



รถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้
Knockdown Electric Tricycle for Disabled

โดย
เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2558

KNOCKDOWN ELECTRIC TRICYCLE FOR DISABLED

By

Jensak Ekburanawat

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2015

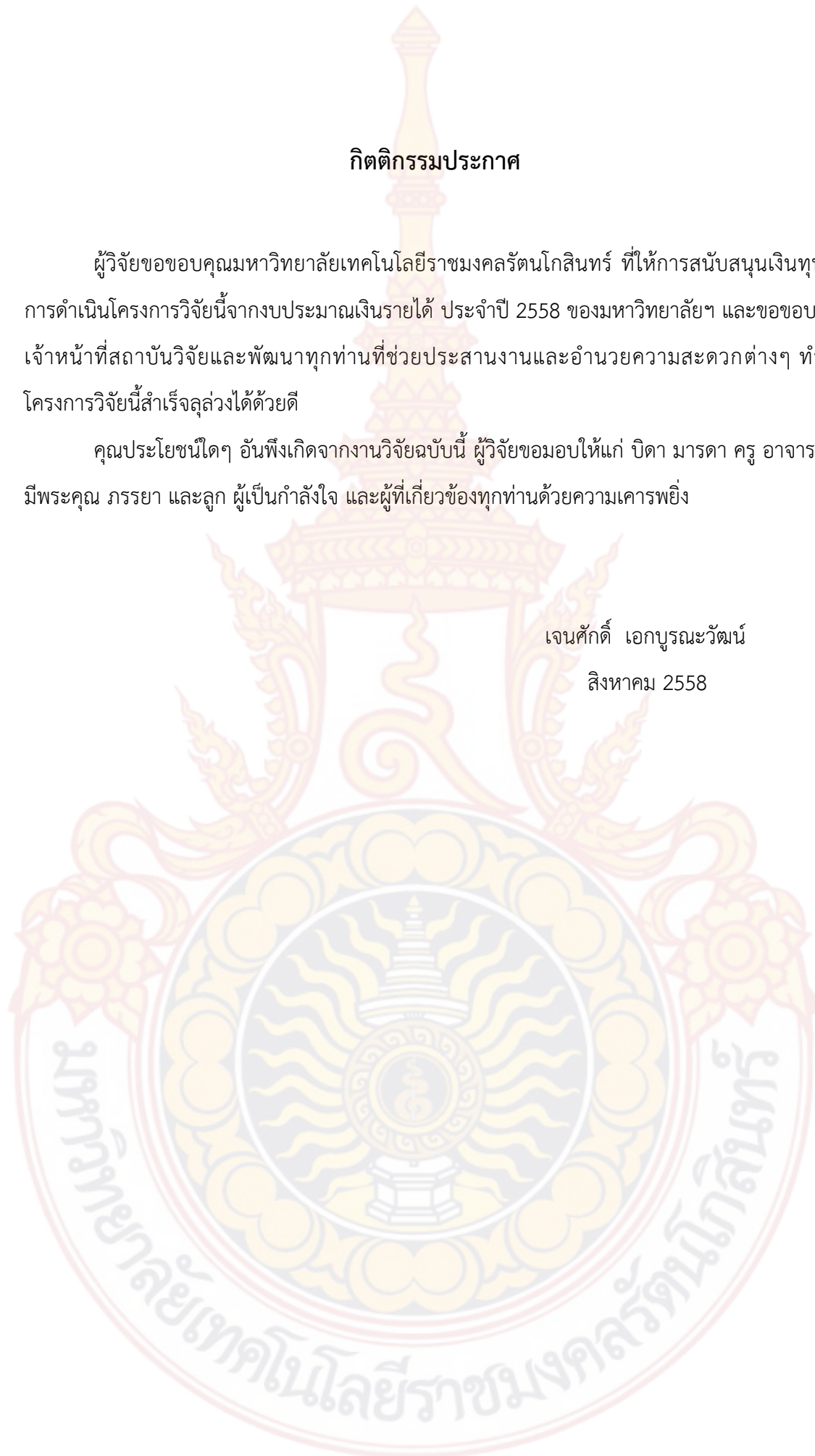
กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินโครงการวิจัยนี้จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2558 ของมหาวิทยาลัยฯ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยและพัฒนาทุกท่านที่ช่วยประสานงานและอำนวยความสะดวกต่างๆ ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณประโยชน์ใดๆ อันพึงเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ครู อาจารย์ ผู้มีพระคุณ ภรรยา และลูก ผู้เป็นกำลังใจ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านด้วยความเคารพยิ่ง

เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์

สิงหาคม 2558



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : พิเศษ 011/2558

ชื่อโครงการ : รถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้

ชื่อนักวิจัย : ผศ.ดร.เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้ ลักษณะของรถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวของรถ และส่วนของรถเข็นคนพิการ โครงสร้างของส่วนหัวของรถสามล้อมีลักษณะเหมือนชุดล้อหน้าของจักรยานประกอบด้วยคันทิ้งค้ำ ตะเกียบหน้า และล้อหน้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นิ้ว โครงสร้างออกแบบให้สามารถประกอบเข้ากับรถเข็นคนพิการแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยสร้างจุดเชื่อมต่อแบบถอดได้จำนวน 4 จุด โดยผู้พิการสามารถใส่และถอดส่วนหัวของรถได้ด้วยตนเอง ระบบขับเคลื่อนของรถใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 36 V 350 W มอเตอร์จะเป็นแบบฝังอยู่ในล้อ (Wheel motor) จากผลการทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าสามารถใช้งาน ได้ 1.15 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน หรือคิดเป็นระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีระยะเวลาในการประจุแบตเตอรี่ประมาณ 6 ชั่วโมง

คำสำคัญ: สามล้อไฟฟ้า คนพิการ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

E-mail Address : jensak.eak@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม 2557 – กันยายน 2558

Abstract

Code of project : พิเศษ 011/2558
Project name : Knockdown Electric Tricycle for Disabled
Researcher name : Asst.Prof. Dr.Jensak Ekburanawat

This research describes the development of knockdown electric tricycle for disabled. The structure of tricycle was split into two parts are a front part and a wheelchair. The front part tricycle was similar as a front part of a normal bicycle. It consists of the handlebar, front fork and 20 inch wheel. The front part of tricycle was design to assemble with the general wheelchair by four jointing point. The disable can be put on and take of it by themselves. The driving system of tricycle is the front wheel drive which uses the 36V, 350W brushless motor as a wheel motor. From the experiment, the tricycle can be operates for 1.15 hour continuous or a distance of 20 km, at 22 km/hour average speed. The charging period are about six hour.

Keyword: Electric Tricycle, Disable, DC brushless motor

E-mail Address : jensak.eak@rmutr.ac.th

Period of project : October 2014 – September 2015

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 คนพิการ	3
2.2 ล้อเข็น (Wheelchair)	5
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)	7
2.4 ไอซีเบอร์ MC33033	15
2.5 ไอซีเบอร์ MC33039	18
2.6 ทฤษฎีการขับมอเตอร์	20
2.7 วงจรภาคกำลัง	29
2.8 ทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ	31
3.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	32
3.2 การออกแบบสร้างชุดล้อไฟฟ้าพร้อมแฮนด์บังคับ	33
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	40
4.1 การทดสอบชุดล้อไฟฟ้าพร้อมแฮนด์บังคับ	35
4.3 ผลการทดสอบสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้	40

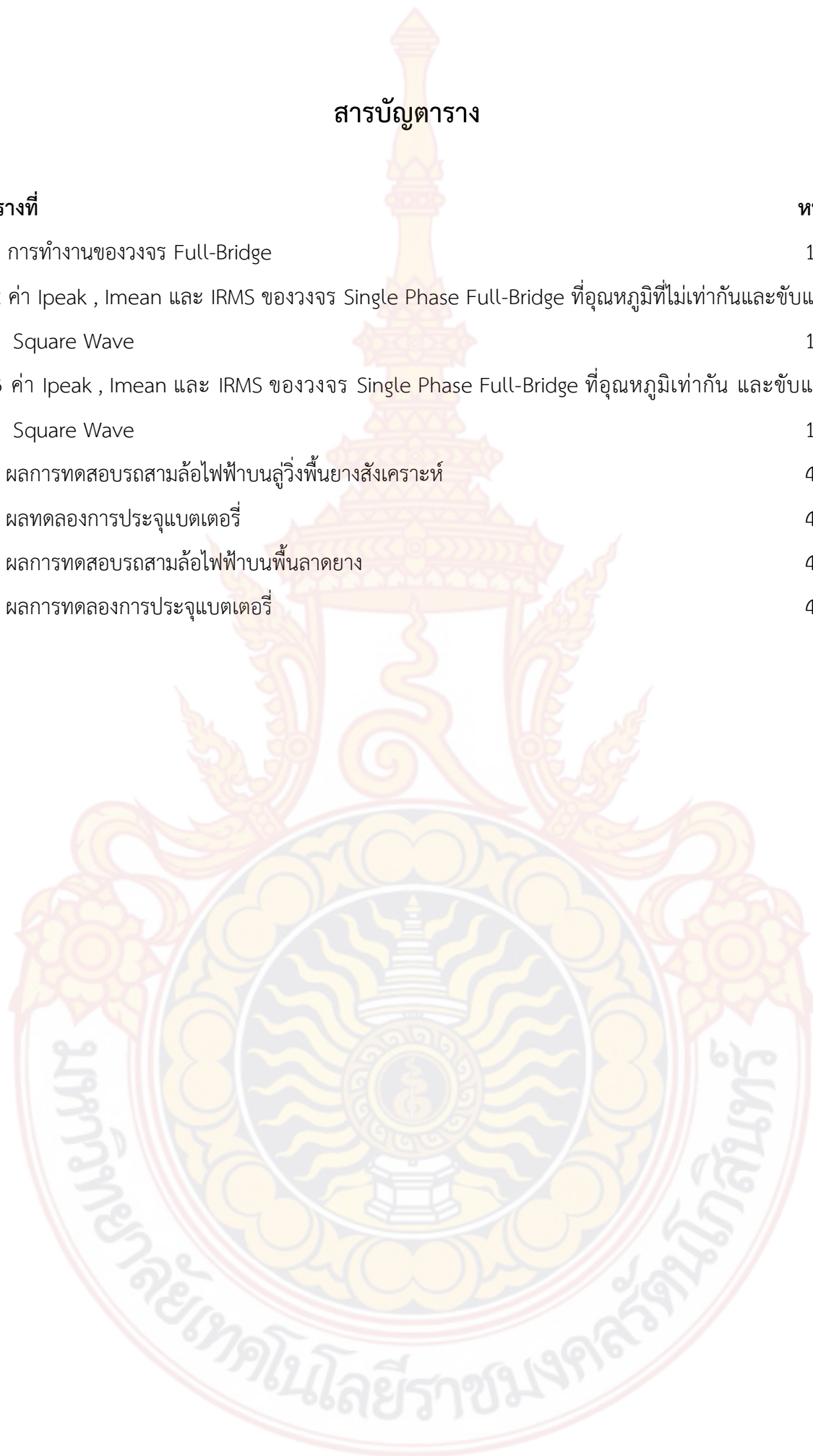
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป	43
5.1 สรุปผลโครงการ	
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	
5.3 ข้อเสนอแนะ	
บรรณานุกรม	44
ประวัตินักวิจัย	45



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การทำงานของวงจร Full-Bridge	12
2-2 ค่า I_{peak} , I_{mean} และ I_{RMS} ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิต่างกันและช้แบบ Square Wave	14
2-3 ค่า I_{peak} , I_{mean} และ I_{RMS} ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิเท่ากัน และช้แบบ Square Wave	14
4.1 ผลการทดสอบบรรดสามล้อไฟฟ้าบนลู่รังพื้นยางสังเคราะห์	40
4.2 ผลทดลองการประจุแบตเตอรี่	41
4.3 ผลการทดสอบบรรดสามล้อไฟฟ้าบนพื้นลาดยาง	41
4.4 ผลการทดลองการประจุแบตเตอรี่	41



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 Wheelchair	5
2-2 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านที่มีโรเตอร์ภายใน	8
2-3 แรงดันพัลส์วิดิมอดูเลชัน	10
2-4 กระแสเรกูลेशन	10
2-5 วงจรควบคุมแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส	11
2-6 วงจร Half-Bridge โดยแสดงการลดระดับของแหล่งจ่ายไฟ DC	12
2-7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรควบคุมแบบ Full-Bridge โดยมีคาบเวลากระแสฟอว์เวิร์ดที่ Single phase load 180°	13
2-8 รูปคลื่นกระแสและ EMF แบบ 2 เฟส	15
2-9 รูปคลื่นสัญญาณการทำงานของไอซีเบอร์ MC33033	16
2-10 รูปคลื่นแสดงตำแหน่งโรเตอร์ 60° และ 120° องศาไฟฟ้า	16
2-11 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33033	17
2-12 ความสัมพันธ์ของค่า R_T และ C_T ในการกำหนดความถี่ PWM	18
2-13 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33039	18
2-14 ความสัมพันธ์ของค่า R_T และ C_T ในการกำหนดความถี่ PWM	19
2-15 รูปคลื่นการทำงานของ Motor Three Phase	19
2-16 แบบจำลองการสวิตช์เหนี่ยวนำ	20
2-17 ช่วงเวลามอสเฟตทำงาน	21
2-18 ช่วงเวลาการสั่งหยุดการทำงานของมอสเฟต	22
2-19 ส่วนประกอบวงจรขับเคลื่อนในสภาวะรีโซแนนซ์	26
2-20 แสดงวงจรขับเคลื่อน และวงจรภายใน TLP250	28
2-21 วงจรภาคกำลัง	29
3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	31
3-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของรถสามล้อไฟฟ้า	32
3-3 ประกอบ Brushless Dc Motor เข้ากับล้อขนาด 50.8 ซม	33
3-4 นำล้อประกอบเข้ากับแฮนด์บังคับ	34
3-5 ภาพรวมของรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้	34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในการที่คนเราจะเดินทางไปไหนมาไหนนั้นถ้าหากว่าสภาพร่างกายของเราเป็นปกติก็คงจะดีเพราะจะได้เดินทางไปไหนมาไหนได้สะดวกสบายและรวดเร็ว แต่ในความเป็นจริงแล้วยังมีกลุ่มคนอีกกลุ่มหนึ่งที่ไม่สามารถเดินทางไปไหนมาไหนได้สะดวกเหมือนบุคคลทั่วไปนั่นก็คือ กลุ่มคนพิการ กลุ่มผู้พิการถือเป็นกลุ่มผู้ด้อยโอกาสในสังคมซึ่งควรได้รับการช่วยเหลือสนับสนุนให้สามารถช่วยเหลือตนเองได้ในการดำเนินชีวิตให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายในการดูแลผู้พิการแล้ว ยังเป็นการส่งเสริมและสนับสนุนให้ผู้พิการมีความภาคภูมิใจในการใช้ชีวิตอย่างมีคุณค่า ไม่เป็นภาระของสังคม ผู้พิการยังเป็นการกำลังสำคัญส่วนหนึ่งในการพัฒนาประเทศชาติให้ก้าวหน้าต่อไปได้อีกด้วย จากการสำรวจความพิการและทุพพลภาพของประเทศไทยที่ผ่านมา พบว่าสัดส่วนผู้พิการในประเทศโดยรวมไม่มีความเปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตาม พบว่ายังมีประเด็นของความเหลื่อมล้ำในกลุ่มผู้พิการในหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยกำหนดสุขภาพทางสังคม (Social Determinants of Health; SDH) ยกตัวอย่างเช่น การศึกษา การประกอบอาชีพ และรายได้ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลในทางลบต่อสุขภาพของผู้พิการ

ในคนพิการ 100 คนจะมีการใช้เครื่องช่วย 22-23 คน สัดส่วนของคนพิการที่ใช้เครื่องช่วย ต่อคนพิการทั้งสิ้น คิดเป็นร้อยละ 22.7 ที่มีการใช้อุปกรณ์ อวัยวะเทียม หรือใช้เครื่องช่วยในการดำรงชีวิต ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนคนพิการที่ใช้เครื่องช่วย ในแต่ละภูมิภาค พบว่าภาคกลาง (รวม กทม.) มีสัดส่วนการใช้เครื่องช่วยมากที่สุด คือ ร้อยละ 27.4 รองลงมาคือภาคเหนือ ภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ร้อยละ 24.7, 22.3 และร้อยละ 19.1 ตามลำดับ สำหรับการกระจายตัวของการใช้เครื่องช่วย ในภูมิภาคต่างๆ พบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีคนพิการที่ใช้เครื่องช่วยมากที่สุด (ร้อยละ 34.5) เนื่องจากเป็นภูมิภาคที่มีจำนวนคนพิการมากที่สุดในขณะที่ภาคใต้มีคนพิการที่ใช้เครื่องช่วยน้อยที่สุด [1] ผู้ศึกษาจึงได้เล็งเห็นความสำคัญและปัญหาที่เกิดขึ้นกับผู้พิการทางขาและผู้พิการซ้่าซ้อจนจึงได้นำเอาเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และทางด้านไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับรถเข็นคนพิการเพื่อช่วยให้ผู้พิการทางขาหรือผู้ทุพพลภาพสามารถเดินทางไปต่างๆ ได้โดยไม่ต้องลำบากเข็นเองและยังช่วยอำนวยความสะดวกให้ผู้พิการทางขาหรือผู้ทุพพลภาพสามารถควบคุมรถเคลื่อนที่ไปตามจุดต่างๆ ภายในบ้านสำนักงานหรือตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวกขึ้น ซึ่งช่วยแบ่งเบาภาระแก่ผู้อื่นที่ต้องดูแลผู้ป่วยได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดล้อไฟฟ้าพร้อมคันบังคับที่สามารถประกอบเข้ากับรถเข็นสำหรับผู้พิการปกติทั่วไปให้กลายเป็นรถสามล้อไฟฟ้า

2. เพื่อศึกษาความพึงพอใจในการใช้งานผู้พิการ เพื่อการพัฒนาให้ดีขึ้น
3. เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้เกิดประโยชน์ต่อผู้พิการและส่งเสริมให้มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

1.3 ขอบเขต

ออกแบบสร้าง และทดสอบชุดล้อไฟฟ้าแบบฮับมอเตอร์ (Hub motor) พร้อมคันบังคับที่สามารถประกอบเข้ากับรถเข็นสำหรับผู้พิการปกติทั่วไปให้กลายเป็นรถสามล้อไฟฟ้า พร้อมนำไปทดลองใช้งานจริงกับผู้พิการเพื่อเก็บข้อมูลความพึงพอใจและข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงให้ดีขึ้นในอนาคต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เรื่องการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสำหรับผู้พิการทางขา
2. ได้ชุดล้อไฟฟ้าแบบถอดประกอบได้ โดยที่ตัวผู้พิการทางขาสามารถถอดประกอบได้ด้วยตัวของผู้พิการทางขาเอง
3. ได้นางานวิจัยที่สร้างขึ้นไปใช้ประโยชน์กับผู้พิการทางขาและสามารถเป็นต้นแบบสำหรับหน่วยงานหรือผู้ที่สนใจเพื่อนำไปช่วยเหลือคนพิการทางขา

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการทางขาแบบถอดประกอบได้ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเหลือคนพิการทางขาอีกทางหนึ่ง เป็นอุปกรณ์ที่ยังไม่ค่อยมีคนออกแบบและการสร้างรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการทางขาแบบถอดประกอบได้ กลุ่มโครงการของผู้ศึกษาจึงสนใจและศึกษาที่จะนำเอามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) และวงจรควบคุม มาศึกษาพฤติกรรมการทำงานรวมถึงทฤษฎีต่างๆ เพื่อเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเหลือคนพิการทางขา จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 คนพิการ

2.1.1 ความหมายของคนพิการ

คนพิการ หมายความว่า บุคคลซึ่งมีข้อจำกัดในการปฏิบัติกิจกรรมในชีวิตประจำวันหรือเข้าไปมีส่วนร่วมทางสังคม เนื่องจากมีความบกพร่องทางการเห็น การได้ยิน การเคลื่อนไหว การสื่อสาร จิตใจ อารมณ์ พฤติกรรม สติปัญญาและการเรียนรู้หรือความบกพร่องอื่นใด ประกอบกับมีอุปสรรคในด้านต่างๆ และมีความจำเป็นเป็นพิเศษที่จะต้องได้รับความช่วยเหลือด้านหนึ่งด้านใด เพื่อให้สามารถปฏิบัติกิจกรรมในชีวิตประจำวันหรือเข้าไปมีส่วนร่วมทางสังคมได้อย่างบุคคลทั่วไป [2]

2.1.2 ประเภทของคนพิการ

2.1.2.1 คนพิการทางการมองเห็น ได้แก่ คนที่มีสายตาข้างที่ตีกว่าเมื่อใช้แว่นสายตาธรรมดาแล้วมองเห็นน้อยกว่า 6/18 หรือ 20/70 ลงไปจนมองไม่เห็นแม้แต่แสงสว่างหรือคนที่มีลานสายตาแคบกว่า 30 องศา

2.1.2.2 คนพิการทางการได้ยินหรือการสื่อความหมาย ได้แก่ คนที่ได้ยินเสียงที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ 1000 เฮิรตซ์หรือ 2000 เฮิรตซ์ในหูข้างที่ตีกว่าที่มีความดังเฉลี่ยดังต่อไปนี้

(1) สำหรับเด็กอายุไม่เกิน 7 ปี เกิน 40 เดซิเบล ขึ้นไปจนไม่ได้ยินเสียง

(2) สำหรับคนทั่วไปเกิน 55 เดซิเบล ขึ้นไปจนไม่ได้ยินเสียงหรือคนที่มีความผิดปกติหรือความบกพร่องในการเข้าใจหรือการใช้ภาษาพูดจนไม่สามารถสื่อความหมายกับคนอื่นได้

2.1.2.3 คนพิการทางกายหรือการเคลื่อนไหว ได้แก่ คนที่มีความผิดปกติหรือความบกพร่องของร่างกายที่เห็นได้อย่างชัดเจนและไม่สามารถประกอบกิจวัตรหลักในชีวิตประจำวันได้หรือคนที่มีการสูญเสียความสามารถในการเคลื่อนไหวมือแขนขาหรือลำตัวอันเนื่องมาจากแขนหรือขาขาดอัมพาตหรืออ่อนแรงโรคข้อหรืออาการปวดเรื้อรังรวมทั้งโรคเรื้อรังของระบบการทำงานของร่างกายอื่นๆที่ทำให้ไม่สามารถประกอบกิจวัตรหลักในชีวิตประจำวันหรือดำรงชีวิตในสังคมเยี่ยงคนปกติได้

2.1.2.4 คนพิการทางจิตใจหรือพฤติกรรม ได้แก่ คนที่มีความผิดปกติหรือความบกพร่องทางจิตใจหรือสมองในส่วนของความรู้หรืออารมณ์ความคิดจนไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมที่จำเป็นในการดูแลตนเองหรืออยู่ร่วมกับผู้อื่น

2.1.2.5 คนพิการทางสติปัญญาหรือการเรียนรู้ ได้แก่ คนที่มีความผิดปกติหรือความบกพร่องทางสติปัญญาหรือสมองจนไม่สามารถเรียนรู้ด้วยวิธีการศึกษาปกติได้ [3]

2.1.3 สถานการณ์คนพิการในปัจจุบัน

สถานการณ์คนพิการในระดับภาค จากฐานข้อมูลทะเบียนกลางคนพิการ สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการแห่งชาติ สํารวจคนพิการเมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2555 พบว่า มีคนพิการจำนวนประมาณ 1,268,496 คน หรือ คิดเป็นร้อยละ 1.98 ของประชากรทั้งหมด จำนวน 64,076,033 คน (31 ธันวาคม 2554) โดยเพศหญิงมีสัดส่วนที่สูงกว่าเพศชายเล็กน้อย คือร้อยละ 1.08 และร้อยละ 0.89 ตามลำดับ ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มผู้สูงอายุ และเป็นคนพิการมีบัตรประจำตัวคนพิการแล้วจำนวน 1,268,496 คน เป็นชาย 694,270 คน หญิงจำนวน 574,226 คน ทั้งนี้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีประชากรที่พิการสูงกว่าภาคอื่น รองลงมาคือภาคเหนือ จำนวน 484,090 คน และ 290,637 คน และจากสถิติข้อมูลคนพิการที่มีบัตรประจำตัวคนพิการจำแนกตามเพศ และภูมิภาค ตั้งแต่วันที่ 1 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2537 จนถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2556 พบว่า คนพิการมีบัตรประจำตัวคนพิการแล้วจำนวน 1,356,003 คน เป็นชาย 738,839 คน หญิงจำนวน 617,164 คน ทั้งนี้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีประชากรที่พิการสูงกว่าภาคอื่นรองลงมาคือภาคเหนือ จำนวน 523,181 คนและ 311,732 คน ตามลำดับ จากข้อมูลสองปีที่ผ่านมาพบว่า คนพิการนับวันมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและการดูแลคนพิการที่นับวันยิ่งทวีจำนวนเพิ่มนั้นก็มีความสำคัญอย่างยิ่งในปัจจุบัน (สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการแห่งชาติ, 2556ก,2556 ข) การศึกษาผลกระทบของความพิการต่อคุณภาพชีวิตในบังคลาเทศ พบว่า ความพิการส่งผลทำลายคุณภาพชีวิตของคนที่มีความพิการ โดยเฉพาะมีผลกระทบทางลบในเรื่องการแต่งงาน เป้าหมายทางการศึกษา การจ้างงาน และภาวะทางอารมณ์ ความพิการยังส่งผลด้านลบต่อชีวิตส่วนตัว ครอบครัวและชีวิตสังคมอีกด้วย (Monawar Hosain, Atkinson, & Underwood, 2002) คุณภาพชีวิตของคนพิการขึ้นกับหลากหลายปัจจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งความรุนแรงของความพิการ ที่พักอาศัย และเกี่ยวข้องกับภาวะซึมเศร้าด้วย (Jomli et.al., 2013) มีการศึกษาพบว่า คุณภาพชีวิตของคนพิการตำบลท่าช้าง จังหวัดจันทบุรี โดยส่วนใหญ่มีคุณภาพชีวิตโดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อพิจารณารายด้านพบว่า คนพิการส่วนใหญ่มีคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพกาย ด้านจิตใจ ด้านสัมพันธภาพทางสังคม ด้านสิ่งแวดล้อม และหมวดคุณภาพชีวิตและสุขภาพโดยรวมอยู่ในระดับปานกลาง (ยศพล เหลืองโสมนภา, สาคร พร้อมเพราะ, และสุกัญญา ชันวิเศษ, 2554) นอกจากนี้มีการศึกษาคุณภาพชีวิตของคนพิการทางกาย ซึ่งส่วนใหญ่มีลักษณะความพิการทางการเคลื่อนไหว (แขน/ขา ผิดรูป) พบว่าคนพิการทางกายมีคุณภาพชีวิตการทำงานอยู่ในระดับปานกลาง (สุทิน จันทา, วรุณี เขาวาน์สุขุม, และวงศ์ธิดา สุวรรณิน, 2554) ดังนั้น การดูแลให้คนพิการมีคุณภาพชีวิตที่ดีผ่านการให้บริการ สวัสดิการ สิทธิประโยชน์ และการช่วยเหลือที่เหมาะสมที่ครอบคลุมด้านการแพทย์ การศึกษา อาชีพและสังคมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

2.2 ล้อเข็น (Wheelchair)

ล้อเข็น (W/C) เป็นอุปกรณ์ช่วยในการเคลื่อนที่มีลักษณะคล้ายเก้าอี้ แต่มีล้อผู้นั่งสามารถหมุนหรือบังคับล้อให้ขับเคลื่อนได้เองหรือบางครั้งอาจให้ผู้อื่นช่วยเข็นได้ ซึ่งอุปกรณ์ล้อเข็นสามารถช่วยให้ผู้ป่วยมีการเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนสถานที่และช่วยให้ผู้ป่วยสามารถกระทำกิจวัตรประจำวันได้มากขึ้น



ภาพที่ 2-1 Wheelchair

2.2.1 ส่วนประกอบของล้อเข็น

2.2.1.1 ล้อ (Wheels) โดยทั่วไปล้อเข็นจะมีล้อ 2 คู่ ได้แก่

(1) ล้อหลัง (Drive wheels) จะอยู่ข้างหลัง มีขนาดใหญ่ ขนาดมาตรฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว ความสูงของที่นั่งปกติ จากพื้น 20 นิ้ว ถ้ารถเข็นชนิดถอดที่วางแขนออกได้ล้อหลังจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้ว เพื่อให้พอดีกับระดับที่นั่ง

(2) ล้อหน้า (Caster wheels) เป็นล้อขนาดเล็กที่อยู่ข้างหน้า ขนาดมาตรฐานมี 2 ขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว เหมาะสำหรับพื้นที่ไม่เรียบ เช่น พรอม พื้นหญ้า หรือพื้นขรุขระ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว จะทำให้การขับเคลื่อนคล่องกว่า วงเลี้ยวแคบ

2.2.1.2 ยาง (Tire) มี 2 ชนิดคือ

- (1) ชนิดยางตัน (Solid rubber) นิยมใช้มากกว่า เพราะทนทานและคล่องกว่า
- (2) ชนิดอัดลม (Pneumatic tire) มีความเสียดทานมากต้องใช้แรงมากในการเข็น เมื่อผ่านพื้นขรุขระจะไม่สะเทือนและไม่ค่อยเลื้อน แต่อาจจะดูแลรักษายาก

2.2.1.3 ที่หมุนล้อ (Wheel rim or Hand rim) เป็นวงล้อทำด้วย stainless steel อยู่ติดกับล้อใหญ่ ทั้ง 2 ข้าง แต่ขนาดเล็กกว่าเล็กน้อย ใช้สำหรับจับหมุนล้อ

2.2.1.4 ที่ห้ามล้อ (Brake, Wheel lock) รถเข็นทุกคันต้องมีห้ามล้อติดที่ล้อใหญ่ทั้ง 2 ข้าง ปกติจะสูงระดับขนาดที่นั่ง

2.2.1.5 ที่วางแขน (Armrests) ขนาดมาตรฐานสูงจากที่นั่งประมาณ 10 นิ้ว ที่วางแขนมีหลายแบบ

2.2.1.6 ที่นั่ง (Seat) ขนาดมาตรฐาน 18 นิ้ว ลึก 16 นิ้ว สูงจากพื้น 20 นิ้ว ความกว้างของที่นั่ง ควรนั่งพอดีตัว เมื่อนั่งแล้วรู้สึกสบาย ไม่ถูกเบียดหรือไม่กว้างเกินไป จนต้องกางแขนมากขณะหมุนล้อ ส่วนความลึกควรให้รองรับได้ตลอดต้นขาถึงข้อพับเข่า ความสูงจากพื้นควรให้วางเท้าบนแผ่นที่วางเท้าได้สบายและมั่นคง

2.2.1.7 พนักพิงหลัง (Back rest) แบบมาตรฐานพนักพิงหลังทำด้วยนั่งเทียมยึดติดด้านหลังสูงจากที่นั่ง 16 นิ้วนอกจากนี้ พนักพิงหลังสามารถดัดแปลงได้ดังนี้

- (1) พนักพิงหลังประเภทถอดออกได้ (Detachable backrest) สามารถถอดออกเพื่อเคลื่อนย้ายตัวออกไปด้านหลัง
- (2) พนักพิงหลังประเภทปรับเอนได้ (Reclining back rest) อาจปรับเอนได้ช่วง 90-180 องศา หรือ 90-150 องศา และอาจต้องมีแผ่นรับศีรษะ (Head rest)

2.2.1.8 ที่วางเท้า (Foot rest) เป็นแผ่นโลหะสามารถพับขึ้นได้เพื่อให้ไปนั่งและลูกเข็นเข้าออกได้สะดวก ระยะห่างจากที่นั่งเท่าความยาวของขาตั้งแต่ข้อพับถึงส้นเท้า ที่วางเท้าควรมีแผ่นหนังด้านหลังป้องกันเท้าหล่น เรียกว่า Heel strap

2.2.1.9 ที่รองขา (Leg rests) มีหลายแบบดังนี้

- (1) Swing foot rest สามารถถอดสลักออกได้แล้วผลักไปด้านข้างได้
- (2) Removable leg rest สามารถถอดออกได้ มีประโยชน์ในการเข็นให้ชิดโต๊ะ เพียง
- (3) Elevating leg rest มีแผ่นกระดาน หรือโฟมหุ้มด้วยหนังติดเหนือที่วางเท้าเพื่อรองรับขา และสามารถปรับระดับให้อยู่ในแนวนอนได้

2.2.1.10 คานยกล้อหน้า (Tipping lever) อยู่ด้านหลังของล้อ ใช้สำหรับให้คนเข็นใช้เท้าเหยียบลงเพื่อยกล้อหน้าให้พ้นพื้น ขณะขึ้นลงพื้นต่างระดับ เช่นฟุตบอลหรือขึ้นลงทางลาดชัน

2.2.1.11 ที่จับ (Chair handle) สำหรับให้ผู้ดูแลใช้จับเพื่อช่วยเข็นรถให้ผู้ป่วย

2.2.1.12 แผ่นกันเบียด (Side guards) เป็นโลหะติดที่ใต้ที่วางแขนเพื่อป้องกันผ้าโดนล้อรถสกปรก

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) (วิชญและทศพล, 2552: 36-37)

2.3.1 ความหมายและรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) มีลักษณะตามชื่อของมัน คือ เป็นมอเตอร์ที่ปราศจากแปรงถ่าน สลิปริง และ คอมมิวเตเตอร์ ซึ่งสิ่งเหล่านั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ที่พันอยู่บนโรเตอร์

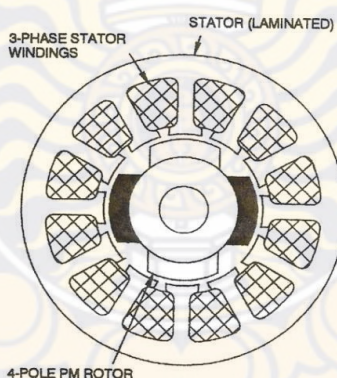
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านมีส่วนประกอบที่สำคัญคือส่วนหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวรและส่วนอยู่กับที่เป็นขดลวดอาร์เมเจอร์ถ้าย้อนกลับไปพิจารณาถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านในการทำงานแม่เหล็กถาวรจะอยู่กับที่ในขณะที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนหมุน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 2 ชนิด กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำกลับไปกลับมาเพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กขึ้น ในทำนองเดียวกันเพื่อให้แน่ใจว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกันให้สังเกตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน การกลับขั้วถูกจัดการโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านการกลับขั้วถูกจัดการโดยทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งต้องถูกสวิตช์ไปตามลำดับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์เช่นเดียวกัน ซึ่งการตรวจสอบตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์จะใช้ตัวถอดรหัส (Encoder) แทนการใช้คอมมิวเตเตอร์กับแปรงถ่าน ขบวนการติดต่อทางไฟฟ้าของมอเตอร์ทั้งสองชนิดเหมือนกัน เป็นสาเหตุให้เกิดสมการและคุณสมบัติระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดเกือบจะเหมือนกันทุกประการ

เมื่อกระแสเฟสในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงปราศจากแปรงถ่าน สวิตช์กลับขั้วทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กตามลำดับ มอเตอร์จะทำงานในลักษณะการกระตุ้นแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) และแรงเคลื่อนไฟฟ้ต้าน (Back-EMF) กรณีนี้จะถูกสร้างขึ้นให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะถูกใช้ในการอ้างถึงมอเตอร์ และชุดควบคุมอย่างไรก็ตามยังมีโหมดการทำงานแบบอื่นซึ่งกระแสเฟสจะถูกสร้างขึ้นเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) และเป็นเหตุทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าทางอุดมคติเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย รูปร่างของมอเตอร์และชุดควบคุมจะเหมือนกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันที่สำคัญคือ มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยรูปคลื่นไซน์ ในการหมุนจะมีการกระจายอัตราส่วนกระแสต่อตัวนำที่ดีกว่าเหมือนกับสนามแม่เหล็กหมุนในอินดักชันมอเตอร์หรือมอเตอร์ไฟฟ้าแบบซิงโครนัส มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงปราศจากแปรงถ่านแบบนี้คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสที่แท้จริงจากการกระตุ้นที่คงที่จากแม่เหล็กถาวร ดูเหมือนกับซิงโครนัสมอเตอร์มากกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป และเป็นสาเหตุที่ทำให้เรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบปราศจากแปรงถ่าน มอเตอร์แบบปราศจากแปรงถ่านที่ใช้แม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะผลิตขึ้นในประเทศญี่ปุ่นและยุโรป แต่จะกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โว (AC Servo

Motor) มากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน อุตสาหกรรมในอเมริกากล่าวถึง เครื่องกลกระแสสลับ (AC Machine) นั้นหมายถึงมอเตอร์ซึ่งจะเริ่มสตาร์ทและทำงานจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

Brushless DC Motor ซึ่งจะไม่แปรงถ่าน มอเตอร์แบบนี้จะอยู่ที่ศูนย์กลางของล้อ ซึ่งที่เราเรียกว่า Hub จึงนิยมติดปากเรียกกันว่า "Hub Motor" นั่นเอง ซึ่งมอเตอร์แบบนี้ ราคาจะสูงกว่าแบบมีแปรงถ่าน และวงจรควบคุมจะมีการทำงานที่ซับซ้อนกว่ามาก ภายในมอเตอร์มีขดลวด 3 ชุดแต่จะมีหลายชุดและมีการป้อนกลับของสัญญาณจาก Hall sensor ทั้งหมด 3 ตัว ทำงานในลักษณะ Sink และ Source คือเป็น Low และ High ตามขั้วของแม่เหล็ก (ซึ่งจะไม่เหมือนกับ Hall Sensor ในคันทรง จะมีการทำงานเป็นแบบลิเนียร์เหมือนวอลุ่ม) โดย Hall sensor ในล้อนี้จะวางใกล้ๆกัน (เฟสจะต่างกันอยู่ 2 แบบคือ 60 องศา หรือ 120 องศา ซึ่งจุดนี้แล้วแต่บริษัทผู้ผลิตจะออกแบบมา) โดยจะวางใกล้ๆกับขบลวดติดกับแม่เหล็กในตัวมอเตอร์เอง ซึ่งรวมๆแล้วจะมีสายไฟทั้งส่วนของสายเซ็นเซอร์และขดลวด ออกจากมอเตอร์ทั้งหมด 8 เส้น) และมอเตอร์แบบนี้ยังมีแบบที่มีเกียร์ ที่เรียกว่าแบบ Planetary Gear ข้อดีคือ จะเบาแรงและขนาดเล็กกะทัดรัดกว่า Hub Motor แบบธรรมดา แต่เนื่องจากอุปกรณ์ภายในซับซ้อน ของระบบเกียร์ที่ไม่ทนทาน เมื่อรับแรงบิดสูงๆ เนื่องจากไม่ใช่โลหะ และการต่อยอดพัฒนาประยุกต์นำไปปั่นไฟนั้นทำได้ยาก อีกทั้งราคาที่แพงกว่ามากเทียบที่กำลังวัตต์เท่ากัน ซึ่ง Hub Motor แบบธรรมดาถึงจะปั่นหน่วงอยู่บ้าง (แรงหน่วงจากการดึงดูตของสนามแม่เหล็ก) แต่มอเตอร์ลักษณะนี้ดูแลรักษาง่ายกว่า

จากภาพที่ 2-2 เป็นภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านแบบที่มีส่วนหมุนอยู่ภายในแม่เหล็กถาวรจะอยู่บนโรเตอร์ ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์อีก เนื่องจากขดลวดอยู่บนสเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่การทำให้โรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะช่วยลดความเฉื่อยลงได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดที่มีโรเตอร์อยู่ภายนอก



ภาพที่ 2-2 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านที่มีโรเตอร์ภายใน

2.3.2 ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน

หลักการควบคุมพื้นฐานจากที่กล่าวมามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน ต้องการลำดับเฟสของกระแสซึ่งอาจจะเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ (Sine Waves Drive) หรือแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Waves Drive) ก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบในทั้ง 2 กรณี อุปกรณ์กำลังที่ใช้ในชุดควบคุมจะมีลักษณะเหมือนกันแตกต่างกันเพียงวิธีการควบคุมการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์กำลังโดยหลักการจะพยายามควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบให้มีความแม่นยำและเรียบในขณะเดียวกันจะต้องจำกัดกระแสอยู่ภายในค่าที่ปลอดภัยมอเตอร์ไม่มีแปรงถ่านแบบแม่เหล็กถาวรคือ เครื่องกลไฟฟ้าแบบกระแสสลับซึ่งดูได้จากการเปลี่ยนทิศทางของกระแสเฟสทุก ๆ ครึ่งไซเคิลตามการหมุนแผ่นแม่เหล็กถ้ากระแสเฟสเป็น รูปไซน์การกระจายของกระแสเฟสในตัวนำ (Ampere-Conductor Distribution) จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วเชิงโคโรนัส การทำให้กระแสเฟสไหลเข้าไปในขดลวดในลักษณะรูปคลื่น การสวิตช์ของทรานซิสเตอร์เรียกว่า พัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM)

ในกรณีที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในการหมุนการกระจายกระแสต่อตัวนำจะไม่เรียบแต่ยังคงค่าตำแหน่งคงที่ไว้ที่ 60° องศาไฟฟ้าและเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่อีก 60° องศาไฟฟ้า ต่อไปข้างหน้า การเปลี่ยนแปลงสัญญาณพัลส์ คือ ผลของการคอมมิวเตชันและการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่างเฟสภายใต้การควบคุมการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์กำลังในแต่ละช่วง 60° ค่าแรงบิดยังคงมีค่าคงที่ ถ้ากระแสและ Back-EMF มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องสร้างสัญญาณรูปคลื่น Back-EMF ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมและพยายามรักษาระดับกระแสให้คงที่ในระหว่างทุก ๆ ช่วง 60° โดยปกติแล้วจะทำได้จากการใช้ พัลส์วิดมอดูเลชันหรือการชอปเปอร์

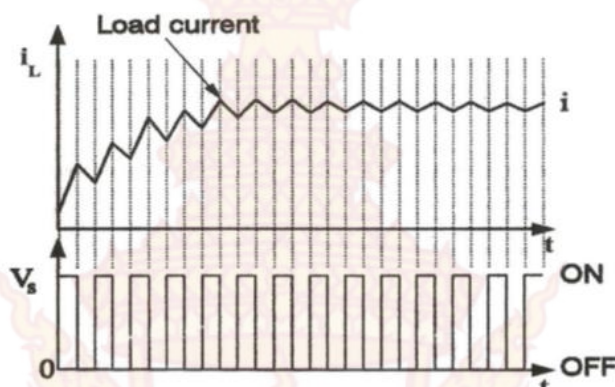
จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นคงทราบว่าคุณสมบัติกำลังที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากแปรงถ่านจะถูกใช้งานในโหมดของการสวิตช์ ซึ่งก็หมายความว่าการทำงานของอุปกรณ์ กำลัง (ทรานซิสเตอร์และไดโอด) จะถูกทำงานในลักษณะสวิตช์ไม่เปิดก็ปิดตลอดเวลาซึ่งสามารถ ควบคุมโดยการควบคุมอัตราส่วนของเวลาหรือการควบคุมดิวิตีไซเคิล หลักการของการควบคุม แบบดิวิตีไซเคิลคือ ต้องทำการสวิตช์ ทรานซิสเตอร์กำลังที่ความถี่สูงแล้วควบคุมค่ากระแสเฉลี่ย โดยใช้ความสัมพันธ์ช่วงเวลาเปิดและปิด

แรงดันพัลส์วิดมอดูเลชันและกระแสเรกูลേഷันการมอดูเลตแรงดัน (PWM) ที่ แสดงในภาพที่ 2-3 และ 2-4 ทรานซิสเตอร์กำลังจะถูกสวิตช์เปิดหรือปิด โดยปกติจะทำการสวิตช์ที่ความถี่คงที่ f_s ค่าเวลาจะหาได้จาก $T=1/f_s$ แรงดันที่ตกคร่อมโหลดคือ V_s จะได้จากช่วงเวลา ที่ ทรานซิสเตอร์กำลังนำกระแส t_{ON} ส่วนในช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์กำลังหยุดนำกระแส t_{OFF} แรงดัน ที่ตกคร่อมโหลดจะเป็นศูนย์หรือไม่ก็ $-V_s$ ในกรณีที่เป็นศูนย์ การชอปเปอร์ของแรงดันจะเรียกว่า การชอปเปอร์แบบชอฟต์ แต่ถ้าในกรณีที่เป็น $-V_s$ การชอปเปอร์จะถูกเรียกว่าการชอปเปอร์แบบฮาร์ดในการชอปเปอร์แบบชอฟต์ต้องการรูปแรงดันเป็นศูนย์ ในขณะที่โหลดถูก ลัดวงจร โดยปกติจะลัดวงจรผ่านทรานซิสเตอร์กำลังหนึ่งตัวและไดโอดกำลังหนึ่งตัว แต่ในกรณีที่เป็นการชอปเปอร์แบบฮาร์ด จะต้องการแรงดันตกคร่อมโหลดในลักษณะกลับขั้วปกติจะไหลผ่าน Free Wheeling ไดโอด 2 ตัว โดยที่ค่าดิวิตีไซเคิลสามารถหาได้จากสมการที่ (2-1)

$$d = \frac{t_{ON}}{T_s} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad (2-1)$$

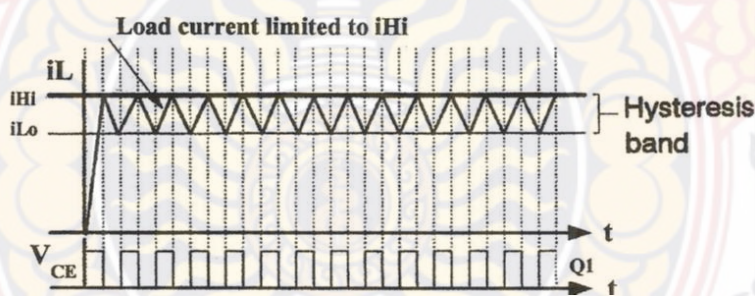
ถ้าแหล่งจ่ายคงที่และตัวตีไซเคิลคงที่ด้วยแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะหาได้จากสมการที่ (2-2)

$$V_{Load} = d \cdot V_s \quad (2-2)$$



ภาพที่ 2-3 แรงดันพัลส์วิดมอดูเลชัน

ตัวตีไซเคิลสามารถปรับค่าได้ ถ้ามอเตอร์มีความถี่ที่ f_1 ทรานซิสเตอร์กำลังที่ใช้ในการ ชอปเปอร์ จะต้องการความถี่ในการสวิตช์ f_s ที่สูงกว่า โดยทั่วไปแล้วจะสูงกว่าประมาณ 10 เท่า จะทำให้ค่าอินดักแตนซ์ ในโหลดลดค่าริบเบิลที่ เกิดจากความถี่สวิตช์ของกระแสไหลลง ตัวอย่างถ้าความถี่ของมอเตอร์คือ 1000 Hz ความถี่ในการสวิตช์ควรเลือกใช้ไม่ต่ำกว่า 10 kHz แต่นั่นเป็นระดับมอเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำ ๆ ถ้าเป็นไปได้ ควรจะใช้ความถี่ในการสวิตช์ระดับนี้จะทำให้มอเตอร์ไม่มีเสียงคราง

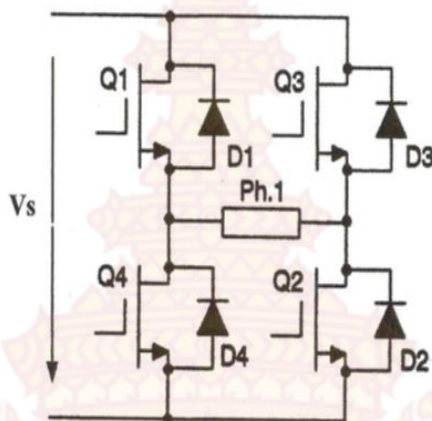


ภาพที่ 2-4 กระแสเรกูเลชัน

จากภาพที่ 2-4 เป็นการบังคับกระแสซึ่งสามารถทำได้โดยการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านและควรมีค่า แบนด์วิดท์เพียงพอตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างรวดเร็วสัญญาณกระแสที่ป้อนกลับจะถูกเปรียบเทียบกับค่ากระแสอ้างอิงในการเปรียบเทียบกระแสจะมีค่าฮิสเตอร์ซิสน้อย เมื่อกระแสไหลมีค่าเกินกระแสที่ ติดตั้งไว้ i_{HI} ทรานซิสเตอร์กำลังจะทำการสวิตช์ให้หยุดนำกระแสและกระแสที่ตรวจจับได้ลดลง Back-EMF ของมอเตอร์จะตกคร่อมในค่าความต้านทานของตัวมอเตอร์ เมื่อกระแสลดลงจนมีค่าต่ำกว่าระดับกระแส

อ้างอิง i_{L0} การขับทรานซิสเตอร์กำลังจะทำการสวิตช์ปิดวงจรอีกครั้ง จะเห็นว่ากระแสที่ไหลจะเกิดย่านฮิสเตอริซิส ($i_{Hi}-i_{Lo}$) ซึ่งความถี่และแอมพลิจูดของริบเปลี่นนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอินดักแตนซ์ของโหลดแรงดันที่ใช้ในวงจร และค่าแบนด์วิดธ์ของวงจรการบังคับกระแส

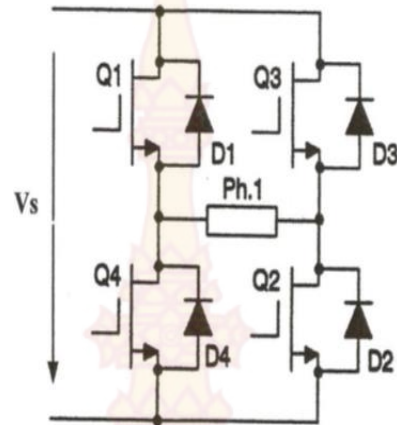
การควบคุมแบบ Full-Bridge ของ 1 เฟส และ 2 เฟส



ภาพที่ 2-5 วงจรควบคุมแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส

ภาพที่ 2-5 แสดงวงจร Full-Bridge ที่ใช้กับโหลดแบบ Single-Phase สำหรับ Brushless Motor แบบ Single-Phase ซึ่งการสั่งการทำงานของวงจรมันได้สรุปไว้ในตาราง 2-1 เมื่อ Q1 และ Q2 ทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ V_s เมื่อ Q3 และ Q4 ทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $-V_s$ เปรียบเทียบกับวงจร Half-Bridge จากภาพที่ 2-6 ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับโหลดที่ต้องการแรงดันเป็น 2 เท่า ถึงแม้ว่าจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันเดียวกัน แต่กำลังและกระแสมอเตอร์ที่ได้จะมีเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น

จากตารางที่ 2-1 สีแถวแรกแสดงการควบคุมทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ทางด้านบวก หรือกระแส Forward กระแสจะไหลผ่านไดโอด Freewheel D4 เมื่อ Q1 off และกระแสจะไหลผ่านไดโอด Freewheel D3 เมื่อ D2 off ซึ่งจะมีเพียงไดโอด 1 ตัว และทรานซิสเตอร์ 1 ตัวที่ทำงาน ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมโหลดลดลงจนเป็นศูนย์ และกระแส Free Wheeling ที่โหลดจะค่อยลดลงภายใต้เงื่อนไขของ Back-EMF มอเตอร์ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในวงจรลูปนี้จะเป็นวิธีของการทำให้เกิดการเปลี่ยนกระแส Ripple เล็กน้อยเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ หรือเป็นทางเลือกที่ต้องการเปลี่ยนแปลงความถี่เพื่อที่จะทำให้กระแสริบเปลี่นอยู่ในระดับหนึ่ง เมื่อทรานซิสเตอร์ทั้งสอง off กระแสจะไหลผ่าน D3 และ D4 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเป็นแรงดันไฟลป ในเวลาต่อมาสำหรับกระแสทางด้าน Forward ทรานซิสเตอร์ Q3 และ Q4 ทำงาน ไดโอด D1 และ D2 ไม่ทำงาน

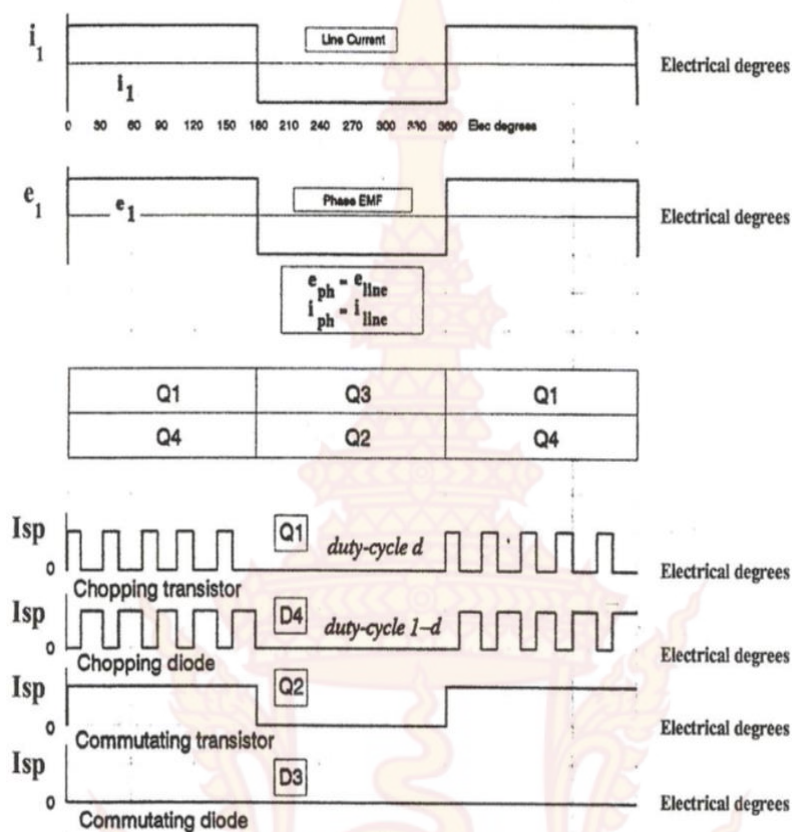


ภาพที่ 2-6 วงจร Half-Bridge โดยแสดงการลดระดับของแหล่งจ่ายไฟ DC

ตารางที่ 2-1 การทำงานของวงจร Full-Bridge

Q1	Q2	Q3	Q4	D1	D2	D3	D4	V_{load}	I_{load}	Power
1	1	0	0	0	0	0	0	$+V_s$	+	+
0	1					0	1	0	+	0
1	0					1	0	0	+	0
0	0					1	1	$-V_s$	+	-
0	0	1	1	0	0	0	0	$-V_s$	-	+
		0	1	0	1			0	-	0
		1	0	1	0			0	-	0
		0	0	1	1			$+V_s$	-	-

ในกลุ่มที่ 2 สีแถวต่อมาจะแสดงเทคนิคการควบคุม Q3 และ Q4 ทางด้านลบหรือกระแส Reverse ระยะเวลาต่อมาสำหรับกระแสทางด้าน Reverse จะเกิดจากทรานซิสเตอร์ Q1 กับ Q2 ทำงานและไดโอด D3 กับ D4 ไม่ทำงาน



ภาพที่ 2-7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรควบคุมแบบ Full-Bridge โดยมีคาบเวลากระแสฟอว์เวิร์ดที่ Single phase load 180°

ภาพที่ 2-7 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่ใช้กับวงจรควบคุมแบบฟูลบริดจ์ single-phase ซึ่งจะนำกระแสทั้งทางด้านฟอว์เวิร์ดและรีเวิร์ด 180° โดยไดอะแกรมนี้จะแสดงคาบเวลาที่ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวทำงานและแสดงรูปคลื่น Chopping ของการนำกระแสแบบฟอว์เวิร์ด

โดยไดอะแกรมจะแสดงสถานะของทรานซิสเตอร์ Q1 เมื่อเกิดการ Chopping ที่ 180° ของ คาบเวลาทั้งหมด ขณะที่ Q2 ยังคง ON ตลอดในช่วงเวลานี้ โดยกรณีของ Q1 จะเรียกว่า Chopping Transistor และในกรณีของ Q2 จะเรียกว่า Commutating Transistor

โดยวงจร Chopping นั้นสามารถที่จะกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งระหว่าง ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวทำงาน ยกตัวอย่างเช่น ในครึ่งไซเคิลถัดไปของกระแสทางด้านฟอว์เวิร์ด Q1 นั้นจะยังคง ON อยู่ในขณะที่ Q2 เกิดการชอปซึ่งแรงดันที่โหลดจะมีค่าเท่ากับครึ่งไซเคิลแรก แต่อย่างไรก็ตามจะเกิดความร้อนขึ้นที่ตัวทรานซิสเตอร์ทั้งสอง เพราะว่ากระแสเฉลี่ยและกระแส RMS มีค่าเท่ากัน

รูปคลื่นตามภาพที่ 2-7 นั้นสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่า I_{peak} , I_{mean} และ I_{RMS} ในโหลด, ใน Chopping transistor ใน Commutating transistor และไดโอดในแต่ละตัว ตารางที่ 2-2 จะสรุปผลใน

กรณีที่ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด Chopping และตารางที่ 2-3 แสดงกรณีที่เกิดการ Chopping ระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวในช่วงเวลาที่สลับกันในแต่ละเฟส

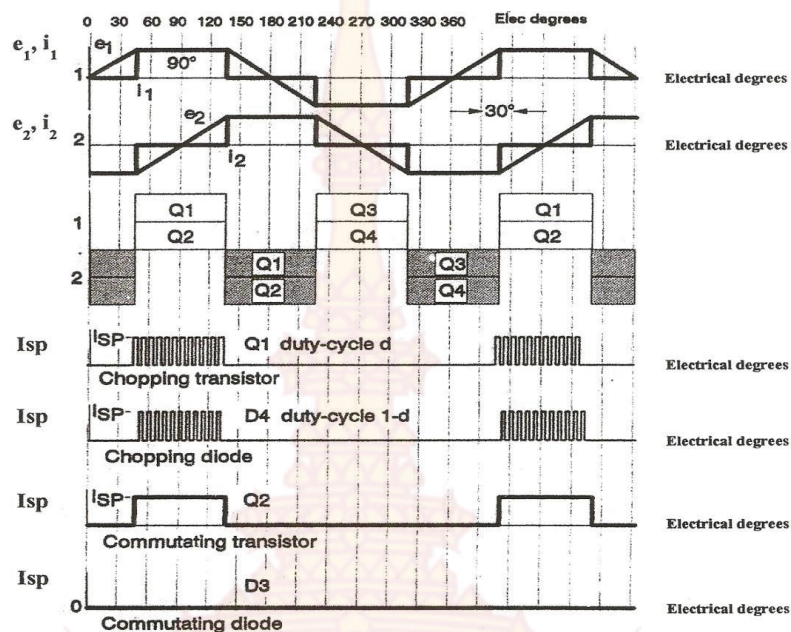
ตารางที่ 2-2 ค่า I_{peak} , I_{mean} และ I_{RMS} ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิต่ำและไม่เท่ากันและขับแบบ Square Wave

	Peak	Mean	RMS
Line	1	1	1
Chopping Transistor	1	$d/2$	$\sqrt{d/2}$
Chopping Diode	1	$(1-d)/2$	$\sqrt{[(1-d)/2]}$
Commutating Transistor	1	$1/2$	$1/\sqrt{2}$
Commutating Diode	1	0	0

ตารางที่ 2-3 ค่า I_{peak} , I_{mean} และ I_{RMS} ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิเท่ากัน และขับแบบ Square Wave

	Peak	Mean	RMS
Line	1	1	1
Transistor	1	$(1+d)/4$	$\sqrt{[1+d]/2}$
Diode	1	$(1+d)/4$	$\sqrt{[1+d]/2}$

ในการขับแบบ 2 เฟส จะกระทำเช่นเดียวกัน แต่ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้นจะทำงานที่ 90 องศาเท่านั้นแทนที่จะเป็น 180 องศา โดยรูปคลื่นจะแสดงดังภาพที่ 2-8 โดยกระแส I_{peak} , I_{mean} และ I_{RMS} ในแต่ละเฟสของ Chopping Transistor ในตัวนั้น ๆ จะสรุปไว้ในตารางที่ 2-3 ถ้าเกิด ทรานซิสเตอร์สลับการทำงานในแต่ละไซเคิล สำหรับที่อุณหภูมิต่ำเท่ากันกระแส I_{peak} , I_{mean} และ I_{RMS} จะสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-8 รูปคลื่นกระแสและ EMF แบบ 2 เฟส

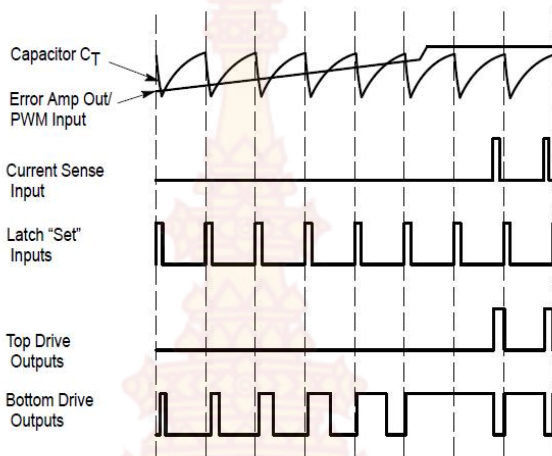
2.4 ไอซีเบอร์ MC33033 (ณรงค์ฤทธิ์และสิทธิศักดิ์, 2549: 11-15)

2.4.1 คุณสมบัติของไอซี MC33033

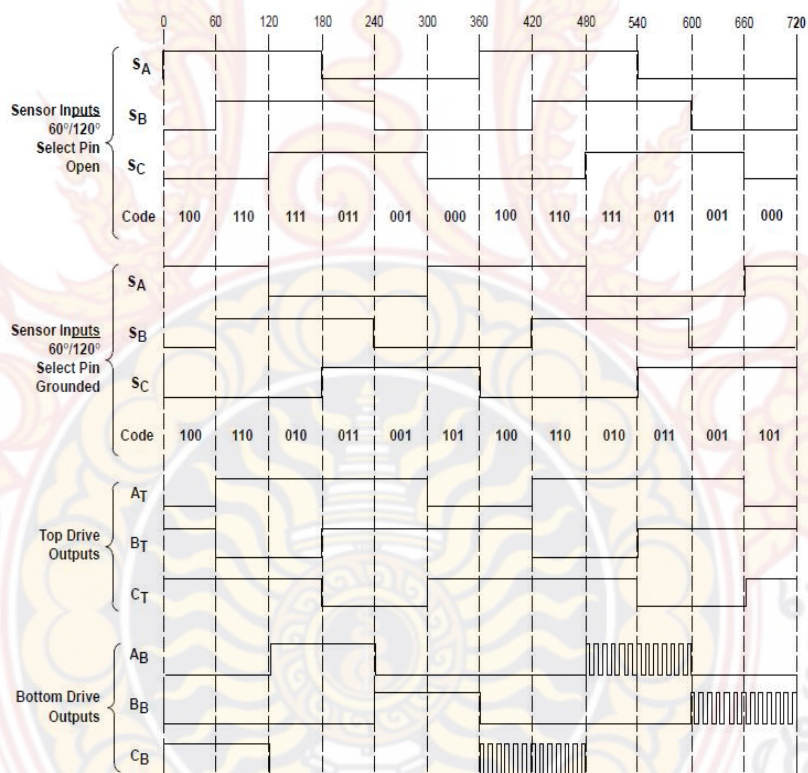
ไอซี MC33033 จะรับสัญญาณจาก Encoder เข้ามาทางขา 4, 5 และ 6 ตามลำดับ แล้วนำสัญญาณที่ได้ผ่านเข้าวงจรตรรกศาสตร์พร้อมกับสัญญาณ F/R ที่ขา 3 กับ $60^\circ/120^\circ$ ที่ขา 18 จากนั้น สัญญาณที่ได้เข้าวงจร AND Gate ทางด้านเอาต์พุต การปรับความเร็วรอบสามารถทำได้โดยปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ทางด้านเอาต์พุตชุดล่างของไอซี ซึ่งจะได้จากการเปรียบเทียบ สัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 8 กับแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ที่ขา 9 ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ชุดล่างของไอซีสามารถกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่ขา 9 ตั้งแต่ 0 โวลต์เพิ่มขึ้นจนถึง 6 โวลต์ แล้วสัญญาณ PWM ที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจร AND Gate ทางเอาต์พุตชุดล่าง

การจำกัดกระแสมอเตอร์ทำได้โดยฟังก์ชัน Current Sensor ที่ขา 12 ซึ่งไอซี MC33033 จะมี Op-Amp ทำงานเป็นตัวเปรียบเทียบสำหรับตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ขาอินเวอร์ตติ้ง ของตัวเปรียบเทียบจะต่ออยู่กับแรงดันอ้างอิง 100 mV ส่วนขาอนอินเวอร์ตติ้งของตัวเปรียบเทียบ จะเป็นขาที่รับสัญญาณตรวจจับกระแส การตรวจจับกระแสจะได้รับการต่อความต้านทานค่าต่ำ ๆ อนุกรมระหว่างอุปกรณ์กำลังชุดล่างกับกราวด์ การจำกัดกระแสอาศัยหลักการทำงานแบบรอบต่อรอบ การทำงานแบบรอบต่อรอบจะคอยตรวจจับสัญญาณกระแสในขณะที่อุปกรณ์กำลังนำกระแส มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ถ้าสัญญาณกระแสมีค่าต่ำกว่า 100 mV ตัวเปรียบเทียบจะส่งแรงดัน “Low” ไปยังวงจร Latch มอเตอร์จะทำงานตามปกติ แต่ถ้าสัญญาณที่ถูกตรวจสอบได้มี ค่ามากกว่า 100 mV ตัวเปรียบเทียบจะส่งสัญญาณแรงดันเป็น “High” ไปยังวงจร Latch ทำให้ไอซี หยุดจ่ายสัญญาณเอาต์พุตชั่วขณะการหยุดจ่ายสัญญาณขั้วเกตทำให้มอเตอร์มีกระแส

ลดลงจนสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้มีค่าต่ำกว่า 100 mV ไอซีก็จะจ่ายสัญญาณเอาต์พุตต่อไปจะทำงานวนรอบแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ดังภาพที่ 2-9 และ ภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-9 รูปคลื่นสัญญาณการทำงานของไอซีเบอร์ MC33033



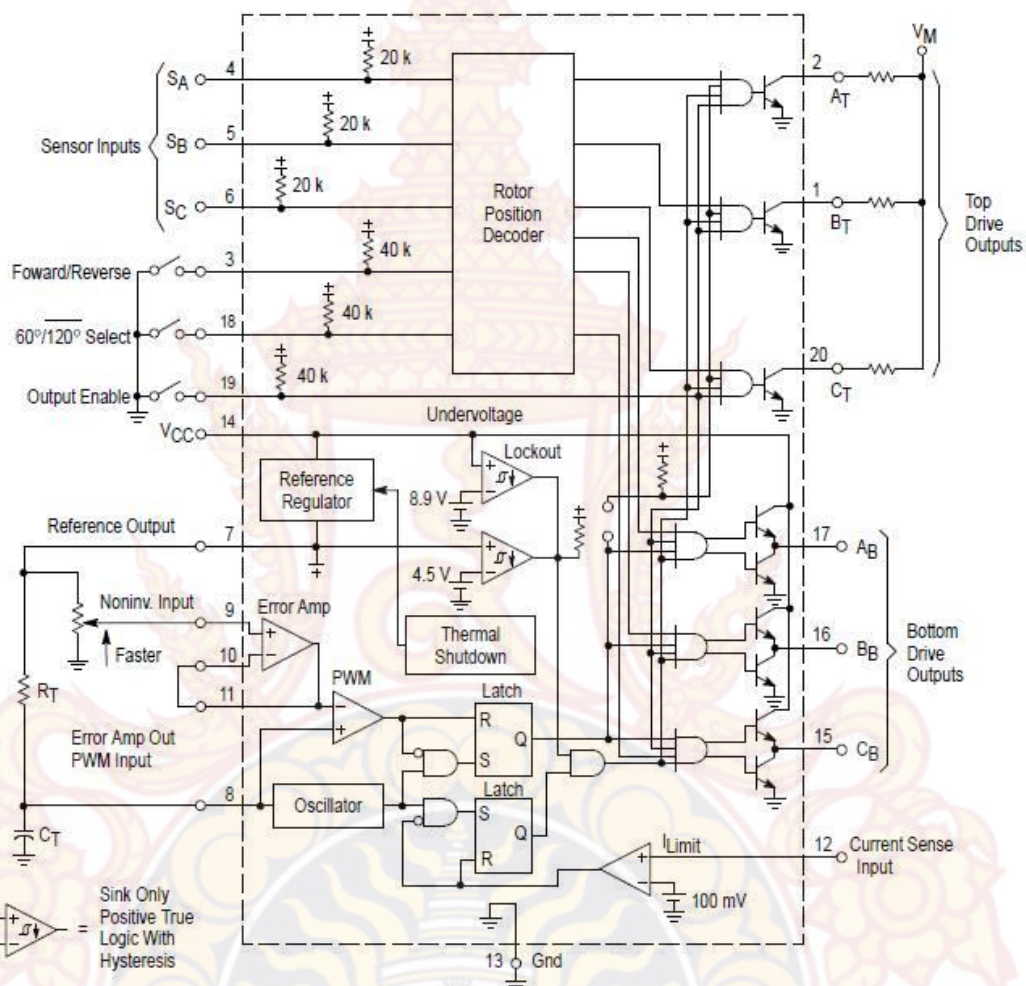
ภาพที่ 2-10 รูปคลื่นแสดงตำแหน่งโรเตอร์ 60° และ 120° องศาไฟฟ้า

2.4.2 โครงสร้างของ MC33033

ในการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน อาศัยหลักการตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์เป็นองศา แล้วจึงสร้างสนามแม่เหล็กที่เกิดบนสเตเตอร์ให้สัมพันธ์กับโรเตอร์ ซึ่ง

สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ด้วยการ Chopper แรงดันที่สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ MC33033 เป็นตัวควบคุม

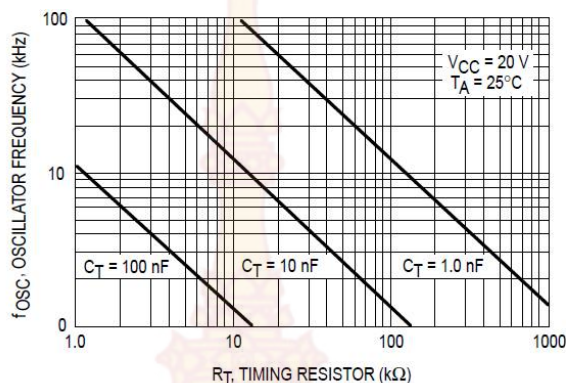
ไอซี MC33033 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน โดยที่ไอซีจะรับสัญญาณบอกตำแหน่งของโรเตอร์มาแล้วถอดรหัสสร้างเป็นสัญญาณ PWM โครงสร้างและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33033 แสดงดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33033

2.4.3 การกำหนดคาบเวลาการทำงานของไอซีเบอร์ MC33033

เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่ที่คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตที่ขา 15, 16 และ 17 จะถูกกำหนดโดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 8 โดยการต่อ R_T กับแรงดันอ้างอิงซึ่งมีแรงดันประมาณ 6.25 V ที่ขา 7 แล้วอนุกรมกับ C_T ลงกราวด์แล้วต่อแรงดันตกคร่อม C_T เข้าที่ขา 8 ซึ่งค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จากกราฟแสดงดังภาพที่ 2-12

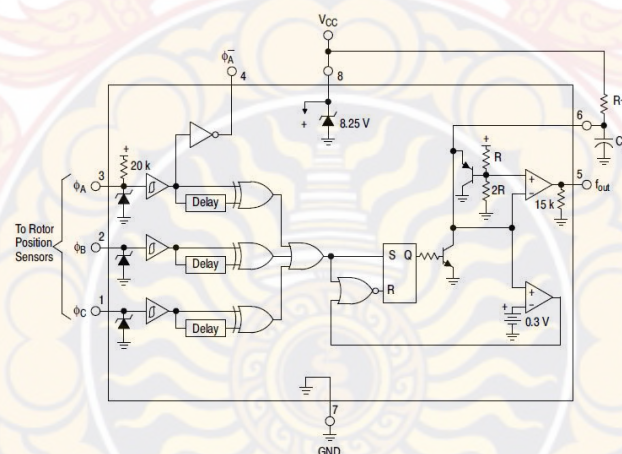


ภาพที่ 2-12 ความสัมพันธ์ของค่า R_T และ C_T ในการกำหนดความถี่ PWM

2.5 ไอซีเบอร์ MC 33039 Closed Loop Brushless Motor

2.5.1 คุณสมบัติของไอซี MC33039

MC33039 มีประสิทธิภาพสูงแบบ Closed Loop ในการควบคุมความเร็วที่ออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อใช้ใน Brushless DC Motor ในระบบควบคุมมอเตอร์ การทำงานจะช่วยให้ควบคุมความเร็วได้อย่างแม่นยำขึ้นโดยไม่ต้องใช้เครื่องวัดความเร็ว อุปกรณ์นี้มีสามอินพุตบัพเฟอร์ แต่ละขั้วมีความสามารถในการตรวจจับสัญญาณดิจิทัล ตั้งโปรแกรมและควบคุมการสับเปลี่ยนขั้วสัญญาณภายใน สำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงของเซ็นเซอร์เป็น ระยะถึงแม้ว่าอุปกรณ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้กับ MC33033 เพื่อควบคุมมอเตอร์ Brushless DC Motor แต่ก็สามารถใช้กับวงจร Closed Loop ในควบคุมความเร็ว อย่างมีประสิทธิภาพในหลาย ๆ Closed Loop ดังภาพที่ 2-13

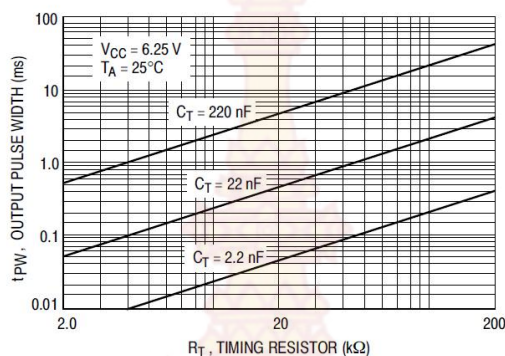


ภาพที่ 2-13 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33039

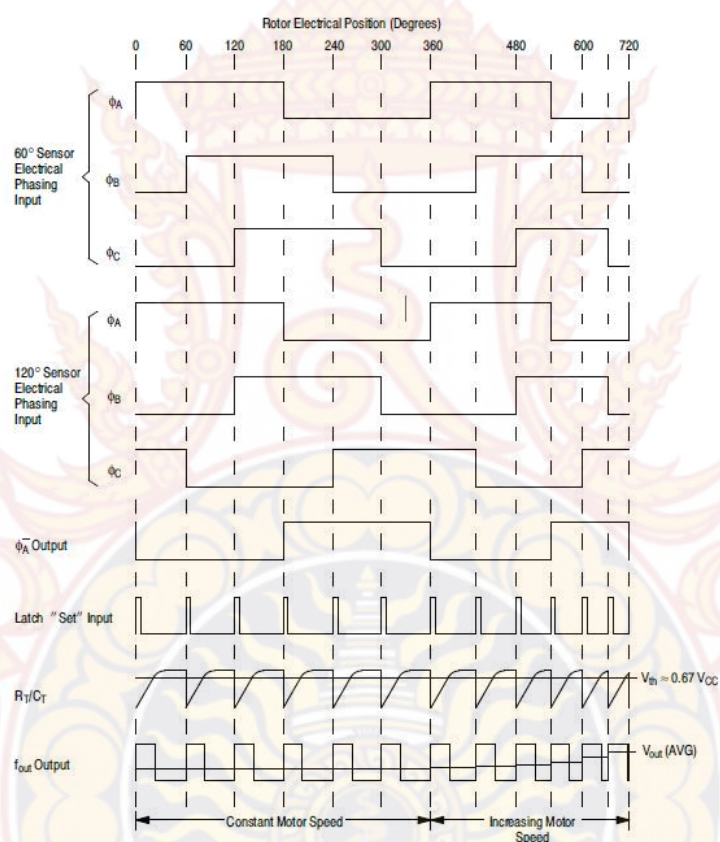
2.5.2 การกำหนดคาบเวลาการทำงานของไอซีเบอร์ MC33039

สร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตที่ขา 5 จะถูกกำหนดโดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 6 โดยการต่อ R_T กับแรงดันอ้างอิงซึ่งมีแรงดันประมาณ 5.5 V ที่แหล่งจ่าย

แล้วอนุกรม C_T ลงกราวด์แล้วต่อแรงดันตกคร่อม C_T เข้าที่ขา 6 ซึ่งค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จากกราฟแสดงดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 ความสัมพันธ์ของค่า R_T และ C_T ในการกำหนดความถี่ PWM



ภาพที่ 2-15 รูปคลื่นการทำงานของ Motor Three Phase

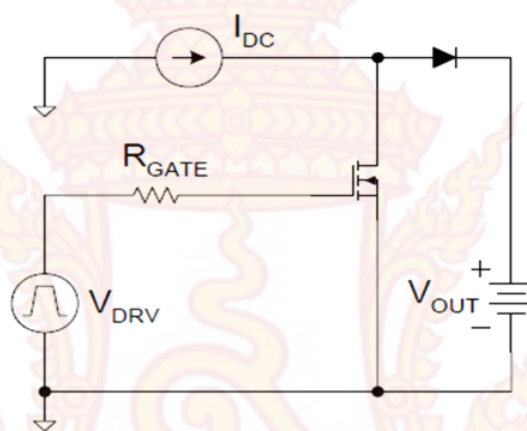
MC33039 มีประสิทธิภาพในการ Closed Loop เพื่อควบคุมความเร็วของ Brushless DC Motor โดยไม่จำเป็นต้องใช้เซ็นเซอร์หรือเครื่องวัดความเร็ว ซึ่งแสดงในภาพที่ 2-26 สัญญาณสามอินพุต (ขา 1, 2, 3) รับสัญญาณจาก Brushless DC Motor ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง แต่ละการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเซ็นเซอร์เป็นแบบดิจิตอล จากสัญญาณอินพุต สามอินพุต เข้ามาใน MC33039 จะถูกสร้างสัญญาณขึ้นที่ f_{out} (ขา 5) ของคลื่นที่กำหนดไว้และความกว้างของโปรแกรมได้ ซึ่งกำหนดค่าโดยการเลือก R_T และ C_T (ขา 6) จากภาพที่ 2-14

การประยุกต์ใช้ MC33039 ในการควบคุม Brushless DC Motor การควบคุมความเร็วคงที่ 100 รอบต่อนาที (ขา 4) สามารถใช้ในระบบที่ควบคุมมอเตอร์เซ็นเซอร์ ด้วยอุณหภูมิลดและควบคุมโดยแรงดันใน VCC (ขา 8) การดำเนินงานลดลงเป็น 5.5 V สำหรับระบบที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟควบคุม

2.6 ทฤษฎีการขับมอสเฟต (Bliss, 1990: 3-35)

2.6.1 การควบคุมการสวิตช์

ผู้ใช้งานต้องรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของมอสเฟต เพื่อเป็นรากฐานความเข้าใจเกี่ยวกับขอบเขตที่ต้องการใช้หลังจากเข้าใจหลักการพื้นฐานและนำมาใช้ในเห็นย่นำการสวิตช์เพราะว่าส่วนมาก มอสเฟตจะใช้ในงานที่ต้องการการสวิตช์ที่ความถี่สูงและใช้งานในภาควงจรกำลัง

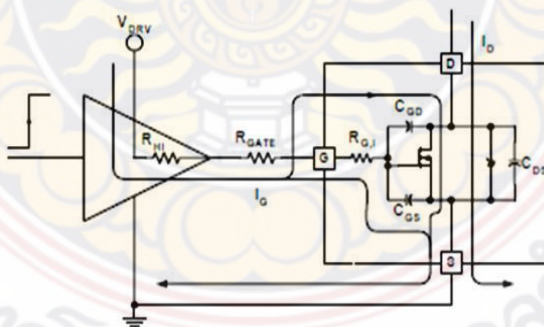


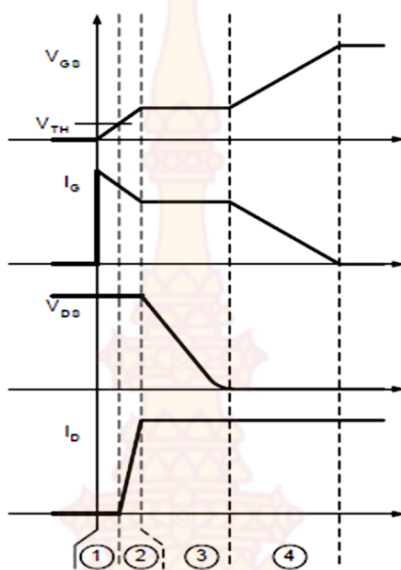
ภาพที่ 2-16 แบบจำลองการสวิตช์เห็นย่นำ

จากตัวอย่างในภาพที่ 2-16 แหล่งจ่ายกระแส DC แสดงให้เห็นถึงการเห็นย่นำกระแส ซึ่งสามารถไหลต่อเนื่องในระหว่างการสับสวิตช์ กระแสจะเดินทางตามทิศทางไดโอดในช่วงเวลาที่มอสเฟต Turn Off เมื่อขาเดรนต่ออยู่กับขาซอร์ส

2.6.1 การสั่งให้มอสเฟตทำงาน

เมื่อมอสเฟตทำงานสามารถแบ่งได้ 4 ระดับเหมือนดังแสดงในภาพที่ 2-17



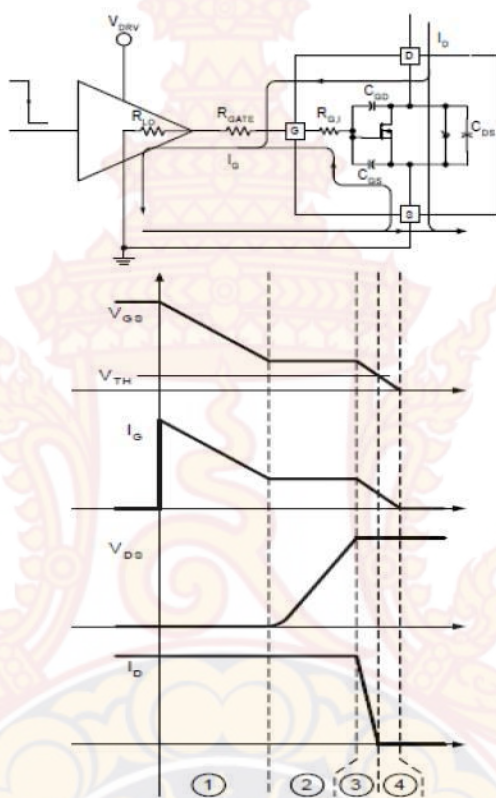


ภาพที่ 2-17 ช่วงเวลาโมสเฟตทำงาน

ในขั้นแรกแรงดันขาเข้าจะอยู่ในช่วง 0 V ที่ V_{TH} ช่วงเวลาแรกของขาเกิดกระแสจะชาร์จมากที่สุดที่ตัวเก็บประจุ C_{GS} และยังมีกระแสที่ไหลเข้าที่ตัวเก็บประจุ C_{GD} ในขณะที่แรงดันขาเดรนนั้นเพิ่มมากขึ้นแต่แรงดันที่ C_{GD} จะลดน้อยลงในระยะเวลานี้เป็นช่วงหน่วงเวลา Turn On เพราะว่าแรงดันและกระแสของขาเดรนของโมสเฟตไม่เหลืออยู่แล้ว ทันทันทีที่ขาเดรนเริ่มต้นชาร์จใหม่กระแสจะเดินทางไปทีโมสเฟตในช่วงเวลาต่อมาที่ V_{TH} ของขาเดรนระดับแรงดันที่ V_{GS} ในช่วงนี้แรงดันที่ ขาเดรนจะเรียบเมื่อมีแรงดันไหล ที่พอเหมาะในระหว่างที่ขาเดรนต้องการกระแสไหลที่ C_{GS} และ C_{GD} ในช่วงเวลาแรกจะต้องการแรงดันที่ V_{GS} เพิ่มขึ้นในระหว่างที่เอาต์พุตภายในขาเดรนมีการไหลถึงแม้ว่าขาเดรนมีแรงดันเท่ากับขา ซอร์สก่อนที่แรงดัน V_{GS} จะ Off ดังนั้นสามารถเข้าใจได้ใน ภาพที่ 2-17 จนกระทั่งกระแสไหลไปที่โมสเฟตจนกระทั่งไดโอดสั่ง Off อย่างสมบูรณ์จนแรงดัน ที่จุด PN สามารถหยุดจ่ายจนแรงดันที่ขาเดรนจะอยู่ในระดับเอาต์พุตจนเข้าสู่ช่วงที่สามเมื่อแรงดันที่ขาเดรน On จนมีกระแสไหลไหลเรียงกระแสที่ไดโอดแต่เนื่องจากแรงดันที่ขาเดรนตกถึงแม้ว่าแรงดันที่ขาเดรนตกแต่ที่ขาเดรนถึงแหล่งจ่ายยังคงเดิมเท่านี้ แรงดันที่ขาเดรนจะเป็นเวฟฟอร์ม โดยถูกถ่ายไปที่ C_{GD} สามารถทำให้ที่จุดเดรนกับขาซอร์สมีแรงดันไหลได้สะดวกขึ้นตั้งแต่ที่แรงดันขาเดรนคงเดิมโดย มีขีดจำกัดของวงจรที่แหล่งจ่ายกระแส DC จนกระทั่ง Turn On เต็มที่ สามารถทำให้โมสเฟตทำงานได้มีแรงดันที่ขาเดรนเพิ่มได้มากขึ้นเมื่อเอา V_{GS} เป็นพื้นฐานค่าความต้านทานช่วง On และที่ช่วงเวลาที่อยู่กรณทำงานเพราะฉะนั้นในช่วงที่ 4 V_{GS} จะอยู่ในระดับสูงสุดคือ V_{DRV} โดยที่ C_{GS} และ C_{GD} ชาร์จประจุ ดังนั้นกระแสที่ไหลระหว่างขาเดรนทั้งสองกำลังแยกออกจากกันถึงแม้ว่ามีการชาร์จอยู่กระแสที่ขาเดรนจะนิ่งไม่เปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขาเดรนจะลดลงแต่ไม่ต่อเนื่องเป็นไปตามปกติ

2.6.3 การสั่งมอสเฟตหยุดทำงาน

เมื่อกล่าวถึงการสั่งมอสเฟตหยุดทำงานโดยพื้นฐานมีการสั่งไม่ต่างกับการสั่งมอสเฟตทำงานเมื่อเริ่มต้น V_{GS} มีค่าเท่ากับ V_{DRV} และมีการไหลของกระแสเต็มที่ผ่านมาไปยัง I_{DC} ในช่วงเวลาที่ 3 คือ จะพุดถึงแรงดันที่ขาซอร์สถึงขาเดรนที่ I_{DC} และ $R_{DS} (On)$ ที่ตัวมอสเฟตมีการสั่งหยุดการทำงานทั้งหมดสี่ลำดับดังแสดงในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ช่วงเวลาการสั่งหยุดการทำงานของมอสเฟต

ช่วงเวลาแรกจะมีการสั่งหน่วงหยุดเวลา แรงดันที่ C_{GS} จะค่อยเก็บประจุทีละน้อยซึ่งให้ความสำคัญที่ลำดับในช่วงระยะเวลาที่กระแสไหลที่ขาเกตโดยที่ตัวเก็บประจุ C_{GS} กระตุ้นตัวเองและไหลผ่านไป C_{GS} และที่ C_{GD} ของมอสเฟตจะมีแรงดันภายในขาเดรนเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงดันลดลงมากการไหลในขาเดรนจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในช่วงเวลาที่ 2 แรงดันที่ขาซอร์สกับขาเดรนของมอสเฟตได้มาจาก $I_{DRES} (On)$ ไปจนถึงระดับแรงดัน $V_{DS} (Off)$ สิ้นสุดและมีแรงดันออกไปสั่งให้ไดโอดเรียงกระแสดังแสดงในภาพที่ 2-18 ในระหว่างช่วงเวลาเริ่มแรกจะมีแรงดันที่ขาเกตและมีกระแสซอร์สที่ขาเกตเพราะว่า C_{GS} เป็นตัวสั่งให้แรงดันที่ขาซอร์สกับขาเดรนไม่เปลี่ยนโดยกระแสจะคงที่ทำให้ตัวเก็บประจุมีระยะเวลาให้กระแสจากขาเดรนไหลออกโดยกระแสที่ขาเดรนจะนิ่งเหมือนกระแสที่ไหลต ดังแสดงเห็นได้จากการจ่ายกระแส DC ในภาพที่ 2-18

เริ่มต้นช่วงเวลาที่ 3 พุดถึงการ Turn On ของไดโอดถ้าหากว่าสนใจเพียงกระแสที่ไหลตแรงดันที่ขาเกตจะเริ่มทำงานจากนั้น V_{GS} จะเริ่มลดลงไปจนถึง V_{TH} ส่วนใหญ่กระแสเกิดขึ้นที่ขาเกตจะมาจาก C_{GS}

เพราะว่า C_{GS} ช่วงนี้จะมีระยะเวลาชาร์จประจุเต็มที่มีมอสเฟตจะทำงานเป็นเชิงเส้นและเป็นสาเหตุให้แรงดันขาซอร์สกับขาเกตตกจนทำให้กระแสที่ขาเดรนลดลงทำให้ช่วงเวลานี้กระแสที่ขาเดรนอาจลดลงจนเป็น 0 ส่วนแรงดันที่ขาเดรนจะคงที่อยู่ระดับ V_{DS} (Off) ขั้นตอนการ Turn Off ขั้นสุดท้ายจะมี Input ที่ตัวเก็บประจุชาร์จเต็มทีจากนั้นแรงดันที่ V_{GS} จะลดลงจนเป็น 0 และมีกระแสที่ขาเกตบางส่วนแต่ในทานองเดียวกันกลับมาย้อนดูช่วงเวลา Turn Off ช่วงที่ 3 ช่วงที่ C_{GS} ช่วงนี้กระแสที่ขาเดรนและแรงดันที่ขาเดรนจะไม่เปลี่ยนแปลง

สรุป คือ มอสเฟตมันสามารถสั่งสวิตซ์ในช่วง Highest และ Lowest Impedance แต่สามารถเลือกช่วงเวลา Turn On และ Turn Off ได้ในช่วงเวลาที่ 4 ระยะเวลาทั้งหมดของช่วงเวลาที่ 4 จะมีการเก็บประจุปะปนในการทำงานเราสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันรวมถึงกระแสที่เกตได้ซึ่งให้ความสำคัญในการเลือกส่วนประกอบและการออกแบบการใช้งานเกตไดร์ฟสำหรับ High Speed High Frequency Switching เป็นลักษณะพิเศษของเบอร์มอสเฟต การสั่ง Turn Off และ Turn On ทำให้มอสเฟตสวิตซ์ได้มากและน้อยจะขึ้นอยู่กับตัว Datasheet ของมอสเฟตแต่น่าเสียดายความสัมพันธ์ของเบอร์มอสเฟตและโหลดเหล่านี้ทำให้มีการยุ่งยากในการเปรียบเทียบเลือกชนิดเบอร์มอสเฟตเหมือนกัน ซึ่งการประยุกต์ใช้งานการสั่งสวิตซ์ที่ใช้ได้จริงจะมีการควบคุม Inductive Load ซึ่งมีความสำคัญต่างกันในแต่ละชนิดตัวมอสเฟสให้เลือกโดยสังเกตที่เบอร์ของตัวมอสเฟต

2.6.4 กำลังสูญเสีย Power Losses

ในการสวิตซ์ตัวมอสเฟตจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียอยู่เราสามารถประยุกต์ใช้ไม่ให้เกิดการสูญเสียได้เราสามารถแบ่งเป็นสองหมวดดังนี้

มีวิธีการง่าย ๆ สองวิธีในการการลดความสูญเสียที่ขาเกตของมอสเฟต แต่ก่อนที่เราจะพูดถึงเรามาดูช่วงที่มอสเฟตกำลัง ON มันมีการชาร์จและคายของ C_{ISS} แม้ว่าแรงดันจะชาร์จที่ตัวเก็บประจุตลอด แต่เราจำเป็นต้องย้ายการชาร์จซึ่งต้องการชาร์จประจุให้แรงดันขาเกตมีค่าอยู่ระหว่าง 0 V ซึ่งช่วงเวลานี้แรงดันที่ขาเกต กับ V_{DRV} เป็น 0 เหมือนกัน เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพิเศษของแรงดันที่ขาเกตกับขาซอร์สดังกราฟใน Datasheet ของ MOSFET

โดยเปรียบเทียบที่กราฟว่าดีหรือไม่ดีโดยการประมาณที่การชาร์จขาเกตกับแรงดันที่เกตอย่างเท่า ๆ กันตัวแปรที่ทำให้แรงดันขาเกตเมื่อ Off เป็นเส้นโค้งเราจะกำหนดให้ V_{DS} (off) ชาร์จอยู่ที่พื้นที่ยานดำที่บริเวณของเส้นโค้งบางส่วนแต่เช่นกัน ในผลรวมซึ่งต้องการให้ขาเกตชาร์จในวงจรทันทีที่การสวิตซ์ ซึ่งสามารถรู้ถึงการสูญเสียขณะที่ชาร์จขาเกตได้จากสมการที่ (2-3)

$$P_{GATE} = V_{DRV} \cdot Q_G \cdot f_{DRV} \quad (2-3)$$

ซึ่งใน V_{DRV} มีความกว้างของรูปคลื่นที่เกตไดร์ฟและความถี่ของเกตไดร์ฟ f_{DRV} ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่จะมีที่การสวิตซ์ความถี่มาก ๆ แต่ที่สุดแล้วมันมีความน่าสนใจไปจนถึงข้อสังเกตที่ว่า Q_G คืออะไร แต่ที่ f_{DRV}

ก่อนนั้นมีการกำหนดระยะเวลาให้ค่าเฉลี่ยแรงดันที่ขาเกต มีค่าดังสมการโดยให้ กระแสมีลักษณะที่สามารถขับเคลื่อนได้ซึ่งกำลังความสูญเสียไปถึงขาเกตของมอสเฟตเป็นตัวที่ทำให้สิ้นเปลืองในวงจรเกตไดรฟ์ซึ่งกล่าวย้อนกลับไปถึงภาพที่ 2-17 และภาพที่ 2-18 ส่วนประกอบที่สิ้นเปลืองสามารถระบุได้ทั้ง ๆ ที่เราต่ออนุกรมตัวต้านทานอยู่ที่ทางเดินของการขับเคลื่อนแต่ในทุก ๆ รอบในการสับสวิตช์มันต้องการให้ค่าความต้านทานที่เกตชาร์จ์ผ่านไปยังเอาต์พุต โดยการต่อตัวต้านทานภายนอกที่ขาเกตและให้ความต้านทานนี้จะทำงานร่วมกันภายในขาเกตด้วย ดังนั้นขณะที่ปลดเอาต์พุตกำลังไฟฟ้าให้เป็นอิสระนั้น แต่ยิ่งชาร์จ์เร็วเท่าไรก็จะส่งผ่านไปที่ตัวต้านทานกำลัง การออกแบบจากภาพที่ 2-17 และภาพที่ 2-18 ดังที่สามารถคำนวณกำลังความสูญเสียในการขับเคลื่อนอย่างชัดเจนเหมือนกันในช่วง ON ดังสมการที่ (2-4) ช่วงOFF ดังสมการที่ (2-5) และค่าสูญเสียทั้งหมดดังสมการที่ (2-6)

$$P_{DRV,ON} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{HI} \cdot V_{DRV} \cdot Q_G \cdot f_{DRV}}{R_{HI} + R_{GATE} + R_G \cdot I} \quad (2-4)$$

$$P_{DRV,OFF} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{LO} \cdot V_{DRV} \cdot Q_G \cdot f_{DRV}}{R_{LO} + R_{GATE} + R_G \cdot I} \quad (2-5)$$

$$P_{DRV} = P_{DRV,ON} + P_{DRV,OFF} \quad (2-6)$$

จากสมการข้างบนแสดงให้เห็นถึงการต่อต้านค่าความต้านทานที่เอาต์พุตของวงจรการขับเคลื่อนและนี่คือ สมมติฐานอย่างมีเหตุผลสำหรับการสั่งขับเคลื่อนของมอสเฟตแม้ว่าการต่อทรานซิสเตอร์สองตัวจะมีประโยชน์ในวงจรการขับเคลื่อนที่ค่าความต้านทานทางเอาต์พุตมีค่าไม่เป็นเชิงเส้นและที่สมการไม่มีคำตอบที่ถูกต้องแต่มันเป็นที่ยอมรับเพราะว่ามีค่าความต้านทานที่ขาเกตน้อยกว่า 5 โอห์ม ความสูญเสียที่ขาเกตมากที่สุดคือความสิ้นเปลืองในการขับเคลื่อนถ้า R_{GATE} มีขนาดใหญ่พอเพื่อจำกัดกระแส I_G ให้เอาต์พุตต่ำลง ซึ่งความสามารถที่ใช้กันในการขับ Bipolar ส่วนมากค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของการขับเคลื่อนนี้อยู่ที่การเผาผลาญในขาเกตในส่วนที่เพิ่มเติมจนถึงการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ขาเกตสิ่งที่เพิ่มเติมคือเพิ่มค่าความต้านทานที่สูญเสียในการสวิตช์สาเหตุเนื่องจากมีความเข้าใจแบบเดิมว่ากระแสจะมากแรงดันจะมากขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน ซึ่งในเวลาเดียวกันธรรมชาติของอุปกรณ์สำหรับเวลาการลัดวงจรเพื่อให้แน่ใจว่าในการสั่งสวิตช์จะมีความสูญเสียน้อยที่สุดในช่วงเวลาของเวลานี้น่าจะน้อยที่สุดซึ่งดูจากช่วงที่มอสเฟต Turn On และ Turn Off สถานะนี้เป็นช่วงเวลาที่ถูกจำกัดไปจนถึงช่วงเวลา 2 และ 3 ในการ Turn On และ Turn Off จะมีการดำเนินการเหมือนกันในการเปลี่ยนการสวิตช์ซึ่งกำหนดเวลานี้ให้หยุดพักเป็นช่วง ๆ ให้สัมพันธ์กับอุปกรณ์โดยมีดำเนินการเป็นเชิงเส้น (Linear) แม้ว่าแรงดันที่เกตอยู่ระหว่าง V_{TH} และ V_{GS} เป็นต้นเหตุที่ทำให้กระแสในอุปกรณ์และรวมไปถึงขอบเขตการทำให้แรงดันเรียบแม้ว่าการสวิตช์ให้แรงดันที่ขาเกตเรนผ่านไปได้นี้เป็นความเข้าใจและความสำคัญในการออกแบบวงจรการขับเคลื่อนแบบ High Speed ซึ่งเน้นความจริงเพราะว่าความสำคัญที่มี

ลักษณะพิเศษของการขับเคลื่อนที่มาจากกระแสจากรอบ ๆ ที่ทำให้ระดับแรงดันเปลี่ยนไปเล็กน้อยสำหรับความสามารถที่ ทำกระแสไหลได้สูงสุดซึ่งวัดได้ ณ V_{DRV} ทำงานเต็มที่ส่งเข้ามาไปยังการ Drive Output Impedance มีคุณสมบัติสัมพันธ์กันอย่างมากรวมไปถึง ณ เวลาที่มอสเฟตทำการสวิตช์ แต่อย่างไรก็ตามในความจริงเวลาในการสวิตช์อุปกรณ์คือ ความสามารถที่กระแสขับเคลื่อนถึงแม้ว่าแรงดันที่ขาเกตกับขาซอร์สที่เอาต์พุตของการ ไดรฟ์จะอยู่ที่ประมาณ 5 V (ประมาณ 2.5 V ที่ระดับ Logic มอสเฟต) ประมาณแบบคร่าว ๆ ของมอสเฟต ซึ่งสามารถพิจารณาความสูญเสีย ของการสวิตช์ได้ง่าย ๆ จากการคำนวณแบบคร่าว ๆ ของการ ไดรฟ์กระแสที่ขาเกตกับกระแสที่ ขาเดรนและแรงดันที่ขาเดรนในระหว่างช่วงระยะเวลาการสวิตช์ในช่วงที่ 2 ดังสมการที่ (2-7) และ ช่วงที่ 3 ดังสมการที่ (2-8) ของการเปลี่ยนช่วงสวิตช์อย่างแรกน่าจะคำนึงถึงกระแสที่เกิด ไดรฟ์เป็น หลักเพื่อให้ช่วงระยะเวลาที่ 2 และ 3 ทำงานตามลำดับ

$$I_{G2} = \frac{V_{DRV} - 0.5(V_{GS,Miller} + V_{TH})}{R_{HI} + R_{GATE} + R_{G-I}} \quad (2-7)$$

$$I_{G3} = \frac{V_{DRV} - V_{GS,Miller}}{R_{HI} + R_{GATE} + R_{G-I}} \quad (2-8)$$

เป็นที่เข้าใจกันเพราะว่า I_{G2} มีการชาร์จประจุจากอุปกรณ์ V_{TH} , V_{GS} และ I_{G3} เป็นตัวคายกระแส ที่ C_{RSS} ถึงแม้ว่าแรงดันที่เดรนจะเปลี่ยนจาก V_{DS} (Off) ไปยัง 0 V เวลาในการสวิตช์เหมือน ช่วง ที่ 2 ดังแสดงในสมการ(2-9) และ ช่วงที่ 3 ดังแสดงในสมการ (2-10)

$$t_2 = C_{ISS} \cdot \frac{V_{GS,Miller} + V_{TH}}{I_{G2}} \quad (2-9)$$

$$t_3 = C_{ISS} \cdot \frac{V_{DS,OFF}}{I_{G3}} \quad (2-10)$$

ในระหว่างช่วงเวลา t_2 แรงดันที่ขาเดรนจะอยู่ในช่วง V_{DS} (Off) จากนั้นกระแสจะลดลง จาก 0 A ไปยังกระแสของโหลดถึงแม้ว่า I_L ในช่วงเวลา t_3 แรงดันที่ขาเดรนจะตกจาก V_{DS} (Off) ไปจนถึงใกล้ 0V อีกครั้งเรามีวิธีการคำนวณแบบคร่าว ๆ เพื่อให้มัน Linear จากรูปคลื่นส่วนประกอบของความสูญเสียสามารถคำนวณช่วงที่ 2 ดังแสดงในสมการ(2-11) และ ช่วงที่ 3 ดังแสดงในสมการ(2-12)

$$P_2 = \frac{t_2 \cdot V_{DS,OFF} \cdot I_L}{T} \quad (2-11)$$

$$P_3 = \frac{t_3 \cdot V_{DS,OFF} \cdot I_L}{T} \quad (2-12)$$

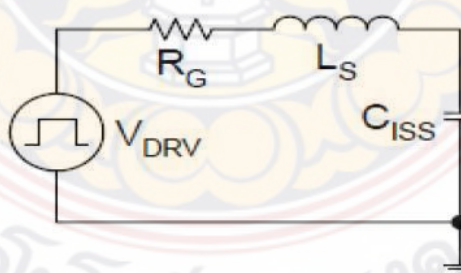
ที่ T ระยะเวลาสวิตช์ค่าความสูญเสียในการสวิตช์ทั้งหมดจะมีความสูญเสียอยู่สองอย่าง ผลลัพธ์ที่ได้สิ่งไหนจะง่ายจากสมการ (2-13)

$$P_{SW} = \frac{V_{DS,OFF} \cdot I_L \cdot t_2 + t_3}{2} \quad (2-13)$$

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าเราเข้าใจเกี่ยวกับการสวิตช์แล้วก็ตามการคำนวณความสูญเสียในการสวิตช์อาจจะไม่มีทางเป็นไปได้ ด้วยเหตุผลที่มีผลกระทบที่ปะปนเข้ามาในการเหนี่ยวนำเราต้องเปลี่ยนแรงดันกับกระแสโดยสังเกตรูปคลื่นสังเกตว่าเหมาะสมหรือไม่ ขณะที่ให้เวลาในการสวิตช์ อย่างเท่า ๆ กันในขั้นตอนการสวิตช์ที่น่าสนใจคือ จะพิจารณาในความแตกต่างระหว่างแหล่งจ่าย และการเหนี่ยวนำที่เดรนของวงจรถูกจับด้วยสมการอันดับที่ 2 ไปจนถึงการบรรยายรูปคลื่นในวงจร เนื่องจากตัวแปรรวมถึงแรงดันเริ่มต้นที่ขาเกตและความสำคัญของการเก็บประจุของมอสเฟต ค่าความต้านทานในกาซิปเอาต์พุต ETC มีการยอมรับอย่างกว้างเหมือนกันแต่เหนือไปกว่านั้นพูด ถึงการคำนวณคร่าว ๆ ในช่วงที่เป็นเส้นตรงดูเหมือนว่ามีเหตุผลพอที่ยอมให้เกิดค่าความสูญเสีย ของการสวิตช์ในตัวมอสเฟต

2.6.5 ส่วนประกอบที่ส่งผลกระทบปะปนในกำลังไฟฟ้า

ผลกระทบที่มีมากที่สุดเมื่อทำการสวิตช์ที่ระหว่างขาซอร์สนั้นจะมีการเหนี่ยวนำในสถานะ นั้นคือ ที่ขาซอร์สซึ่งในตัววงจรจะมีการปะปนมาในการเหนี่ยวนำที่ขาซอร์สเมื่อต่อเข้ากับมอสเฟต แล้วจากวงจรโดยจะต่ออยู่ระหว่างขั้วหน้าของขาซอร์สและต่อร่วมกับกราวด์โดยปกติแล้วนี้ จะอ้างอิงแต่เนื่องจากที่ขั้วลบนี้ความถี่สูง ๆ จึงมีการกรองประจุอยู่รอบ ๆ ช่วงเวลาที่เกิดกำลังไฟฟ้า รวมไปถึงการเก็บประจุที่ขาเกต กระแสในการที่เราต่อวงจรอนุกรมรวมกับขาซอร์สเราสามารถ เพิ่มตัวเหนี่ยวนำก่อนสองตัวดังนั้นก็จะได้เงื่อนไขคือ มีสองวิธีการในขั้นตอนการสวิตช์ สิ่งที่เกี่ยวข้องกับตัวนำเหนี่ยวนำของขาซอร์ส ณ จุดเริ่มต้นของการทำการสวิตช์ กระแสที่ขาเกตจะมากอย่างรวดเร็ว เมื่อกระแสนี้ซึ่งควรที่ไหลจากเหนี่ยวนำที่ขาซอร์สและเป็นที่ต้องการให้ค่าของตัวเหนี่ยวนำนั้นลดลงอย่างช้า ๆ ดังนั้นเราจึงต้องการให้ตัวเก็บประจุชาร์จและคายประจุที่ Input ของมอสเฟต โดย มีพัฒนาให้ยาวนานโดยส่วนใหญ่แล้วภายในจะมีการ Turn On และ Turn Off ช้ากว่าแต่ยิ่งกว่านั้น ที่ การเหนี่ยวนำที่ขาซอร์สและที่ C_{ISS} จากวงจรรีโซแนนซ์ดังที่แสดงในภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 ส่วนประกอบวงจรขับเคลื่อนในสถานะรีโซแนนซ์

จากวงจรรีโซแนนซ์แรงดันที่ขับเคลื่อนจะมีความถี่ที่ขับเคลื่อนออกมาที่รูปคลื่นจะมีการขึ้นสุดแล้วตกลงมา ทันทีและมันเป็นเหตุผลเพื่อที่ต้องสังเกตในวงจรขับเคลื่อนจะมีการแกว่งของยอดคลื่นอยู่มาก แต่โชคดี ไม่เช่นนั้น Q จะมีรีโซแนนซ์สูงระหว่าง C_{ISS} และ L_S ซึ่งห่วงหรือสามารถห่วงโดยการ ต่ออนุกรมตัวต้านทานของทั้ง Loop ซึ่งรวมถึงค่าความต้านทานที่ขับเคลื่อนที่ขับเคลื่อนด้วยการต่อตัวต้านทานภายนอกเกตและต่อตัวต้านทานเข้าภายในเกตซึ่งผู้ใช้สามารถปรับค่าความต้านทานได้ R สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2-14)

$$R_{GATE,OPT} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_S}{C_{ISS}}} - (R_{DRV} + R_{G.I}) \quad (2-14)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จะได้ค่าความต้านทานค่อนข้างน้อยเป็นผลให้เกิด Overshoot ที่รูปคลื่นแรงดัน ขับเกต แต่เช่นกันคือส่งผลให้เกิดการ Turn On อย่างรวดเร็ว แต่ที่ค่าความต้านทานสูงจะมีการ แกว่งไปมาและเกิด Under Damp และทำให้เวลาในการสวิตช์เลื่อนออกไปถือว่าเป็นผลดีในการ ออกแบบการขับเคลื่อนที่มีผลกระทบทั้งสองด้านที่ช่วงขาซอร์สเหนี่ยวนำจะมีการป้อนกลับเป็นลบ อย่างไรก็ตามกระแสที่ขาเดรนจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่ผลกระทบช่วงเวลา Turn On ที่สองนี้ และช่วงเวลาที่สามของของขั้นตอนการ Turn Off ช่วงเวลาเหล่านี้ที่แรงดันขาเกตอยู่ระหว่าง V_{TH} และ V_{GS} และกระแสที่เกิดขึ้นเป็นตัวกำหนดโดยที่แรงดันไหลผ่านเข้าที่ขาเกตค่าของความต้านทาน $V_{VDRV} - V_{GS}$ ในลำดับแรกจะเพิ่มขึ้นไป ที่กระแสเดรนอย่างรวดเร็ว ซึ่งความหมายของ แรงดันจำเป็นที่ต้องนำมาประยุกต์ใช้ข้ามไปที่การเหนี่ยวนำขาซอร์ส แรงดันนี้จะลดลงซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้ซึ่งแรงดันจะข้ามไปที่ขาเกตค่าของความต้านทาน ดังนั้นเมื่อจัดลำดับไล่ลงไป แทนที่ในแรงดันที่ขับเคลื่อนซึ่งจะทำให้เกิดการลดระดับ di/dt ของกระแสเดรนที่ระดับต่ำลง di/dt คือต้องการให้ขาซอร์สเหนี่ยวนำข้ามไปยังแรงดันที่น้อยกว่าซึ่งการทรงตัวที่ยู่งยากซับซ้อนของกระแสเกตและเดรน di/dt เป็นที่ยอมรับเนื่องจากมีการป้อนกลับมาเป็นลบเพื่อเหนี่ยวนำขาซอร์ส

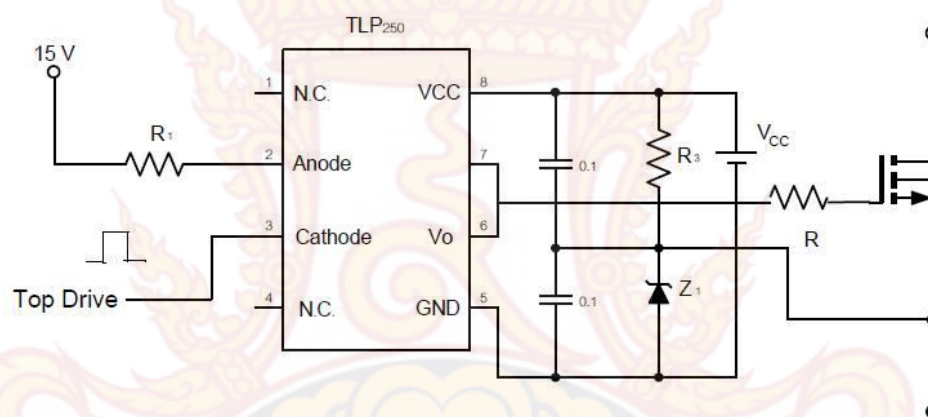
อีกสิ่งหนึ่งที่ปะปนอยู่ในตัวเหนี่ยวนำของโครงข่ายการสวิตช์อยู่ที่ตัวเหนี่ยวนำเดรนเหมือนเช่นเคยพวกนั้นจะอยู่ในโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำและโครงสร้างทรานซิสเตอร์ ทั้งหมดนี้มีความสัมพันธ์กับตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อและที่ตัวเหนี่ยวนำที่รั่วไหลในหม้อแปลง Isolated Power-Supplies ผลกระทบเหล่านี้สามารถอยู่รวมตัวกันนับตั้งแต่ในการอนุกรมรวมเข้าด้วยกันตอน Turn On พวกมันทำหน้าที่เป็น Snubber สำหรับตัวมอสเฟตในระหว่างที่พวกมัน Turn On จะถูกจำกัดที่ di/dt ของกระแสเดรนและบังคับให้แรงดันที่จ่ายให้เดรนข้ามไปยังอุปกรณ์ประกอบของ L_D di/dt โดยแท้จริงแล้ว L_D สามารถลดระดับความสูญเสียเมื่อสวิตช์ Turn On ตอนที่จำเป็นถึงแม้ว่าค่า I_D จะสูงแต่เป็นประโยชน์ตอนที่ Turn On แต่สาเหตุสำคัญที่เป็นปัญหา ณ ช่วง Turn Off แม้ว่ากระแสเดรนจะลดต่ำอย่างรวดเร็วไปจนถึงตัวที่ช่วยทำให้กระแสเดรนต่ำได้อย่างรวดเร็ว สาเหตุเกิดจากการ Turn Off ของมอสเฟตซึ่งแรงดันที่ควบคุมต่างกันโดยสิ้นเชิงตามช่วงเวลา Turn On น่าจะอยู่ตรงข้ามกันกับ L_D เท่านั้นในทางทฤษฎีก็ มีแรงดันสูงกว่า ระดับแรงดันอยู่ที่ $V_{DS}(Off)$ จึงทำให้เกิด

Overshoot ในการจ่ายแรงดันที่เดรนและทำให้การสูญเสียเพิ่มขึ้นในช่วงการ Turn Off การวิเคราะห์ข้อผิดพลาดของการสวิตช์และผลกระทบที่จะป็นมาในตั้เห็ยนวนำอาจมีอยู่บ้างในการเขียนวงจร

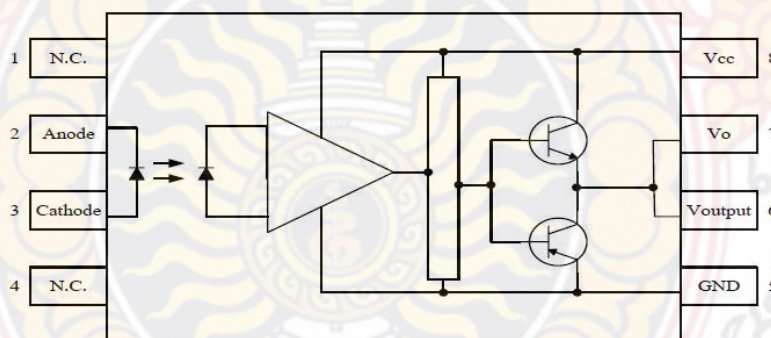
2.6.6 วงจรขับเกต Mosfet โดย อปโต TLP250

ปัจจุบันมอสเฟสกำลังเป็นที่นิยมมากในการใช้เป็นสวิตช์กำลัง ในระบบการควบคุมทั้ง อินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมมอเตอร์ และระบบจ่ายกำลังสำรอง

มอสเฟสต้องการแรงดันมาขับเกต เพื่อให้มันสามารถทำงานในสภาวะนำกระแสและหยุด นำกระแสได้ซึ่งไอซีขับเกต TLP250 เป็นไอซีขับเกตของบริษัทโตชิบาได้ถูกออกแบบมาสำหรับขับนำเกตของไอจีบีที และมอสเฟสกำลัง ลักษณะโดยรวมเป็นวงจรสำเร็จรูปรวมอยู่ในชิปเดียว ไอซี TLP250 1 ตัว สามารถขับเกตมอสเฟสได้ 1 ตัว สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตถูกแยกออก จากกันด้วยออปโตคัปเปอร์ ซึ่งอยู่ภายในตัวไอซีทำให้ช่วยลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน TLP250 ยังสามารถทำงานในย่านความถี่สูงได้



(ก) แสดงวงจรขับเกต



(ข) แสดงวงจรภายใน TLP250

ภาพที่ 2-20 แสดงวงจรขับเกต และวงจรภายใน TLP250

จากภาพที่ 2-20 วงจรชุดขับเกตที่มี Opto TLP250 ไว้แยกกราวด์ของภาค Control กับ ภาคกำลัง เมื่อไดโอดของ TLP250 ถูกไบอัสตรงทำให้มีการจ่ายไฟบวกจากขา 6 ของ TLP250 ให้กับ ขาเกต ของ

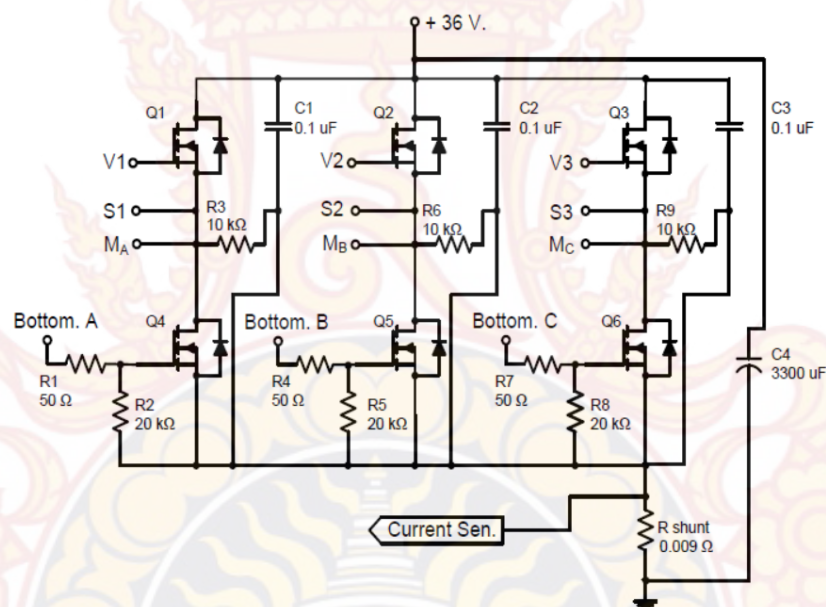
มอสเฟส ทำให้มอสเฟสปิดวงจร แต่เมื่อไดโอดของ TLP250 หยุดทำงาน จะมีแรงดันลบจาก ขา 6 ของ TLP250 แรงดันลบที่จ่ายไฟให้กับขาเกตของมอสเฟสนี้เป็นผลให้มอสเฟสเปิดวงจร

2.7 วงจรภาคกำลัง (วิษณุและทศพล, 2552: 81-83)

ในการเลือกใช้อุปกรณ์ภาคกำลังต้องให้เหมาะสมกับมอเตอร์กระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้ที่เลือกใช้มีขดลวด 3 ขด ดังนั้นสามารถใช้อุปกรณ์ภาคกำลัง ชนิด 3 เฟส แบบบริดจ์ จำนวน 1 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะประกอบด้วยมอสเฟตกำลัง (Power Mosfets) โดยทำหน้าที่ ซอปเปอร์ 6 ตัว

ในการเลือกเพาเวอร์มอสเฟต โดยคำนึงถึงแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ตามลักษณะของ ตัวมอเตอร์ ซึ่งมีขนาดแรงดันต่ำแต่มีกำลังวัตต์สูง ดังนั้นต้องเลือกใช้อุปกรณ์ภาคกำลังที่มีแรงดันที่ทำให้สภาวะอิ่มตัว (V_{SAT}) ค่าต่ำและพิจารณาที่กระแสมอเตอร์ ซึ่งมีการคำนวณหากระแสของมอเตอร์ ได้จากสมการ (2-15)

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_{max}} \quad (2-15)$$



ภาพที่ 2-21 วงจรภาคกำลัง

จากภาพที่ 2-21 ซึ่งจะเป็นภาพวงจรภาคกำลังของวงจรนี้ซึ่งจะใช้ Mosfets จำนวน 6 ตัว มาต่อแบบ 3 เฟส โดยใช้เฟสละ 2 ตัว เพื่อให้สัมพันธ์กับจำนวนของขดลวดมอเตอร์ ซึ่งใน แกวที่ 1 Q1 กับ Q4 จะเป็นตัวควบคุมของเฟส A ของ Q2 กับ Q5 ของเฟส B และ Q3 กับ Q6 ของเฟส C ในส่วนของ Q1 Q2 Q3 จะเป็นตัวรับสัญญาณจาก Top Drive ซึ่งมาจากไอซีและ Q4 Q5 Q6 จะเป็น BottomDrive ซึ่งจุดต่อของวงจรในส่วน ของ G และ S จะสัมพันธ์กับภาพวงจร และในส่วนของ MA MB MC ก็จะเป็นสายสัญญาณที่จ่าย กำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ การทำงานของวงจรนี้ Mosfets ระหว่างTop กับ Bottom จะจับคู่กันทำงานเป็นคู่ ๆ ซึ่งอาจจะเป็น Q1 กับ Q5 และ Q1 กับ Q6 หรือ Q2 กับ Q4 ซึ่งการจับคู่การทำงานก็จะเป็นไปตาม สัญญาณของ Encoder ที่รับเข้ามา เพื่อกำหนดจังหวะการทำงาน ซึ่งข้อห้ามของวงจรนี้คือ Mosfets ในแกว

เดียวกันจะทำงานพร้อมกันไม่ได้เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรทำให้วงจรเสียหายได้ และในส่วนล่างของวงจรจะนำเอาความต้านทานค่าอื่น ๆ มาต่อไปให้ตัวไอซีโดยผ่านทางชุดควบคุมกระแสอีกครั้งหนึ่ง

2.8 ทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

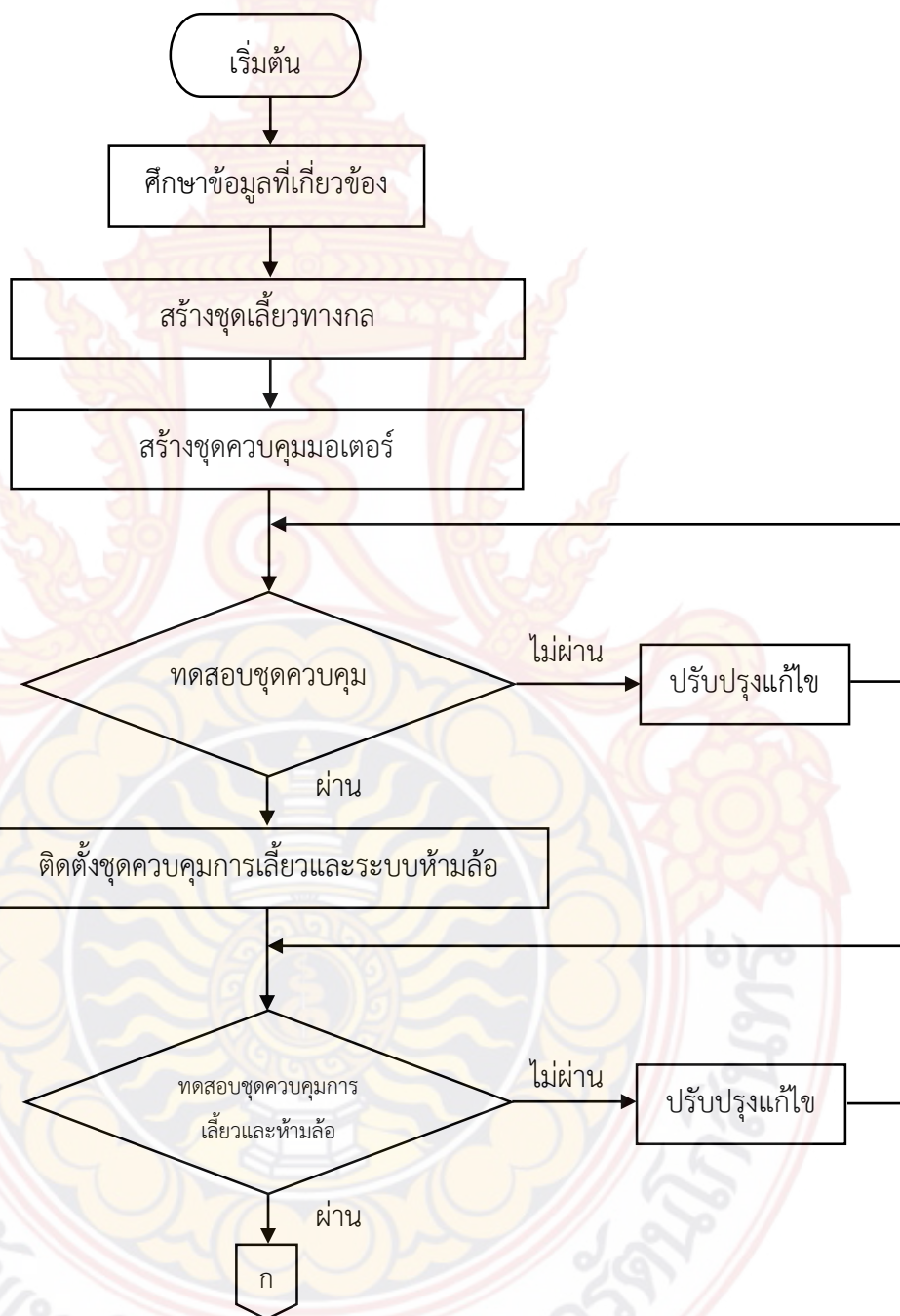
เดชฤทธิ์ มณีธรรม และนิยม ละออปักษิน [6] ได้พัฒนารถเข็นคนพิการแบบพับได้ หรือวีลแชร์ รุ่นที่ 2 ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งพัฒนามาจาก วีลแชร์รุ่นที่ 1 ที่จะขับเคลื่อนล้อหลัง 2 ล้อ โดยมีล้อหน้าเป็นตัวกำหนดทิศทาง การควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 เป็นตัวควบคุม ผ่าน Keypad แต่ราคาแพงประมาณ 40,000 บาท น้ำหนักมากและไม่สามารถพับเก็บได้เมื่อไฟฟ้าหมดไม่สามารถเข็นได้ การเลี้ยวด้วย Keypad ไม่ค่อยคล่องตัวเท่าที่ควร สำหรับรุ่นที่ 2 จะมีล้อหลังเป็นชุดควบคุมการเดินหน้าและถอยหลัง และเลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวา การควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 เป็นตัวควบคุม ผ่านจอยสติค สามารถถอดแยกชุดควบคุมกับตัวรถได้เมื่อต้องเดินทางไกลและเก็บพับได้ เมื่อไฟฟ้าหมด ผู้ใช้สามารถเข็นรถได้ปกติ แต่ที่ขายในท้องตลาดไม่สามารถเข็นได้ ราคาอยู่ที่คันละ 25,000 บาท เมื่อเทียบกับรถควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าทั่วไปที่มีราคาอยู่ที่ 160,000 บาทต่อคัน

การสร้างรถจักรยานไฟฟ้าแบบสามล้อ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน เป็นการพัฒนามาจากปริญญาานิพนธ์เรื่องรถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor ของวิษณุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552 ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนแบบ Brushless DC Hub Motor เป็นชนิดที่ปราศจากแปรงถ่านจำนวน 1 ตัว ทำให้เกิดแรงบิดน้อย ซึ่งผู้จัดทำจึงมีแนวคิดพัฒนารถจักรยานไฟฟ้าโดยนามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน Brushless DC Hub Motor ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 36 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ซึ่งส่งผลทำให้แรงบิดดีขึ้น การเร่งหรือลดความเร็วสามารถทำได้โดยการบิดและผ่อนคันเร่งซึ่งเป็นคำสั่งให้ ไอซี MC33033 ไปขับมอสเฟต (Mosfets) ทาหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์วงจรมอสเฟต (Mosfets) แบบ 3 เฟส โดยใช้มอสเฟต (Mosfets) จำนวน 6 ตัว เพื่อจับคู่ทำงาน (6 ควอดแรนท์) ส่วนใน การเลี้ยวอาศัยการปรับสัญญาณ PWM(Pulse Width Modulation)ให้ลดลงทำให้มอเตอร์ อีกตัวหมุน ช้าลงโดยการใช้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ชนิดมีแท่งปกกลางทำหน้าที่ลดทอนแรงดันแล้วนำคำสั่งที่ได้ส่งไปยังไอซี MC 33033เพื่อไปขับมอสเฟต (Mosfets) จากผลการทดสอบการทำงานของโครงการรถจักรยานไฟฟ้า สามารถควบคุมให้มีการเคลื่อนไปข้างหน้า โดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ล้อหน้าจำนวน 2 ล้อและเมื่อเลี้ยวมอเตอร์ ทั้ง 2 ตัวมีความเร็วรอบไม่เท่ากัน รถจักรยานไฟฟ้ามี่น้ำหนักรวมแบตเตอรี่ 80 กิโลกรัม สามารถ วิ่งบนทางเรียบด้วยความเร็วสูงสุด 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง และสามารถวิ่งไต่ระดับที่ความชัน 20,27 และ 32 องศา ด้วยความเร็วสูงสุด 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง สามารถวิ่งในระยะทางต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง ได้ 22.5 กิโลเมตร ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม [7]

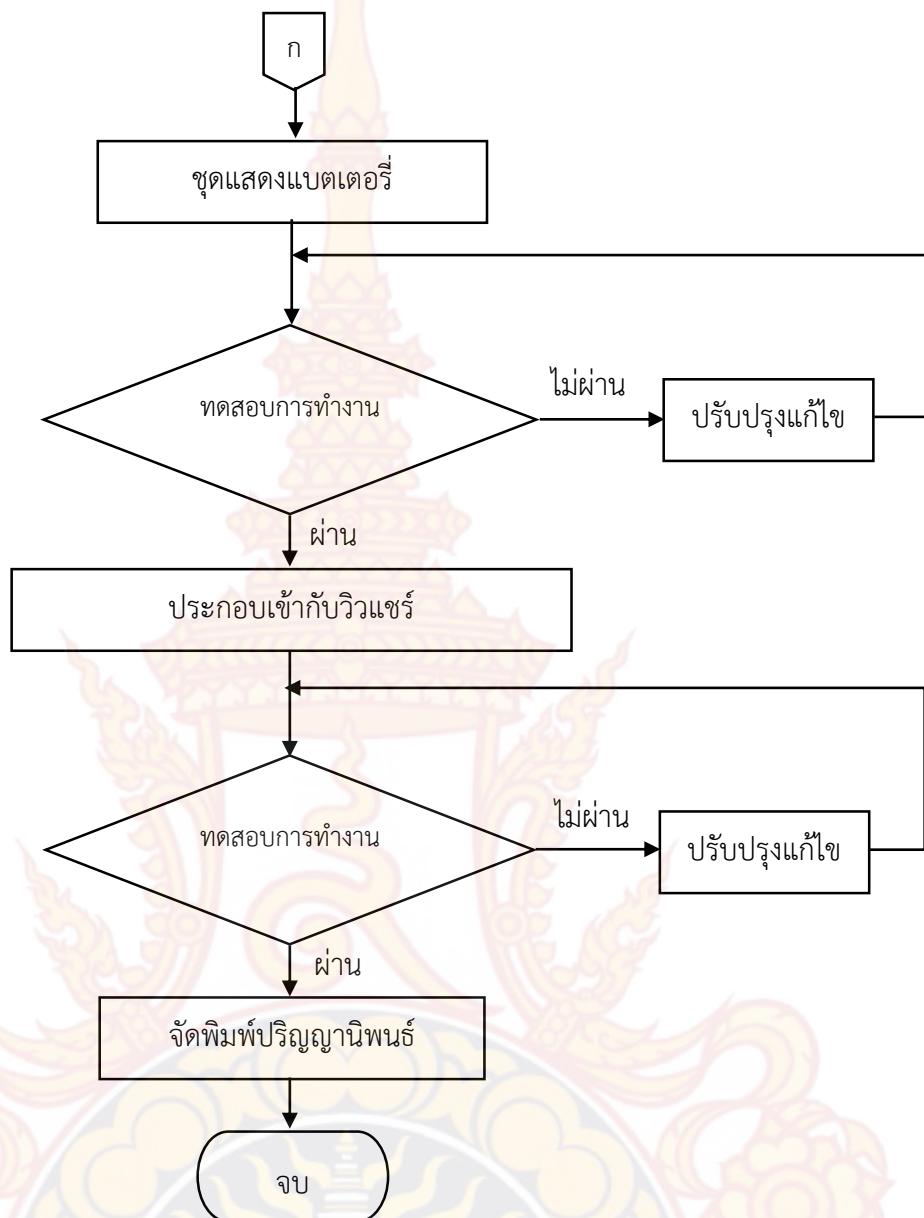
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการ

กระบวนการในการสร้างรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้ มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานดังแสดงไว้ด้วยแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน (Flow Chart) โดยรายละเอียดต่างๆ มีดังนี้



ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

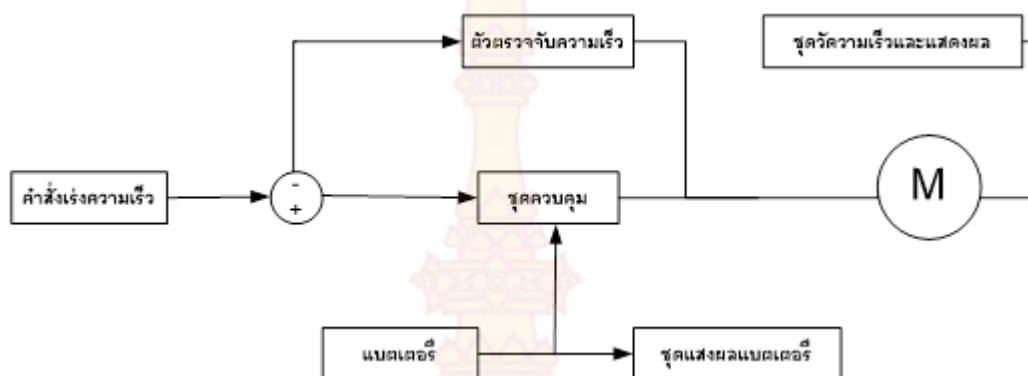


ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน (ต่อ)

3.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

การศึกษารวบรวมข้อมูลเบื้องต้น ทางคณะของผู้จัดทำได้ทำการค้นคว้าหาข้อมูลมาจากหลายแหล่งอ้างอิง นำมารวบรวมเข้าด้วยกันและทำการศึกษา ข้อมูลที่ค้นคว้ามาได้ สามารถแบ่งการศึกษาค้นคว้าข้อมูลได้ดังนี้

- 3.1.1. ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน
- 3.1.2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน
- 3.1.3. การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน



ภาพที่ 3-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของรถสามล้อไฟฟ้า

เมื่อหมุนคันเร่งค่าสั่งเร่งความเร็วส่งไปยังชุดควบคุมเมื่อชุดควบคุมทำงานทำให้มอเตอร์หมุน เพื่อให้มอเตอร์ตอบสนองต่อบิตคันเร่งเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราความเร็วคงที่จึงใช้ตัวตรวจจับความเร็วและมีชุดวัดความเร็วแสดงผลบอกถึงความเร็วของรถสามล้อไฟฟ้า

3.2 การออกแบบสร้างชุดล้อไฟฟ้าพร้อมแฮนด์บังคับ

ขั้นตอนนี้เป็นารออกแบบโครงสร้างของชุดล้อไฟฟ้าพร้อมแฮนด์บังคับ ในงานวิจัยนี้ใช้ Brushless Dc Motor ขนาด 36V 350W มาประกอบเข้ากับล้อขนาด 50.8 ซม. และประกอบเข้ากับแฮนด์บังคับ



ภาพที่ 3-3 ประกอบ Brushless Dc Motor เข้ากับล้อขนาด 50.8 ซม.



ภาพที่ 3-4 นำล้อประกอบเข้ากับแฮนด์บังคับ



ภาพที่ 3-5 ภาพรวมของรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

กระบวนการในการสร้างรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้ มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานดังแสดงไว้ด้วยแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน (Flow Chart) โดยรายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

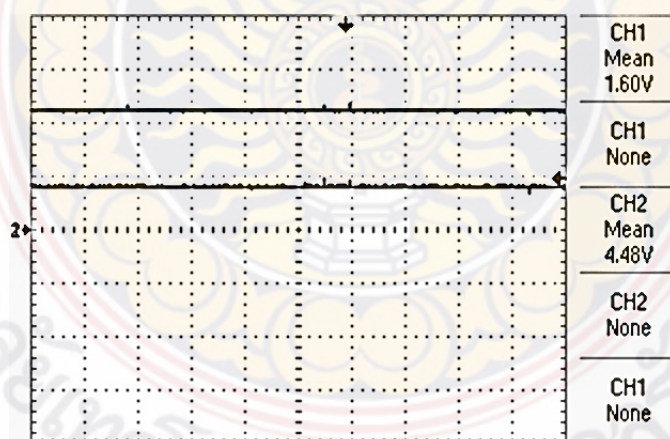
4.1 การทดสอบชุดล้อไฟฟ้าพร้อมแฮนด์บังคับ

เมื่อหมุนคันเร่งคำสั่งเร่งความเร็วส่งไปยังชุดควบคุมเมื่อชุดควบคุมทำงานทำให้มอเตอร์หมุนเพื่อให้มอเตอร์ตอบสนองต่อบิตคันเร่งเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยอัตราความเร็วคงที่จึงใช้ตัวตรวจจับความเร็วและมีชุดวัดความเร็วแสดงผลบอกถึงความเร็วของรถสามล้อไฟฟ้า

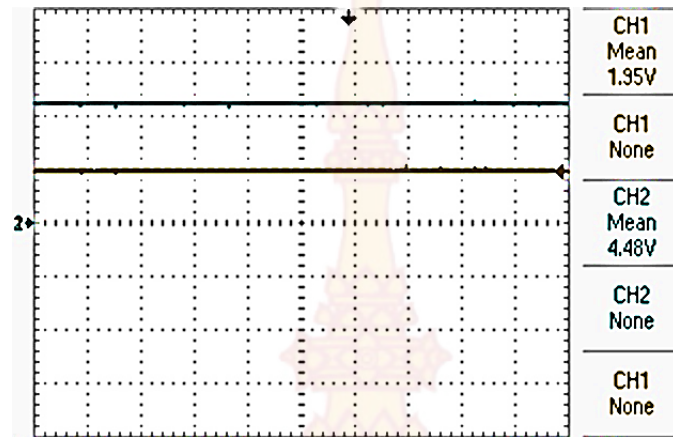
การสร้างชุดควบคุม Brushless Dc Motor โดยทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจรตัวอย่าง

4.1.1 การทดสอบชุดคันเร่ง

หลักการทำงานของคันเร่งก็เหมือนการใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้ทั่วไปควบคุมแรงดันไฟฟ้า คือสามารถเร่งหรือปรับแรงดันขาออกได้ 1-4 โวลต์โดยประมาณ แต่ภายในจะไม่ใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้ แต่จะใช้ Hall Sensor (เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก) แทนเนื่องจากคงทนและแม่นยำกว่าความต้านทานแบบปรับค่าที่เราพบเห็น Hall Sensor มีลักษณะเหมือนทรานซิสเตอร์มี 3 ขาคือ ขาไฟเลี้ยง 5 โวลต์ ขากราวด์ และขาไฟออก ซึ่งภายในคันเร่งจะมีแม่เหล็กลักษณะทรงโค้งฝังอยู่ในตัวบิต (บางตัวก็วางแม่เหล็กเป็น 2 ชั้นโดยมีเซนเซอร์รับ สนามแม่เหล็กอยู่ตรงกลาง เมื่อเราบิดคันเร่งก็จะเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ต่างกันไป ให้ Hall sensor แปรผันเป็นแรงดันไฟ ส่งไปให้ชุดควบคุมรับรู้อีกทีหนึ่ง



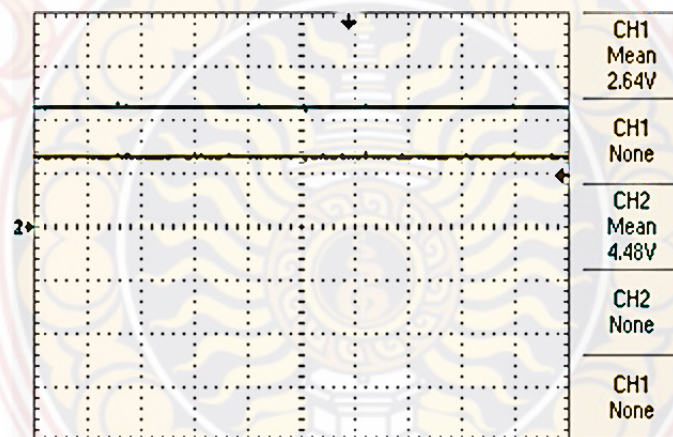
ภาพที่ 4-1 สัญญาณที่จากคันเร่งที่ความเร็วรอบ 50 RPM



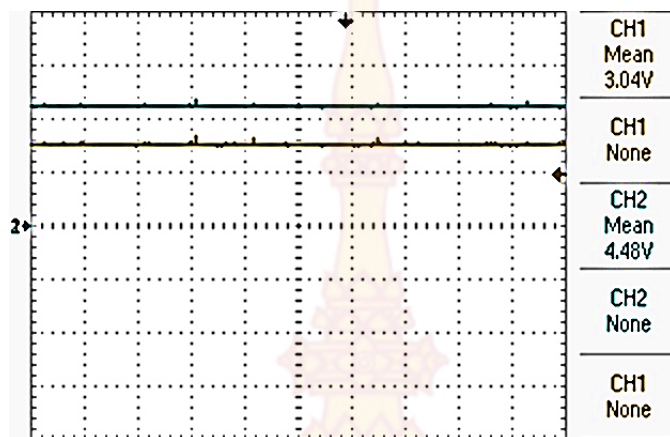
ภาพที่ 4-2 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 100 RPM



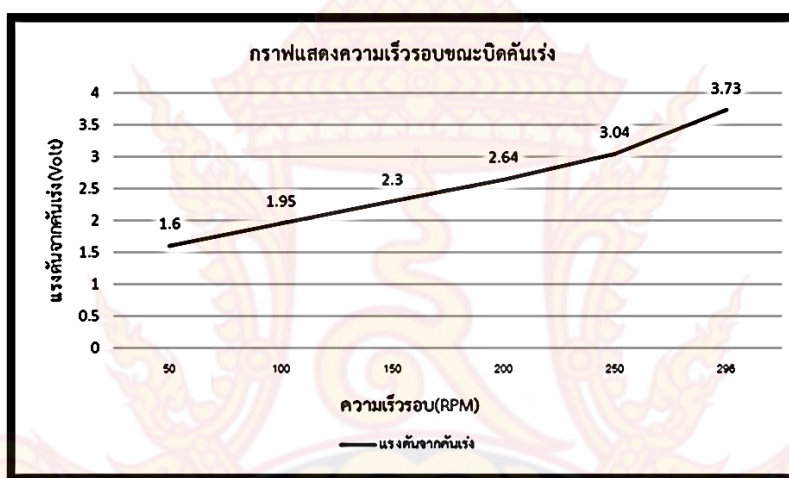
ภาพที่ 4-3 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 150 RPM



ภาพที่ 4-4 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 200 RPM



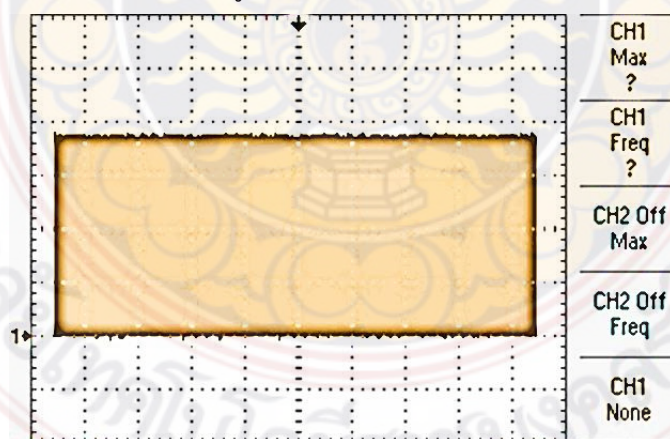
ภาพที่ 4-5 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 250 RPM



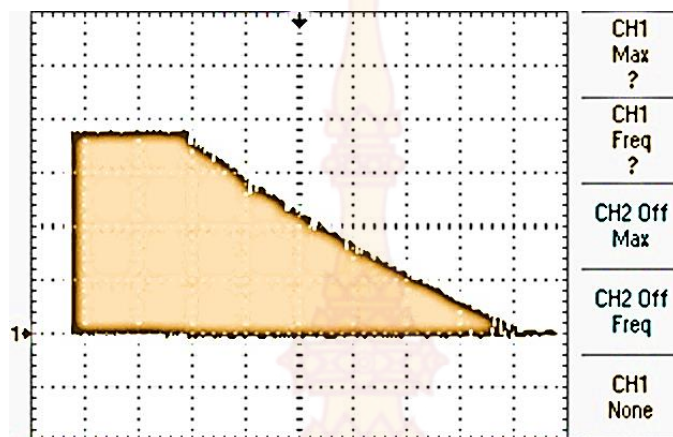
ภาพที่ 4-6 แรงดันไฟฟ้าจากคันเร่งที่ความเร็วรอบต่างๆ

4.1.2 การทดสอบเบรก

ระบบเบรกที่ใช้เป็นมือเบรก มีเซนเซอร์ในตัว (สวิทซ์) ใช้ต่อกับกล่องควบคุมเพื่อตัดการทำงานของมอเตอร์ สัญญาณที่วัดได้จากการเบรกมีรูปร่างดังต่อไปนี้

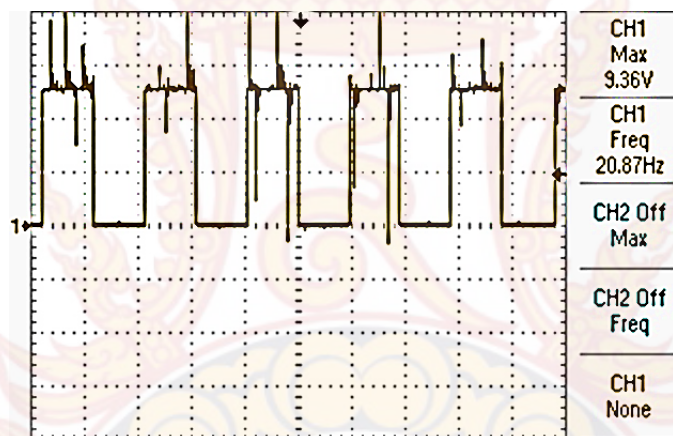


ภาพที่ 4-7 สัญญาณขณะบิดคันเร่ง

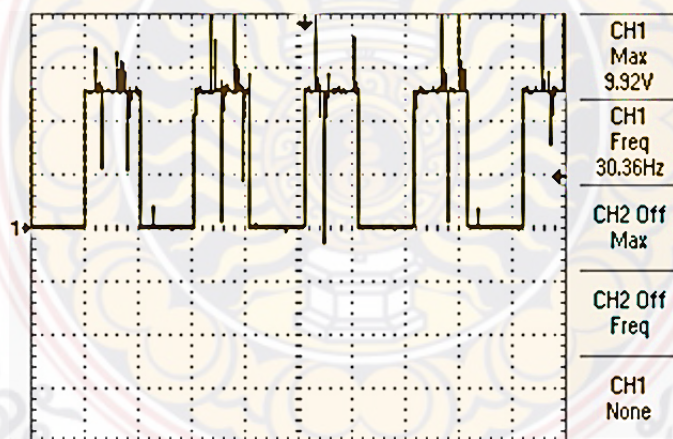


ภาพที่ 4-8 สัญญาณขณะเบรก

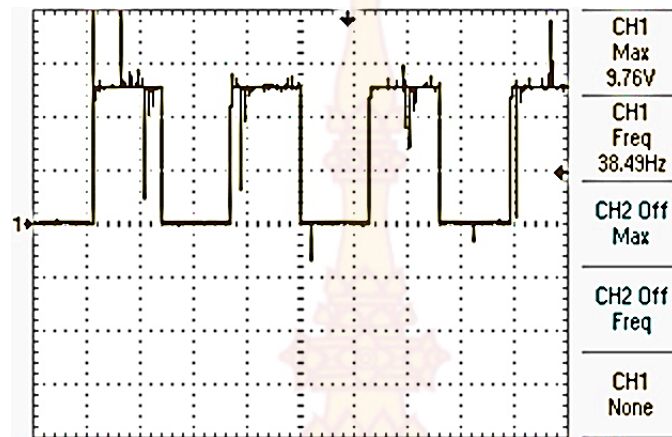
4.1.3 สัญญาณที่วัดได้ขณะมอเตอร์ทำงาน



ภาพที่ 4-9 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 50 RPM



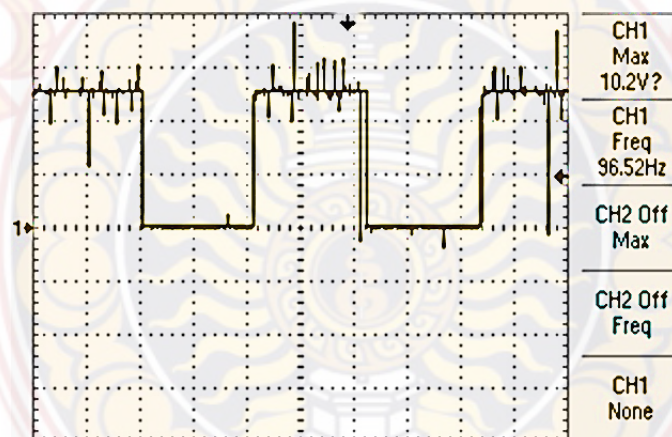
ภาพที่ 4-10 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 100 RPM



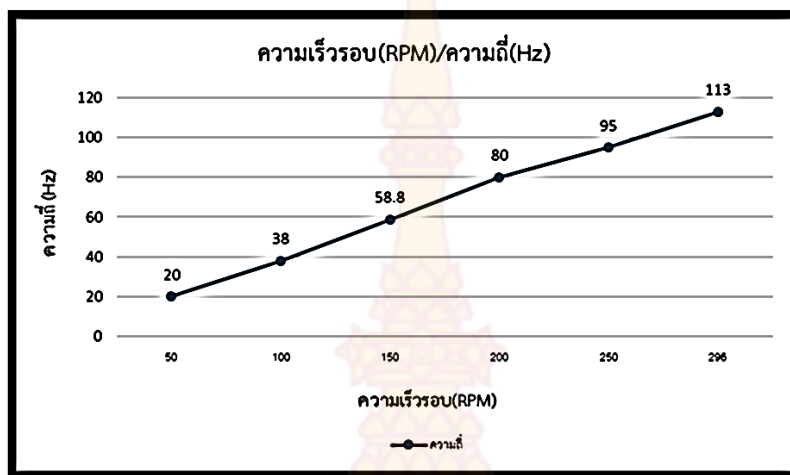
ภาพที่ 4-11 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 150 RPM



ภาพที่ 4-12 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 200 PRM

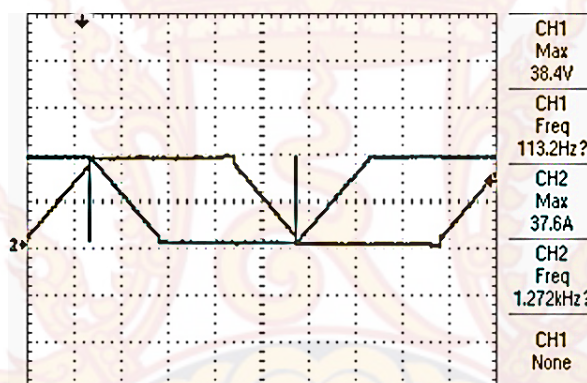


ภาพที่ 4-13 สัญญาณที่ความเร็วรอบ 250 PRM



ภาพที่ 4-14 สัญญาณเบรคที่ความเร็วรอบต่างๆ

มุมเฟสต่างกัน 120 องศา



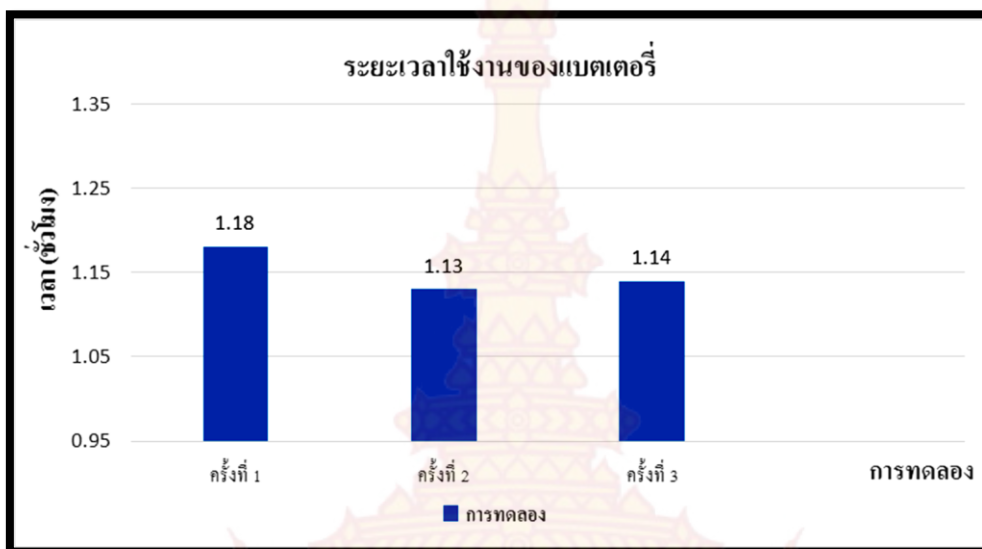
ภาพที่ 4-15 สัญญาณเฟส A เทียบกับเฟส B

4.1.4 ผลการทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้

ผลการทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าบนลู่วิ่งพื้นยางสังเคราะห์ภายในสนามกีฬามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งลู่วิ่งยางสังเคราะห์จะมีความยืดหยุ่นสูง โดยผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าบนลู่วิ่งพื้นยางสังเคราะห์

ครั้งที่	ระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่ (ชม.)	ความเร็วสูงสุด (กม./ชม.)	ระยะทางที่วิ่งได้ (กม.)
1	1.18	21	20
2	1.13	23	18
3	1.14	23	22
เฉลี่ย	1.15	22.3	20



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระยะเวลาการใช้งานของ Battery ต่อการใช้งานแต่ละครั้ง

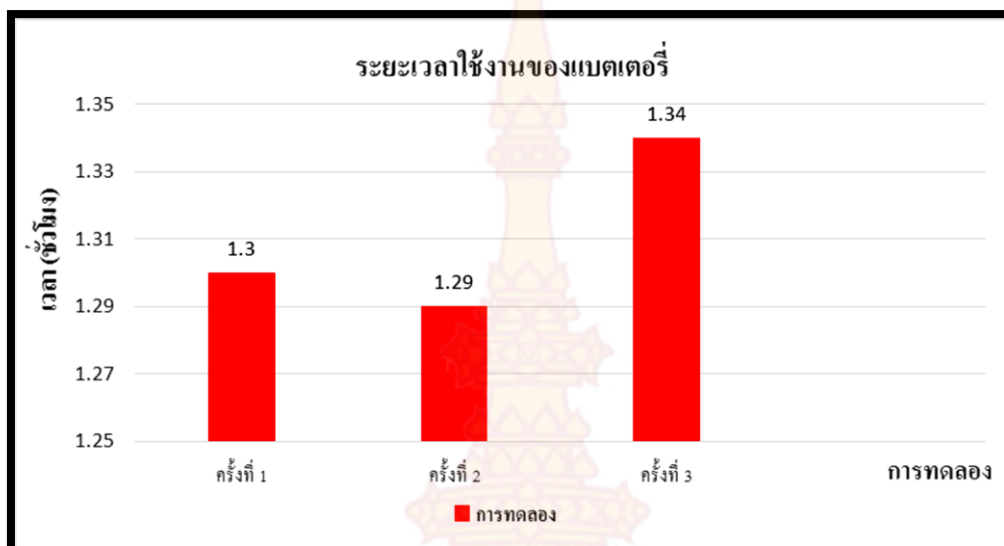
ตารางที่ 4.2 ผลทดลองการประจุแบตเตอรี่

ครั้งที่	ระยะเวลาในการประจุแบตเตอรี่ (ชั่วโมง)
1	8
2	6.15
3	6

ทดลองวิ่งบนถนนแอสฟัลต์ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ได้ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าบนพื้นลาดยาง

ครั้งที่	ระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่ (ชม.)	ความเร็วสูงสุด (กม./ชม.)	ระยะทางที่วิ่งได้ (กม.)
1	1.29	25	22
2	1.30	26	20
3	1.34	25	22
เฉลี่ย	1.28	25	21



ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการประจุแบตเตอรี่

ครั้งที่	ระยะเวลาในการประจุแบตเตอรี่ (ชั่วโมง)
1	6
2	6
3	6.30

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

รถสามล้อไฟฟ้าสำหรับคนพิการแบบถอดประกอบได้ที่พัฒนาขึ้นให้มีลักษณะของรถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวของรถ และส่วนของรถเข็นคนพิการ มีข้อดีคือคนพิการสามารถใส่และถอดชุดล้อหน้าออกได้เองโดยไม่ต้องมีคนช่วยเหลือ ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนรถใช้งานในอาคาร โครงสร้างของส่วนหัวของรถสามล้อมีลักษณะเหมือนชุดล้อหน้าของจักรยานประกอบด้วยคันบังคับ ตะเกียบหน้า และล้อหน้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นิ้ว โครงสร้างออกแบบให้สามารถประกอบเข้ากับรถเข็นคนพิการแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยสร้างจุดเชื่อมต่อแบบถอดได้จำนวน 4 จุด โดยผู้พิการสามารถใส่และถอดส่วนหัวของรถได้ด้วยตนเอง ระบบขับเคลื่อนของรถใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 36 V 350 W มอเตอร์จะเป็นแบบฝังอยู่ในล้อ (Wheel motor) จากผลการทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ 1.15 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน หรือคิดเป็นระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยมีระยะเวลาในการประจุแบตเตอรี่ประมาณ 6 ชั่วโมง

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานพัฒนานโยบายสุขภาพระหว่างประเทศ (IHPP) กระทรวงสาธารณสุข, สถานการณ์คนพิการในสังคมไทย: การวิเคราะห์ข้อมูลการสำรวจความพิการและคุณภาพของสำนักงานสถิติแห่งชาติ ปี พ.ศ. 2545 และ 2550, มีนาคม 2556
- [2] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์, สถิติการออกบัตรประจำตัวคนพิการในประเทศไทย, สิงหาคม 2556
- [3] พวงแก้ว กิจธรรม. ประเภทของคนพิการ.2549 [cited 2549 November]; Available from: URL:<http://sichon.wu.ac.th/file.pdf>
- [4] ศูนย์สถิติอุปกรณ์เครื่องช่วยคนพิการ, ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเก้าอี้ล้อเข็นและการช่วยเหลือเบื้องต้นแก่คนพิการทางกายและการเคลื่อนไหวในการใช้ล้อเข็น
- [5] ศูนย์ข้อมูลพิชวิทยากรกระทรวงสาธารณสุข, แบตเตอรี่ <http://signal.rta.mi.th/signal%20meteriel/Interest/Magazine/training.html>
- [6] สืบค้นจากเว็บไซต์ RMUTT HOT NEWS, <http://www.news.rmutt.ac.th/archives/616>
- [7] กิตติศักดิ์ หมึกแดง, อติศักดิ์ คามพินิจ “รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor 2 ตัว” ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.

- [1] เสรี ชื่นอารมณ ณ์ัฐ จันท์ครบ และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์. (2550). เทคนิคการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียดสูงด้วยซอฟต์แวร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5 (PEC-5) โรงแรมภูเก็ตแกรนด์ รีสอร์ท&สปา จังหวัดภูเก็ต วันที่ 10-11 พฤษภาคม 2550.
- [2] ณ์ัฐ จันท์ครบ เสรี ชื่นอารมณ ณ์ และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์. (2550). การวิเคราะห์รูปแบบการต่อเชื่อมกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5 (PEC-5) โรงแรมภูเก็ตแกรนด์ รีสอร์ท&สปา จังหวัดภูเก็ต วันที่ 10-11 พฤษภาคม 2550.
- [3] ณ์ัฐ จันท์ครบ เสรี ชื่นอารมณ ณ์ เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และกลางพล กมลโชติ. (2551). การทดสอบสภาพนำไฟฟ้าของน้ำเสียเพื่อใช้สำหรับการบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4 โรงแรมโรสการ์เด้น ริเวอร์ไซด์ สวนสามพราน จังหวัดนครปฐม วันที่ 14-16 พฤษภาคม 2551.
- [4] ณ์ัฐ จันท์ครบ เสรี ชื่นอารมณ ณ์ และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์. (2551). ระบบควบคุมความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดสำหรับอาคารที่ใช้เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4 โรงแรมโรสการ์เด้น ริเวอร์ไซด์ สวนสามพราน จังหวัดนครปฐม วันที่ 14-16 พฤษภาคม 2551.
- [5] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ เสรี ชื่นอารมณ ณ์ และณ์ัฐ จันท์ครบ. (2552). ระบบติดตามดวงอาทิตย์อัตโนมัติสำหรับเครื่องอบแห้ง. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก วันที่ 30 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2552.
- [6] สมิต อินทร์ศิริพงษ์ เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และณ์ัฐ จันท์ครบ. (2552). ต้นแบบเตาเผาขามูแบบช่วยลดมลภาวะ. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น โรงแรมพูลแมนขอนแก่น ราชาออคิต จังหวัดขอนแก่น วันที่ 21-22 ตุลาคม 2552.
- [7] สมิต อินทร์ศิริพงษ์ ญัฐพรภัทร อินทร์ศิริพงษ์ เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และณ์ัฐ จันท์ครบ. (2553). การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องต้นแบบอย่างง่ายสำหรับการผลิตน้ำตาลมะพร้าวสดเข้มข้น. การประชุมวิชาการหัวข้อ การพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตหนองคาย จังหวัดหนองคาย วันที่ 21-23 มกราคม 2553.
- [8] สมิต อินทร์ศิริพงษ์ ณ์ัฐ จันท์ครบ และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์. (2553). การออกแบบและสร้างเตาเผาถ่านไม้สำหรับหมักเบ้าประจำบ้าน. การประชุมวิชาการหัวข้อการพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตหนองคาย จังหวัดหนองคาย วันที่ 21-23 มกราคม 2553.

- [9] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และณัฐ จันท์ครบ (2553) การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากมันสำปะหลังเปียกเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โรงแรมฮอเลียอินน์ รีสอร์ท ภูเก็ต บีช ซะอำ จังหวัดเพชรบุรี วันที่ 5-7 พฤษภาคม 2553
- [10] สมิต อินทร์ศิริพงษ์ เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และณัฐ จันท์ครบ (2553) การผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาถ่านแบบเคลื่อนที่ได้ การประชุมทางวิชาการ ประจำปี 2553 มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 26-27 พฤษภาคม 2553
- [11] สมิต อินทร์ศิริพงษ์ และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานจากคลื่นทะเลขนาดเล็ก งานประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 20 ประจำปี 2553 โรงแรม เจ บี หาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา วันที่ 16-18 กันยายน 2553
- [12] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ ไชยยันต์ ทองสองยอด และณัฐ จันท์ครบ ศักยภาพของเชื้อเพลิงกากมันสำปะหลังอัดแท่งในเชิงการให้กำเนิดแก๊สสำหรับผลิตไฟฟ้า งานประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 20 ประจำปี 2553 โรงแรม เจ บี หาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา วันที่ 16-18 กันยายน 2553
- [13] ณัฐ จันท์ครบ เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และสมิต อินทร์ศิริพงษ์ การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลแห้งสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์จากกากมันสำปะหลังเปียก การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี วันที่ 13-15 ตุลาคม 2553
- [14] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และไชยยันต์ ทองสองยอด การจัดการพลังงานสำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นทะเล ประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33) ประจำปี 2553 โรงแรม เซ็นทารา ดวงตะวัน จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 1-3 ธันวาคม 2553
- [15] Ekburanawat J., Thongsongyod C., Energy Management Systems for a Handmade Permanent Magnet Generator, The 5th International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket, Thailand, May 2-3, 2011
- [16] สมิต อินทร์ศิริพงษ์ เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล ต้นแบบระบบการผลิตน้ำเชื่อมจากอ้อยแบบเคลื่อนที่สำหรับเกษตรกรรายย่อย การประชุมวิชาการเครือข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554” โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี วันที่ 20-21 ตุลาคม พ.ศ. 2554
- [17] เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และไชยยันต์ ทองสองยอด การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรแบบหล่อด้วยเรซินในเชิงการใช้งานเป็นกักหนัลดผลิตไฟฟ้า การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 โรงแรมชลจันทร์ พัทยา รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี 14-16 ธันวาคม 2554

- [18] พีรวัจน์ มีสุข ครอบยศ โพธิชัย และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ “การจำลองผลสนามแม่เหล็กที่มีผลต่ออุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 27-29 มีนาคม 2556
- [19] อนุรักษ์ภัทร์ อินทร์ศิริพงษ์ ครอบศักดิ์ ภัทรนกก และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ “เครื่องพาสเจอร์ไรซ์น้ำผลไม้แบบกึ่งอัตโนมัติ” การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 12 - 14 พฤศจิกายน 2557
- [20] ทรงกษ เพ็ญวันศุกร์ จีรพงศ์ ทองสุข ชีรเมธ เปียขุนทด อำนาจ บัวบาน และเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ “การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน” การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 12 - 14 พฤศจิกายน 2557
- [21] เจตน์สฤกษ์ รัชกุลวิทยา ชีรศักดิ์ เชียงจุง วิริยะนนท์ คุ่มศิริวงศ์ เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และพีรวัจน์ มีสุข “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีผลมาจากช่องว่างอากาศ” การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 12 - 14 พฤศจิกายน 2557