

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอัตราเร็วรอบต่ำด้วยแม่เหล็กแรงสูง,

NdFeB N35

Development of Low-Speed Synchronous Generator with Permanent Magnet,

NdFeB N35

กานต์ธิดา บุญมา^{1*} และชัยนุสนธ์ เกษตรพงศ์ศาล²

Kantida Boonma^{1*} and Chainuson Kasagepongsarn²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามเฟสอัตราเร็วรอบต่ำด้วยแม่เหล็กถาวรความหนาแน่นแรงสูง NdFeB, N35 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจรที่อัตราเร็วซิงโครนัส 300 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบนิวตรอนมีค่าเฉลี่ย 531.47 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าเฟสเทียบเฟสค่าเฉลี่ย 921.00 โวลต์ สัญญาณคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่น ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ แรงดึงแม่เหล็กขณะเริ่มหมุนมีค่าสูงสุด 12.40 นิวตันเมตร มีค่าแรงบิดสูงสุด 468.40 นิวตัน-เมตร เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุด 6.62 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร้อยละ 72.00 ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากงานวิจัยนี้สามารถเป็นต้นกำลังในการผลิตไฟฟ้าจากระบบพลังงานลมและพลังงานน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แม่เหล็กแรงสูง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอัตราเร็วรอบต่ำ

Abstract

The objective of this research is to develop the low-speed 3 phases synchronous generator with high force density permanent magnet, NdFeB N35 (PMSG). The results indicate that open circuit characteristics (O.C.C.) at a synchronous speed of 300 rpm, average voltage based on line phase to neutral of 531.47 V and line phase to line phase voltage of 921.00 V. Sinusoidal full wave with a frequency of 50.00 Hz are revealed the maximum cogging torque is 12.40 Nm and maximum torque is 468.40 Nm. The maximum power of generator is 6.26 kW and efficiency of 72.00 %. The result shows that low-speed synchronous generator with permanent magnet, NdFeB N35 can be wind power wind turbines or hydropower plants with high efficiency.

Keywords: Permanent Magnet (PM), Synchronous Generator (SG), Low-Speed Synchronous Generator (LSSG)

บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า มีส่วนประกอบหลัก คือสเตเตอร์ (Stator) และโรเตอร์ (Rotor) ส่วนของสเตเตอร์คือส่วนที่ยึดกับโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีชุดขดลวดเพื่อรับการเหนี่ยวนำ

¹ อ., สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี 84100

² อ., หน่วยวิจัยพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน (REERCU) มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี 84100

¹ Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Surat thani Rajabhat University, 84100

² Lecturer, Renewable Energy and Environmental Research for Local Community Unit (REERCU) ม. Surat thani Rajabhat University, 84100

* Corresponding author: E-mail address: kantida.sangrieng@gmail.com

จากเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า ส่วนของโรเตอร์คือส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กและหมุนอยู่
แกนกลางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยรับแรงบิดหรือพลังงานกลผ่านแกนเหล็กที่เชื่อมต่อกับต้นกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เชิงโรตอร์สแบบแม่เหล็กถาวร (PMSG) เป็นอุปกรณ์หลักในการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบพลังงานทดแทน (Renewable
Energy) เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีบทบาทสำคัญในระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจนถึงระดับปานกลาง [1-3]
มีคุณสมบัติเด่นคือ มีประสิทธิภาพสูง ขณะทำงานไม่ส่งเสียงดัง อายุการใช้งานยาวนาน การบำรุงรักษาน้อย สร้างได้ง่าย
ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการสร้างสนาม มีขนาดเล็กแต่สามารถจ่ายพลังงานได้สูง [4-5]
มีข้อได้เปรียบด้านราคาเนื่องจากสามารถชดเชยชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้น้อยลง [6] แต่มีข้อเสีย
คือมีสนามแม่เหล็กปรากฏขึ้นตลอดเวลาทั้งในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานหรือไม่ทำงาน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรเนื่องจากมีค่าแรงดึงแม่เหล็กขณะเริ่มหมุน (Cogging Torque) ตลอดเวลาโดยเฉพาะ
อย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้กับเทคโนโลยีกังหันลม [7] ดังนั้นในการดึงพลังงานจากแหล่งพลังงานลมให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะ
เป็นไปได้ และเพื่อลดระยะเวลาต้นทุน ปัจจัยที่สำคัญคือกังหันต้องมีความสามารถเริ่มต้นทำงาน (Cut in Wind Speed)
ได้ในความเร็วลมต่ำ ส่งมอบให้ค่าแรงดึงแม่เหล็กขณะเริ่มหมุนต้องมีค่าต่ำไปด้วย ในปี พ.ศ. 2554 Maia ใช้ซอฟต์แวร์
Finite Element Method (FEM) วิเคราะห์ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรสำหรับกังหันลมขนาด 10 กิโลวัตต์
อัตราเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สแบบแม่เหล็กถาวรสามารถให้
กำลังการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูง โดยขึ้นอยู่กับจำนวนสลอต/ขั้ว/เฟส รูปร่างของแม่เหล็ก ช่องการปิด-เปิดสลอต โรเตอร์ และ
สเตเตอร์ [8] และ Erikson อธิบายว่าจำนวนขดลวด สลอตต่อขั้ว มีความเหมาะสมที่อัตราส่วน 5/4 สามารถลดแรงดึงแม่เหล็ก
ขณะเริ่มหมุนได้ดี และสามารถลดฮาร์มอนิกที่ 3 ได้มากกว่าร้อยละ 5.8 ในสถานะไม่มีโหลด [9] และการบิดของสลอตที่
สเตเตอร์สามารถลดแรงดึงแม่เหล็กขณะเริ่มหมุนซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ
สูงขึ้นในการเริ่มทำงาน [10]

ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของบทความวิจัยนี้คือ การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สแบบแม่เหล็กแรงสูงที่
สามารถทำงานในอัตราเร็วรอบการหมุน 300 รอบต่อนาที ลดแรงดึงแม่เหล็กขณะเริ่มหมุน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ
ผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานลม ตามแผนปฏิบัติการพัฒนาพลังงานลม (Wind Energy Action Plan) [11] เพื่อผลิต
ภายในประเทศ ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูง ตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจ
พอเพียงในการจัดการพลังงาน โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งพลังงานที่เหมาะสมในท้องถิ่นหรือ
ภายในประเทศให้สามารถผลิตและใช้งานได้ดียิ่งขึ้น [12]

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สอัตราเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กแรงสูง

1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นปริมาณโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ใน
วงจรมันแสดงดังสมการที่ (1)

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

เครื่องหมายลบ (-) เกิดจากกฎของเลนส์ (Lenz's Law) ซึ่งแสดงทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น
กับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ในกรณีขดลวดมีจำนวน N รอบ สามารถเขียนสมการ (1) ได้ดังนี้

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2)$$

และฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่ A ทำมุม 0 องศา มีค่าเท่ากับ $\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ เนื่องจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กมีส่วนประกอบคือสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ และพื้นที่ A ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของปริมาณใดๆ ปริมาณหนึ่งย่อมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กด้วย ดังนั้นกรณีของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแต่ขนาดตัวนำคงที่สมการที่ (2) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

(3)

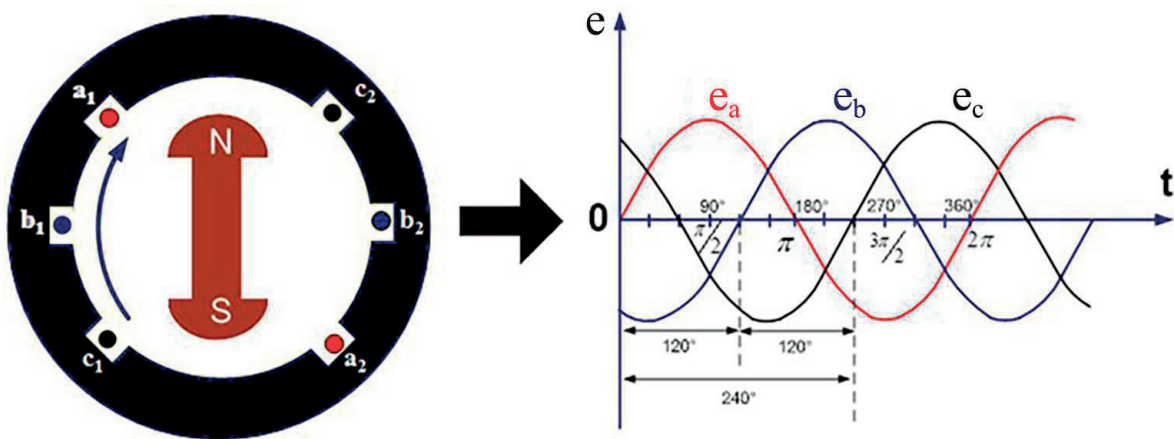
1.2 การเกิดรูปคลื่นไซน์

การเกิดรูปคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขดลวดตัวนำขณะหมุนตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก กรณีขดลวดตัวนำตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดและจะมีค่าน้อยลง เมื่อขดลวดตัวนำตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กในมุมน้อยกว่า 90 องศา และจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อขดลวดตัวนำวางขนานกับเส้นแรงแม่เหล็ก แสดงดังภาพที่ 1 และสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสแสดงดังสมการที่ (4)-(6)

$$e_a = E \sin \omega t \quad (4)$$

$$e_b = E \sin(\omega t + 240^\circ) \quad (5)$$

$$e_c = E \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (6)$$



ภาพที่ 1 การเกิดรูปคลื่นไซน์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

1.3 อัตราเร็วเชิงโรตอร์

จำนวนขั้วแม่เหล็กและอัตราเร็วรอบของโรเตอร์จะมีผลต่อค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) กำหนดให้ P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก θ_e เป็นมุมทางไฟฟ้าและ θ_m เป็นมุมทางกลที่มีการเปลี่ยนแปลงในหน่วยของเรเดียนต่ออนาที แสดงดังสมการที่ (8)

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (7)$$

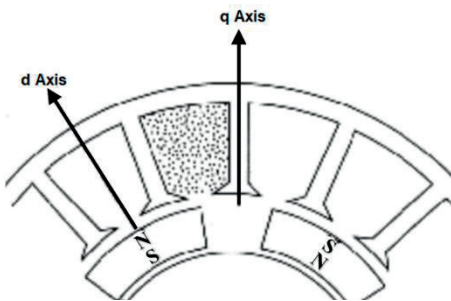
$$\frac{\theta_e}{2\pi \times 60} = \frac{P}{2} \cdot \frac{\theta_m}{2\pi \times 60} \quad (8)$$

เมื่อ $\theta_e/2\pi \times 60$ คือ ความถี่ (f) และ $\theta_m/2\pi$ คือ อัตราเร็วอัตราเร็วเชิงโรนัสต์ (N_s) ดังสมการที่ (9) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วเชิงโรนัสต์ สามารถกำหนดได้โดยค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็ก [13]

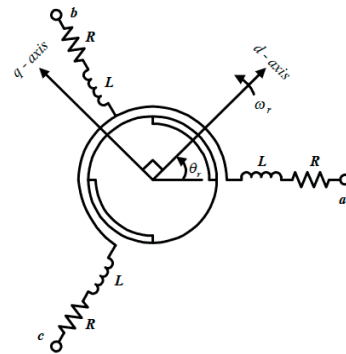
$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (9)$$

1.4 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสต์อัตราเร็วรอบต่ำด้วยแม่เหล็กแรงสูง, NdFeB N35

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะโรเตอร์แบบทรงกระบอก (Non-Salient Pole) แบบแม่เหล็กแรงสูง (NdFeB N35) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสต์อัตราเร็วรอบต่ำ และภาพที่ 3 แสดงวงจรสมมูลย์ที่จุดต่อเฟส a, b และ c จะมีความต้านทานต่อเฟสของขดลวดสเตเตอร์ (R) อนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำตัวเองต่อเฟสด้านสเตเตอร์ (L) โดยเทียบกับแกนของการอ้างอิงโรเตอร์ d Axis คือแกนอ้างอิงที่ตรงกับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (Direct Axis) และ q Axis คือแกนอ้างอิงที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (Quadrature Axis) ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_r) ในตำแหน่งเชิงมุม (θ_r)



ภาพที่ 2 ลักษณะของโรเตอร์แบบทรงกระบอก



ภาพที่ 3 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสต์อัตราเร็วรอบต่ำแม่เหล็กถาวรเทียบกับแกนอ้างอิงของโรเตอร์

จากวงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสต์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามเฟส (U_{abc}) ที่มีกระแสไฟฟ้าต่อเฟสของสเตเตอร์ (i_{abc}) แสดงดังสมการที่ (10)

$$U_{abc} = R i_{abc} + \frac{d}{dt} (L i_{abc} + \lambda_m(\theta)) \quad (10)$$

โดยที่ $d\lambda_m(\theta)/dt$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back e.m.f.) ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเดิมของขดลวด เนื่องจากการหมุนของขดลวดส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดขณะหมุนมีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่หมุน แสดงดังสมการที่ (11)

$$\frac{d\lambda_m(\theta)}{dt} = -\omega_r \lambda_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (11)$$

เมื่อแทนสมการที่ (10) ใน สมการที่ (11) ได้

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R i_a + L \frac{d}{dt} i_a - \lambda_m \omega_r \sin \theta_r \\ U_b &= R i_b + L \frac{d}{dt} i_b - \lambda_m \omega_r \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ U_c &= R i_c + L \frac{d}{dt} i_c - \lambda_m \omega_r \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

การพิจารณาสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (AC Generator) เพื่อสะดวกในการคำนวณจึงพิจารณาให้อยู่ในรูปสมการของสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระแสตรง (DC Generator) โดยการแปลงค่าปริมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองเฟส (U_{qd}) บนแกนอ้างอิง ดี-คิว (q-d axis) โดยกำหนดให้เป็นแกนที่อยู่กับที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_r) แสดงดังสมการที่ (13)

$$U_{qd} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} U_{abc} \quad (13)$$

จากสมการที่ (12) และ (13) สามารถนำมาเขียนเป็นสมการแรงดันไฟฟ้า U_d และ U_q ของแม่เหล็กแรงสูงได้ ซึ่ง แสดงดังสมการที่ (14) และสมการที่ (15) ตามลำดับ โดยที่ $\lambda_d = -L_d i_d + \lambda_M$ และ $\lambda_q = -L_q i_q$

$$U_d = -R i_d - \omega_r \lambda_q + \frac{d\lambda_d}{dt} \quad (14)$$

$$U_q = -R i_q + \omega_r \lambda_d + \frac{d\lambda_q}{dt} \quad (15)$$

ผลของแรงบิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Interior PMSG) เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็กเนื่องจากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force :MMF) บริเวณช่องอากาศของขดลวดสเตเตอร์และ โรเตอร์จะถูกกำหนดโดยสมการที่ (16)

$$\begin{aligned} T_e &= -\frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \\ T_e &= -\frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) [\lambda_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{aligned} \quad (16)$$

ซึ่งถูกกำหนดโดยค่าประกอบของ แรงบิดของโหลด (T_m) โมเมนต์ความเฉื่อย (J) ความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์ (ω_m) และ สัมประสิทธิ์ความหน่วง (B) ดังนั้นแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอัตราเร็วของโรเตอร์มีความสัมพันธ์กันแสดงดังสมการที่ (17)

$$T_e = T_m - J \frac{d\omega_m}{dt} - B\omega_m \quad (17)$$

แรงดันเหนี่ยวนำต่อเฟสแสดงดังสมการที่ (18)

$$E_{rms} = 4.44 f N_{ph} \cdot k_w \frac{\Phi_r}{1 + k_r \frac{\mu_r}{P_c}} \quad (18)$$

การพันขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบกระจายดังนั้นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce EMF) ต้องคูณด้วยค่าแฟกเตอร์การพันขดลวด (k_w) สมการที่ (19) ซึ่งประกอบด้วยค่าแฟกเตอร์การพันกระจายขดลวด (k_d) สมการที่ (20) และพิทซ์แฟกเตอร์ (k_p) สมการที่ (21)

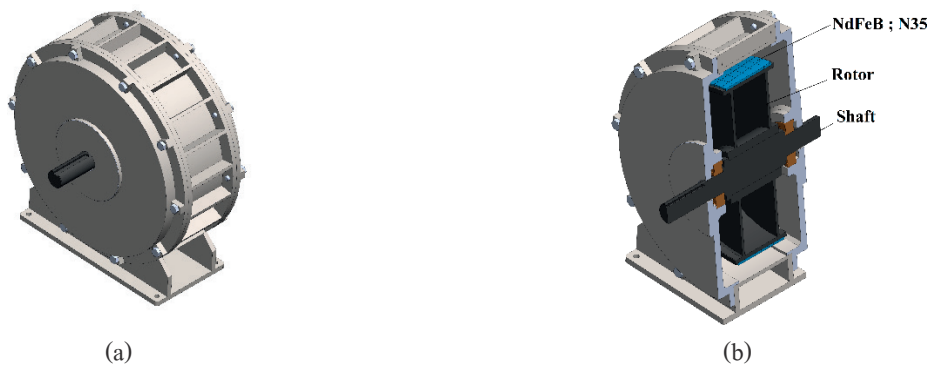
$$k_w = k_d k_p \quad (19)$$

$$k_d = \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) / g \sin\left(\frac{\sigma}{2g}\right) \quad (20)$$

$$k_p = \cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \quad (21)$$

2. โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสอัตราเร็วรอบ

โครงสร้างที่นำเสนอในบทความนี้ ประกอบด้วยโครงสร้างภายนอกโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนรองรับส่วนประกอบอื่นๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำด้วยเหล็กหล่อมีครีบสำหรับระบายความร้อน รูปร่างและโครงสร้างภายนอกแสดงดังภาพที่ 3(a) โครงสร้างภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย สเตเตอร์ที่มีร่องสลิตจำนวน 60 ร่อง และโรเตอร์ที่มีขั้วแม่เหล็กแบบแม่เหล็กแรงสูง (NdFeB ; N35) รูปร่างและโครงสร้างภายในแสดงดังภาพที่ 3(b)

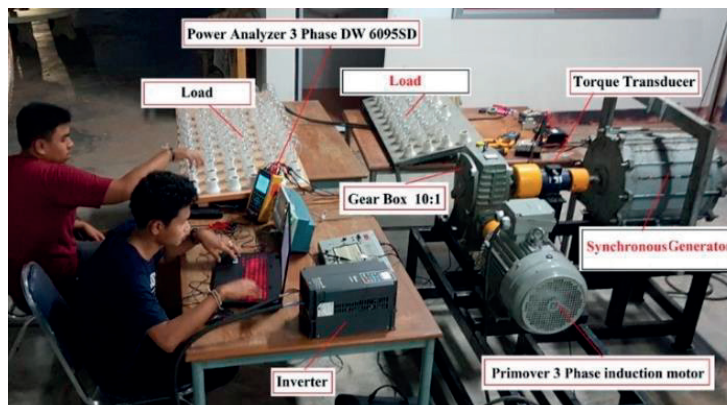


ภาพที่ 3 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสอัตราเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กแรงสูง

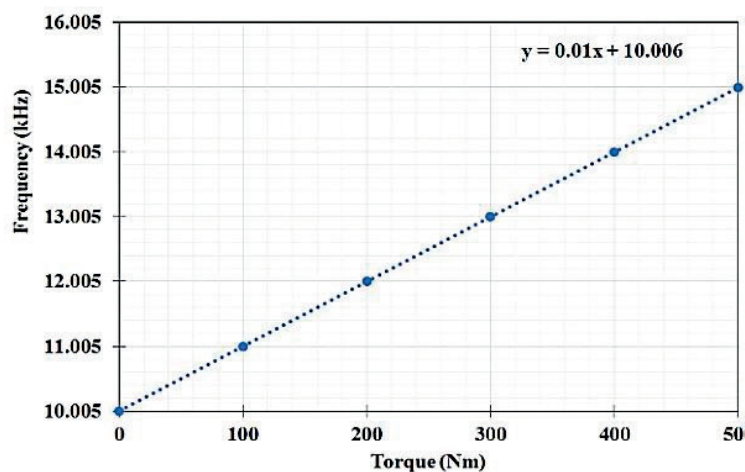
3. การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสอัตราเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กแรงสูง

ภาพที่ 4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบจริง โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 10 กิโลวัตต์ ต่อร่วมกับกล่องเกียร์ที่มีอัตราทดรอบเท่ากับ 10:1 การหมุนของมอเตอร์ต้นกำลังถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ตั้งแต่อัตราเร็วรอบ 100-350 รอบต่อนาที เพื่อทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยระหว่างกล่องเกียร์ลดทอนและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ติดตั้งเครื่องวัดแรงบิด Torque Transducer ขนาด 500 นิวตันเมตร โดยสามารถสอบเทียบค่าแรงบิดด้วยค่าความถี่ผ่านออสซิลโลสโคปโดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่เป็นฟังก์ชันกับแรงบิด แสดงดังภาพที่ 5 การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าและการทดสอบคุณลักษณะแรงดันในแต่ละเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่อง Power Analyzer DW-6095 โดยใช้คลิปแอมป์ Cp1201 คล้องสายไฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเฟส และส่งผ่านการ

เชื่อมต่อข้อมูลสัญญาณพอร์ท (USB) กับคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าในขณะเปิดวงจร (OCC Curve) และในขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่อัตราเร็วรอบต่างๆ



ภาพที่ 4 ระบบจริงที่ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 5 กราฟความถี่เป็นฟังก์ชันกับแรงบิดเพลลาที่โรเตอร์

ผลการทดลอง

1. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสถรรวรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวร

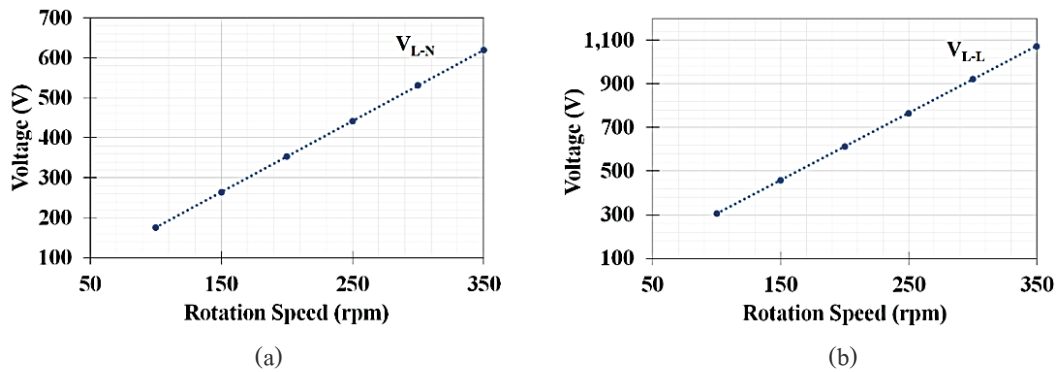
ผลการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสถรรวรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวร สำหรับทั้งหั่นขนาดเล็กรวมด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสถรรวรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวร

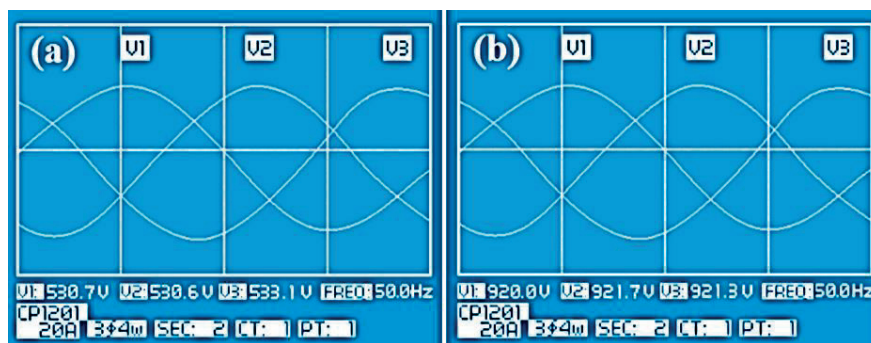
ลำดับ	ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
1	ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร
2	ขนาดของขดลวด	SWG#17
3	จำนวนเฟส	3 เฟส
4	จำนวนขั้วแม่เหล็ก	20 ขั้ว
5	จำนวนรอบของขดลวดต่อสล็อต	40 รอบ/สล็อต
6	จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟส	800 รอบ/เฟส
7	ความต้านทานขดลวดเฟส A	6.00 Ω/เฟส
8	ความต้านทานขดลวดเฟส B	6.00 Ω/เฟส
9	ความต้านทานขดลวดเฟส C	6.02 Ω/เฟส

2. การทดสอบแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณคลื่นไซน์ในขณะเปิดวงจร

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจรของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบนิวตรอน (V_{L-N}) ภาพที่ 6(a) และสามเฟสเทียบสามเฟส (V_{L-L}) ภาพที่ 6(b) แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าแปรผันอย่างเป็นเชิงเส้นกับอัตราเร็วรอบการหมุน สัญญาณคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส และสามเฟสเทียบนิวตรอน ที่อัตราเร็วเชิงโรตารี พบว่าได้สัญญาณคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่น (Full Wave) ภาพที่ 7(a) และสามเฟสเทียบสามเฟสภาพที่ 7(b)



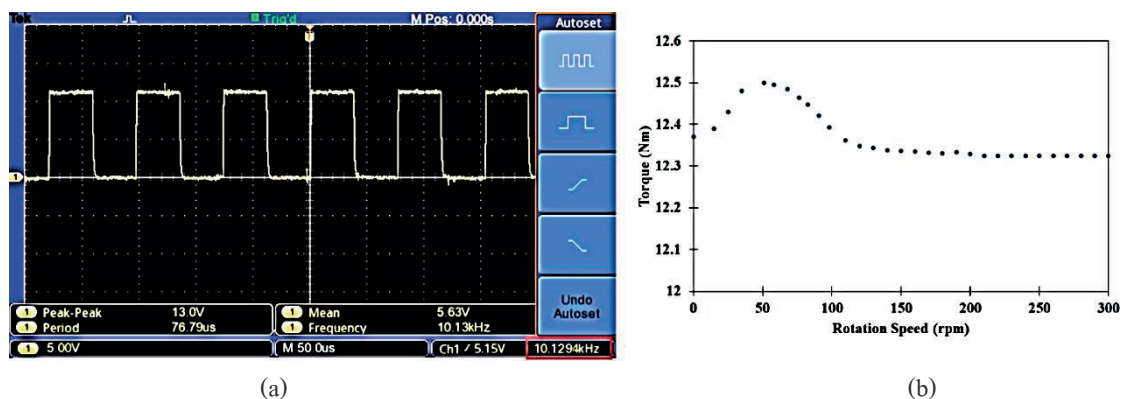
ภาพที่ 6 กราฟแรงดันไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับรอบการหมุน



ภาพที่ 7 สัญญาณคลื่นไซน์ในขณะเปิดวงจรของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ

3. การทดสอบแรงบิด และพลังงานไฟฟ้าที่อัตราเร็วรอบต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ

การทดสอบค่าแรงบิดแม่เหล็กขณะเริ่มหมุนที่มุมบิดร่องสล๊อต 20 องศา โดยการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนที่อัตราเร็วรอบตั้งแต่ 1-300 รอบต่อวินาที โดยใช้เครื่องวัดแรงบิด Torque Transducer วัดสอบเทียบค่าแรงบิดด้วยค่าความถี่ผ่านออสซิลโลสโคปมาคำนวณตามสมการความชันดังภาพที่ 5 พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าแรงบิดแม่เหล็กขณะเริ่มหมุนสูงสุดที่ค่าความถี่ 10.1294 กิโลเฮิร์ตซ์ ภาพที่ 8(a) มีค่าแรงบิดสูงสุด 12.4 นิวตันเมตร ภาพที่ 8(b)

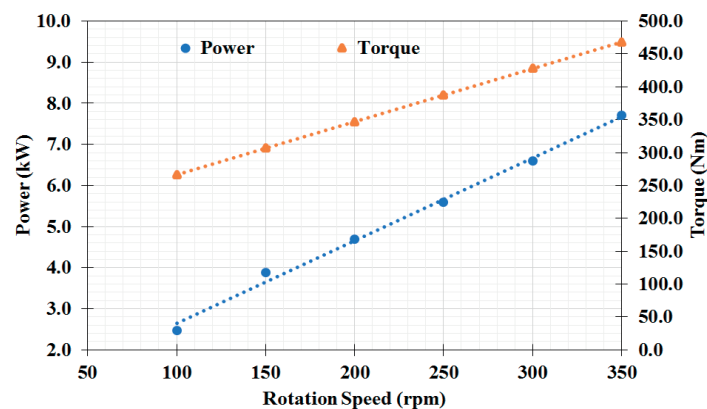


ภาพที่ 8 การสอบเทียบค่าแรงบิดด้วยค่าความถี่ผ่านออสซิลโลสโคป

ผลลัพธ์ของอัตรารอบ ความถี่ กำลังไฟฟ้า และแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำแสดงดังตารางที่ 2 และผลการทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่อัตรารอบต่างๆ เพื่อหาจุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุดแสดงดังภาพที่ 9 พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 6.62 กิโลวัตต์ ที่อัตรารอบ 300 รอบต่อนาที ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ มีค่าแรงบิดขณะโหลดเต็มพิกัดเท่ากับ 428.4 นิวตันเมตร ประสิทธิภาพร้อยละ 72.0

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของอัตรารอบ ความถี่ กำลังไฟฟ้า และแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ

อัตรารอบ (rpm)	ความถี่ (Hz)	กำลังไฟฟ้า (kW)	แรงบิด (Nm)
100	16.67	2.47	266.00
150	25.00	3.88	306.80
200	33.33	4.71	346.80
250	41.67	5.61	387.60
300	50.00	6.62	428.40
350	58.33	7.72	468.40



ภาพที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า ค่าแรงบิดในขณะมีโหลดเต็มพิกัดเป็นฟังก์ชันของอัตรารอบการหมุน

สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สอัตรารอบต่ำด้วยแม่เหล็กแรงสูง NdFeB N35 ที่อัตรารอบเชิงโรตอร์ส 300 รอบต่อนาที ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจรของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบนิวตรอนมีค่าเฉลี่ย 531.47 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟสค่าเฉลี่ย 921.00 โวลต์ สัญญาณคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่น ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ แรงดึงแม่เหล็กขณะเริ่มหมุนมีค่าสูงสุด 12.40 นิวตันเมตร สามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุด 6.62 กิโลวัตต์ มีค่าแรงบิดสูงสุด 468.40 นิวตันเมตร ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร้อยละ 72.00 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าสามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ไปใช้เป็นตัวกำเนิดในการผลิตไฟฟ้าจากระบบต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 หน่วยวิจัยพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน (REERCU) มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ขอขอบคุณนักศึกษาศาखाวิชาฟิสิกส์ และบุคลากรสาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gupta, R. A., Singh, B. and Jain, B. B. (2015). “Wind Energy Conversion System Using PMSG”, **Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), 2015 International Conference on IEEE.** 199-203.
- [2] Ashourianjozdani, M., Lopes, L. A. and Pillay, P. (2017). “Converter-based PMSG Emulator: A Testbed for Renewable Energy Experiments”, **Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017 IEEE International.** 1-7.
- [3] Guo, Z. and Chang, L. (2005). “FEM Study on Permanent Magnet Synchronous Generators for Small Wind Turbines”, **Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on IEEE.** 641-644.
- [4] Grauers, A. (1994). **Synchronous Generator and Frequency Converter in Wind Turbine Applications: System Design and Efficiency.** Chalmers University of Technology.
- [5] Kedjar, B., Kanaan, H. Y. and Al-Haddad, K. (2014). “Vienna Rectifier with Power Quality Added Function”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics.** 61(8), 3847-3856.
- [6] Kasagepongsan, C., Boonma, K. and Suklueng, M. (2017). “The Development of Low-Speed Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) For Small-Scale Wind Turbine”, **Thaksin University Journal.** 20(1), 75-87.
- [7] Guo, Z. and Chang, L. (2008). “Calculation and Study on Cogging Torque of Small Wind Turbine PMSG”, **Electrical and Computer Engineering, 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on IEEE.** 4-7 May 2008. Niagara Falls. Canada.
- [8] Maia, T. A., Faria, O. A., Cardoso, A. A., Borges, F. S., Mendonça, H. G., Silva, M. A., Vasconcelos, J. A., Silva S. R. and Lopes, B. M. (2011). “Electromechanical Design for an Optimized Axial Flux Permanent Magnet Torus Machine for 10kw Wind Turbine”, **Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on, IEEE.** 20-23 August 2011. Beijing, China.
- [9] Eriksson, S., Bernhoff, H. and Bergkvist, M. (2012). “Design of A Unique Direct Driven PM Generator Adapted for A Telecom Tower Wind Turbine”, **Renewable Energy.** 44, 453-456.
- [10] Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's University Of Technology North Bangkok. (2011). **Research and Development of Low Speed Wind Turbine Generators for Manufacturer in Country.** Final Report. Energy Policy and Planning Office (EPPO). Ministry of Energy. Thailand.
- [11] Ministry of Energy. (2015). **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015.** Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, September. Thailand.
- [12] Phoochinda, W. (2012). **The Management of Energy Production for Consumption at Community and Household Level.** Research Report. National Institute of Development Administration (NIDA). Thailand.
- [13] Cathey, J. J. (2000). **Electric Machines: Analysis and Design Applying Matlab.** McGraw-Hill Higher Education.