

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อเข้ากับระบบกริด
Power flow Analysis of Induction Generator for Grid Connected Systemภาณุพล ปิ่นรารยันท * , ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล¹¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
โทรศัพท์ 02-549-3425 โทรสาร 02-549-3422 E-mail: phanuphol1260@gmail.com , chatchai.s@en.rmutt.ac.th**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดต่อเข้ากับระบบกริด เพื่อใช้ในการทำหาค่าขนาดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตป้อนกลับคืนระบบจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดและทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า 6 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ในส่วนของสเตเตอร์ โรเตอร์ และ แกนเหล็ก มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะนำมาทำการจำลองเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ จากผลการเปรียบเทียบพบว่าผลการจำลองของแบบที่นำเสนอและการทดสอบได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการจำลองจะนำไปช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้ขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เหมาะสมมาทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อเข้ากับระบบกริด

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ระบบกริด การไหลของกำลังไฟฟ้า**Abstract**

This paper presents a power flow model of induction generator for grid connected system. In order to determine the electrical power of induction generator that is fed back into the grid connected system. Parameters of a 3 phase 6 poles squirrel cage induction motor with rated power of 1 Hp in which obtain from stator, rotor and iron-core were used in characteristic analyzing then employed to establish a mathematical model of the induction generator. The simulation results from the proposed model are compared to the results of the testing set in the laboratory. As the experimental results, it is found that the model simulation provided power flow results almost the same as the testing set. Therefore, the model can be used to support for selecting of induction generator sizing for grid connected system.

Keywords: induction generator, grid connected system, power flow**1. บทนำ**

ปัจจุบันแหล่งผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก VSPP ที่กำลังการผลิตไม่เกิน 10 MW ที่ใช้เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพเป็นต้นกำลัง เริ่มมีการนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel cage induction motor; SCIM) มาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Machine; SMC) อย่างแพร่หลายมากขึ้นโดยเฉพาะในเขตจังหวัดราชบุรีและนครปฐม ที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เป็นจำนวนมากจากฟาร์มเลี้ยงหมู เนื่องจากมีราคาถูก การบำรุงรักษาน้อย และการต่อเชื่อมเข้ากับระบบกริดไม่ยุ่งยาก

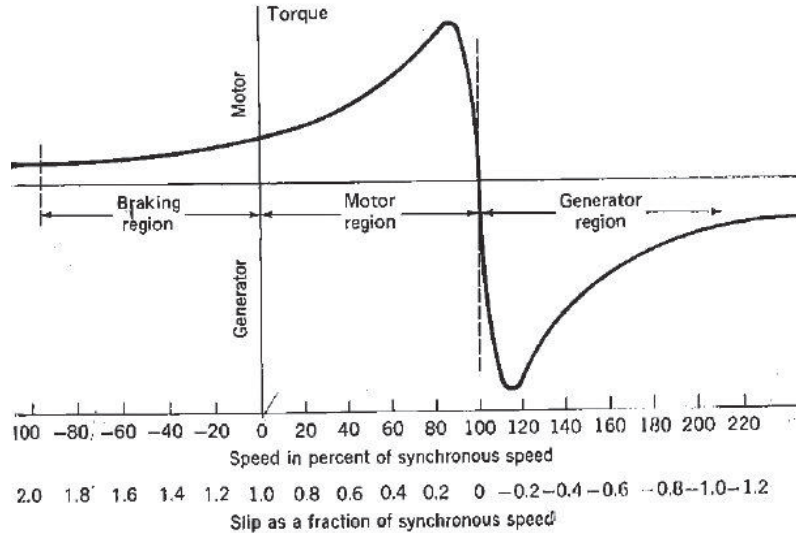
ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ สามารถทำได้สองวิธี คือ ระบบที่จ่ายโหลดจากเครื่องกำเนิดเอง (Stand alone) และระบบต่อเชื่อมเข้ากับระบบไฟฟ้าหลักหรือระบบกริด (Grid connected) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมีข้อดี คือไม่ต้องใช้ ไฟฟ้ากระแสตรงในการกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ราคาถูกเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (SMC) ที่ขนาดพิกัดเท่ากัน ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ มีโครงสร้างที่แข็งแรง [1] และสามารถต่อเชื่อมเข้ากับระบบกริดไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องทำการซิงโครไนซ์ จึงเป็นเรื่องง่ายต่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าหลัก เมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ที่ต้องซิงโครไนซ์เข้ากับระบบกริดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ยังจำเป็นต้องได้รับกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ [2-4] และในประเทศไทย [5-7] จะวิจัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำระบบที่จ่ายโหลดจากเครื่องกำเนิดเองหรือแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้คาปาซิเตอร์มาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำระบบนี้จะควบคุมแรงดันไฟฟ้า และความถี่ที่ขั้วแม่เหล็กให้คงที่ได้ยาก เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง [8] จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาวิจัยการนำระบบต่อเชื่อมเข้ากับระบบกริด

บทความนี้นำเสนอการนำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบต่อเชื่อมเข้ากับระบบกริดไฟฟ้า ข้อดีของเครื่องกำเนิดระบบนี้ คือไม่ต้องใช้คาปาซิเตอร์มาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิด แต่เครื่องกำเนิดจะได้รับกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟจากระบบกริดไฟฟ้าที่ต่อเชื่อมอยู่ ผลทำให้แรงดันไฟฟ้า และความถี่ ที่ขั้วแม่เหล็กคงที่ตลอดเวลา อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบกริดไม่มีผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้ โดยหัวข้อที่ 2 อธิบายถึงหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อเข้ากับระบบกริด หัวข้อที่ 3 อธิบายการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หัวข้อที่ 4 นำเสนอแบบจำลองและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า หัวข้อที่ 5 แสดงการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง สรุปและเสนอแนะในหัวข้อที่ 6

2. หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อเข้ากับระบบกริด

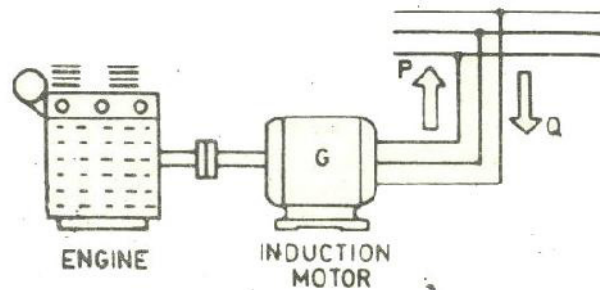
2.1 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก จะทำงานเป็นมอเตอร์ในช่วงที่ความเร็วรอบของโรเตอร์มีค่าน้อยกว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุน ค่าสลิปจะเป็นบวก ในทางกลับกันถ้าความเร็วรอบของโรเตอร์มีค่ามากกว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนทำให้ ค่าสลิปเป็นลบ มอเตอร์จะทำตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยกระแสไหลกลับออกจากตัวมอเตอร์ เป็นการจ่ายกำลังไฟฟ้ากลับ

ออกมา ดังแสดงในรูปที่ 1 จากพฤติกรรมดังกล่าวจะเห็นว่า ถ้าสามารถควบคุมค่าสลิป (Slip) ของมอเตอร์ให้เป็นลบ มอเตอร์จะทำตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 1 พฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [1]

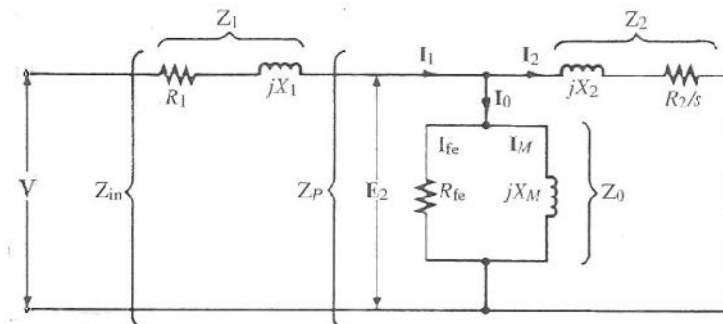
2.2 กระบวนการสร้างกำลังไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบกริด กระบวนการสร้างกำลังไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบกริดสามารถทำได้ โดยการใช้เครื่องยนต์ต้นกำลังมาขับเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์มากกว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์หรือความเร็วซิงโครนัส คือทำให้สลิปเป็นลบ เมื่อต่อเข้าสู่ระบบกริด มอเตอร์ได้รับกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ (ค่า Q) จากระบบ และผลิตกระแสไหลย้อนกลับเข้าสู่ระบบกริด จึงทำให้ทิศทางของกำลังไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีค่าสลิปเป็นลบ

3. การหาพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีความจำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการจำลองการไหลกลับของกำลังไฟฟ้า จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าเพื่อใช้งาน ซึ่งได้แก่ 1. ค่าความต้านทานของขดลวดที่สเตเตอร์ (R_1) 2. ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ (R_2) 3. ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ (X_1) 4. ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ (X_2) 5. ค่าแมกนีไทซ์จิ่งรีแอกแตนซ์ (X_m) 6. ค่าสลิป (s) และ 7. ค่าความต้านทานแทนการสูญเสียที่แกนเหล็ก (R_{fe}) ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถหาได้ โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยการทำการทดสอบ i) DC Volt-Amp test ii) Blocked Rotor test และ iii) No-load test



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [9]

4. แบบจำลองและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

4.1 การหาขนาดและทิศทางของกำลังไฟฟ้า

จากวงจรสมมูล สามารถหาความต้านทานในส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

Z_0 คือค่าอิมพีแดนซ์ ในส่วนแทนการสูญเสียของแกนเหล็ก (Magnetization branch impedance) หาได้จากสมการที่ (1)

$$Z_0 = \frac{(R_{fe} \times jX_m)}{(R_{fe} + jX_m)} \quad (1)$$

Z_1 คือค่าอิมพีแดนซ์ ในส่วนของขดลวดที่สเตเตอร์ (Stator impedance) หาได้จากสมการที่ (2)

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (2)$$

Z_2 คือค่าอิมพีแดนซ์ ในส่วนของโรเตอร์ (Rotor impedance) หาได้จากสมการที่ (3)

$$Z_2 = \frac{R_2}{S} + jX_2 \quad (3)$$

Z_p คือผลรวมของอิมพีแดนซ์ในส่วนแกนเหล็กกับในส่วนของโรเตอร์ หาได้จาก สมการ (1)+(3) .. (4)

Z_{in} คือค่าอิมพีแดนซ์รวมของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Total impedance of machine) หาได้จากสมการ (2)+(4) (5)

และจากวงจรสมมูลสามารถหาขนาดและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ได้จากสมการ (6) และ (7)

$$P = S * \cos\theta \quad (6)$$

$$S = 3VI_1^* \quad (7)$$

$$I_1 = \frac{V}{Z_{in}} \quad (8)$$

P คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Active power) มีหน่วยเป็น วัตต์ (W)

S คือ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Appearance power) มีหน่วยเป็น โวลต์-แอมป์ (VA)

V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Voltage/phase) มีหน่วยเป็น โวลท์ (V)

I_1 คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Current/phase) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

หมายเหตุ: P เป็นลบ (-) หมายถึงกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลเข้าระบบกริด

4.2 การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากทดสอบด้วยวิธีการที่กล่าวมาแล้ว จะถูกนำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวงจรสมมูล เพื่อที่จะทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ในขณะที่มีพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิด โดยสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้จากสมการ (1)-(9) [10]

ขั้นตอนการคำนวณ หาค่าสลิปจากสมการ (3)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (9)$$

$$Z_0 = \frac{(R_{fe} \times jX_m)}{(R_{fe} + jX_m)}; Z_p = \frac{(Z_0 \times Z_2)}{(Z_0 + Z_2)}$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \text{ และ } Z_{in} = Z_1 + Z_p$$

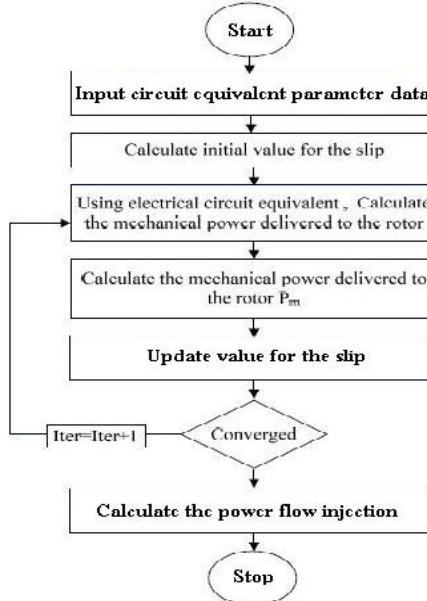
$$\therefore I_1 = \frac{V}{Z_m}$$

แทนค่า I_1 ลงในสมการที่ (7)

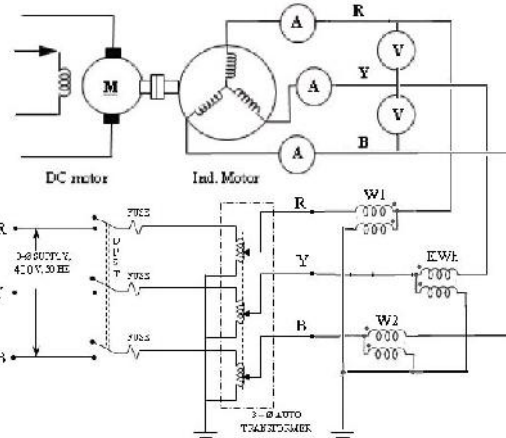
$$S = 3VI_1^*$$

จากสมการ (1)-(9) นำมาสร้างแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้าระบบกริด โดยมีขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 เป็นชุดทดลองที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการ

ทดสอบจริงกับผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งประกอบไปด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6 ขั้วแม่เหล็กขนาด 1 แรงม้า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้เป็นตัวกำลังแทนเครื่องยนต์ ชุดควบคุมการจ่ายไฟสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5 ชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าและวงจรการต่อ

5. การทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

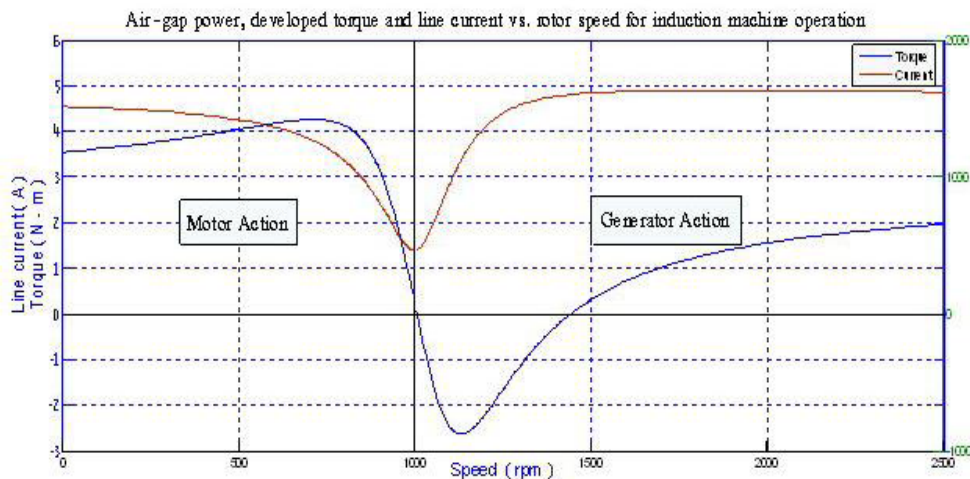
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกรงกระรอก ที่นำมาใช้ทดสอบ มีขนาดพิกัด แรงดัน 380 โวลต์ กระแส 2.20 แอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ 6 ขั้วแม่เหล็ก 1 แรงม้า ต่อแบบสตาร์ โดยทำการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าในฟังก์ชันมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ทดสอบในฟังก์ชันลอสต์ ที่ความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส และทดสอบในฟังก์ชันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูล ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_1 (Ω)	X_2 (Ω)	R_{fe} (Ω)	X_m (Ω)
6	13.13	8.225	23.86	23.86	11377.01	133.12

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับชุดทดลองที่สร้างขึ้น

Slip (%)	Rotor Speed (rpm)	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์		ชุดทดลองจริงที่สร้างขึ้น	
		I ₁ (A)	Output (W)	I ₁ (A)	Output (W)
-1.00	1010	1.434	-38.424	1.45	-38.00
-1.50	1015	1.469	-100.196	1.47	-96.00
-2.00	1020	1.516	-161.278	1.57	-160.00
-2.50	1025	1.570	-221.373	1.60	-210.00
-3.00	1030	1.630	-280.187	1.65	-277.00
-3.50	1035	1.708	-337.433	1.76	-336.00
-4.00	1040	1.780	-392.836	-	-
-4.50	1045	1.870	-446.135	-	-
-5.00	1050	1.958	-497.090	-	-



รูปที่ 6 ผลการจำลองจากแบบจำลองที่นำเสนอ

จากการทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยการทดลองจริงด้วยชุดทดลองที่สร้างขึ้นมา และจากการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยนำผลการทดสอบในทั้งสามพฤติกรรมมาเปรียบเทียบกัน ผลของการเปรียบเทียบ ทั้งชุดทดลองจริง และโมเดลทางคณิตศาสตร์ ให้ผลลัพธ์ตรงกัน มีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน

พฤติกรรมมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส จากวงจรรูปที่ 5 ใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า(W1,W2)และ เครื่องวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (KWh) แบบจานหมุน ตรวจสอบทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า โดย เครื่องวัด W1 ตรวจสอบทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไหลกลับเข้าสู่กริด เครื่องวัด W2 ตรวจสอบทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากกริดไหลเข้าเครื่องกำเนิด เครื่องวัด KWh ตรวจสอบทิศทางการไหลทั้งสองทิศทาง โดยต่อขั้วมีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าอ้างอิง W2 ผลการทดลองในฟังก์ชันมอเตอร์กำลังไฟฟ้าไหลจากกริดเข้าสู่เครื่องกำเนิด โดย เครื่องวัด KWh มีทิศการหมุนไปในทิศทางเดียวกันกับเครื่องวัด W2 ส่วนเครื่องวัด W1จะมีทิศตรงกันข้าม

พฤติกรรมของมอเตอร์ในกรณีโรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส เมื่อปรับความเร็วต้นกำลังให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น เท่ากับความเร็วจิงโครนัส เครื่องวัด W1 และ W2 จะชี้ที่ตำแหน่งศูนย์ เครื่องวัด KWh จะหยุดนิ่งอยู่กับที่ สภาวะนี้จะมีกำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ลดลงเหลือกระแสสร้างสนามแม่เหล็กเท่านั้น

พฤติกรรมของมอเตอร์ในกรณีอยู่ในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการเพิ่มความเร็วต้นกำลังให้โรเตอร์มีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส สภาวะนี้กำลังไฟฟ้าจะไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลับเข้าสู่ระบบกริด โดยเครื่องวัด KWh จะหมุนกลับทิศทาง เครื่องวัดW1 จะแสดงขนาดค่ากำลังไฟฟ้าไหลกลับ เครื่องวัด W2 มีทิศทางเหมือน KWh

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสามารถจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อเข้าระบบกริดที่สร้างขึ้นมา มีถูกต้องและมีความแม่นยำ สามารถนำไปช่วยในการตัดสินใจเลือกขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำแบบต่อเข้าระบบกริด

อย่างไรก็ตามในการทำวิจัยยังมีข้อจำกัดในการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาขับ ซึ่งยังไม่ถึงพิกัดสูงสุด แต่ผลที่ได้ในพิกัดที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถขับได้มีความถูกต้อง ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลอง



7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kulandhavelu, S.; Ray, K. K.; Jyothi, P.; Jayachitra, S.; Rao, V.N., "Experimental evaluation of capacitance value; to self-excite the induction motor operating as generator in wind energy conversion," *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International*
- [2] Barrado, J.A.; Grino, R.; Valderrama, H.; , "Standalone Self-Excited Induction Generator with a Three-Phase Four-Wire Active Filter and Energy Storage System," *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.600-605, 4-7 June 2007
- [3] Alghuwainem, S.M. , "Steady-state analysis of an isolated self-excited induction generator supplying an induction motor load," *Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99*, vol., no., pp.351-353, May 1999
- [4] Al-Saffar, M.A.; Eui-Cheol Nho; Lipo, T.A.; , "Controlled shunt capacitor self-excited induction generator," *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE* , vol.2, no., pp.1486-1490 vol.2, 12-15 Oct. 1998
- [5] วุฒิชัย รอดพุ่ม และคณะ “ค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตนเอง” งานประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒและมหาวิทยาลัยศรี ปทุมหน้าที่ 343-346
- [6] ยุทธนา ขำสุวรรณ และคณะ “การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง” งานประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และมหาวิทยาลัยศรีปทุม หน้าที่ 173-176
- [7] ประสิทธิ์ภาพ ปัญญานันท์ และคณะ. “การศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้ ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาน” งานประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หน้าที่ 585-588
- [8] Ouazenne, L.; McPherson, G., "Analysis of the Isolated Induction Generator," *Power Engineering Review, IEEE* , vol.PER-3, no.8, pp.59,59, Aug. 1983
- [9] Cathey.Jimmie J.Electrical machines analysis and design applying Matlab Internation ed.2001
- [10] Hubert,CharlesL.ElectricalMacminesTheory,Operation,Applications,Adjustment,and Control 2nd ed. New Jersey: 2002.