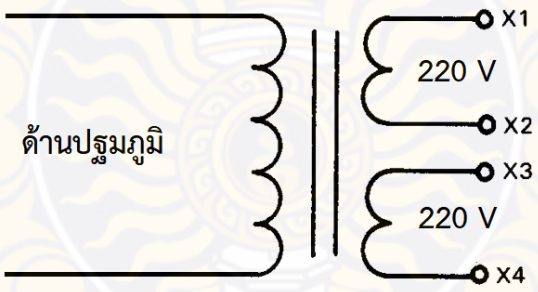
รูปที่ 6.9 การต่อใช้งานหม้อแปลงวัดแรงดัน



รูปที่ 6.10 หม้อแปลงวัดแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ

6.3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบหลายขดลวด (multi-coil transformer)

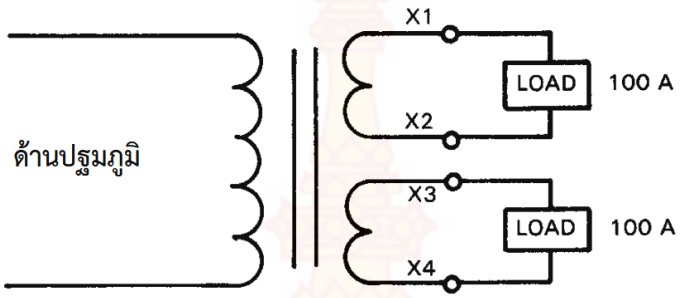
โดยส่วนใหญ่แล้วหม้อแปลงจำหน่ายแบบ 1 เฟส จะมีขดลวดทางด้านจ่ายไฟสองขดหรือมากกว่า จึงสามารถต่อวงจรให้เกิดความแตกต่างระหว่างแรงดันและกระแสได้หลายแบบ รูปที่ 6.11 แสดงภาพของหม้อแปลงจำหน่ายที่มีขดลวดทางด้านจ่ายไฟ 2 ขด ขั้วของขดแรกคือ X1 และ X2 ขั้วของขดที่ 2 คือ X3 และ X4 ขั้ว X3 จะเป็นบวกเมื่อ X1 เป็นบวกด้วย



รูปที่ 6.11 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบหลายขดลวด

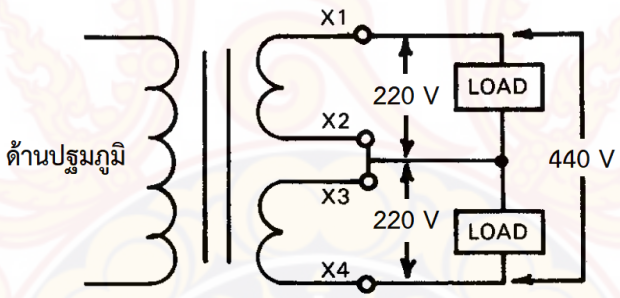
สมมติให้แรงดันที่ขดลวดปฐมภูมิที่หม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 6.11 ต้องการ คือ 22 kV อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดเป็น 10 : 1 พิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็น 22 kVA เมื่อต่อโหลดให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเต็มพิกัดกระแสทางด้านปฐมภูมิจะไหล 1 A

รูปที่ 6.12 ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งในการต่อใช้งาน โดยการแยกโหลดขนาด 100 A จำนวน 2 ชุด ต่อเข้ากับขดลวดทุติยภูมิแต่ละขด โดยแต่ละขดมีแรงดันตกคร่อม 220 V

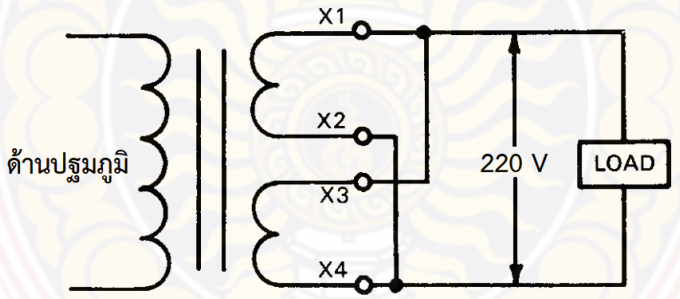


รูปที่ 6.12 ขดลวดทุติยภูมิแต่ละขดสามารถจ่ายภาระแยกกันได้

รูปที่ 6.13 ทำการต่อขั้ว X2 และ X3 เข้าด้วยกันเป็นจุดต่อร่วมจึงทำให้ได้แรงดัน 220 V ระหว่างขั้ว X1 กับจุดต่อร่วมและระหว่างขั้ว X4 กับจุดต่อร่วม ขดลวดทุติยภูมิแต่ละขดยังสามารถจ่ายกระแสได้ 100 A เหมือนเดิมแต่จะไม่เป็นอิสระต่อกันกระแสที่ไหลในขดใดขดหนึ่งอาจมีผลกระทบกับกระแสที่ไหลในอีกขดได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าขดลวดขดที่ 1 จ่ายกระแสออกมามากอาจทำให้แรงดันที่ขดลวดขดที่ 2 ลดลงได้และจากรูปที่ 6.13 นี้ เราสามารถใช้แรงดันได้ 2 แบบคือ 220 V และ 440 V โดยวัดที่ขั้ว X1 กับ X4 จะได้แรงดัน 240 V



รูปที่ 6.13 การต่อขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงอนุกรมกัน

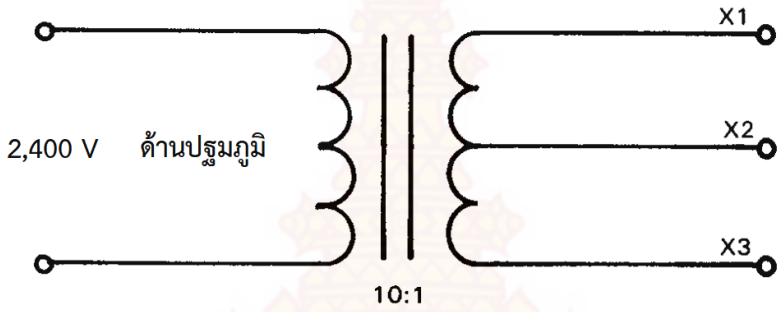


รูปที่ 6.14 การต่อขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบขนาน

จากรูปที่ 6.14 เป็นการต่อขนานกันของขดลวดขดที่ 1 และขดที่ 2 ทำให้หม้อแปลงสามารถจ่ายกระแสได้เท่ากับผลรวมของกระแสของขดลวดทั้งสองขด คือ 200 A ที่แรงดันไฟฟ้า 220 V

6.4 แทปของหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer taps)

แรงดันทางด้านจ่ายไฟของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิโดยแรงดันเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำในแต่ละรอบของขดลวด จึงอาจกล่าวได้ว่าขดลวดแต่ละรอบต่ออนุกรมกันอยู่ แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิ คือ แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดแต่ละรอบรวมกัน เราสามารถดึงเอาแรงดันค่าอื่นออกมาใช้งานได้ด้วยการสร้างจุดต่อออกจากขดลวดทุติยภูมิจุดต่อนี้เราเรียกว่า "แทป"



รูปที่ 6.15 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแทปตรงกลางขดลวดทุติยภูมิ

หม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 6.15 มีแทป 50 เปอร์เซ็นต์ ด้านขดลวดทุติยภูมิ หมายความว่าแทปถูกต่ออยู่ตรงกลางของขดลวด ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องนี้มีอัตราส่วนเป็น 10 : 1 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแปลงลงมีแรงดันที่ขดปฐมภูมิ 2,400 V แรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิจะเป็นดังนี้ วัดที่ขั้ว X1 กับ X2 จะได้ 120 V, วัดที่ขั้ว X2 กับ X3 จะได้ 120 V, วัดที่ขั้ว X1 กับ X3 จะได้ 240 V

สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง หม้อแปลงออโตและหม้อแปลงชนิดอื่น ๆ ที่นำมาใช้ในงานระบบไฟฟ้า โดยหม้อแปลงออโตใช้ขดลวดร่วมกันระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ สามารถต่อใช้งานได้ทั้งแบบแปลงแรงดันขึ้นและแปลงแรงดันลง รวมถึง วาริแอค (Variac) ซึ่งเป็นหม้อแปลงออโตที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ตามต้องการ

นอกจากนี้ยังกล่าวถึง หม้อแปลงเครื่องมือวัด ได้แก่ หม้อแปลงวัดกระแส (CT) สำหรับลดกระแสขนาดใหญ่ให้เหมาะสมกับการวัด และหม้อแปลงวัดแรงดัน (PT) สำหรับลดแรงดันสูงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ควบคุม

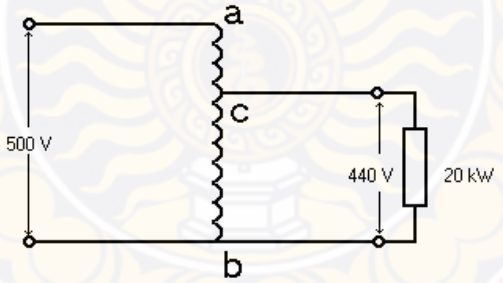
หม้อแปลงแบบหลายขดลวดสามารถนำขดลวดทุติยภูมิมาต่อแบบอนุกรมหรือขนานเพื่อให้ได้แรงดันและกระแสตามต้องการ ส่วน แทปของหม้อแปลง เป็นจุดต่อที่นำออกจากขดลวดเพื่อเลือกค่าระดับแรงดันให้เหมาะสมกับการใช้งาน

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

1. หม้อแปลงออโตพิกัด 2300/450 V 60 Hz ใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าลง จ่ายโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ $2\angle 10^\circ$ Ω ถ้าไม่คิดอิมพีแดนซ์ภายในของหม้อแปลง จงคำนวณหา
   - ก) กระแสโหลด (ตอบ $225\angle 10^\circ$A)
   - ข) กระแสทางด้านแรงสูงและกระแสของหม้อแปลง (ตอบ $44.02\angle 10^\circ$A, $180.98\angle 10^\circ$A)
   - ค) วาดวงจรพร้อมแสดงขนาดและทิศทางของกระแส

2. หม้อแปลงออโตเครื่องหนึ่งปรับแทปที่ตำแหน่ง 25 % ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 600 V เพื่อแปลงแรงดันขึ้น ด้านแรงสูงต่อกับภาระทางไฟฟ้าขนาด 100 kVA 0.8 PF lagging จงวาดวงจรแล้วคำนวณหา
   - ก) แรงดันทางด้านทุติยภูมิ (ตอบ 2,400 V)
   - ข) กระแสโหลด (ตอบ 41.67 A)
   - ค) กระแสทางด้านปฐมภูมิ (ตอบ $166.67\angle -36.87$ A)
   - ง) กระแสในขดลวดส่วนที่ต่อกับเครื่องกำเนิด (ตอบ $125\angle -36.87$ A)
3. หม้อแปลงออโตเครื่องหนึ่งมีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ 600 รอบแบ่งเป็นส่วนของด้านทุติยภูมิ 200 รอบ ทางด้านปฐมภูมิต่ออยู่กับแรงดัน 2400 V 60 Hz ทางด้านทุติยภูมิต่ออยู่กับภาระทางไฟฟ้าขนาด 4.8 kVA 0.6 PF Lagging ถ้าไม่คิดค่าความสูญเสียของหม้อแปลง จงคำนวณหา
   - ก) แรงดันทางด้านทุติยภูมิ (ตอบ 800 V)
   - จ) กระแสทางด้านทุติยภูมิ (ตอบ $6\angle -53.13$ A)
   - ฉ) กระแสทางด้านปฐมภูมิ (ตอบ $2\angle -53.13$ A)

4. หม้อแปลงออโตเครื่องหนึ่งใช้แปลงแรงดันจาก 500 V เป็น 440 V ถ้าจ่ายภาระทางไฟฟ้า 20 kW ที่ Unity PF โดยไม่คิดค่าความสูญเสีย จงหากระแสที่ไหลในขด ac และ bc (ตอบ 40 A, 5.45 A)



5. ต้องการติดตั้งหม้อแปลงวัดกระแส เพื่อวัดกระแสของระบบที่มีพิกัดกระแส เท่ากับ 80 A ถ้าเลือกใช้หม้อแปลงวัดกระแส ขนาด 100/1 อัตราส่วน (Ratio) ของหม้อแปลงวัดกระแสจะเป็นเท่าใด และถ้ามีกระแสไหลผ่านด้านปฐมภูมิ 80 A กระแสทางด้านทุติยภูมิจะเป็นเท่าใด (ตอบ 100:1, 0.8 A)

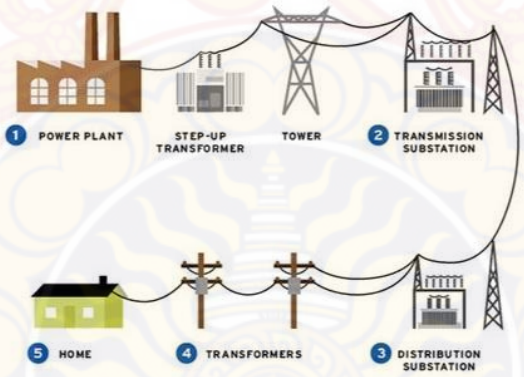
7 การใช้งานและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

Transformer Operation and Maintenance

ในระบบไฟฟ้ากำลังไม่ว่าจะเป็นส่วนของการผลิต การส่งจ่าย และการจำหน่าย อุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งก็คือ หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับของแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือลดลง ตามความต้องการของผู้ให้บริการและผู้ใช้ไฟ นอกจากการทำความเข้าใจกับทฤษฎีและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าแล้ว การติดตั้ง การใช้งาน การบำรุงรักษาก็เป็นสิ่งที่มีความสำคัญ ไม่น้อยไปกว่ากัน เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การแบ่งชนิดของหม้อแปลงตามลักษณะการระบายความร้อน การติดตั้งใช้งาน อุปกรณ์ของหม้อแปลง และอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ตลอดจนการบำรุงรักษาหม้อแปลง

7.1 ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (distribution system) เป็นระบบที่รับพลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างมาจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ผ่านมายังระบบสายส่งไฟฟ้า เพื่อทำการกระจายกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ สถานีไฟฟ้าย่อย (subsatation) ซึ่งมีหน้าที่ปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟ โดยส่วนใหญ่แล้วสำหรับประเทศไทยระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีระดับแรงดันครอบคลุมทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิสูงสุดไม่เกิน 115 kV



รูปที่ 7.1 ระบบผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทย

จากรูปที่ 7.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเริ่มต้นจากจุดที่ 3 ตรงจุดนี้ระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของสถานีไฟฟ้าย่อย จะเป็น 69/115 kV และระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกจะเป็น 12/24 kV ตามระบบของการไฟฟ้านครหลวง และ 22/33 kV ตามระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หลังจากผ่านสถานีฟ้าย่อยจุดที่ 3 เพื่อลดแรงดันลงแล้ว กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งต่อไปยังจุดที่ 4 และลดระดับแรงดันลงอีกครั้งด้วยหม้อแปลงจำหน่าย ขนาดของหม้อแปลงจำหน่ายจะเป็นไปตามปริมาณของโหลด ระดับแรงดันไฟฟ้าจะเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ให้บริการในพื้นที่ ก็คือ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 โหลดและแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

ระบบจำหน่าย	กฟน. (MEA)	กฟภ. (PEA)
ระบบแรงดันสูง (High Voltage)	โหลด > 15 MVA ใช้แรงดัน 69/115 kV 3 เฟส 3 สาย	โหลด > 10 MVA ใช้แรงดัน 115 kV 3 เฟส 3 สาย
ระบบแรงดันปานกลาง (Medium Voltage)	โหลด ≥ 300-15 MVA ใช้แรงดัน 12/24 kV 3 เฟส 3 สาย	โหลด ≥ 250-10 MVA ใช้แรงดัน 22/33 kV 3 เฟส 3 สาย
ระบบแรงดันต่ำ (Low Voltage)	โหลด < 300 kVA ใช้แรงดัน 240/416 V	โหลด < 250 kVA ใช้แรงดัน 230/400 V

ที่มา: ดัดแปลงจากข้อมูลระบบแรงดันและโหลดในการจ่ายไฟของการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

7.2 หม้อแปลงจำหน่ายในระบบไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) และหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) สำหรับหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้งานทั่วไปของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

1. ระบบ 1 เฟส 3 สาย มีใช้งานอยู่ 4 ขนาด คือ 10 kVA, 20 kVA, 30 kVA, 50 kVA
2. ระบบ 3 เฟส 4 สาย มีหลายขนาด ได้แก่ 30 kVA, 50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA, 315 kVA, 400 kVA, 500 kVA, 1,000 kVA, 1,250 kVA, 1,500 kVA, 2,500 kVA

หม้อแปลงจำหน่ายที่ติดตั้งเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าทั่วไปของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กำหนดให้ใช้ได้ตั้งแต่ขนาด 10 kVA 1 เฟส จนถึง 250 kVA 3 เฟส (ยกเว้น 30 kVA 3 เฟส) นอกเหนือจากนี้เป็นหม้อแปลงที่ติดตั้งให้ผู้ใช้ไฟเฉพาะราย มาตรฐาน (Standard) ต่าง ๆ ที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้

- มอก.384-2543/TIS 384-2000
- IEC 60076 Power Transformer
- IEC 60076-1,2011 Part 1: General
- IEC 60076-2,2011 Part 2: Temperature Rise
- IEC 60076-3,2000 Part 3: Insulation Level and Dielectric Tests
- IEC 60076-4,2002 Part 4: Lightning and Switching Impulse
- IEC 60076-5,2006 Part 5: Withstand Short Circuit
- IEC 60076-11: Dry-type Transformer
- IEEE C57.12.00-2000

- General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers

7.3 ชนิดของหม้อแปลงจำหน่าย

หม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 แบบตามลักษณะทางกายภาพ คือ หม้อแปลงแบบใช้ของเหลว (liquid-immersed transformers) และหม้อแปลงแบบแห้ง (dry-type transformers)

7.3.1 หม้อแปลงแบบใช้ของเหลว (liquid-immersed transformers)

หม้อแปลงที่ใช้ของเหลวเป็น ฉนวนและตวัระบายความร้อนแบ่งเป็น หม้อแปลงชนิดฉนวนของเหลวติดไฟได้ (flammable liquid-insulated transformer) หรือเรียกว่า หม้อแปลงน้ำมัน (oil type transformer) เป็นหม้อแปลงที่ใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวน และเป็นตัวระบายความร้อนด้วย ซึ่งน้ำมันหม้อแปลงมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ราคาถูก การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก นิยมใช้กับงานภายนอกอาคาร ถ้าจะนำมาใช้ในการติดตั้งภายในอาคาร ต้องติดตั้งในห้องหม้อแปลง เนื่องจากน้ำมันสามารถติดไฟได้โดยมีจุดติดไฟ (fire point) ที่ 165 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7.2 หม้อแปลงแบบใช้ของเหลว (liquid-immersed transformers)

7.3.2 หม้อแปลงแบบแห้ง (dry-type transformer)

เป็นหม้อแปลงที่ใช้ฉนวนเป็นของแข็ง นิยมใช้ติดตั้งภายในอาคารมีความปลอดภัยจากการเกิดเพลิงไหม้สูง เนื่องจากหากหม้อแปลงเกิดระเบิดขึ้นจะไม่มีส่วนที่ติดไฟ หม้อแปลงชนิดนี้มีทั้งชนิดที่ใช้ฉนวนเป็นเรซินแห้ง (cast resin) และชนิดที่ใช้ฉนวนอากาศ (air cooled) แต่ที่นิยมใช้กันมากคือหม้อแปลงชนิดฉนวนเรซิน ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่ระหว่างขดลวดอัดด้วยเรซินเสริมด้วยใยแก้ว (resin reinforced glass fiber) เรซินมีคุณสมบัติที่ดี คือ จุดติดไฟอยู่ที่อุณหภูมิสูงถึง 350°C ทำให้หม้อแปลงชนิดนี้ติดไฟยาก ฉนวนเรซินต้องไม่เป็นพิษต่อคนและสิ่งแวดล้อม และตัวหม้อแปลงต้องติดตั้งอยู่ในสิ่งห่อหุ้ม (enclosure) ด้วย



รูปที่ 7.3 หม้อแปลงแบบแห้ง (dry-type transformers)

7.4 วิธีระบายความร้อนของหม้อแปลง

หม้อแปลงที่ใช้งานในปัจจุบันนั้นสามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงได้เป็นสองชนิด คือ หม้อแปลงแบบแห้งหรือชนิดผึ่งอากาศ (dry type transformer) และหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมัน (oil-immersed transformer) หม้อแปลงทั้งสองชนิดนี้มีวิธีการระบายความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถแบ่งแยกวิธีการที่ใช้ในการระบายความร้อนของหม้อแปลง ได้ดังนี้

1. วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงแบบแห้ง แบ่งได้เป็น
   - ระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ ใช้สัญลักษณ์เป็น AN
   - ระบายความร้อนโดยวิธีเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของอากาศด้วยพัดลม ใช้สัญลักษณ์เป็น AF
2. วิธีการระบายความร้อนของหม้อแปลงชนิดแช่น้ำมัน แบ่งได้เป็น
   - ระบายความร้อนโดยหมุนเวียนอากาศและน้ำมันโดยวิธีธรรมชาติ ใช้สัญลักษณ์เป็น ONAN
   - ระบายความร้อนโดยหมุนเวียนน้ำมันโดยวิธีธรรมชาติ และเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของอากาศด้วยพัดลม ใช้สัญลักษณ์เป็น ONAF
   - ระบายความร้อนโดยวิธีการเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของน้ำมันด้วยปั๊ม และหมุนเวียนอากาศโดยวิธีธรรมชาติ ใช้สัญลักษณ์เป็น OFAN
   - ระบายความร้อนโดยวิธีการเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของน้ำมันด้วยปั๊มและเพิ่มกำลังการหมุนเวียนของอากาศด้วยพัดลม ใช้สัญลักษณ์เป็น OFAF
   - ระบายความร้อนโดยวิธีเพิ่มกำลังการหมุนเวียนให้กับน้ำและน้ำมัน ใช้สัญลักษณ์เป็น OFWF

7.4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกกันในวิธีระบายความร้อน

1. ตัวกลางระบายความร้อน
   - O คือ น้ำมันแร่ (mineral oil)
   - L คือ ของเหลวที่สังเคราะห์ขึ้น
   - G คือ ก๊าซ

W คือ น้ำ

A คือ อากาศ

S คือ ฉนวนแข็ง

2. แบบของการถ่ายเทความร้อน

N คือ โดยธรรมชาติ

F คือ โดยการขับเคลื่อน เช่น พัดลม ปั๊ม

7.5 ฉนวนของหม้อแปลง

ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนที่มีความสำคัญในเรื่องของความปลอดภัยและอายุการใช้งานของหม้อแปลงเนื่องจากต้องใช้งานกับไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำฉนวนจะต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือต้องเป็นความต้านทานไฟฟ้า มีความคงทนไดอิเล็กตริก (dielectric strength) สูง และยังต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุและความคงทนต่อความชื้น ความร้อนและปฏิกิริยายาทางเคมี สำหรับวัสดุหลักๆ ที่ใช้เป็นฉนวนสำหรับการสร้างหม้อแปลงก็คือ กระดาษและกระดาษอัด (paper and pressboard) โดยสามารถแบ่งชนิดของกระดาษได้ตามวัตถุดิบธรรมชาติที่ใช้ผลิตกระดาษ ดังนี้

1. กระดาษสีน้ำตาล (kraft paper) ผลิตจากเส้นใยของไม้ มีความหนาของกระดาษตั้งแต่ 0.05-0.5 มม.
2. กระดาษอัด ผลิตจากไม้และฝ้ายที่ใช้โดยทั่วไปมีความหนา 0.8-5.0 มม.

กระดาษฉนวนสำหรับหม้อแปลงจำหน่าย จัดเป็นฉนวนคลาส A มีความคงทนต่อความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 105°C โดยไม่ทำให้ความเป็นฉนวนเสื่อมสภาพลง เมื่อกระดาษแห้งจะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกได้ดีและมีการสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำ แต่กระดาษสามารถดูดซึมความชื้นได้ง่าย ดังนั้นในการสร้างหม้อแปลงจะต้องอบส่วนแกนเหล็กและขดลวดที่ประกอบขึ้นรูปแล้วให้แห้งแล้วนำไปจุ่มลงในน้ำมันในถังหม้อแปลงเพื่อป้องกันความชื้นและรักษาความคงทนของไดอิเล็กตริกของกระดาษไว้

ตารางที่ 7.2 คลาสของฉนวนและพิกัดของอุณหภูมิ

Insulation Class	**A**	**B**	**F**	**H**
Ambient (°C)	40	40	40	40
Rise by resistance (°C)	60	80	105	125
Hot spot allowance (°C)	5	10	10	15
Maximum hottest spot temperature (°C)	105	130	155	180

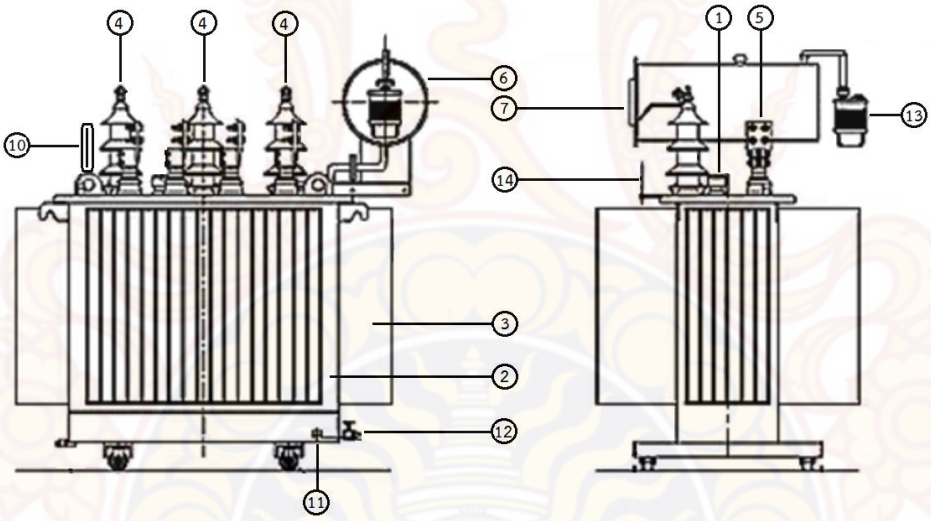
ที่มา: ดัดแปลงจาก NEMA MG 1, Motors and Generators.

7.6 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงใช้เป็นฉนวนระหว่างขดลวด แกนเหล็กและส่วนที่นำกระแสได้ น้ำมันหม้อแปลงนับว่าเป็นฉนวนที่มีความสำคัญเช่นเดียวกับกระดาษและยังใช้เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวด น้ำมันหม้อแปลงที่นำมาใช้งานต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานดังนี้

1. มีการระบายความร้อนที่ดีหรือมีความหนืดต่ำ
2. มีความต้านทานต่อการรวมตัวกับออกซิเจน
3. มีความคงทนต่อไดอิเลคตริก (dielectric breakdown) สูง
4. มีอุณหภูมิของจุดติดไฟสูง (มาตรฐานกำหนดไว้ไม่ต่ำกว่า 140°C)
5. ไม่มีความชื้นหรือสิ่งอื่นเจือปน เช่น ฝุ่นละออง
6. มีสภาพความเป็นกรดน้อยที่สุด

การทดสอบความคงทนไดอิเลคตริกของน้ำมันหม้อแปลงด้วยเครื่องมือทดสอบตามมาตรฐานต้องได้ผลเฉลี่ยจากการทดสอบไม่ต่ำกว่า 30 kV ต่อระยะ 2.5 มิลลิเมตร จึงจะถือว่าน้ำมันหม้อแปลงนี้ผ่านการทดสอบและสามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 7.4 ส่วนประกอบของหม้อแปลงแบบใช้น้ำมันเป็นฉนวน



ก) อุปกรณ์ระบายความดัน **ข) บุคโฮลซ์รีเลย์**

รูปที่ 7.5 ส่วนประกอบของหม้อแปลงแบบใช้น้ำมันเป็นฉนวน

7.7 ส่วนประกอบของหม้อแปลงระบบจำหน่าย

รูปที่ 7.4 และ 7.5 แสดงส่วนประกอบของหม้อแปลงระบบจำหน่ายแบบใช้น้ำมันเป็นฉนวน โดยแต่ละส่วนมีลักษณะและการทำงาน มีดังนี้

1) แทปปรับแรงดัน (tap changer) คือ ชุดสวิตช์เปลี่ยนเพิ่ม/ลด จำนวนรอบของขดลวดแรงสูง ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าด้านจ่ายหรือด้านแรงต่ำให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2) ตัวถังหม้อแปลง (tank) ทำจากโลหะเชื่อมขึ้นรูปสำหรับบรรจุส่วนประกอบภายในของหม้อแปลงและน้ำมันหม้อแปลง

3) ครีบ (fin) คือ ส่วนที่ใช้ระบายความร้อนของน้ำมันหม้อแปลง โดยที่ด้านข้างตัวถังหม้อแปลงจะมีครีบหรือลอนลูกฟูกสำหรับใช้ระบายความร้อนและรองรับการขยายตัวของน้ำมันหม้อแปลง

4) ลูกถ้วยแรงสูง (hv bushing) คือ แท่งฉนวนที่มีแกนตัวนำอยู่ภายใน ทำจากเซรามิค ใช้สำหรับเชื่อมต่อวงจรด้านแรงสูงภายในตัวหม้อแปลงกับภายนอก

5) ลูกถ้วยแรงต่ำ (lv bushing) คือ แท่งฉนวนที่มีแกนตัวนำอยู่ภายใน ทำจากเซรามิค ใช้สำหรับเชื่อมต่อวงจรด้านแรงต่ำภายในตัวหม้อแปลงกับภายนอก

6) ถังพักน้ำมัน (conservator tank) คือ ถังขนาดเล็กที่อยู่เหนือถังหม้อแปลง มีหน้าที่สำรองน้ำมันในถังที่ลดหรือเพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของน้ำมันหม้อแปลง

7) เกจวัดระดับน้ำมัน (oil level gauge) คือ เกจชี้แสดงระดับน้ำมันซึ่งอาจมีลักษณะเป็นร่องเป็นท่อหรือเข็มหน้าปัด ซึ่งหม้อแปลงชนิดปิดจะมีลูกลอยชี้บอกการมีอยู่ของน้ำมัน

8) อุปกรณ์ระบายความดันหรือท่อกันระเบิด (pressure-relief device) คือ กลไกสปริงที่ทำหน้าที่ปลดปล่อยแรงดันภายในถังหม้อแปลง จะทำงานเมื่อความดันภายในถังหม้อแปลงสูงจนชนะแรงสปริง ความดันก็จะถูกระบายออก

9) บุคโฮลซ์รีเลย์ (buchholz relay) คือ อุปกรณ์ป้องกันที่ทำหน้าที่เตือนหรือตัดวงจร เมื่อเกิดเหตุไม่ปกติภายในถังหม้อแปลง (เฉพาะหม้อแปลงแบบที่มีถังพัก)

10) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer pocket) เป็นตัววัดอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง

11) ที่ต่อสายดิน (earthing terminal) คือ จุดที่ต่อสายจากตัวถังลงสู่ดินเพื่อความปลอดภัยจากไฟฟ้ารั่ว ลัดวงจร และฟ้าผ่า

12) วาลว์ถ่ายน้ำมัน (oil drain valve) คือ วาลว์เปลี่ยนถ่ายน้ำมันออกจากหม้อแปลงหรือเป็นวาลว์เปิดเก็บตัวอย่างน้ำมันทดสอบ

13) ชุดกรองความชื้น (conservator breather) หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดมีถังน้ำมันสำรอง (conservator tank) จะต้องติดตั้งสารดูดความชื้น ซิลิกาเจล (silica gel) เพราะเมื่อมีการใช้งานหม้อแปลงเป็นเวลานาน และเกิดความชื้นขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สารดูความชื้นจะทำหน้าที่ดูดซับความชื้นไว้ ถ้าสาร

ดูดความชื้นเกิดเปลี่ยนสี เช่น จากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู หมายถึง ซิลิก้าเจลเริ่มเสื่อมสภาพแล้ว จะต้องทำการเปลี่ยนใหม่

14) อาร์คชิ่งฮอร์น (arcing horn) คือ อุปกรณ์ป้องกันหม้อแปลงมิให้ชำรุดเสียหายจากภาวะแรงดันเกิน (surge) ที่เกิดจากฟ้าผ่า เพราะแรงดันเกินจากฟ้าผ่าจะกระโดดผ่านทางอาร์คชิ่งฮอร์นลงกราวด์แทนที่จะหาทางทะลุผ่านฉนวนและน้ำมันลงตัวถัง เพราะการไหลผ่านอาร์คชิ่งฮอร์นมีค่า breakdown airgap ต่ำกว่าค่าฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า

7.8 อุปกรณ์ประกอบหม้อแปลง

- ฟิวส์ (fuse) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันระบบหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า จากภาวะลัดวงจร (short circuit) หรือกระแสเกิน (over load) จะมีทั้งฟิวส์ด้านแรงสูง (ติดตั้งด้านปฐมภูมิ ของหม้อแปลง) และฟิวส์ด้านแรงต่ำ (ติดตั้งด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง) ขนาดฟิวส์แรงสูงตาม มาตรฐาน EEI-NEMA คือ 1, 2, 3, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 65, 80, 100, 140, 200 A



รูปที่ 7.6 ฟิวส์แรงสูง

- ล่อฟ้า (lightning arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์หรือระบบและสายส่ง ไม่ให้ได้รับความเสียหายจากภาวะแรงดันเกิน (over voltage) ที่เกิดจากฟ้าผ่าหรือการปลดสับสวิตช์



รูปที่ 7.7 ล่อฟ้า

7.9 การติดตั้งใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า

การติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถแบ่งการติดตั้งได้เป็น 2 แบบ คือ การติดตั้งภายในอาคาร และการติดตั้งภายนอกอาคาร

7.9.1 การติดตั้งภายในอาคาร แบ่งเป็น

1. การติดตั้งไว้ในบริเวณที่จัดไว้สำหรับการติดตั้งหม้อแปลงโดยเฉพาะ



รูปที่ 7.8 การติดตั้งไว้ในบริเวณที่จัดไว้สำหรับการติดตั้งหม้อแปลงโดยเฉพาะ

2. การติดตั้งในห้องหม้อแปลง

ห้องหม้อแปลงจะต้องอยู่ในสถานที่ซึ่งบุคคลที่เกี่ยวข้องสามารถเข้าถึงเพื่อที่จะทำการตรวจสอบ ดูแล บำรุงรักษาหม้อแปลงได้โดยสะดวก



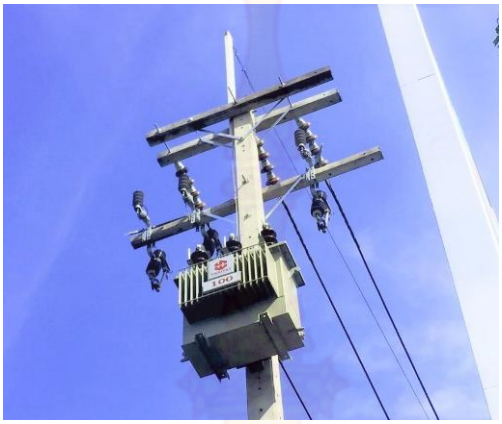
รูปที่ 7.9 การติดตั้งหม้อแปลงในห้องหม้อแปลง

7.9.2 การติดตั้งภายนอกอาคาร แบ่งเป็น

1. การติดตั้งบนเสาและนั่งร้านหม้อแปลง

- แบบแขวนเสา ใช้สำหรับติดตั้งหม้อแปลง 1 เฟส และ 3 เฟส ขนาดตั้งแต่ 10-160 kVA และสูงสุดได้ถึง 250 kVA

- แบบนั่งร้าน ใช้สำหรับติดตั้งหม้อแปลง 3 เฟส โดยแบ่งตามความสามารถในการรับ น้ำหนักได้ 2 ขนาด คือ ขนาดรับน้ำหนัก 4.5 ตัน และขนาดรับน้ำหนัก 6.5 ตัน ขนาดการรับน้ำหนักของนั่งร้านหม้อแปลงจะต้องสอดคล้องกันทั้งหมด ทั้งชุดนั่งร้านหม้อแปลง ซึ่งได้แก่ เสาไฟฟ้า คานและอุปกรณ์ประกอบ และต้องเป็นไปตามมาตรฐานของ การไฟฟ้าฯ รวมถึงวิศวกรในสาขาที่เกี่ยวข้องรับรองความมั่นคงแข็งแรง



รูปที่ 7.10 การติดตั้งหม้อแปลงแบบแขวนเสา



รูปที่ 7.11 การติดตั้งหม้อแปลงบนนั่งร้าน

2. การติดตั้งในลานหม้อแปลง

หากติดตั้งหม้อแปลงใกล้กับวัสดุ หรืออาคารที่ติดไฟได้ หรือติดตั้งใกล้ทางหนีไฟ ประตู หรือหน้าต่าง ต้องมีการปิดกั้นเพื่อป้องกันไฟที่เกิดจากของเหลวของหม้อแปลงลุกลามไปติดวัสดุ หรือส่วนของอาคารที่ติดไฟได้ และส่วนที่เป็นด้านไฟฟ้าแรงสูงต้องอยู่ห่างจากโครงสร้างอื่น ไม่น้อยกว่า 1.80 เมตร



รูปที่ 7.12 การติดตั้งหม้อแปลงในลานหม้อแปลง

3. การติดตั้งแบบมีเครื่องห่อหุ้ม

เครื่องห่อหุ้มต้องทนต่อสภาพอากาศ และหม้อแปลงที่มีขนาด เกิน 112.5 kVA ต้องติดตั้งไว้ห่างวัสดุติดไฟไม่น้อยกว่า 0.30 เมตร



รูปที่ 7.13 การติดตั้งหม้อแปลงแบบมีเครื่องห่อหุ้ม

7.10 การบำรุงรักษาหม้อแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ต้องบำรุงรักษาน้อยกว่าเครื่องกลไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าก็ยังต้องการ การตรวจสอบและบำรุงรักษาตามวาระหรือตามรอบการใช้งาน ซึ่งจำเป็นต้องจัดทำอย่างสม่ำเสมอ ส่วนวาระจะยาวนานเท่าใดนั้น จะต้องพิจารณาจากสภาพการใช้งานของหม้อแปลงและสภาพของสิ่งแวดล้อมที่หม้อแปลงติดตั้งอยู่ การบำรุงรักษาที่ดีนั้นควรจัดทำแผนการตรวจสอบและบำรุงรักษา และดำเนินการตาม แผนอย่างจริงจัง ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษาอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง เพื่อยืดอายุการใช้งาน ให้ใช้งานได้อย่างคุ้มค่า โดยมีสิ่งบ่งบอกถึงความจำเป็นที่จะต้องบำรุงรักษาดังต่อไปนี้

1. หากสารดูดความชื้น (siliga gel) เสื่อมคุณภาพจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพู หรือสีดำ ควรเปลี่ยนใหม่
2. ซีลยางชำรุดน้ำมันไหลซึมออกมา
3. ถังหม้อแปลงขึ้นสนิม ผุ ชำรุด
4. อาร์คชิ่งฮอนชำรุด บิดงอ ไม่ได้ระยะ (15.5 ซม.)
5. ประเก็นกรอบหมดสภาพหรือชำรุดน้ำมันจะไหลซึมออกมา
6. บุชชิ่งแรงสูง หรือแรงต่ำ บิ่น แตก ชำรุด หรือมีฝุ่นเกาะหนา อาจเป็นตัวนำให้ไฟรั่วลงดินทำให้ไฟดับได้
7. ถังน้ำมันสำรอง (conservator tank) ของหม้อแปลงมีระดับน้ำมันต่ำต้องเติมน้ำมันเพิ่ม
8. ครีบระบายความร้อนสกปรกหรือรั่วซึม
9. ขั้วต่อสายแรงสูง - แรงต่ำที่บุชชิ่งหลวมหรือเกิดออกไซด์จะทำให้เกิดอาร์คทำให้ชำรุด

10. ค่าความเป็นฉนวนของน้ำมันต่ำกว่าพิกัดจะต้องกรองหรือเปลี่ยนน้ำมันทันที
11. ใช้งานมานานมากกว่า 6 เดือน เป็นต้นไป

7.11 การเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

การเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมกับงานนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลาย ๆ อย่าง ซึ่งมีแนวทางในการพิจารณา เลือกใช้หม้อแปลง ดังนี้

- ระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้หม้อแปลงและจ่ายให้โหลด เช่น ระดับแรงดัน ความถี่ จำนวนเฟส
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์และการทดสอบ เช่น มอก., IEC, IEEE
- ชนิดของหม้อแปลงที่เลือกใช้ เช่น หม้อแปลงน้ำมัน หรือหม้อแปลงแห้ง
- การระบายความร้อนของหม้อแปลง เช่น ONAN, AN, AF
- ค่าใช้จ่ายของหม้อแปลง เช่น ราคาหม้อแปลง การใช้งาน การบำรุงรักษา
- ค่าความสูญเสียของหม้อแปลง เช่น ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ค่าสูญเสียในขดลวดทองแดง
- เวคเตอร์กรุ๊ปของหม้อแปลง เช่น Dyn11, Dd0
- อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้น ไอเกลือ ผงฝุ่น
- ข้อจำกัดทางด้านขนาด น้ำหนัก
- สถานที่ติดตั้งการใช้งาน เช่น ในพื้นที่อันตราย โรงกลั่นน้ำมัน
- แรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ ขนาดกระแสลัดวงจร และแรงดันตกที่ปลายสาย
- ลักษณะของ Tap Changer ตามพื้นที่ของแต่ละการไฟฟ้า
- อายุการใช้งานของหม้อแปลง
- การขนานหม้อแปลง

7.12 การเลือกขนาดหม้อแปลงให้คุ้มค่าและมีความสูญเสียน้อยที่สุด

จากบทความวิจัยและบทความวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการเลือกขนาดหม้อแปลงจำหน่าย (optimal distribution transformer sizing) พบว่าการเลือกขนาดของหม้อแปลงไม่ควรพิจารณาเฉพาะ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสูงสุด (kVA) ที่ต้องการใช้งาน หรือราคาซื้อของหม้อแปลงเท่านั้น แต่ควรพิจารณาที่รูปแบบการจ่ายโหลดตลอดปี ความสูญเสียขณะไม่มีโหลด ความสูญเสียขณะจ่ายโหลด ราคาพลังงาน การเติบโตของโหลด อุณหภูมิ ฮาร์มอนิก และอายุการใช้งาน เพื่อให้ต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุด

7.12.1 หลักพื้นฐานของการเลือกขนาดหม้อแปลง

กำลังสูญเสียจากการจ่ายโหลดของหม้อแปลง (load loss) คือ ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงจ่ายโหลด และมีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสโหลด โดยองค์ประกอบหลัก คือ ความสูญเสียในขดลวดจากความต้านทานของตัวนำ หรือ copper loss นั่นเอง

$$P_{Load\ Loss} = I^2 R \qquad (7.1)$$

ถ้ากำหนดให้ P_k คือ กำลังสูญเสียจากการจ่ายโหลดที่กระแสพิกัด และหม้อแปลงทำงานที่อัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง (x)

$$x = \frac{S}{S_N} \tag{7.2}$$

กำลังสูญเสียจากการจ่ายโหลด (load loss) ที่ระดับโหลดใด ๆ ประมาณได้เป็น

$$P_{Load\ Loss} = x^2 P_k \tag{7.3}$$

เมื่อ

x คือ อัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง

S คือ kVA ที่หม้อแปลงจ่ายโหลด

S_N คือ ขนาด kVA ของหม้อแปลง

P_k คือ กำลังสูญเสียจากการจ่ายโหลดที่กระแสพิกัด

ตัวอย่าง 7.1 หม้อแปลงเครื่องหนึ่งมี load loss ที่พิกัด P_k เท่ากับ 4 kW แต่ใช้งานที่ 50% ของพิกัด จะมีกำลังสูญเสียจากการจ่ายโหลดเท่าไร

$$P_{Load\ Loss} = 0.5^2 \times 4 = 1\,kW$$

ดังนั้น เมื่อโหลดลดจาก 100% เหลือ 50% Load Loss จะลดเหลือประมาณ 25% ของค่าที่พิกัด load loss เปลี่ยนตามโหลด ในขณะที่ core loss หรือ core loss เกิดขึ้นเกือบคงที่ตลอดเวลาที่หม้อแปลงยังต่ออยู่กับแรงดันพิกัด ดังนั้นความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลด จึงประมาณการ ได้จาก

$$P_{Loss} = P_{Core} + x^2 P_k$$

เมื่อ

P_{Loss} คือ ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลด

P_{Core} คือ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss or core loss)

P_k คือ ความสูญเสียจากการจ่ายโหลด (load loss) ที่พิกัด

หม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นจะมีค่า x ต่ำ แม้ copper loss จะต่ำ แต่ core loss ยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลาที่หม้อแปลงได้รับแรงดัน ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีค่า x สูง ทำให้ load loss เพิ่มขึ้นตามกระแสโหลดยกกำลังสอง (I^2R) และทำให้อุณหภูมิขดลวดสูงขึ้น การลดความสูญเสียต้องพิจารณาทั้ง core loss และ load loss พร้อมกับระดับการจ่ายโหลด ไม่ใช่ดูเฉพาะประสิทธิภาพที่พิกัดเท่านั้น

จุดที่ประสิทธิภาพของหม้อแปลงสูงสุดในเชิงทฤษฎีเกิดขึ้นเมื่อ $P_{cu} = P_{Core}$ ดังนั้น

$$x_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{P_{Core}}{P_k}} \tag{7.4}$$

อย่างไรก็ตาม การเลือกหม้อแปลงให้ทำงานที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด $(P_{cu} = P_{Core})$ ไม่จำเป็นต้องเป็นขนาดหม้อแปลงที่คุ้มค่าที่สุดทางเศรษฐศาสตร์ เพราะการเลือกหม้อแปลงใช้งานจริงต้องรวมราคาซื้อ ราคาพลังงาน อายุใช้งาน รูปแบบโหลด และมูลค่าความสูญเสียตลอดอายุเข้าด้วยกัน และการควบคุมให้หม้อแปลงทำงานที่จุดประสิทธิภาพสูงสุดนั้นแทบเป็นไปไม่ได้เลยในทางปฏิบัติ เพราะในความเป็นจริงโหลดที่ต่อใช้งานอยู่กับหม้อแปลงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

7.12.2 การเลือกขนาดจากรูปแบบการจ่ายโหลดและการเติบโตของโหลด

Chen และ Wu [13] นำเสนอวิธีการ Dynamic Programming เพื่อเลือกขนาดหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้ลักษณะโหลดของผู้ใช้ประเภทที่อยู่อาศัย พาณิชย์ และอุตสาหกรรม พร้อมพิจารณาการเพิ่มขึ้นของโหลดในอนาคต โดยมีเป้าหมายทำให้ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-Cycle Cost) ต่ำที่สุด

ประเด็นสำคัญในการเลือกขนาดหม้อแปลง คือ ไม่ควรเลือกขนาด kVA ของหม้อแปลงประมาณเท่ากับ kVA ที่ใช้งานสูงสุด ($S_N \approx S_{max}$) เพียงอย่างเดียว แต่ควรพิจารณาจาก kVA ที่ใช้งานตามช่วงเวลา S(t) ตลอดหลายปีในอนาคต เพราะหม้อแปลงอาจมีโหลดต่ำมากในช่วงต้นและเพิ่มขึ้นในช่วงปลายอายุของโครงการ การติดตั้งหม้อแปลงขนาดใหญ่มากเพื่อรองรับโหลดในอนาคตตั้งแต่วันแรกจึงอาจไม่ใช่วิธีที่ประหยัดที่สุด

7.12.3 การพิจารณาการสูญเสียอายุการใช้งาน

Jardini และคณะ [14] ศึกษาการเลือกขนาดหม้อแปลงจำหน่ายจากเกณฑ์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยพิจารณาต้นทุนการลงทุน ต้นทุนความสูญเสีย และต้นทุนจากการสูญเสียอายุการใช้งาน

$$\text{Total Cost} = \text{Investment} + \text{Cost of Losses} + \text{Cost of Loss of Life} \qquad (7.5)$$

งานวิจัยดังกล่าวใช้ข้อมูลเส้นโค้งโหลด (load curve) อุณหภูมิแวดล้อม และ hot-spot temperature ในการประเมินอายุฉนวน จึงชี้ให้เห็นว่าค่า โหลดสูงสุด เพียงค่าเดียวไม่เพียงพอสำหรับการเลือกกำลัง kVA การจ่ายโหลดสูงของหม้อแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ อาจยอมรับได้หากอุณหภูมิ hot spot ยังอยู่ในเกณฑ์ แต่การจ่ายโหลดสูงเป็นเวลานานจะเร่งการเสื่อมของฉนวน

7.12.4 การจ่ายโหลดเชิงเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลง

แนวคิดการจ่ายโหลดเชิงเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงใช้ core loss, load loss, load factor และ ตัวประกอบการสูญเสียตามภาระโหลด (load loss factor) ของโหลดจริงในการหาจุดโหลดที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์

$$LF = \frac{P_{ave}}{P_{\max}} \qquad (7.6)$$

ตัวประกอบภาระโหลด (load factor; LF) หรือ คือ อัตราส่วนระหว่าง โหลดเฉลี่ย กับ โหลดสูงสุด ในช่วงเวลาที่พิจารณา ใช้บอกความสม่ำเสมอของการใช้กำลังไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ 7.2 หม้อแปลงจ่ายโหลดเฉลี่ย 60 kW และจ่ายโหลดสูงสุดที่ 100 kW

$$LF = \frac{P_{ave}}{P_{\max}} = \frac{60}{100} = 0.6 \quad or \quad 60\%$$

- Load Factor มีค่าสูง หมายถึงการใช้ไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอ
- Load Factor มีค่าต่ำ หมายถึงมีช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้าสูงมาก แต่การใช้ไฟฟ้าโดยเฉลี่ยใช้น้อย
- Load Factor มีค่าระหว่าง 0–1 หรือ 0–100%

ถ้ากำหนด ตัวประกอบการสูญเสียตามภาระโหลด (Load Loss Factor) ให้สะท้อนค่าเฉลี่ยของกำลังสองของโหลด

$$LLF \approx \frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt \qquad (7.7)$$

พลังงานสูญเสียรายปีสามารถประมาณได้จาก

$$E_{loss} = 8,760P_{Core} + 8,760(LLF)P_k \qquad (7.8)$$

ดังนั้น หม้อแปลงจำหน่ายสองเครื่องที่มีโหลดสูงสุดเท่ากันแต่อยู่ในพื้นที่ใช้งานที่แตกต่างกัน อาจต้องเลือกขนาดที่แตกต่างกัน หาก Load Curve แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่ 7.3 หม้อแปลงเครื่องหนึ่งมี โหลดสูงสุด เท่ากับ 100 kW และมีรูปแบบการใช้โหลดใน 1 วัน ดังนี้

ช่วงเวลา	ระยะเวลา	โหลด	x(t) = P/Ppeak	$x^2(t)$
00:00–06:00	6 ชม.	20 kW	0.20	0.0400
06:00–12:00	6 ชม.	50 kW	0.50	0.2500
12:00–18:00	6 ชม.	100 kW	1.00	1.0000
18:00–24:00	6 ชม.	60 kW	0.60	0.3600

จากสมการ

$$LLF \approx \frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt$$

เมื่อโหลดเป็นค่าคงที่ในแต่ละช่วง สามารถเขียนเป็น

$$LLF = \frac{\sum x_i^2 t_i}{T}$$

ดังนั้น

$$LLF = \frac{(0.2)^2(6) + (0.50)^2 + (1.00)^2(6) + (0.60)^2(6)}{24}$$
$$LLF = \frac{0.24 + 1.50 + 6.00 + 2.16}{24} = 0.4125$$
$$LLF = 0.4125 \times 100 = 41.25\%$$

จากนั้นนำ LLF ไปหาพลังงานสูญเสียของหม้อแปลง สมมติให้หม้อแปลงมี Core Loss (P_{Core}) เท่ากับ 1.0 kW Load Loss ที่ โหลดสูงสุด (P_k) เท่ากับ 4.0 kW LLF เท่ากับ 0.4125

$$E_{loss} = 8,760P_{Core} + 8,760(LLF)P_k$$

แทนค่า

$$E_{loss} = 8,760 \times 1.0 + 8,760 \times (0.4125 \times 4.0)$$
$$E_{loss} = 8,760 + 14,454$$
$$E_{loss} = 23,214 \quad \text{kWh/year}$$

ถึงแม้ว่าหม้อแปลงจะมีโหลดสูงสุด 100 kW แต่ไม่ได้รับโหลดสูงสุดตลอดเวลา จึงไม่ควรคำนวณ Load Loss โดยสมมติว่า P_k เท่ากับ 4 kW เกิดขึ้นตลอด 8,760 ชั่วโมง (365 วัน x 24 ชั่วโมง เท่ากับ 8,760 ชั่วโมง) การใช้ LLF เท่ากับ 0.4125 ทำให้ประมาณความสูญเสียตามลักษณะเส้นโค้งโหลดจริง ได้เหมาะสมกว่า

7.12.5 ต้นทุนรวมในการเป็นเจ้าของหม้อแปลง

การประเมินต้นทุนรวมในการเป็นเจ้าของ (Total Owning Cost; TOC) เป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าการพิจารณาราคาซื้อเพียงอย่างเดียว โดยสามารถเขียนแนวคิดพื้นฐานได้เป็น

$$TOC = C_T + A \cdot P_{Core} + B \cdot P_k$$

เมื่อ

C_T คือ ราคาของหม้อแปลงที่ซื้อ

P_{Core} คือ core loss

P_k คือ load loss

A กับ B คือ ตัวประกอบการแปลงเป็นมูลค่าปัจจุบัน (capitalization factor) ที่ใช้แปลงความสูญเสียเป็นมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายพลังงานตลอดอายุใช้งาน

ค่า A และ B คือการแปลงความสูญเสียเป็นมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายพลังงานตลอดอายุใช้งานของหม้อแปลง แนวคิด life-cycle cost ในลักษณะเดียวกันนี้ยังถูกนำเสนอโดย Amoiralis และคณะ [5] ซึ่งรวมถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อมของการสูญเสียพลังงานด้วย

ดังนั้นจึงอาจเกิดกรณีที่ หม้อแปลงเครื่องที่ 1 ราคา 400,000 บาท แต่มีค่าความสูญเสียสูง หม้อแปลงเครื่องที่ 2 ราคา 460,000 บาท แต่มีค่าความสูญเสียต่ำ แม้เครื่องที่ 2 จะมีราคาแพงกว่าเครื่องที่ 1 ถึง 60,000 บาท แต่ถ้าหากสามารถประหยัดค่าไฟจากความสูญเสียได้มากกว่า ความแตกต่างของราคาตลอด การ

ใช้งาน 20–30 ปี หม้อแปลงเครื่องที่ 2 จะมี TOC ต่ำกว่า และถือว่าคุ้มค่ากว่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ แนวคิดนี้สอดคล้องกับ IEEE Guide สำหรับการประเมินความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลง ดังนั้น หม้อแปลงที่มีราคาแพงแต่มีความสูญเสียต่ำ อาจมีต้นทุนรวมตลอดอายุใช้งานต่ำกว่าหม้อแปลงราคาถูกที่มีความสูญเสียสูง

ตัวอย่าง 7.4 จงหาค่าต้นทุนรวมในการเป็นเจ้าของ (TOC) ของหม้อแปลง ตามข้อมูลดังต่อไปนี้

- อายุใช้งานหม้อแปลง 20 ปี
- ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 4 บาท/kWh
- ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) เกิดตลอด 8,760 ชั่วโมง/ปี
- คำนวณแบบไม่คิดอัตราดอกเบี้ยและมูลค่าปัจจุบัน

ตัวอย่างการกำหนดค่า A

$$A = 4 \times 8,760 \times 20$$
$$A = 700,800 \quad \text{Baht/kW}$$

ความหมาย คือ ความสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง (Core Loss) ทุก ๆ 1 kW มีต้นทุนพลังงานประมาณ 700,800 บาท ตลอด 20 ปี

ตัวอย่างการกำหนดค่า B

สำหรับความสูญเสียจากการจ่ายโหลด (Load loss) ต้องคำนึงถึง Load Loss Factor (LLF) เนื่องจากหม้อแปลงไม่ได้จ่ายโหลดเต็มพิกัดตลอดเวลา หากกำหนดให้ LLF มีค่าเท่ากับ 0.30 ดังนั้น

$$B = 4 \times 8,760 \times 20 \times 0.30$$
$$B = 210,240 \quad \text{Baht/kW}$$

กำหนดให้ หม้อแปลงราคา (C_T) เท่ากับ 500,000 บาท มี P_{Core} เท่ากับ 1.0 kW และ Load loss ที่พิกัด (P_k) เท่ากับ 5.0 kW จะได้

$$TOC = C_T + A \cdot P_{Core} + B \cdot P_k$$
$$TOC = 500,000 + (700,800 \times 1) + (210,240 \times 5)$$
$$TOC = 500,000 + 700,800 + 1,051,200$$
$$TOC = 2,252,000 \quad \text{Baht}$$

ดังนั้น แม้หม้อแปลงมีราคาซื้อเพียง 500,000 บาท แต่เมื่อคิดมูลค่าความสูญเสียตลอด 20 ปีแล้ว TOC จะเป็นประมาณ 2.252 ล้านบาท

7.12.6 การใช้งานหม้อแปลงกับโหลดที่มีฮาร์มอนิก

สำหรับอาคารสมัยใหม่ โรงงาน ศูนย์ข้อมูล หรืออาคารธุรกิจรูปแบบอื่นที่มีการใช้งาน EV charger, UPS, VFD และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ อุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นตัวสร้างกระแสฮาร์มอนิกทำให้

การสูญเสียจากการจ่ายโหลดและอุณหภูมิขดลวดเพิ่มขึ้นได้ ส่งผลให้อัตราการเสื่อมของฉนวนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น การเลือกขนาดหม้อแปลงสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นควรตรวจสอบค่า THDi, กระแสฮาร์มอนิก, eddy-current loss และ hot-spot temperature รวมถึงพิจารณา K-factor หรือ Harmonic Loss Factor ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

7.12.7 หม้อแปลงควรจ่ายโหลดประมาณกี่เปอร์เซ็นต์

ไม่ควรกำหนดเป็นกฎตายตัวว่าหม้อแปลงควรจ่ายโหลด 50%, 60%, 70% หรือ 80% เนื่องจากค่าเหมาะสมขึ้นอยู่กับอัตราส่วน P_{Core}/Pk, load factor, load loss factor, ราคาพลังงาน รูปแบบการจ่ายโหลด และการเพิ่มขึ้นของโหลด สามารถใช้จุดประสิทธิภาพสูงสุดเป็นค่าอ้างอิงเบื้องต้น

$$x_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{P_{Core}}{P_k}}$$

ตัวอย่างเช่น ถ้า P_{Core} เท่ากับ 1.0 kW และ P_k เท่ากับ 4.0 kW จะได้

$$x_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{P_{Core}}{P_k}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = 0.50 \quad or \quad 50\,\%$$

แต่ถ้า P_{Core} เท่ากับ 1.5 kW และ P_k เท่ากับ 3.0 kW จะได้

$$x_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{P_{Core}}{P_k}} = \sqrt{\frac{1.5}{3}} = 0.707 \quad or \quad 70.7\,\%$$

จึงอธิบายได้ว่าทำไมจากหลายแหล่งข้อมูลจึงให้คำแนะนำในการจ่ายโหลดในช่วงประมาณ 50–70 % แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกขนาดของหม้อแปลงไม่ควรนำช่วงดังกล่าวไปใช้เป็นเกณฑ์สากลโดยไม่พิจารณาข้อมูลของระบบจริง

7.12.8 แนวทางการเลือกขนาดหม้อแปลงสำหรับงานออกแบบ

วิธีที่เหมาะสมควรเริ่มจากการสร้างรูปแบบโหลด (load profile) ก่อน ไม่ควรเริ่มจากการเลือกขนาด kVA โดยกำหนดให้

$$LF = \frac{S_{ave}}{S_{\max}} \tag{7.9}$$

รวมถึง load curve รายชั่วโมง เช่น 8,760 ชั่วโมงต่อปี (หากมีข้อมูล) จากนั้นกำหนดขนาดหม้อแปลงที่เป็นไปได้ เช่น 100, 160, 250, 315, 400, 500 และ 630 kVA แล้วคำนวณอัตราการจ่ายโหลดของแต่ละขนาดจาก

$$xi(t) = \frac{S(t)}{S_{N,i}} \tag{7.10}$$

พลังงานสูญเสียของหม้อแปลงแต่ละขนาดสามารถประเมินจาก

$$E_{Loss,i} = \int [P_{Core,i} + x_i^2(t) P_{k,i}]dt \qquad (7.11)$$

จากนั้นคำนวณ

$$TOC_i = C_i + PV\left(C_{Losss,i}\right) + PV\left(C_{\text{maintenance},i}\right) + C_{Loss-life,i} \qquad (7.12)$$

และเลือกขนาดของหม้อแปลงที่ทำให้ TOC ต่ำที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดด้านกำลังโหลด อุณหภูมิจุด hot-spot และอายุการใช้งานของฉนวน

ตัวอย่างที่ 7.5 หาขนาดของหม้อแปลงที่เหมาะสมจากรูปแบบการจ่ายโหลด (Load Profile) รายวัน ดังนี้

00.00 – 6.00 น เท่ากับ 80 kVA
06.00 –12.00 น. เท่ากับ 120 kVA
12.00 –18.00 น. เท่ากับ 200 kVA
18.00 –24.00 น. เท่ากับ 160 kVA

รูปแบบโหลดนี้เกิดซ้ำกันทุกวันตลอดปี ต้องการเปรียบเทียบ TOC ของหม้อแปลง 3 ขนาด คือ 250, 315 และ 400 kVA โดยกำหนดข้อมูลตัวอย่างดังตารางต่อไปนี้

ขนาดหม้อแปลง	ราคา (C_i)	$P_{Core,i}$	$P_{k,i}$	ค่าบำรุงรักษา/ปี
250 kVA	250,000 บาท	0.55 kW	2.70 kW	3,000 บาท
315 kVA	290,000 บาท	0.65 kW	3.20 kW	3,500 บาท
400 kVA	340,000 บาท	0.75 kW	3.60 kW	4,000 บาท

กำหนดให้ ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 4.00 บาท/kWh อายุโครงการ (n) 20 ปี อัตราคิดลด (i) เท่ากับ 5.81 % และใช้ PWF เท่ากับ 11.65

PWF คือ Present Worth Factor หรือ ตัวประกอบมูลค่าปัจจุบัน

$$PWF = \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \qquad (7.13)$$

สมการหลัก คือ

$$TOC_i = C_i + PV\left(C_{Losss,i}\right) + PV\left(C_{\text{maintenance},i}\right) + C_{Loss-life,i}$$

ตัวอย่างนี้สมมติให้

$$C_{Loss\text{-}life,i} = 0$$

เพื่อให้เห็นหลักการคำนวณชัดเจนก่อน

1) หม้อแปลงขนาด 250 kVA

อัตราการจ่ายโหลดของหม้อแปลงแต่ละช่วงเวลา คำนวณได้จาก

$$x_i(t) = \frac{S(t)}{S_{N,i}}$$

ดังนั้น

$$x_1 = \frac{80}{250} = 0.32, \quad x_2 = \frac{120}{250} = 0.48, \quad x_3 = \frac{200}{250} = 0.80, \quad x_4 = \frac{160}{250} = 0.64$$

หาค่า

$$\int x_i^2(t)dt$$

สำหรับ 1 วัน

$$x = (0.32^2 \times 6) + (0.48^2 \times 6) + (0.80^2 \times 6) + (0.64^2 \times 6)$$
$$x = 0.6144 + 1.3824 + 3.8400 + 2.4576$$
$$x = 8.2944 \quad h/day$$

ตลอด 1 ปี

$$x = 8.2944 \times 365 = 3,027.46 \text{ h/year}$$

พลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก

$$E_{Core} = 8,760 P_{Core} = 8,760 \times 0.55 = 4,818 \text{ kWh/year}$$

พลังงานสูญเสียขณะจ่ายโหลด

$$E_{Load} = P_k \int x_i^2(t)dt = 2.70 \times 3,027.46 = 8,174.13 \text{ kWh/year}$$

ดังนั้น

$$E_{Loss,250} = 4,818 + 8,174.13 = 12,992.13 \text{ kWh/year}$$

ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียต่อปี

$$C_{Loss} = 12,992.13 \times 4 = 51,968.52 \text{ Baht/year}$$

คิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน (Present Value; PV) ตลอด 20 ปี

$$PV(C_{Loss}) = 519,68.52 \times 11.65 = 605,433.31 \text{ Baht}$$

ค่าบำรุงรักษาคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน

$$PV\left(C_{maintenance}\right) = 3,000 \times 11.65 = 34,950 \text{ Baht}$$

ดังนั้น

$$TOC_{250} = 250,000 + 605,433.31 + 34,950$$
$$TOC_{250} = 890,383.31 \text{ Baht}$$

2) หม้อแปลงขนาด 315 kVA

อัตราการจ่ายโหลดของหม้อแปลงแต่ละช่วงเวลา คือ

$$x_1 = \frac{80}{315}, \quad x_2 = \frac{120}{315}, \quad x_3 = \frac{200}{315}, \quad x_4 = \frac{160}{315}$$

จึงได้

$$\int x_i^2(t)dt = 1,906.94 \text{ h/year}$$

พลังงานสูญเสียในแกนเหล็กต่อปี

$$E_{Core} = 8,760 \times 0.65 = 5,694 \text{ kWh/year}$$

พลังงานสูญเสียขณะจ่ายโหลดต่อปี

$$E_{Load} = 3.20 \times 1906.94 = 6,102.20 \text{ kWh/year}$$

ดังนั้น

$$E_{Loss,315} = 5,694 + 6,102.20 = 11,796.20 \text{ kWh/year}$$

ค่าใช้จ่ายความสูญเสียต่อปี

$$C_{Loss} = 11,796.20 \times 4 = 47,184.82 \text{ Baht/year}$$

มูลค่าปัจจุบันของความสูญเสีย

$$PV\left(C_{Loss}\right) = 47,184.82 \times 11.65 = 549,703.11 \text{ Baht}$$

ค่าบำรุงรักษา

$$PV\left(C_{maintenance}\right) = 3,500 \times 11.65 = 40,775 \text{ Baht}$$

ดังนั้น

$$TOC_{315} = 290,000 + 549,703.11 + 40,775$$
$$TOC_{315} = 880,478.11 \text{ Baht}$$

3) หม้อแปลงขนาด 400 kVA

คำนวณในลักษณะเดียวกันจะได้

$$\int x_i^2(t)dt = 1,182.60 \text{ h/year}$$

พลังงานสูญเสียในแกนเหล็กต่อปี

$$E_{Core} = 8,760 \times 0.75 = 6,570 \text{ kWh/year}$$

พลังงานสูญเสียขณะจ่ายโหลดต่อปี

$$E_{Load} = 3.60 \times 1,182.60 = 4,257.36 \text{ kWh/year}$$

พลังงานสูญเสียรวม

$$E_{Loss,400} = 6,570 + 4,257.36 = 10,827.36 \text{ kWh/year}$$

ค่าใช้จ่ายความสูญเสีย

$$C_{Loss} = 10,827.36 \times 4 = 43,309.44 \text{ Baht/year}$$

มูลค่าปัจจุบัน

$$PV\left(C_{Loss}\right) = 43,309.44 \times 11.65 = 504,554.98 \text{ Baht}$$

ค่าบำรุงรักษา

$$PV\left(C_{maintenance}\right) = 4,000 \times 11.65 = 46,600 \text{ Baht}$$

ดังนั้น

$$TOC_{400} = 340,000 + 504,554.98 + 46,600$$
$$TOC_{400} = 891,154.98 \text{ Baht}$$

สรุปผลได้ดังนี้

ขนาด	ราคาเริ่มต้น	PV ความสูญเสีย	PV บำรุงรักษา	TOC_i
250 kVA	250,000	605,433	34,950	890,383 บาท
315 kVA	290,000	549,703	40,775	880,478 บาท
400 kVA	340,000	504,555	46,600	891,155 บาท

ดังนั้น จากข้อมูลของหม้อแปลงทั้ง 3 เครื่อง ต้นทุนรวมในการเป็นเจ้าของหม้อแปลงที่น้อยที่สุด คือ หม้อแปลงขนาด 315 kVA เท่ากับ 880,478 บาท ดังนั้นจึงเลือกหม้อแปลงขนาด 315 kVA เพราะมีต้นทุนรวมตลอดอายุใช้งานต่ำที่สุด ถึงแม้ว่าหม้อแปลงขนาด 250 kVA จะมีราคาซื้อถูกกว่า และหม้อแปลงขนาด 400 kVA จะมี load loss ต่ำกว่า แต่เมื่อรวมราคาซื้อ ความสูญเสีย และค่าบำรุงรักษาแล้ว หม้อแปลงขนาด 315 kVA ให้สมดุลทางเศรษฐศาสตร์ดีที่สุด

จุดสำคัญของตัวอย่างนี้ คือ แสดงให้เห็นว่า หม้อแปลงที่มีความสูญเสียน้อยที่สุด ไม่จำเป็นต้องเป็นหม้อแปลงที่มีต้นทุนรวมในการเป็นเจ้าของ (TOC) ต่ำที่สุด เพราะขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้ load loss ลดลง แต่ราคาซื้อและ core loss อาจสูงขึ้นตามไปด้วย

การเลือกขนาดหม้อแปลงที่เหมาะสมไม่ควรพิจารณาเฉพาะโหลดสูงสุด แต่ควรพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโหลดตลอดช่วงเวลา ความสูญเสียขณะไม่มีโหลด ความสูญเสียขณะจ่ายโหลด การเพิ่มขึ้นของโหลดในอนาคต อายุการใช้งาน และต้นทุนพลังงาน โดยเลือกขนาดที่ทำให้ต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดภายใต้ข้อจำกัดด้านอุณหภูมิและอายุฉนวน หม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กมีสัดส่วนสูงเมื่อเทียบกับพลังงานที่จ่ายให้โหลด ขณะที่หม้อแปลงที่มีขนาดเล็กเกินไปจะมีความสูญเสียในขดลวดสูงเนื่องจากความสูญเสียส่วนนี้แปรผันโดยประมาณตามกำลังสองของกระแส ดังนั้น ขนาดที่เหมาะสมจึงเป็นจุดสมดุลระหว่างต้นทุนการลงทุน ความสูญเสียพลังงาน และอายุการใช้งานของหม้อแปลง

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง การใช้งานและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า โดยครอบคลุมระบบจำหน่ายไฟฟ้า การเลือกใช้หม้อแปลงจำหน่าย ชนิดของหม้อแปลงแบบใช้ของเหลวและแบบแห้ง ตลอดจนมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้า

การใช้งานหม้อแปลงอย่างเหมาะสมต้องพิจารณา วิธีการระบายความร้อน ฉนวน และน้ำมันหม้อแปลง รวมถึงส่วนประกอบและอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ เพื่อให้หม้อแปลงสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ โดยน้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่ทั้งเป็นฉนวนไฟฟ้าและเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน

นอกจากนี้ การติดตั้งหม้อแปลงสามารถทำได้ทั้ง ภายในและภายนอกอาคาร โดยต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ความสะดวกในการตรวจสอบและบำรุงรักษา รวมถึงสภาพแวดล้อมและข้อกำหนดในการติดตั้ง การ

เลือกหม้อแปลงจึงต้องพิจารณาทั้งพิกัด ชนิด การระบายความร้อน ความสูญเสีย สถานที่ติดตั้ง และอายุการใช้งาน เพื่อให้ระบบมีความมั่นคง ปลอดภัย และเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7

1. โครงสร้างระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย แบ่งเป็นกี่ส่วน และแต่ละส่วนมีหน่วยงานใดเป็นผู้รับผิดชอบดำเนินการ
2. หม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้กี่แบบ
3. หม้อแปลงแบบแห้ง (dry-type transformer) มีลักษณะอย่างไร
4. หม้อแปลงแบบ ONAF มีลักษณะการระบายความร้อนอย่างไร
5. หากต้องการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ในเขตจังหวัดนครปฐม จะต้องเลือกหม้อแปลงแบบใด จงอธิบาย

8 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

Principle of DC Generator

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เรียกว่า เจนเนอเรเตอร์ (generator) และ เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้กำลังทางกล เรียกว่า มอเตอร์ (motor) เครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้งสองประเภทนี้มีหลักการและโครงสร้างที่คล้ายกัน เพียงแต่ว่าเจนเนอเรเตอร์เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนมอเตอร์นั้นเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เพื่อนำพลังงานที่ได้ไปขับเคลื่อนวัตถุหรือสิ่งหนึ่งสิ่งใดตามต้องการ

8.1 การเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (induce voltage)

พิจารณาตัวนำไฟฟ้าความยาว l วางอยู่ทางขวาของสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอที่มีความหนาแน่น B ดังแสดงในรูปที่ 8.1 ตัวนำที่พิจารณาสามารถเคลื่อนที่ได้และสัมผัสอยู่กับรางที่วางขนานกันอยู่ ทำการต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับรางเพื่อวัดค่าของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างจุด a และจุด b ถ้าตัวนำเคลื่อนที่ไปทางขวา ดังรูปที่ 8.1 เส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งตามกฎของฟาราเดย์ (Michael Faraday, 1791 – 1867) แล้วจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำนั้น โดยกฎของฟาราเดย์กล่าวว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อ

1) มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องตัวนำ
2) ตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก

ในกรณีแรกสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของเวลา จากวงจรรูปที่ 8.1 จะเกิดแรงเคลื่อน e โวลต์ เหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำเนื่องจากการเคลื่อนที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในสนามแม่เหล็ก คือ

$$e = Blv \qquad (8\text{-}1)$$

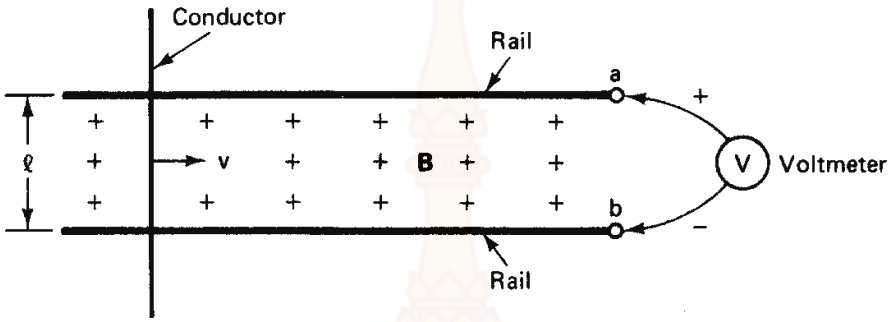
เมื่อ

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2)

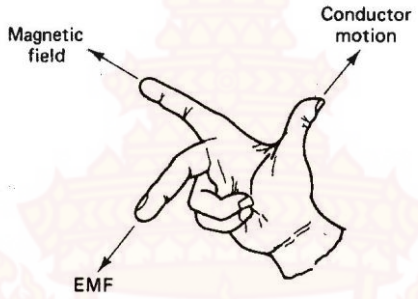
l คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

v คือ ความเร็วของตัวนำที่เคลื่อนที่ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที (m/s)

ขั้วของแรงเคลื่อนที่เหนี่ยวนำขึ้นนั้นแสดงดังรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบลิเนียร์

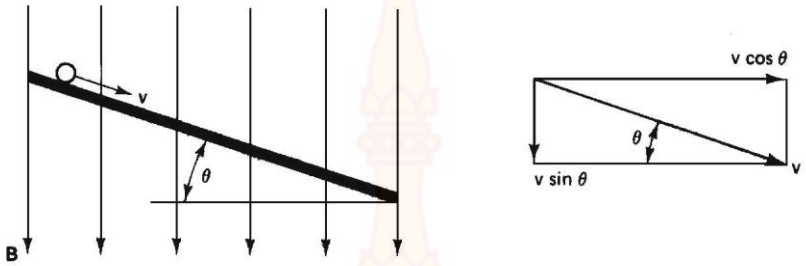


รูปที่ 8.2 ทิศทางของปริมาณต่าง ๆ ตามกฎมือขวา

ถ้าสนามแม่เหล็กกลับทิศทาง (ทิศทางของ B พุ่งออกจากกระดาษ) หรือตัวนำเคลื่อนที่จากขวาไปซ้าย ขั้วของแรงดันที่เกิดขึ้นก็จะกลับกันตามไปด้วย การกลับทิศทางทั้งของสนามแม่เหล็กและการเคลื่อนที่ของตัวนำพร้อมกันจะไม่ทำให้ขั้วเกิดการเปลี่ยนแปลง ถ้าเรากำหนดให้ขั้ว a เป็นขั้วบวกเมื่อเทียบกับขั้ว b ทำอย่างไรเราถึงจะทราบขั้วที่เกิดขึ้นได้ เราสามารถอธิบายได้โดยใช้กฎมือขวาโดยกำหนดให้นิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลางบอกทิศทางของปริมาณต่าง ๆ ตามรูปที่ 8.2 คือ นิ้วชี้เป็นทิศทางของสนามแม่เหล็ก นิ้วหัวแม่มือเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็กและนิ้วกลางเป็นทิศทางของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยจะชี้ไปทางขั้วบวก เราจึงสามารถนำกฎมือขวามาใช้อธิบายเรื่องการกำหนดขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปที่ 8.1 ได้ แต่เมื่อการเคลื่อนที่ของตัวนำไม่อยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นอย่างไร เราสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 8.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 8-1 ที่จริงแล้วถ้าเราทำให้มุม θ = 90° จะไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากตัวนำเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กทำให้ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวนำ แสดงว่าสมการที่ 8-1 จะต้องคูณด้วยแฟคเตอร์ตัวหนึ่งเพื่อทำให้ถูกต้องมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 8.3 แล้วสมการที่ได้คือ

$$e = Blv\cos\theta \qquad (8\text{-}2)$$

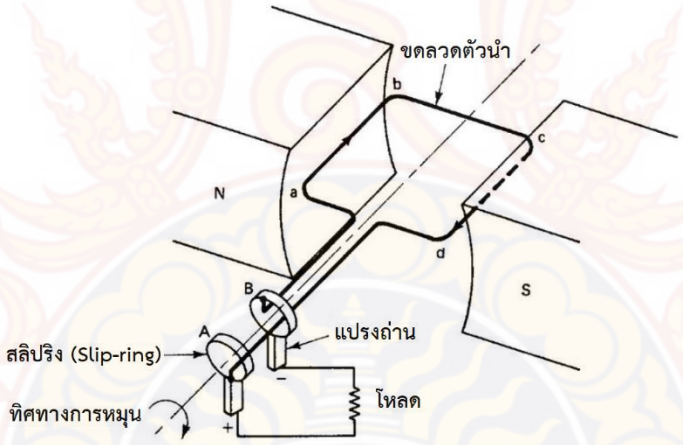
สมการนี้ใช้ในกรณีที่มุมระหว่าง *V* และ *B* เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องซึ่งเกิดขึ้นเมื่อตัวนำมีการเคลื่อนที่ในลักษณะวงกลมในสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 8.3 ตัวนำเคลื่อนที่ทำมุมกับสนามแม่เหล็ก

8.2 หลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (fundamental of a generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พิจารณาในหัวข้อที่ 8.1 นั้นในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะทำได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของตัวนำที่เป็นเส้นตรง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นโดยทั่วไปแล้ว ตัวนำจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมโดยอาศัยการหมุนของแกนกลางของเครื่อง จากรูปที่ 8.4 แสดงรูปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับพื้นฐานซึ่งมีขดลวดตัวนำรอบเดียว ถ้าขดลวดตัวนำถูกหมุนด้วยความเร็วสม่ำเสมอแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดจะเป็นแรงเคลื่อนกระแสสลับ การหมุนตามเข็มนาฬิกาทำให้ทราบทิศทางของแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นในขดลวดด้านที่อยู่ใกล้ขั้วเหนือว่ามีทิศทางจาก a ไป b ซึ่งเป็นไปตามกฎมือขวา



รูปที่ 8.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับพื้นฐานแบบ 2 ขั้ว



รูปที่ 8.5 รูปคลื่นของแรงเคลื่อนที่เหนี่ยวนำขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รูปที่ 8.4

ทิศทางของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดด้านที่อยู่ใกล้กับขั้วใต้นั้นมีทิศทางจาก c ไป d เมื่อตัวนำ ab เคลื่อนที่จากขั้วเหนือไปขั้วใต้ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะกลับจากทิศทางเดิม ดังนั้นกระแสจะไหลจากจุด b ไปจุด a ในขณะเดียวกันขดลวดด้าน cd จะเคลื่อนที่ไปทางขั้วเหนือและเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีทิศทางกลับกับตอนแรกเช่นกัน โดยกระแสจะไหลจากจุด d ไปจุด c ด้วยเหตุนี้การหมุนไปครึ่งรอบของเครื่องกำเนิดทำให้แรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นรอบขดลวดมีทิศทางจากจุด a ไป d และเมื่อหมุนไปอีกครึ่งรอบแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นรอบขดลวดจะมีทิศทางจาก d ไป a เมื่อต่อตัวต้านทานกับแปรงถ่านที่สัมผัสอยู่กับวงแหวนลื่น (Slip ring) ที่จุด A และ B จะทำให้เกิดกระแสไหลออกสู่วงจรภายนอกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นนี้จะมีรูปร่างไม่เป็นรูปคลื่นซายน์ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้มีขั้วแม่เหล็กเพียงสองขั้วทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นไม่สม่ำเสมอในทุกจุดที่ตัวนำเคลื่อนที่ผ่าน

ตัวอย่างที่ 8.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพื้นฐาน ในรูปที่ 8.4 ถ้าตัวนำด้าน ab ยาวเท่ากับด้าน cd เท่ากับ 20 cm เส้นผ่าศูนย์กลางของอาเมเจอร์เท่ากับ 26 cm สมมติให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เท่ากับ 0.5 Tesla และสม่ำเสมอ ขดลวดหมุนด้วยความเร็ว 12 m/s จงหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด

วิธีทำ จากตำแหน่งที่แสดงในรูป แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดด้านข้างมีค่าสูงสุดและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8.1 โดยขดลวดทั้งสองด้านช่วยกันผลิตแรงเคลื่อน

$$\begin{aligned} E_{\max} &= 2Blv \\ &= 2\times 0.5\times 0.2\times 12 \\ &= 2.4 \quad V \end{aligned}$$

แรงเคลื่อนที่ผลิตขึ้นในขดลวดตัวนำนั้นเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของการหมุน ดังนั้น

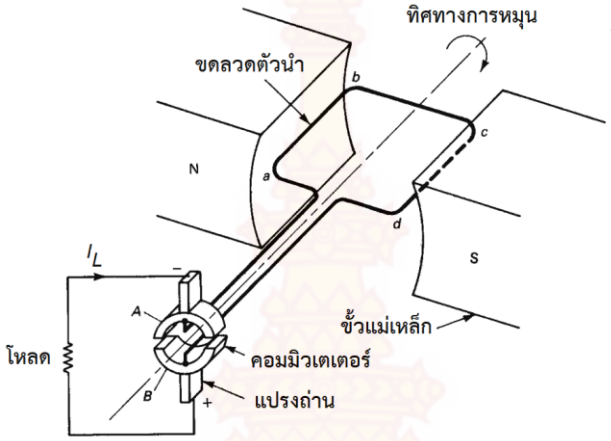
$$\begin{aligned} e_{coil} &= E_{\max}\cos\theta \\ &= 2.4\cos\theta \quad V \end{aligned}$$

จากรูปที่ 8.4 ตำแหน่งของขดลวดตัวนำอยู่ที่ θ = 0

8.2.1 การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (commutation)

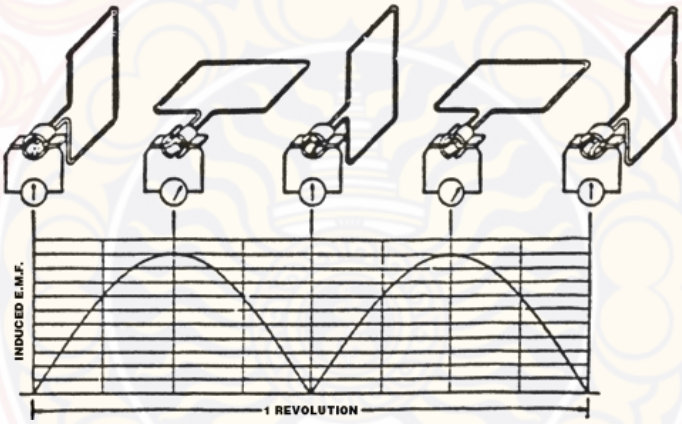
ในทางปฏิบัติแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องจะผลิตแรงเคลื่อนที่เป็นกระแสสลับเท่านั้น ถ้าเราต้องการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นให้เป็นกระแสตรงต้องใช้กลไกที่สร้างขึ้นเพื่อเปลี่ยนแปลงกระแสด้วยวิธีการเรียงกระแส ซึ่งเราเรียกกลไกนี้ว่า “คอมมิวเตเตอร์” (commutator) พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปที่ 8.6 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 8.4 แล้วจะเห็นว่า สลิปริง (slip ring) ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ *A* และ *B* โดยต่ออยู่กับขดลวดด้านละส่วน วงแหวนนี้สัมผัสอยู่กับแปรงถ่านที่วางอยู่ด้านบนและด้านล่างดังรูป เมื่อขดลวดตัวนำหมุนตามเข็มนาฬิกาจะทำให้วงแหวนหมุนตามไปด้วยแต่แปรงถ่านจะถูกยึดอยู่กับที่ จากตำแหน่งของขดลวดตัวนำในรูป ขดลวดตัวนำวางอยู่ในแนวนอนกระแสที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด *abcd* จะไหลไปที่วงแหวน

ส่วน *B* ผ่านแปรงถ่านขั้วบวกไปที่โหลดแล้วไหลกลับมาที่แปรงถ่านขั้วลบผ่านวงแหวนส่วน *A* ดังนั้นเมื่อเกิดกระแสไหลจากแปรงถ่านด้านล่างผ่านโหลดไปที่แปรงถ่านด้านบนจะทำให้เกิดขั้วบวกและขั้วลบขึ้น



รูปที่ 8.6 การใช้งานคอมมิวเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อขดลวดตัวนำหมุนต่อไปจนขดลวดวางตัวในแนวตั้งแปรงถ่านจะลัดวงจรวงแหวนทั้งสองส่วนแต่จะไม่เป็นไรเนื่องจากในตำแหน่งนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดจะเป็นศูนย์ และเมื่อขดลวดตัวนำหมุนต่อไปจนขดลวดวางตัวในแนวนอนอีกครั้งขดลวดด้าน *ab* จะอยู่ใกล้ขั้วแม่เหล็กด้านขั้วใต้ และขดลวดด้าน *cd* จะอยู่ใกล้ขั้วเหนือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงข้ามจากเดิมแต่ตำแหน่งของวงแหวนส่วน *A* และ *B* ก็เปลี่ยนแปลงเช่นกัน ทำให้กระแสสามารถไหลไปที่โหลดได้ในลักษณะเดิมทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 8.7



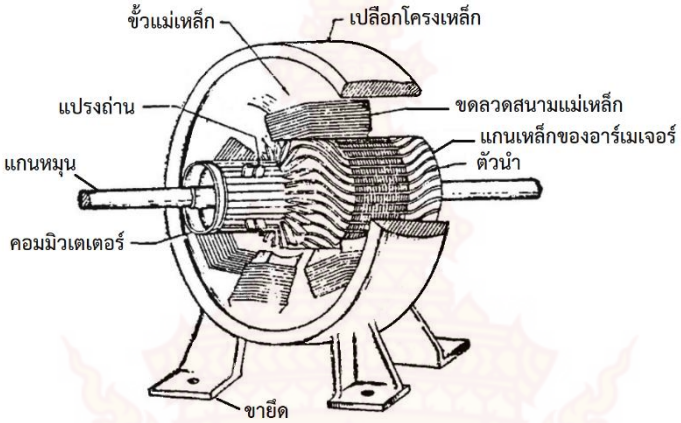
รูปที่ 8.7 รูปคลื่นของแรงเคลื่อนที่เหนี่ยวนำขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปที่ 8.6

กระบวนการในการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงนี้เรียกว่า “การคอมมิวเตชัน” เราจึงเรียกวงแหวนที่ถูกผ่าออกเป็นสองส่วนนี้ว่า “คอมมิวเตเตอร์” (commutator)

8.3 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC machine structure)

โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

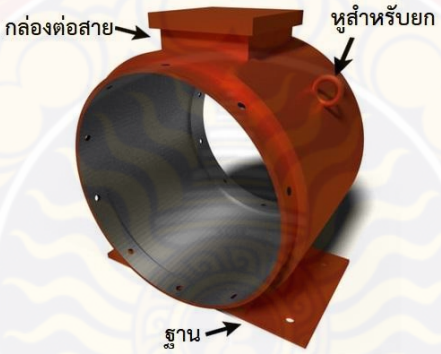
- ส่วนที่อยู่กับที่ (stator)
- ส่วนที่เคลื่อนที่ (rotor)



รูปที่ 8.8 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

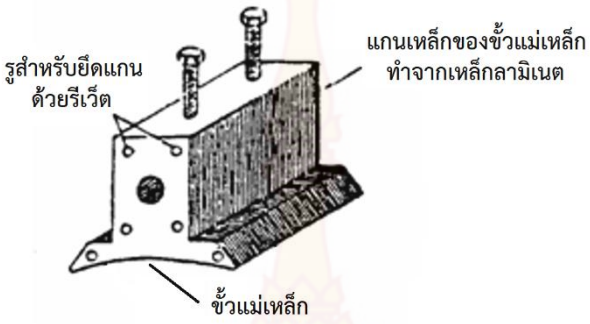
8.3.1 โครงสร้างของส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วย

1. เปลือกโครงเหล็ก (magnetic frame or yoke) ทำด้วยเหล็กหล่อหรือสารแม่เหล็กมีไว้สำหรับยึดขั้วแม่เหล็กและทำให้ทางเดินแม่เหล็กครบวงจรและยังเป็นที่ยึดติดกับฐานรองรับน้ำหนักหรือขาตั้ง



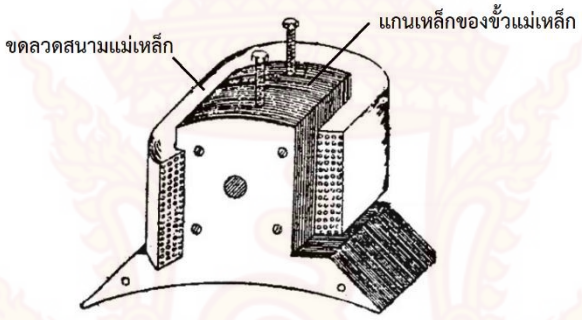
รูปที่ 8.9 เปลือกโครงเหล็ก

2. แกนเหล็กของขั้วแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็ก (pole-core and pole-shoe) ทำหน้าที่เป็นแกนและขั้วของแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นหลังจากที่มีกระแสไฟไหลผ่านขดลวดตัวนำที่พันรอบแกนเหล็ก



รูปที่ 8.10 แกนเหล็กของขั้วแม่เหล็ก

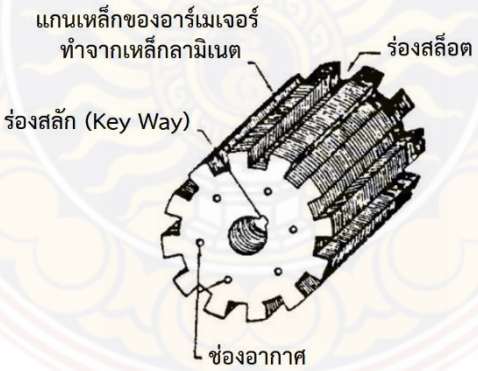
3. ขดลวดสนามแม่เหล็ก (field-coils) คือขดลวดทองแดงที่พันเป็นขดและสวมลงบนแกนเหล็กของขั้วแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดนี้จะทำให้ขั้วแม่เหล็กเกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นโดยการผลิตเส้นแรงแม่เหล็กให้เกิดขึ้น



รูปที่ 8.11 ขดลวดสนามแม่เหล็กที่พันรอบขั้วแม่เหล็ก

8.3.2 โครงสร้างของส่วนที่เคลื่อนที่ ประกอบด้วย

1. แกนเหล็กของอาเมเจอร์ (armature core) ทำจากแผ่นเหล็กลามิเนตบาง ๆ ปั๊มขึ้นรูปแล้วนำมาอัดรวมกันเป็นแท่ง ดังรูปที่ 8.12 ลักษณะของอาร์เมเจอร์จะเป็นทรงกระบอกที่มีร่องสล็อตอยู่รอบ ๆ เป็นส่วนที่ใช้ติดตั้งขดลวดตัวนำ เมื่อหมุนอาร์เมเจอร์ตัวนำจะตัดกับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำ



รูปที่ 8.12 แกนเหล็กของอาเมเจอร์

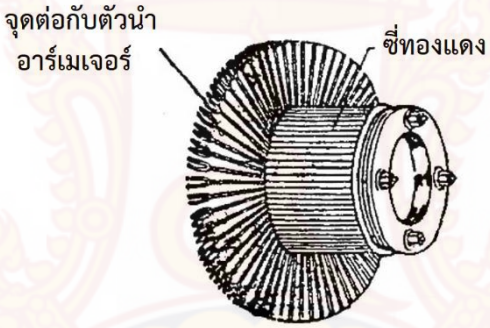
2. ขดลวดอาเมเจอร์ (armature winding) เป็นขดลวดตัวนำที่พันอยู่ในร่องสล็อตของอาเมเจอร์ ทำหน้าที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า ทำจากขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน

3. คอมมิวเตเตอร์ (commutator) ทำจากทองแดงลักษณะเป็นซี่ ๆ ขั้นด้วยฉนวนไฟฟ้า หน้าที่ของคอมมิวเตเตอร์ คือ นำกระแสออกจากขดลวดตัวนำที่พันอยู่ในอาเมเจอร์และเป็นตัวแปลงกระแสไฟสลับที่เกิดขึ้นภายในอาเมเจอร์ให้เป็นไฟตรง

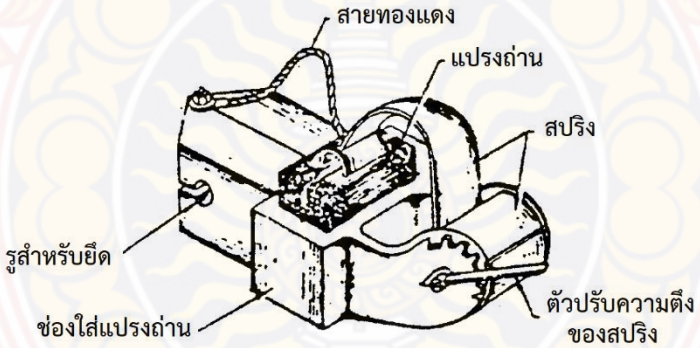
4. แกนหมุน (shaft) เป็นแกนเหล็กที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักส่วนต่าง ๆ ของโรเตอร์ทั้งหมด และเป็นจุดเชื่อมต่อกับตัวต้นกำลัง

5. แปรงถ่าน (carbon brushes) ทำจากคาร์บอน ทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากขดลวดตัวนำในอาร์เมเจอร์โดยรับผ่านมาจากคอมมิวเตเตอร์เพื่อส่งต่อไปยังวงจรภายนอก แปรงถ่านจะติดตั้งให้สัมผัสเสียดสีกับซี่คอมมิวเตเตอร์ตลอดเวลา จึงเกิดการสึกหรอจากการใช้งาน

6. ตลับลูกปืน (bearings) ทำหน้าที่รับน้ำหนักทั้งหมดของโรเตอร์ และช่วยลดแรงเสียดทานในการหมุน



รูปที่ 8.13 คอมมิวเตเตอร์

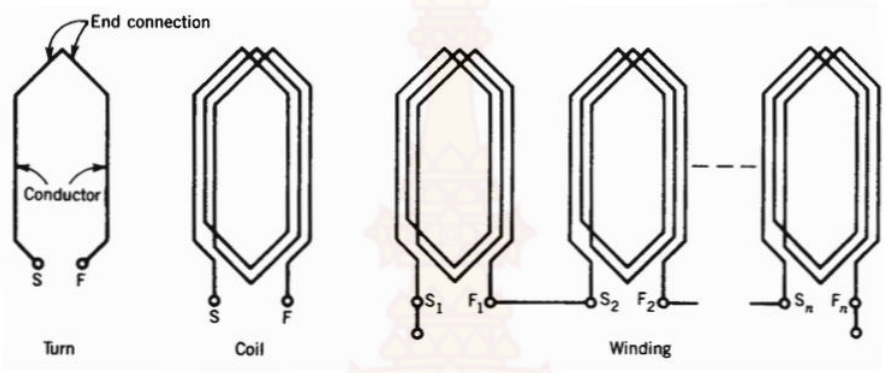


รูปที่ 8.14 แปรงถ่าน

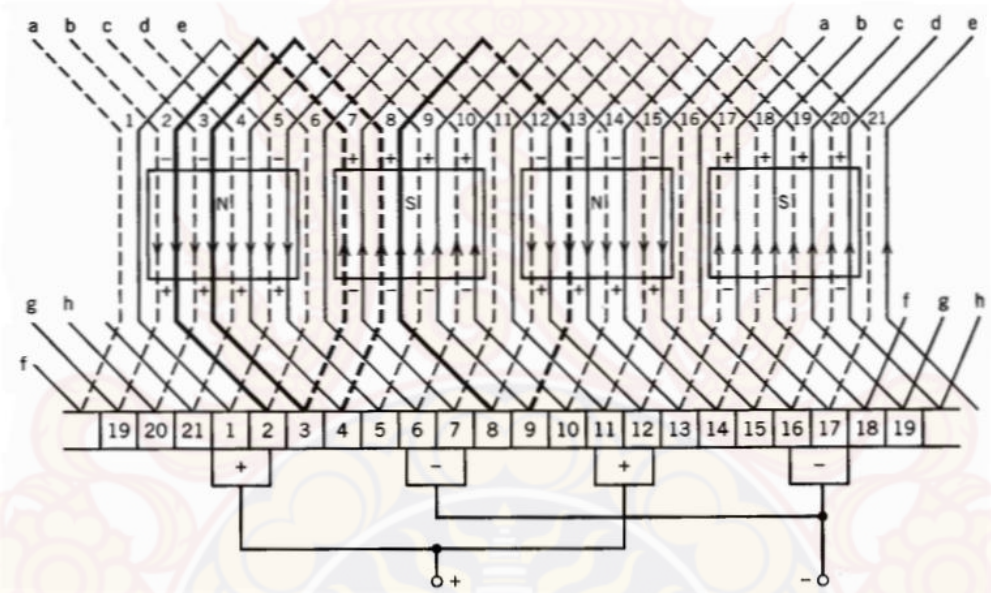
8.4 การพันอาเมเจอร์ (armature winding)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปที่ 8.4 นั้นเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง แต่ยังเป็นแรงเคลื่อนที่ยังไม่ค่อยคงที่นักเพราะการกระเพื่อมของแรงเคลื่อนที่ขั้วยังมีมาก เนื่องจากขดลวดตัวนำเพียงรอบเดียวนั้นไม่สามารถสร้างแรงเคลื่อนที่มีขนาดสูง ๆ ได้ เราสามารถปรับปรุงแก้ไขเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มี

ประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ด้วยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดอาร์เมเจอร์เข้าไปซึ่งจะมีผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มปริมาณมากขึ้น และการกระเพื่อมของแรงดันจะลดลงเมื่อเราเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้นด้วย



รูปที่ 8.15 ลักษณะต่าง ๆ ของขดลวดตัวนำ

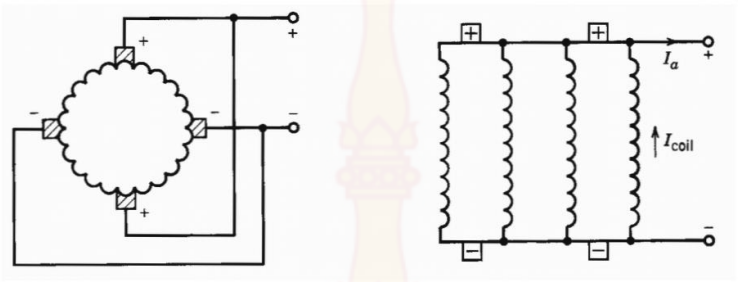


รูปที่ 8.16 ภาพคลี่ของการพันขดลวดอาร์เมเจอร์แบบทับกัน (Lap Winding)

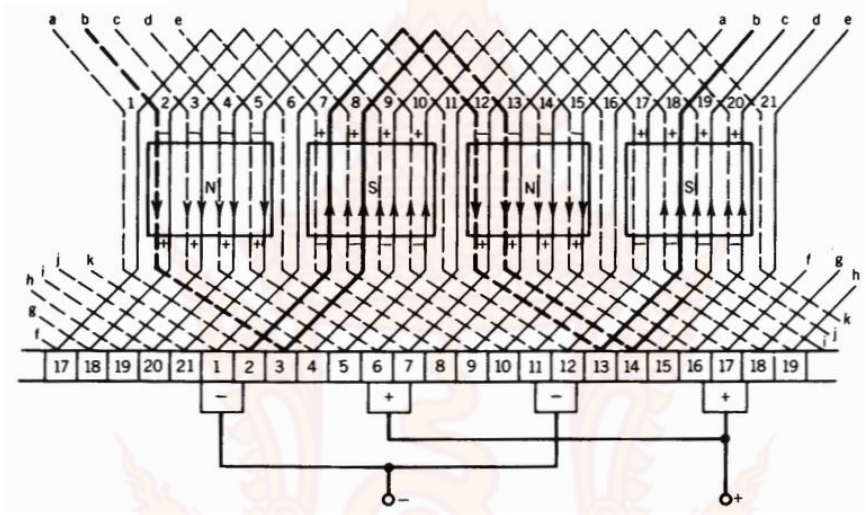
การพันขดลวดอาเมเจอร์นั้น ในทางปฏิบัติแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การพันแบบแกรมมาริง (gramme-ring winding) ซึ่งปัจจุบันไม่ใช้แล้ว และการพันแบบดรัม (drum winding) การพันขดลวดแบบดรัมนี้ แบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

1. การพันขดลวดแบบทับซ้อนกัน (lap winding) การพันอาเมเจอร์แบบนี้จำนวนของแผงขนานของขดลวดจะเท่ากับจำนวนของขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (a = P) การพันแบบนี้ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องจ่ายกระแสสูง

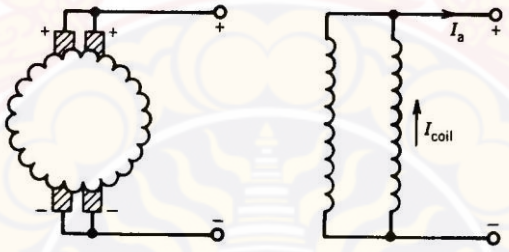
2. การพันแบบรูปคลื่น (wave winding) การพันอาเมเจอร์แบบนี้จำนวนของแผงขนานของขดลวดจะเท่ากับ 2 (a = 2) ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการแรงดันสูง



รูปที่ 8.17 วงจรการต่อขดลวดอาร์เมเจอร์ที่พันขดลวดแบบทับซ้อนกัน (lap winding)



รูปที่ 8.18 ภาพคลี่ของการพันขดลวดอาร์เมเจอร์แบบรูปคลื่น (wave winding)



รูปที่ 8.19 วงจรการต่อขดลวดอาร์เมเจอร์ที่พันขดลวดแบบรูปคลื่น (wave winding)

8.5 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF equation)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ขนาดของแรงเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวนำในอาเมเจอร์ จำนวนขั้วแม่เหล็ก และการต่อวงจรของตัวนำในอาเมเจอร์ว่ามีลักษณะอย่างไร กฎของฟาราเดย์กล่าวว่า ขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านตัวนำต่อเวลา ถ้ามีจำนวนตัวนำ Z ตัวบนอาเมเจอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขั้วแม่เหล็ก P ขั้ว เครื่องหมุนด้วยความเร็ว N รอบต่อนาที หรือ $N/60$ รอบต่อวินาที จำนวนแผงขนานของตัวนำบนอาเมเจอร์ที่ต่อกันเท่ากับ a แผง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เครื่องผลิตขึ้น คือ

$$E_a = \frac{\phi \cdot z \cdot n}{60} \times \frac{P}{a} \qquad (8\text{-}3)$$

เมื่อ

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งขั้ว (Wb)

Z คือ จำนวนตัวนำทั้งหมดของอาเมเจอร์

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

a คือ จำนวนแผงที่ขนานกันในอาเมเจอร์

n คือ จำนวนรอบต่อนาที (rpm) ของการหมุนอาเมเจอร์

E_a คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้น (V)

หมายเหตุ การพันแบบทับกัน P = a การพันแบบรูปคลื่น a = 2

ตัวอย่างที่ 8.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องหนึ่ง มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว ถูกขับให้หมุนด้วยความเร็ว 750 rpm ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ 240 V ที่อาเมเจอร์มีตัวนำ 792 ตัว พันแบบรูปคลื่น (Wave Wound) จงหาเส้นแรงแม่เหล็กที่ใช้งานต่อขั้ว

วิธีทำ

$$E_a = \frac{\phi \cdot z \cdot n}{60} \times \frac{P}{a} \; Volt$$

$$240 = \frac{\phi \times 792 \times 750}{60} \times \frac{4}{2}$$

$$\phi = 0.0121 \text{ Wb}$$

ตัวอย่างที่ 8.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องหนึ่ง มีขั้วแม่เหล็ก 6 ขั้ว ถูกขับให้หมุนด้วยความเร็ว 400 rpm มีจำนวนตัวนำที่อาเมเจอร์ 720 ตัว พันแบบทับซ้อน (lap winding) มีเส้นแรงแม่เหล็ก 40×10^{-3} Wb ต่อขั้ว จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เครื่องผลิตได้

วิธีทำ

$$E_a = \frac{\phi \cdot z \cdot n}{60} \times \frac{P}{a} \; Volt$$

$$E_a = \frac{40 \times 10^{-3} \times 720 \times 400}{60} \times \frac{6}{6}$$

$$E_a = 192 \text{ V}$$

การต่อวงจรของขดลวดภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบง่าย ๆ นั้นจะต่อเป็นเครื่องกำเนิดแบบขนานที่มีขดลวดสนามกระตุ้นต่อขนานอยู่กับขดลวดอาเมเจอร์หรืออาจจะต่อขดลวดสนามกระตุ้นกับแหล่งจ่ายไฟอื่นจากภายนอก เพื่อใช้สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก เช่น แบตเตอรี่หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่น วงจรของเครื่องกำเนิดแบบใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับขดลวดสนามกระตุ้นแสดงดังรูปที่ 8.13 ความ

ต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์และความต้านทานของขดลวดสนามกระตุ้น เรียกว่า R_a และ R_f ถ้าไม่คิดผลของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างเราสามารถคำนวณหาเส้นแรงแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแบบนี้ได้จากสมการ

$$\phi_p = \frac{N_f \cdot I_f}{\Re} \qquad (8\text{-}4)$$

เมื่อ

I_f คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสนามกระตุ้น (A)

N_f คือ จำนวนรอบของขดลวดสนามกระตุ้น (A)

$\Re$ คือ ความต้านทานของวงจรแม่เหล็ก (A-t/Wb) หรือ H^{-1}

ϕ_p คือ เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (Wb)

เมื่อ k_e เป็นค่าคงที่ของสมการที่ 8-3 คือ $k_e = \frac{z}{60} \times \frac{p}{a}$ เพราะฉะนั้น

$$E_a = k_e \cdot \phi \cdot n \qquad (8\text{-}5)$$

แทนสมการที่ 8-4 ในสมการ 8-5 จะได้

$$E_a = \frac{k_e \cdot N_f \cdot I_f \cdot n}{\Re} \qquad (8\text{-}6)$$

แต่ความต้านทานของวัสดุเฟอโรแมกเนติกนั้นไม่คงที่ ดังนั้นผลของสมการที่ 8-6 จะไม่เป็นเชิงเส้นตลอด กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณหาได้โดยใช้กฎของโอห์ม คือ

$$I_f = \frac{E_{bat}}{R_f + R_{rheo}} \qquad (8\text{-}7)$$

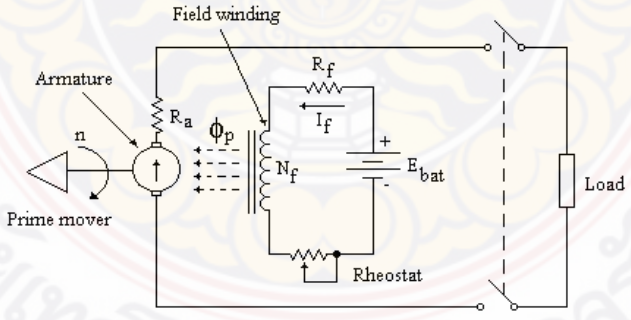
เมื่อ

I_f คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็ก (A)

E_{bat} คือ แรงดันของแบตเตอรี่ (V)

R_f คือ ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็ก (Ω)

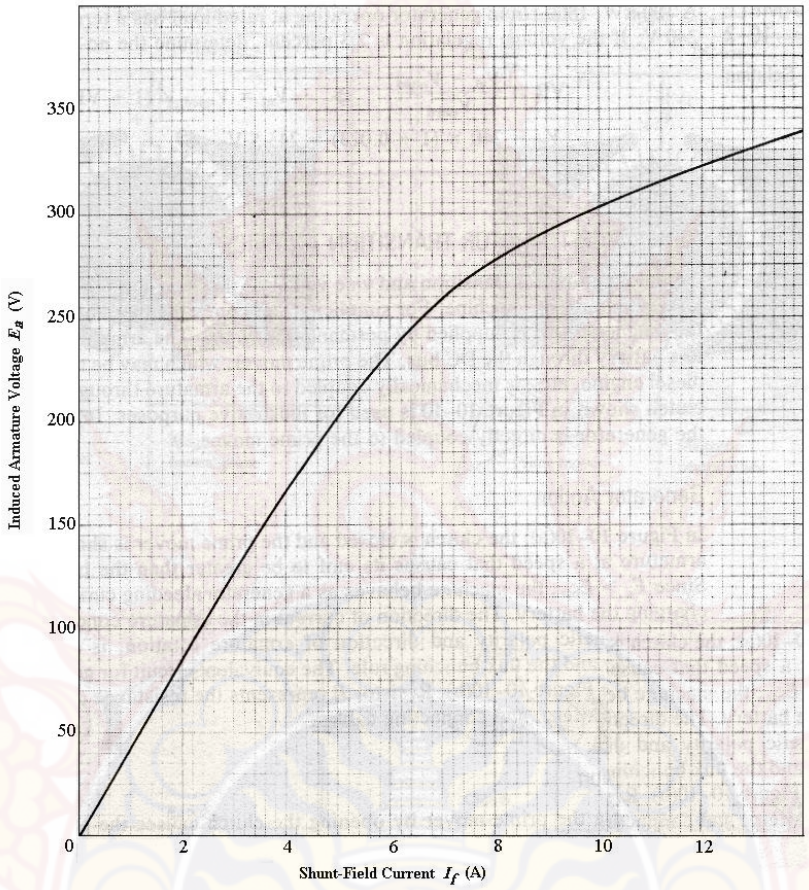
R_{rheo} คือ ความต้านทานของตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ที่เรากำหนดไว้ (Ω)



รูปที่ 8.20 วงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสนามกระตุ้นต่อแยก

จากรูปที่ 8.20 ถ้าเราลดค่าความต้านทานที่ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ลงกระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วเพิ่มขึ้นเป็นผลให้แรงดันที่อาเมเจอร์ของเครื่องเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

กราฟความสัมพันธ์ของกระแสของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นที่อาร์เมเจอร์ แสดงดังรูปที่ 8.21 กราฟนี้เราเรียกว่า magnetization curve หรือ open circuit characteristic ซึ่งเป็นกราฟที่เกิดจากการพล๊อตค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่อาเมเจอร์ (E_a) เปรียบเทียบกับกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_f) ตามสมการที่ 8-6 โดยสมมติให้ความเร็วของเครื่องคงที่และไม่มีโหลดต่อกับเครื่อง



รูปที่ 8.21 magnetizing curve ของเครื่องกำเนิดแบบสนามกระตุ้นต่อแยก

ตัวอย่างที่ 8.4 สมมติให้ความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ในรูปที่ 8.19 เป็น 0.014 Ω และ 10.4 Ω ตามลำดับ และใช้กราฟของเส้นแรงแม่เหล็กในรูปที่ 8.14 จงหาค่าความต้านทานของรีโอสตัด (rheostat) ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 275 V

วิธีทำ

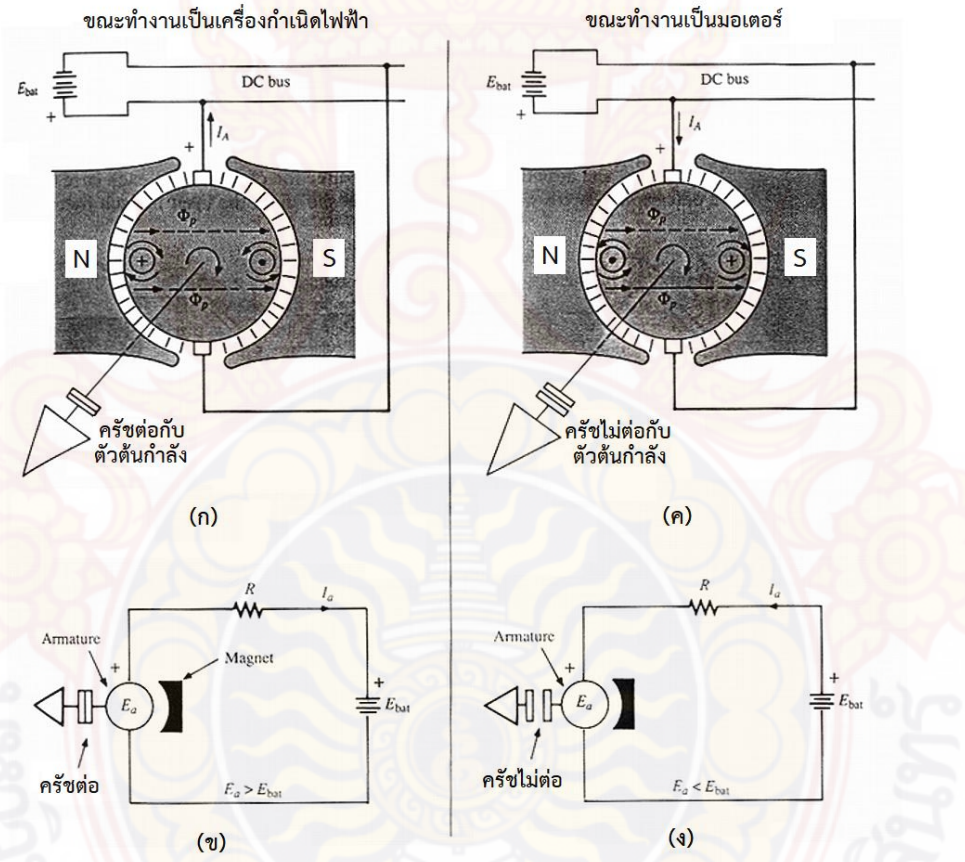
$$I_f = \frac{E_{bat}}{R_f + R_{rheo}}$$

$$R_{rheo} = \frac{E_{bat}}{I_f} - R_f$$

$$R_{rheo} = \frac{275}{8} - 10.4 \; = \; 23.98\,\Omega$$

8.6 การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องกลจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ก็ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้เนื่องจากทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์มีโครงสร้างที่เหมือนกัน การเปลี่ยนการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นมอเตอร์และเปลี่ยนจากมอเตอร์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น อธิบายได้ดังรูปที่ 8.15 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงในรูปที่ 8.15 ประกอบไปด้วยขดลวดอาเมเจอร์และแม่เหล็กถาวร ที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก ขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องต่ออยู่กับแบตเตอรี่ และขับเคลื่อนด้วยตัวต้นกำลังซึ่งอาจจะเป็นกังหันไอน้ำ เครื่องยนต์ดีเซล หรือตัวต้นกำลังแบบอื่นก็ได้ ตัวต้นกำลังต่ออยู่กับอาเมเจอร์โดยใช้คลัตช์เป็นตัวเชื่อมต่อดังรูป คลัตช์ที่แสดงให้เห็นเป็นเพียงการยกตัวอย่างเท่านั้น เพราะในความเป็นจริงแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อตรงกับตัวต้นกำลัง



รูปที่ 8.22 การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสภาวะเป็นมอเตอร์

8.6.1 การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 8.22 (ก) ถ้าต่อคลัตช์ให้ตัวต้นกำลังเชื่อมต่อกับอาเมเจอร์และขับเคลื่อนอาร์เมเจอร์ให้หมุนที่ความเร็วระดับหนึ่ง จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) ขึ้นในอาร์เมเจอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้า

เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ ($E_a > E_{bat}$) ในขณะนี้เครื่องจะมีพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าไปชาร์จแบตเตอรี่ได้ ทิศทางของกระแสในตัวนำที่อยู่ในอาเมเจอร์ ทิศทางของสนามแม่เหล็กและทิศทางของการหมุนของอาร์เมเจอร์ สามารถหาได้จากกฎมือขวา วงจรสมมูลย์ของเครื่องในขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 8.22 (ข) ตัวต้านทาน R ในวงจร ก็คือค่าความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์ แบตเตอรี่ และสายไฟรวมกัน

8.6.2 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ถ้าเราตัดตัวต้นกำลังโดยปลดคลัตช์ออกจะทำให้ความเร็วของอาเมเจอร์ลดลงและส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ผลิตขึ้นลดลงตามไปด้วย และเมื่อความเร็วของอาเมเจอร์ลดลงจนกระทั่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำน้อยกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ ($E_a < E_{bat}$) แบตเตอรี่ก็จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า จ่ายกระแสไหลกลับเข้าอาเมเจอร์และขับให้เครื่องหมุนเป็นมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 8.22 (ค) การหมุนของอาเมเจอร์ในขณะที่เครื่องทำงานเป็นมอเตอร์นั้นจะมีทิศทางเดียวกันกับการหมุนโดยตัวต้นกำลัง จากรูปที่ 8.22 (ข) และ (ค) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) ที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะทำงานเป็นมอเตอร์หรือเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพราะว่าทั้งสองกรณีมีขั้วแม่เหล็กและทิศทางการหมุนเหมือนกัน

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีการผลิตแรงดันไฟฟ้าและแรงบิดขึ้น เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงในรูป 8.22 (ก) และ (ข) จะผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น ในขณะที่เครื่องทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะเกิดแรงบิดที่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงจากตัวต้นกำลังขึ้น และเมื่อเครื่องทำงานเป็นมอเตอร์ดังรูป 8.22 (ค) และ (ง) เครื่องจะสร้างแรงบิดขึ้นและเมื่อเพลาของเครื่องหมุนก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับเครื่อง ซึ่งเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟต้านกลับ (back EMF) นั่นเอง

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสามารถกำหนดทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ด้วยกฎมือขวา

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอาเมเจอร์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องอาศัย คอมมิวเตเตอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนจ่ายออกสู่วงจรภายนอก กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การคอมมิวเตชัน เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่เคลื่อนที่ โดยมีส่วนประกอบสำคัญ เช่น ขั้วแม่เหล็ก ขดลวดสนามแม่เหล็ก อาเมเจอร์ คอมมิวเตเตอร์ แปรงถ่าน แกนหมุน และตลับลูกปืน

การพันขดลวดอาเมเจอร์มีผลต่อแรงดันและกระแสที่เครื่องสามารถผลิตได้ โดยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดช่วยเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าและลดการกระเพื่อมของแรงดัน หลักการเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์การทำงานและคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต่อไป

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 6 ขั้วแม่เหล็ก พันอาร์เมเจอร์แบบทับซ้อนกัน มีเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว 0.045 Wb ขณะไม่จ่ายโหลดมีแรงดันไฟฟ้า 300 V ที่ความเร็ว 400 rpm จงหาจำนวนตัวนำในอาเมเจอร์ (ตอบ 1,000 ตัว)
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 8 ขั้วแม่เหล็ก มีจำนวนตัวนำในอาร์เมเจอร์เท่ากับ 1,000 เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว 0.035 Wb จงหาความเร็วที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีแรงเคลื่อนไฟฟ้า 500 V (ตอบ 214.3 rpm)
3. เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง 4 ขั้วแม่เหล็กเครื่องหนึ่ง มีการพันอาเมเจอร์แบบรูปคลื่น จำนวนตัวนำในอาเมเจอร์เท่ากับ 300 รอบ เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วเท่ากับ 0.025 Wb หมุนด้วยความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที จงหา
   ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น (ตอบ 250 V)
   ข) พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องเป็น kW เมื่อพิกัดกระแสของเครื่องเท่ากับ 25 A (ตอบ 6.25 kW)
4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 6 ขั้วแม่เหล็ก พันอาเมเจอร์แบบรูปคลื่น (Wave Winding) มีจำนวนตัวนำในอาเมเจอร์ 480 ตัว เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วเท่ากับ 0.03 Wb และหมุนด้วยความเร็ว 1,200 รอบต่อนาที จงหา
   ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น (ตอบ 432 V)
   ข) พิกัดกำลังไฟฟ้าเป็น kW เมื่อเครื่องจ่ายกระแส 40 A (ตอบ 17.28 kW)
5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน จ่ายกระแสโหลด 500 A ที่แรงดัน 220 V ความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน =44 Ω ความต้านทานอาร์เมเจอร์ =0.015 Ω จงหา
   ก) กระแสสนามแม่เหล็กขนาน
   ข) กระแสอาร์เมเจอร์
   ค) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอาร์เมเจอร์
6. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 4 ขั้วแม่เหล็ก พันอาเมเจอร์แบบ Lap มีจำนวนตัวนำในอาเมเจอร์ 600 ตัว เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วเท่ากับ 0.02 Wb และหมุนด้วยความเร็ว 900 รอบต่อนาทีจงหา
   ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น (ตอบ 648 V)
   ข) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เมื่อเครื่องจ่ายกระแส 50 A (ตอบ 33.88 kW)

9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความสูญเสีย และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

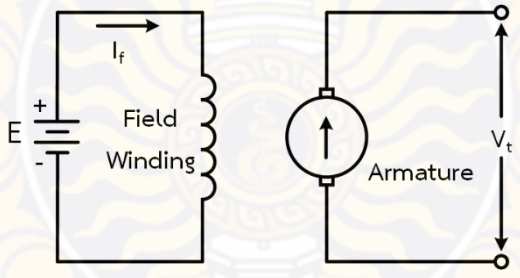
Induced Voltage, Losses and Efficiency of DC Generators

ในทางปฏิบัติเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ต้องการไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ในงานเฉพาะที่เท่านั้นไม่ได้ใช้ผลิตเพื่อส่งจ่ายไปในระยะทางไกล ๆ เหมือนระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อจำกัดในการสร้างให้มีขนาดใหญ่ เพราะคอมมิวเตเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับที่เหนี่ยวนำขึ้นให้เป็นกระแสตรงนั้น ไม่สามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่ได้ แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงก็ยังคงมีความสำคัญอยู่ เนื่องจากสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ ได้ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่แบ่งแยกตามการต่อวงจรขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่อง และค่าความสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

9.1 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก (field winding connection)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นได้นั้น จำเป็นต้องมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Winding) เราสามารถแบ่งชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้ตามลักษณะของการต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

9.1.1 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็กแยกกับอาร์เมเจอร์ (separately excited) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก ได้รับไฟฟ้ากระแสตรงมาจากแหล่งจ่ายภายนอก ดังรูปที่ 9.1 ซึ่งแหล่งจ่ายภายนอกที่ใช้อาจเป็นแบตเตอรี่ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องอื่น



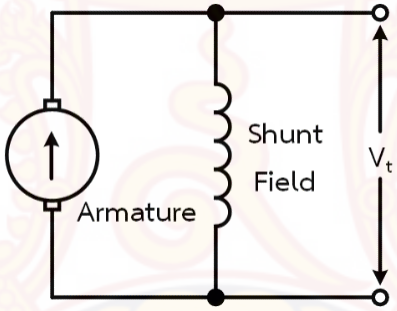
รูปที่ 9.1 การต่อขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามแม่เหล็กต่อแยก

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ต้องการกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่แยกต่างหาก ดังนั้นจึงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีราคาแพงกว่าแบบอื่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงชนิดนี้ จะสามารถควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้อย่างดีเพราะมีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว และถูกต้องแน่นอน

ตามการควบคุมกระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กจากแหล่งจ่ายภายนอก และยังสามารถตอบสนองได้ดีเมื่อแรงดันด้านขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในย่านที่กว้าง ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกใช้งานตามปกติ

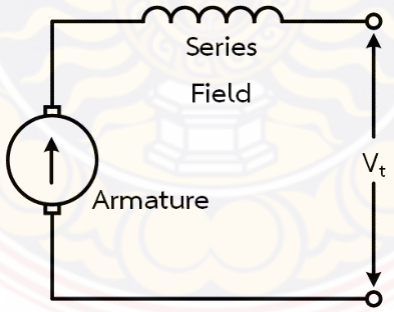
9.1.2 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็กกับอาร์เมเจอร์เพื่อจ่ายไฟให้ตัวเอง (self-excited) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่ได้รับกระแสไฟฟ้าสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กมาจากอาร์เมเจอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเอง การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในตอนเริ่มแรกนั้นเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่ยังเหลือค้างอยู่ในขดลวดสนามแม่เหล็ก (residual magnetism) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการต่อแบบนี้ สามารถแบ่งตามลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กได้เป็น 3 แบบ คือ

1) การต่อแบบขนาน (shunt wound) การต่อแบบนี้ขดลวดสนามแม่เหล็กจะต่อคร่อมหรือขนานกับอาร์เมเจอร์ โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดสนามแม่เหล็กเต็มที่ ขดลวดสนามแม่เหล็กที่ต่อแบบขนานนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นเล็ก ๆ มีจำนวนรอบมาก และมีค่าความต้านทานสูงกว่าความต้านทานที่อาร์เมเจอร์มาก เครื่องกำเนิดแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป



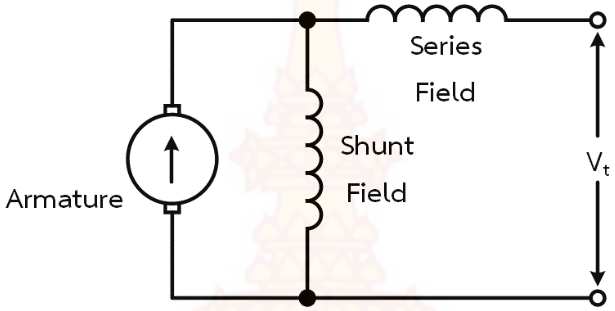
รูปที่ 9.2 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน

2) การต่อแบบอนุกรม (series wound) การต่อแบบนี้จะต่อขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมกับอาร์เมเจอร์ ขดลวดสนามแม่เหล็กที่ต่อแบบอนุกรมนั้นมีความต้านทานต่ำ มีขนาดใหญ่และมีจำนวนรอบน้อย ทั้งนี้เพราะต้องทนกระแสไฟได้เต็มที่ในขณะที่เครื่องกำเนิดจ่ายกระแส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้มักไม่ค่อยใช้ยกเว้นในกรณีพิเศษเท่านั้น เช่น เป็นตัวเสริมแรงเคลื่อนไฟฟ้า (booster) เป็นต้น

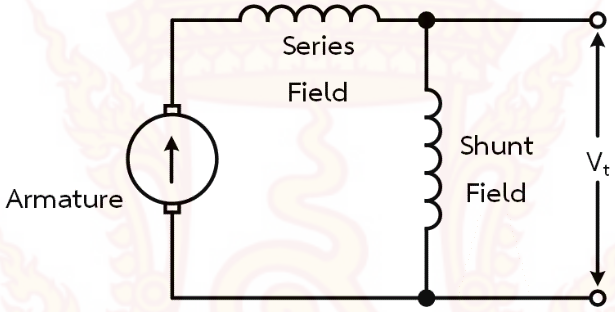


รูปที่ 9.3 การต่อขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม

3) การต่อแบบผสม (compound wound) การต่อแบบนี้จะต่อขดลวดสนามแม่เหล็กทั้งแบบขนานและอนุกรมกับอาร์เมเจอร์ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะต้องมีทั้งขดลวดขนานและขดลวดอนุกรมในเครื่องเดียวกัน ซึ่งการต่อแบบผสม ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบ Short shunt และแบบ Long shunt



รูปที่ 9.4 ลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ short shunt



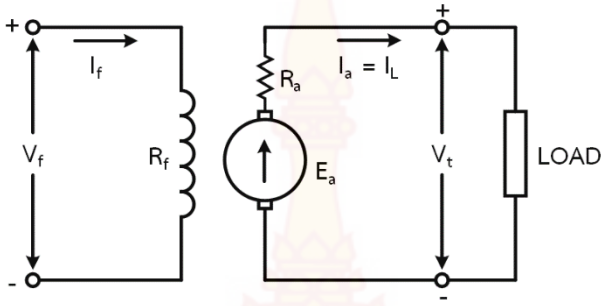
รูปที่ 9.5 ลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ long shunt

9.2 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

การคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่อาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการต่อวงจรภายในแบบต่าง ๆ นั้น สามารถทำได้ด้วยวิธีการคำนวณทางวงจรไฟฟ้า โดยต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียก่อน ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ

E_a คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์ (V)
R_a คือ ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ω)
R_{sh} คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กที่ต่อขนานกับอาร์เมเจอร์ (Ω)
R_s คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กที่ต่ออนุกรมอาร์เมเจอร์ (Ω)
I_a คือ กระแสที่ไหลออกจากอาร์เมเจอร์ (A)
I_{sh} คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดขนาน (A)
I_s คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอนุกรม (A)
I_L คือ กระแสที่ไหลผ่านโหลด (A)

9.2.1 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อแยก



รูปที่ 9.6 ทิศทางของแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อแยก

เมื่อพิจารณาการต่อวงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กต่อแยกกับอาร์เมเจอร์ รูปที่ 9.6 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ

$$E_a = V_t + I_a R_a \qquad (9\text{-}1)$$

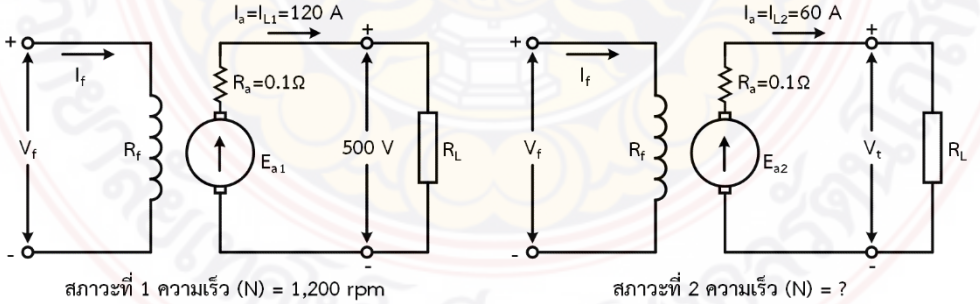
จากสมการที่ 9-1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (ขั้วต่อสายที่ Terminal box) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กต่อแยกกับอาร์เมเจอร์ คือ

$$V_t = E_a - I_a R_a \qquad (9\text{-}2)$$

ตัวอย่างที่ 9.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดสนามแม่เหล็กต่อแยกเครื่องหนึ่ง สมมติให้มีสนามแม่เหล็กคงที่ มีค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.1 Ω เมื่อเครื่องหมุนด้วยความเร็ว 1,200 rpm สามารถจ่ายกระแสได้ 120 A ที่ 500 V จงหาความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำให้กระแสลดลงเป็น 60 A โดยมีแรงดันตกคร่อมที่แปรงถ่านข้างละ 1 V

<u>วิธีทำ</u>

ความเร็วของเริ่มต้นของเครื่อง (n_1) เท่ากับ 1,200 rpm
กระแสโหลดที่สภาวะที่ 1 (I_{L1}) เท่ากับ 120 A
กระแสโหลดที่สภาวะที่ 2 (I_{L2}) เท่ากับ 60 A
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_t) เท่ากับ 500 V



- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่กระแสโหลด 120 A เท่ากับ (พิจารณาจากรูปที่ 9.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ กระแสอาร์เมเจอร์ (I_a) และกระแสโหลด (I_L) คือ กระแสเดียวกัน)

$$E_{a1} = V_t + I_a R_a + V_b$$
$$E_{a1} = 500 + (120 \times 0.1) + 2 \quad = \quad 514 \text{ V}$$

- กำหนดให้ค่าความต้านทานของโหลดคงที่ เท่ากับ

$$R_L = \frac{V_t}{I_{L1}} = \frac{500}{120} = 4.167\ \Omega$$

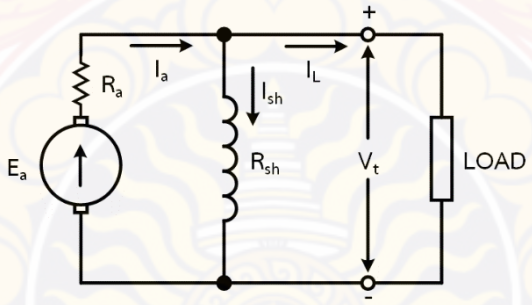
- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่กระแสโหลด 60 A เท่ากับ

$$E_{a2} = V_t + I_a R_a + V_b$$
$$V_t = I_{L2} \cdot R_L = 60 \times 4.167 \quad = 250 \text{ V}$$
$$E_{a1} = 250 + (60 \times 0.1) + 2 \quad = 258 \text{ V}$$

- หาความเร็วรอบของเครื่องที่ทำให้จ่ายกระแสโหลดได้ 60 A จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_{a1}}{E_{a2}}$$
$$\frac{1,200}{N_2} = \frac{514}{258}$$
$$N_2 = \frac{1,200 \times 258}{514} = 602.33 \text{ rpm}$$

9.2.2 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน



รูปที่ 9.7 ทิศทางของแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน

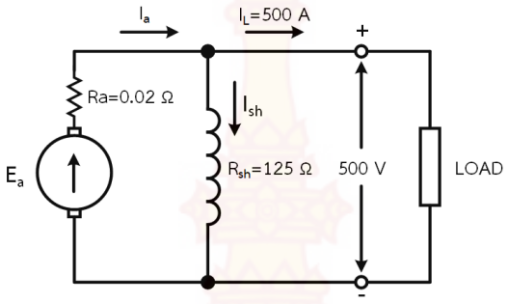
เมื่อพิจารณาจาก รูปที่ 9.7 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กต่อขนานกับอาร์เมเจอร์ คือ

$$E_a = V_t + I_a R_a \qquad (9\text{-}3)$$

จากสมการที่ 9-3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กต่อขนานกับอาร์เมเจอร์ คือ

$$V_t = E_a - I_a R_a \qquad (9\text{-}4)$$

ตัวอย่างที่ 9.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน จ่ายกระแสให้โหลด 500 A ที่แรงดัน 500 V จงคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้น ถ้าขดลวดอาเมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กมีความต้านทาน 0.02 Ω และ 125 Ω ตามลำดับ



วิธีทำ

- หากระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก จาก

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} = \frac{500}{125} = 4 \text{ A}$$

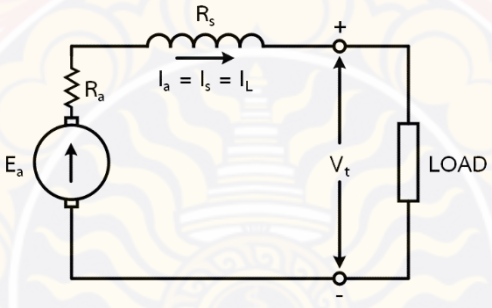
- หากระแสอาร์เมเจอร์ จาก

$$I_a = I_{sh} + I_L = 4 + 500 = 504 \text{ A}$$

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น คือ

$$E_a = V_t + I_a R_a$$
$$E_a = 500 + (504 \times 0.02) = 510.08 \text{ V}$$

9.2.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม



รูปที่ 9.8 ทิศทางของแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม

เมื่อพิจารณาจาก รูปที่ 9.8 กระแสที่ไหลผ่านอาร์เมเจอร์ ขดลวดสนามแม่เหล็ก และโหลด คือ กระแสเดียวกัน ดังนั้นสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ คือ

$$E_a = V_t + I_a R_a + I_a R_s \qquad (9\text{-}5)$$

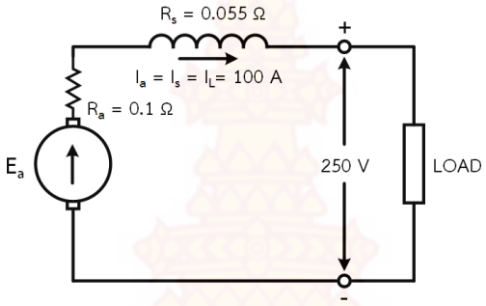
หรือ

$$E_a = V_t + I_a (R_a + R_s) \qquad (9\text{-}6)$$

จากสมการที่ 9-6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ คือ

$$V_t = E_a - I_a(R_a + R_s) \qquad (9\text{-}7)$$

ตัวอย่างที่ 9.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม จ่ายกระแสให้โหลด 100 A ที่แรงดัน 250 V ถ้าขดลวดอาเมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กมีความต้านทาน 0.1 Ω และ 0.055 Ω ตามลำดับ จงคำนวณหากระแสอาร์เมเจอร์และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้น



<u>วิธีทำ</u>

- จากรูปวงจร เครื่องกำเนิดแบบนี้กระแสอาร์เมเจอร์และกระแสโหลด คือ กระแสเดียวกัน ดังนั้น

$$I_a = I_L = 100 \text{ A}$$

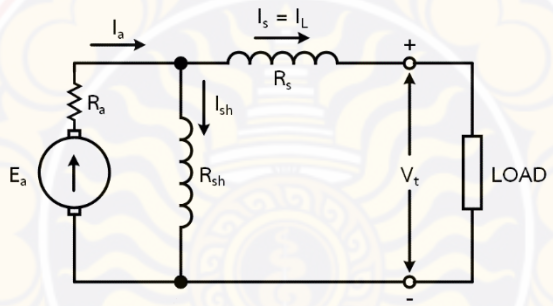
- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น คือ

$$E_a = V_t + I_a(R_a + R_s)$$

$$E_a = 250 + 100(0.1 \times 0.055) = 265.5 \text{ V}$$

9.2.4 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสม

1. แบบต่อขดลวดขนานอยู่ใกล้อาร์เมเจอร์ หรือ แบบ Short Shunt



รูปที่ 9.9 แรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กต่อแบบ Short Shunt

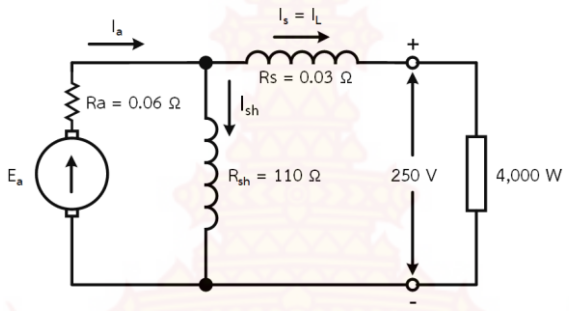
เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีทั้งขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมและขดลวดสนามแม่เหล็กขนานในเครื่องเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 9.9 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ คือ

$$E_a = V_t + I_L R_s + I_a R_a \qquad (9\text{-}8)$$

และจากสมการที่ 9-8 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ คือ

$$V_t = E_a - I_L R_s - I_a R_a \qquad (9\text{-}9)$$

ตัวอย่างที่ 9.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Short Shunt ขดลวดอาเมเจอร์มีความต้านทาน 0.06 Ω ขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมและขดลวดสนามแม่เหล็กขนานมีความต้านทาน 0.03 Ω และ 110 Ω ตามลำดับ จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดขนาด 4,000 W เต็มพิกัดที่แรงดัน 250 V จงคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้น โดยสมมติให้มีแรงดันตกคร่อมแปรงถ่านข้างละ 1 V



<u>วิธีทำ</u>

- หากระแสโหลด จาก

$$I_L = \frac{P_L}{V_t} = \frac{4,000}{250} = 16 \text{ A}$$

- กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} = \frac{V_t + I_L R_s}{R_{sh}} = \frac{250 + (16 \times 0.03)}{110} = 2.277 \text{ A}$$

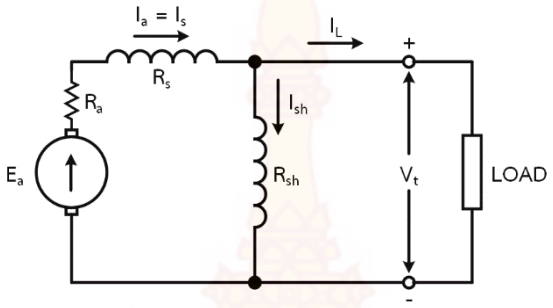
- กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$I_a = I_{sh} + I_L = 2.277 + 16 = 18.277 \text{ A}$$

- จากรูปวงจร จะเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นที่อาร์เมเจอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานแต่ละส่วนในวงจรรวมกัน นั่นคือ

$$E_a = V_t + I_L R_s + I_a R_a + V_{brush}$$
$$E_a = 250 + (16 \times 0.03) + (18.227 \times 0.06) + 2$$
$$E_a = 253.58 \text{ V}$$

2. แบบต่อขดลวดอนุกรมใกล้อาร์เมเจอร์ หรือ แบบ Long Shunt



รูปที่ 9.10 แรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขดลวดสนามแม่เหล็กต่อแบบ Long Shunt

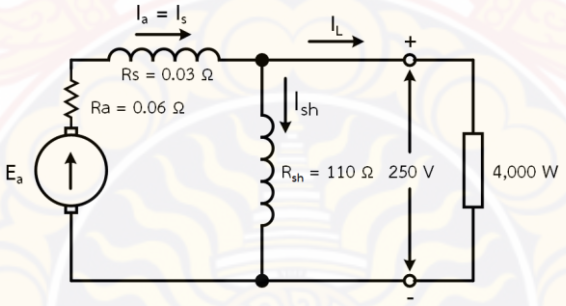
พิจารณาจากรูปที่ 9.10 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามกระตุ้นต่อแบบผสมชนิด Long Shunt คือ

$$E_a = V_t + I_a R_s + I_a R_a \qquad (9\text{-}10)$$

และจากสมการที่ 9-9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ

$$V_t = E_a - I_a R_s - I_a R_a \qquad (9\text{-}11)$$

ตัวอย่างที่ 9.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในข้อ 9.4 หากเปลี่ยนมาต่อแบบ Long Shunt และจ่ายโหลดเท่าเดิม จงคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้น



<u>วิธีทำ</u>

- หากระแสโหลด จาก

$$I_L = \frac{P_L}{V_t} = \frac{4,000}{250} = 16 \text{ A}$$

- กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} = \frac{250}{110} = 2.273 \text{ A}$$

- กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$I_a = I_{sh} + I_L = 2.273 + 16 = 18.273 \text{ A}$$

- จากรูปวงจร จะเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นที่อาร์เมเจอร์ มีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานแต่ละส่วนในวงจรและแรงดันที่ตกคร่อมแปรงถ่านรวมกัน นั่นคือ

$$E_a = V_t + I_a R_s + I_a R_a + V_{brush}$$
$$E_a = 250 + (18.273 \times 0.03) + (18.273 \times 0.06) + 2$$
$$E_a = 251.64 \text{ V}$$

9.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ แม้จะเดินเครื่องต้นกำลังแล้วก็ตาม อาจเกิดขึ้นได้จากเหตุผลหลายประการด้วยกัน โดยเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสร้างแรงเคลื่อนด้วยตัวเอง (Self-excited) สาเหตุที่สำคัญที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ อาจเป็นได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. การต่อขั้วของขดลวดสนามแม่เหล็กกลับขั้วจากเดิม ในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้วยตัวเอง (Self-excited) หากต่อขั้วของขดลวดสนามแม่เหล็กกลับขั้วจากเดิมที่ต่ออยู่จะทำให้สนามแม่เหล็กกลับทิศทางและหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่เดิมให้หมดไป

2. ความต้านทานในวงจรสนามแม่เหล็ก (field circuit resistance) มีค่าสูงเกินไป การควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้วยตัวเอง (Self-excited) ทำได้โดยการต่อความต้านทานปรับค่าได้อนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กเพื่อปรับกระแส แต่ถ้าค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมในวงจรสนามแม่เหล็กนี้มีค่าสูงเกินไปก็จะทำให้กระแสไหลได้น้อย ทำให้สร้างสนามแม่เหล็กได้น้อยจึงทำให้เครื่องไม่สามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้

3. แปรงถ่านอยู่ห่างจากตำแหน่งสะเทินมากเกินไป ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงาน การรวมกันระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กและเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำในอาเมเจอร์ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กรวม (Resultant Flux) บิดเบนไปทางเดียวกับทางหมุนของอาเมเจอร์ ทำให้ตำแหน่งแนวสะเทินของเส้นแรงแม่เหล็กหรือแกนนิวตรอลบิดเบนไปด้วย จึงจำเป็นต้องเลื่อนแปรงถ่านไปตำแหน่งใหม่ ตำแหน่งที่แปรงถ่านถูกเลื่อนไปหากอยู่ห่างจากแนวสะเทินมากเกินไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้

4. ตัวต้นกำลังหมุนช้าทำให้ความเร็วของเครื่องกำเนิดต่ำเกินไป เนื่องจากความเร็วในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า หากตัวต้นกำลังหมุนช้าเกินไปเครื่องก็ไม่สามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้

5. เส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ในขดลวดสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยเกินไป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้วยตัวเอง (Self-excited) หากเส้นแรงแม่เหล็กที่หลงเหลืออยู่ในขดลวดสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยเกินไปอาจไม่พอเพียงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้

9.4 การสูญเสียในแกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ (iron loss in armature)

เนื่องจากอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต้องหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กที่อยู่รอบ ๆ จึงทำให้เกิดการสูญเสียอย่างต่อเนื่องในแกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ การสูญเสียนี้เรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss หรือ Core loss) ซึ่งประกอบด้วย

9.4.1 การสูญเสียจากฮีสเทอรีซิส (hysteresis loss; P_h) เกิดจากการกลับขั้วของเส้นแรงแม่เหล็กบนอาร์เมเจอร์ในขณะที่อาร์เมเจอร์หมุนผ่านสนามแม่เหล็ก การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรและคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ทำแกน โดยสามารถหาได้จาก

$$P_h = \eta \cdot B_{\max}^{1.6} . f . V \quad Watts \tag{9-12}$$

เมื่อ

B_{max} คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Wb/m^2)

f คือ ความถี่ของการกลับเส้นแรงแม่เหล็ก (c/s)

V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3)

η คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแกนเหล็ก - Sheet steel = 502

- Silicon steel = 191

9.4.2 การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss; Pe) การเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก เกิดขึ้นจากการที่อาร์เมเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็ก ถึงแม้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าน้อยมากแต่ก็สามารถทำให้กระแสไหลจำนวนมากได้เนื่องจากค่าความต้านทานของแกนเหล็กต่ำนั่นเอง การสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ เราเรียกว่าการสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก และสามารถหาได้จาก

$$P_e = k \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot V \quad watts \tag{9-13}$$

เมื่อ

B_{max} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Wb/m^2)

f คือ ความถี่ของการกลับเส้นแรงแม่เหล็ก (c/s)

t คือ ความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น (cm)

V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก (m^3)

k คือ ค่าคงที่ในการเกิดกระแสไหลวน = 13.6 W/cc

เราสามารถลดค่าการสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็กได้โดยการใช้แกนเหล็กที่ทำจากเหล็กแผ่นบาง ๆ อาบด้วยฉนวน นำมาอัดเข้าด้วยกันแล้วยึดด้วยหมุดให้เป็นรูปอาร์เมเจอร์ เพื่อตัดทางเดินของกระแสไฟฟ้าแต่เส้นแรงแม่เหล็กยังสามารถไหลผ่านได้ จึงสามารถลดค่าการสูญเสียจากกระแสไหลวนได้แต่

การสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีนี้ การลดค่าฮิสเทอรีซิสทำได้โดยการเลือกชนิดของเหล็กที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของฮิสเทอรีซิสต่ำ แต่มีค่าความต้านทานสูง

9.5 การสูญเสียทั้งหมดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (total loss in dc generator)

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

9.5.1 การสูญเสียที่ขดลวดทองแดง (copper losses) แบ่งเป็น

1) การสูญเสียที่ขดลวดทองแดงอาร์เมเจอร์ (Armature Copper Loss) เป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ อินเตอร์โพล และส่วนอื่น ๆ รวมกัน การสูญเสียชนิดนี้มีค่าประมาณร้อยละ 30-40 ของการสูญเสียรวมเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด หาได้จาก

$$armature\ copper\ loss = I_a^2 R_a$$

2) การสูญเสียที่ขดลวดของสนามแม่เหล็ก (field copper losses) คือค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากค่าความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กขนานและขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรม หาได้จาก

$$shunt\ copper\ loss = I_{sh}^2 R_{sh}$$
$$series\ copper\ loss = I_s^2 R_s$$

9.5.2 การสูญเสียเนื่องจากความเป็นแม่เหล็ก (magnetic losses) หรือการสูญเสียที่แกนเหล็กซึ่งก็คือการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss; P_h) และการสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current Loss; P_e) การสูญเสียทั้งสองอย่างนี้ ในทางปฏิบัติแล้วถือว่าคงที่ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแบบขนานและผสม ทั้งนี้เพราะกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กมีค่าเกือบคงที่ การสูญเสียทั้งสองแบบนี้คิดเป็นร้อยละ 20-30 ของการสูญเสียรวมทั้งหมด เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด

9.5.3 การสูญเสียทางกล (mechanical losses) ประกอบด้วย

1. การสูญเสียจากแรงเสียดทานที่ตลับลูกปืน (bearing) และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์

2. แรงเสียดทานเนื่องจากอาร์เมเจอร์หมุนต้านอากาศ ทำให้เกิดแรงต้านที่กระทำกับอาร์เมเจอร์ในขณะที่อาร์เมเจอร์หมุนไป

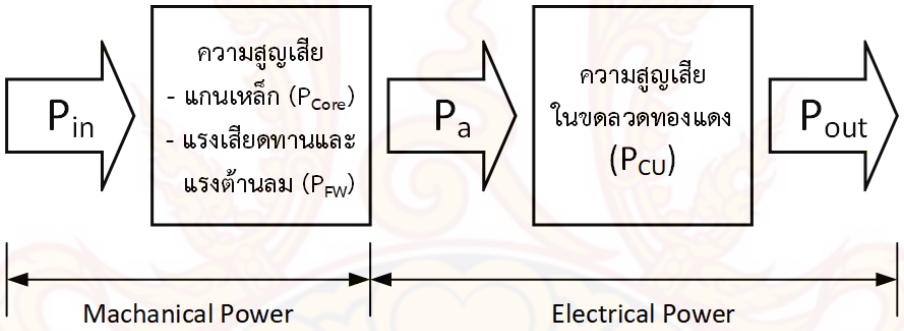
การสูญเสียทั้งสองอย่างนี้คิดเป็นร้อยละ 10-20 ของการสูญเสียรวมทั้งหมด เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด การสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 9.11



รูปที่ 9.11 การสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

9.6 แผนผังกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (power flow diagram)

กำลังงานที่จ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อผลิตเป็นกำลังไฟฟ้านั้น มีลำดับขั้นของกำลังงานในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถอธิบายได้จากแผนผังกำลัง ดังรูปที่ 9.12 และสามารถหาค่าประสิทธิภาพ ณ ลำดับขั้นต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 9.12 แผนผังกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

1. ประสิทธิภาพทางกล (Mechanical Efficiency)

$$\eta_m = \frac{P_a}{P_{in}} = \frac{E_a \times I_a}{HP \times 746}$$

2. ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

$$\eta_e = \frac{P_{out}}{P_a} = \frac{V_t \times I_L}{E_a \times I_a}$$

3. ประสิทธิภาพทั้งหมดหรือประสิทธิภาพทางการค้า (overall or commercial efficiency)

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_t \times I_L}{HP \times 746}$$

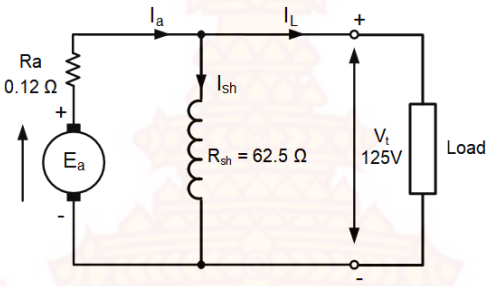
ตัวอย่างที่ 9.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน พิกัด 10 kW มีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเท่ากับ 125 V วัดค่าความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กได้ 62.5 Ω และวัดค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ได้เท่ากับ 0.12 Ω เมื่อมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการหมุนเท่ากับ 580 W จงหา

ก) กระแสไฟฟ้าที่เครื่องจ่ายให้โหลด (I_L) ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด

ข) ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวม

ค) แรงม้าของตัวต้นกำลัง (HP)

ง) ประสิทธิภาพทางการค้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนี้



<u>วิธีทำ</u>

ข้อมูลจากโจทย์

- กำลังไฟฟ้าขาออก เท่ากับ (P_{out}) เท่ากับ 10 kW
- แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_t) เท่ากับ 125 V
- ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน (R_{sh}) เท่ากับ 62.5 Ω
- ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (R_a) เท่ากับ 0.12 Ω

ก) กระแสไฟฟ้าที่เครื่องจ่ายให้โหลดขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{10\times10^3}{125} = 80 \text{ A}$$

ข) ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวม

หาค่ากระแสที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก ได้ดังนี้

$$I_{sh} = \frac{V_t}{R_{sh}} = \frac{125}{62.5} = 2 \text{ A}$$

และหากระแสอาร์เมเจอร์ ได้ดังนี้

$$I_a = I_{sh} + I_L = 80 + 2 = 82 \text{ A}$$

หาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก

$$Shunt\ copper\ loss = I_{sh}^2 \times R_{sh} = 2^2 \times 62.5 = 250 \text{ W}$$

หาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดอาร์เมเจอร์

$$Armature\ copper\ loss = I_a^2 \times R_a = 82^2 \times 0.12 = 806.88 \text{ W}$$

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการหมุน เท่ากับ 580 W จะได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม

$$P_{loss} = 250 + 806.88 + 580 = 1,636.88 \text{ W}$$

ค) แรงม้าของตัวต้นกำลัง

$$P_{in} = P_{out} + P_{Loss}$$
$$P_{in} = 10,000 + 1,636.88 = 11,636.88 \text{ W}$$
$$Hp = \frac{11,636.88}{746} = 15.6$$

ง) ประสิทธิภาพทางการค้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\ \%$$
$$\eta_c = \frac{10,000}{11,636.88} \times 100\ \%$$
$$\eta_c = 85.93\ \%$$

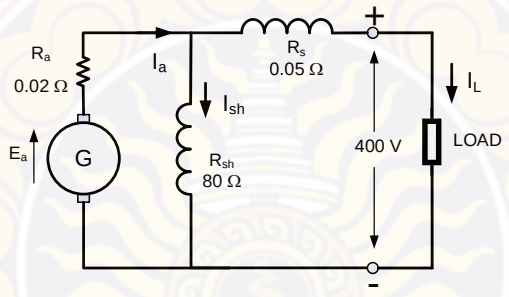
ตัวอย่างที่ 9.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมต่อแบบ short shunt ขนาด 10 kW มีแรงดันที่ขั้วเท่ากับ 400 V ค่าความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กได้เท่ากับ 80 Ω และค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.02 Ω ค่าความต้านทานของขดลวดอนุกรมเท่ากับ 0.05 Ω มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการหมุนเท่ากับ 580 W จงหา

ก) กระแสไฟฟ้าที่เครื่องจ่ายให้โหลด

ข) ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวม

ค) แรงม้าของตัวต้นกำลัง

ง) ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



วิธีทำ

ก) กระแสไฟฟ้าที่เครื่องจ่ายให้โหลด

$$I_L = \frac{P_{Load}}{V_t} = \frac{10,000}{400} = 25 \text{ A}$$

ข) ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวม

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} = \frac{V_t + I_L R_s}{R_{sh}} = \frac{400 + (25 \times 0.05)}{80} = 5.02 \text{ A}$$
$$I_a = I_{sh} + I_L = 5.02 + 25 = 30.02 \text{ A}$$

Armature copper loss = $I_a^2 \cdot R_a = 30.02^2 \times 0.02 = 18.02$ W

Shunt copper loss = $I_{sh}^2 \cdot R_{sh} = 5.02^2 \times 80 = 2,016.03$ W

Series copper loss = $I_s^2 \cdot R_s = 25^2 \times 0.05 = 31.25$ W

Total copper loss = $18.02 + 2,016.03 + 31.25 = 2,065.30$ W

ค) แรงม้าของตัวต้นกำลัง

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{out} + copper\ loss + friction\ \&\ windage\ loss \\ &= 10,000 + 2,065.30 + 580 \\ &= 12,645.30 \text{ W} \end{aligned}$$

$$HP = \frac{P_{in}}{746} = \frac{12,645.30}{746} = 16.95$$

ง) ประสิทธิภาพทางการค้า

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{10,000}{12,645.30} \times 100 = 79.08\%$$

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความสูญเสีย และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจำแนกเครื่องกำเนิดตามลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นแบบสนามกระตุ้นแยกและแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ซึ่งแบบกระตุ้นด้วยตัวเองประกอบด้วยแบบขนาน แบบอนุกรม และแบบผสม โดยแบบผสมแบ่งเป็น Short Shunt และ Long Shunt

การคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดแต่ละชนิดต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสอาร์เมเจอร์ กระแสโหลด กระแสสนามแม่เหล็ก และแรงดันตกคร่อมความต้านทานของขดลวดตามลักษณะการต่อวงจร นอกจากนี้ การสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับการต่อขั้วสนามแม่เหล็ก ความต้านทานของวงจรสนาม ความเร็วรอบ และเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

ความสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้นจากหลายส่วน เช่น ความสูญเสียในขดลวดทองแดง ความสูญเสียในแกนเหล็ก และความสูญเสียจากการหมุน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเครื่อง โดยประสิทธิภาพสามารถพิจารณาได้ทั้งประสิทธิภาพทางกล ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน จ่ายกระแสได้ 400 A ที่ 220 V มีค่าความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ 40 Ω ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 0.02 Ω จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอาร์เมเจอร์ (ตอบ 228.11 V)
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานเครื่องหนึ่ง จ่ายกระแสโหลด 250 A ที่แรงดัน 240 V ความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน 60 Ω ความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.03 Ω จงหา

ก) กระแสสนามแม่เหล็กขนาน (ตอบ 4 A)

ข) กระแสอาร์เมเจอร์ (ตอบ 254 A)

ค) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอาร์เมเจอร์ (ตอบ 247.62 V)

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิด Long Shunt จ่ายกระแสได้ 80 A มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว 400 V ความต้านทานอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 0.015 Ω ความต้านทานของขดลวดอนุกรม เป็น 0.035 Ω ความต้านทานของขดลวดขนาน เท่ากับ 80 Ω หากคิดค่าแรงดันที่ตกคร่อมแปรงถ่านข้างละ 1 V จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอาร์เมเจอร์ (ตอบ 406.08 V)
4. เครื่องกำเนิดแบบขนานจ่ายกระแสที่พิกัดได้ 100 A ที่แรงดัน 110 V ค่าความต้านทานของขดลวดขนานเท่ากับ 55 Ω การสูญเสียคงที่ เท่ากับ 500 W ประสิทธิภาพที่พิกัดเท่ากับ 88 % จงหาค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (ตอบ 0.075 Ω)
5. เครื่องกำเนิดแบบผสมชนิด Short Shunt จ่ายกระแส 100 A ที่แรงดัน 220 V ความต้านทานของขดลวดขนาน เท่ากับ 50 Ω ความต้านทานของขดลวดอนุกรม เป็น 0.025 Ω ความต้านทานอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 0.05 Ω แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านรวม 2 V ความสูญเสียในแกนเหล็กและแรงเสียดทานเท่ากับ 1 kW จงหา

ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ตอบ 229.72 V)

ข) ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ขดลวด (ตอบ 1,785.62 W)

ค) แรงม้าของตัวขับ (ตอบ 33.51 แรงม้า)

ง) ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิด (ตอบ 88.02 %)

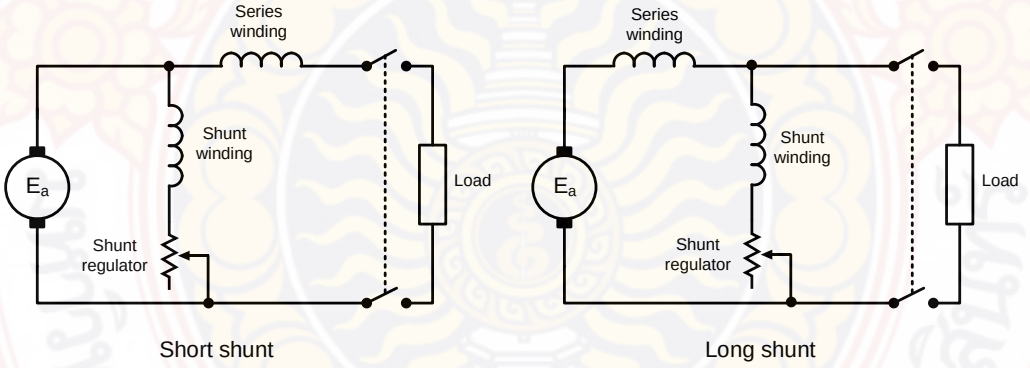
10 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและอาร์เมเจอร์รีแอคชัน

DC Generators Characteristics and Armature Reaction

โดยปกติแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกออกแบบให้ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าในลักษณะให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนที่หมุน และขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่อยู่กับที่ เมื่อตัวต้นกำลังหมุนส่งกำลังไปยังแกนของตัวหมุน ขดลวดอาร์เมเจอร์ก็จะหมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กแล้วผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นภายใน หลังจากนั้นจะส่งผ่านออกมาภายนอกผ่านทางคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน พฤติกรรมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะการต่อวงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และลักษณะการต่อวงจรภายในนี้ยังเกี่ยวข้องกับรูปแบบในการใช้งานอีกด้วย

10.1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรมนั้นควบคุมระดับแรงดันได้ยาก แต่ขดลวดอนุกรมของเครื่องกำเนิดชนิดนี้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อตอบสนองโหลดที่เพิ่มขึ้นได้ดี คุณลักษณะที่เป็นประโยชน์ของขดลวดอนุกรมนี้ เมื่อนำมารวมกับคุณสมบัติเรื่องแรงดันคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน จึงทำให้เกิดเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ซึ่งรวมเอาคุณลักษณะที่ดีของเครื่องกำเนิดทั้ง 2 แบบเข้าด้วยกัน รูปที่ 10.1 แสดงการต่อวงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสม

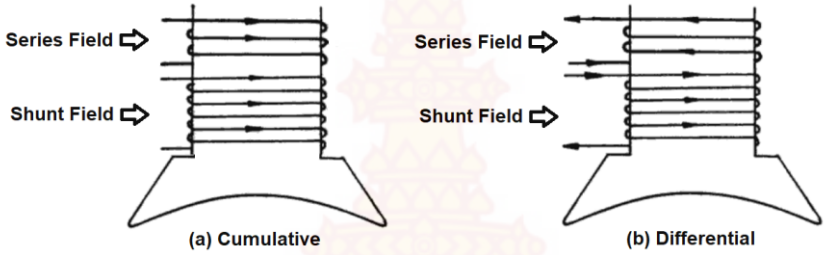


รูปที่ 10.1 การต่อวงจรภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสม

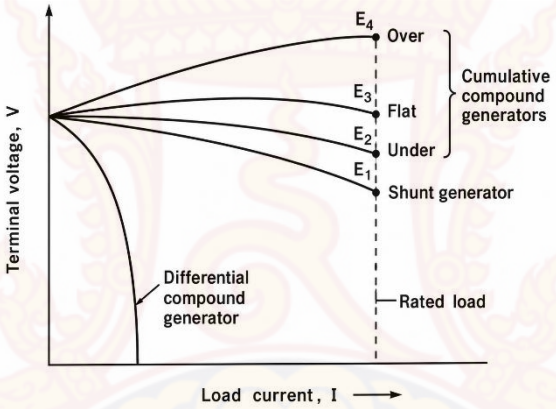
ไม่ว่าจะต่อวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม เป็นแบบ short shunt หรือแบบ long shunt ก็ตาม แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องจะมีสมการ ดังต่อไปนี้

$$V_t = E_a - (I_s R_s + I_a R_a)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมผลิตขึ้น เป็นผลมาจากการรวมกันของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากจากกระแสที่ไหลในขดลวดอนุกรมและขดลวดขนาน ขดลวดขนานจะมีจำนวนรอบที่มากกว่าขดลวดอนุกรม เมื่อสนามแม่เหล็กจากขดลวดอนุกรมและขนานมีทิศทางเสริมกัน เรียกว่า เครื่องกำเนิดแบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟ แต่ถ้ามีทิศทางที่หักล้างกัน เรียกว่าเครื่องกำเนิดแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล ดังรูป



รูปที่ 10.2 ทิศทางของกระแสในขดลวดอนุกรมและขดลวดขนาน



รูปที่ 10.3 คุณลักษณะแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟ และชนิดดิฟเฟอเรนเชียล

10.1.1 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟ

จากรูปที่ 10.3 จากการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดอนุกรมทำให้เกิดคุณลักษณะที่เป็นไปได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด 3 รูปแบบ ดังนี้

1) over compound generator คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว เพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายโหลด ดังนั้นแรงดันขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัดของเครื่องจะมากกว่าแรงดันขณะไม่มีโหลด

2) flat compound generator คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด และขณะไม่จ่ายโหลดมีค่าเท่ากัน

3) under compound generator คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัดน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าขณะไม่จ่ายโหลด แต่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้ดีกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน

โดยปกติแล้วในทางการค้าโรงงานจะผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแบบ over compound ทุกเครื่อง การปรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีพฤติกรรมเป็น over compound, flat compound หรือ under compound นั้น ขึ้นอยู่กับการปรับตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่กับขดลวดสนามแม่เหล็ก

10.1.2 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล (differential compound generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่อขดลวดอนุกรมและขดลวดขนานในทิศทางตรงข้ามกัน ความแตกต่างของทิศทางการไหลของกระแสของขดลวดทั้งสองขด แสดงดังรูปที่ 10.2



รูปที่ 10.4 แสดงกราฟคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล

จากรูปที่ 10.4 กราฟคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล ขณะจ่ายโหลด เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ยังไม่ได้ต่อโหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสร้างแรงดันขึ้นจากสนามแม่เหล็กของขดลวดขนานเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน แต่เมื่อต่อโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ผลิตขึ้น (E_a) จะลดลงเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหลักจากขดลวดขนานลดลงเพราะถูกหักล้างด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดอนุกรมที่มีทิศทางตรงกันข้าม ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 10.4 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเครื่องจ่ายกระแสให้โหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียลจะใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระแสคงที่ สำหรับจ่ายโหลดที่ต้องการใช้งานกระแสที่คงที่

10.2 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

10.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวดสนามกระตุ้นต่อแยก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้มีราคาแพงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นตัวเอง (self-excited) เพราะต้องการแหล่งจ่ายจากภายนอกแยกต่างหาก ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่ต้องการความแน่นอนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นตัวเองทำไม่ได้ คือ

(1) เนื่องจากความสามารถในการให้แรงดันไฟฟ้าขาออกได้หลากหลาย จึงมักใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

(2) เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการตอบสนองในการควบคุมที่รวดเร็วด้วยการปรับค่าความต้านทานของวงจรสนามแม่เหล็ก หรือปรับกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งต้องควบคุมความเร็วขณะใช้งาน

10.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน

การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนานมีข้อจำกัดเรื่องแรงดันไฟฟ้าตก (voltage drop) ซึ่งเป็นคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ จึงเหมาะสำหรับใช้จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กับตัวเครื่อง โดยทั่วไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนานจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคงที่สำหรับการจ่ายไฟในระยะใกล้ ๆ และต้องมีการควบคุมสนามแม่เหล็กตั้งแต่ไม่มีโหลดจนถึงจ่ายโหลดเต็มที่ งานที่เหมาะกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน คือ

(1) ใช้งานเป็นเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า (automatic voltage regulator; AVR)

(2) ใช้งานเป็นเอ็กไซเตอร์ (exciter) ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

(3) ใช้งานชาร์จแบตเตอรี่ เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกได้คงที่

(4) ใช้จ่ายไฟให้ระบบแสงสว่างทั่วไป หรือใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟแบบเคลื่อนที่ขนาดเล็ก

10.2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟ เนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะของของเครื่องที่แรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) จะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้นจากไม่มีโหลดจนถึงโหลดเต็มพิกัด คุณลักษณะนี้สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสคงที่เพื่อใช้งานต่าง ๆ เช่น

(1) ใช้สำหรับจ่ายกระแสให้ขดลวดสนามกระตุ้นในระบบเบรกแบบคืนพลังงาน (regenerative brake) ของหัวรถจักร

(2) ใช้ทำหน้าที่เป็นซีรีส์บูสเตอร์ (series booster) หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับเพิ่มแรงดันในสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ต่ออนุกรมกับสายส่งไฟฟ้า เพื่อชดเชยแรงดันตกเนื่องจากค่าความต้านทานของสายส่ง

10.2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมเป็นชนิดที่ใช้แพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติในการชดเชยแรงดันตกได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดอนุกรม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟอาจเป็นแบบ over compound, flat compound หรือ under compound ก็ได้ เราสามารถปรับแรงดันของเครื่องที่ต้องการได้โดยการชดเชยแรงดันตกอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของอาร์เมเจอร์และความต้านทานของ

สายไฟได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมสามารถใช้งานได้หลากหลายมากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทอื่น ดังนี้

(1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้สามารถสร้างและปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อจ่ายแรงดันให้โหลดคงที่ได้โดยอัตโนมัติ ณ จุดที่ใช้งาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมชนิดโอเวอร์คอมปาวด์สามารถจ่ายแรงดันคงที่ในสายส่งระยะยาวได้เพราะแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานของสายส่งถูกชดเชยด้วยแรงดันที่เพิ่มขึ้นตามคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดแบบโอเวอร์คอมปาวด์ ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดต้องการใช้งานใกล้เคียงกับแรงดันที่เครื่องผลิตได้ก็สามารถใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมชนิดแฟลตคอมปาวด์ได้

(2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องเชื่อมไฟฟ้าได้เพราะเครื่องกำเนิดแบบนี้สามารถทำงานแบบลัดวงจรได้ในขณะที่ลวดเชื่อมและแผ่นโลหะสัมผัสกันในขณะเชื่อม

(3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบผสม สามารถใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบต่าง ๆ เช่น รถไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าในอุตสาหกรรม หลอดอินแคนเดสเซนต์ และระบบลิฟต์ แต่ในปัจจุบันไม่มีการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะนี้แล้ว

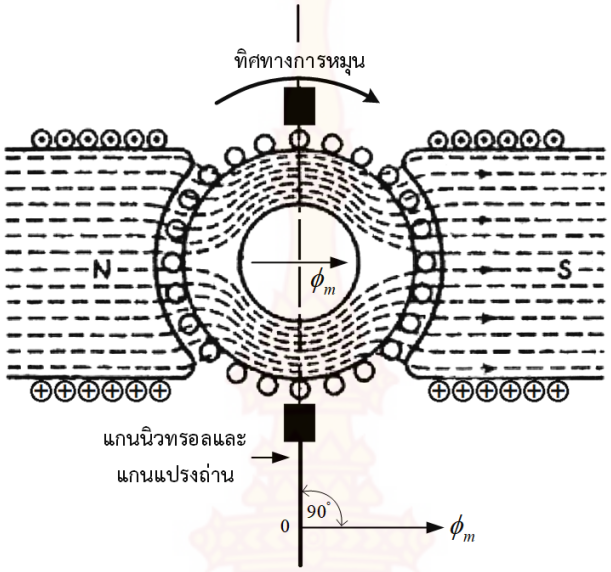
ในปัจจุบันการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อจำกัดอย่างมาก เนื่องจากเหตุผลทางเทคนิคและเศรษฐกิจ ทุกวันนี้พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับ และหากมีความต้องการใช้งานไฟฟ้ากระแสตรงก็ต้องอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ ช่วยเหลือ

10.3 อาเมเจอร์รีแอคชัน (armature reaction)

อาเมเจอร์รีแอคชัน หรือ ปฏิกิริยาอาเมเจอร์ นั้นหมายถึง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในตัวอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นจากขดลวดอาเมเจอร์ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้มีผลกระทบกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วลดลง เป็นสาเหตุให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง พฤติกรรมแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายโหลด และยังทำให้เกิดประกายไฟขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์อีกด้วย

10.3.1 สนามแม่เหล็กหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

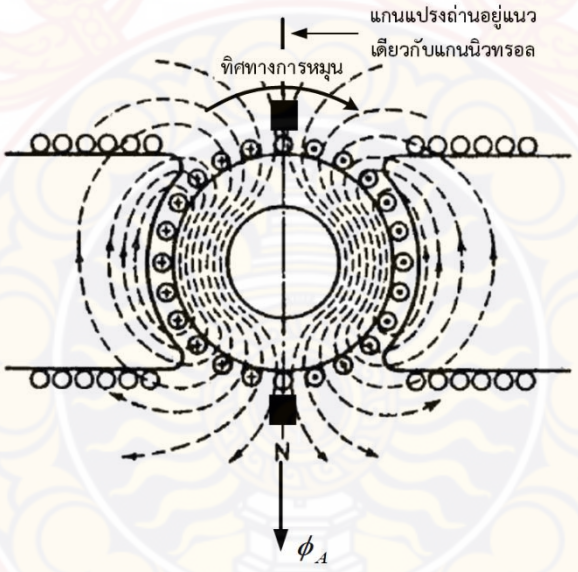
ในสภาวะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีโหลด สนามแม่เหล็กหลักจากขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ϕ_m) จะมีทิศทางตามลูกศรในรูปที่ 10.5 ซึ่งจากรูปจะแสดงให้เห็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เดินทางจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ ในกรณีนี้จะมีการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กหลัก (ϕ_m) ในลักษณะที่สมมาตรกับกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ แกนนิวทรอลของสนามแม่เหล็กหลัก (main neutral axis) จะวางตัวในแนวเดียวกันกับแกนของแปรงถ่าน ซึ่งแกนนิวทรอลของสนามแม่เหล็กหลักก็คือแกนที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กหลักที่ไหลผ่านอาเมเจอร์ แปรงถ่านจะต้องวางอยู่ตามแนวของแกนนิวทรอลเสมอ ซึ่งเรียกว่าแกนคอมมิวเตชัน เพราะการไหลกลับกันของกระแสในตัวนำอาเมเจอร์เกิดขึ้นที่แกนนี้ ดังรูปที่ 10.6



รูปที่ 10.5 เส้นแรงแม่เหล็กหลักที่สร้างจากขั้วแม่เหล็กหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

10.3.2 สนามแม่เหล็กของอาเมเจอร์

เมื่อต่อโหลดเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลไปที่โหลด กระแสไฟฟ้าที่ไหลไปที่โหลดมาจากตัวนำในอาเมเจอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสจากแผงขนานทั้งหมดในอาเมเจอร์รวมกัน รูปที่ 10.6 คือ รูปของอาเมเจอร์ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดมีกระแสไหลในตัวนำอาเมเจอร์ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ตัวนำ



รูปที่ 10.6 เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากกระแสที่ไหลในตัวนำอาเมเจอร์

เมื่อตัวนำไฟฟ้าในอาเมเจอร์หลายตัววางอยู่ด้วยกัน เส้นแรงแม่เหล็กจากตัวนำแต่ละตัวจะรวมกัน สนามแม่เหล็กที่มาจากตัวนำทางด้านซ้ายของอาเมเจอร์ และสนามแม่เหล็กที่มาจากตัวนำทางด้านขวาของอาเมเจอร์ เมื่อรวมกันแล้วจะเกิดเป็นผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กตรงส่วนกลางของอาเมเจอร์และมีทิศทางลง

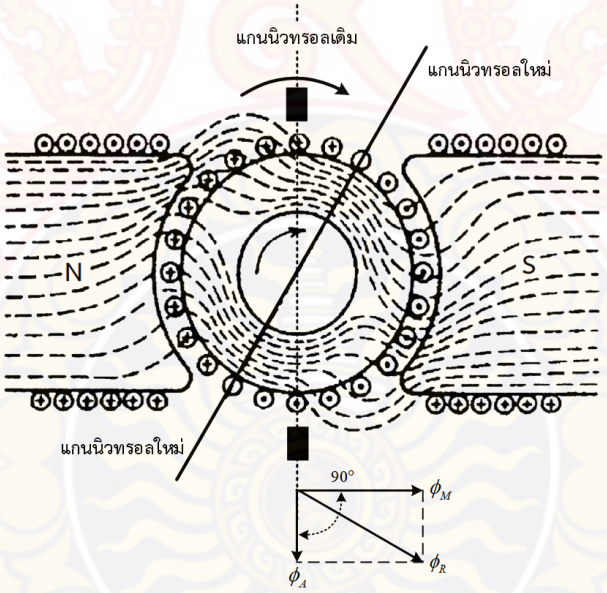
ด้านล่างตามรูปที่ 10.6 เรียกว่าสนามแม่เหล็กของอาเมเจอร์ (ϕ_A) สนามแม่เหล็กนี้มีผลกระทบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ประการ คือ

1) สนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์จะหักล้างกับสนามแม่เหล็กหลักที่มาจากขั้วแม่เหล็กของเครื่องทำให้สนามแม่เหล็กหลักอ่อนแรงลง

2) สนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์ จะทำให้สนามแม่เหล็กหลักเกิดการบิดเบี้ยวผิดเพี้ยนไปจากเดิม

ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดจะมีสนามแม่เหล็ก 2 ส่วน เกิดขึ้นภายในเครื่อง ส่วนแรก คือ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กหลักของเครื่อง (ϕ_m) และส่วนที่สอง คือสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในตัวนำอาเมเจอร์ (ϕ_A) เมื่อสนามแม่เหล็กทั้งสองส่วนนี้รวมกันจะเกิดผลรวมของสนามแม่เหล็กใหม่ (Resultant flux; ϕ_R) ดังรูปที่ 10.7

ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่รวมตัวกันขึ้นใหม่นี้จะมีทิศทางไม่เหมือนกับสนามแม่เหล็กหลักของเดิมที่เคลื่อนที่จากขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือผ่านอาร์เมเจอร์ไปหาขั้วแม่เหล็กขั้วใต้ สนามแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะบิดเบนไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของอาร์เมเจอร์ ทำให้แปรงถ่านไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องขดลวดจึงเกิดการลัดวงจรในขณะที่มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ทำให้เกิดประกายไฟที่แปรงถ่าน ทำให้ตำแหน่งแนวสะเทินของเส้นแรงแม่เหล็กหรือแกนนิวทรอลบิดเบนไปด้วย จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนตำแหน่งของแปรงถ่านไปตำแหน่งใหม่ ตำแหน่งที่แปรงถ่านถูกเปลี่ยนไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 10.7 สนามแม่เหล็กรวมที่การบิดเบนจากผลของสนามแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์

10.3.3 ผลของการเลื่อนตำแหน่งแปรงถ่าน

เห็นได้ชัดเจนว่าเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กหลักขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดสนามแม่เหล็ก หากตำแหน่งของแปรงถ่านเปลี่ยนแปลงเลื่อนไปที่แกนนิวทรอลใหม่จะไม่มีผลกับขนาดหรือ

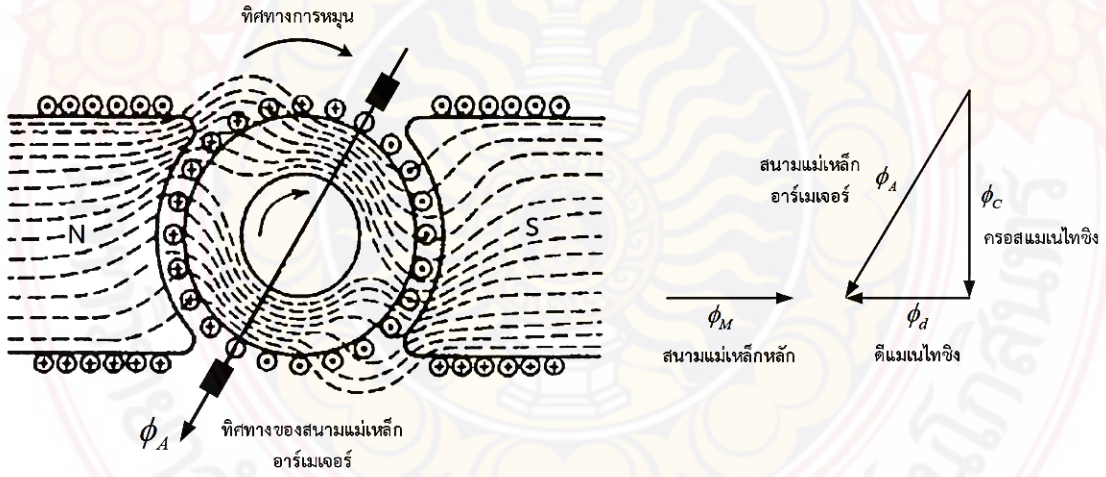
ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กหลักจะเท่ากันทั้งก่อนและหลังการเลื่อนตำแหน่งของแปรงถ่าน หากเราพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กจากอาร์เมเจอร์ (หลังจากแปรงถ่านเปลี่ยนตำแหน่งไปที่แกนนิวตรอลใหม่) ในรูปที่ 10.7 จากกฎมือขวาของเฟรมมิ่ง (Fleming's right hand rule) สังเกตได้ว่าตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ด้านขั้วแม่เหล็กเหนือจะมีทิศทางของกระแสพุ่งเข้า และตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ด้านขั้วแม่เหล็กใต้จะมีทิศทางของกระแสพุ่งออกจากหน้ากระดาษ และแน่นอนว่าเส้นแรงแม่เหล็กรวมจากตัวนำทั้งหมดยังคงอยู่ในทิศทางจากแปรงถ่านด้านบนไปยังแปรงถ่านด้านล่างเช่นเดียวกับก่อนที่แปรงถ่านจะถูกเลื่อนตำแหน่ง อาจสังเกตได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กจากตัวนำในอาร์เมเจอร์ไม่เป็นมุมฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กหลัก ผลกระทบของสนามแม่เหล็กจากอาร์เมเจอร์สามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กที่ประกอบด้วย 2 สององค์ประกอบที่ทำมุมตั้งฉากกัน คือ

1) องค์ประกอบครอสแมกเนไทซิง

องค์ประกอบนี้อยู่ทางมุมด้านขวาของสนามแม่เหล็กหลัก และเพราะว่าองค์ประกอบนี้ตัดขวางเส้นแรงแม่เหล็กหลัก จึงเรียกว่าองค์ประกอบแม่เหล็กตัดขวางหรือครอสแมกเนไทซิง (ϕ_c) ของเส้นแรงแม่เหล็กอาร์เมเจอร์ ครอสแมกเนไทซิงหรือองค์ประกอบบิดเบี้ยวนั้นทำให้แนวสะเทินของเส้นแรงแม่เหล็กหลักหรือแกนนิวทรอลเปลี่ยนแปลง ทำให้ต้องเลื่อนแปรงถ่านไปตามทิศทางการหมุนของอาร์เมเจอร์เพื่อลดประกายไฟที่แปรงถ่าน

2) องค์ประกอบดีแมกเนไทซิง

องค์ประกอบดีแมกเนไทซิง (ϕ_d) นี้อยู่ในระนาบเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหลัก ทิศทางขององค์ประกอบนี้จะตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กหลัก ผลขององค์ประกอบนี้ทำให้สนามแม่เหล็กหลักลดลง เป็นสาเหตุให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าลดลง



รูปที่ 10.8 องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กอาร์เมเจอร์และองค์ประกอบอื่น ๆ เมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็กหลัก

10.3.4 ผลขององค์ประกอบดีแมกเนไตซิงและครอสแมกเนไตซิง

องค์ประกอบดีแมกเนไตซิงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกระแสของโหลด องค์ประกอบดีแมกเนไตซิงมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กหลักจึงหักล้างกัน ทำให้ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กลดลง เป็นสาเหตุที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้มีค่าลดลง

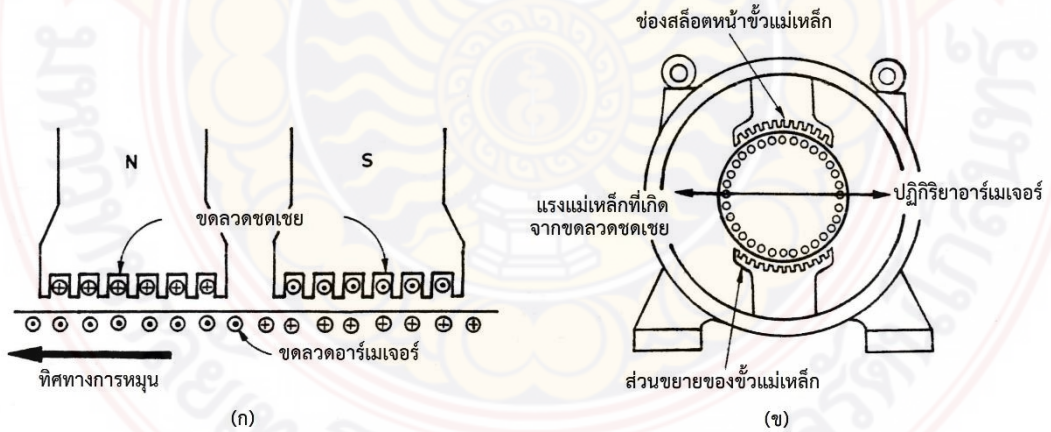
องค์ประกอบครอสแมกเนไทซิงทำให้แนวสะเทินของเส้นแรงแม่เหล็กหรือแกนนิวทรอลเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม จึงทำให้ต้องเลื่อนแปรงถ่านไปตามทิศทางการหมุนของอาร์เมเจอร์เพื่อลดประกายไฟที่เกิดขึ้นที่แปรงถ่าน

10.3.5 การชดเชยสนามแม่เหล็กที่บิดเบี้ยว

ถ้าแกนนิวทรอลของสนามแม่เหล็กเลื่อนไปตามทิศทางของการหมุน จะทำให้เกิดผลกระทบกับการคอมมิวเตชันอย่างมาก เพราะจะทำให้เกิดประกายไฟที่แปรงถ่าน แก้ไขได้ด้วยการเลื่อนตำแหน่งแปรงถ่านไปที่แกนนิวทรอลใหม่ นอกจากนี้แปรงถ่านจะต้องเลื่อนกลับออกมาอย่างต่อเนื่องเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง เพราะผลกระทบของอาร์เมเจอร์รีแอคชันจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสอาร์เมเจอร์ ในทางปฏิบัตินั้นแน่นอนว่าการขยับแปรงถ่านซ้ำ ๆ นั้นไม่ใช่เรื่องดีพอๆ กับการเกิดประกายไฟที่พยายามจะแก้ไข สิ่งนี้นำไปสู่วิธีการแก้ไขหลายอย่างที่สามารถลดผลกระทบบางส่วนหรือผลกระทบทั้งหมดของอาร์เมเจอร์รีแอคชันลงได้ มีดังต่อไปนี้

(1) การแก้ไขอาร์เมเจอร์รีแอคชันด้วยขดลวดชดเชย

ขดลวดชดเชยคือขดลวดตัวนำที่ถูกวางไว้ในช่องสล็อตที่หน้าของขั้วแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 10.9 และขดลวดชดเชยจะต่ออนุกรมกับวงจรอาร์เมเจอร์ ในลักษณะที่กระแสในขดลวดชดเชยไหลไปในทิศทางตรงข้ามกับกระแสของอาร์เมเจอร์ ด้วยวิธีนี้หากขดลวดชดเชยมีจำนวนกระแสเท่ากับกระแสของตัวอาร์มาเจอร์ เส้นแรงแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์จะถูกทำให้เป็นกลางอย่างสมบูรณ์ สนามแม่เหล็กหลักจะไม่เกิดการบิดเบี้ยวขณะจ่ายโหลด ซึ่งโครงสร้างเครื่องแบบนี้มักจะใช้สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบพิเศษเท่านั้น เนื่องจากมีราคาแพงมาก



รูปที่ 10.9 การติดตั้งขดลวดชดเชย

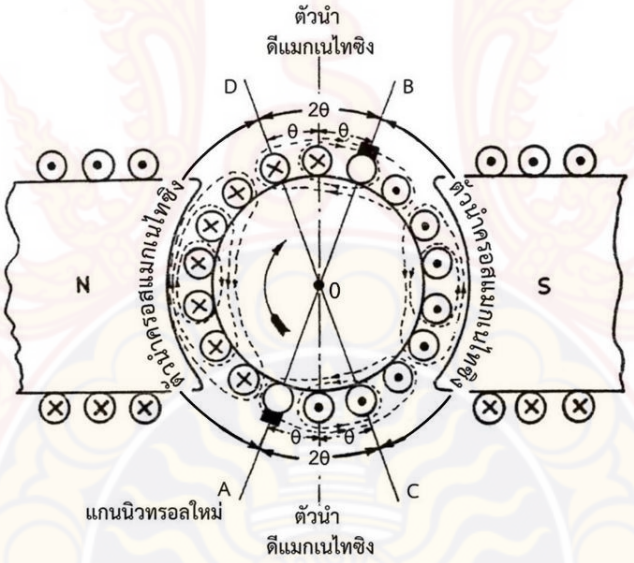
(2) การแก้ไขอาร์เมเจอร์รีแอคชันด้วยอินเตอร์โพล

อินเตอร์โพลเป็นขั้วแม่เหล็กเสริมขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่บนโครงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กหลัก อินเตอร์โพลนี้จะต้องพันขดลวดให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอินเตอร์โพลมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กแนวขวางที่เกิดจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์

10.3.6 อาร์เมเจอร์ แอมแปร์-เทิร์น (armature, ampere-turns)

รูปที่ 10.10 แสดงให้เห็นกลุ่มของตัวนำในอาร์เมเจอร์ที่สร้างสนามแม่เหล็กที่บิดเบี้ยวเป็นผลให้เกิดองค์ประกอบดีแมกเนไทซิง และจากรูปแกนของแปรงถ่านถูกเลื่อนไปข้างหน้าเป็นมุม θ เป็นตำแหน่งแกนนิวทรอลใหม่ซึ่งในรูปแทนด้วยเส้น AB ตัวนำที่อยู่ภายในพื้นที่มุม AOC = BOD = 2θ ที่อยู่ด้านล่างและด้านบนของอาร์เมเจอร์จะนำกระแสในทิศทางที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กจากขวาไปซ้ายซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กหลัก เราเรียกตัวนำอาร์เมเจอร์ในกลุ่มนี้ว่า ตัวนำดีแมกเนไทซิง

พิจารณาตัวนำอาร์เมเจอร์ที่เหลือในพื้นที่ AOD และ COB ตัวนำในกลุ่มนี้จะนำกระแสในทิศทางที่สร้างสนามแม่เหล็กรวมชี้ลงในแนวตั้งซึ่งตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กหลักผลที่ได้คือทำให้สนามแม่เหล็กหลักบิดเบี้ยว เราเรียกตัวนำในกลุ่มนี้ว่า ตัวนำครอสแมกเนไทซิง



รูปที่ 10.10 ตัวนำดีแมกเนไทซิงและตัวนำครอสแมกเนไทซิง

เมื่อ Z คือ จำนวนตัวนำของอาร์เมเจอร์

a คือ จำนวนของแผงขนาน

θ_m คือ มุมของแปรงถ่านที่นำหน้าไป

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

I คือ กระแสในตัวนำอาร์เมเจอร์แต่ละตัว

- พันแบบ Lap, $I = \frac{I_a}{p}$ และพันแบบ Wave, $I = \frac{I_a}{2}$

ดีแมกเนไทซิง แอมป์แปร์-เทิร์น ต่อขั้ว (AT_d)

จากรูปที่ 10.10 จำนวนตัวนำอาร์เมเจอร์ทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่ AOC และ BOD $= \frac{4\theta_m}{360} \times Z$

การพันหนึ่งรอบประกอบด้วย 2 ตัวนำ

$\therefore$ จำนวนรอบทั้งหมดในพื้นที่ $= \frac{2\theta_m}{360} \times Z$

$\therefore$ ดีแมกเนไทซิง แอมแปร์-เทิร์น ต่อคู่ขั้ว $= \frac{2\theta_m}{360} \times ZI$

$\therefore$ ดีแมกเนไทซิง แอมแปร์-เทิร์น ต่อขั้ว (AT_d) $= \frac{\theta_m}{360} \times ZI$

หรือ $AT_d = \frac{\theta_m}{360} \times ZI$

ครอสแมกเนไทซิง แอมป์แปร์-เทิร์น ต่อขั้ว (AT_C)

ตัวนำอาร์เมเจอร์ที่อยู่ในพื้นที่ AOC และ BOC เป็นตัวนำที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสนามแม่เหล็กหรือตัวนำในแนวขวาง ซึ่งหาได้จาก

จำนวนตัวนำอาร์เมเจอร์รวมต่อขั้วทั้งครอสแมกเนไทซิงและดีแมกเนไทซิง $= \frac{Z}{p}$

ตัวนำดีแมกเนไทซิงต่อขั้ว $= \frac{Z}{p} \times \frac{2\theta_m}{360}$

$\therefore$ ตัวนำดีแมกเนไทซิงต่อขั้ว $= \frac{Z}{p} - Z \times \frac{2\theta_m}{360} = Z\left(\frac{1}{p} - \frac{2\theta_m}{360}\right)$

$\therefore$ ตัวนำดีแมกเนไทซิงแอมแปร์ต่อขั้ว $= ZI\left(\frac{1}{p} - \frac{2\theta_m}{360}\right)$

$\therefore$ ครอสแมกเนไทซิง แอมป์แปร์-เทิร์น ต่อขั้ว $= ZI\left(\frac{1}{2p} - \frac{\theta_m}{360}\right)$

หรือ $AT_c = ZI\left(\frac{1}{2p} - \frac{\theta_m}{360}\right)$

การทำให้ผลของดีแมกเนไทซิงจากอาร์เมเจอร์รีแอคชันเป็นกลางจะต้องมีการเพิ่มรอบของขดลวดในแต่ละขั้วแม่เหล็กขึ้นเป็นพิเศษ ดังนี้

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขนาน จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นต่อขั้ว $= \frac{AT_d}{I_{sh}}$
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอนุกรม จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นต่อขั้ว $= \frac{AT_d}{I_a}$

ถ้ามุมของแปรงถ่านอยู่ในรูปขององศาทางไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนให้เป็นองศาทางกลได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

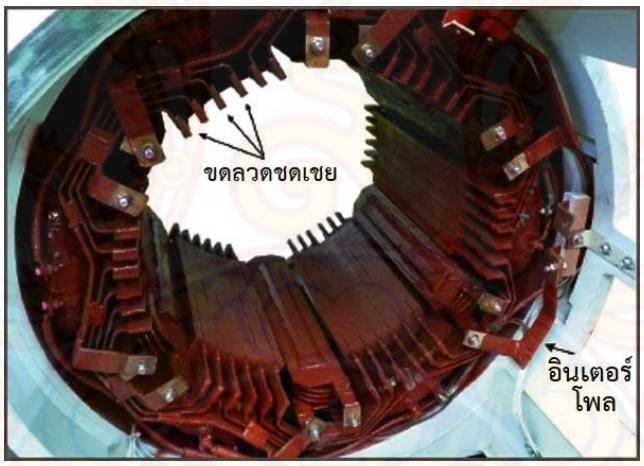
$$\theta(mechanical) = \frac{\theta(electrical)}{pair\ of\ \ poles}$$

หรือ

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{\frac{p}{2}} = \frac{2\theta_e}{p}$$

10.3.7 ขดลวดชดเชย (compensating winding)

หน้าที่ของขดลวดชดเชย ก็คือ ทำให้ผลกระทบของอาร์เมเจอร์รีแอคชันจากเส้นแรงแม่เหล็กแนวขวาง (cross-magnetizing) เป็นกลาง ขดลวดชดเชยจะใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาดใหญ่ที่มีโหลดแบบผันผวนไม่คงที่ ในกรณีที่ไม่มีขดลวดชดเชย เส้นแรงแม่เหล็กจะเลื่อนไปข้างหน้าและข้างหลังอย่างกะทันหันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดทุกครั้ง การเลื่อนของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของโหลดและปริมาณของการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมันอาจจะสูงจนทำให้เกิดการอาร์คข้ามระหว่างซี่คอมมิวเตเตอร์ที่อยู่ติดกันผ่านแผ่นไมกาที่กั้นซี่คอมมิวเตอร์ให้แยกออกจากกัน สิ่งนี้อาจทำให้เกิดวาบไฟตามผิวรอบ ๆ คอมมิวเตอร์ทั้งหมด ซึ่งจะทำให้อาร์มาเจอร์ทั้งหมดลัดวงจร



รูปที่ 10.11 การติดตั้งขดลวดชดเชยด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กหลัก
ที่มา https://electricalacademia.com/dc-machines/armature-reaction-dc-machine/

ขดลวดขดเชยในรูปที่ 10.11 ติดตั้งอยู่ในสล็อตด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กหลักและต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ในทิศทางที่กระแสไหลตรงข้ามกับขดลวดอาร์เมเจอร์ การติดตั้งขดลวดชดเชยทำให้เพิ่มต้นทุนในการสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นและมีค่าความสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ขดลวดชดเชยจะใช้งานในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าใช้งานกับโหลดที่มีความผันผวน เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าของโรงสี หรือใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกระแสเต็มพิกัดที่แรงดันต่ำ ๆ

10.3.8 จำนวนของขดลวดชดเชย

จำนวนของตัวนำอาร์เมเจอร์ต่อขั้ว $= \frac{Z}{p}$

จำนวนรอบของตัวนำอาร์เมเจอร์ต่อขั้ว $= \frac{Z}{2p}$

$\therefore$ จำนวนรอบของตัวนำอาร์เมเจอร์ภายใต้ขั้วแม่เหล็กหนึ่งขั้ว

$$= \frac{Z}{2p} \times \frac{pole\ arc}{pitch} = 0.7 \times \frac{ZI}{2p}$$

$\therefore$ จำนวนรอบของตัวนำอาร์เมเจอร์แอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว

$$= 0.7 \times \frac{ZI}{2p}$$

$= 0.7$ x อาร์เมเจอร์แอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว

ตัวอย่างที่ 10.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 40 kW 6 ขั้ว 500 V พันแบบ wave มีจำนวนตัวนำอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 480 เมื่อเลื่อนแปรงถ่านเลื่อนไป 9 องศาทางกล ทำให้ลดประกายไฟที่คอมมิวเตเตอร์ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัดลงได้ จงหา

ก) ดีแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว

ข) ครอสแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว

วิธีทำ

ก) หาดีแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว จาก

$$AT_d = \frac{\theta_m}{360} \times ZI$$

หากระแสอาร์เมเจอร์ จาก

$$I_a = \frac{P}{V} = \frac{40 \times 1,000}{500} = 80 \text{ A}$$

กระแสที่ไหลในแต่ละตัวนำ

$$I = \frac{I_a}{a} = \frac{80}{2} = 40 \text{ A}$$

ดังนั้น ค่าดีแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว เท่ากับ

$$AT_d = \frac{9}{360} \times 480 \times 40 = 480 \text{ AT}$$

ข) หาครอสแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว จาก

$$AT_c = ZI\left(\frac{1}{2p} - \frac{\theta_m}{360}\right)$$
$$= 480 \times 40\left(\frac{1}{2\times 6} - \frac{9}{360}\right)$$
$$= 480 \times 40 \times \frac{21}{360} = 1{,}120 \text{ AT}$$

ตัวอย่างที่ 10.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 220 kW 8 ขั้ว 400 V พันแบบ wave มีจำนวนตัวนำอาร์เมเจอร์เท่ากับ 720 มีกระแสไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน 8 A จงหา

ก) ค่าดีแมกเนไทซิงและครอสแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว

ข) จำนวนรอบของขดลวดขนานที่ต้องเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้ค่าดีแมกเนไทซิงเป็นกลาง ถ้าเลื่อนแปรงถ่านไปข้างหน้าเป็นมุม 20 องศาทางไฟฟ้า

วิธีทำ

ก) หาดีแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว จาก

กระแสที่จ่ายให้โหลด $I_L = \frac{P}{V} = \frac{220\times 1{,}000}{400} = 550 \text{ A}$

กระแสอาร์เมเจอร์ $I_a = I_{sh} + I_L = 8 + 550 = 558 \text{ A}$

กระแสในแต่ละตัวนำ $I = \frac{I_a}{a} = \frac{558}{2} = 279 \text{ A}$

องศาทางกล $\theta_m = \frac{\theta_e}{p/2} = \frac{20}{8/2} = 5^\circ$

ค่าดีแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว เท่ากับ

$$AT_d = \frac{\theta_m}{360} \times ZI = \frac{5}{360} \times 720 \times 279 = 2{,}790 \text{ AT}$$

หาครอสแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์นต่อขั้ว จาก

$$AT_c = ZI\left(\frac{1}{2p} - \frac{\theta_m}{360}\right)$$
$$= 720 \times 279\left(\frac{1}{2\times 8} - \frac{5}{360}\right)$$
$$= 720 \times 279 \times \frac{56}{16\times 72} = 9{,}765 \text{ AT}$$

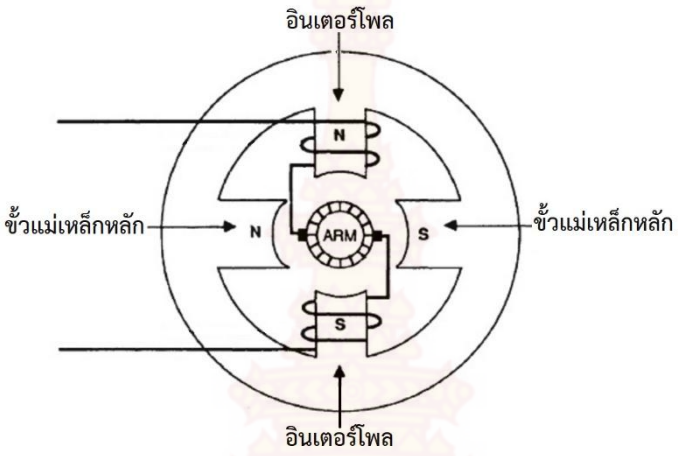
จำนวนรอบของขดลวดขนานที่เพิ่มขึ้นเพื่อทำให้ค่าดีแมกเนไทซิงเป็นกลาง

$$= \frac{AT_d}{I_{sh}} = \frac{2{,}790}{8} = 348.75 \approx 349 \text{ รอบ}$$

10.3.9 อินเตอร์โพล (interpoles)

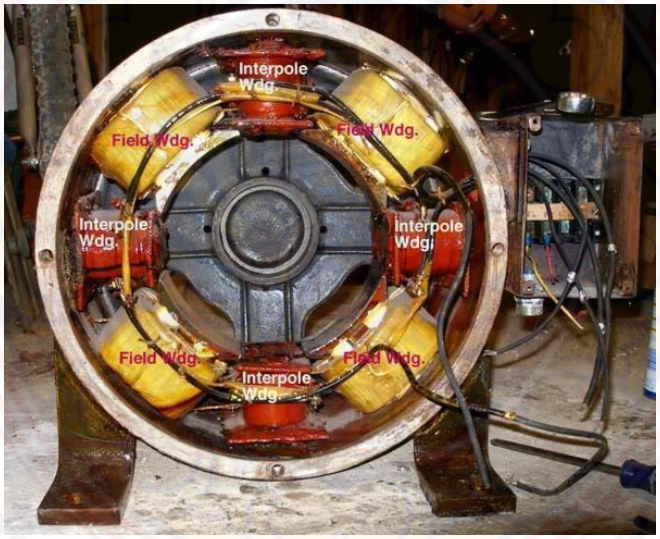
อีกวิธีการหนึ่งที่จะลดผลกระทบของอาร์เมเจอร์รีแอคชันลงได้ก็คือการวางขั้วแม่เหล็กขนาดเล็กที่เรียกว่า อินเตอร์โพล (interpoles) ตรงพื้นที่ว่างระหว่างขั้วแม่เหล็กหลัก อินเตอร์โพลเป็นขั้วแม่เหล็กขนาด

เล็ก พันด้วยลวดทองแดงขนาดใหญ่มีจำนวนรอบน้อยและความต้านทานต่ำจึงสามารถทนกระแสได้สูง อินเตอร์โพลจะต่อวงจรแบบอนุกรมอยู่กับขดลวดอาร์เมเจอร์



รูปที่ 10.12 ขดลวดอินเตอร์โพลต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์

อินเตอร์โพลแต่ละตัวจะมีขั้วแม่เหล็กเหมือนกับขั้วแม่เหล็กหลักที่วางอยู่ข้างหน้าในทิศทางของการหมุน สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยอินเตอร์โพลจะให้ผลเช่นเดียวกับการสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดชดเชย สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอินเตอร์โพลนี้จะต่อต้านกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ที่เกิดจากกระแสโหลด โดยทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากอินเตอร์โพลนี้จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กทั้งสองเป็นผลมาจากกระแสของอาร์เมเจอร์เช่นเดียวกัน



รูปที่ 10.13 การติดตั้งอินเตอร์โพลระหว่างขั้วแม่เหล็กหลัก

ขดลวดอินเตอร์โพลทุกตัวจะต่อกันแบบอนุกรมและเชื่อมต่อกับวงจรอาร์เมเจอร์ และมีตัวต้านทานต่อขนานกับขดลวดอินเตอร์โพล ซึ่งจะถูกปรับและตั้งค่าอย่างถาวรมาแล้วจากโรงงาน กระแสอาร์เมเจอร์ส่วนใหญ่จะไหลผ่านขดลวดอินเตอร์โพลมีเพียงส่วนเล็กน้อยเท่านั้นที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่ต่อขนาน เนื่องจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้น และเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้นทำให้สนามแม่เหล็กของอินเตอร์โพลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นก็คือแกนนิวทรอลหรือแกนสะเทินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะคงอยู่ในตำแหน่งคงที่ตลอดช่วงของการจ่ายโหลด แก้ไขด้วยวิธีการนี้ ความบิดเบี้ยวของสนามแม่เหล็กจะยังคงหลงเหลืออยู่บ้างบางส่วน เนื่องจากสนามแม่เหล็กจากอินเตอร์โพลนั้นมีปริมาณน้อย จึงสามารถแก้ไขความบิดเบี้ยวของสนามแม่เหล็กได้อย่างสมบูรณ์

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความสูญเสีย และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยอธิบายการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อแยก แบบขนาน แบบอนุกรม และแบบผสม รวมถึงความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละรูปแบบ ตลอดจนปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า นอกจากนี้ยังกล่าวถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเครื่อง ได้แก่ ความสูญเสียในขดลวดทองแดง ความสูญเสียในแกนเหล็ก และความสูญเสียจากการหมุน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 10

1. พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบ over compound นั้นเป็นอย่างไรจงอธิบาย
2. การปรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีพฤติกรรมเป็น over compound, flat compound หรือ under compound นั้น สามารถทำได้ด้วยวิธีการอย่างไรจงอธิบาย
3. จงอธิบายความหมายของอาร์เมเจอร์รีแอคชัน (armature reaction) ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมทั้งอธิบายผลกระทบที่มีต่อการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กภายในเครื่องจักร
4. อาร์เมเจอร์รีแอคชันส่งผลเสียต่อการคอมมิวเตชัน (commutation) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงอย่างไร และมีวิธีการแก้ไขหรือลดผลกระทบดังกล่าวด้วยวิธีใดบ้าง จงอธิบาย
5. จงอธิบายหน้าที่ หลักการทำงาน และประโยชน์ของอินเตอร์โพล (interpoles) ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมทั้งอธิบายว่าหากไม่มีการติดตั้งอินเตอร์โพลจะส่งผลต่อการคอมมิวเตชันอย่างไร

11 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Principles of Operation of DC Motor

มอเตอร์ไฟฟ้าคือ เครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยอาศัยหลักการของแรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่และวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีลักษณะการทำงานและโครงสร้างคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงก็สามารถทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้หากต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขดลวดสนามแม่เหล็กและอาร์เมเจอร์เพราะมีโครงสร้างเดียวกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF) จำนวนมากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่อง แต่ในทางกลับกันมอเตอร์ไฟฟ้าจะผลิตแรงเคลื่อนไฟต้านกลับ (back EMF) น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่อง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจะไหลกลับทิศทางกัน ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นให้พลังงานกลได้

11.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงที่มีทิศทางตามกฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง (Fleming's left hand rule) ดังแสดงในรูปที่ 11.1



รูปที่ 11.1 กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง

ขนาดของแรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำนี้สามารถหาได้จากสมการ

$$F = Bil \qquad (11\text{-}1)$$

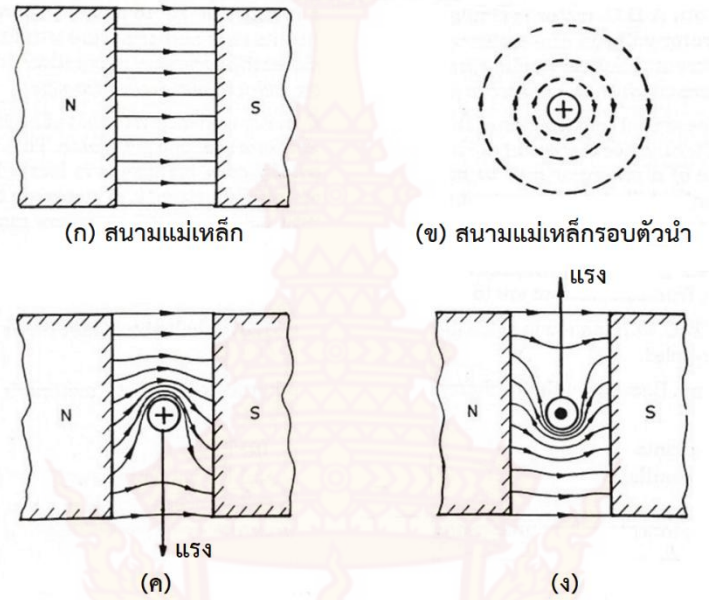
เมื่อ

F คือ แรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำ มีหน่วยเป็น นิวตัน (Newton)

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2)

i คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวนำ มีหน่วยเป็นแอมป์แปร์ (A)

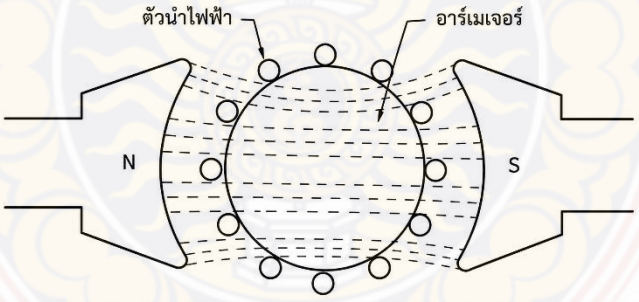
l คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร (m)



รูปที่ 11.2 หลักการทำงานของมอเตอร์

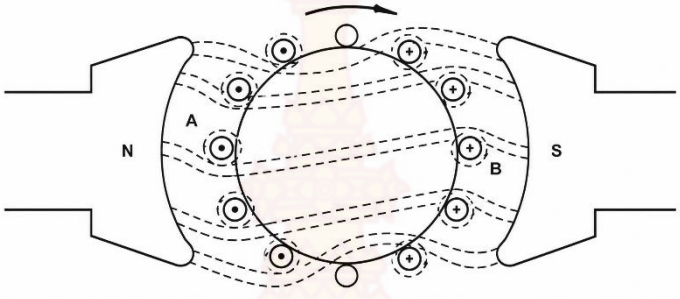
จากรูปที่ 11.2 (ค) เส้นแรงแม่เหล็กด้านบนของตัวนำไฟฟ้าจะมีความเข้มมากกว่าด้านล่างของตัวนำ แรงที่เกิดขึ้นในตัวนำจึงมีในทิศทางเคลื่อนที่ลงล่าง และจะเห็นได้ว่าแรงจะกระทำไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กที่อ่อนกว่า ถ้าเรากลับทิศทางของกระแสที่ไหลในตัวนำ แรงที่เกิดขึ้นในตัวนำก็จะกลับทิศทางเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 11.2 (ง) เมื่อกระแสในตัวนำกลับทิศทาง แรงที่เกิดขึ้นในตัวนำจึงมีในทิศทางเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน

หากพิจารณาสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะที่ยังไม่มีกระแสไหลในตัวนำอาร์เมเจอร์ เส้นแรงแม่เหล็กจะจัดเรียงตัวดังรูปที่ 11.3



รูปที่ 11.3 สนามแม่เหล็กหลักของมอเตอร์ในสภาวะที่ยังไม่มีกระแสไหลในตัวนำอาร์เมเจอร์

ถ้ามีกระแสไหลในอาร์เมเจอร์ตัวนำแต่ละตัวในอาร์เมเจอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ซึ่งเมื่อทับซ้อนกับสนามแม่เหล็กหลักที่มาจากขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ จะทำให้ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังรูปที่ 11.4

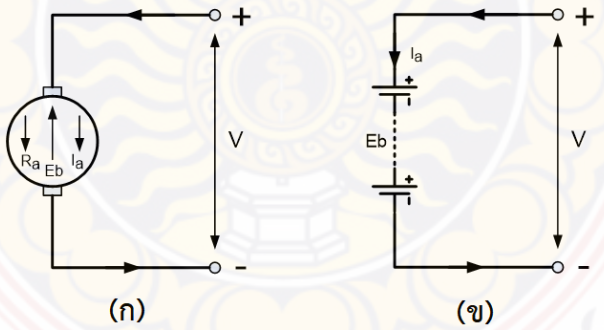


รูปที่ 11.4 สนามแม่เหล็กหลักของมอเตอร์ขณะมอเตอร์ทำงานมีกระแสไหลในตัวนำอาร์เมเจอร์

จากรูปที่ 11.4 ถ้ามีกระแสไหลในตัวนำอาร์เมเจอร์ สนามแม่เหล็กหลักจะถูกบิดให้ไม่เป็นเส้นตรงเหมือนเดิมอีกต่อไป เส้นแรงแม่เหล็กเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะย่อตัวให้สั้นลงจนอาจถือได้ว่าอยู่ในภาวะตึงเครียด ตัวนำแต่ละตัวในรูปจะได้รับแรงเช่นเดียวกับที่แรงกระทำบนก้อนหินด้วยหนังสติ๊ก เนื่องจากตัวนำเหล่านี้ฝังอยู่ในร่องสล็อตบนอาร์เมเจอร์จึงทำให้เกิดการหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

11.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back EMF)

ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานนั้นอาเมเจอร์ของเครื่องจะหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นตัวนำที่ฝังอยู่ในอาเมเจอร์ก็จะหมุนตัดกับสนามแม่เหล็กไปพร้อมกันด้วยในลักษณะเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นมาส่วนหนึ่งตามกฎการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎมือขวาของเฟรมมิ่งซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ดังนั้นเราจึงเรียกแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back EMF)



รูปที่ 11.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
(ก) อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ข) วงจรที่แทนแรงเคลื่อนไฟต้านกลับด้วยแบตเตอรี่

กระแสที่ไหลเข้าอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์หาได้จากสมการ

$$I_a = \frac{V - E_b}{R_a} \quad (11\text{-}2)$$

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการหมุนของตัวนำในสนามแม่เหล็กมีค่า

$$E = \frac{\phi \cdot z \cdot N}{60} \times \frac{P}{a}$$

ดังนั้น

$$E_b = \frac{\phi \cdot z \cdot N}{60} \times \frac{P}{a}$$

ค่าแรงเคลื่อนไฟต้านกลับ (back EMF; E_b) ขึ้นอยู่กับตัวประกอบต่าง ๆ เช่น เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) จำนวนตัวนำ (Z) ความเร็วรอบ (N), จำนวนขั้ว (P), และจำนวนของแผงตัวนำที่ต่อขนานในเครื่อง (a) แต่เนื่องจากว่า Z และ $\frac{P}{a}$ เป็นค่าคงที่ในการพันอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์แต่ละเครื่อง ดังนั้นจึงได้

$$E_b = K_e \phi N \quad (11\text{-}3)$$

เมื่อ

K_e คือ ค่าคงที่ทางไฟฟ้า เท่ากับ $\frac{Z}{60} \times \frac{P}{a}$

N คือ ความเร็วของตัวหมุนเป็นรอบต่อนาที (rpm)

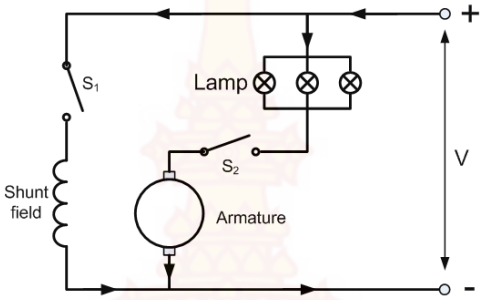
ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (Wb)

ถ้าเราพิจารณาสมการที่ 11-3 จะเห็นว่าปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (E_b) จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) และความเร็วรอบของตัวหมุน (N) ดังนั้นเมื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กคงที่ (ϕ คงที่) แรงเคลื่อนไฟต้านกลับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็ว เมื่อความเร็วมีค่ามากจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่ามากตามและทำให้กระแสที่ไหลเข้าอาร์เมเจอร์ (I_a) มีค่าลดลงด้วย จึงทำให้แรงบิด (Torque) ที่มอเตอร์จ่ายออกมามีค่าน้อยลงด้วย และในทางกลับกันเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่ำย่อมทำให้กระแสที่ไหลเข้าอาร์เมเจอร์ (I_a) มีค่ามากทำให้มอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดได้มาก จึงสรุปได้ว่า

E_b มาก $\longrightarrow$ I_a น้อย $\longrightarrow$ Torque น้อย

E_b น้อย $\longrightarrow$ I_a มาก $\longrightarrow$ Torque มาก

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าปริมาณของแรงเคลื่อนไฟต้านกลับจะคอยควบคุมการไหลของกระแส I_a ในอาร์เมเจอร์นั่นคือ แรงเคลื่อนไฟต้านกลับเป็นตัวทำให้มอเตอร์สามารถควบคุมกระแส I_a ในตัวมันเองได้โดยอัตโนมัติโดยมอเตอร์จะดึงเอากระแส I_a จากภายนอกมาใช้เท่าที่จำเป็นเท่านั้น

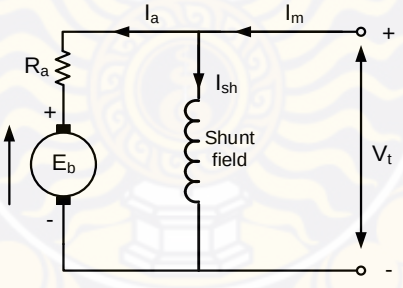


รูปที่ 11.6 วงจรการทดสอบหาแรงเคลื่อนไฟต้านกลับในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เราสามารถทำการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าในขณะที่มอเตอร์ทำงานจะมีแรงเคลื่อนไฟต้านกลับเกิดขึ้นโดยต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 11.6 วิธีการทดลองทำได้โดยการป้อนไฟเข้าที่ขั้วของมอเตอร์ จากนั้นต่อสวิตช์ S_1 จ่ายกระแสให้ขดลวดสนามขนาน (shunt field) เพื่อให้มีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นสูงสุด หลังจากนั้นต่อสวิตช์ S_2 เพื่อต่อวงจรอาร์เมเจอร์ในขณะเริ่มต่อสวิตช์หลอดไฟทั้งสามหลอดจะสว่างมาก แต่เมื่ออาร์เมเจอร์เริ่มหมุนความสว่างของหลอดไฟจะค่อยๆ ลดลงและจะลดลงเรื่อยเมื่อเริ่มหมุนเร็วขึ้น ซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เพิ่มขึ้นทำให้ I_a ไหลเข้าอาร์เมเจอร์ได้น้อยลงนั่นเอง

11.3 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์

จากลักษณะการต่อวงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีลักษณะเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แต่แตกต่างกันที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีปริมาณมากกว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ จึงทำให้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะที่แตกต่างกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 11.7 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

จากวงจรการต่อขดลวดภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานในรูปที่ 11.7 เราสามารถเขียนสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$I_m = I_a + I_{sh}$$
$$I_a = I_m - I_{sh}$$
$$V_t = E_b + I_a R_a \quad (11\text{-}4)$$

เมื่อ

I_m คือ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (A)

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

I_{sh} คือ กระแสขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน (A)

E_b คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (V)

V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ (V)

จากสมการที่ 11-4 เมื่อนำ I_a คูณตลอดจะได้

$$V_t I_a = E_b I_a + I_a^2 R_a \quad (11\text{-}5)$$

ดังนั้น

$V_t I_a$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์

$E_b I_a$ คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (P_m)

$I_a^2 R_a$ คือ กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงของอาร์เมเจอร์

สภาวะที่มีกำลังสูงสุดของมอเตอร์ หาได้จาก

$$V_t I_a = P_m + I_a^2 R_a$$
$$P_m = V_t I_a - I_a^2 R_a$$

กำลังสูงสุด (P_{max}) จะเกิดขึ้นเมื่อ $\frac{dP_m}{dI_a} = 0$

$$\frac{dP_m}{dI_a} = V_t - 2I_a R_a = 0$$
$$I_a R_a = \frac{V_t}{2}$$

เพราะฉะนั้นสภาวะที่เกิดกำลังสูงสุดของมอเตอร์จะเกิดขึ้นเมื่อ $I_a R_a = \frac{V_t}{2}$

ตัวอย่างที่ 11.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องหนึ่ง มีแรงดันที่ขั้วเท่ากับ 230 V ขดลวดอาร์เมเจอร์มีความต้านทาน 0.6 Ω ขณะทำงานเต็มพิกัดมีกระแสไหลเข้าอาร์เมเจอร์ 30 A และขณะไม่มีภาระมีกระแสไหลเข้าอาร์เมเจอร์ 4 A จงหาค่าแรงเคลื่อนไฟต้านกลับที่เปลี่ยนแปลงไป

วิธีทำ

$$E_b = V_t - I_a R_a$$

ในสภาวะไม่มีโหลด

$$I_{a1} = 4\ A$$
$$E_{b1} = V_t - I_{a1}R_a$$
$$E_{b1} = 230 - (4 \times 0.6)$$
$$= 227.6 \quad V$$

ในสภาวะจ่ายโหลดเต็มพิกัด

$$I_{a2} = 30\ A$$
$$E_{b2} = V_t - I_{a2}R_a$$
$$E_{b2} = 230 - (30 \times 0.6)$$
$$= 212 \quad V$$

เพราะฉะนั้นแรงเคลื่อนไฟต้านกลับที่เปลี่ยนไป คือ

$$\Delta E_b = E_{b1} - E_{b2}$$
$$\Delta E_b = 227.6 - 212$$
$$= 15.6 \quad V$$

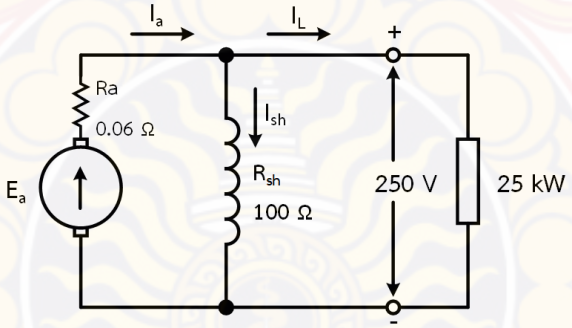
ตัวอย่างที่ 11.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 25 kW 250 V มีค่าความต้านทานที่อาร์เมเจอร์ 0.06 Ω ความต้านทานที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก 100 Ω จงหากำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ เมื่อ

ก) ขณะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลด 25 kW (P_a)

ข) ขณะที่เป็นมอเตอร์กินไฟ 25 kW (P_m)

<u>วิธีทำ</u>

ก) ขณะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลด 25 kW



$$I_a = I_L + I_{sh}$$
$$I_L = \frac{P_{out}}{V_t} = \frac{25 \times 10^3}{250} = 100\ \text{A}$$
$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} = \frac{250}{100} = 2.5\ \text{A}$$
$$I_a = 100 + 2.5 = 102.5\ \text{A}$$

จาก

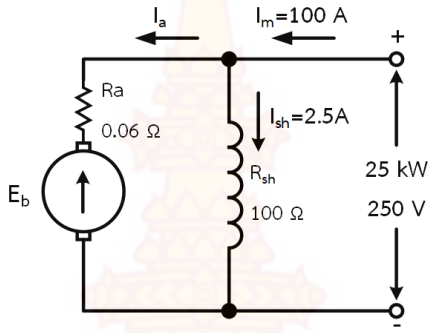
$$E_a = V_t + I_a R_a$$

$$E_a = 250 + (102.5 \times 0.06) = 256.15 \text{ V}$$

กำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (P_a) ในขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ

$$P_a = E_a I_a = 256.15 \times 102.5 = 26.25 \text{ kW}$$

ข) ขณะที่เป็นมอเตอร์กินไฟ 25 kW



$$I_a = I_m - I_{sh}$$

$$I_a = 100 - 2.5 = 97.5 \text{ A}$$

$$E_b = V_t - I_a R_a$$

$$E_b = 250 - (97.5 \times 0.06) = 244.15 \text{ V}$$

กำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (P_m) ในขณะทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า คือ

$$P_m = E_b I_a = 244.15 \times 97.5 = 23.8 \text{ kW}$$

11.4 แรงบิดของมอเตอร์ (Torque; T)

แรงบิด หรือ ทอร์ค คือ แรงบิดตัวของแกนหมุนใด ๆ หรือการบิดของโมเมนต์ของแรงหนึ่งๆ ที่กระทำรอบแกนหมุน วัดได้จากผลคูณของแรงกับรัศมี ณ จุดที่แรงไปกระทำ มีหน่วยวัดได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้มี 3 แบบ คือ นิวตันเมตร (N.m) ฟุต-ปอนด์ (ft.lb) และกิโลกรัมเมตร (kg.m)

$$T = F \cdot r \qquad (11\text{-}6)$$

แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเกิดจากแรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำที่อยู่บนอาร์เมเจอร์ ขนาดของแรงบิดที่เกิดขึ้นในตัวนำแต่ละตัว จะเท่ากับ

$$T = Bil \cdot r \qquad (11\text{-}7)$$

ถ้ามอเตอร์มีจำนวนตัวนำในอาร์เมเจอร์ เท่ากับ z ตัว ดังนั้นแรงบิดรวมที่เกิดขึ้นที่อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ จะเท่ากับ

$$T_a = Bilz \cdot r \qquad (11\text{-}8)$$

เมื่อ

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2)

i คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวนำ มีหน่วยเป็น แอมป์แปร์ (A)

l คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

r คือ รัศมีของแกน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

z คือ จำนวนตัวนำในอาร์เมเจอร์

แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้านั้นมีอยู่ 2 ส่วน คือ แรงบิดที่อาร์เมเจอร์และแรงบิดที่แกนของมอเตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (armature torque; T_a)

เป็นแรงบิดรวมทั้งหมดของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นบนอาร์เมเจอร์เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็ว N รอบต่อนาที (rpm) โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นนี้มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (Nm) กำลังที่เกิดขึ้นที่อาร์เมเจอร์ คือ

กำลังทางกลที่เกิดขึ้น = งานที่ทำต่อวินาที

งานที่ทำโดยการหมุน 1 รอบ = แรง x ระยะทาง

$= F \times 2\pi r$ (Joule)

กำลังทางกลที่เกิดขึ้น $= F \times 2\pi r \times N$ (Joule/second or W)

$= (F \times r) \times 2\pi N$ (W)

ดังนั้น กำลังทางกลที่เกิดขึ้นที่อาร์เมเจอร์ คือ

$$P_m = T_a \times 2\pi N \quad \text{(W)} \qquad (11\text{-}9)$$

กำลังทางไฟฟ้าที่เทียบเท่ากับกำลังทางกลที่อาร์เมเจอร์สร้างขึ้น คือ

$$P_m = E_b I_a \quad \text{(W)} \qquad (11\text{-}10)$$

ดังนั้น เมื่อ (11-9) เท่ากับ (11-10)

$$T_a \times \frac{2\pi N}{60} = E_b I_a$$

$$T_a = \frac{E_b I_a}{2\pi\left(\frac{N}{60}\right)}$$

เมื่อ

$$E_b = \frac{\phi z N}{60} \times \frac{P}{a}$$

$$T_a \times \frac{2\pi N}{60} = \frac{\phi z N}{60} \times \frac{P}{a} \times I_a$$

$$T_a = \frac{\phi z}{2\pi} \times \frac{P}{a} \times I_a$$

$$T_a = 0.159 \cdot \phi z \frac{P}{a} \cdot I_a \qquad (11\text{-}11)$$

จากสมการแรงบิดด้านบน พบว่า

$$T \propto \phi I_a$$

ในกรณีของมอเตอร์แบบขนาน ϕ มีค่าคงที่คงที่ ดังนั้น

$$T \propto I_a$$

ในกรณีของมอเตอร์แบบอนุกรม ϕ เปลี่ยนแปลงตาม I_a ในช่วงก่อนอิ่มตัว ดังนั้น

$$T \propto I_a^2$$

เมื่อ

P_m คือ กำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ มีหน่วยเป็น วัตต์ (W)

N คือ ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที (rpm)

หรือ สรุปได้ว่า

$$T_a = 0.159 \cdot \phi z \cdot \frac{P}{a} \cdot I_a \quad \text{(Nm)} \qquad (11\text{-}12)$$

$$T_a = 0.0162 \cdot \phi z \cdot \frac{P}{a} \cdot I_a \quad \text{(kg-m)} \qquad (11\text{-}13)$$

หรือ

$$T_a = 0.159 \cdot \frac{E_b \times I_a}{\left(\frac{N}{60}\right)} \quad \text{(Nm)} \qquad (11\text{-}14)$$

$$T_a = 0.0162 \cdot \frac{E_b \times I_a}{\left(\frac{N}{60}\right)} \quad \text{(kg-m)} \qquad (11\text{-}15)$$

2) แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ (Shaft torque; T_{sh})

แรงบิดที่เกิดขึ้นที่อาร์เมเจอร์เป็นแรงบิดรวมทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งแรงบิดนี้ไม่ได้ถูกส่งไปที่โหลดทั้งหมด เพราะต้องหักค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและแรงเสียดทานออกเสียก่อน แรงบิดที่เราจะนำไปใช้งานจริงเรียกว่า แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ (Shaft torque) โดยเป็นแรงบิดส่วนที่เพลาของมอเตอร์ที่คิดการสูญเสียแล้ว โดยกำลังที่ได้จากการหมุนของมอเตอร์นั้นสามารถวัดได้จากการเบรกมอเตอร์มีหน่วยเป็นแรงม้า (Horse power; HP) นั่นเอง

$$T_{sh} = \frac{HP \times 746}{\frac{2\pi N}{60}} \qquad (11\text{-}16)$$

เมื่อ

T_{sh} คือ แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ มีหน่วยเป็น วัตต์ (W)

N คือ ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm)

1 HP เท่ากับ 746 วัตต์ (SI Unit)

จากการสูญเสีย Stray Losses นั้น เราสามารถนำมาหาผลต่างระหว่างแรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (T_a) กับแรงบิดที่แกน (T_{sh}) ได้ ผลต่างระหว่างแรงบิดทั้งสองนั้นเราเรียกว่า แรงบิดสูญเสีย (Lost torque) ซึ่งเกิดจาก Stray losses นั่นเอง ดังนั้น

$$T_L = T_a - T_{sh} \qquad (11\text{-}17)$$

หรือ

$$T_L = 0.159 \times \frac{\text{iron and friction losses}}{\left(\frac{N}{60}\right)} \quad \text{(Nm)} \qquad (11\text{-}18)$$

$$T_L = 0.0162 \times \frac{\text{iron and friction losses}}{\left(\frac{N}{60}\right)} \quad \text{(kg.m)} \qquad (11\text{-}19)$$

ตัวอย่างที่ 11.3 จงหาแรงบิดที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (T_a) เป็น นิวตัน-เมตร จากมอเตอร์กระแสตรง 4 ขั้ว มีตัวนำทั้งหมด 774 ตัวนำ มีการพันแบบ Wave และเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วเป็น 24×10^{-3} Wb เมื่อมอเตอร์มีกระแสอาร์เมเจอร์เท่ากับ 50 A

วิธีทำ

$$T_a = 0.159 \times \phi \times z \times \frac{P}{a} \times I_a$$

เพราะฉะนั้น

$$T_a = 0.159 \times 24 \times 10^{-3} \times 774 \times \frac{4}{2} \times 50$$

$$T_a = 295.3 \quad Nm$$

ตัวอย่างที่ 11.4 มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน 4 ขั้ว 250 V พันแบบ Wave มีจำนวนตัวนำ เท่ากับ 250 ตัวนำ ให้กำลังงาน 10 kW ขณะหมุนที่ความเร็ว 1,000 rpm มอเตอร์มีกระแสอาร์เมเจอร์และกระแสที่ขดลวดสนามแม่เหล็กเท่ากับ 60 A และ 1 A ตามลำดับ มีค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.2 Ω ถ้ามีแรงดันตกคร่อมที่แปรงถ่านข้างละ 1 V จงหา

ก) แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์

ข) แรงบิดที่แกนของมอเตอร์

วิธีทำ

ก) แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์

$$E_b = V_t - I_a R_a - V_b$$
$$= 250 - (60 \times 0.2) - 2 = 236\ V$$

$$T_a = \frac{E_b I_a \times 60}{2\pi N}$$

$$\therefore T_a = \frac{236 \times 60 \times 60}{2\pi \times 1,000} = 135.2\ Nm$$

ข) แรงบิดที่แกนของมอเตอร์

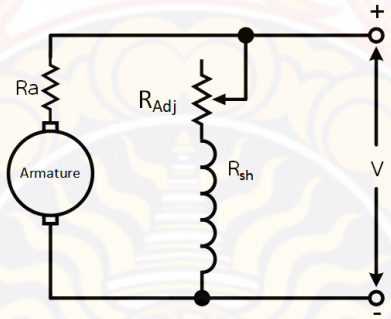
$$T_{sh} = \frac{HP \times 746 \times 60}{2\pi N} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi N}$$
$$= \frac{10,000 \times 60}{2\pi \times 1,000} = 95.48\ Nm$$

11.5 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมี 3 ชนิดหลัก ๆ แบ่งตามลักษณะการต่อวงจรของขดลวดสนามแม่เหล็กกับอาร์เมเจอร์ ดังนี้

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนามแม่เหล็กต่อขนานกับอาร์เมเจอร์ รูปที่ 11.8 แสดงการต่อวงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน จากลักษณะการต่อวงจรจะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กจะคงที่ ถ้ามอเตอร์ต่อตรงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันคงที่ ดังนั้นจึงประมาณการได้ว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าคงที่ไปด้วย ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์มีค่าคงที่ภายใต้เงื่อนไขการทำงานปกติซึ่งจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์คงที่ ในทางปฏิบัติเราจึงใช้งานมอเตอร์ชนิดนี้ในงานที่ต้องการความเร็วคงที่และสามารถปรับความเร็วรอบได้เมื่อจำเป็นโดยการเพิ่มตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กดังรูป



รูปที่ 11.8 การต่อวงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ จากรูปที่ 11.9 แสดงการต่อวงจรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม กระแสที่ไหลผ่านขดลวสนามแม่เหล็กก็คือกระแสเดียวกันกับที่ไหลผ่านอาร์เมเจอร์ ดังนั้นเมื่อกระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นจากโหลดทางกลที่แกนของมอเตอร์เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้กระแสสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย ผลของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง ดังพิจารณาได้จากสมการ

$$E_b = \frac{\phi \times z \times N}{60} \times \frac{P}{a}$$

$$E_b = K_e \cdot \phi \cdot N$$

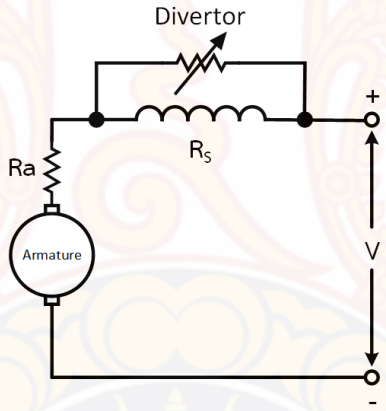
เมื่อ

K_e คือ ค่าคงที่ทางไฟฟ้า เท่ากับ $K_e = \frac{z}{60} \times \frac{P}{a}$

ดังนั้น

$$N = \frac{E_b}{K_e \phi}$$

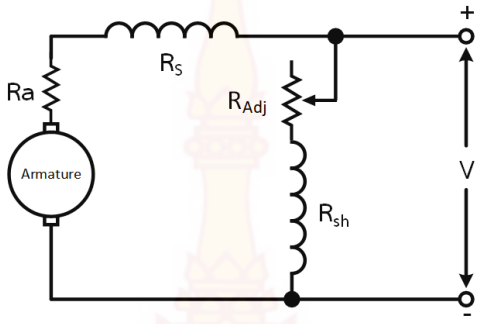
กรณีนี้ถือเป็นคุณสมบัติที่มีประโยชน์ซึ่งเป็นที่ต้องการในการขับเคลื่อนมอเตอร์ว่าหากโหลดเพิ่มขึ้นอย่างมากควรมีการชดเชยความเร็วให้ลดลงโดยอัตโนมัติ เช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน เราสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมได้โดยไม่ขึ้นกับโหลด ด้วยการใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ต่อขนานเข้ากับขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งเรียกตัวต้านทานนี้ว่า ไดเวอเตอร์ (Divertor) ตามรูปที่ 11.9



รูปที่ 11.9 การต่อวงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ขด ขดหนึ่งต่อขนานกับอาร์เมเจอร์ และอีกขดหนึ่งต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ จากรูปที่ 11.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมจะมีทั้งขดลวดสนามแม่เหล็กขนานและอนุกรมจึงทำให้ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผลิตขึ้นที่ขั้วแม่เหล็กมาจากทั้งขดลวดขนานและขดลวดอนุกรม หากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดทั้งสองมีทิศทางที่เสริมกันจะเรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟ (cumulative compound motor) แต่ถ้าทิศทางของสนามแม่เหล็กหักล้างกันจะเรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล (differential compound motor)



รูปที่ 11.10 การต่อวงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม

11.6 ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (speed; N)

ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ของมอเตอร์ที่วัดที่เพลา มีหน่วยวัดเป็น รอบต่อนาที (revolutions per minute; rpm) โดยสมการความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหาได้จาก

$$V_t = E_b + I_a R_a$$
$$E_b = V_t - I_a R_a$$
$$K_e \cdot \phi \cdot N = V_t - I_a R_a$$
$$N = \frac{V_t - I_a R_a}{\phi} \times \frac{1}{K_e} \quad \text{(rpm)} \qquad (11\text{-}20)$$

เมื่อ

K_e เท่ากับ $\frac{z}{60} \times \frac{P}{a}$ คือ ค่าคงที่ทางไฟฟ้า

$$V_t - I_a R_a = E_b$$
$$N = \frac{E_b}{K_e \cdot \phi}$$
$$N \; \alpha \; \frac{E_b}{\phi} \qquad (11\text{-}21)$$

สำหรับมอเตอร์แบบอนุกรม (series motor)

N_1 คือ ความเร็วในกรณีแรกของมอเตอร์

I_{a1} คือ กระแสอาร์เมเจอร์ในกรณีแรก

ϕ_1 คือ เส้นแรกแม่เหล็กในกรณีแรก

N_2, I_2, ϕ_2 คือ ปริมาณที่สอดคล้องกันในกรณีที่สอง

จากความสัมพันธ์ในสมการด้านบน ดังนั้น

$$N_1 \; \alpha \; \frac{E_{b1}}{\phi_1}$$

$$N_2 \alpha \frac{E_{b2}}{\phi_2}$$

เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กไม่คงที่เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง ดังนั้น

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2} \quad (11\text{-}22)$$

ในสภาวะก่อนที่ขั้วแม่เหล็กจะอิ่มตัวเส้นแรงแม่เหล็กจะแปรผันตามกระแสอาร์เมเจอร์ $(\phi \alpha I_a)$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \quad (11\text{-}23)$$

สำหรับมอเตอร์แบบขนาน (Shunt motor) ในกรณีนี้สมการเหมือนกัน คือ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

ถ้า $\phi_1 = \phi_2$ แล้วจะได้

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \quad (11\text{-}24)$$

11.7 ความเร็วเรกูเลชัน (speed regulation)

หมายถึง ค่าความแตกต่างกันของความเร็วของมอเตอร์ขณะไม่มีโหลดกับความเร็วของมอเตอร์ขณะรับโหลดเต็มพิกัด ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด อัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะอยู่ในรูปของร้อยละความเร็วรอบในสภาวะโหลดเต็มพิกัด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\%\,\text{Speed regulation} = \frac{\text{No load speed - Full load speed}}{\text{Full load speed}} \times 100 \quad (11\text{-}25)$$

ตัวอย่างที่ 11.5 มอเตอร์แบบขนานตัวหนึ่งในขณะไม่มีโหลดกินไฟ 200 V 2 A ที่อาร์เมเจอร์ และมีความต้านทานที่อาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.4 Ω ในขณะหมุนโหลดมอเตอร์กินไฟที่อาร์เมเจอร์ 50 A มีความเร็ว 20 รอบ/วินาที จงหาความเร็วของมอเตอร์เป็นรอบต่อนาที

วิธีทำ

$$E_{b1} = V - I_a R_a$$
$$= 200 - (2 \times 0.4) \quad = 199.2 \quad \text{V}$$
$$E_{b2} = V - I_a R_a$$
$$= 200 - (50 \times 0.4) \quad = 180 \quad \text{V}$$
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}}$$
$$\frac{20}{N_1} = \frac{180}{199.2}$$
$$N_1 = \frac{20 \times 199.2}{180} = 22.13 \text{ rps}$$
$$N_1 = 22.13 \times 60 = 1,328 \text{ rpm}$$

ตัวอย่างที่ 11.6 มอเตอร์แบบขนานมีแรงดันที่ขั้ว 230 V ความเร็ว 1,000 rpm กินกระแส 5 A ความต้านทานอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.025 Ω ความต้านทานของขดลวดสนามขนานเท่ากับ 230 Ω จงหาความเร็วที่ลดลงไปในขณะที่มอเตอร์จ่ายโหลด ในขณะจ่ายโหลดกินกระแสเท่ากับ 41 A

วิธีทำ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}}$$

$$E_{b1} = V - I_a R_a$$

$$I_{a1} = I_m - I_{sh}$$

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} = \frac{230}{230} = 1\text{ A}$$

$$I_{a1} = 5 - 1 = 4\text{ A}$$

$$E_{b1} = 230 - (4 \times 0.025) = 229.9\text{ V}$$

$$E_{b2} = V - I_a R_a$$

$$I_{a2} = 41 - 1 = 40\text{ A}$$

$$E_{b2} = 230 - (40 \times 0.025) = 229\text{ V}$$

$$\frac{229}{229.9} = \frac{N_2}{1,000}$$

$$N_2 = \frac{229 \times 1,000}{229.9} = 996.08\text{ rpm}$$

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และใช้คอมมิวเตเตอร์ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นภายในอาร์เมเจอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้ยังกล่าวถึงโครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่อง การพันขดลวดอาร์เมเจอร์ และสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 11

1. มอเตอร์กระแสตรงแบบขนานตัวหนึ่ง ใช้แรงดันไฟฟ้า 220 V มีกระแสอาร์เมเจอร์ 40 A และความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.25 Ω จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (ตอบ 210 V)
2. มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน ใช้แรงดัน 240 V มีกระแสอาร์เมเจอร์ 50 A และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ 228 V จงหากำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (ตอบ 11.4 kW)

3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน มีขั้วแม่เหล็ก 6 ขั้ว พันอาเมเจอร์แบบ Lap ใช้แรงดัน 230 V มีจำนวนตัวนำในอาร์เมเจอร์ 410 ตัวนำ เมื่อรับโหลดเต็มพิกัดมอเตอร์กินกระแส 41 A มีเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว 0.05 Wb ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 0.1 Ω ความต้านทานของขดลวดขนาน เท่ากับ 230 Ω มีแรงดันตกคร่อมแปรงถ่านข้างละ 1 V จงหาค่าต่อไปนี้

   ก) กระแสที่อาร์เมเจอร์ (ตอบ 40 A)

   ข) แรงดันไฟฟ้าต้านกับ (Back EMF) ขณะมอเตอร์รับโหลดเต็มพิกัด (ตอบ 224 V)

   ค) ความเร็วของมอเตอร์ขณะรับโหลดเต็มพิกัด (ตอบ 655.6 rpm)

4. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน มีขั้วแม่เหล็ก 4 ขั้ว ใช้แรงดัน 500 V ขณะไม่มีโหลดมอเตอร์กินกระแส 7 A ความเร็วรอบ 750 rpm มีกระแสที่ขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน 2 A จงหาความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะรับโหลดเต็มพิกัด กินกระแส 122 A ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 0.2 Ω มีแรงดันตกคร่อมแปรงถ่านข้างละ 1 V และปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง 4 % (ตอบ 745 rpm)

5. มอเตอร์กระแสตรงแบบขนานเครื่องหนึ่ง หมุนด้วยความเร็ว 1,200 rpm ขณะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ 240 V ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กคงที่และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับลดลงเหลือ 180 V จงหาความเร็วรอบใหม่ของมอเตอร์ (ตอบ 900 rpm)

12 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการใช้งาน

DC Motor Control and Applications

ถึงแม้ในปัจจุบันการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมจะลดน้อยลงอย่างมากเพราะถูกทดแทนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีราคาถูกและทนทานมากกว่า แต่การศึกษาหลักการทำงานและการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ก็ยังคงเป็นเรื่องที่มีความจำเป็นอยู่อย่างมาก เนื่องจากในปัจจุบันยังคงมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กในเครื่องมือเครื่องจักรและระบบยานยนต์อยู่ ความรู้ความเข้าใจเรื่องการทำงานและการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงยังคงมีความสำคัญและเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิชาที่ว่าด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่นอีกต่อไปในอนาคต

12.1 การสตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (starting methods of a dc motor)

ในสภาวะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกำลังทำงานอยู่ สมการแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเขียน ได้ดังนี้

$$V_t = E_b + I_a R_a$$

และสมการของกระแสอาร์เมเจอร์ในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน คือ

$$I_a = \frac{V_t - E_b}{R_a}$$

แต่ในขณะที่มอเตอร์ยังไม่ทำงานหรือยังไม่หมุน ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (E_b) ของมอเตอร์จะยังไม่เกิดขึ้น ($E_b = 0$) ดังนั้น สมการของกระแสอาร์เมเจอร์ในขณะที่มอเตอร์ยังไม่หมุนจึงกำหนดได้เป็น

$$I_a = \frac{V_t}{R_a}$$

ในทางปฏิบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ต่ำมาก ๆ ดังนั้นจึงมีกระแสจำนวนมากไหลผ่านอาร์เมเจอร์ในขณะที่มอเตอร์เริ่มต้นสตาร์ต กระแสนี้มีขนาดมากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายกับอาร์เมเจอร์ได้ ปริมาณกระแสสตาร์ตที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดเหตุการณ์ดังต่อไปนี้ขึ้นได้

1. ฟิวส์อาจขาด ขดลวดอาร์เมเจอร์ แปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์อาจเกิดความเสียหายได้
2. เกิดแรงบิดเริ่มต้นที่สูงมาก และแรงบิดเริ่มต้นที่สูงมากนี้อาจทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์จำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้อาร์เมเจอร์เกิดความเสียหาย
3. โหลดที่เชื่อมต่ออยู่กับแหล่งจ่ายเดียวกันอาจประสบปัญหาแรงดันตกได้ในขณะสตาร์ตมอเตอร์

ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดใหญ่เริ่มหมุนความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นช้า เนื่องจากโรเตอร์มีน้ำหนักมากจึงมีความเฉื่อยสูง ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์จึงเกิดขึ้นได้ช้า ทำให้กระแสสตาร์ตจำนวนมากเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ซึ่งสิ่งนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงขึ้น หากต้องการหลีกเลี่ยงสถานการณ์นี้ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยสตาร์ตมอเตอร์ที่เหมาะสม แต่ในการสตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กจะใช้วิธีต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านคอนแทกเตอร์หรือสวิตช์โดยตรง ซึ่งในกรณีนี้จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์ขนาดเล็กสามารถเพิ่มความเร็วรอบขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เพราะโรเตอร์มีน้ำหนักน้อยจึงมีความเฉื่อยน้อย กระแสสตาร์ตจึงลดลงได้อย่างรวดเร็วจากการเพิ่มขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน

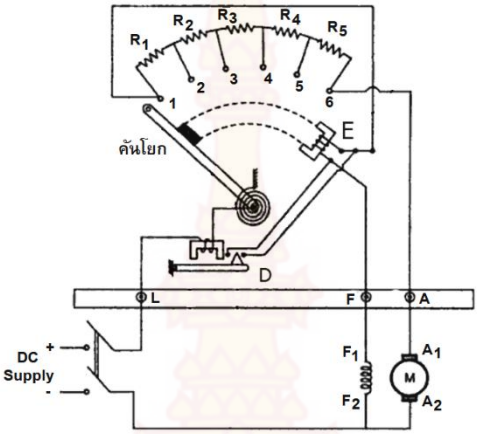
12.2 อุปกรณ์สตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor starters)

เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการสตาร์ต การสตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณของกระแสสตาร์ต โดยใช้อุปกรณ์ช่วยสตาร์ตที่เรียกว่า สตาร์ตเตอร์ ซึ่งสตาร์ตเตอร์มีหลายประเภท เช่น สตาร์ตเตอร์แบบ 3 จุด สตาร์ตเตอร์แบบ 4 จุด สตาร์ตเตอร์แบบใช้กับมอเตอร์อนุกรม เป็นต้น

แนวคิดพื้นฐานของตัวสตาร์ตเตอร์ ก็คือ การต่อความต้านทานภายนอกอนุกรมเข้ากับอาร์เมเจอร์ในขณะที่เริ่มสตาร์ตมอเตอร์ ตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 3 จุด และตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 4 จุด จะใช้สำหรับการสตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานและแบบผสม

12.2.1 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 3 จุด (3 point starter)

การทำงานของสตาร์เตอร์แบบ 3 จุด สามารถอธิบายได้จากวงจรภายในของสตาร์ตเตอร์รูปที่ 12.1 คือ เมื่อสับสวิตช์ต่อวงจรเพื่อสตาร์ตมอเตอร์ คอยล์แม่เหล็ก E จะดูดคันโยกของสตาร์ตเตอร์ให้ค่อย ๆ เคลื่อนตัวโยกไปทางขวา เมื่อคันโยกสัมผัสตำแหน่งที่ 1 ขดลวดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์จะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟและขดลวดอาร์เมเจอร์จะเชื่อมต่อแบบอนุกรมกับความต้านทาน R_1 ถึง R_5 โดยคันโยกจะค่อย ๆ โยกไปทางขวาต่อเนื่องกันไปในระหว่างการสตาร์ต และเมื่อคันโยกเคลื่อนที่ไปข้างหน้าความต้านทานจะถูกปลดออกจากวงจรอาร์เมเจอร์ไปเรื่อย ๆ ทีละตัว ทำให้ค่าความต้านทานลดลงตามลำดับ และเมื่อคันโยกสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 6 ความต้านทานจะถูกตัดออกจากวงจรอาร์เมเจอร์ทุกตัว อาร์เมเจอร์จะต่อตรงกับแหล่งจ่ายไฟ คอยล์แม่เหล็ก E จะดูดคันโยกให้ค้างอยู่ในตำแหน่งนี้ โดยคอยล์แม่เหล็ก E จะปล่อยคันโยกออกคืนสู่ตำแหน่งเดิม เมื่อไม่มีไฟฟ้าหรือมีแรงดันไฟฟ้าต่ำ ๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อคันโยกเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งสุดท้าย ความต้านทาน R1-R5 ของตัวสตาร์ตเตอร์จะเปลี่ยนตำแหน่งจากการต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์มาต่อเพิ่มเข้ากับขดลวดสนามแม่เหล็กตามลำดับ แต่เนื่องจากค่าความต้านทานของสตาร์ตเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการลดลงของกระแสสนามแม่เหล็กจึงน้อยมาก

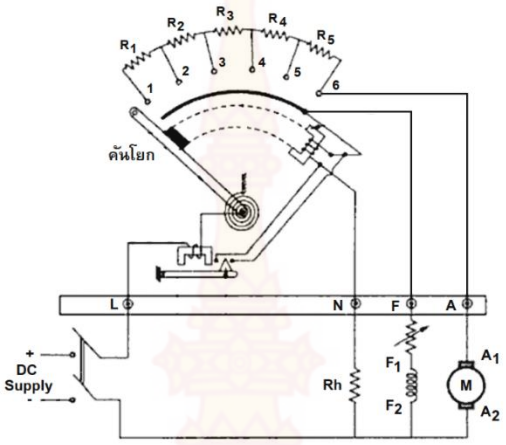


รูปที่ 12.1 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 3 จุด

เมื่อมอเตอร์เกิดภาวะโหลดเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ กระแสที่ไหลเพิ่มขึ้นมากเกินจะทำให้คอยล์แม่เหล็ก D ที่ทำหน้าที่ป้องกันกระแสเกินเริ่มทำงาน โดยจะสร้างแรงแม่เหล็กดูดหน้าสัมผัสให้เคลื่อนที่ไปลัดวงจรของคอยล์แม่เหล็ก E เมื่อคอยล์แม่เหล็ก E ถูกลัดวงจรแรงแม่เหล็กก็จะหมดไป ทำให้คันโยกถูกปล่อยออกและถูกดึงกลับไปที่ตำแหน่งเดิมตอนเริ่มต้น มอเตอร์ก็จะหยุดการทำงาน

12.2.2 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 4 จุด (4 point starter)

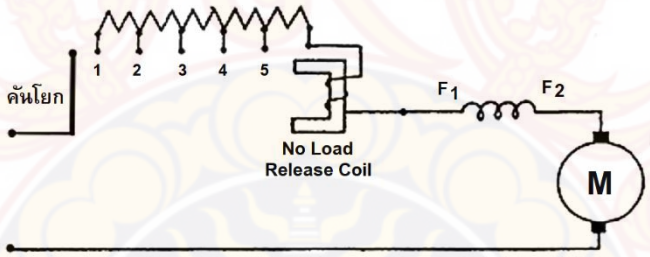
วงจรการทำงานของสตาร์ตเตอร์แบบ 4 จุด นั้นแตกต่างจากแบบ 3 จุด คือ คอยล์แม่เหล็ก E จะไม่ได้ต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ แต่ขดลวดสนามแม่เหล็กของมอเตอร์จะต่อตรงกับแหล่งจ่ายไฟเมื่อคันโยกเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับแถบทองเหลืองที่อยู่ใต้ชุดความต้านทาน โดยคอยล์แม่เหล็ก E จะเชื่อมต่อกับตัวต้านทาน Rh เพื่อจำกัดการไหลของกระแส ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กจึงไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ต่อกระแสที่ไหลผ่านคอยล์แม่เหล็ก E ซึ่งหมายความว่าแรงแม่เหล็กของคอยล์แม่เหล็ก E จะเพียงพอที่จะดึงดูดคันโยกค้างไว้ไม่ให้สปริงดึงกลับไปในตำแหน่งหยุดการทำงานได้โดยไม่จำเป็น ทำให้สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ตามความต้องการใช้งานได้โดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็ก (field rheostat)



รูปที่ 12.2 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบ 4 จุด

12.2.3 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบใช้กับมอเตอร์แบบอนุกรม (DC series motor starter)

สตาร์ตเตอร์มอเตอร์แบบอนุกรมมีโครงสร้างพื้นฐานที่มีความง่ายไม่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 12.3 การสตาร์ตมอเตอร์เริ่มจากคันโยกสตาร์ตเคลื่อนที่ไปทางขวา เมื่อสัมผัสตำแหน่งที่ 1 ค่าความต้านทานสูงสุดจะถูกต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ และค่าความต้านทานจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อคันโยกเปลี่ยนตำแหน่งไปทางขวาตามลำดับ สตาร์ตเตอร์แบบนี้บางครั้งถูกเรียกว่า สตาร์ตเตอร์แบบ 2 จุด โดยคอยล์แม่เหล็กจะดูดคันโยกไว้ที่ตำแหน่งทำงาน และปลดวงจรออกเมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 12.3 ตัวสตาร์ตเตอร์แบบใช้กับมอเตอร์แบบอนุกรม

12.3 การกลับทางหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นขึ้นอยู่กับขั้วของสนามแม่เหล็กหลักและทิศทางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กนั้น ซึ่งเป็นไปตามกฎมือซ้ายของมอเตอร์ (left-hand rule of motor action) ความสัมพันธ์ของกฎมือซ้ายจะเป็นไปตามหลักการทำงานภายใต้ขั้วของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์แบบใด วิธีการพันขดลวดอาร์เมเจอร์ไม่ว่าจะเป็นแบบแลป (lap) แบบเวฟ (wave) ล้วนมีจุดประสงค์เดียวกัน คือ กระแสจะไหลในทิศทางตรงกันข้าม ภายใต้ขั้วเหนือและขั้วใต้ ดังนั้นในแต่ละบริเวณจึงเกิดแรงดึงไปในทิศทางเดียวกัน โดยสรุปแล้ว ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ถูกกำหนดโดยปัจจัย ดังต่อไปนี้

1) ทิศทางการพันขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกสร้างมาตั้งแต่แรก

2) การเชื่อมต่อขั้วของขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงหรือสลับขั้วได้

3) ทิศทางการพันขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งถูกสร้างมาตั้งแต่แรกเช่นกัน

4) การเชื่อมต่อขั้วของชุดแปรงถ่าน ซึ่งกำหนดจุดต่อเข้าถึงขดลวดอาร์เมเจอร์และสามารถเปลี่ยนแปลงหรือสลับได้

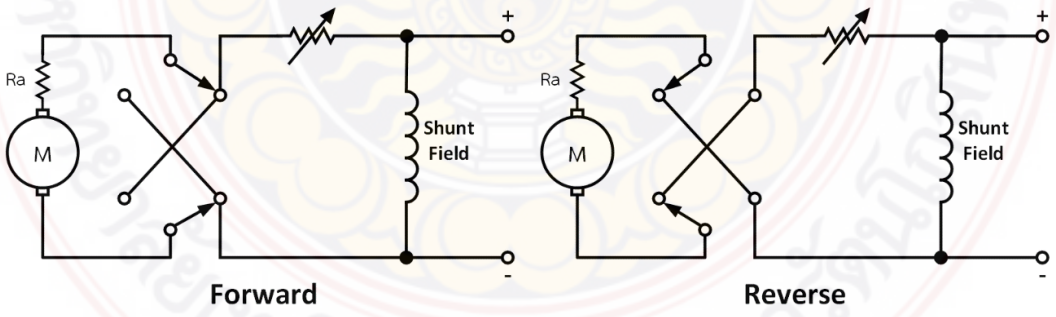
ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หากการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าถูกเปลี่ยนแปลงทิศทางของกระแสไฟฟ้าทั้งในอาร์เมเจอร์และทิศทางของสนามแม่เหล็กก็จะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งให้ผลเหมือนกับการย้ายตำแหน่งจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งภายในมอเตอร์ ทิศทางของแรงบิดในการหมุนจึงไม่เปลี่ยนแปลง ข้อยกเว้นสำหรับหลักการนี้ คือ มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร เพราะมีขดลวดพันอยู่เฉพาะที่อาร์เมเจอร์เท่านั้น ในกรณีนี้การกลับทิศทางสามารถทำได้โดยการสลับขั้วการเชื่อมต่อสายไฟ (line connections) เท่านั้น

การกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำได้โดยการเปลี่ยนขั้วของอาร์เมเจอร์หรือขั้วของขดลวดสนามแม่เหล็กอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น แต่ไม่ใช่การเปลี่ยนทั้งสองอย่างพร้อมกัน

12.3.1 การต่อวงจรการกลับทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1) วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบขนาน

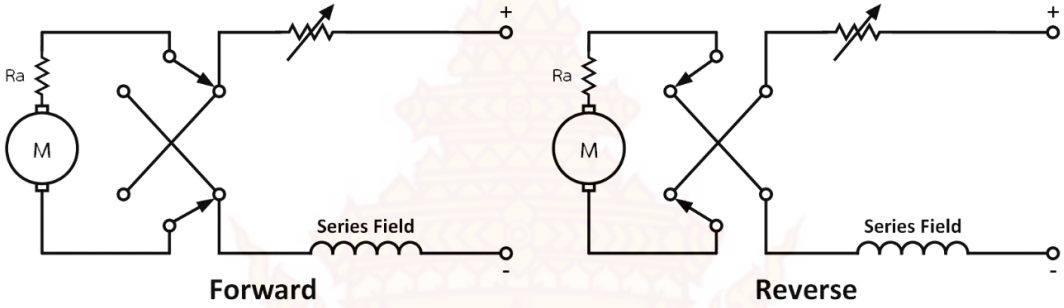
ปกติแล้วการทำงานของมอเตอร์แบบขนาน กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็กจะน้อยกว่ากระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์มาก ดังนั้นจึงดูเหมือนว่าขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นจุดที่เหมาะสมสำหรับการสลับขั้ว แต่วิธีการนี้อาจไม่ใช่แนวทางที่ดีที่สุด เนื่องจากขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นวงจรที่มีการเหนี่ยวนำสูง ดังนั้นหากมีการสลับวงจรก่อนที่กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กจะลดลงจนหมด ที่จุดหน้าสัมผัสของสวิตช์กลับทางหมุนจะเกิดการอาร์กอย่างรุนแรงและอาจเป็นอันตรายได้ และหากหน้าสัมผัสของสวิตช์กลับทางหมุนของขดลวดสนามแม่เหล็กเสียหาย การสตาร์ทมอเตอร์ครั้งต่อไปจะเกิดขึ้นโดยมีสนามแม่เหล็กน้อยหรือไม่มีเลย ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนเกินความเร็ว (run-away) ด้วยเหตุผลนี้จึงมักจะใช้วิธีการสลับทิศทางของวงจรของอาร์เมเจอร์แทน รูปที่ 12.4 แสดงการต่อวงจรกลับทางหมุนของมอเตอร์โดยสังเขป



รูปที่ 12.4 วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบขนาน

2) วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบอนุกรม

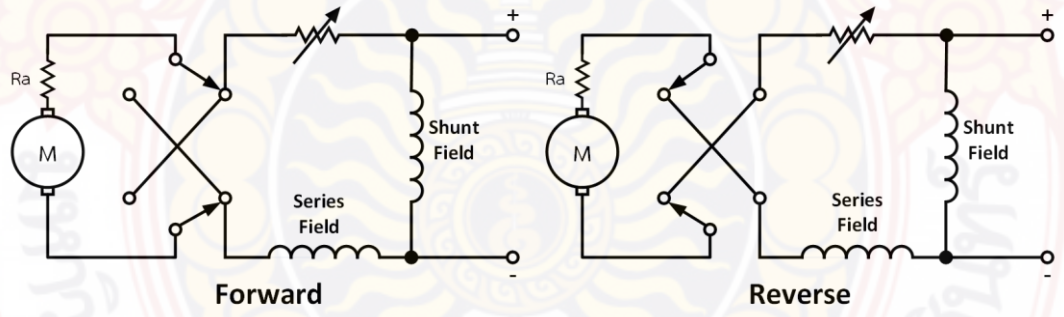
รูปที่ 12.5 แสดงการวงจรการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์แบบอนุกรม สำหรับมอเตอร์แบบอนุกรม การกลับทิศทางการหมุนไม่ได้สร้างความแตกต่างมากนัก เนื่องจากขดลวดสนามแม่เหล็กมีความเหนี่ยวนำน้อยกว่ามอเตอร์แบบขนานมากเพราะมีจำนวนรอบของขดลวดสนามแม่เหล็กที่น้อยกว่า นอกจากนี้ ขดลวดสนามแม่เหล็กยังมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ด้วย



รูปที่ 12.5 วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบอนุกรม

3) วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบผสม

รูปที่ 12.6 แสดงวงจรกลับทางหมุนของมอเตอร์แบบผสม ในมอเตอร์แบบผสมนั้นหากต้องการกลับทิศทางสนามแม่เหล็ก จะต้องเปลี่ยนสนามแม่เหล็กทั้งสองชุด ดังนั้น การสลับขั้วอาร์เมเจอร์จึงมีความซับซ้อนน้อยกว่า หากเปลี่ยนเฉพาะสนามแม่เหล็กเพียงชุดเดียว มอเตอร์แบบผสมจะเปลี่ยนจากแบบสนามแม่เหล็กเสริมกัน (cumulative compound) ไปเป็นแบบสนามแม่เหล็กหักล้างกัน (differential compound) ซึ่งคุณลักษณะของมอเตอร์จะเปลี่ยนไป



รูปที่ 12.6 วงจรกลับทางหมุนของมอเตอร์แบบผสม

12.4 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

12.4.1 ปัจจัยในการควบคุมความเร็ว

โดยทั่วไปเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงสามารถปรับความเร็วให้เข้ากับการใช้งานตามที่ต้องการได้ง่ายกว่ามอเตอร์ชนิดอื่นมาก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถปรับความเร็วในการทำงานได้

หลากหลายช่วง และด้วยวิธีการที่หลากหลาย ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$N = \frac{V - I_a R_a}{\phi}$$

ดังนั้น ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็ก (ϕ) ค่าความต้านทาน (R_a) หรือ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โดยวิธีการ

1) การควบคุมสนามแม่เหล็ก (field control)

2) การควบคุมด้วยรีโอสตัด (rheostatic control)

3) การควบคุมแรงดันไฟฟ้า (voltage control)

12.4.2 วิธีการควบคุมสนามแม่เหล็ก

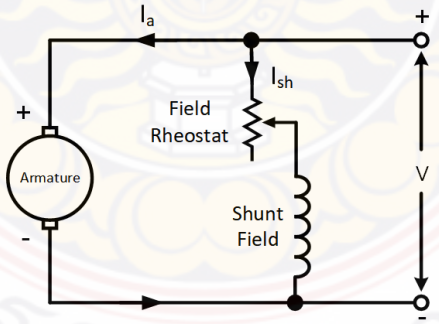
การควบคุมสนามแม่เหล็กเป็นวิธีการที่พบบ่อยที่สุดในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วิธีนี้ใช้ได้ดีในมอเตอร์แบบขนานและใช้ได้กับมอเตอร์แบบผสมอีกด้วย การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยการปรับกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการปรับค่าความต้านทานในวงจรสนามแม่เหล็กแบบขนาน หรือด้วยการควบคุมแบบโซลิดสเตต การควบคุมสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบกระตุ้นแยกจะสามารถทำได้ง่ายกว่าแบบอื่น มีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง และไม่ทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์มากนัก

ความเร็วของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนผกผันกับกระแสสนามแม่เหล็ก ดังสมการ

$$N \propto \frac{1}{I_f} \propto \frac{1}{\phi}$$

1) การควบคุมสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบขนาน

เส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์แบบขนานสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการปรับกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน (I_{sh}) ด้วยตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ตามรูปที่ 12.7 กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กขนานนั้นมีปริมาณน้อยดังนั้นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการควบคุมด้วยค่าความต้านทานแบบนี้จึงมีปริมาณน้อยมาก



รูปที่ 12.7 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบขนาน

2) การควบคุมสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบอนุกรม

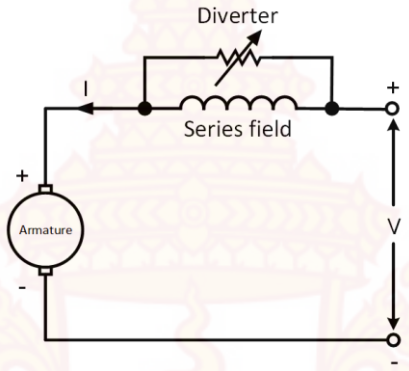
การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของมอเตอร์แบบอนุกรมเพื่อปรับความเร็วรอบนั้น สามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

(1) การควบคุมขดลวดสนามแม่เหล็กด้วยไดเวอร์เตอร์

(2) การควบคุมอาร์เมเจอร์ด้วยไดเวอร์เตอร์

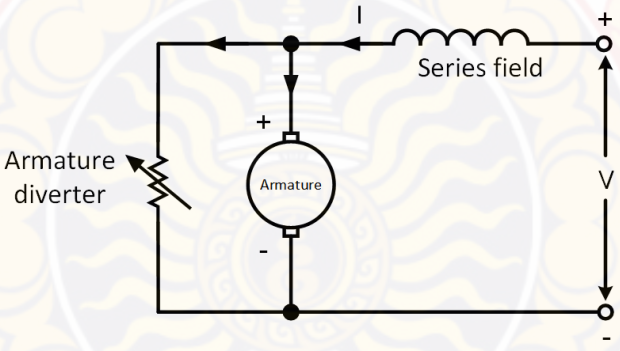
(3) การควบคุมด้วยการแทปขดลวดสนามแม่เหล็ก

(4) การควบคุมด้วยการต่อขนานขดลวดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 12.8 วงจรการควบคุมสนามแม่เหล็กด้วยไดเวอร์เตอร์

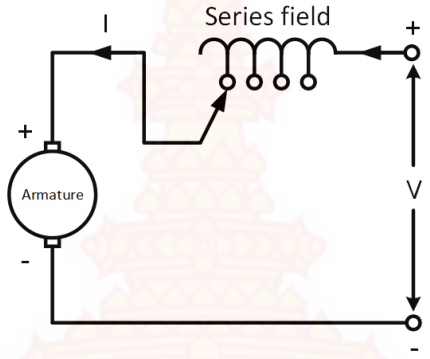
(1) วิธีการควบคุมขดลวดสนามแม่เหล็กด้วยไดเวอร์เตอร์ คือ การต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ที่เรียกว่า ไดเวอร์เตอร์ ขนานกับขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรม ซึ่งจะทำให้มีการแบ่งกระแสจำนวนหนึ่งไหลผ่านไดเวอร์เตอร์และสามารถปรับค่าความต้านทานของไดเวอร์เตอร์เพื่อปรับปริมาณของกระแสที่ไหลผ่าน ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กลงทำให้ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 12.9 วงจรการควบคุมอาร์เมเจอร์มอเตอร์ด้วยไดเวอร์เตอร์

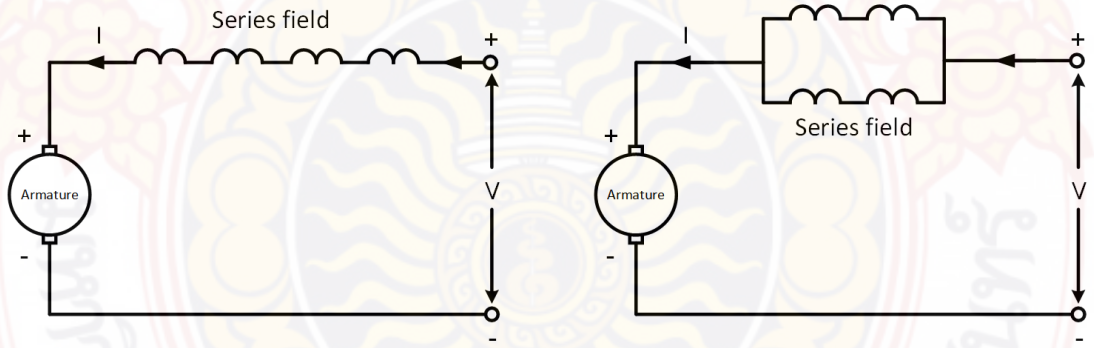
(2) วิธีการควบคุมอาร์เมเจอร์ด้วยไดเวอร์เตอร์ การลดความเร็วของมอเตอร์แบบอนุกรมให้ต่ำกว่าความเร็วปกติ สามารถใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า อาร์เมเจอร์ไดเวอร์เตอร์ต่อคร่อมตัวอาร์เมเจอร์ได้ (รูปที่ 12.9) สำหรับกรณีที่มีโหลดคงที่ หากกระแสอาร์เมเจอร์ ลดลงเนื่องจากการใช้อาร์เมเจอร์ไดเวอร์เตอร์ จะส่งผลให้สนามแม่เหล็ก (ϕ) ต้องเพิ่มขึ้น (ตามสมการแรงบิด $T_a \propto I_a$) การเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กนี้จะ

ทำให้มอเตอร์ดึงกระแสจากแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปเสริมให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีก และส่งผลให้ความเร็วมอเตอร์ลดลง (ตามสมการ $N \propto \frac{1}{\phi}$) เราสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้โดยการปรับค่าความต้านทานของไดเวอร์เตอร์



รูปที่ 12.10 วงจรการควบคุมด้วยการแทปขดลวดสนามแม่เหล็ก

(3) วิธีการควบคุมด้วยการแทปขดลวดสนามแม่เหล็ก วิธีนี้เป็นการลดจำนวนรอบของขดลวดสนามแม่เหล็กลง ทำให้ปริมาณสนามแม่เหล็กลดลง ส่งผลให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น โดยจะใช้การต่อสายแทปหลายจุดจากขดลวดสนามแม่เหล็กออกมาภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 12.10 ทำให้เราสามารถลดจำนวนรอบของขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมได้จากการปรับแทป เมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กทั้งหมดอยู่ในวงจร (คือยังไม่มีการปรับแทปเลย) มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วต่ำสุด ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเราปรับแทปให้จำนวนรอบของขดลวดสนามแม่เหล็กลดลง วิธีการนี้มักจะถูกนำไปใช้ในระบบการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (electric traction) เช่น ในรถไฟ หรือรถราง



รูปที่ 12.11 วงจรการควบคุมด้วยการต่อขนานขดลวดสนามแม่เหล็ก

(4) วิธีการควบคุมด้วยการต่อขนานขดลวดสนามแม่เหล็ก วิธีการควบคุมความเร็วแบบนี้ เราสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้หลายระดับโดยการจัดกลุ่มของขดลวดสนามแม่เหล็กใหม่ เพื่อเปลี่ยนความต้านทานรวมของขดลวดสนาม ทำให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามเปลี่ยนไป และส่งผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กและความเร็วรอบ ดังแสดงในรูปที่ 12.11 วิธีการนี้ถูกนำไปใช้กับมอเตอร์พัดลม

ตัวอย่างที่ 12.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 220 V มีค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.2 Ω กระแสอาร์เมเจอร์ขณะไม่มีโหลดเท่ากับ 2.5 A ที่ความเร็วรอบ 1,400 rpm จงหาความเร็วของมอเตอร์ขณะกระแสอาร์เมเจอร์เท่ากับ 60 A เมื่ออาร์เมเจอร์รีแอคชันทำให้สนามแม่เหล็กหลักลดลง 3 เปอร์เซ็นต์

วิธีทำ

แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF) ขณะไม่มีโหลด

$$E_{b1} = V_t - I_{a1}R_a = 220 - (2.5 \times 0.2) = 219.5 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF) ขณะมีโหลด

$$E_{b2} = V_t - I_{a2}R_a = 220 - (60 \times 0.2) = 208 \text{ V}$$

ใช้สมการความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

$$\frac{N_2}{1,400} = \frac{208}{219.5} \times \frac{\phi_1}{0.97\phi_2}$$

$$N_2 = \frac{1,400 \times 208}{219.5 \times 0.97} = 1,367.7 \text{ rpm}$$

ตัวอย่างที่ 12.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 500 V มีค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.2 Ω และค่าความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน 100 Ω จงหาค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่าได้ (Shunt regulator) ที่ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 800 rpm เป็น 1,000 rpm ถ้ากระแสของมอเตอร์เป็น 450 A และสมมติคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นเส้นตรง

วิธีทำ

เนื่องจากสมมติให้คุณลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นเส้นตรง ปริมาณของสนามแม่เหล็กจึงแปรผันตามกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน $(\phi \propto I_{sh})$

ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

จึงเขียนได้เป็น

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{I_{sh1}}{I_{sh2}}$$

ที่ความเร็วรอบ 800 rpm

$$I_{sh1} = \frac{V_t}{R_{sh}} = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}$$

กระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ $I_a = I_m - I_{sh1} = 450 - 5 = 445 \text{ A}$

Back EMF เท่ากับ $E_{b1} = V_t - I_{a1}R_a = 500 - (445 \times 0.2) = 411 \text{ V}$

ที่ความเร็วรอบ 1,000 rpm

กระแสอาร์เมเจอร์ เท่ากับ $I_a = I_m - I_{sh2} = 450 - I_{sh2}$

Back EMF เท่ากับ $E_{b2} = V_t - I_{a2}R_a = 500 - (445 \times I_{sh2}) \times 0.2 = 410 + 0.2I_{sh2}$

จาก $$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{I_{sh1}}{I_{sh2}}$$

ดังนั้น $$\frac{1,000}{800} = \frac{(410 + 0.2I_{sh2})}{411} \times \frac{5}{I_{sh2}}$$

$$410 + 0.2I_{sh2} = \frac{800}{1,000} \times \frac{411}{5} I_{sh2} = 102.75I_{sh2}$$

$$410 + 0.2I_{sh2} = 102.75I_{sh2}$$

$$410 = 102.75I_{sh2} - 0.2I_{sh2}$$

$$410 = 102.55I_{sh2}$$

$$I_{sh2} = \frac{410}{102.55} = 3.998 \approx 4 \text{ A}$$

ดังนั้น ค่าความต้านทานรวมในวงจรสนามแม่เหล็ก จึงเท่ากับ

$$R_{total} = \frac{V_t}{I_{sh2}} = \frac{500}{4} = 125\,\Omega$$

$\therefore$ ค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่าได้ (Shunt regulator) คือ

$$R_{reg} = R_{total} - R_{sh} = 120 - 100 = 25\,\Omega$$

ตัวอย่างที่ 12.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 230 V กินกระแส 20 A เมื่อหมุนที่ความเร็ว 750 rpm ค่าความต้านทานอาร์เมจอร์เท่ากับ 0.2 Ω ขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุดต่ออนุกรมกันมีค่าความต้านทานรวม 0.1 Ω จงหาความเร็วของมอเตอร์เครื่องนี้ ถ้านำขดลวดสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุด มาต่อขนานกันและมอเตอร์กินกระแสเพิ่มเป็น 28.28 A

วิธีทำ

ที่ความเร็วรอบ 750 rpm

Back EMF ขณะต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด อนุกรมกัน เท่ากับ

$$E_{b1} = V_t - I_{a1}\left(R_a + R_{S1}\right) = 230 - 20(0.2 + 0.1) = 224 \text{ V}$$

เมื่อต่อขนานขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด กระแสไหลผ่าน เท่ากับ 28.28 A

ความต้านทานของขดลวดแต่ละชุด $= \frac{R_S}{2} = \frac{0.1}{2} = 0.05\,\Omega$

ดังนั้น ความต้านทานรวมของชุดขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด ต่อขนานกัน จึงเป็น

$$= \frac{0.05 \times 0.05}{0.05 + 0.05} = 0.025\,\Omega$$

Back EMF ขณะต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด ขนานกัน เท่ากับ

$$E_{b2} = V_t - I_{a2}\left(R_a + R_{S2}\right) = 230 - 28.28(0.2 + 0.025) = 223.6 \text{ V}$$

ความเร็วของมอเตอร์เมื่อต่อขดลวดสนามแม่เหล็กขนานกัน คือ

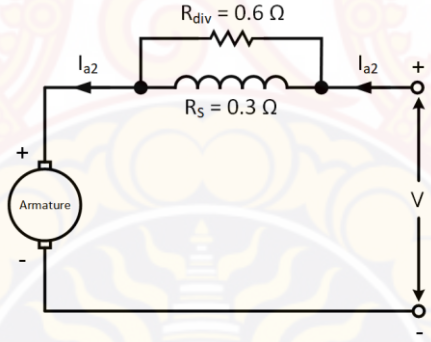
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{I_{a1}}{I_{a2}}$$

$$\frac{N_2}{750} = \frac{223.6}{224} \times \frac{20}{28.8}$$

$$N_2 = 750 \times \frac{223.6}{224} \times \frac{20}{28.8} = 519.9 \approx 520 \text{ rpm}$$

การนำขดลวดสนามแม่เหล็กมาต่อขนานกันทำให้ความต้านทานของขดลวดลดลงกระแสจึงไหลเข้ามอเตอร์มากขึ้นทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นความเร็วของมอเตอร์จึงลดลง (ตามสมการ $N \propto \frac{1}{\phi}$)

ตัวอย่างที่ 12.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 500 V มีค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.4 Ω ค่าความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรม 0.3 Ω กินกระแส 100 A ที่ความเร็วรอบ 600 rpm ถ้าต่อขนานไดเวอร์เตอร์ความต้านทาน 0.6 Ω กับขดลวดสนามแม่เหล็ก มอเตอร์กินกระแสเพิ่มขึ้นเป็น 122.44 A จงหาความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องนี้ โดยให้แรงบิดที่โหลดคงที่ ไม่คิดผลของอาร์เมเจอร์รีแอคชันและสมมติให้เส้นแรงแม่เหล็กแปรผันตามกระแส



วิธีทำ

Back EMF ของมอเตอร์ที่ความเร็ว 600 rpm ขณะยังไม่ต่อไดเวอร์เตอร์ เท่ากับ

$$E_{b1} = V_t - I_{a1}\left(R_a + R_S\right) = 500 - 100(0.4 + 0.3) = 430 \text{ V}$$

เมื่อต่อไดเวอร์เตอร์ขนานกับขดลวดสนามแม่เหล็กกระแสอาร์เมเจอร์ จะเพิ่มขึ้นเป็น 122.44 A ตามรูปด้านบน ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กเมื่อต่อขนานกับไดเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไปเป็น

$$R_{S//div} = \frac{R_{div} \times R_S}{R_{div} + R_S} = \frac{0.6 \times 0.3}{0.6 + 0.3} = 0.2\ \Omega$$

แรงดันตกคร่อมขดลวดสนามแม่เหล็กและไดเวอร์เตอร์ เท่ากับ

$$I_{a2}R_{S//div} = 122.44 \times 0.2 = 24.49 \text{ V}$$

ดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กจึงเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น

$$I_S = \frac{I_{a2}R_{S//div}}{R_{S1}} = \frac{24.49}{0.3} = 81.63\ \text{A}$$

ดังนั้น Back EMF ของมอเตอร์เมื่อต่อขนานไดเวอร์เตอร์กับขดลวดสนามแม่เหล็ก จึงเท่ากับ

$$\begin{aligned} E_{b2} &= V_t - I_{a2}R_a - I_S R_S \\ &= 500 - (122.44 \times 0.4) - (81.63 \times 0.3) = 426.54\ \text{V} \end{aligned}$$

$\therefore$ ความเร็วของมอเตอร์เมื่อต่อไดเวอร์เตอร์ขนานกับขดลวดสนามแม่เหล็กหาได้จากสมการ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}} \times \frac{I_{a1}}{I_{a2}}$$

$$\frac{N_2}{600} = \frac{426.54}{430} \times \frac{100}{81.64}$$

$$N_2 = 1.215 \times 600 = 729\ \text{rpm}$$

12.5 การหยุดหรือชะลอความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การหยุดหรือชะลอความเร็ว หรือที่เรียกว่า เบรก (brake) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเบรกแบบกลไกไฟฟ้า (electro-mechanical) และการเบรกแบบไฟฟ้า

12.5.1 เบรกแบบกลไกไฟฟ้า (electro-mechanical brakes)

การเบรกแบบกลไกไฟฟ้า หรือ เบรกแบบใช้แรงเสียดทาน จะทำงานโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้าหรือเครื่องผลัก (thrustors) ที่ทำงานด้วยไฟฟ้า เบรกแบบแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเบรกที่ใช้สปริงเป็นตัวสร้างแรงกด โดยใช้แผ่นผ้าเบรกเสียดทานกับล้อเบรก ผ้าเบรกจะคลายออกเมื่อแม่เหล็กไฟฟ้าทำงาน การออกแบบเบรกแบบนี้ช่วยให้มั่นใจในเรื่องความปลอดภัยเพราะหากเกิดไฟฟ้าขัดข้อง เบรกจะจับยึดล้อเองโดยอัตโนมัติ ตำแหน่งที่ดีที่สุดในการติดตั้งเบรก คือ ที่เพลาของมอเตอร์ฝั่งที่ไม่ใช่ด้านขับเคลื่อนและพิกัดของเบรกควรมีค่าเท่ากับพิกัดของมอเตอร์ ตัวอย่างเช่น หากใช้มอเตอร์แบบทำงานต่อเนื่อง (continuous rated motor) ก็ควรใช้เบรกที่ออกแบบมาสำหรับงานต่อเนื่องเช่นกัน

เบรกแบบใช้เครื่องผลัก (thrustor) หรือแบบไฮดรอลิก (hydraulic type brake) จะใช้ปั๊มแทนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยของเหลวภายใต้แรงดันจะไปดันลูกสูบ ซึ่งจะไปคลายเบรกอีกทอดหนึ่ง ข้อเสียของการใช้ระบบเบรกแบบกลไกไฟฟ้าคือ ถ้าเกิดการที่เบรกอย่างกะทันหันอาจทำให้เกิดแรงกระแทกและอาจทำให้เครื่องจักรเสียหายได้

การเบรกไฟฟ้าที่ใช้ในการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

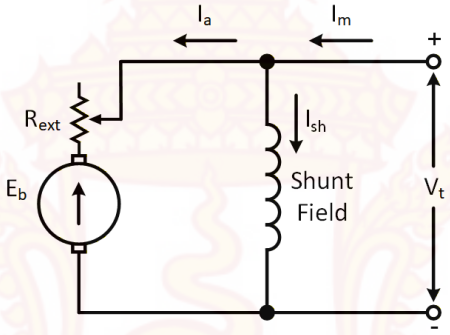
1. การเบรกแบบปลั๊กกิ้ง หรือแบบใช้กระแสย้อนกลับ (plugging or counter current braking)
2. การเบรกแบบรีโอ-สแตติก หรือแบบไดนามิก (rheostatic or dynamic braking)

3. การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative braking)

1) การเบรกไฟฟ้าของมอเตอร์แบบขนาน (electric braking of shunt motors)

(1) การเบรกแบบปลั๊กกิ้งหรือแบบใช้กระแสย้อนกลับ

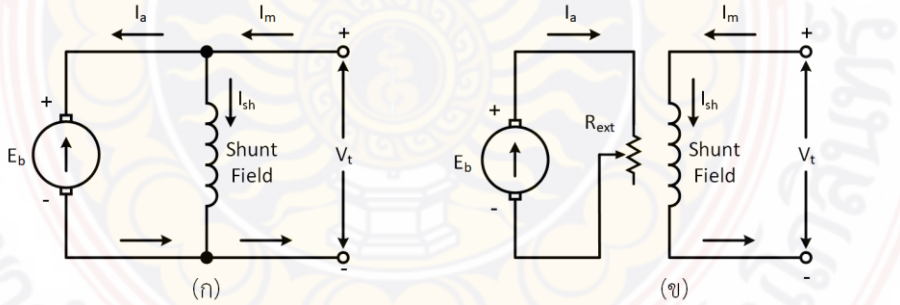
วิธีนี้จะใช้การสลับขั้วสายไฟของอาร์เมเจอร์ เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังรูปที่ 12.12 เนื่องจากการสลับขั้วของอาร์เมเจอร์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Eb) มีทิศทางเดียวกันในวงจร ดังนั้น เพื่อจำกัดกระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม จึงจำเป็นต้องต่อตัวต้านทานเพิ่มเข้าไปในวงจรในขณะที่ทำการสลับขั้ว วิธีนี้มักใช้ในการควบคุม เครื่องพิมพ์ เครื่องมือกล เครื่องรีดเหล็ก และลิฟต์ เป็นต้น เมื่อเทียบกับการเบรกแบบรีโอ-สแตติก การเบรกแบบปลั๊กกิ้งจะให้แรงบิดในการเบรกที่ดีกว่า



รูปที่ 12.12 การเบรกแบบปลั๊กกิ้งหรือแบบใช้กระแสย้อนกลับ

(2) การเบรกแบบรีโอ-สแตติก หรือการเบรกแบบไดนามิก

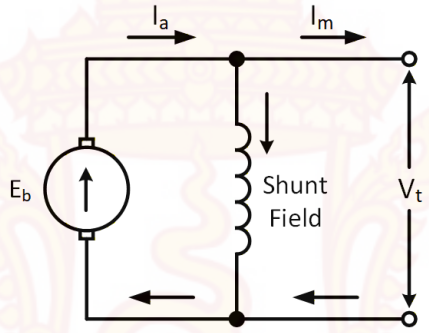
การเบรกมอเตอร์แบบขนานด้วยวิธีนี้ อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์จะถูกตัดออกจากแหล่งจ่ายไฟ และนำไปต่อเข้ากับตัวต้านทานปรับค่าได้ R_{ext} ดังแสดงในรูปที่ 12.13 (ข) อย่างไรก็ตาม ขดลวดสนามแม่เหล็กยังคงต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟตามเดิมโดยไม่เปลี่ยนแปลง ผลของการเบรกสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าความต้านทานอนุกรม R_{ext} นั่นเอง



รูปที่ 12.13 การเบรกแบบรีโอ-สแตติกหรือการเบรกแบบไดนามิก

(3) การเบรกแบบคืนพลังงาน

จากรูปที่ 12.14 วิธีการเบรกแบบคืนพลังงานจะใช้เมื่อโหลดของมอเตอร์มีลักษณะที่เป็นแบบ “การพาให้หมุนต่อ” (overhauling characteristic) เช่น การลดระดับของรอกยกของ (hoist) หรือการเคลื่อนที่ลงทางลาดของรถไฟฟ้า การคืนพลังงานจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF; E_b) มีค่ามากกว่าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อลดหรือหยุดจ่ายไฟฟ้าให้มอเตอร์ แต่แรงเฉื่อยของโหลดจะพาให้โรเตอร์หมุนต่อ โหลดจึงทำหน้าที่เสมือนตัวต้นกำลัง (prime mover) และขับมอเตอร์ให้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น ทิศทางของกระแสอาร์เมเจอร์ และแรงบิดของอาร์เมเจอร์จึงกลับทิศ ทำให้ความเร็วมอเตอร์ลดลงจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ มีค่าน้อยกว่าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ จะเห็นได้ชัดว่าในขณะที่มอเตอร์กำลังชะลอความเร็ว มอเตอร์สามารถส่งคืนพลังงานไฟฟ้ากลับเข้าสู่แหล่งจ่ายได้

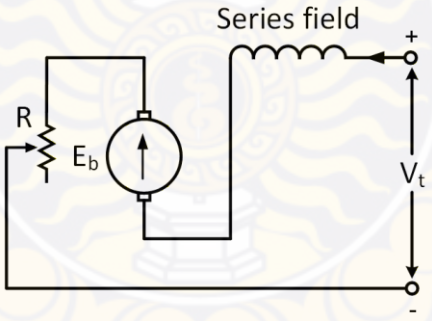


รูปที่ 12.14 การเบรกแบบคืนพลังงาน

2) การเบรกไฟฟ้าของมอเตอร์แบบอนุกรม (electric breaking of series motors)

(1) การเบรกแบบปลั๊กกิ้งหรือแบบใช้กระแสย้อนกลับ

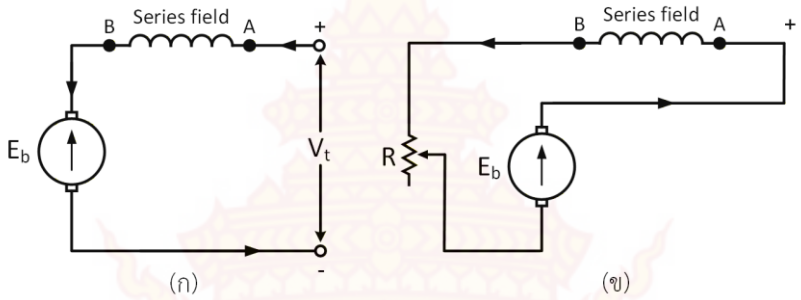
วิธีการนี้จะทำการสลับขั้วการต่อสายของอาร์เมเจอร์ เช่นเดียวกับในกรณีของมอเตอร์แบบขนาน และต่อตัวต้านทานปรับค่าได้อนุกรมเข้ากับอาร์เมเจอร์ ดังที่แสดงในรูปที่ 12.15



รูปที่ 12.15 การเบรกมอเตอร์อนุกรมแบบปลั๊กกิ้งหรือแบบใช้กระแสย้อนกลับ

(2) การเบรกแบบรีโอ-สแตติก (rheostatic braking)

ในการเบรกวิธีนี้ มอเตอร์จะถูกตัดออกจากแหล่งจ่ายไฟ ขั้วของสนามแม่เหล็กจะถูกสลับกลับ และมอเตอร์จะถูกต่ออนุกรมกับตัวต้านทานปรับค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 12.16 เห็นได้ชัดว่า ขณะนี้เครื่องจักรกำลังทำงานในลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การสลับขั้วของสนามแม่เหล็กทำขึ้นเพื่อให้แน่ใจว่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามยังคงไหลไปในทิศทางเดียวกับเดิม (คือจาก A ไป B) เพื่อช่วยเสริมสนามแม่เหล็กตกค้าง (residual magnetism) ในทางปฏิบัติ ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ใช้สำหรับการสตาร์ต มักจะนำมาใช้สำหรับการเบรกด้วยเช่นกัน



รูปที่ 12.16 การเบรกมอเตอร์อนุกรมแบบรีโอ-สแตติก

(3) การเบรกแบบคืนพลังงาน (regenerative braking)

ในมอเตอร์อนุกรมการเบรกแบบคืนพลังงานไม่สามารถทำได้โดยตรงหากไม่มีการดัดแปลงวงจร เพราะเมื่อทิศทางของกระแสอาร์เมเจอร์กลับทิศ ก็จะทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF; E_b) กลับทิศตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม วิธีนี้สามารถนำมาใช้ได้หากมีการใช้วงจรพิเศษในมอเตอร์สำหรับงานฉุดลาก

ตัวอย่างที่ 12.5 มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน 50 HP, 440 V ถูกเบรกด้วยวิธีปลั๊กกิ้ง จงคำนวณค่าความต้านทานที่ต้องต่ออนุกรมกับวงจรอาร์เมเจอร์ เพื่อจำกัดกระแสเบรกเริ่มต้นให้มีค่า 150 A และคำนวณแรงบิดเบรกที่เกิดขึ้น ถ้ากำหนดให้ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ Ra เท่ากับ 0.1 Ω กระแสอาร์เมเจอร์ขณะโหลดเต็มพิกัด เท่ากับ 100 A ความเร็วขณะโหลดเต็มพิกัด 600 rpm

วิธีทำ

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์

$$\begin{aligned} E_b &= V_t - I_a R_a \\ &= 400 - (100 \times 0.1) \\ &= 430 \text{ V} \end{aligned}$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอาร์เมเจอร์ในขณะทำการเบรก เท่ากับ

$$\begin{aligned} &= V_t + E_b \\ &= 440 + 430 = 870 \text{ V} \end{aligned}$$

ค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ที่ทำให้กระแสไม่เกิน 150 A เท่ากับ

$$R = \frac{870}{150} = 5.8\,\Omega$$

ค่าความต้านทานภายนอกที่ใช้ต่ออนุกรมในวงจรอาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$R_{ext} = R - R_a = 5.8 - 0.1 = 5.7\,\Omega$$

หาแรงบิดในการเบรก (Breaking Torque; T_b) ดังนี้

แรงบิดขณะรับโหลดเต็มพิกัด

$$T_L = \frac{P_m \times 746}{2\pi \times \left[\frac{N}{60}\right]} = \frac{50 \times 746}{2\pi \times \left[\frac{600}{60}\right]} = 593.95\ \text{N.m}$$

ในกรณีของมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น แรงบิดของมอเตอร์ จึงแปรผันตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ แรงบิดในการเบรก จะเท่ากับ

$$T_b = T_L \times \frac{I_b}{I_L} = 593.95 \times \frac{150}{100} = 890.925\ \text{N.m}$$

ตัวอย่างที่ 12.6 มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน 45 kW, 500 V, 600 rpm มีประสิทธิภาพที่โหลดเต็มพิกัด 90% มีค่าความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็ก 200 Ω ขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.2 Ω จงหาความเร็วของมอเตอร์ เมื่อทำการเบรกมอเตอร์แบบคืนพลังงานและไม่จำกัดค่าความต้านทาน กำหนดให้กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กคงที่และไม่คิดอาร์เมเจอร์รีแอคชันและแรงดันตกคร่อมแปรงถ่าน

วิธีทำ

กระแสของมอเตอร์ที่โหลดเต็มพิกัด เท่ากับ

$$I_m = \frac{P_{out} \times 1,000}{V_t \times \eta} = \frac{45 \times 1,000}{500 \times 0.9} = 100\ \text{A}$$

กระแสขดลวดสนามแม่เหล็ก เท่ากับ

$$I_{sh} = \frac{V_t}{R_{sh}} = \frac{500}{200} = 2.5\ A$$

กระแสอาร์เมเจอร์ที่โหลดเต็มพิกัด เท่ากับ

$$I_a = I_m - I_{sh} = 100 - 2.5 = 97.5\ \text{A}$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่โหลดเต็มพิกัด เท่ากับ

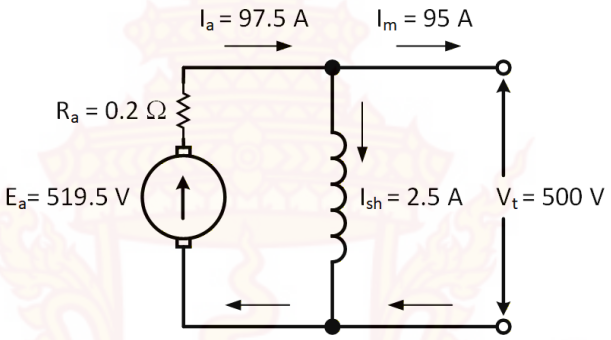
$$\begin{aligned} E_b &= V_t - I_a R_a \\ &= 500 - (97.5 \times 0.2) \\ &= 480.5\ \text{V} \end{aligned}$$

เนื่องจากกระแสสนามแม่เหล็กคงที่ และผลของปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์รวมทั้งแรงดันตกคร่อมที่แปรงถ่านมีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ ดังนั้นแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ (I_a) และ ความเร็วรอบ (N) จะแปรผันตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (E_b)

เนื่องจากแรงบิดที่ต้องการในแต่ละกรณีมีค่าเท่ากับแรงบิดที่พิกัด ดังนั้นกระแสอาร์เมเจอร์ในแต่ละกรณีจึงเท่ากับกระแสอาร์เมเจอร์ที่โหลดเต็มพิกัด คือ 97.5 A

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) ที่ทำให้กระแสอาร์เมเจอร์มีค่า 97.5 A สำหรับการเบรกแบบสร้างพลังงานกลับคืน (Regenerative Braking) เท่ากับ

$$E_a = V_t + I_a R_a = 500 + (97.5 \times 0.2) = 519.5 \text{ V}$$



ความเร็วในสภาวะการเบรกแบบสร้างพลังงานกลับคืน (N_1) เท่ากับ

$$\frac{N_1}{N_{FL}} = \frac{E_a}{E_b}$$

$$N_1 = N_{FL} \times \frac{E_a}{E_b}$$

$$N_1 = 600 \times \frac{519.5}{480.5} = 648.7 \text{ rpm}$$

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการใช้งาน เริ่มจากการสตาร์ตมอเตอร์และการใช้อุปกรณ์สตาร์ตเพื่อจำกัดกระแสเริ่มต้น ได้แก่ สตาร์ตเตอร์แบบ 3 จุด แบบ 4 จุด และแบบใช้กับมอเตอร์อนุกรม นอกจากนี้ยังอธิบาย การกลับทางหมุน การควบคุมความเร็ว และการเบรกมอเตอร์ โดยการควบคุมความเร็วสามารถทำได้ด้วยการควบคุมสนามแม่เหล็ก ความต้านทาน และแรงดันไฟฟ้า ส่วนการเบรกทางไฟฟ้ามีทั้งแบบปลั๊กกิ้ง แบบรีโอสแตติก และแบบรีเจนเนอเรทีฟ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม 220 V ขณะหมุนที่ความเร็ว 750 rpm กินกระแส 80 A ความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.14 Ω ความต้านทานขดลวดอนุกรม 0.11 Ω จงหาความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อสมมติว่าเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อมอเตอร์กินกระแส 20 A เป็นร้อยละ 40 ของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อมอเตอร์กินกระแส 80 A (ตอบ 2,015 rpm)
2. มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน 230 V มีความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.2 Ω กินกระแส 15 A ที่พิกัดแรงดัน ความเร็วรอบ 800 rpm จงคำนวณหาค่าความต้านทานที่ต้องต่อเพิ่มในวงจรอาร์เมเจอร์เพื่อลดความเร็วรอบความเร็วเป็น 600 rpm โดยไม่คิดแรงบิดที่โหลด (ตอบ 3.783 Ω)
3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 220 V มีค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.5 Ω กระแสสนามแม่เหล็กคงที่ ความเร็วที่พิกัดเท่ากับ 500 rpm กระแสอาร์เมเจอร์ 30 A ถ้าต่อความต้านทานขนาด 1.0 Ω ในวงจรอาร์เมเจอร์ จงหาความเร็วของมอเตอร์ขณะทำงานเต็มพิกัด (ตอบ 426.83 rpm)
4. มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน 45 kW, 500 V, 600 rpm มีประสิทธิภาพที่โหลดเต็มพิกัด 90% มีค่าความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็ก 200 Ω ขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.2 Ω จงหาความเร็วของมอเตอร์เมื่อทำการเบรกมอเตอร์แบบปลั๊กกิ้งที่ต่อค่าความต้านทานภายนอก 5.5 Ω กำหนดให้กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กคงที่และไม่คิดอาร์เมเจอร์รีแอคชันและแรงดันตกคร่อมแปรงถ่าน (ตอบ 69.6 rpm)
5. จากข้อ 4 จงหาความเร็วของมอเตอร์ เมื่อทำการเบรกมอเตอร์แบบรีโอ-สแตติกหรือไดนามิค เมื่อต่อค่าความต้านทานภายนอก 5.5 Ω (ตอบ 340.9 rpm)

13 การสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Losses and Efficiency of DC Motor

ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงาน จะเกิดการสูญเสียพลังงานในส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ เช่น การสูญเสียในขดลวด การสูญเสียในแกนเหล็ก และการสูญเสียทางกล ส่งผลให้กำลังขาออกมีค่าน้อยกว่ากำลังขาเข้า ดังนั้นการศึกษาการสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงมีความสำคัญ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์ ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน และลดการสูญเสียพลังงานให้เหลือน้อยที่สุดได้

13.1 การสูญเสียและประสิทธิภาพ (losses and efficiency)

กำลังขาออก (output) ของมอเตอร์จะมีค่าน้อยกว่ากำลังขาเข้า (input) เสมอ เนื่องจากพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน การสูญเสียเหล่านี้ทำให้อุณหภูมิของส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมโดยรอบ และจะถูกระบายออกได้ในอัตราเท่ากับที่ถูกสร้างขึ้นให้กับสิ่งแวดล้อม การสูญเสียบางส่วนจะขึ้นอยู่กับภาระโหลด ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงขึ้นอยู่กับโหลดด้วย และอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้จะเป็นตัวกำหนดโหลดสูงสุดที่เครื่องสามารถรับได้ ขีดจำกัดของกำลังขาออกจะเกิดขึ้นเมื่อโหลดสูงมากจนทำให้อุณหภูมิสูงพอที่จะเป็นอันตรายต่อฉนวนของขดลวด ดังนั้น การพิจารณาเรื่องการสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจึงมีความสำคัญ ด้วยเหตุผล 3 ประการ ดังต่อไปนี้

1) การสูญเสียมีผลโดยตรงต่อต้นทุนการเดินเครื่อง
2) การสูญเสียเป็นตัวกำหนดความร้อนของเครื่องจักร และส่งผลต่อพิกัดกำลังหรือกำลังขับที่สามารถใช้งานได้โดยไม่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร
3) แรงดันตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการชดเชยการสูญเสียต้องถูกนำมาพิจารณาอย่างถูกต้องในการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองเครื่องจักร

ประสิทธิภาพ (η) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังหรือพลังงานที่ได้ออกมาอย่างมีประโยชน์ (power output) ต่อกำลังหรือพลังงานที่ป้อนเข้าไป (power input) นิยามได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

หรือ เขียนได้เป็น

$$\eta = \frac{P_{in} - Losses}{P_{in}}$$

หรือ สามารถเขียนได้อีกแบบเป็น

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Losses}$$

และ โดยทั่วไปจะเขียนในรูปของร้อยละ คือ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\ \%$$

13.1.1 การสูญเสียทางไฟฟ้าหรือการสูญเสียในขดลวดทองแดง (electrical losses or copper losses)

การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้น เนื่องจากขดลวดตัวนำมีค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านพลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนตามกฎของจูล (Joule's Law)

(1) การสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature copper loss) คำนวณได้จาก

$$armature\ copper\ loss = I_a^2 \times R_a$$

(2) การสูญเสียในขดลวดสนามอนุกรม (Series Copper Loss) คำนวณได้จาก

$$series\ copper\ loss = I_s^2 \times R_s$$

(3) การสูญเสียในขดลวดสนามขนาน (Shunt Copper Loss) คำนวณได้จาก

$$shunt\ copper\ loss = I_{sh}^2 \times R_{sh}$$

การสูญเสียทางไฟฟ้าเป็นการสูญเสียจากกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์รับเข้า จากการสูญเสียทางไฟฟ้านี้ การสูญเสียในขดลวดสนามขนาน ถือว่าแทบจะไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของโหลด ขณะที่การสูญเสียทางไฟฟ้าที่ส่วนอื่น ๆ จะมีค่าแปรผันตามกำลังสองของกระแสโหลด

13.1.2 การสูญเสียเชิงกลจากการหมุน (rotational losses)

(1) การสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) ประกอบด้วยการสูญเสียจาก 2 ส่วน คือ

- การสูญเสียจากฮีสเทอรีซีส (hysteresis loss) เกิดจากการกลับขั้วของเส้นแรงแม่เหล็กบนอาร์เมเจอร์ในขณะที่อาร์เมเจอร์หมุนผ่านสนามแม่เหล็ก
- การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss) เกิดขึ้นจากการที่อาร์เมเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในแกนเหล็ก ถึงแม้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าน้อยมากแต่ก็สามารถทำให้กระแสไหลจำนวนมากได้เนื่องจากค่าความต้านทานของแกนเหล็กต่ำนั่นเอง

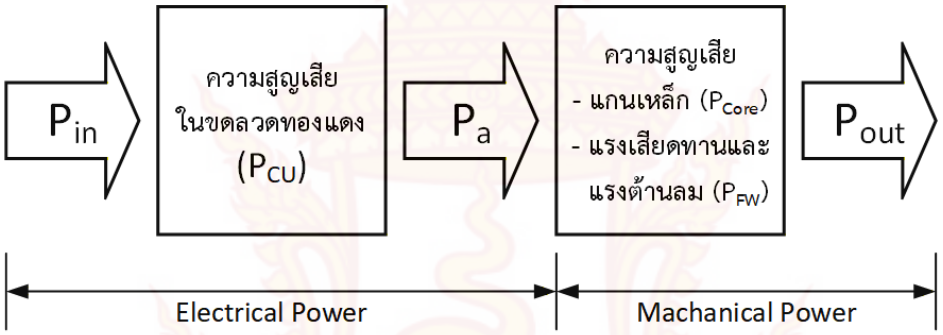
(2) การสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลม (friction and windage loss) ประกอบด้วยการสูญเสียจาก 2 ส่วน คือ

- แรงเสียดทานที่ตลับลูกปืน (bearing) และแปรงถ่าน (brushes)
- แรงต้านของลม (windage)

การสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลมเป็นการสูญเสียจากกำลังกลที่มอเตอร์ผลิตขึ้น การสูญเสียทั้งสองประเภทนี้มักถูกรวมอยู่ในกลุ่มเดียวกัน เรียกว่า การสูญเสียทางกล เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วคงที่ การสูญเสียทางกลจะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ ทั้งนี้ ความเร็วรอบของเครื่องและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสูญเสียทางกลของมอเตอร์

13.2 แผนผังกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (power flow diagram)

กำลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อผลิตเป็นกำลังทางกลนั้น มีลำดับขั้นของกำลังงานในกระบวนการสร้างกำลังทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถอธิบายได้จากแผนผังกำลัง ดังรูปที่ 13.1 และสามารถหาค่าประสิทธิภาพ ณ ลำดับขั้นต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 13.1 แผนผังกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (electrical efficiency)

$$\eta_e = \frac{P_a}{P_{in}} = \frac{E_b \times I_a}{V_m \times I_m}$$

2. ประสิทธิภาพทางกล (mechanical efficiency)

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_a} = \frac{HP \times 746}{E_b \times I_a}$$

3. ประสิทธิภาพทั้งหมดหรือประสิทธิภาพทางการค้า (overall or commercial efficiency)

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{HP \times 746}{V_m \times I_m}$$

13.3 การเกิดประสิทธิภาพสูงสุด (condition of maximum efficiency)

เงื่อนไขในการเกิดประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเหมือนกัน สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เงื่อนไขในการเกิดสภาวะประสิทธิภาพสูงสุด คือ

- กำลังไฟฟ้าของเครื่อง เท่ากับ $V \times I$

- ถ้าเส้นแรงแม่เหล็กและความเร็วของเครื่องคงที่ ความสูญเสียทั้งหมดยกเว้นความสูญเสียในอาร์เมเจอร์จะคงที่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} losses &= armature\ copper\ loss + constant\ loss \\ &= (I + I_{sh})^2 R_a + P_c \\ &= I^2 R_a + P_c \end{aligned}$$

จากสมการที่กล่าวข้างต้น ไม่นำค่า I_{sh} มาคำนวณด้วย เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสโหลดแล้วมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ และ P_c คือค่าความสูญเสียคงที่ซึ่งประกอบด้วยความสูญเสียของขดลวดสนามแม่เหล็กและความสูญเสียทางกล

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \\ &= \frac{P_{out}}{P_{out} + losses} \\ &= \frac{VI}{VI + I^2 R_a + P_c} \end{aligned}$$

จะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อ $\frac{d\eta}{dI} = 0$

$$\frac{d\eta}{dI} = \frac{(VI + I^2 R_a + P_c)V - VI(V + 2IR_a)}{(VI + I^2 R_a + P_c)^2}$$

$$\frac{(VI + I^2 R_a + P_c)V - VI(V + 2IR_a)}{(VI + I^2 R_a + P_c)^2} = 0$$

$$(VI + I^2 R_a + P_c)V - VI(V + 2IR_a) = 0$$

$$(VI + I^2 R_a + P_c)V = VI(V + 2IR_a)$$

$$V^2 I + I^2 R_a V + P_c V = V^2 I + 2VI^2 R_a$$

$$P_c V = VI^2 R_a$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพจะสูงสุด เมื่อความสูญเสียไม่คงที่เท่ากับความสูญเสียคงที่

$$P_c = I^2 R_a$$

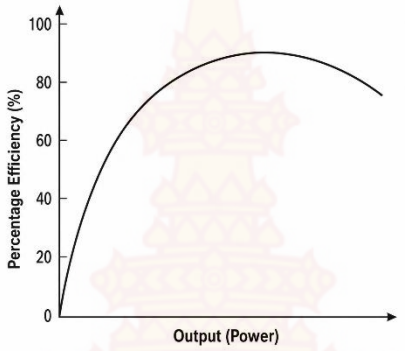
ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดเมื่อกระแสโหลดมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดโดยสมการ

$$I = \sqrt{\frac{P_c}{R_a}}$$

13.3.1 เส้นโค้งประสิทธิภาพ (efficiency curve)

ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะมีค่าแตกต่างกันที่กำลังขาออกแต่ละค่า เมื่อกำลังขาออกเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพก็จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้น หากกำลังขาออกเพิ่มขึ้นต่อไป ประสิทธิภาพจะเริ่มลดลง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังขาออก เรียกว่า เส้นโค้งประสิทธิภาพ

(efficiency curve) แสดงใน รูปที่ 13.2 โดยทั่วไป เครื่องจักรไฟฟ้าจะถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่หรือใกล้เคียงกับกำลังที่พิกัดของเครื่อง เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่แรงดันคงที่ ดังนั้นเส้นโค้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจึงเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสโหลดได้



รูปที่ 13.2 เส้นโค้งประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

ตัวอย่างที่ 13.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 200 V, 12 kW มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 90 มีความเร็วรอบ 800 rpm เมื่อขับโหลดที่ร้อยละ 80 ของพิกัด ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็กขนานเท่ากับ 80 Ω จงหาประสิทธิภาพและความเร็วเมื่อมอเตอร์กินกระแส 70 A จากระบบไฟฟ้า

วิธีทำ

มอเตอร์ทำงานที่ร้อยละ 80 ของพิกัด มีกำลังขาออก เท่ากับ

$$P_{out} = 0.8 \times 12,000 = 9,600 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าขาเข้าที่ประสิทธิภาพร้อยละ 90 เท่ากับ

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{9,600}{0.9} = 10,667 \text{ W}$$

$\therefore$ ค่ากำลังสูญเสียรวม เท่ากับ

$$Total\ losses = P_{in} - P_{out} = 10,667 - 9,600 = 1,067 \text{ W}$$

ถ้ามอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ปริมาณโหลดเท่านี้ ดังนั้นที่สภาวะนี้ค่าความสูญเสียไม่คงที่จะเท่ากับค่าความสูญเสียคงที่ เพราะฉะนั้น

$$P_c = I^2 R_a = \frac{1,067}{2}$$

$$I^2 R_a = \frac{1,067}{2} = 533.5 \text{ W}$$

กระแสขาเข้ามอเตอร์ เท่ากับ

$$I_m = \frac{P_{in}}{V} = \frac{10,667}{200} = 53.33 \text{ A}$$

กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} = \frac{200}{80} = 2.5 \text{ A}$$

กระแสที่ไหลเข้าอาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$I_a = I_m - I_{sh} = 53.33 - 2.5 = 50.83 \text{ A}$$

ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$I^2 R_a = 533.5 \text{ W}$$

$$50.83^2 \times R_a = 533.5 \text{ W}$$

$$R_a = \frac{533.5}{50.83^2} = 0.2065 \, \Omega$$

เมื่อจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ 70 A

$$I_a = I_m - I_{sh} = 70 - 2.5 = 67.5 \text{ A}$$

$$I^2 R_a = 67.5^2 \times 0.2065 = 941 \text{ W}$$

ความสูญเสียรวมของมอเตอร์ เท่ากับ

$$Total\ losses = I_a^2 R_a + P_c = 941 + \frac{1067}{2} = 1,474.5 \text{ W}$$

$\therefore$ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ เมื่อจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ 70 A เท่ากับ

$$P_{in} = V \times I_m = 200 \times 70 = 14,000 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{in} - Losses}{P_{in}} \times 100 \, \%$$

$$\eta = \frac{14,000 - 1,474.5}{14,000} \times 100 \, \%$$

$$\eta = 89.5 \, \%$$

หาความเร็วของมอเตอร์จากสมการ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}}$$

เมื่อ

$$E_{b1} = V - I_{a1} R_a = 200 - (50.83 \times 0.2065) = 189.50 \text{ V}$$

$$E_{b2} = V - I_{a2} R_a = 200 - (67.50 \times 0.2065) = 186.06 \text{ V}$$

$\therefore$ ความเร็วของมอเตอร์ เมื่อจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ 70 A เท่ากับ

$$\frac{N_2}{800} = \frac{186.06}{189.50}$$

$$N_2 = 800 \times \frac{186.06}{189.50} = 785.5 \text{ rpm}$$

ตัวอย่างที่ 13.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 210 V ให้กำลังขาออก 18 kW เมื่อกำลังไฟฟ้าขาเข้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เท่ากับ 21 kW มีค่าความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็ก 60 Ω และความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.05 Ω จงหาประสิทธิภาพของมอเตอร์และกำลังไฟฟ้าขาเข้า ถ้ากำลังขาออกของมอเตอร์เท่ากับ 8 kW และมีกระแสไหลเข้าอาร์เมเจอร์ 47.2 A

วิธีทำ

สภาวะที่ 1 มอเตอร์มีกำลังขาออก เท่ากับ 18 kW และกำลังขาเข้า 21 kW

ดังนั้น กำลังสูญเสียรวมของมอเตอร์ เท่ากับ

$$\begin{aligned} Total\ losses &= P_{in} - P_{out} \\ &= 21 - 18 \\ &= 3\ \text{kW} = 3,000\ \text{W} \end{aligned}$$

กระแสขาเข้าของมอเตอร์ เท่ากับ

$$I_m = \frac{P_{in}}{V} = \frac{21,000}{210} = 100\ \text{A}$$

กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} = \frac{210}{60} = 3.5\ A$$

กระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$I_a = I_m - I_{sh} = 100 - 3.5 = 96.5\ \text{A}$$

ความสูญเสียที่อาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$I_a^2 R_a = 96.5^2 \times 0.05 = 465.6\ \text{W}$$

จาก

$$Total\ losses = I_a^2 R_a + P_c$$

$\therefore$ ความสูญเสียคงที่ เท่ากับ

$$P_c = Total\ losses - I_a^2 R_a$$
$$P_c = 3,000 - 465.6 = 2,534.4\ \text{W}$$

สภาวะที่ 2 มอเตอร์มีกำลังขาออก เท่ากับ 8 kW และมีกระแสไหลเข้าอาร์เมเจอร์ 47.2 A

กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ เท่ากับ

$$I_m = I_a + I_{sh} = 47.2 - 3.5 = 50.7\ \text{A}$$

กำลังขาเข้าของมอเตอร์ เท่ากับ

$$P_{in} = V \times I_m = 210 \times 50.7 = 10,647\ \text{W}$$

$\therefore$ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ เมื่อมีกำลังขาออก เท่ากับ 8 kW เท่ากับ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{8,000}{10,647} \times 100 = 75\ \%$$

ตัวอย่างที่ 13.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขนาด 4,000 W, 220 V ขณะยังไม่จ่ายโหลดกินกระแส 5 A ความต้านทานอาร์เมเจอร์และความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็กเป็น 0.1 Ω และ 110 Ω ตามลำดับ จงหาค่าความสูญเสียคงที่ของมอเตอร์ และหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด เมื่อกระแสขาเข้าของมอเตอร์ที่พิกัดเท่ากับ 21.5 A

วิธีทำ

กำลังไฟฟ้าขาเข้าขณะยังไม่จ่ายโหลด เท่ากับ

$$P_{in} = V \times I_{m1} = 220 \times 5 = 1{,}100 \text{ W}$$

กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} = \frac{220}{110} = 2 \text{ A}$$

ความสูญเสียในขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh}^2 \times R_{sh} = 2^2 \times 110 = 440 \text{ W}$$

ความสูญเสียที่อาร์เมเจอร์ขณะยังไม่จ่ายโหลด เท่ากับ

$$I_a = I_{m1} - I_{sh} = 5 - 2 = 3 \text{ A}$$

$$I_a^2 R_a = 3^2 \times 0.1 = 0.9 \text{ W}$$

$\therefore$ การสูญเสียคงที่ เท่ากับ

$$Stray\ loss = P_{in} - (I_a^2 R_a + I_{sh}^2 R_{sh})$$

$$Stray\ loss = 1{,}100 - (0.9 + 440) = 659.1 \text{ W}$$

ขณะมอเตอร์ทำงานเต็มพิกัด กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ เท่ากับ

$$I_m = I_a + I_{sh} = 21.5 + 2 = 23.5 \text{ A}$$

กำลังไฟฟ้าขาเข้าขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด เท่ากับ

$$P_{in} = V \times I_{m2} = 220 \times 23.5 = 5{,}170 \text{ W}$$

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด เท่ากับ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{4{,}000}{5{,}170} \times 100 = 77.37\ \%$$

ตัวอย่างที่ 13.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน กินกระแส 80 A 220 V ที่พิกัด มีความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.2 Ω ความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็ก 110 Ω ถ้าค่าความสูญเสียคงที่เท่ากับ 800 W จงหา

ก) กำลังขาออกของมอเตอร์ ข) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า

ค) ประสิทธิภาพทางกล ง) ประสิทธิภาพรวมของมอเตอร์

วิธีทำ

กำลังไฟฟ้าขาเข้าขณะยังไม่จ่ายโหลด เท่ากับ

$$P_{in} = V \times I_m = 220 \times 80 = 17,600 \text{ W}$$

กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} = \frac{220}{110} = 2 \text{ A}$$

ความสูญเสียที่อาร์เมเจอร์ขณะยังไม่จ่ายโหลด เท่ากับ

$$I_a = I_m - I_{sh} = 80 - 2 = 78 \text{ A}$$

$$I_a^2 R_a = 78^2 \times 0.2 = 1,216.8 \text{ W}$$

ความสูญเสียในขดลวดสนามแม่เหล็กขนาน เท่ากับ

$$I_{sh}^2 \times R_{sh} = 2^2 \times 110 = 440 \text{ W}$$

การสูญเสียในขดลวดทองแดงรวม เท่ากับ

$$Total\ Copper\ Losses = I_a^2 R_a + I_{sh}^2 R_{sh} = 1,216.8 + 440 = 1,656.8 \text{ W}$$

กำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ เท่ากับ

$$P_a = E_b I_a$$

$$P_a = P_{in} - Total\ Copper\ Loss$$

$$P_a = 17,600 - 1656.8 = 15,943.2 \text{ W}$$

(ก) กำลังขาออกของมอเตอร์ เท่ากับ

$$P_{out} = P_a - Stray\ Losses = 15,943.2 - 800 = 15,143.2 \text{ W}$$

(ข) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า

$$\eta_e = \frac{P_a}{P_{in}} = \frac{E_b I_a}{V_m I_m}$$

$$\eta_e = \frac{15,943.2}{17,600} \times 100 = 90.6\ \%$$

ค) ประสิทธิภาพทางกล

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_a}$$

$$\eta_m = \frac{15,143.2}{15,943.2} \times 100 = 94.9\ \%$$

ง) ประสิทธิภาพรวมของมอเตอร์

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\eta = \frac{15,143.2}{17,600} \times 100 = 86\ \%$$

สรุปท้ายบท

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง การสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการสูญเสียประกอบด้วยการสูญเสียทางไฟฟ้าในขดลวดทองแดง การสูญเสียในแกนเหล็ก และการสูญเสียทางกลจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลม ซึ่งทำให้กำลังขาออกมีค่าน้อยกว่ากำลังขาเข้า นอกจากนี้ยังกล่าวถึงแผนผังกำลัง ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางกล และประสิทธิภาพรวมของมอเตอร์ รวมถึงเงื่อนไขการเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ ความสูญเสียไม่คงที่เท่ากับความสูญเสียคงที่ และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับภาระของมอเตอร์

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 13

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตัวหนึ่งใช้แรงดันไฟฟ้า 220 V และมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้า 5 A ถ้ามอเตอร์นี้สร้างกำลังงานกลที่เพลาได้ 880 W จงหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เครื่องนี้ (ตอบ 80 %)
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 400 V กินกระแสไฟฟ้า 50 A มอเตอร์มีความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.5 Ω และความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็ก 200 Ω ถ้ามีกำลังสูญเสียทางกลและแกนเหล็กรวมกัน 500 W จงหาประสิทธิภาพรวมของมอเตอร์ (ตอบ 87.74 %)
3. มอเตอร์กระแสตรงตัวหนึ่งมีประสิทธิภาพ 85 % สามารถจ่ายกำลังทางกลขับโหลดที่เพลาได้สูงสุด 3.4 kW ถ้าวัดกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้งานได้ 16 A อยากทราบว่ามอเตอร์ตัวนี้ถูกต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันกี่โวลต์
4. มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม ต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้า 250 V กินกระแสไฟฟ้า 20 A ความต้านทานอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 0.3 Ω และความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรม เท่ากับ 0.2 Ω ถ้ามอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,200 rpm และมีความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมรวมกับความสูญเสียในแกนเหล็ก เท่ากับ 400 W จงหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ (ตอบ 88 %)
5. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขนาด 15 kW, 250 V ขณะยังไม่จ่ายโหลดกินกระแส 5 A ความต้านทานอาร์เมเจอร์และความต้านทานขดลวดสนามแม่เหล็กเป็น 0.5 Ω และ 125 Ω ตามลำดับ จงหาค่าความสูญเสียคงที่ของมอเตอร์ และหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด เมื่อกระแสขาเข้าของมอเตอร์ที่พิกัดเท่ากับ 75.9 A (ตอบ 1,245.5 W, 79 %)
6. เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานเครื่องหนึ่ง เมื่อทำงานเป็นมอเตอร์ขณะไม่มีโหลดกินกำลังไฟฟ้า 420 W ที่แรงดัน 210 V ความเร็ว 800 rpm กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแม่เหล็ก 1 A มีความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.4 Ω จงคำนวณหาประสิทธิภาพเมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานในสภาวะต่อไปนี้

    ก) ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแส 35 A ที่แรงดัน 200 V (ตอบ 88.7 %)

    ข) ทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากินกระแส 35 A ที่แรงดัน 200 V (ตอบ 88 %)

14 เอกสารประกอบการทดลองหม้อแปลงไฟฟ้า

Transformer Laboratory Manual

การทดลองเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า การศึกษาหลักการทำงาน คุณลักษณะ และสมรรถนะของอุปกรณ์นี้เป็นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาความรู้และทักษะทางวิศวกรรมไฟฟ้า การเรียนภาคทฤษฎีช่วยให้นักศึกษาเข้าใจหลักการและความสัมพันธ์ต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตาม การเรียนรู้จากทฤษฎีเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้นักศึกษามองเห็นพฤติกรรมการทำงานจริงของอุปกรณ์ ดังนั้นการปฏิบัติการในห้องทดลองจึงมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงความรู้ทางทฤษฎีเข้ากับการประยุกต์ใช้งานจริง การทดลองเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าจะช่วยให้นักศึกษาเข้าใจลักษณะการทำงานของหม้อแปลง นอกจากนี้ การปฏิบัติการยังช่วยพัฒนาทักษะที่จำเป็นสำหรับวิศวกรไฟฟ้า ได้แก่ การใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า การต่อวงจรทดลอง การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลทางทฤษฎี ตลอดจนการปฏิบัติงานภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นทักษะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานจริง

การทดลองเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้าในบทนี้ แบ่งออกเป็น 5 การทดลอง ดังต่อไปนี้

- การทดลองที่ 1 การหาอัตราส่วนและการหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า
- การทดลองที่ 2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร
- การทดลองที่ 3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร
- การทดลองที่ 4 การทดสอบหาค่าโวลเตจเรกูเลชันของหม้อแปลง
- การทดลองที่ 5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส เป็น 3 เฟส

การทดลองที่ 1

การหาอัตราส่วนและการหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Ratio)
2. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Polarity)
3. เพื่อให้นักศึกษาสามารถทำการทดสอบหาอัตราส่วนและหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การทดสอบหาอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า

อัตราส่วนของหม้อแปลง (Transformer ratio) คือ อัตราส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ของ แรงดัน กระแส และจำนวนรอบของขดลวด ระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าว คือ

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (1.1)$$

เมื่อ

a คือ อัตราส่วนของหม้อแปลง
E_1 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
E_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิ
N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิ
I_1 คือ กระแสทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)
I_2 คือ กระแสทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

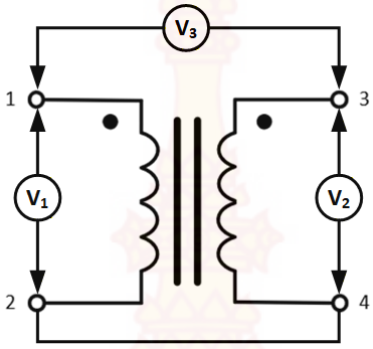
2. การทดสอบหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีลักษณะเฉพาะตามทิศทางที่สัมพันธ์กันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทั้ง 2 ด้าน การต่อหม้อแปลงไฟฟ้าหลายตัวเข้าด้วยกันจำเป็นต้องรู้ถึงขั้วที่สัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าได้โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ตามรูปที่ 1-1 และรูปที่ 1-2 ซึ่งถ้าหากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เป็นไปตามสมการที่ 1-2 จะเรียกผลลักษณะนี้ว่าขั้วเหมือน หรือขั้วเสริมกัน (Additive Polarity) แต่ถ้าผลที่ได้เป็นไปตามสมการที่ 1-3 จะเรียกผลลักษณะนี้ว่าขั้วต่าง หรือขั้วหักล้างกัน (Subtractive Polarity)

ในการกำหนดขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้ามีความจำเป็นมากในการนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส มาต่อใช้งานร่วมกันเป็น 3 เฟส เราสามารถใช้สัญลักษณ์ ± หรือ ● ในการกำหนดขั้วของขดลวดทางด้านแรงสูง และทางด้านแรงต่ำได้

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบขั้วเหมือน หรือ ขั้วเสริม (Additive)

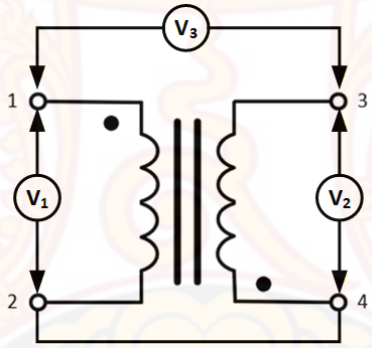
$$V_3 = V_1 + V_2 \tag{1.2}$$



รูปที่ 1-1 ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเสริมกัน

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบขั้วต่าง หรือ ขั้วหักล้างกัน (Subtractive)

$$V_3 = V_1 - V_2 \tag{1.3}$$

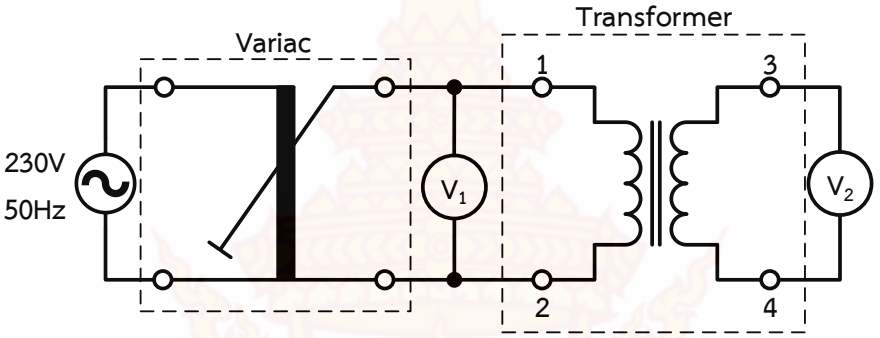


รูปที่ 1-2 ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบหักล้างกัน

การทดลองที่ 1.1 การทดสอบหาอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	1	เครื่อง
2. วาริแอค	1	เครื่อง
3. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
4. ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์	1	เครื่อง
5. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 1.3 วงจรทดสอบการทดลองที่ 1.1

ขั้นตอนการทดลอง

1) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V

2) ต่อวาริแอคกับหม้อแปลงไฟฟ้าตามรูปที่ 1-3

3) ปรับวาริแอคเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_1 ที่จ่ายให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 100V

4) วัดแรงดันไฟฟ้า V_2 และบันทึกผลในตารางที่ 1.1

5) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_1 ขึ้นครั้งละ 50 V ตามตารางที่ 1.1

6) คำนวณค่าอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า และบันทึกผลในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ผลการทดลองการขั้วของหม้อแปลง

แรงดันไฟฟ้า V_1 (V)	แรงดันไฟฟ้า V_2 (V)	อัตราส่วนหม้อแปลง
100		
150		
200		

สรุปผลการทดลองที่ 1.1

.....

.....

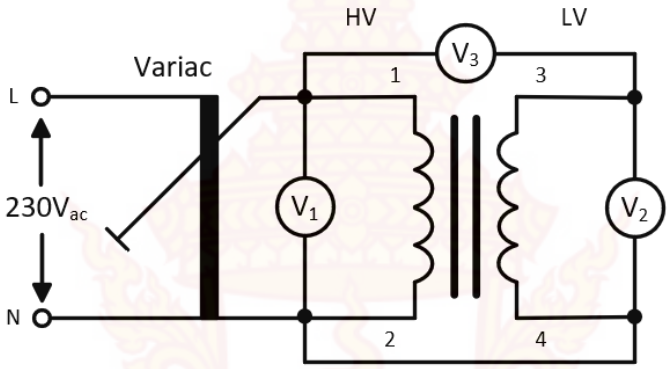
.....

.....

การทดลองที่ 1.2 การทดสอบหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	1	เครื่อง
2. วาริแอค	1	เครื่อง
3. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
4. ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์	1	เครื่อง
5. สายต่อวงจร	1	ชุด



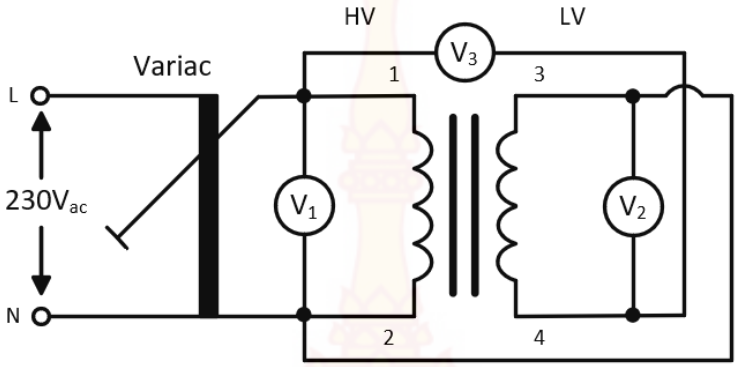
รูปที่ 1.4 วงจรทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง ครั้งที่ 1

ขั้นตอนการทดลอง

1) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V
2) ต่อวาริแอคกับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิตามรูปที่ 1.4
3) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ด้านปฐมภูมิตามตารางการทดลองที่ 1.2
4) วัดแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และบันทึกผลในตารางที่ 1.2
5) คำนวณค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า และบันทึกผลในตารางที่ 1.2
6) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิขึ้นครั้งละ 50 V ตามตารางที่ 1.2
7) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V จากนั้นปิดเบรกเกอร์

ตารางที่ 1.2 ผลการทดลองการหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า ครั้งที่ 1

ครั้งที่	แรงดันด้านปฐมภูมิ (V_1)	แรงดันด้านทุติยภูมิ (V_2)	แรงดันตกคร่อม 2 ขด (V_3)	ขั้วของหม้อแปลง (Add, Sub)
1	100			
2	150			
3	200			



รูปที่ 1.5 วงจรทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง ครั้งที่ 2

ขั้นตอนการทดลอง (ต่อ)

8) ต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 1.5
9) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ด้านปฐมภูมิตามตารางการทดลองที่ 1.3
10) วัดแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และบันทึกผลในตารางที่ 1.3
11) คำนวณค่าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า และบันทึกผลในตารางที่ 1.3
12) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิขึ้นครั้งละ 50 V ตามตารางที่ 1.3
13) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V จากนั้นปิดเบรกเกอร์

ตารางที่ 1.3 ผลการทดลองการหาขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า ครั้งที่ 2

ครั้งที่	แรงดันด้านปฐมภูมิ (V_1)	แรงดันด้านทุติยภูมิ (V_2)	แรงดันตกคร่อม 2 ขด (V_3)	ขั้วของหม้อแปลง (Add, Sub)
1	100			
2	150			
3	200			

สรุปผลการทดลองที่ 1.2

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองหาอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าในการทดลองที่ 1.1 ถ้าหากจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 1,000 รอบขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะมีค่าเท่าใด (แสดงวิธีคำนวณ)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. การทดสอบหาขั้วหม้อแปลงไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างไร จงอธิบายตามความเข้าใจของนักศึกษา

.....

.....

.....

.....

.....

.....

การทดลองที่ 2

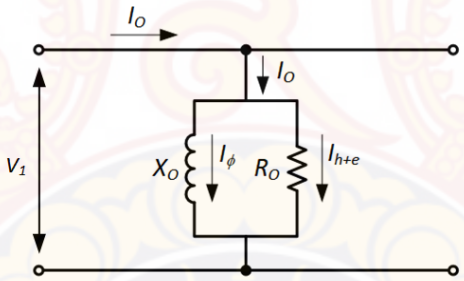
การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจรได้
3. เพื่อให้นักศึกษามีทักษะในการใช้งานเครื่องมือวัดในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

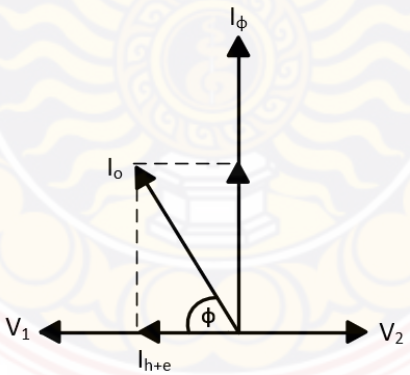
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจรหรือขณะไม่มีโหลดเป็นการทดสอบหา ค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (Iron Losses or Core Losses) และค่าความสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss) การทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง และเปิดวงจรทางด้านแรงดันสูง แล้วทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบจะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ทางด้านแรงต่ำจะมีค่าน้อยมากเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าขณะเปิดวงจรน้อยมากจึงทำให้สามารถตัดค่าอิมพีแดนซ์ออกจากวงจรได้ โดยสามารถวาดวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจรได้ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

จากลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้า สามารถนำมาเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

เมื่อ

V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ หน่วย V

V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ หน่วย V

I_o คือ กระแสไฟฟ้ารวมขณะไม่มีโหลด หน่วย A

I_{h+e} คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก หน่วย A

$I\phi$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย A

R_o คือ ค่าความต้านทานสมมูลของแกนเหล็ก หน่วย Ω

X_o คือ ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของแกนเหล็ก หน่วย H

จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะเปิดวงจรทำให้สามารถหาค่าความต้านทานสมมูลของแกนเหล็ก (R_o) ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของแกนเหล็ก (X_o) ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (I_{h+e}) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก ($I\phi$) ได้ดังสมการต่อไปนี้

จากสูตรการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง

$$P = V_{OL} \cdot I_o \cdot \cos\phi \tag{2.1}$$

ทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์

$$\cos\theta_{OL} = \frac{P}{V_{OL} \cdot I_o} \tag{2.2}$$

เมื่อทราบค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์จะสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้า ($I\phi$) และ ($_{Ih+e}$) ได้ดังนี้

$$I_\phi = I_o \sin\theta_{OL} \tag{2.3}$$

$$I_{h+e} = I_o \cos\theta_{OL} \tag{2.4}$$

เมื่อทราบหาค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการที่ 2.4 และ 2.5 สามารถนำค่ากระแสไฟฟ้ามาใช้หาค่าความต้านทานสมมูลของแกนเหล็ก และค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของแกนเหล็กได้ดังนี้

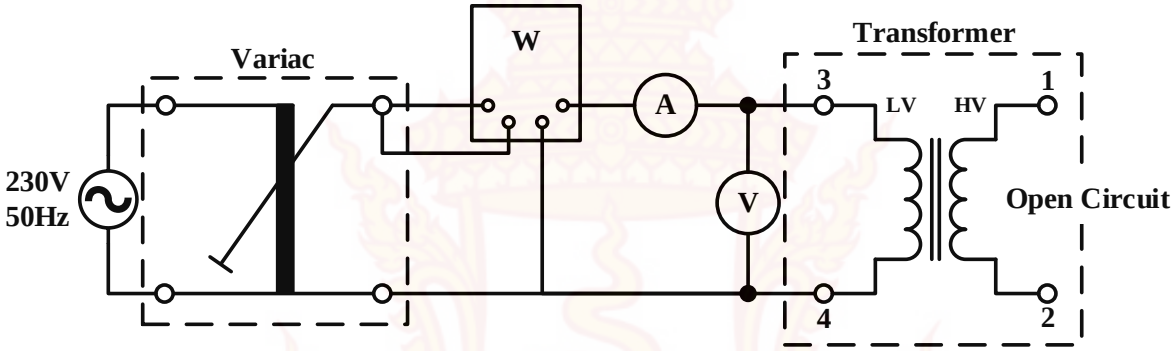
$$R_o = \frac{V_{OL}}{I_{h+e}} \tag{2.5}$$

$$X_o = \frac{V_{OL}}{I_\phi} \tag{2.6}$$

การทดลองที่ 2.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	1	เครื่อง
2. วาริแอค	1	เครื่อง
3. โวลต์มิเตอร์	1	เครื่อง
4. แอมมิเตอร์	1	เครื่อง
5. เพาเวอร์มิเตอร์	1	เครื่อง
6. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 2.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร

ขั้นตอนการทดลอง

1) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V
2) ต่อวาริแอคกับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิตามรูปที่ 2.3
3) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ด้านทุติยภูมิตามตารางที่ 2.1
4) วัดแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และบันทึกผลในตารางที่ 2.1
5) วัดกระแสไฟฟ้า และบันทึกผลในตารางที่ 2.1
6) วัดกำลังไฟฟ้า และบันทึกผลในตารางที่ 2.1
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิขึ้นครั้งละ 50 V ตามตารางที่ 2.1
8) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V จากนั้นปิดเบรกเกอร์

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร

ครั้งที่	แรงดันด้านทุติยภูมิ (V_2)	กระแสไฟฟ้า (I_O)	กำลังไฟฟ้า (P_{OL})	ตัวประกอบกำลัง ($\cos\theta$)
1	150			
2	200			

ตารางที่ 2.2 ผลการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

ครั้งที่	**แรงดันด้านทุติยภูมิ** (V_2)	**กระแสสูญเสียในแกนเหล็ก** (I_{h+e})	**กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก** (I_ϕ)
1	150		
2	200		

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากผลการทดลอง จงคำนวณหากระแสไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (I_{h+e}) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก (I_ϕ) พร้อมทั้งวาดเฟสเซอร์ไดอะแกรม

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. จงวาดวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดพร้อมกับใส่ค่าความต้านทานสมมูลของแกนเหล็ก (R_o) และค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของแกนเหล็ก (X_o)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

การทดลองที่ 3

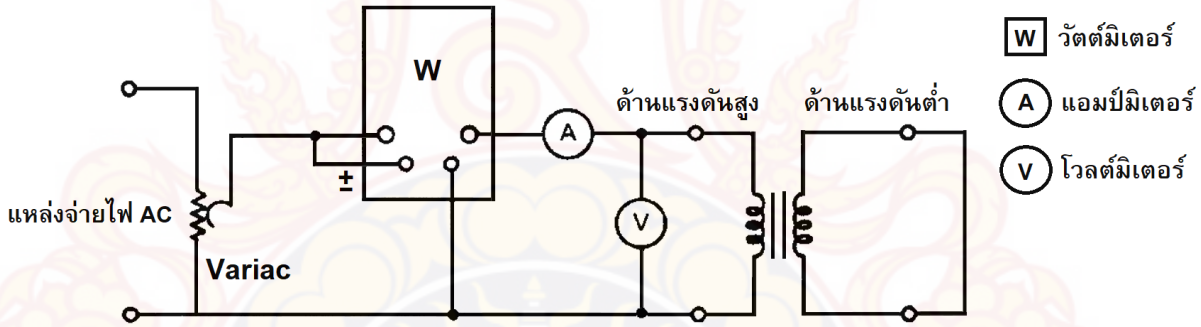
การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร

วัตถุประสงค์

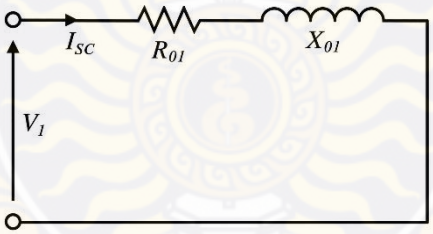
1. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจรได้
3. เพื่อให้นักศึกษามีทักษะในการใช้งานเครื่องมือวัดในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจรเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลง (Copper Loss) ขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด การทดสอบแบบนี้จะทำการต่อวงจรเครื่องมือวัดและแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดแรงสูงและลัดวงจรทางด้านขดลวดแรงต่ำด้วยตัวนำขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 การทดสอบทำโดยปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแรงสูงขึ้นจนกระทั่งแอมป์มิเตอร์สามารถอ่านค่ากระแสได้เต็มพิกัดทางด้านแรงสูงของหม้อแปลง แล้วทำการอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์และวัตต์มิเตอร์



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร

จากการทดสอบหม้อแปลงแบบลัดวงจร ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบ คือ กระแส (I_{SC}) แรงดัน (V_{SC}) และกำลังไฟฟ้า (P_{SC}) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดลองสามารถนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล (R_{01}) รีแอคแตนซ์สมมูล (X_{01}) และอิมพีแดนซ์สมมูล (Z_{01}) ได้ดังต่อไปนี้

ค่าที่อ่านได้จากการทดลอง คือ P_{SC} และ I_{SC} ดังนั้น สมการหาค่ากำลังไฟฟ้า คือ

$$P_{SC} = I_{SC}^2 \cdot R_{01} \tag{3.1}$$

ย้ายข้างสมการหาค่า R_{01} ได้ จาก

$$R_{01} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} \tag{3.2}$$

และสามารถหาค่า Z_{01} ได้ จาก

$$Z_{01} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \tag{3.3}$$

เมื่อ หาค่า Z_{01} ได้แล้ว ก็สามารถหาค่า X_{01} ได้ ดังต่อไปนี้

$$Z_{01}^2 = R_{01}^2 + X_{01}^2 \tag{3.4}$$

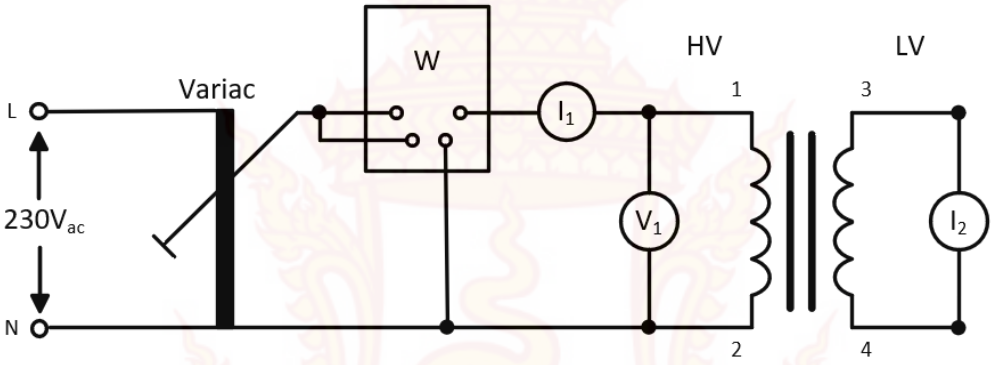
$$X_{01}^2 = Z_{01}^2 - R_{01}^2 \tag{3.5}$$

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} \tag{3.6}$$

การทดลองที่ 3.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	1	เครื่อง
2. วาริแอค	1	เครื่อง
4. ดิจิตอลเพาเวอร์มิเตอร์	1	เครื่อง
5. ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์	1	เครื่อง
6. ดิจิตอลแอมมิเตอร์	1	เครื่อง
7. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร

ขั้นตอนการทดลอง

1) ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V

2) ต่อวาริแอคกับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิตามรูปที่ 3.3

3) ต่อวัตต์มิเตอร์เพื่อใช้วัดกำลังไฟฟ้า โดยเลือกย่านวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสม

4) ต่อโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ด้านปฐมภูมิ และต่อแอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

5) ต่อแอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ

6) ค่อย ๆ ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคจนกระทั่งอ่านค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.1

7) ทำการบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าลงในตารางที่ 3.1

8) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับแรงดันไฟฟ้าที่วาริแอคให้เป็น 0 V จากนั้นปิดเบรกเกอร์

***** ขณะทำการทดลองห้ามปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้หม้อแปลงไฟฟ้าจนกระทั่งกระแสลัดวงจรเกินค่าที่กำหนด และไม่ต่อวงจรทิ้งไว้เวลานานเกิน 1 นาที *****

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร

ครั้งที่	**แรงดันด้านปฐมภูมิ** (V_1)	**กระแสด้านปฐมภูมิ** (I_{SC})	**กำลังไฟฟ้า** (P_{SC})	**กระแสด้านลัดวงจร** (I_2)
1				3
2				3.5
3				4

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร

ครั้งที่	R_{01}	X_{01}	Z_{01}
1			
2			
3			

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากผลการทดลอง จงคำนวณหาค่า R_{02} และ X_{02} และวาดวงจรสมมูลของหม้อแปลงที่ย้ายพารามิเตอร์มาทางทุติยภูมิ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. จากผลการทดลอง จงแสดงการคำนวณหาค่า Z_{02}

.....

.....

.....

.....

.....

.....

การทดลองที่ 4

การทดสอบหาค่าโวลเตจเรกูเลชันของหม้อแปลง

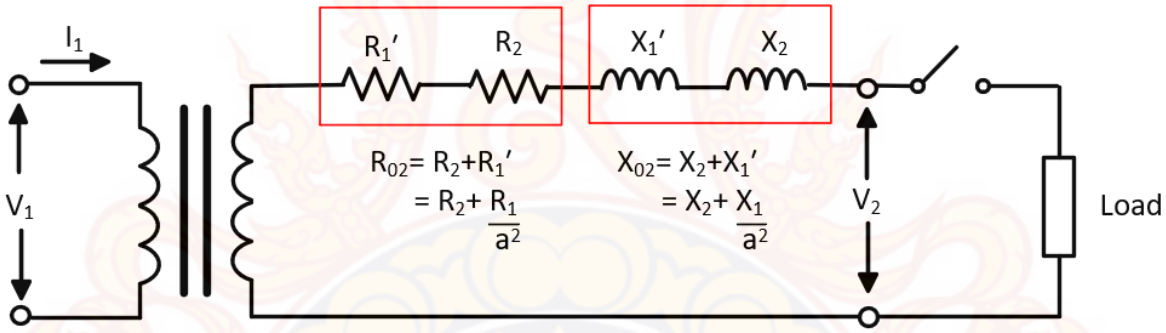
วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทดสอบหาค่าโวลเตจเรกูเลชันของหม้อแปลง
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถสามารถคำนวณหาค่าโวลเตจเรกูเลชันของหม้อแปลงได้

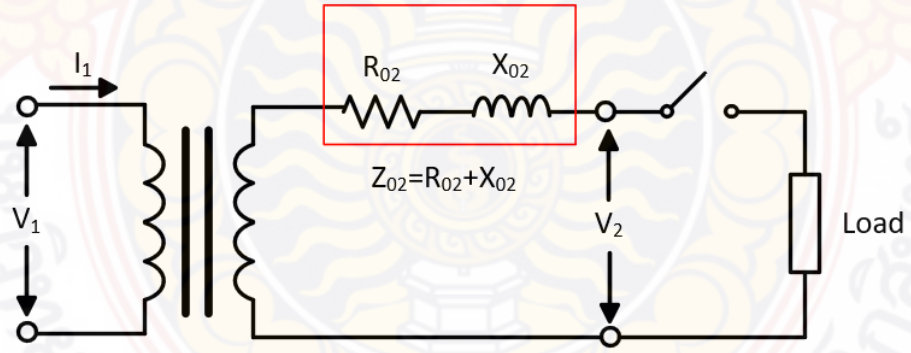
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่โหลดจะต่ออยู่ทางด้านขดลวดทุติยภูมิ และจะถูกออกแบบให้ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าคงที่แต่ในความเป็นจริงแล้วขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

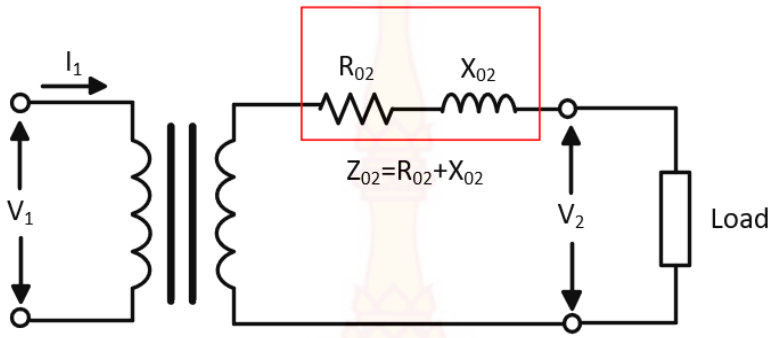
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงจะเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดที่นำมาต่อใช้งาน และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลด ซึ่งถ้าหากโหลดมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง (Lagging) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของโหลดจะตกมากขึ้น โดยเกิดขึ้นได้จากค่าความต้านทาน (R) กับค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล (X_L)



รูปที่ 4-1 วงจรสมมูลโวลเตจเรกูเลชัน กรณีที่ย้ายค่าความต้านทานและรีแอคแตนซ์ไว้ทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 4-2 วงจรสมมูลโวลเตจเรกูเลชันขณะไม่มีโหลด กรณีที่รวมค่าความต้านทานและรีแอคแตนซ์ให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4-3 วงจรสมมูลโวลเตจเรกูเลชันขณะมีโหลด กรณีที่รวมค่าความต้านทานและรีแอคแตนซ์ให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 4-2 เป็นค่าอิมพีแดนซ์รวมของหม้อแปลงไฟฟ้า (Z_{02} หรือ Z_{eq}) ซึ่งถ้าหากยังไม่มีการต่อโหลดให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4-1 หรือ 4-2

$$V_{NL} = \frac{V_1}{a} \qquad (4\text{-}1)$$

หรือ

$$V_2 = \frac{V_1}{a} \qquad (4\text{-}2)$$

จากรูปที่ 4-3 หากทำการปิดสวิตช์เพื่อทำการต่อโหลดให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4-3 หรือ 4-4

$$V_{FL} = \frac{S}{I_2} \qquad (4\text{-}3)$$

หรือ

$$V_2 = \frac{S}{I_2} \qquad (4\text{-}4)$$

ดังนั้น สามารถเรียกค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วในขณะที่ไม่มีโหลดและขณะมีโหลดเต็มพิกัดว่าโวลเตจเรกูเลชัน (Voltage Regulation) ซึ่งสามารถคำนวณในรูปของเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดได้ดังสมการที่ 4-5 และ 4-6 ซึ่งโดยทั่วไปการหาค่าโวลเตจเรกูเลชันของหม้อแปลงไฟฟ้ามักใช้แบบโวลเตจเรกูเลชันดาวน์ (Regulation down)

โวลเตจเรกูเลชันดาวน์ $$Voltage\ \ regulation\ \ (V_{reg}) = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{NL}} \times 100\% \qquad (4\text{-}5)$$

โวลเตจเรกูเลชันอัพ $$Voltage\ \ regulation\ \ (V_{reg}) = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \qquad (4\text{-}6)$$

เมื่อ

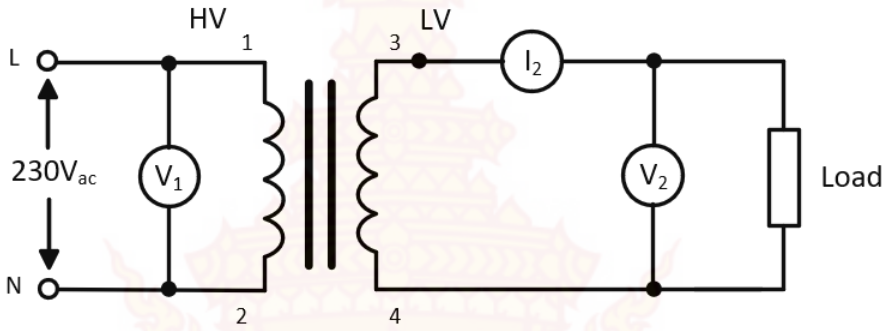
V_{NL} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะยังไม่มีโหลด

V_{FL} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัด

การทดลองที่ 4.1 การทดสอบหาค่าโวลเตจเรกูเลชัน

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	1	เครื่อง
2. ดิจิตอลเพาเวอร์มิเตอร์	1	เครื่อง
3. ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์	1	เครื่อง
4. แผงโหลดหลอดไฟ (จำนวน 5 หลอด หลอดละ 200 วัตต์)	1	ชุด
5. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 4-4 วงจรการทดสอบหาค่าโวลเตจเรกูเลชัน

ขั้นตอนการทดลอง

1) นำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส มาต่อวงจรตามรูปที่ 4-4

2) ต่อเพาเวอร์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงทางด้านทุติยภูมิ และต่อแอมมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ

3) ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{L-L}) ให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (V_1)

4) ค่อยๆ เพิ่มจำนวนโหลดทีละ 200 วัตต์จนโหลดเต็มพิกัด จากนั้นทำการบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจริงลงในตารางที่ 4.1

5) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปิดเบรกเกอร์ทันที

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการทดสอบหาค่าโวลเตจเรกูเลชัน

จำนวนโหลด (200W/หลอด)	**กำลังไฟฟ้าจริง** ($P = V_2 \times I_2$)	**แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ** (V_2)	**กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ** (I_2)
200			
400			
600			
800			
1,000			

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายโวลเตจเรกูเลชันตามความเข้าใจของนักศึกษา (อย่างละเอียด)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. จงคำนวณหาค่าโวลเตจเรกูเลชันดาวน์ กรณีที่จ่ายโหลดเต็มพิกัดที่ 1,000 วัตต์

.....

.....

.....

.....

.....

.....

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

การทดลองที่ 5

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส เป็น 3 เฟส

วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถต่อใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ได้
2. เพื่อให้นักศึกษาสามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า และเลือกรูปแบบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ได้อย่างเหมาะสม

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส โดยนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมาต่อร่วมกันเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟสว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัว ร่วมกันเส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว จะมีมุมเฟสต่างกัน 120 องศา รูปแบบในการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้ามี 2 วิธี คือแบบสตาร์ (Y) และแบบเดลต้า (Δ) ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายออกจะเกิดการเฉลี่ยกันของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ทั้ง 3 ตัว โดยที่พิกัดของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า

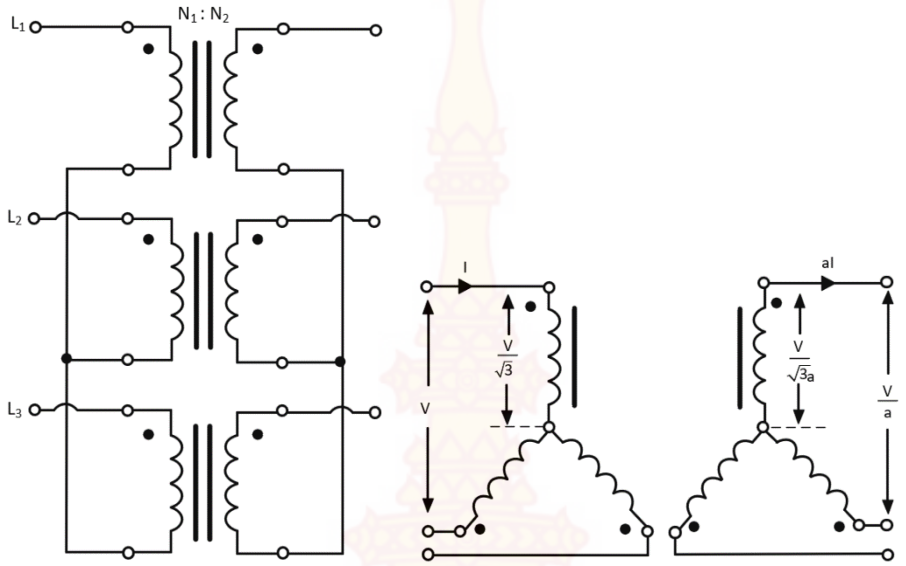
โดยลักษณะการต่อขดลวดด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าให้เป็น 3 เฟส นั้นแบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังนี้

1. Y - Y หรือ Yy โดยขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Y และขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Y เช่นกัน
2. Δ - Δ หรือ Dd โดยขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Δ และขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Δ เช่นกัน
3. Y - Δ หรือ Yd โดยขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Y และขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Δ
4. Δ - Y หรือ Dy โดยขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Δ และขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Y
5. Open-Delta เป็นการนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 2 ตัวมาต่อร่วมกันโดยขดลวดด้านปฐมภูมิต่อแบบ Δ และขดลวดด้านทุติยภูมิต่อแบบ Δ เช่นกัน

รูปแบบการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า มี 5 รูปแบบ ดังนี้

1. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Y-Y

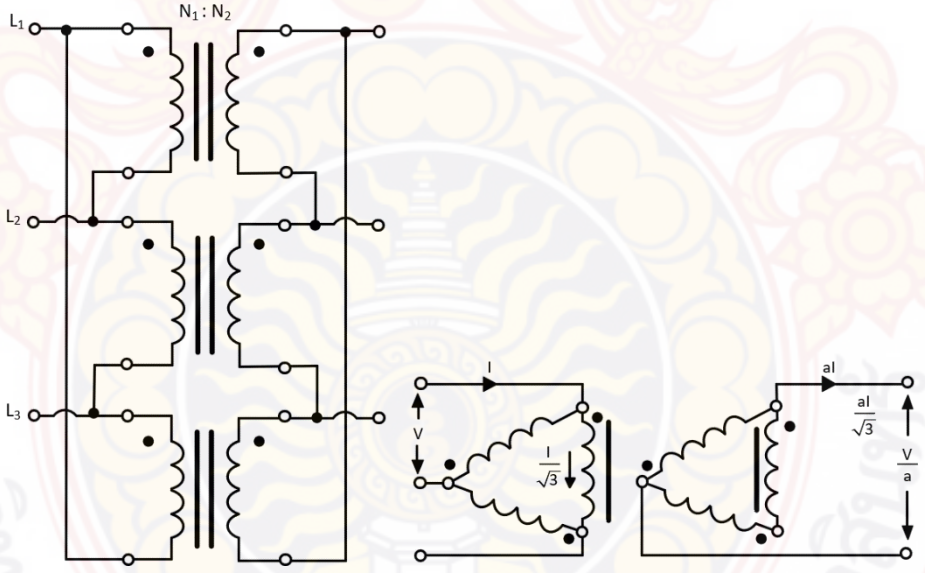
เป็นการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์หรือ Y ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ ซึ่งการต่อใช้งานแบบนี้สามารถใช้งานได้ดี ในกรณีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นโหลดสมดุล



รูปที่ 5.1 วงจรการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Y-Y

2. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Δ-Δ

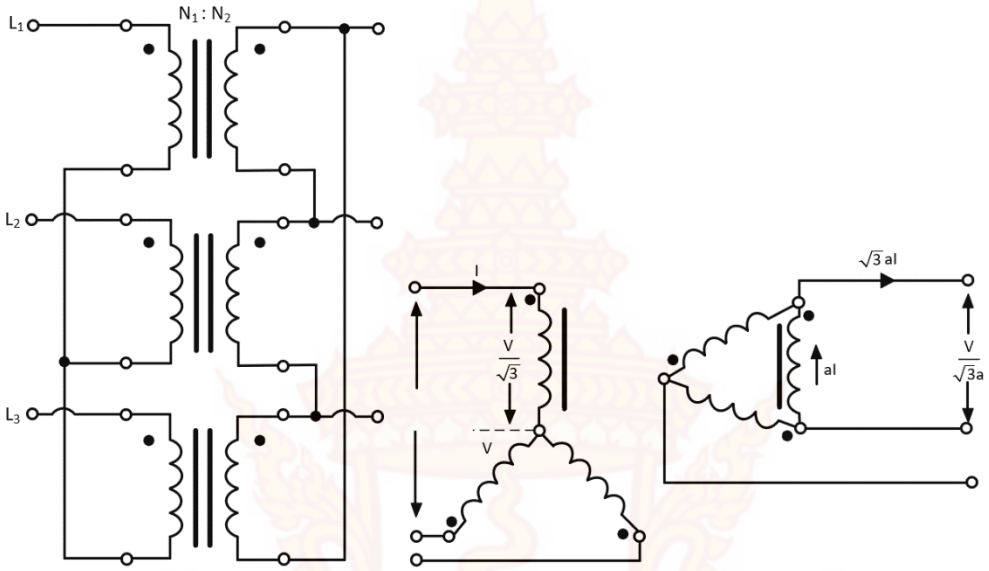
เป็นการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลต้าหรือ Δ ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ ซึ่งการต่อแบบนี้ในปกติจะใช้ในระบบที่มีรงดันไฟฟ้าไม่สูงมากระบบสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องแม้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดความเสียหาย



รูปที่ 5.2 วงจรการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Δ-Δ

3. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Y-Δ

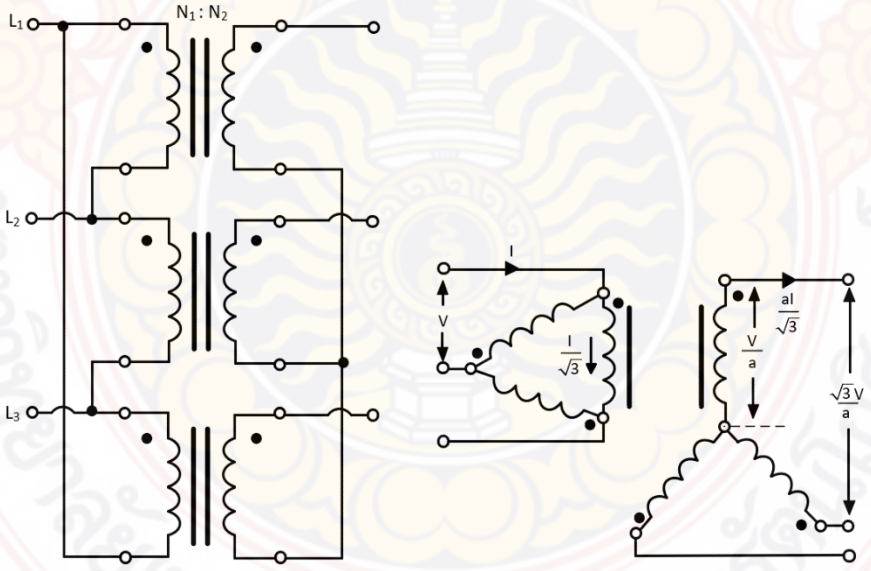
เป็นการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแบบสตาร์หรือ Y และต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิแบบเดลต้าหรือ Δ ซึ่งการต่อแบบนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแปลงแรงดันลงจุดต่อร่วม (N) ทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถต่อลงดินได้



รูปที่ 5.3 วงจรการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Y-Δ

4. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Δ-Y

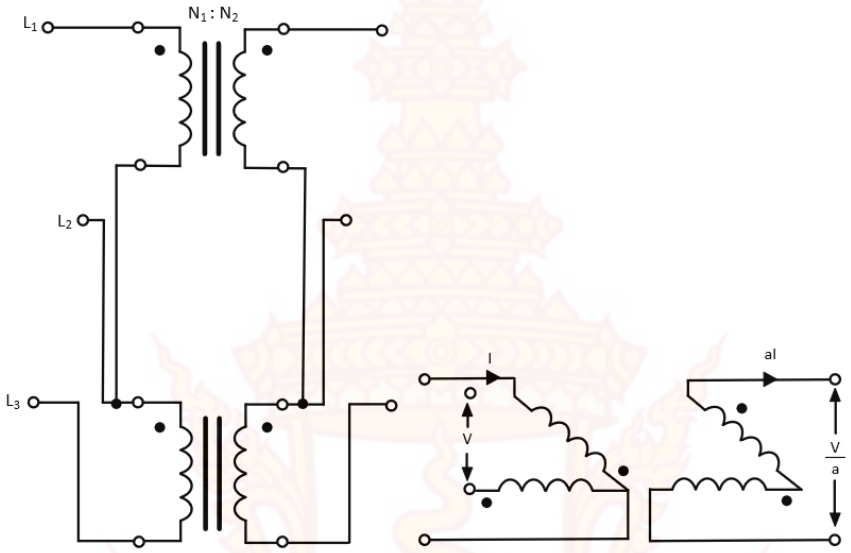
เป็นการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิแบบเดลต้าหรือ Δ และต่อขดลวดทางด้านทุติยภูมิแบบสตาร์หรือ Y ซึ่งการต่อแบบนี้สามารถใช้ได้ทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแปลงแรงดันขึ้น และแปลงแรงดันลง



รูปที่ 5.4 วงจรการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Δ-Y

5. การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Open-Delta

เป็นการต่อขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเดลต้าหรือ Δ ทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ ซึ่งจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 2 ตัว โดยจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความสเถียรของระบบ เนื่องจากมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเหลือเพียง 57.7 %

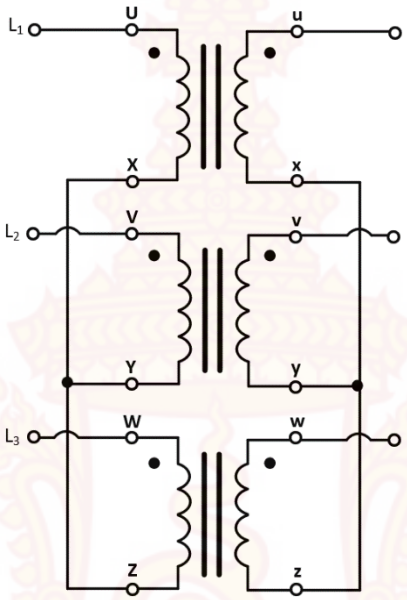


รูปที่ 5.5 วงจรการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Open-Delta

การทดลองที่ 5.1 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Y-Y

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	3	เครื่อง
2. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
3. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 5.6 วงจรการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Y-Y

ขั้นตอนการทดลอง

1) นำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัว มาต่อวงจรตามรูปที่ 5.6
2) ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ
3) ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่าง ๆ และบันทึกผลลงในตารางที่ 5.1
4) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปิดเบรกเกอร์ทันที

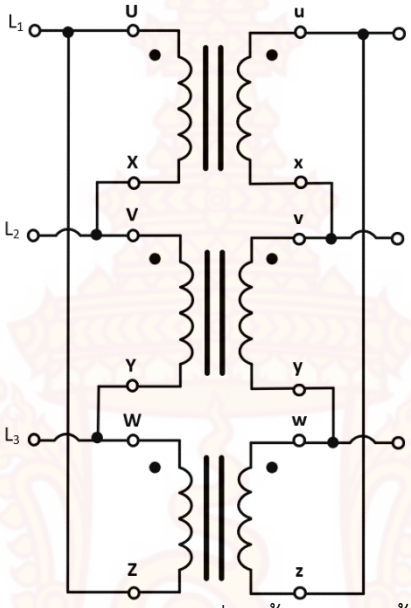
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Y-Y

ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)	ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)
U - X		u - x	
V - Y		v – y	
W - Z		w - z	
U - V		u - v	
U - W		u - w	
V - W		v - w	

การทดลองที่ 5.2 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Δ-Δ

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	3	เครื่อง
2. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
3. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 5.7 วงจรการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Δ-Δ

ขั้นตอนการทดลอง

1) นำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัว มาต่อวงจรตามรูปที่ 5.7
2) ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ
3) ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่าง ๆ และบันทึกผลลงในตารางที่ 5.2
4) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปิดเบรกเกอร์ทันที

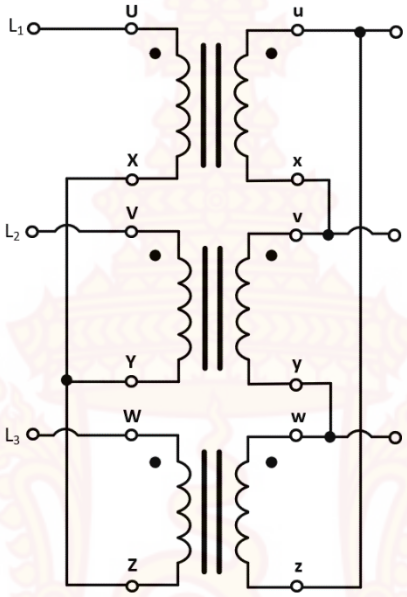
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Δ-Δ

ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)	ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)
U - X		u - x	
V - Y		v – y	
W - Z		w - z	
U - V		u - v	
U - W		u - w	
V - W		v - w	

การทดลองที่ 5.3 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Y-Δ

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	3	เครื่อง
2. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
3. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 5.8 วงจรการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Y-Δ

ขั้นตอนการทดลอง

1) นำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมาต่อวงจรตามรูปที่ 5.8
2) ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ
3) ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่าง ๆ และบันทึกผลลงในตารางที่ 5.3
4) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปิดเบรกเกอร์ทันที

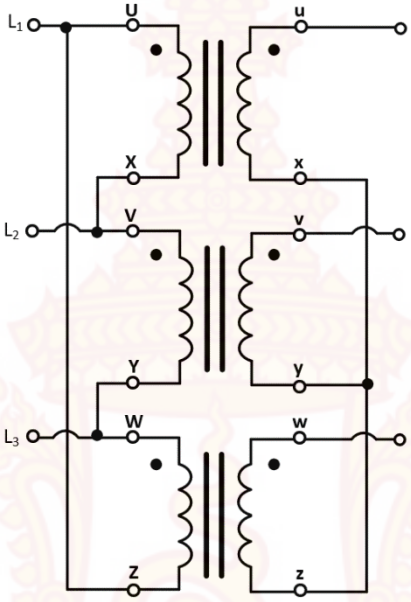
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Y-Δ

ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)	ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)
U - X		u - x	
V - Y		v – y	
W - Z		w - z	
U - V		u - v	
U - W		u - w	
V - W		v - w	

การทดลองที่ 5.4 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Δ-Y

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	3	เครื่อง
2. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
3. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 5.9 วงจรการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Δ-Y

ขั้นตอนการทดลอง

1) นำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัว มาต่อวงจรตามรูปที่ 5.9
2) ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ
3) ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่าง ๆ และบันทึกผลลงในตารางที่ 5.4
4) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปิดเบรกเกอร์ทันที

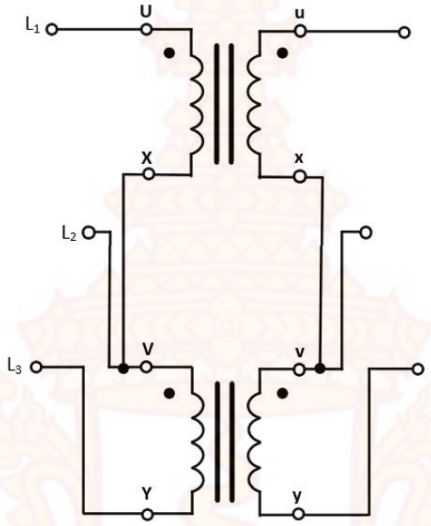
ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Δ-Y

ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)	ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)
U - X		u - x	
V - Y		v – y	
W - Z		w - z	
U - V		u - v	
U - W		u - w	
V - W		v - w	

การทดลองที่ 5.5 การต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Open-Delta

อุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 380/220V	2	เครื่อง
2. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
3. สายต่อวงจร	1	ชุด



รูปที่ 5.10 วงจรการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า Open-Delta

ขั้นตอนการทดลอง

1) นำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 2 ตัว มาต่อวงจรตามรูปที่ 5-10
2) ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ
3) ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่าง ๆ และบันทึกผลลงในตารางที่ 5.5
4) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปิดเบรกเกอร์ทันที

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองการทดสอบการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ Open-Delta

ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)	ขั้วสาย	แรงดันไฟฟ้า (V)
U - X		u - x	
V - Y		v – y	
U - Y		u - y	

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. การนำหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส 3 ตัวมาต่อร่วมกันจะต้องคำนึงถึงสิ่งใดเป็นอย่างแรก

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

15 เอกสารประกอบการทดลองเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

DC Machine Laboratory Manual

การทดลองเรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า การศึกษาหลักการทำงาน คุณลักษณะ และสมรรถนะของอุปกรณ์นี้เป็นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาความรู้และทักษะทางวิศวกรรมไฟฟ้า การเรียนภาคทฤษฎีช่วยให้นักศึกษาเข้าใจหลักการ และความสัมพันธ์ต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตาม การเรียนรู้จากทฤษฎีเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้นักศึกษามองเห็นพฤติกรรมการทำงานจริงของอุปกรณ์ ดังนั้นการปฏิบัติการในห้องทดลองจึงมีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงความรู้ทางทฤษฎีเข้ากับการประยุกต์ใช้งานจริง การทดลองเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจะช่วยให้นักศึกษาเข้าใจลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ นอกจากนี้การปฏิบัติการยังช่วยพัฒนาทักษะที่จำเป็นสำหรับวิศวกรไฟฟ้า ได้แก่ การใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า การต่อวงจรทดลอง การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลทางทฤษฎี ตลอดจนการปฏิบัติงานภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นทักษะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานจริง

การทดลองเรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงในบทนี้ แบ่งออกเป็น 8 การทดลอง ดังต่อไปนี้

- การทดลองที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
- การทดลองที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน
- การทดลองที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม
- การทดลองที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม
- การทดลองที่ 5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
- การทดลองที่ 6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน
- การทดลองที่ 7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม
- การทดลองที่ 8 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม

การทดลองที่ 1

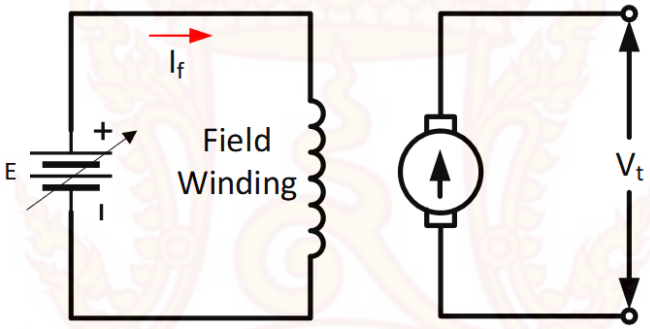
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อวงจรอาร์เมเจอร์แยกกันกับขดลวดสนามแม่เหล็ก โดยขดลวดสนามแม่เหล็กจะได้รับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก ดังรูปที่ 1-1 ซึ่งแหล่งจ่ายภายนอกที่ใช้อาจเป็นแบตเตอรี่หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องอื่นก็ได้



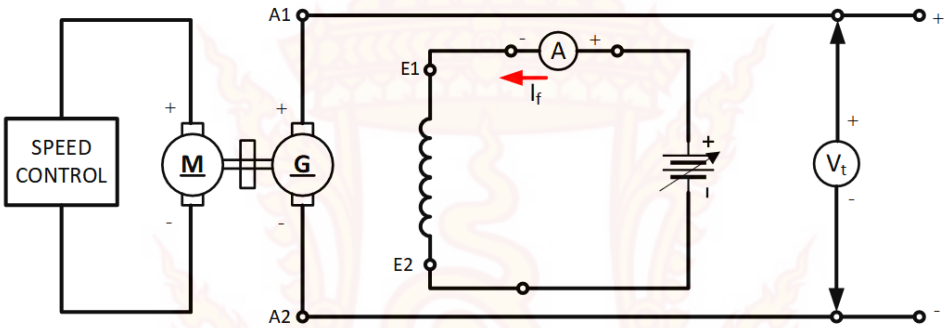
รูปที่ 1.1 การต่อขดลวดสนามกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยก

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก จึงสามารถควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วได้เป็นอย่างดี เพราะมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วและถูกต้องแน่นอนตามการควบคุมกระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก (I_f) จากแหล่งจ่ายภายนอก และยังสามารถตอบสนองได้ดีเมื่อแรงดันขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปในย่านที่กว้าง ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกใช้งานตามปกติ

การทดลองที่ 1.1 การหาความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กกับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกเมื่อความเร็วรอบคงที่ ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
6. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 1.2 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 3,000 รอบต่อนาที ตลอดการทดลอง
4) ปรับกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก (I_f) ตามตารางการทดลองที่ 1.1
5) ทำการอ่านค่าแรงดันของขดลวดสนามแม่เหล็ก และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 1.1
6) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กขึ้นครั้งละ 0.04 A ตามตารางที่ 1.1
7) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับทุกปุ่มที่ค่าเริ่มต้น แล้วปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดสนามแม่เหล็ก (I_f) กับ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (V_t) ขณะไม่มีโหลด ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที

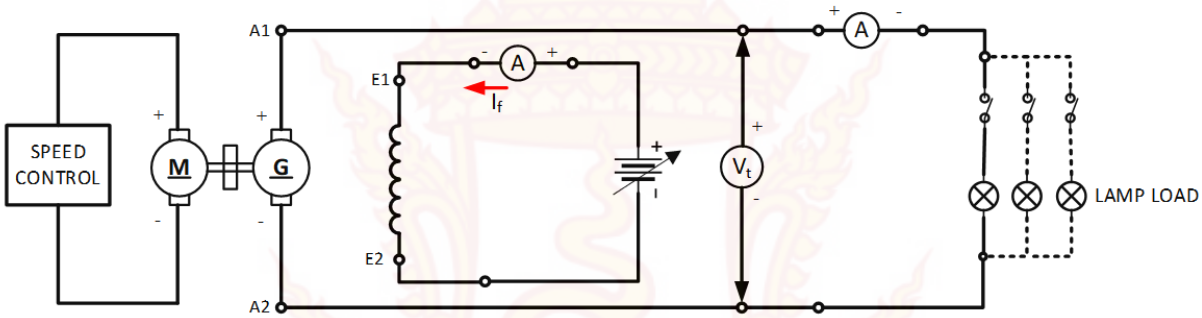
กระแส ของขดลวดสนามแม่เหล็ก $I_f(A)$	**แรงดัน ของขดลวดสนามแม่เหล็ก** $V_f(V)$	**แรงดัน ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t(V)$
0		
0.04		
0.08		
0.12		

เขียนกราฟ $V_t = f\left(I_f\right)$ และวิเคราะห์การทดลอง

การทดลองที่ 1.2 การหาความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลดและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 1.3 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ต่อชุดโหลดหลอดไฟ ปรับสวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ตั้งความเร็วรอบมอเตอร์ 3,000 รอบต่อนาที และปรับกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กเป็น **0.14** A ตลอดการทดลอง
5) เปิดโหลดหลอดไฟ 1 หลอด
6) อ่านค่ากระแสของโหลดและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตาราง 1.2
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 1.2
8) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับทุกปุ่มที่ค่าเริ่มต้น แล้วปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตารางที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลด (I_L) และ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (V_t) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

หลอดไฟ (25W/Lamp)	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก** $I_f(A)$	**แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t(V)$	**กระแสของโหลด** $I_L(A)$	**กำลังไฟฟ้า (คำนวณ)** $P(W)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่โหลด (I_L) กับจำนวนหลอด และ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_t) กับจำนวนหลอด จากนั้นวิเคราะห์การทดลอง

สรุปผลการทดลอง

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกว่าทำงานอย่างไร

2. ให้นักศึกษาบอกส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกี่ส่วนและแต่ละส่วนมีอะไรบ้าง

การทดลองที่ 2

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

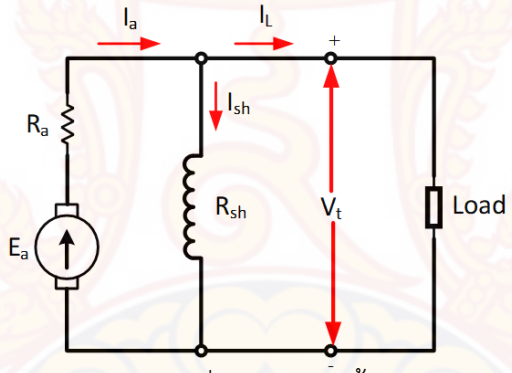
วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานนี้ที่ขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อขนานกับขดลวดอาร์เมเจอร์ วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2-1 ในวงจรนี้กระแสอาร์เมเจอร์ที่จ่ายออกมาจะจ่ายให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กและโหลดที่ต่ออยู่ที่ขั้วด้วย ดังนั้นจะได้

$$I_a = I_{sh} + I_L \qquad (2\text{-}1)$$



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

จาก Kirchhoff's Voltage Law (KVL) จะได้สมการของอาร์เมเจอร์ คือ

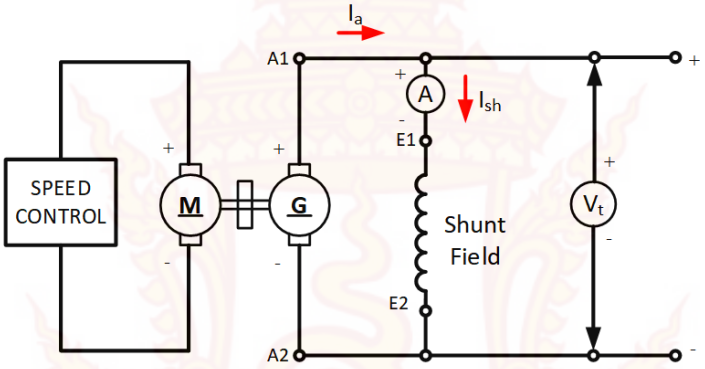
$$V_t = E_a - I_a R_a \qquad (2\text{-}2)$$

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะมีข้อดีกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกที่ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายแหล่งดันจากภายนอกสำหรับขดลวดสนามแม่เหล็ก

การทดลองที่ 2.1 การหาความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดขนานกับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
6. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 2.2 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 1,200 รอบต่อนาที
4) ทำการอ่านค่ากระแสของขดลวดขนาน และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 2.1
5) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบขึ้นครั้งละ 200 รอบต่อนาที ตามตารางที่ 2.1
6) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับทุกปุ่มที่ค่าเริ่มต้น แล้วปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดขนาน (I_{sh}) กับ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (V_t) เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

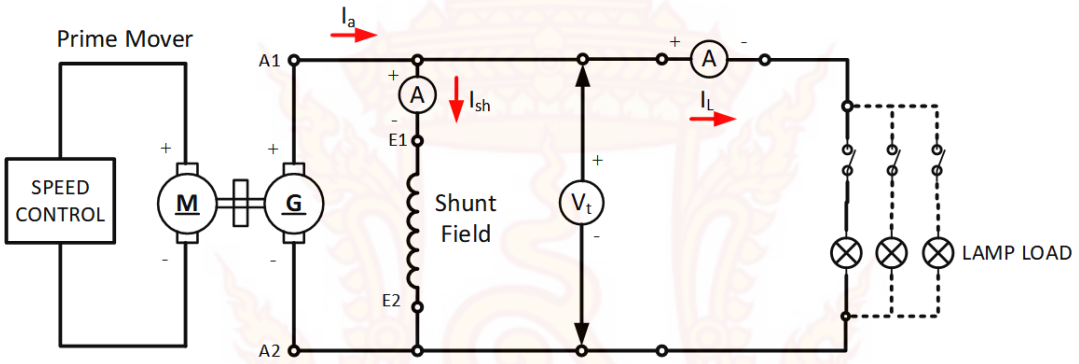
ความเร็วรอบ $N(rpm)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$	**แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t(V)$
1,200		
1,600		
2,000		

เขียนกราฟ $I_{sh} = f(N)$ และ $V_t = f(N)$ จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 2.2 การหาความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลดและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 2.3 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 3,000 รอบต่อนาทีตลอดการทดลอง
5) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6) ทำการอ่านค่ากระแสขดลวดขนาน, กระแสของโหลด และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 2.2
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลด (I_L) และ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (V_t) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

หลอดไฟ (25W/Lamp)	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$	**แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t(V)$	**กระแสของโหลด** $I_L(A)$	**กำลังไฟฟ้า (คำนวณ)** $P(W)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของโหลดกับจำนวนหลอดไฟ และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับจำนวนหลอดไฟ จากนั้นวิเคราะห์การทดลอง

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จงอธิบายหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

---

2. จากการทดลองขณะจ่ายโหลดความเร็วและแรงดันที่ขั้วมีผลเป็นอย่างไร

การทดลองที่ 3

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

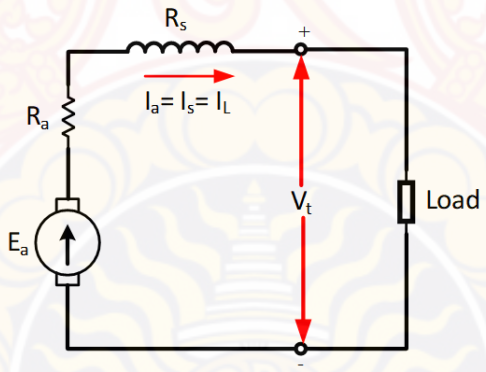
วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมที่ขดลวดสนามแม่เหล็กจะต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจ อร์ จากที่ผ่านมาแล้วที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีกระแสไหลผ่านในปริมาณที่มากกว่ากระแสที่ไหลในขดลวดขนาน ดังนั้นที่ขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ จะต้องมีขดลวดที่มีจำนวนรอบน้อยและค่าความต้านทานต่ำกว่าขดลวดขนาน เพราะจะต้องสามารถรับปริมาณกระแสที่ออกจากขดลวดอาร์เมเจอร์ได้ด้วย (ในขณะจ่ายโหลดที่พิกัด) วงจรสมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 3-1

$$I_a = I_s = I_L \tag{3-1}$$



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

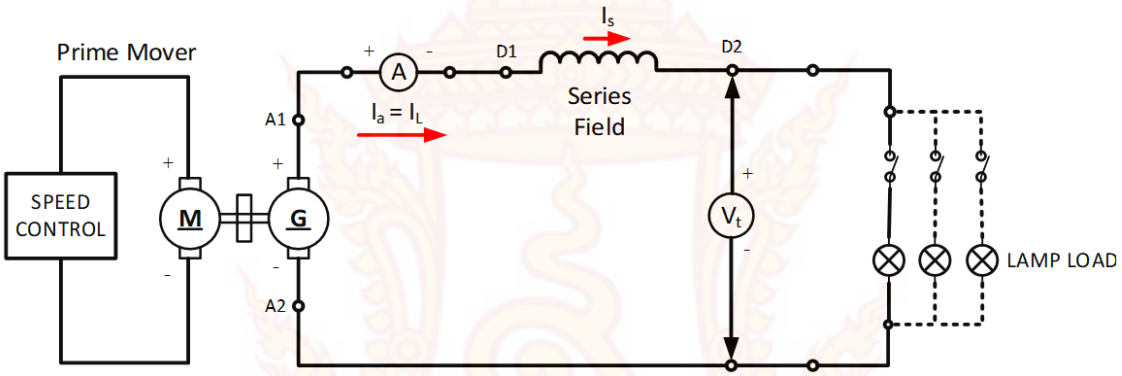
จาก Kirchoff's Voltage (KVL) จะได้

$$V_t = E_A - I_a(R_a + R_s) \tag{3-2}$$

การทดลองที่ 3.1 การหาความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลดและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. Series Universal Motor	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 3.2 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 3,000 รอบต่อนาทีตลอดการทดลอง
5) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6) อ่านค่ากระแสของโหลด และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 3.1
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลด (I_L) และ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมม (V_t) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

หลอดไฟ (25W/Lamp)	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t(V)$	**กระแสของโหลด** $I_L(A)$	**กำลังไฟฟ้า (คำนวณ)** $P(W)$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่โหลดกับจำนวนหลอดไฟ และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วกับจำนวนหลอดไฟ จากนั้นวิเคราะห์การทดลอง

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองทำไมจึงไม่มีการทดสอบแบบไม่จ่ายโหลดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

2. ลักษณะของขดลวดแบบอนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอย่างไร

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้นำไปใช้งานในด้านใด

การทดลองที่ 4

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม

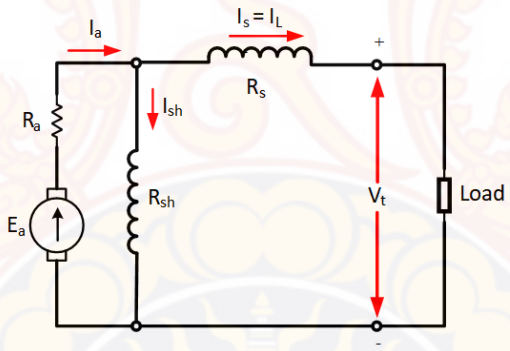
วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

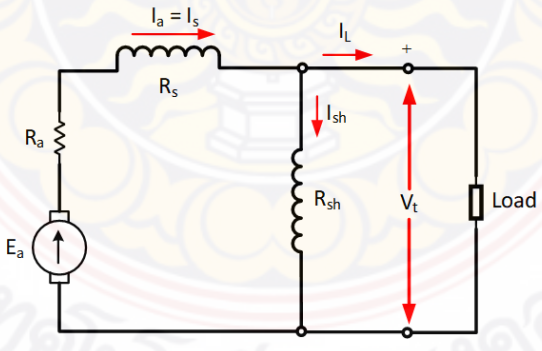
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมประกอบด้วย ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก (Field Winding) ที่มีขดลวดสองชุดที่พันอยู่บนแกนขั้วแม่เหล็กเดียวกัน คือ ชุดขดลวดขนานและขดลวดอนุกรม ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะการต่อใช้งานตามการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กได้ 2 แบบ ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงชนิดผสมที่มีขดลวดขนานต่อกับขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) และขดลวดอนุกรมต่ออนุกรมกับขดลวดขนานตามรูปที่ 4-1



รูปที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงชนิดผสมที่มีขดลวดอนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) และขดลวดขนานตามรูปที่ 4.2

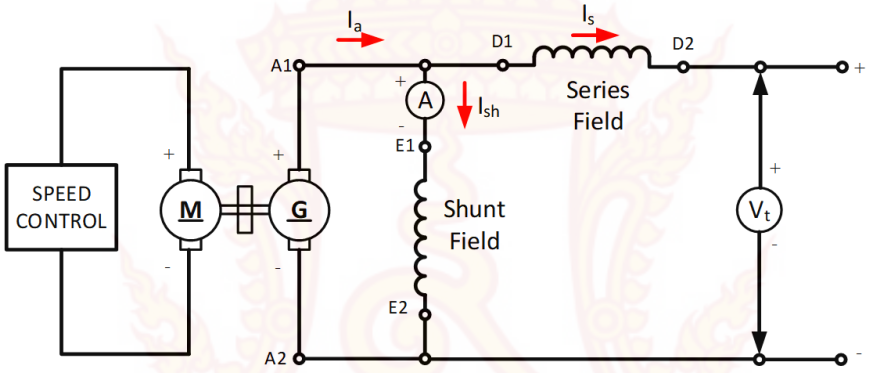


รูปที่ 4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt

การทดลองที่ 4.1 การหาความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดขนานกับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1.	Universal Power Supply	1	เครื่อง
2.	DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3.	Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4.	Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5.	Analog DC Ammeter	2	เครื่อง
6.	Analog DC Voltmeter	2	เครื่อง
7.	Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 4.3 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 1,200 รอบต่อนาที
4) ทำการอ่านค่ากระแสของขดลวดขนาน และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.1
5) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบทีละ 200 รอบต่อนาที ตามตารางที่ 4.1
6) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับทุกปุ่มที่ค่าเริ่มต้น แล้วปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดขนาน (I_{sh}) กับ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt (V_t) เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ความเร็วรอบ $N\left(rpm\right)$	**แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t\left(V\right)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$
1,400		
1,800		
2,200		

เขียนกราฟ $I_{sh} = f\left(V_t\right)$ และวิเคราะห์การทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

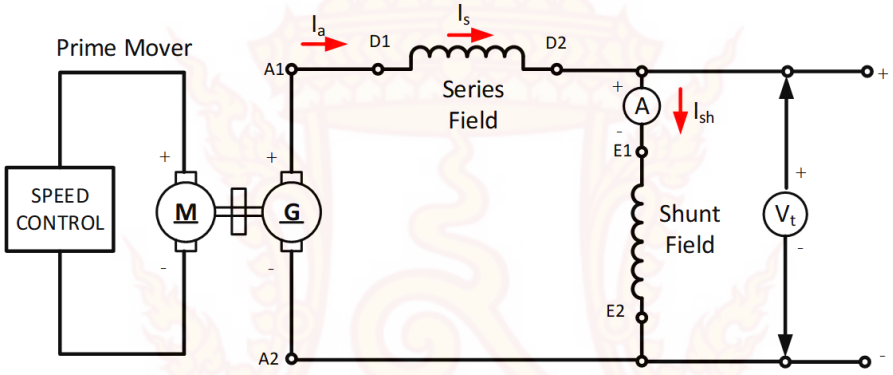
.....

.....

การทดลองที่ 4.2 การหาความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดขนานกับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
6. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 4.4 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt ขณะจ่ายโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
    2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
    2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
    2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
    2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
    2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 1,200 รอบต่อนาที
4) ทำการอ่านค่ากระแสของขดลวดขนาน และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.2
5) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบทีละ 200 รอบต่อนาที ตามตารางที่ 4.2
6) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับทุกปุ่มที่ค่าเริ่มต้น แล้วปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของกระแสขดลวดขนาน (I_{sh}) กับ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt (V_t) เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ความเร็วรอบ $N\left(rpm\right)$	**แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t\left(V\right)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$
1,400		
1,800		
2,200		

เขียนกราฟ $I_{sh} = f\left(V_t\right)$ และวิเคราะห์การทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

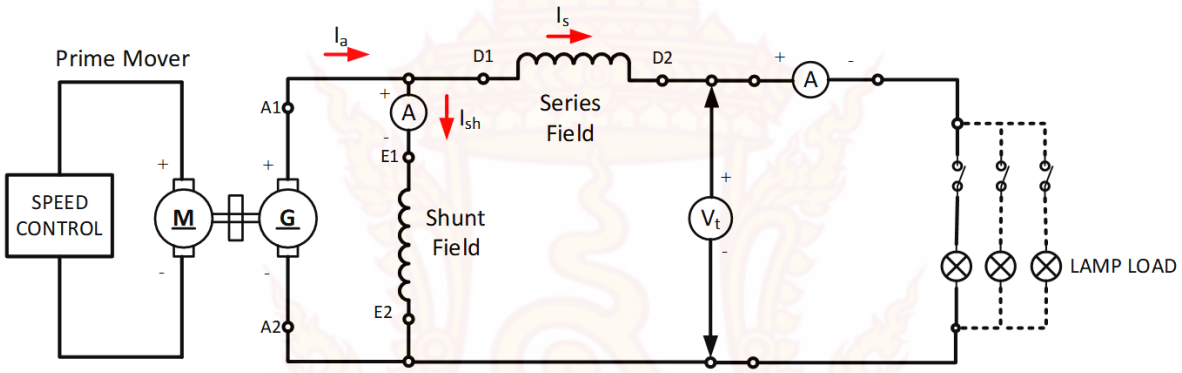
.....

.....

การทดลองที่ 4.3 การหาความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลดและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 4.5 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 3,000 รอบต่อนาทีตลอดการทดลอง
5) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6) ทำการอ่านค่ากระแสขดลวดขนาน กระแสของโหลด และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.3
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลด (I_L) และ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt (V_t) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

หลอดไฟ (25W/Lamp)	ความเร็วรอบ $N(rpm)$	กระแสของขดลวดขนาน $I_{sh}(A)$	แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $V_t(V)$	กระแสของโหลด $I_L(A)$	กำลังไฟฟ้า (คำนวณ) $P(W)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

เขียนกราฟ $R = f(I_L), R = f(V_t)$ และวิเคราะห์การทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

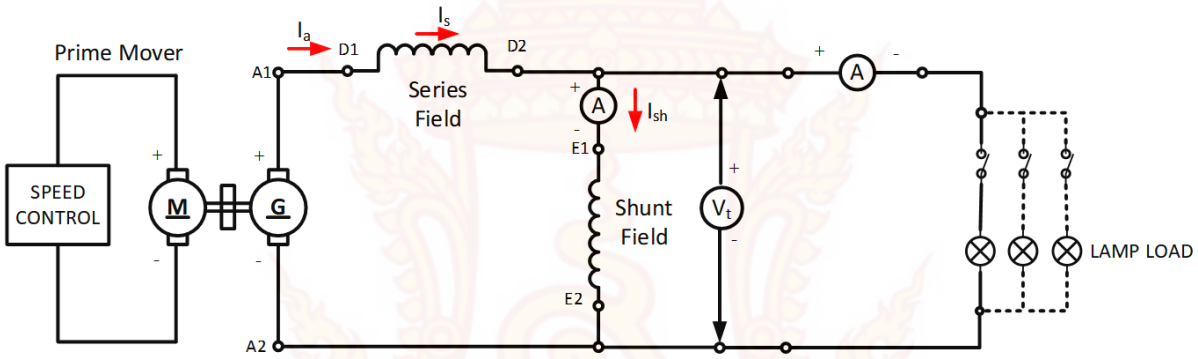
.....

.....

การทดลองที่ 4.4 การหาความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลดและแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3. Torque & Speed Control	1	เครื่อง
4. Dynamometer Machine	1	เครื่อง
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Digital DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Digital DC Voltmeter	2	เครื่อง



รูปที่ 4.6 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
2) ทำการตั้งค่า Torque & Speed Control ดังนี้
   2.1. เปิดสวิตช์ไฟ Power โดยใช้ปุ่มสีเขียว
   2.2. ตรวจเช็คก้านหมุนให้อยู่ในตำแหน่งปิดอยู่และก้านโยกอยู่ในตำแหน่ง Speed
   2.3. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์เข้ากับช่องเสียบโหมดความเร็ว
   2.4. ตั้งสวิตช์ก้านโยกแรงดันไฟฟ้าไปที่ตำแหน่ง +
   2.5. กดปุ่ม กำลังของไดนาโมมิเตอร์ เพื่อให้ไฟ LED สีแดงสว่าง
3) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ตั้งค่าความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 3,000 รอบต่อนาทีตลอดการทดลอง
5) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6) ทำการอ่านค่ากระแสขดลวดขนาน, กระแสของโหลด และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.4
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของจำนวนโหลดกับกระแสของโหลด (I_L) และ แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt (V_t) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

หลอดไฟ (25W/Lamp)	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$	**แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า** $V_t(V)$	**กระแสของโหลด** $I_L(A)$	**กำลังไฟฟ้า (คำนวณ)** $P(W)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

เขียนกราฟ $R = f(I_L), R = f(V_t)$ และวิเคราะห์การทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแสตรงแบบผสมถูกแบ่งออกเป็นกี่แบบ พร้อมทั้งวาหลอดจรสมมูลและทิศทางของกระแส

---

2. จากการทดลองการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละประเภทนั้น ให้นักศึกษาเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันอย่างไรบ้าง

การทดลองที่ 5
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการแยกแหล่งจ่ายไฟให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวดอาร์เมเจอร์ มอเตอร์แบบนี้จะมีความสามารถในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสสนามแม่เหล็กแยกกัน ซึ่งส่งผลให้สามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้เป็นอิสระ สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ หาได้จากสมการที่ 5-1

$$E_b = V_t - I_a R_a \tag{5-1}$$

$$I_m = I_{sh} + I_a \tag{5-2}$$

$$I_a = I_m - I_{sh} \tag{5-3}$$

แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ หาได้จากสมการที่ 5-4

$$T_a = \frac{E_b I_a}{\frac{2\pi N}{60}} \tag{5-4}$$

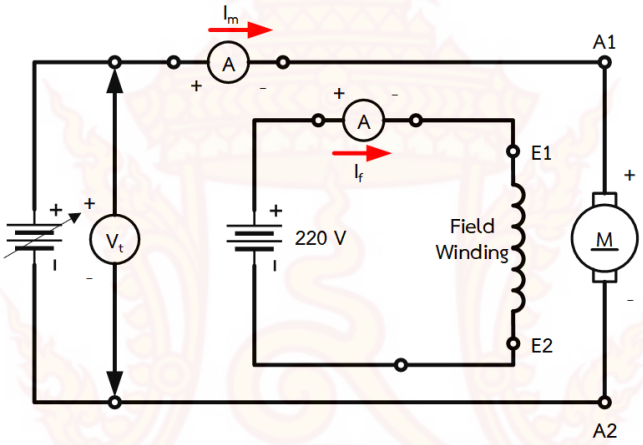
เมื่อ

I_m คือ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (A)
I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
I_{sh} คือ กระแสขดลวดขนาน (A)
R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ω)
E_b คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (V)
V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ (V)
T_a คือ แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (N.m)
N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

การทดลองที่ 5.1 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3. Tachometer	1	ชุด
4. Analog DC Ammeter	2	เครื่อง
5. Analog DC Voltmeter	1	เครื่อง
6. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 5.1 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) วัดค่าความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ (R_a) = ... Ω
2) ต่อวงจรตามรูปที่ 5.1
3) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
4) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 1,200 รอบต่อนาที โดยการหมุนเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
5) จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 220 V ให้กับขดลวดสนามแม่เหล็ก
6) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, กระแสของอาร์เมเจอร์ และกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 5.1
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบ เพิ่มขึ้นครั้งละ 200 รอบ ตามตารางที่ 5.1
8) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับทุกปุ่มที่ค่าเริ่มต้น แล้วปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) กับ แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (V_t) ขณะไม่มีโหลด (No Load)

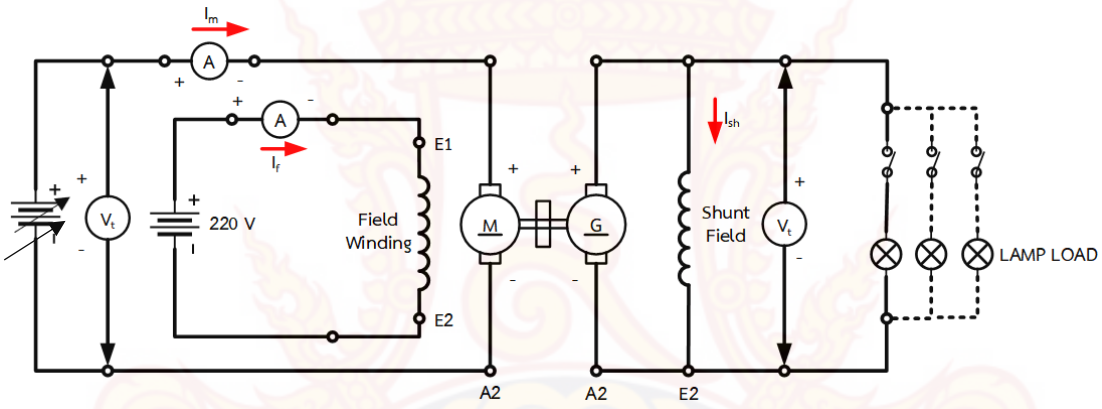
ความเร็วรอบ $N(rpm)$	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$	**กระแสอาร์เมเจอร์** $I_a(A)$	**กระแสขดลวดสนามแม่เหล็ก** $I_f(A)$
1,200			
1,600			
2,000			

เขียนกราฟ $V_t = f(N)$ และวิเคราะห์การทดลอง

การทดลองที่ 5.2 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและกระแสของอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
4. Tachometer	1	ชุด
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Analog DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Analog DC Voltmeter	2	เครื่อง
8. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 5.2 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) ต่อวงจรตามรูปที่ 5.2
2) นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมาเชื่อมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
3) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) ที่ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 2,500 รอบต่อนาที และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 220 V ให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กตลอดการทดลอง
5) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ กระแสของอาร์เมเจอร์ ความเร็วรอบ กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก ความเร็วรอบ และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บันทึกผลลงในตารางที่ 5.2
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) และกระแสของอาร์เมเจอร์ (I_a) กับ แรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (T_a) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

Motor						Generator	
แรงดันที่ขั้ว $V_t(V)$	**กระแสของอาร์เมเจอร์** $I_m = I_a(A)$	**กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก** $I_f(A)$	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ** $E_b(V)$ **(คำนวณ)**	**แรงบิดที่อาร์เมเจอร์** $T_a(N.m)$ **(คำนวณ)**	**หลอดไฟ (25W/ Lamp)**	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$
						1	
						2	
						3	
						4	
						5	
						6	

เขียนกราฟ $T_a = f(I_a)$, $I_a = f(N)$, $T_a = f(N)$ และวิเคราะห์การทดลอง

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. ให้นักศึกษาอธิบายหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกตามความเข้าใจ

---

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกมีความแตกต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

การทดลองที่ 6

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ประกอบด้วย ขดลวดสนามแม่เหล็กและขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยขดลวดทั้งสองต่อขนานกันหรือต่อขนานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า หรือแยกแหล่งจ่ายไฟฟ้าในการควบคุมแต่ละขดลวดได้อย่างอิสระ ซึ่งง่ายต่อการควบคุมความเร็วและแรงบิด
สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ หาได้จากสมการที่ 6-1

$$E_b = V_t - I_a R_a \tag{6-1}$$

$$I_m = I_{sh} + I_a \tag{6-2}$$

$$I_a = I_m - I_{sh} \tag{6-3}$$

แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ หาได้จากสมการที่ 6-4

$$T_a = \frac{E_b I_a}{\frac{2\pi N}{60}} \tag{6-4}$$

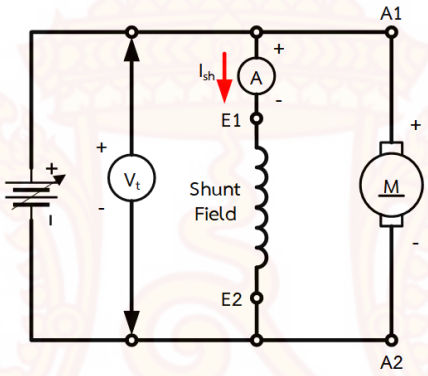
เมื่อ

I_m คือ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (A)
I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
I_{sh} คือ กระแสขดลวดขนาน (A)
R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ω)
E_b คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (V)
V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ (V)
T_a คือ แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (N.m)
N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

การทดลองที่ 6.1 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3. Tachometer	1	ชุด
4. Analog DC Ammeter	1	เครื่อง
5. Analog DC Voltmeter	1	เครื่อง
6. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 6.1 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) วัดค่าความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ra) = ... Ω
2) ต่อวงจรตามรูปที่ 6-1
3) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
4) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 1,200 รอบต่อนาที โดยการหมุนเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
5) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 6.1
6) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบ เพิ่มขึ้นครั้งละ 200 รอบ ตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) กับ แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (V_t) เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

Motor		
ความเร็วรอบ $N(rpm)$	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$
1,200		
1,600		
2,000		

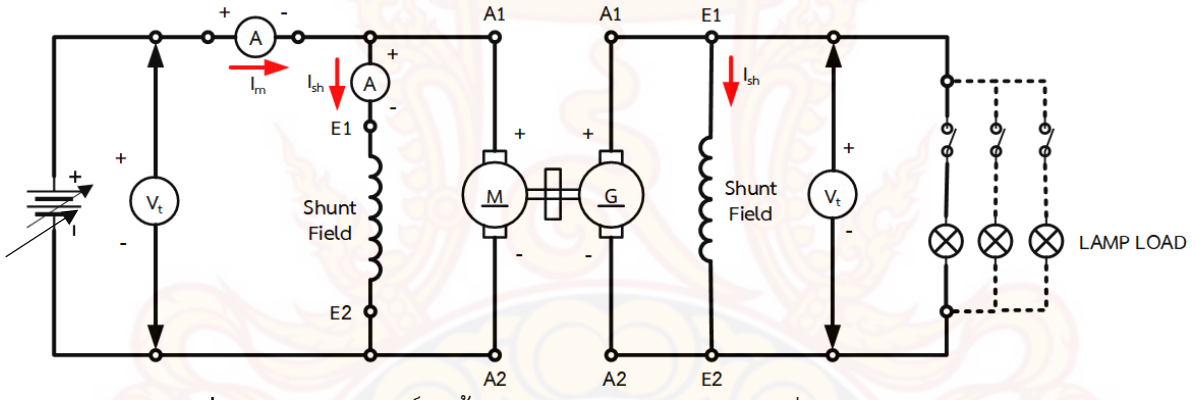
หมายเหตุ : ควรวัดค่าความต้านทานของขดลวดก่อนทำการทดลอง

เขียนกราฟ $V_t = f(N), I_{sh} = f(N)$ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 6.2 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและกระแสของอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
4. Tachometer	1	ชุด
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Analog DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Analog DC Voltmeter	2	เครื่อง
8. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 6.2 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 6.2
2. นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมาเชื่อมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
3. ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) ที่ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4. ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 2,500 รอบต่อนาที
5. เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6. ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์, กระแสของอาร์เมเจอร์, กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก, ความเร็วรอบ และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 6.2
7. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) และกระแสของอาร์เมเจอร์ (I_a) กับแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (T_a) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

Motor							Generator	
แรงดันที่ขั้ว $V_t(V)$	**กระแสของมอเตอร์** $I_m(A)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ** $E_b(V)$ **(คำนวณ)**	**กระแสของอาร์เมเจอร์** $I_a(A)$ **(คำนวณ)**	**แรงบิดที่อาร์เมเจอร์** $T_a(N.m)$ **(คำนวณ)**	**หลอดไฟ (25W/ Lamp)**	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$
							1	
							2	
							3	
							4	
							5	
							6	

เขียนกราฟ $T_a = f(I_a)$, $T_a = f(N)$, $I_a = f(N)$ และวิเคราะห์การทดลอง

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. ให้นักศึกษายกตัวอย่างการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ว่านำไปใช้งานในด้านใดบ้าง

---

2. จากการทดลองให้นักศึกษาบอกคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานว่าเป็นอย่างไร พร้อมทั้งวาหลอดจรสมมูลและทิศทางของกระแสไฟฟ้า

การทดลองที่ 7

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ประกอบด้วย ขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมอยู่กับขดลวดอาร์เมเจอร์

ข้อควรระวังในการใช้งานมอเตอร์แบบอนุกรม คือ ในสภาวะโหลดน้อย ๆ หรือไม่มีโหลด ความเร็วของมอเตอร์จะสูงมากจนทำความเสียหายให้กับมอเตอร์ได้ ดังนั้นมอเตอร์แบบอนุกรมจึงต้องทำงานในขณะมีโหลดต่ออยู่เสมอ สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ หาได้จากสมการที่ 7-1

$$E_b = V_t - I_a(R_a + R_s) \tag{7-1}$$

$$I_m = I_s = I_a \tag{7-2}$$

แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ หาได้จากสมการที่ 7-3

$$T_a = \frac{E_b I_a}{\frac{2\pi N}{60}} \tag{7-3}$$

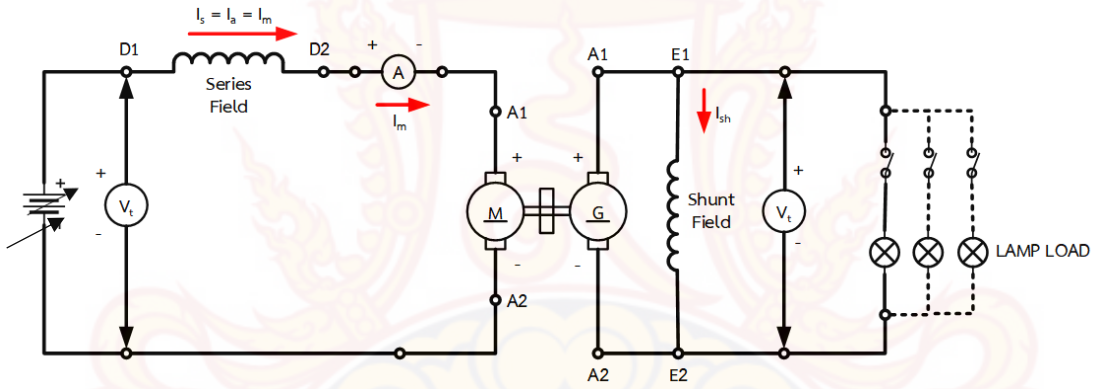
เมื่อ

I_m คือ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (A)
I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
I_s คือ กระแสขดลวดอนุกรม (A)
R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ω)
R_s คือ ความต้านทานขดลวดของอนุกรม (Ω)
E_b คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (V)
V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ (V)
T_a คือ แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (N.m)
N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

การทดลองที่ 7.1 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
4. Tachometer	1	ชุด
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Analog DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Analog DC Voltmeter	2	เครื่อง
8. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 7.1 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) วัดค่าความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ (R_a) = ... Ω , ขดลวดอนุกรม (R_s) = ... Ω
2) ต่อวงจรตามรูปที่ 7-1
3) นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมาเชื่อมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
4) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) ที่ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
5) ปรับแหล่งจ่ายแรงดันให้ความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 2,500 รอบต่อนาที
6) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
7) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์, กระแสของมอเตอร์, ความเร็วรอบ และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 7.1
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) กับ แรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (T_a) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

Motor					Generator	
แรงดันที่ขั้ว $V_t(V)$	**กระแสของมอเตอร์** $I_s = I_m = I_a(A)$	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ** $E_b(V)$ **(คำนวณ)**	**แรงบิดที่อาร์เมเจอร์** $T_a(N.m)$ **(คำนวณ)**	**หลอดไฟ (25W/ Lamp)**	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$
					1	
					2	
					3	
					4	
					5	
					6	

หมายเหตุ : ควรวัดค่าความต้านทานของขดลวดก่อนทำการทดลอง

เขียนกราฟ $T_a = f(I_a)$, $I_a = f(N)$, $T_a = f(N)$ และวิเคราะห์การทดลอง

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. เพราะสาเหตุใดในการทดลองจึงไม่ควรทดสอบมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมในขณะไม่มีโหลด จึงอธิบาย

---

2. จากการทดลองให้นักศึกษาคำนวณหาแรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (T_a) ในขณะเปิดโหลดที่

การทดลองที่ 8

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม

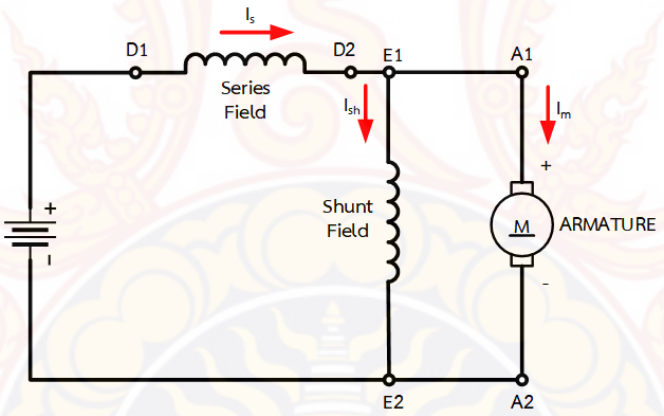
วัตถุประสงค์

1) เพื่อให้นักศึกษารู้จักมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม
2) เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม
3) เพื่อให้นักศึกษาสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ประกอบด้วย ขดลวดสนามแม่เหล็กที่มีขดลวดสองชุดที่พันอยู่บนแกนแกนขั้วแม่เหล็กเดียวกัน คือ ชุดขดลวดขนานและขดลวดอนุกรม ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะการต่อใช้งานตามการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กได้ 2 แบบ ดังนี้

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดผสมที่มีขดลวดสนามแม่เหล็กแบบขนานต่อขนานกับขดลวดอาร์เมเจอร์ และขดลวดสนามแม่เหล็กแบบอนุกรมต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กแบบขนาน ดังรูปที่ 13-1



รูปที่ 8.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt

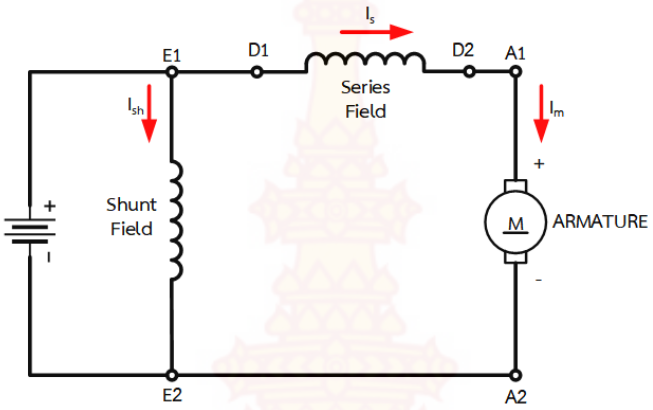
จากรูปที่ 13-1 สามารถหาแรงดันที่ขั้วได้จากสมการที่ 13-1

$$V_t = E_b + I_a R_a + I_s R_s \qquad (8\text{-}1)$$

$$I_m = I_s \qquad (8\text{-}2)$$

$$I_m = I_{sh} + I_a \qquad (8\text{-}3)$$

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดผสมที่มีขดลวดสนามแม่เหล็กแบบอนุกรมต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ และขดลวดสนามแม่เหล็กแบบขนาน ดังรูปที่ 13-2



รูปที่ 8.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt

จากรูปที่ 13-2 สามารถหาแรงดันที่ขั้วได้จากสมการที่ 13-4

$$V_t = E_b + I_a(R_a + R_s) \quad (8\text{-}4)$$

$$I_a = I_s \quad (8\text{-}5)$$

$$I_m = I_{sh} + I_a \quad (8\text{-}6)$$

และสมหารหาแรงบิดที่อาร์เมเจอร์หาได้จากสมการที่ 8-7

$$T_a = \frac{E_b I_a}{\frac{2\pi N}{60}} \quad (8\text{-}7)$$

เมื่อ

I_m คือ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (A)

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (A)

I_s คือ กระแสขดลวดอนุกรม (A)

I_{sh} คือ กระแสขดลวดขนาน (A)

R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ω)

R_s คือ ความต้านทานของขดลวดอนุกรม (Ω)

E_b คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (V)

V_t คือ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ (V)

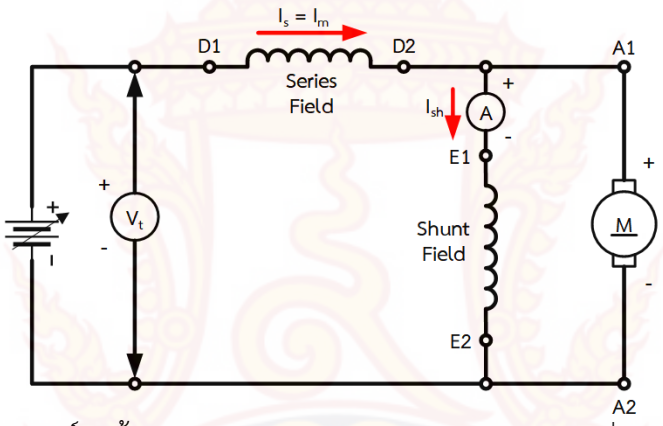
T_a คือ แรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (N.m)

N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

การทดลองที่ 8.1 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3. Tachometer	1	ชุด
4. Analog DC Ammeter	1	เครื่อง
5. Analog DC Voltmeter	1	เครื่อง
6. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 8.3 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) วัดค่าความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ (R_a) = ... Ω , ขดลวดอนุกรม (R_s) = ... Ω
2) ต่อวงจรตามรูปที่ 8.3
3) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
4) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 1,200 รอบต่อนาที โดยการหมุนเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
5) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 5.1
6) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบ เพิ่มขึ้นครั้งละ 200 รอบ ตามตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) กับ แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt (V_t) เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

Motor		
ความเร็วรอบ $N(rpm)$	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$
1,200		
1,400		
1,600		
1,800		
2,000		
2,200		

หมายเหตุ : ควรวัดค่าความต้านทานของขดลวดก่อนทำการทดลอง

เขียนกราฟ $N = f(V_t)$ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

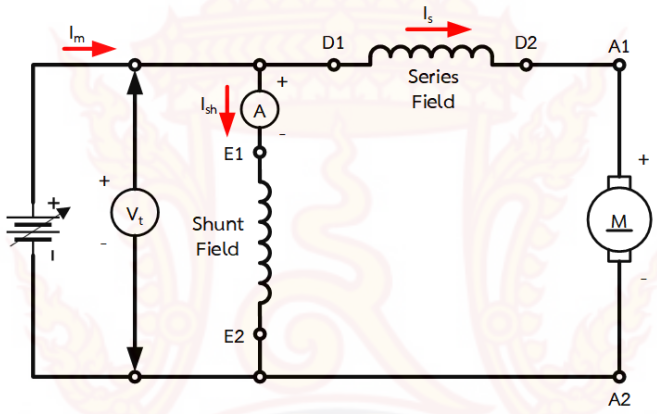
.....

.....

การทดลองที่ 8.2 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
3. Tachometer	1	ชุด
4. Analog DC Ammeter	1	เครื่อง
5. Analog DC Voltmeter	1	เครื่อง
6. Connecting Wires	1	ชุด



รูปที่ 8.4 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt ขณะไม่มีโหลด (No Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) ต่อวงจรตามรูปที่ 13-3
2) เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์บน Universal Power Supply
3) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 1,200 รอบต่อนาที โดยการหมุนเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
4) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 5.1
5) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 โดยค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบ เพิ่มขึ้นครั้งละ 200 รอบ ตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 8.2 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) กับ แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสผสมแบบ Long Shunt (V_t) เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ขณะไม่มีโหลด (No Load)

Motor		
ความเร็วรอบ $N(rpm)$	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$
1,200		
1,400		
1,600		
1,800		
2,000		
2,200		

เขียนกราฟ $N = f(V_t)$ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

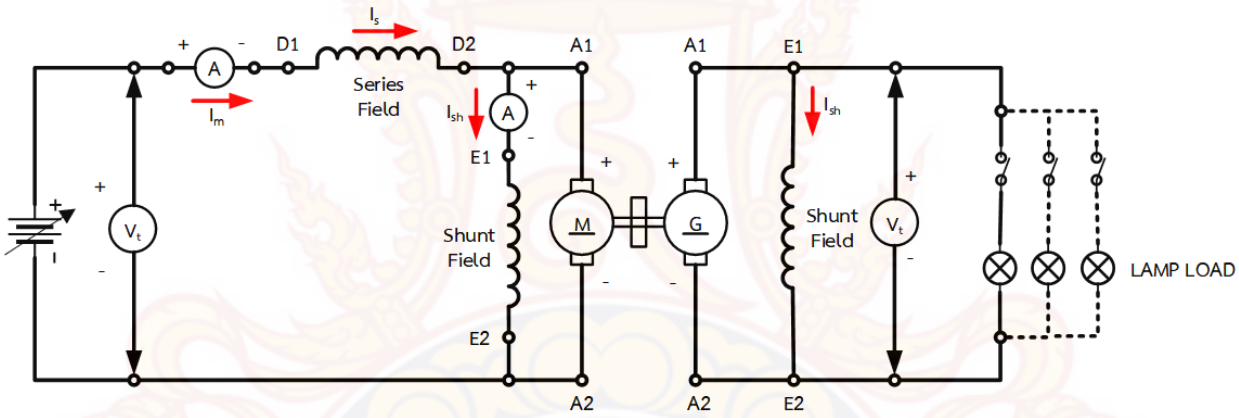
.....

.....

การทดลองที่ 8.3 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและกระแสของอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
4. Tachometer	1	ชุด
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Analog DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Analog DC Voltmeter	2	เครื่อง
8. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 8.5 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) ต่อวงจรตามรูปที่ 8.5
2) นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมาเชื่อมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
3) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) ที่ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 2,500 รอบต่อนาที
5) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ กระแสของอาร์เมเจอร์ กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก, ความเร็วรอบ และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 6.2
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 6.2

ตารางที่ 8.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) และกระแสของอาร์เมเจอร์ (I_a) กับแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Short Shunt (T_a) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

Motor							Generator	
แรงดันที่ขั้ว $V_t(V)$	**กระแสของมอเตอร์** $I_m(A)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ** $E_b(V)$ **(คำนวณ)**	**กระแสของอาร์เมเจอร์** $I_a(A)$ **(คำนวณ)**	**แรงบิดที่อาร์เมเจอร์** $T_a(N.m)$ **(คำนวณ)**	**หลอดไฟ (25W/ Lamp)**	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$
							1	
							2	
							3	
							4	
							5	
							6	

เขียนกราฟ $T_a = f(I_a), N = f(I_a), N = f(T_a)$ และวิเคราะห์การทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

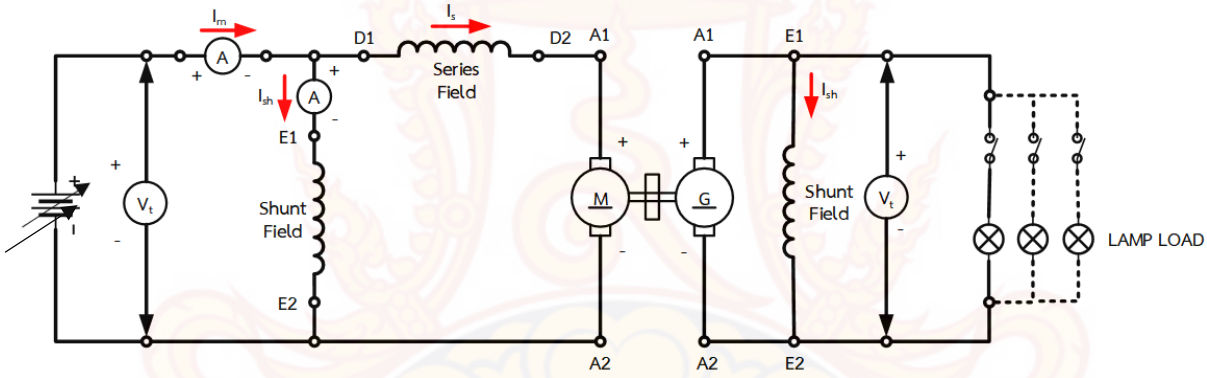
.....

.....

การทดลองที่ 8.4 การหาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและกระแสของอาร์เมเจอร์กับแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Universal Power Supply	1	เครื่อง
2. DC Shunt Wound Machine	1	เครื่อง
3. DC Compound Wound Machine	1	เครื่อง
4. Tachometer	1	ชุด
5. Lamp Load	1	ชุด
6. Analog DC Ammeter	2	เครื่อง
7. Analog DC Voltmeter	2	เครื่อง
8. Connecting Lead	1	ชุด



รูปที่ 8.6 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt ขณะจ่ายโหลด (On Load)

ขั้นตอนการทดลอง

1) ต่อวงจรตามรูปที่ 8.6
2) นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมาเชื่อมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
3) ต่อชุดโหลดทางไฟฟ้าแบบหลอดไฟ (Lamp Load) ที่ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สวิตช์ทุกตัวอยู่ในตำแหน่ง OFF
4) ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เป็น 2,500 รอบต่อนาที
5) เปิดหลอดไฟ 1 หลอด
6) ทำการอ่านค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์, กระแสของอาร์เมเจอร์, กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็ก, ความเร็วรอบ และแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 6.2
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยเปิดหลอดไฟเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 หลอด ตามตารางที่ 6.2
8) เมื่อสิ้นสุดการทดลองให้ปรับทุกปุ่มไปที่ค่าเริ่มต้น แล้วปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ตารางที่ 8.4 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ (N) และกระแสของอาร์เมเจอร์ (I_a) กับแรงบิดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผสมแบบ Long Shunt (T_a) ขณะจ่ายโหลด (On Load)

Motor							Generator	
แรงดันที่ขั้ว $V_t(V)$	**กระแสของมอเตอร์** $I_m(A)$	**กระแสของขดลวดขนาน** $I_{sh}(A)$	**ความเร็วรอบ** $N(rpm)$	**แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ** $E_b(V)$ **(คำนวณ)**	**กระแสของอาร์เมเจอร์** $I_a(A)$ **(คำนวณ)**	**แรงบิดที่อาร์เมเจอร์** $T_a(N.m)$ **(คำนวณ)**	**หลอดไฟ (25W/ Lamp)**	**แรงดันที่ขั้ว** $V_t(V)$
							1	
							2	
							3	
							4	
							5	
							6	

เขียนกราฟ $T_a = f(I_a)$, $N = f(I_a)$, $N = f(T_a)$ และวิเคราะห์การทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามท้ายการทดลอง

1. จากการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละใบงานการทดลอง ให้นักศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์แต่ละประเภทว่าแตกต่างกันอย่างไร

---

2. จากตารางการทดลองที่ 8.4 จงคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (E_b), กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (I_a) และแรงบิดที่อาร์เมเจอร์ (T_a) ขณะเปิดโหลดที่ 5 หลอด

บรรณานุกรม

[1] G.R. Slemon, A. Straughen, Electric machines, Massachusetts: Addison-Wesley, 1980.

[2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, Electric Machinery, 4th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.

[3] P.C. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics, New York: John Wiley & Sons, 1997.

[4] P.F. Ryff, Electric Machinery, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1994.

[5] C.I. Hubert, Electric Machines: Theory, Operation, Applications, Adjustment, and Control, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1991.

[6] S. Bhag, Hu. Guru, R. Seyin, lu. Hizirog, Electric Machinery and Transformers, 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2001.

[7] R.K. Rajput, A Text Book of Electrical Technology, 1st ed. New Delhi: University Science Press, 2004.

[8] M. Abdus Salam, Fundamentals of Electrical Machines, 1st ed. Oxford: Alpha Science, 2005.

[9] D.P. Kothari, I.J. Nagrath, Electric machines, 3rd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2005

[10] R.K. Rajput, Direct Current Machines, 4th ed. New Delhi: University Science Press, 2007.

[11] Stephen J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

[12] B.L. Theraja and A.K. Theraja, A Textbook of Electrical Technology, Vol. II: AC & DC Machines, 24th ed. New Delhi, India: S. Chand Publishing, 2014.

[13] C.S. Chen and T.-H. Wu, “Optimal distribution transformer sizing by dynamic programming,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 20, no. 3, pp. 161–167, 1998

[14] J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, E. L. Ferrari, and S. U. Ahn, “Selection of distribution transformer based on economic criteria,” in Proc. 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 1997), Birmingham, U.K., 1997, vol. 6, pp. 6.14.1–6.14.5.

[15] E. Hajipour, M. Mohiti, N. Farzin, and M. Vakilian, “Optimal distribution transformer sizing in a harmonic involved load environment via dynamic programming technique,” Energy, vol. 120, pp. 92–105, 2017.

[16] L. P. Di Noia, D. Lauria, F. Mottola, and R. Rizzo, “Design optimization of distribution transformers by minimizing the total owning cost,” International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 27, no. 11, Art. no. e2397, 2017.

[17] A. Agha, H. Attar, and A. K. Luhach, “Optimized economic loading of distribution transformers using minimum energy loss computing,” Mathematical Problems in Engineering, vol. 2021, Art. no. 8081212, pp. 1–9, 2021.

[18] สัมพันธ์ หาญชเล, เครื่องกลไฟฟ้า 1 เล่ม 1, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 2542.

[19] สัมพันธ์ หาญชเล, เครื่องกลไฟฟ้า 1 เล่ม 2, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 2542

[20] เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, หม้อแปลงไฟฟ้า, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, กรุงเทพฯ, 2544.

ดัชนีคำศัพท์ทางเทคนิค

บทที่ 1 พลังงานและแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
พลังงาน	Energy	1–2, 8–12
กฎการอนุรักษ์พลังงาน	Conservation of Energy	1
พลังงานศักย์	Potential Energy	1, 6
พลังงานจลน์	Kinetic Energy	1
พลังงานเคมี	Chemical Energy	1, 4
พลังงานความร้อน	Thermal Energy	1–2, 5–12
พลังงานแสง	Light Energy	1, 5
พลังงานไฟฟ้า	Electrical Energy / Electricity	1–5, 8–12
พลังงานกล	Mechanical Energy	1, 8–12
กำลัง	Power	1–3
จูล	Joule, J	1–3
กิโลจูล	Kilojoule, kJ	2
เมกะจูล	Megajoule, MJ	2
วัตต์	Watt, W	1–3
กิโลวัตต์	Kilowatt, kW	1–3, 10–11
เมกะวัตต์	Megawatt, MW	10–11
วัตต์-ชั่วโมง	Watt-hour, Wh	2, 12
กิโลวัตต์-ชั่วโมง	Kilowatt-hour, kWh	1–3, 12
บีทียู	British Thermal Unit, BTU	2
ความเข้มรังสีอาทิตย์	Solar Irradiance	3
ประจุไฟฟ้า	Electric Charge	3
กระแสไฟฟ้า	Electric Current	3–5, 12
ไฟฟ้าสถิต	Static Electricity	4
ไฟฟ้ากระแสตรง	Direct Current, DC	4–5
ไฟฟ้ากระแสสลับ	Alternating Current, AC	5
แบตเตอรี่ตะกั่วกรด	Lead-acid Battery	4
อิเล็กโทรไลต์	Electrolyte	4
แม่เหล็กไฟฟ้า	Electromagnetism	5, 12

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	Generator	1, 5–7, 10–12
สารกึ่งตัวนำ	Semiconductor	5
เซลล์แสงอาทิตย์	Solar Cell	1, 5
แผงเซลล์แสงอาทิตย์	Solar Panel	1, 5
เทอร์โมคัปเปิล	Thermocouple	6
เทอร์โมอิเล็กตริก	Thermoelectric	6
โรงไฟฟ้า	Power Plant	1, 6–8, 11–12
โรงไฟฟ้าพลังน้ำ	Hydroelectric Power Plant	6–7, 12
กังหันน้ำ	Hydro Turbine	6
โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ	Steam Power Plant	6–7, 12
ไอน้ำยวดยิ่ง	Superheated Steam	6, 10
กังหันไอน้ำ	Steam Turbine	6–10, 12
โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์	Nuclear Power Plant	7, 12
ระบบไฟฟ้ากำลัง	Power System	7, 12
ระบบผลิต	Generating System	7, 12
ระบบส่งจ่าย	Transmission System	7–8, 12
ระบบจำหน่าย	Distribution System	7–8, 12
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	Power Transformer	7
หม้อแปลงจำหน่าย	Distribution Transformer	8
สถานีไฟฟ้าย่อย	Substation	7–8
ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม	Combined Heat and Power	8–12
โคเจนเนอเรชัน	Cogeneration	8–12
กังหันก๊าซ	Gas Turbine	9–11, 12
เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน	Internal Combustion Engine	9–11
อัตราส่วนความร้อนต่อไฟฟ้า	Heat to Power Ratio, H/P	9–10
หม้อไอน้ำ	Boiler	10
ห้องเผาไหม้	Combustion Chamber	10
กังหันชนิดแรงดันย้อนกลับ	Back-pressure Turbine	10
กังหันชนิดสกัดไอน้ำ	Extraction Turbine	10
คอมเพรสเซอร์	Compressor	10

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
หม้อไอน้ำความร้อนทิ้ง	Waste Heat Boiler	11
เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ	Spark-ignition Engine	11
เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด	Compression-ignition Engine	11
ก๊าซไอเสีย	Exhaust Gas	11
โหลดสูงสุด	Peak Load	11

บทที่ 2 แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
วงจรแม่เหล็ก	Magnetic Circuit	13, 15–17, 21–24, 26–30
สนามแม่เหล็ก	Magnetic Field	13–19, 21, 24–27
เส้นแรงแม่เหล็ก	Magnetic Flux Lines	13–19, 21–30
ฟลักซ์แม่เหล็ก	Magnetic Flux, ϕ	14, 16–18, 21–24, 27–30
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	Magnetic Flux Density, B	14, 17–21, 23–30
เวเบอร์	Weber, Wb	14, 16, 21–24, 27–29
เทสลา	Tesla, T	14, 17, 20, 26, 30
สนามแม่เหล็กรอบตัวนำ	Magnetic Field around a Conductor	14
กฎกำมือขวา	Right-hand Grip Rule	14, 26
สนามแม่เหล็กรอบขดลวด	Magnetic Field around a Coil	15
กฎของแอมแปร์	Ampere's Rule	15
ขดลวดตัวนำ	Coil / Winding	13–19, 21–30
แรงเคลื่อนแม่เหล็ก	Magnetomotive Force, MMF	15–17, 22–24, 26–30
แอมแปร์-รอบ	Ampere-turn, At	15–16, 23–29
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	Electromotive Force, EMF	15, 21–23
ความเข้มสนามแม่เหล็ก	Field Intensity, H	16–20, 23, 26–28
ทางเดินแม่เหล็ก	Magnetic Path	16–17, 22, 26, 28
ความต้านทานแม่เหล็ก	Reluctance, $\mathfrak{R}$	16–17, 21–24, 27–29
ความซึมผ่านแม่เหล็ก	Permeability, μ	16–17, 22–23, 27–29
ความซึมผ่านแม่เหล็กของอากาศ	Permeability of Air, μ_o	16, 22, 25–26
ความซึมผ่านแม่เหล็กสัมพัทธ์	Relative Permeability, μ_r	16–17, 27–29
กฎของโอห์มของวงจรแม่เหล็ก	Magnetic-circuit Ohm's Law	16–17, 22

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
วงจรแม่เหล็กสมมูล	Equivalent Magnetic Circuit	16–17, 21–23, 29
แกนเทอรอยด์	Toroidal Core	17
เส้นโค้ง B-H	B-H Curve	17–20, 26–27
เส้นโค้งความอิ่มตัว	Saturation Curve	17
จุดอิ่มตัวแม่เหล็ก	Magnetic Saturation	17–18
ฮิสเทอรีซิส	Hysteresis	18–20, 26–27
วงรอบฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Loop	18–20, 26–27
ฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง	Residual Flux, Br	18
แม่เหล็กถาวร	Permanent Magnet	18
วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก	Ferromagnetic Material	18
วัสดุแม่เหล็กอ่อน	Soft Magnetic Material	20
วัสดุแม่เหล็กแข็ง	Hard Magnetic Material	20
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	Core Loss	19–21, 26–27
ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Loss	19–20, 26–27
ค่าคงที่ฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Constant, k_h	19
ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด	Maximum Flux Density, B_{max}	17, 19, 21
ความสูญเสียจากกระแสไหลวน	Eddy Current Loss	21, 26–27
เหล็กแผ่นลามิเนต	Laminate / Laminated Core	21, 26–27
วานิช	Varnish	21
ช่องว่างอากาศ	Air Gap	21–30
ความต้านทานแม่เหล็กของแกน	Core Reluctance, $\mathfrak{R}_{core}$	21–24, 28–29
ความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ	Air-gap Reluctance, $\mathfrak{R}_{gap}$	21–24, 28–29
ความเข้มสนามไฟฟ้า	Electric Field Intensity	23
ความหนาแน่นกระแส	Current Density, J	23
ฟลักซ์รั่วไหล	Leakage Flux	24–25, 26–27
ผลของสนามแม่เหล็กบริเวณขอบ	Fringing Effect	24–25, 26–27
แรงแม่เหล็ก	Magnetic Force, FM	25–26, 30
รีเลย์	Relay	25, 29–30
คอนแทคเตอร์	Contactor	25
แม่เหล็กไฟฟ้ายกของ	Lifting Electromagnet	25
นิวตัน	Newton, N	25–26, 30

บทที่ 3 หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
หม้อแปลงไฟฟ้า	Transformer	31–53
หม้อแปลงแบบแปลงขึ้น	Step-up Transformer	31, 52
หม้อแปลงแบบแปลงลง	Step-down Transformer	31
อิมพีแดนซ์	Impedance	31, 39, 47–51
ขดลวดปฐมภูมิ	Primary Winding / Primary Coil	31–53
ขดลวดทุติยภูมิ	Secondary Winding / Secondary Coil	31–53
แกนเหล็กแบบคอร์	Core Type	31–32, 51, 53
แกนเหล็กแบบเชลล์	Shell Type	32, 51
เหล็กลามิเนต	Laminated Steel	32
ฉนวนไฟฟ้า	Electrical Insulation	31
การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า	Electromagnetic Induction	33, 51
กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์	Faraday's Law of Induction	33, 51
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	Induced EMF	33–36, 37, 39–44, 51–53
รูปคลื่นไซน์	Sine Wave	33–35
อัตราส่วนของหม้อแปลง	Transformer Ratio, a	34, 38, 45, 48–52
อัตราส่วนแรงดัน	Voltage Ratio	38
อัตราส่วนจำนวนรอบ	Turns Ratio	34, 36, 48–52
ฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด	Maximum Magnetic Flux, ϕ_{max}	34–36, 44, 52
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด	Maximum Flux Density, B_{max}	36, 52–53
ความถี่	Frequency, f	34–36, 46–47, 52–53
ฟอร์มแฟคเตอร์	Form Factor	35
ค่าแรงดันประสิทธิผล	RMS Value, E_{rms}	35
ค่าแรงดันเฉลี่ย	Average Value, E_{ave}	34–35
สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	Induced EMF Equation	35, 51–53
ขั้วของหม้อแปลง	Transformer Polarity	37–38, 52
เครื่องหมายจุด	Dot Convention	37
การทดสอบหาขั้ว	Polarity Test	37
การต่อขนานหม้อแปลง	Parallel Operation of Transformers	38, 52
กระแสลัดวงจร	Short-circuit Current	38

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
หม้อแปลงในอุดมคติ	Ideal Transformer	38, 48, 53
หม้อแปลงในสภาวะใช้งานจริง	Actual Transformer	38, 47–52
พิกัดหม้อแปลง	Transformer Rating	38–39, 52–53
กำลังไฟฟ้าปรากฏ	Apparent Power, S	38
กิโลโวลต์-แอมป์	Kilovolt-ampere, kVA	36, 38–39, 42, 51–53
พิกัดแรงดัน	Rated Voltage	38–39
พิกัดกระแส	Rated Current	38–39, 52
แผ่นป้ายหม้อแปลง	Nameplate	38–39
หม้อแปลงในสภาวะไม่มีโหลด	No-load Transformer	39–43, 52–53
กระแสขณะไม่มีโหลด	No-load Current, I_0	39–43, 45, 52–53
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	Core Loss	39–45, 47, 52–53
ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Loss	39–40, 52–53
ความสูญเสียจากกระแสไหลวน	Eddy Current Loss	39–40, 52–53
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	Magnetizing Current, I_ϕ	39–45, 47, 52–53
กระแสสูญเสียในแกนเหล็ก	Core-loss Current, I_{h+e}	40–43, 52–53
ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก	Core Loss Resistance, R_0	41–42, 47, 52
รีแอคแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก	Magnetizing Reactance, X_0	41–42, 47, 52
เพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะไม่มีโหลด	No-load Power Factor	42–43, 53
วงจรสมมูลขณะไม่มีโหลด	No-load Equivalent Circuit	40–42
หม้อแปลงในสภาวะมีโหลด	On-load Transformer	43–45, 52–53
เส้นแรงแม่เหล็กหลัก	Main Flux	44–45
เส้นแรงแม่เหล็กร่วม	Mutual Flux	46
เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล	Leakage Flux	46, 51–52
ความเหนี่ยวนำรั่วไหล	Leakage Inductance of Winding, L_1/L_2	46
รีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำ	Inductive Reactance, XL	46–47
รีแอคแตนซ์รั่วไหลขดลวดปฐมภูมิ	Primary Leakage Reactance, X_1	46–51
รีแอคแตนซ์รั่วไหลขดลวดทุติยภูมิ	Secondary Leakage Reactance, X_2	46–51
ความต้านทานขดลวดปฐมภูมิ	Primary Winding Resistance, R_1	45, 47–51
ความต้านทานขดลวดทุติยภูมิ	Secondary Winding Resistance, R_2	45, 47–51

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
วงจรสมมูลของหม้อแปลง	Equivalent Circuit of Transformer	40–42, 47–52
อิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิ	Primary Impedance, Z_1	47
อิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ	Secondary Impedance, Z_2	47
พัฒนาการของวงจรสมมูล	Development of Equivalent Circuit	48–51
ความต้านทานสมมูลด้านปฐมภูมิ	Equivalent Resistance Referred to Primary, R_{01}	49–51
ความต้านทานสมมูลด้านทุติยภูมิ	Equivalent Resistance Referred to Secondary, R_{02}	49–51
รีแอคแตนซ์สมมูลด้านปฐมภูมิ	Equivalent Reactance Referred to Primary, X_{01}	49–50
รีแอคแตนซ์สมมูลด้านทุติยภูมิ	Equivalent Reactance Referred to Secondary, X_{02}	49–51
อิมพีแดนซ์สมมูลด้านปฐมภูมิ	Equivalent Impedance Referred to Primary, Z_{01}	50–51
อิมพีแดนซ์สมมูลด้านทุติยภูมิ	Equivalent Impedance Referred to Secondary, Z_{02}	50–51
โหลดเต็มพิกัด	Full Load / Rated Load	36

บทที่ 4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพ

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	Transformer Tests	54–58, 60, 64–69
ประสิทธิภาพหม้อแปลง	Transformer Efficiency, η	54, 62–70
ความต้านทานสมมูล	Equivalent Resistance	54, 57–58, 65, 69
ความต้านทานสมมูลด้านปฐมภูมิ	Equivalent Resistance, R_{01}	54, 57–58, 65, 69
ความต้านทานสมมูลด้านทุติยภูมิ	Equivalent Resistance, R_{02}	54, 58, 61–62, 65, 69–70
รีแอคแตนซ์สมมูล	Equivalent Reactance	54, 57–58, 65, 69
รีแอคแตนซ์สมมูลด้านปฐมภูมิ	Equivalent Reactance, X_{01}	54, 57–58, 65, 69
รีแอคแตนซ์สมมูลด้านทุติยภูมิ	Equivalent Reactance, X_{02}	54, 58, 65, 69
อิมพีแดนซ์สมมูล	Equivalent Impedance	57–60, 68–69
อิมพีแดนซ์สมมูลด้านปฐมภูมิ	Equivalent Impedance, Z_{01}	57–58
ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก	Core Loss Resistance, R_{OL} / R_O	54–58, 65, 69

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
รีแอคแตนซ์สร้างสนามแม่เหล็ก	Magnetizing Reactance, X_{OL} / X_O	54–58, 65, 69
วงจรสมมูลของหม้อแปลง	Equivalent Circuit	54–58, 64–69
การทดสอบแบบไม่มีโหลด	No-load Test	54–58, 64–66, 68–69
การทดสอบแบบเปิดวงจร	Open-circuit Test	54–58, 64–66, 68–69
แรงดันทดสอบแบบเปิดวงจร	Open-circuit Voltage, V_{OL}	55–58
กระแสขณะไม่มีโหลด	No-load Current, I_{OL}	55–58, 64–66
กำลังไฟฟ้าทดสอบแบบเปิดวงจร	Open-circuit Power, P_{OL}	55–58
เพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะเปิดวงจร	Open-circuit Power Factor	55–58, 64–66, 69
กระแสสูญเสียในแกนเหล็ก	Core-loss Current, I_{h+e}	55–58, 65
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	Magnetizing Current, I_ϕ	55–58, 64–65, 69
การทดสอบแบบลัดวงจร	Short-circuit Test	56–60, 64–66, 68–69
กระแสลัดวงจรทดสอบ	Short-circuit Current, I_{SC}	57–58
แรงดันลัดวงจร	Short-circuit Voltage, V_{SC}	57–60
กำลังไฟฟ้าทดสอบแบบลัดวงจร	Short-circuit Power, P_{SC}	57–58
เพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะลัดวงจร	Short-circuit Power Factor	66, 69
ความสูญเสียในขดลวดทองแดง	Copper Loss, P_{cu}	56, 60–63, 67–70
โวลเตจเรกูเลชัน	Voltage Regulation	58–60, 66–68
อิมพีแดนซ์ภายในหม้อแปลง	Transformer Internal Impedance	58–60
แรงดันขณะไม่มีโหลด	No-load Voltage, V_{NL}	59
แรงดันขณะโหลดเต็มพิกัด	Full-load Voltage, V_{FL}	59
เปอร์เซ็นต์โวลเตจเรกูเลชัน	Percent Voltage Regulation	59, 66–67
เปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจ	Percent Impedance Voltage, %Zk	59–60, 68
อิมพีแดนซ์โวลเตจ	Impedance Voltage	59–60
แรงดันพิกัด	Rated Voltage, V_{rated}	59–60
กระแสลัดวงจร	Short-circuit Current	60, 68–70
ความสูญเสียของหม้อแปลง	Transformer Losses	60–64, 68–70
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	Iron Loss / Core Loss, P_{core}	54–55, 60–70
ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Loss	61, 68–69
กำลังไฟฟ้าขาเข้า	Input Power, P_{in}	62–63
กำลังไฟฟ้าขาออก	Output Power, P_{out}	62–64, 67–68
ประสิทธิภาพสูงสุด	Maximum Efficiency	63, 67–68, 70

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
ประสิทธิภาพตลอดวัน	All-day Efficiency	64, 68, 70
พลังงานขาออก	Output Energy	64
พลังงานขาเข้า	Input Energy	64

บทที่ 5 หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส	Three-phase Transformer, 3-ϕ Transformer	71–86
ระบบไฟฟ้า 3 เฟส	Three-phase System	71–72, 76, 78, 85–86
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส	Three-phase Generator	71
มุมเฟส	Phase Angle	71–72, 75–77, 82–86
เฟสเซอร์ไดอะแกรม	Phasor Diagram	71, 77
พิกัดกิโลโวลต์แอมแปร์	kVA Rating	72, 79, 86
การต่อแบบสตาร์	Star / Wye Connection, Y	72–86
การต่อแบบเดลตา	Delta Connection, Δ	72–86
การต่อแบบ Y-Y	Y-Y / Yy Connection	72–74, 77–78, 85–86
การต่อแบบ Δ-Δ	Δ-Δ / Dd Connection	72–74, 76–77, 83–86
การต่อแบบ Y-Δ	Y-Δ / Yd Connection	72–73, 75, 77, 83–86
การต่อแบบ Δ-Y	Δ-Y / Dy Connection	72–73, 75–77, 83–86
โหลดสมดุล	Balanced Load	73, 78, 86
โหลดไม่สมดุล	Unbalanced Load	74, 85
กระแสไลน์	Line Current, (I_L)	73, 86
กระแสเฟส	Phase Current, (I_P)	73, 86
แรงดันไลน์	Line Voltage, (V_L)	73–75, 82–83, 86
แรงดันเฟส	Phase Voltage, (V_P)	73, 75–76, 86
แรงดันระหว่างไลน์กับไลน์	Line-to-line Voltage	75–79
แรงดันระหว่างไลน์กับนิวทรัล	Line-to-neutral Voltage	75
จุดนิวทรัล	Neutral Point	74, 76, 85–86
ระบบ 3 เฟส 3 สาย	Three-phase Three-wire System	76
ระบบ 3 เฟส 4 สาย	Three-phase Four-wire System	76
การต่อลงดิน	Grounding / Earthing	74–76

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การลัดวงจร	Short Circuit	73–74, 84
ความต่างเฟส	Phase Shift	75–77, 82–86
มุมต่างเฟส 30°	30° Phase Shift	75–77, 82–85
การต่อแบบวี	V-Connection	74, 76–77, 85–86
การต่อแบบโอเพนเดลตา	Open-Delta	74, 76–77, 85–86
การต่อแบบ V-V	V-V Connection	74, 85–86
กำลังไฟฟ้า 3 เฟส	Three-phase Power	76–77
การแปลง Y-Δ	Y-Δ Transformation	78
อิมพีแดนซ์สมมูล	Equivalent Impedance	79–80, 86
โวลเตจเรกูเลชัน	Voltage Regulation	79–80, 86
แกนแม่เหล็กร่วม	Common Magnetic Core	80–81
หม้อแปลงแบบแกน	Core-type Transformer	80–81
แผ่นเหล็กลามิเนต	Laminated Steel	80
เวกเตอร์กรุ๊ป	Vector Group	82–86
การอ้างอิงแบบหน้าปัดนาฬิกา	Clock-hour Notation	82
การต่อแบบซิกแซก	Zigzag Connection, Z/z	82–83
การต่อขนานหม้อแปลง	Parallel Operation of Transformers	83–84, 86
Yy0	Vector Group Yy0	82–84
Yy6	Vector Group Yy6	83–84
Dd0	Vector Group Dd0	83–84
Dd6	Vector Group Dd6	82–84
Yd1	Vector Group Yd1	82–85
Yd5	Vector Group Yd5	82–84
Yd11	Vector Group Yd11	83–85
Dy1	Vector Group Dy1	83–85
Dy5	Vector Group Dy5	82–84
Dy11	Vector Group Dy11	83–85
Dyn11	Vector Group Dyn11	85–86
ฮาร์มอนิกอันดับ 3	Third Harmonic	85

บทที่ 6 หม้อแปลงออโตและหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
หม้อแปลงออโต	Auto Transformer	87–90, 95–96
หม้อแปลงออโตแบบแปลงลง	Step-down Auto-transformer	87–90, 95–96
หม้อแปลงออโตแบบแปลงขึ้น	Step-up Auto-transformer	87–89, 95–96
แกนตัวนำแม่เหล็ก	Magnetic Core	87
เส้นแรงแม่เหล็กร่วม	Mutual Flux	87
ฟลักซ์ร่วม	Common Flux	87
อัตราส่วนหม้อแปลง	Transformer Ratio, a	88–89, 92–96
จำนวนรอบของขดลวด	Number of Turns	88–89, 91–96
กำลังไฟฟ้าโหลด	Load Power	88–90
วาริแอค	Variac	89, 95
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้	Variable AC Voltage	89
แทปกลาง	Center Tap	89, 95–96
หม้อแปลงเครื่องมือวัด	Instrument Transformer	90–93, 95
หม้อแปลงวัดกระแส	Current Transformer, CT	90–92, 95–96
หม้อแปลงวัดแรงดัน	Potential Transformer, PT	90, 92–93, 95
ระบบไฟฟ้าแรงสูง	High-voltage System	90–93
ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ	Low-voltage System	91–92
พิกัดกระแส	Current Rating	91–92, 96
อัตราส่วนกระแส	Current Ratio	91–92, 96
สวิตช์ลัดวงจร	Shorting Switch	91
บัสบาร์	Busbar	91
ขดลวดปฐมภูมิหนึ่งรอบ	Single-turn Primary	91
กระแสทุติยภูมิมาตรฐาน	Standard Secondary Current	92
การต่อลงกราวด์	Grounding	92–93
รีเลย์	Relay	92
อุปกรณ์ควบคุม	Control Device	92
หม้อแปลงหลายขดลวด	Multi-coil Transformer	93–95
ขั้ว X1, X2, X3, X4	Secondary Terminal Designations	93–95
การต่อขดลวดทุติยภูมิแบบอนุกรม	Series-connected Secondary Windings	94–95

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การต่อขดลวดทุติยภูมิแบบขนาน	Parallel-connected Secondary Windings	94–95
จุดต่อร่วม	Common Point	94
โหลดแยก	Separate Load	94
แทปของหม้อแปลงไฟฟ้า	Transformer Taps	95–96
แทป 50 เปอร์เซ็นต์	50% Tap	95
อัตราส่วนจำนวนรอบ	Turns Ratio	92–95
อิมพีแดนซ์โหลด	Load Impedance	96
เพาเวอร์แฟคเตอร์	Power Factor, PF	96
เพาเวอร์แฟคเตอร์หนึ่ง	Unity Power Factor	96
เพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง	Lagging Power Factor	96
กระแสโหลด	Load Current	96
กิโลโวลต์-แอมป์	Kilovolt-ampere, kVA	90, 93, 96
ความสูญเสียในแกน	Core Loss	87, 96
เครื่องมือวัดมาตรฐาน	Standard Measuring Instrument	90
การลดทอนแรงดัน	Voltage Reduction	92
การลดกระแส	Current Reduction	90–92

บทที่ 7 การใช้งานและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
ระบบจำหน่ายไฟฟ้า	Distribution System	97–98
สถานีไฟฟ้าย่อย	Substation	97
ระบบแรงดันสูง	High Voltage	98
ระบบแรงดันปานกลาง	Medium Voltage	98
ระบบแรงดันต่ำ	Low Voltage	98
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	Power Transformer	98
มาตรฐานหม้อแปลง	Transformer Standard	98–99, 108
IEC 60076	Power Transformer Standard	98
IEEE C57.12.00	Transformer Standard	98
หม้อแปลงแบบใช้ของเหลว	Liquid-immersed Transformer	99, 119
หม้อแปลงแบบแห้ง	Dry-type Transformer	98–100, 108, 119

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
หม้อแปลงน้ำมัน	Oil-type Transformer	99–100, 108
ฉนวนของเหลวติดไฟได้	Flammable Liquid Insulation	99
จุดติดไฟ	Fire Point	99, 102
เรซินแห้ง	Cast Resin	99
ฉนวนอากาศ	Air Cooled	99
เรซินเสริมใยแก้ว	Resin Reinforced Glass Fiber	99
สิ่งห่อหุ้ม	Enclosure	99, 107
การระบายความร้อน	Transformer Cooling	97, 99–102, 108, 119
การระบายความร้อนแบบ AN	AN	100, 108
การระบายความร้อนแบบ AF	AF	100, 108
การระบายความร้อนแบบ ONAN	ONAN	100, 108, 119
การระบายความร้อนแบบ ONAF	ONAF	100, 119
การระบายความร้อนแบบ OFAN	OFAN	100
การระบายความร้อนแบบ OFAF	OFAF	100
การระบายความร้อนแบบ OFWF	OFWF	100
น้ำมันแร่	Mineral Oil	100
ฉนวนหม้อแปลง	Transformer Insulation	99–102, 108–119
ความคงทนไดอิเล็กตริก	Dielectric Strength	101–102
การพังทลายทางไดอิเล็กตริก	Dielectric Breakdown	102
กระดาษฉนวน	Insulating Paper	101–102
กระดาษสีน้ำตาล	Kraft Paper	101
กระดาษอัด	Pressboard	101
คลาสฉนวน	Insulation Class	101
อุณหภูมิจุดร้อน	Hot-spot Temperature	101, 110, 115, 119
น้ำมันหม้อแปลง	Transformer Oil	99, 102–108, 119
แทปปรับแรงดัน	Tap Changer	103, 108
ตัวถังหม้อแปลง	Tank	103, 107
ครีบระบายความร้อน	Fin	103, 107
ลูกถ้วยแรงสูง	HV Bushing	103, 107
ลูกถ้วยแรงต่ำ	LV Bushing	103, 107
ถังพักน้ำมัน	Conservator Tank	103, 107

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
เกจวัดระดับน้ำมัน	Oil Level Gauge	103
อุปกรณ์ระบายความดัน	Pressure-relief Device	102–103
บุคโฮลซ์รีเลย์	Buchholz Relay	102–103
เทอร์โมมิเตอร์	Thermometer Pocket	103
ที่ต่อสายดิน	Earthing Terminal	103
วาล์วถ่ายน้ำมัน	Oil Drain Valve	103
ชุดกรองความชื้น	Conservator Breather	103–104
ซิลิกาเจล	Silica Gel	103–104, 107
อาร์กชิ่งฮอร์น	Arcing Horn	104, 107
แรงดันเกิน	Surge / Overvoltage	104
ฟิวส์	Fuse	104
การลัดวงจร	Short Circuit	104, 108
กระแสเกิน	Overload	104
ล่อฟ้า	Lightning Arrester	104
การติดตั้งภายในอาคาร	Indoor Installation	99, 104–105
ห้องหม้อแปลง	Transformer Room	99, 105
การติดตั้งภายนอกอาคาร	Outdoor Installation	99, 104–107
การติดตั้งแบบแขวนเสา	Pole-mounted Installation	105–106
นั่งร้านหม้อแปลง	Transformer Platform	105–106
ลานหม้อแปลง	Transformer Yard	106
การบำรุงรักษาหม้อแปลง	Transformer Maintenance	97, 99, 107–108, 112–119
การเลือกใช้หม้อแปลง	Transformer Selection	108–119
เวกเตอร์กรุ๊ป	Vector Group	108
Dyn11	Vector Group Dyn11	108
Dd0	Vector Group Dd0	108
อิมพีแดนซ์	Impedance	108
กระแสลัดวงจร	Short-circuit Current	108
แรงดันตก	Voltage Drop	108
การขนานหม้อแปลง	Parallel Operation of Transformers	108
การเลือกขนาดหม้อแปลง	Transformer Sizing	108–119

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การเลือกขนาดหม้อแปลงที่เหมาะสม	Optimal Distribution Transformer Sizing	108–119
กำลังสูญเสียจากการจ่ายโหลด	Load Loss	108–119
ความสูญเสียในขดลวดทองแดง	Copper Loss	108–110, 119
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	Core Loss	108–119
ความสูญเสียขณะไม่มีโหลด	No-load Loss	108, 118–119
อัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง	Loading Ratio, x	109, 115–118
รูปแบบการจ่ายโหลด	Load Profile	108, 110, 115–118
การเติบโตของโหลด	Load Growth	108, 110, 118–119
ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน	Life-Cycle Cost	110, 118–119
การสูญเสียอายุการใช้งาน	Loss of Life	110, 114–115
เส้นโค้งโหลด	Load Curve	110–112, 114–115
ตัวประกอบภาระโหลด	Load Factor, LF	110–111
ตัวประกอบการสูญเสียตามภาระโหลด	Load Loss Factor, LLF	110–112
พลังงานสูญเสียรายปี	Annual Energy Loss	111–118
การจ่ายโหลดเชิงเศรษฐศาสตร์	Economic Loading	110–119
ต้นทุนรวมในการเป็นเจ้าของ	Total Owning Cost, TOC	112–119
ตัวประกอบการแปลงเป็นมูลค่าปัจจุบัน	Capitalization Factor	112
มูลค่าปัจจุบัน	Present Value, PV	112–118
ตัวประกอบมูลค่าปัจจุบัน	Present Worth Factor, PWF	115–118
อัตราคิดลด	Discount Rate, i	115–118
ต้นทุนการลงทุน	Investment Cost	110, 114–119
ต้นทุนความสูญเสีย	Cost of Losses	110, 112–119
ต้นทุนการบำรุงรักษา	Maintenance Cost	115–118
ต้นทุนการสูญเสียอายุ	Cost of Loss of Life	110, 114–115
ฮาร์มอนิก	Harmonic	108, 114
กำลังไฟฟ้าปรากฏ	Apparent Power, kVA	108–119

บทที่ 8 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	DC Generator	120–135

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง	DC Machine	120, 125–127, 133–135
มอเตอร์	Motor	120, 127, 133–135
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	Induced EMF / Induced Voltage	120–124, 126–135
กฎของฟาราเดย์	Faraday's Law	120, 129
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	Magnetic Flux Density, B	120–123
เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว	Flux per Pole	129–131, 135
ตัวนำไฟฟ้า	Conductor	120–123, 126–130
ความเร็วตัวนำ	Conductor Velocity, v	120–123
กฎมือขวา	Right-hand Rule	121–122, 134
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบลิเนียร์	Linear Generator	121
ขั้วแม่เหล็ก	Magnetic Pole	122–130, 133–135
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	AC Generator	122–124
วงแหวนลื่น	Slip Ring	122–124
แปรงถ่าน	Carbon Brush	123–127
การคอมมิวเตชัน	Commutation	123–124
คอมมิวเตเตอร์	Commutator	123–129
การเรียงกระแส	Rectification	123–124
ส่วนที่อยู่กับที่	Stator	125–126
ส่วนที่เคลื่อนที่	Rotor	125–127
เปลือกโครงเหล็ก	Magnetic Frame / Yoke	125
ทางเดินแม่เหล็ก	Magnetic Path	125
แกนเหล็กของขั้วแม่เหล็ก	Pole Core	125–126
ขั้วแม่เหล็ก	Pole Shoe	125–126
ขดลวดสนามแม่เหล็ก	Field Coil	126, 130–133
แกนเหล็กอาร์เมเจอร์	Armature Core	126
อาร์เมเจอร์	Armature	123–135
แผ่นเหล็กลามิเนต	Laminated Steel	126
ร่องสล็อต	Slot	126–128
ขดลวดอาร์เมเจอร์	Armature Winding	127–135
แกนหมุน	Shaft	127
ต้นกำลัง	Prime Mover	127, 133–134

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
ตลับลูกปืน	Bearings	127
การพันอาร์เมเจอร์	Armature Winding	127–130, 135
การพันแบบแกรมมาริง	Gramme-ring Winding	128
การพันแบบดรัม	Drum Winding	128
การพันแบบทับซ้อน	Lap Winding	128–130, 135
การพันแบบรูปคลื่น	Wave Winding	128–130, 135
แผงขนาน	Parallel Paths, a	128–130
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	Number of Poles, P	128–130, 135
จำนวนตัวนำอาร์เมเจอร์	Armature Conductors, Z	129–130, 135
ความเร็วรอบ	Rotational Speed, n / rpm	129–135
สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า	EMF Equation	129–130, 135
แรงเคลื่อนไฟฟ้าอาร์เมเจอร์	Armature EMF, E_a	130–135
กระแสอาร์เมเจอร์	Armature Current	133–135
ความต้านทานอาร์เมเจอร์	Armature Resistance, R_a	131–134
ขดลวดสนามกระตุ้น	Field Excitation Winding	130–133
กระแสสนามกระตุ้น	Field Current, I_f	131–133
จำนวนรอบขดลวดสนาม	Field Turns, N_f	131
ความต้านทานขดลวดสนาม	Field Resistance, R_f	131–133
ความต้านทานวงจรแม่เหล็ก	Magnetic Reluctance, $\mathfrak{R}$	131
วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก	Ferromagnetic Material	131
แรงดันแบตเตอรี่	Battery Voltage, E_{bat}	131–134
ตัวต้านทานปรับค่าได้	Variable Resistor	131–133
รีโอสแตต	Rheostat	131–133
เครื่องกำเนิดสนามกระตุ้นต่อแยก	Separately Excited Generator	131–133
เครื่องกำเนิดแบบขนาน	Shunt Generator	130–131
เส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	Residual Flux	131
เส้นโค้งการทำให้เป็นแม่เหล็ก	Magnetization Curve	132
คุณลักษณะวงจรเปิด	Open-circuit Characteristic, OCC	132
สภาวะไม่มีโหลด	No-load Condition	132, 135
วงจรสมมูล	Equivalent Circuit	134
แรงบิด	Torque	133–135

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ	Back EMF	134–135
พิกัดกำลังไฟฟ้า	Power Rating	135
กระแสพิกัด	Rated Current	135
การชาร์จแบตเตอรี่	Battery Charging	134

บทที่ 9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความสูญเสีย และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก	Field Winding Connection	136–138
เครื่องกำเนิดสนามกระตุ้นแยก	Separately Excited Generator	136, 139–140
เครื่องกำเนิดกระตุ้นด้วยตัวเอง	Self-excited Generator	137, 145–146, 151
เส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	Residual Magnetism / Residual Flux	137, 145–146, 151
เครื่องกำเนิดแบบอนุกรม	Series Generator / Series Wound	137, 141–142
เครื่องกำเนิดแบบผสม	Compound Generator / Compound Wound	138, 142–145, 150–152
เครื่องกำเนิดแบบชอร์ตชันต์	Short-shunt Compound Generator	138, 142–143, 150–152
เครื่องกำเนิดแบบลองชันต์	Long-shunt Compound Generator	138, 144–145, 151–152
ขดลวดสนามขนาน	Shunt Field Winding	137–145, 147–152
ขดลวดสนามอนุกรม	Series Field Winding	137–145, 147, 150–152
ความต้านทานขดลวดสนามขนาน	Shunt Field Resistance, (R_{sh})	138, 141–145, 149–152
ความต้านทานขดลวดสนามอนุกรม	Series Field Resistance, (R_s)	138, 141–145, 150–152
กระแสสนามขนาน	Shunt Field Current, (I_{sh})	138, 141–145, 147, 149–152
กระแสสนามอนุกรม	Series Field Current, (I_s)	138–145, 147, 150–152
แรงดันที่ขั้ว	Terminal Voltage, (V_t)	138–145, 148–152
กล่องต่อสาย	Terminal Box	139
แรงดันตกคร่อมแปรงถ่าน	Brush Voltage Drop	139–145, 152
ความต้านทานโหลด	Load Resistance, (R_L)	140
ตัวเสริมแรงเคลื่อนไฟฟ้า	Booster	137
ความต้านทานวงจรสนาม	Field Circuit Resistance	145
ความต้านทานปรับค่าได้	Variable Resistance	145
ตำแหน่งสะเทิน	Neutral Position	145
แกนนิวทรอล	Neutral Axis	145

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
ตัวต้นกำลัง	Prime Mover	145, 149–152
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	Iron Loss / Core Loss	146–148, 151–152
ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Loss, (P_h)	146–148
ความสูญเสียจากกระแสไหลวน	Eddy Current Loss, (P_e)	146–148
ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด	Maximum Flux Density, (B_{max})	146
ความถี่ของการกลับฟลักซ์	Flux Reversal Frequency, (f)	146
ปริมาตรแกนเหล็ก	Core Volume, (V)	146
สัมประสิทธิ์ฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Coefficient	146–147
เหล็กแผ่น	Sheet Steel	146
เหล็กซิลิกอน	Silicon Steel	146
แผ่นเหล็กลามิเนต	Laminated Steel	146–147
ความสูญเสียรวม	Total Loss	147–152
ความสูญเสียทองแดงอาร์เมเจอร์	Armature Copper Loss	147, 149–152
ความสูญเสียทองแดงขดลวดขนาน	Shunt Copper Loss	147–151
ความสูญเสียทองแดงขดลวดอนุกรม	Series Copper Loss	147, 150–151
ความสูญเสียทางแม่เหล็ก	Magnetic Losses	147–148
ความสูญเสียทางกล	Mechanical Losses	147–148
ความสูญเสียจากแรงเสียดทาน	Friction Loss	147–148, 150–152
ความสูญเสียจากแรงต้านอากาศ	Windage Loss	147–148, 150–151
แรงเสียดทานตลับลูกปืน	Bearing Friction	147
แรงเสียดทานแปรงถ่าน–คอมมิวเตเตอร์	Brush–Commutator Friction	147
แผนผังกำลัง	Power Flow Diagram	148
กำลังกลขาเข้า	Mechanical Input Power, (P_{in})	148–151
กำลังไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์	Armature Electrical Power, (P_a)	148
กำลังไฟฟ้าขาออก	Output Power, (P_{out})	148–151
ประสิทธิภาพทางกล	Mechanical Efficiency	148, 151
ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า	Electrical Efficiency	148, 151
ประสิทธิภาพทั้งหมด	Overall Efficiency	148, 151–152
ประสิทธิภาพทางการค้า	Commercial Efficiency	148–151
พิกัดกำลังไฟฟ้า	Power Rating	149–152
กำลังสูญเสียจากการหมุน	Rotational Loss	149–151

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การสูญเสียคงที่	Constant Loss	152

บทที่ 10 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและอาร์เมเจอร์รีแอคชัน

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
คุณลักษณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	DC Generator Characteristics	153–155
อาร์เมเจอร์รีแอคชัน	Armature Reaction	153, 156–168
เครื่องกำเนิดแบบกระตุ้นตัวเอง	Self-excited Generator	155
เครื่องกำเนิดแบบขดลวดสนามกระตุ้นต่อแยก	Separately Excited Generator	155–156
เครื่องกำเนิดแบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟ	Cumulative Compound Generator	154, 156–157
เครื่องกำเนิดแบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล	Differential Compound Generator	154–155, 157
โอเวอร์คอมปาวด์	Over Compound Generator	154–155, 157
แฟลตคอมปาวด์	Flat Compound Generator	154–155, 157
อันเดอร์คอมปาวด์	Under Compound Generator	154–155, 156
แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว	Terminal Voltage	153–157
แรงดันตก	Voltage Drop	156–157
แรงดันคงที่	Constant Voltage	153, 155–157
กระแสคงที่	Constant Current	155–156
เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ	Automatic Voltage Regulator; AVR	156
เอ็กไซเตอร์	Exciter	156
ระบบเบรกแบบคืนพลังงาน	Regenerative Brake	156
ซีรีส์บูสเตอร์	Series Booster	156
สนามแม่เหล็กหลัก	Main Magnetic Field	157–164
ฟลักซ์แม่เหล็กหลัก	Main Flux, (ϕ_m)	157–160
สนามแม่เหล็กอาร์เมเจอร์	Armature Magnetic Field	157–161
ฟลักซ์อาร์เมเจอร์	Armature Flux, (ϕ_A)	158–160
ขั้วแม่เหล็กหลัก	Main Pole	157–168
แกนนิวทรอล	Neutral Axis	157, 159–162, 167–168
แกนสะเทิน	Neutral Axis	159, 161, 167–168
แกนนิวทรอลสนามแม่เหล็กหลัก	Main Neutral Axis	157

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
แกนคอมมิวเตชัน	Commutating Axis	157
คอมมิวเตชัน	Commutation	157, 161–168
การเลื่อนตำแหน่งแปรงถ่าน	Brush Shift	159–164
มุมเลื่อนแปรงถ่าน	Brush Lead Angle, (θ_m)	162–166
กฎมือขวาของเฟลมมิง	Fleming's Right-Hand Rule	160
องค์ประกอบครอสแมกเนไทซิง	Cross-magnetizing Component	160–166
ฟลักซ์ครอสแมกเนไทซิง	Cross-magnetizing Flux, (ϕ_c)	160
องค์ประกอบดีแมกเนไทซิง	Demagnetizing Component	160–166
ฟลักซ์ดีแมกเนไทซิง	Demagnetizing Flux, (ϕ_d)	160
ตัวนำดีแมกเนไทซิง	Demagnetizing Conductors	162–166
ตัวนำครอสแมกเนไทซิง	Cross-magnetizing Conductors	162–166
ดีแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์น	Demagnetizing Ampere-Turns, (ATd)	163–166
ครอสแมกเนไทซิงแอมแปร์-เทิร์น	Cross-magnetizing Ampere-Turns, (ATc)	163–166
อาร์เมเจอร์แอมแปร์-เทิร์น	Armature Ampere-Turns	162–166
จำนวนแผงขนาน	Parallel Paths, (a)	162–166
การพันแบบแลป	Lap Winding	162–166
การพันแบบเวฟ	Wave Winding	162–166
ขดลวดชดเชย	Compensating Winding	161, 164–167
การชดเชยสนามแม่เหล็ก	Magnetic Field Compensation	161–168
อินเตอร์โพล	Interpole	162, 167–168
ขั้วแม่เหล็กเสริม	Interpole / Commutating Pole	162, 167–168
สนามแม่เหล็กแนวขวาง	Cross-magnetizing Field	162, 164–168
สล็อต	Slot	161, 164–165
การอาร์ค	Arcing	164
ประกายไฟที่แปรงถ่าน	Brush Sparking	157, 159–161
การบิดเบี้ยวของสนามแม่เหล็ก	Flux Distortion	159–168

บทที่ 11 หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	DC Motor	169–185
หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	Principles of Operation of DC Motor	169–171
สนามแม่เหล็ก	Magnetic Field	169–173, 180–185
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	Magnetic Flux Density, B	169, 176
เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว	Flux per Pole, ϕ	172, 176–185
กฎมือซ้ายของเฟลมมิง	Fleming's Left-Hand Rule	169
แรงบนตัวนำ	Force on Conductor, F	169–171, 176–177
นิวตัน	Newton, N	169, 176
ตัวนำอาร์เมเจอร์	Armature Conductor	170–172, 176–179
ค่าคงที่ทางไฟฟ้า	Electrical Constant, K_e	172, 181–182
รอบต่อนาที	Revolutions per Minute, rpm	172, 177–185
กระแสมอเตอร์	Motor Current, I_m	173–174, 184
แรงดันที่ป้อนมอเตอร์	Terminal/Supply Voltage, V_t	173–176, 182–185
กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์	Armature Input Power	174
กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์	Power Developed in Armature, P_m	174–178
ความสูญเสียทองแดงอาร์เมเจอร์	Armature Copper Loss, $I_a^2R_a$	174, 178–180
กำลังสูงสุด	Maximum Power, P_{max}	174
สภาวะไม่มีโหลด	No-load Condition	174–175, 183–185
แรงบิดอาร์เมเจอร์	Armature Torque, T_a	177–180
แรงบิดที่เพลา	Shaft Torque, T_{sh}	178–180
แรงบิดสูญเสีย	Lost Torque, T_L	179
โมเมนต์ของแรง	Moment of Force	176
นิวตัน-เมตร	Newton-metre, N·m	176–180
ฟุต-ปอนด์	Foot-pound, ft·lb	176
กิโลกรัม-เมตร	Kilogram-metre, kg·m	176–179
กำลังทางกล	Mechanical Power	177–180
แรงม้า	Horsepower, HP	178–180
ความสูญเสียในแกนเหล็ก	Iron Loss	178–179
ความสูญเสียจากแรงเสียดทาน	Friction Loss	178–179

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
ความสูญเสียแฝง	Stray Losses	179
มอเตอร์แบบขนาน	Shunt Motor	173, 178, 180, 183–185
มอเตอร์แบบอนุกรม	Series Motor	178, 180–183
มอเตอร์แบบผสม	Compound Motor	180–182
มอเตอร์แบบผสมชนิดคิวมูเลทีฟ	Cumulative Compound Motor	181
มอเตอร์แบบผสมชนิดดิฟเฟอเรนเชียล	Differential Compound Motor	181
ตัวต้านทานปรับค่าได้	Variable Resistor	180–181
ไดเวอร์เตอร์	Diverter	181
ความอิ่มตัวของขั้วแม่เหล็ก	Magnetic Saturation	178, 183
ความเร็วของมอเตอร์	Motor Speed	180–185
สมการความเร็ว	Speed Equation	182–183
ความเร็วเรกูเลชัน	Speed Regulation	183–184
ความเร็วขณะไม่มีโหลด	No-load Speed	183
ความเร็วขณะโหลดเต็มพิกัด	Full-load Speed	183
เปอร์เซ็นต์ความเร็วเรกูเลชัน	Percent Speed Regulation	183
แรงดันตกคร่อมแปรงถ่าน	Brush Voltage Drop	179, 185

บทที่ 12 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการใช้งาน

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	DC Motor Control	186–204
การสตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	Starting Methods of a DC Motor	186–189
กระแสสตาร์ต	Starting Current	186–187
แรงบิดเริ่มต้น	Starting Torque	186
แรงเหวี่ยงหนีศูนย์	Centrifugal Force	186
ความเฉื่อย	Inertia	187, 200
คอนแทกเตอร์	Contactor	187
อุปกรณ์สตาร์ตมอเตอร์	DC Motor Starter	187–189
สตาร์ตเตอร์แบบ 2 จุด	2-Point Starter	189
สตาร์ตเตอร์แบบ 3 จุด	3-Point Starter	187–188
สตาร์ตเตอร์แบบ 4 จุด	4-Point Starter	187–189
สตาร์ตเตอร์มอเตอร์แบบอนุกรม	DC Series Motor Starter	189

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
ความต้านทานภายนอก	External Resistance	187, 199, 202
คอยล์แม่เหล็ก	Magnetic Coil	187–189
การป้องกันกระแสเกิน	Overcurrent Protection	188
โหลดเกิน	Overload	188
รีโอสแตตสนาม	Field Rheostat	188–189
การกลับทางหมุน	Reversing	189–191
กฎมือซ้ายของมอเตอร์	Left-Hand Rule of Motor Action	189
มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร	Permanent-Magnet Motor	190
การสลับขั้ว	Polarity Reversal	190–191, 199–201
การหมุนเกินความเร็ว	Run-away	190
วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบขนาน	Shunt Motor Reversing Circuit	190
วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบอนุกรม	Series Motor Reversing Circuit	191
วงจรกลับทางหมุนมอเตอร์แบบผสม	Compound Motor Reversing Circuit	191
สนามแม่เหล็กเสริมกัน	Cumulative Compound	191
สนามแม่เหล็กหักล้างกัน	Differential Compound	191
การควบคุมความเร็ว	Speed Control	191–198
การควบคุมสนามแม่เหล็ก	Field Control	192–194
การควบคุมด้วยรีโอสแตต	Rheostatic Control	192
การควบคุมแรงดันไฟฟ้า	Voltage Control	192
การควบคุมแบบโซลิดสเตต	Solid-State Control	192
มอเตอร์แบบกระตุ้นแยก	Separately Excited Motor	192
กระแสสนามแม่เหล็ก	Field Current	192–194
ตัวต้านทานปรับค่าได้	Variable Resistor	192–201
ไดเวอร์เตอร์	Diverter	193–194, 197–198
ไดเวอร์เตอร์สนาม	Field Diverter	193–194
อาร์เมเจอร์ไดเวอร์เตอร์	Armature Diverter	193–194
การแทปขดลวดสนามแม่เหล็ก	Tapped Field Control	193–194
การต่อขนานขดลวดสนามแม่เหล็ก	Parallel Field Control	193–197
ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า	Electric Traction	194
ตัวต้านทานปรับค่าสนามขนาน	Shunt Regulator	195–196
การเบรก	Brake / Braking	198–203

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การเบรกแบบกลไกไฟฟ้า	Electro-mechanical Braking	198
เบรกแบบใช้แรงเสียดทาน	Friction Brake	198
เครื่องผลัก	Thrustor	198
เบรกแบบไฮดรอลิก	Hydraulic Type Brake	198
การเบรกไฟฟ้า	Electric Braking	198–203
การเบรกแบบปลั๊กกิ้ง	Plugging	198–202
การเบรกแบบใช้กระแสย้อนกลับ	Counter-current Braking	198–202
การเบรกแบบรีโอสแตติก	Rheostatic Braking	198–201
การเบรกแบบไดนามิก	Dynamic Braking	198–200
การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ	Regenerative Braking	199–203
การเบรกแบบคืนพลังงาน	Regenerative Braking	200–203
โหลดแบบพาให้หมุนต่อ	Overhauling Characteristic	200
สนามแม่เหล็กตกค้าง	Residual Magnetism	201
แรงบิดในการเบรก	Braking Torque, (Tb)	202
แรงดันตกคร่อมแปรงถ่าน	Brush Voltage Drop	203

บทที่ 13 การสูญเสียและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
กำลังขาเข้า	Input Power, (Pin)	205–214
กำลังขาออก	Output Power, (Pout)	205–214
ภาระโหลด	Load	205, 208–214
พิกัดกำลัง	Power Rating	205, 209, 212–214
การสูญเสียทางไฟฟ้า	Electrical Losses	206, 214
การสูญเสียในขดลวดทองแดง	Copper Losses	206, 208–214
กฎของจูล	Joule’s Law	206
การสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์	Armature Copper Loss	206, 208–214
การสูญเสียในขดลวดสนามอนุกรม	Series Copper Loss	206, 214
การสูญเสียในขดลวดสนามขนาน	Shunt Copper Loss	206, 208–214
การสูญเสียเชิงกลจากการหมุน	Rotational Losses	206–207
การสูญเสียในแกนเหล็ก	Core Loss	206–207, 214
การสูญเสียฮิสเทอรีซิส	Hysteresis Loss	206

คำศัพท์ทางเทคนิค	ภาษาอังกฤษ / สัญลักษณ์	หน้า
การสูญเสียจากกระแสไหลวน	Eddy Current Loss	206
การสูญเสียจากแรงเสียดทาน	Friction Loss	206–207, 214
การสูญเสียจากแรงต้านลม	Windage Loss	206–207, 214
แรงเสียดทานตลับลูกปืน	Bearing Friction	206
แรงเสียดทานแปรงถ่าน	Brush Friction	206
ความสูญเสียทางกล	Mechanical Loss	206–207, 214
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	Magnetic Flux Density	207
กำลังที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์	Armature Developed Power	207, 213
เงื่อนไขประสิทธิภาพสูงสุด	Condition of Maximum Efficiency	207–209, 214
ความสูญเสียคงที่	Constant Loss, (P_c)	208–214
ความสูญเสียไม่คงที่	Variable Loss	208–210, 214
เส้นโค้งประสิทธิภาพ	Efficiency Curve	208–209
กำลังพิกัด	Rated Power	209, 212–214
กำลังสูญเสียรวม	Total Losses	209–214
กระแสขาเข้ามอเตอร์	Motor Input Current, (I_m)	209–213
การสูญเสียแฝง	Stray Losses	212–213
การสูญเสียทองแดงรวม	Total Copper Losses	213
กำลังกลที่เพลา	Shaft Mechanical Power	214
สภาวะไม่มีโหลด	No-load Condition	212, 214
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน	Shunt DC Motor	209–214
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม	Series DC Motor	214

เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1

ELECTRICAL MACHINE 1

เนื้อหาของตำราเล่มนี้ กล่าวถึงเรื่องของการเปลี่ยนรูปพลังงาน แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก หลักการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้า หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการควบคุม พร้อมทั้งส่วนของเอกสารประกอบการทดลองเรื่องหม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งตรงตามหัวข้อที่กำหนดไว้ในหลักสูตร ทั้งนี้เพื่อให้นักศึกษามีความรู้และทักษะปฏิบัติเพียงพอที่จะใช้ในการประกอบวิชาชีพหรือการศึกษาต่อในระดับที่สูงขึ้น

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์