



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การเปรียบเทียบผลของการพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรโดยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก

Comparison of permanent magnet generator winding effect by finite element method for micro hydro power.

เกรียงศักดิ์ ไกรกิจราษฎร์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

Kreangsuk Kraikitrat

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Phayao, Maeka, Muang, Phayao, 56000

Corresponding author.

E-mail: kreangsuk_k@hotmail.com; Telephone: 08 1394 2052

วันที่รับบทความ 9 มีนาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 30 เมษายน 2564 ; วันที่ตอบรับบทความ 10 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบการพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก โดยสร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรขนาด 200 วัตต์ ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) ร่วมกับการทดสอบในสภาวะการณ์จริง เพื่อหาประเภทการพันขดลวดสเตเตอร์หรือขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่เหมาะสมกับกังหันน้ำความเร็วต่ำ ที่ใช้สำหรับฝายเก็บน้ำขนาดเล็กที่มีความสูงของหัวน้ำ (Header) อยู่ในระดับต่ำ จากผลการจำลองการทำงานในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบพบว่า การพันขดลวดแบบ Whole Coiled จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีแรงดันเอาต์พุต และประสิทธิภาพมากกว่าการพันขดลวดแบบ Half Coiled เพราะปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรมีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ระยะพิทช์ของขดลวดและการวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้พัน การพันขดลวดแบบระยะพิทช์เศษส่วน จะช่วยจัดฮาร์โมนิกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด แต่จะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบระยะพิทช์เต็ม

คำสำคัญ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การพันขดลวด ขดลวดอาร์เมเจอร์ ระยะพิทช์

Abstract

This research presents a comparative study of the winding of a permanent magnet synchronous generator (PMSG) for micro hydro power. A working model of a 200-watt permanent magnet synchronous generator was constructed in the Finite Element Method (FEM) method with the actual test. To determine the type of stator winding in permanent magnet synchronous generators suitable for low-speed water turbines for small dams and low water elevations. As a result of the finite element method and testing, it was found that the whole coiled winding resulted in the generator having more output voltage and efficiency than the half-coiled winding. Because there are major reasons to affect the efficiency of permanent magnet synchronous generators are the pitch and positioning of the stator windings. Fractional pitch winding

reduces the harmonic effect on the coil inductance voltage. But it will make the induced voltage is lower compared to the full pitch.

Keywords

permanent magnet synchronous generator; finite element method; winding; armature winding; pitch

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งน้ำขนาดเล็ก ถือเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ยอดนิยม จากบรรดาพลังงานทดแทนต่าง ๆ ที่หลายฝ่ายหันมาพัฒนาเพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าแทนพลังงานแบบเดิม ๆ โดยองค์กรพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency (IEA)) ระบุว่าปัจจุบันทั่วโลกผลิตไฟฟ้าจากพลังงานขนาดเล็ก รวม 16.6 % ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด และคิดเป็น 92 % ของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานทดแทน เพราะแหล่งน้ำขนาดเล็กมีกระจายอยู่ทั่วไป สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงที่นำมาสร้างพลังงานไฟฟ้า และนอกจากจะใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า พลังงานน้ำยังใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้อีกมากมาย ใช้เป็นแหล่งน้ำเพื่อการอุปโภค และบริโภค เพื่อการเกษตร และอุตสาหกรรม รวมถึงเป็นแหล่งขยายพันธุ์ และอยู่อาศัยของสัตว์และพืชน้ำ

ข้อมูลจากกรมชลประทาน ประเทศไทยมีแหล่งไฟฟ้าพลังน้ำที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าทั้งสิ้น 2,999.86 MW คือการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผลิตแบบไฟฟ้าพลังน้ำขนาดใหญ่และเล็กได้ 2,886.2 และ 60.40 MW ตามลำดับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคผลิตไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กได้ 8.65 MW และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานผลิตไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กและไฟฟ้าระดับหมู่บ้านได้ 43.32 และ 1.16 MW ตามลำดับ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำขนาดเล็ก จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมมากในระดับชุมชนและพื้นที่ชนบทห่างไกล

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยไม่เคิลฟาราเดย์ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1821 ด้วยการใช้เส้นแรงแม่เหล็กตัดกับขดลวด เรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Current) โดยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ตัดกันของสนามแม่เหล็กกับขดลวดเท่านั้น ถ้าหยุดเคลื่อนที่กระแสไฟฟ้าก็หายไป และมีแนวคิดที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลอยู่ตลอดเวลาจึงหมุนขดลวดตัดกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลา เกิดสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่าเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้าในเวลาต่อมา [1] โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรตามแนวแกน (Axial flux Generator) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ตามแนวรัศมี (Radius flux Generator) [2-4] แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรตามแนวแกน ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Generator) [5-7] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะสร้างขึ้นได้ง่ายมีประสิทธิภาพพอเหมาะกับการใช้งานในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานขนาดเล็กได้

ในปัจจุบันการพัฒนาและออกแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรจะให้ความสำคัญกับส่วนประกอบหลักคือโรเตอร์ และสเตเตอร์ ซึ่งส่วนประกอบหลักนี้จะส่งผลโดยตรงต่อขนาดพิกัดและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

มีหลายงานวิจัย [8-10] เปรียบเทียบประเภทการพันขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรประเภทต่าง ๆ เพื่อหาประเภทที่เหมาะสมกับประเภทของแหล่งต้นกำลังที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในงานวิจัย [11-13] ได้นำวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มาสร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร เพื่อวิเคราะห์การทำงานในสภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีการพันขดลวดสเตเตอร์ 2 ประเภทคือการพันแบบ Whole Coiled และการพันขดลวดแบบ Half Coiled ร่วมกับการทดสอบงานทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวต้นแบบในสภาวะการทำงานจริง

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า มีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ สเตเตอร์ (Stator) และโรเตอร์ (Rotor) ส่วนของสเตเตอร์คือส่วนหลักที่ยึดกับระบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีชุดขดลวดเพื่อรับการเหนี่ยวนำจากเส้นแรงแม่เหล็กของ โรเตอร์ เพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า ส่วนของโรเตอร์เป็นส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กและหมุนอยู่แกนกลางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสามารถรับแรงบิดหรือพลังงานกลผ่านแกนเหล็กที่เชื่อมต่อกับต้นกำลัง [14] เช่นพลังงานลมพลังงานน้ำ เป็นต้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กตามหลักการของ ไมเคิลฟาราเดย์ (Faraday 's law) [15]

โดยมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างขดลวดกับแม่เหล็ก จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีปริมาณเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จึงเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ε) ขึ้นในขดลวด โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กในหนึ่งหน่วยเวลา ($d\phi$) ดังสมการที่ 1

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

ขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ตามความยาวแกนเหล็กดังสมการที่ (2)

$$\phi = \frac{\mu_r \mu_o A}{L} \times N_{ph} I \quad (2)$$

ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce EMF) ต้องคูณด้วยค่าแฟคเตอร์การพันขดลวด (K_w) ดังสมการที่ (3)

$$K_w = K_d K_p \quad (3)$$

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)}{\left(\frac{\sigma}{2g}\right)} \quad (4)$$

$$K_p = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5)$$

เมื่อ K_d คือค่าแฟคเตอร์การพันกระจายขดลวด

K_p คือพิทช์แฟคเตอร์

σ คือการกระจายของมุมเฟส

g คือจำนวนร่องสลิต/เฟส/ขั้วแม่เหล็ก

α คือมุมพิทช์สั้น (Short Chord Angle)

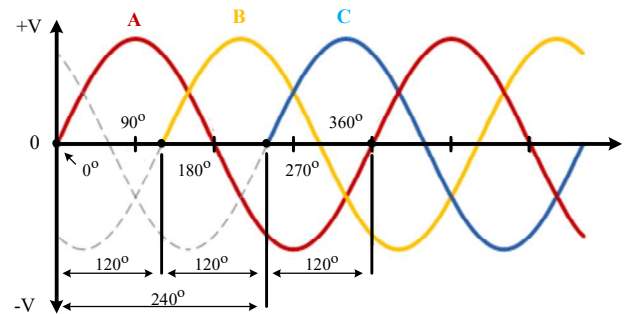
แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหนึ่งเฟส ($E_{rms} / phase$) สมการที่ (6)

$$E_{rms} = \sqrt{2} \pi k_w N \phi \quad (6)$$

การคำนวณจำนวนการพันขดลวดต่อเฟส ($N/phase$) ได้จากสมการที่ (7)

$$N = \frac{E_{rms}}{4.44 f k_w \phi} \quad (7)$$

3. การพันขดลวดอาร์เมเจอร์



รูปที่ 1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

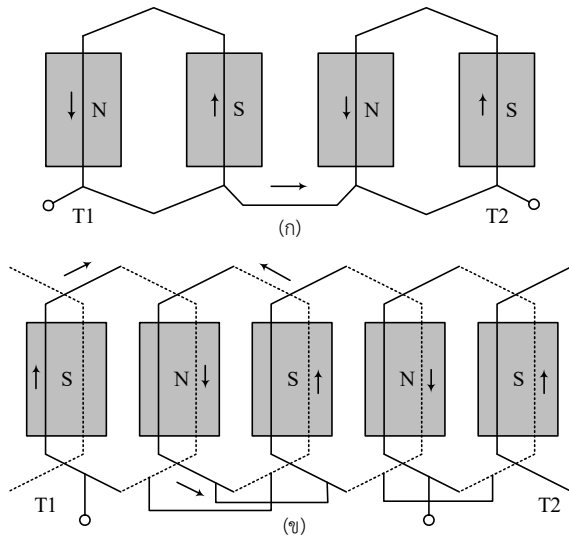
ในการพันขดลวดสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือแรงดันเอาต์พุต (Output Voltage) ต้องใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) ดังรูปที่ 1 มากที่สุด ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ขดลวดแต่ละชุดจะพันเรียงห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า

3.1 การพันขดลวดแบบ Half Coil (Single-Layer)

การพันแบบนี้ใน 1 ร่อง (Slot) มี 1 คอยล์ไซด์ (Coil-Side) เรียกว่า Half Coil Winding จำนวน Coil-Group ต่อเฟส เท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนขั้วแม่เหล็ก การต่อขดลวดแต่ละ Coil-Group เข้าด้วยกันต่อแบบปลายต่อต้น ดังรูปที่ 2 (ก)

3.2 การพันขดลวดแบบ Whole Coil (Double-Layer)

การพันแบบนี้ใน 1 ร่อง (Slot) มี 2 คอยล์ไซด์ (Coil-Side) เรียกว่า Whole Coil Winding จำนวน Coil-Group ต่อเฟส เท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็ก การต่อขดลวดของแต่ละ Coil-Group ต่อแบบปลายต่อปลาย ดังรูปที่ 2 (ข)



รูปที่ 2 การพันขดลวด (ก) half-coil windings (ข) whole-coil windings

3.3 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการที่ 8 สามารถหาค่าของกำลังงานทางกลด้านอินพุตได้ดังนี้

$$P_{in} = \tau_{app} \omega_m \quad (8)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังทางกลอินพุต (วัตต์)

τ_{app} คือ แรงบิดทางกล (นิวตันเมตร)

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมทางกล (เรเดียนต่อวินาที)

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (9)$$

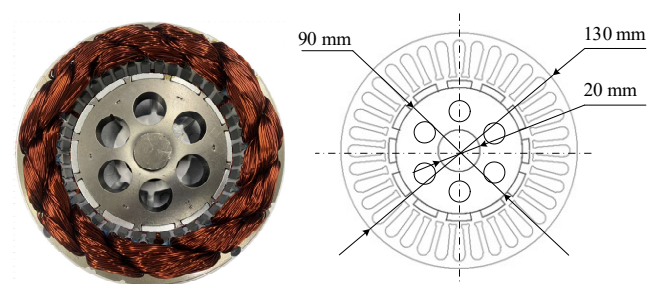
เมื่อ P_{out} คือกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์)

P_{in} คือกำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์)

4. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) ชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) และเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ (Node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมนของปัญหา จากนั้นเมื่อทำการแก้ระบบสมการดังกล่าวก็จะได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบนโดเมนของปัญหา

รูปที่ 3 แสดงขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร ตัวต้นแบบเพื่อจำลองการทำงานในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และตารางที่ 1 แสดงพิกัดของพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3 ขนาดของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวต้นแบบ

รูปที่ 4 แสดงประเภทการพันขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 2 แบบที่ใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้คือ Half Coil Winding และ Whole Coil Winding

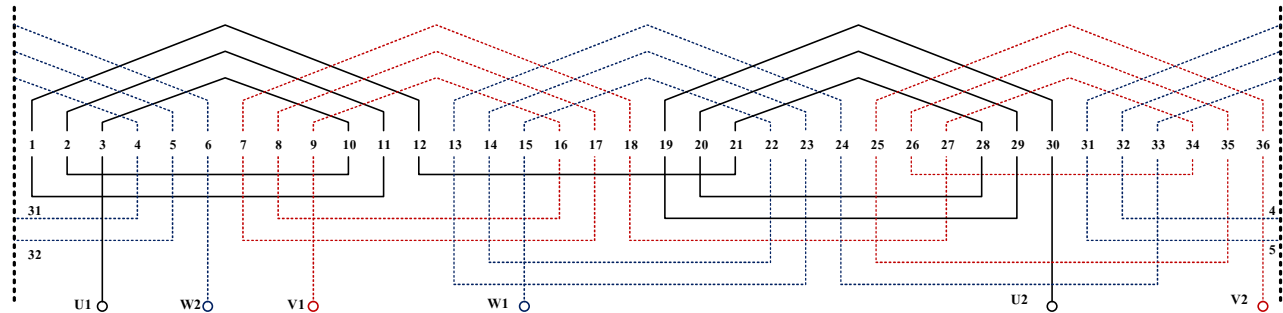
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวต้นแบบ

รายการ	ขนาด	หน่วย
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	200	วัตต์
แรงดันไฟฟ้า (พิกัด)	24	โวลต์
ขั้วแม่เหล็ก	12	-
ความเร็วรอบ (พิกัด)	900	รอบต่อนาที
ร่องสลิตสเตเตอร์	36	-

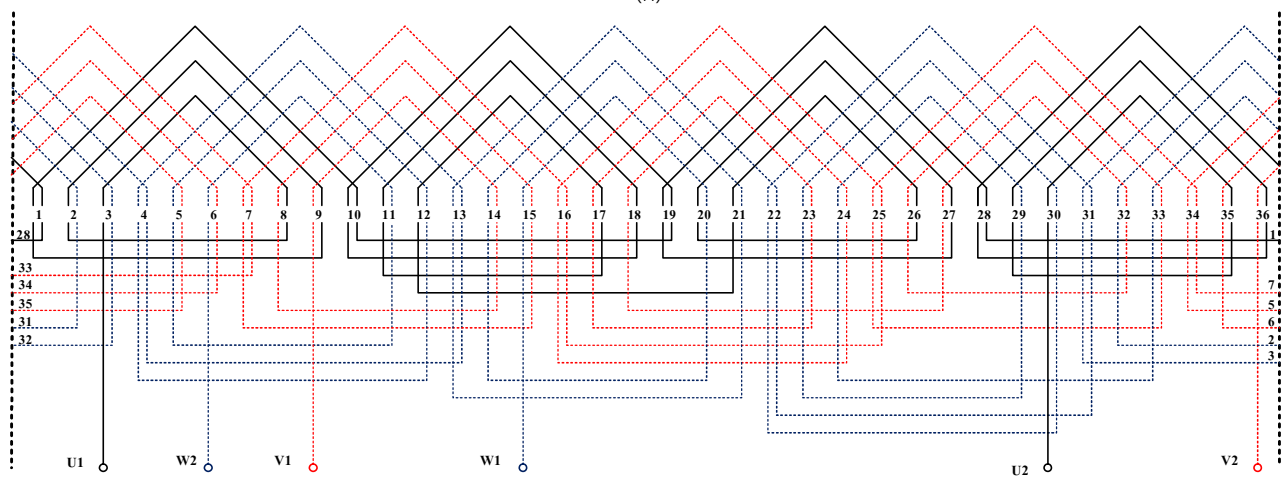
ในส่วนของคุณลักษณะในการทดลองเพื่อหาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวต้นแบบ ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply), ออสซิลโลสโคป

(Oscilloscope), โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter), แอมป์มิเตอร์ (Ammeter) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ดังรูปที่ 4 ในการทำการทดสอบหาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรงทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทำการบันทึกค่าผ่านเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า



(ก)



(ข)

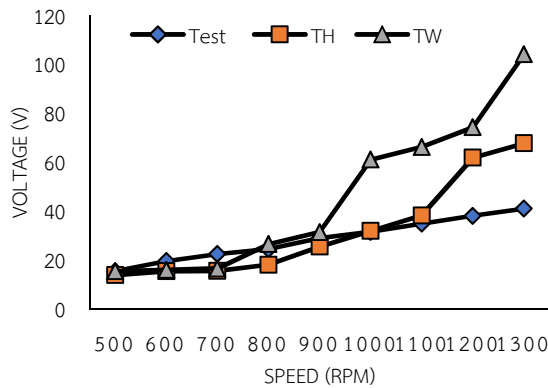
รูปที่ 4 การพันขดลวดในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (a) Half Coil Winding (b) Whole Coil Winding

ในรูปที่ 6 แสดงแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการทดสอบตัวต้นแบบที่มีการพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Whole Coil (Test) และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการจำลองการพันขดลวด 2 แบบคือ Half Coil (TH) และ Whole Coil (TW)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากการพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Whole Coil Winding มีแรงดันเอาต์พุตสูงกว่าพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Half Coil Winding



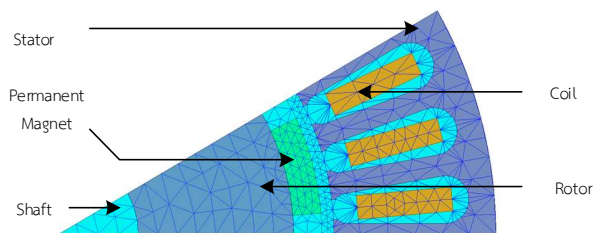
รูปที่ 5 การทดสอบ PMSG ตัวต้นแบบ



รูปที่ 6 แรงดันเอาต์พุต

5. การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองประเภทการพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร 2 ประเภท โดยแบบจำลองนี้จะมีส่วนประกอบคือ แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core), แกนเหล็กโรเตอร์ (Rotor Core), ขดลวดตัวนำ (Coil), แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) และช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ (Air Gap) ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เอลิเมนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร 1/12

การวิเคราะห์ปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [16] เป็นปัญหาที่ต้องแก้โดยใช้สมการของแมกซ์เวล (Maxwell's Equation) และมีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ที่แตกต่างกันซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าปัญหาขอบเขต (Boundary Value Problem) ที่จะแก้ปัญหาโดยการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการของแมกซ์เวลสามารถอธิบายถึงปริมาณและความสัมพันธ์ต่าง ๆ ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งจะเป็เซตของสมการพื้นฐานที่ควบคุมปรากฏการณ์ทาง

แม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่มองเห็นด้วยตาเปล่า สมการของแมกซ์เวลสามารถเขียนในรูปของการอนุพันธ์และการอินทิกรัล

สมการของแมกซ์เวลในประเภตอนุพันธ์ทั่วไป สำหรับสนามที่แปรตามเวลาทั่วไป สามารถเขียนได้เป็นดังสมการ (10)

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (\text{กฎของฟาราเดย์}) \quad (10)$$

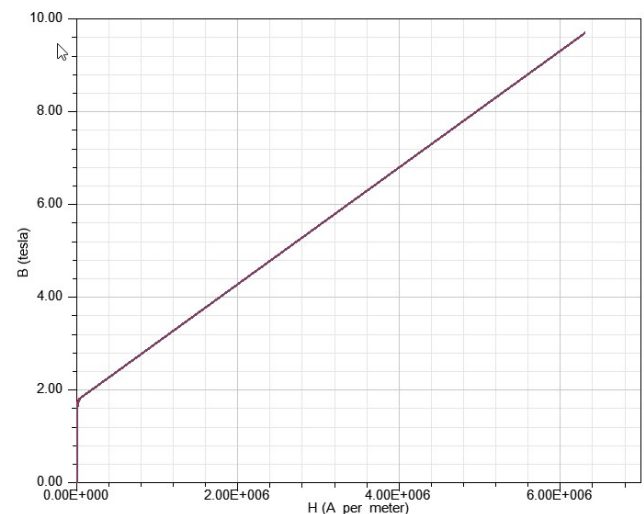
$$\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = J \quad (\text{กฎของแมกซ์เวล-แอมแปร์}) \quad (11)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{กฎของเกาส์}) \quad (12)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{กฎของเกาส์-แม่เหล็ก}) \quad (13)$$

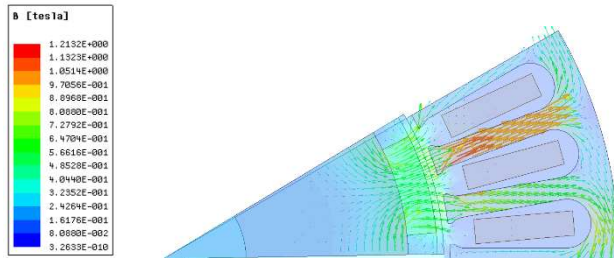
เมื่อ E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Volts/m), D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (Coulombs/m²), H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (A/m), B คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Weber/m²), J คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (A/m²) และ ρ คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (Coulombs /m³)

โดยมีการกำหนดประเภทของแกนเหล็กเป็นไปตามตัวอย่างของวัสดุในโปรแกรม (M-19) ซึ่งมีคุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ B และ H ของวัสดุแกนเหล็ก

ในรูปที่ 9 และตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) และค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ของแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 9 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก 1/12

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (H)

การพันขดลวด	B	H
Half Coil	1.91E+000	1.10E+006
Whole Coil	1.71E+000	9.74E+005

6. ผลการทดสอบ

โดยทั่วไปกำลังงานเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่ากำลังงานอินพุต เนื่องจากการสูญเสียต่าง ๆ เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) เอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 3 เฟส สามารถแสดงได้โดย

$$P_{out} = \sqrt{3V_T I_L \cos \theta} \quad (14)$$

หรือ

$$P_{out} = 3V_\phi I_A \cos \theta \quad (15)$$

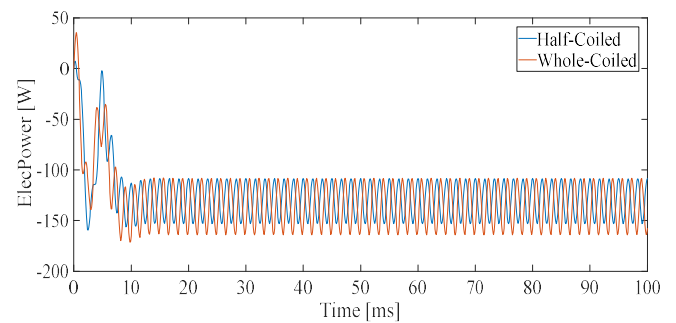
หรือ

$$P_{out} = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{X_s} \quad (16)$$

สมการที่ (14) แสดงกำลังงานที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ มุม δ ระหว่าง V_ϕ และ E_A โดยมุม δ นี้จะถูกเรียกว่ามุมกำลังหรือมุมแรงบิด (Power

Angle หรือ Torque Angle หรือ load angle) ซึ่งถ้า $\delta = 90^\circ$ จะได้กำลังงานสูงสุด (Maximum Power)

จากรูปที่ 10 คือกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจากการพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Whole Coil Winding มีกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงกว่าพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Half Coil Winding



รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

แรงบิดเหนี่ยวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส แสดงได้เป็น

$$\tau_{ind} = k B_R x B_{net} \quad (17)$$

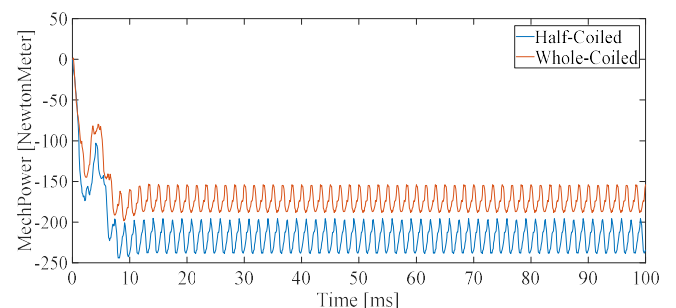
หรือแสดงอยู่ในรูปขนาดได้เป็น

$$\tau_{ind} = k B_R x B_{net} \sin \delta \quad (18)$$

หรือ

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_s} \quad (19)$$

จากรูปที่ 11 คือแรงบิดเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าแรงบิดเหนี่ยวนำจากการพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Whole Coil Winding มีแรงบิดเหนี่ยวนำสูงกว่าพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Half Coil Winding



รูปที่ 11 แรงบิดเหนี่ยวนำ

จากการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏจากประเภทการพันขดลวดทั้งสองแบบดังรูปที่ 12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่มีการพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Whole Coil Winding จะมีพิกัดเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าปรากฏมากกว่าการพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Half Coil Winding

ในรูปที่ 13 คือประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ที่แสดงให้เห็นว่า การพันขดลวดสเตเตอร์แบบ Whole Coil Winding จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการพันแบบ Half Coil Winding ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากกำลังสูญเสียการพันแบบ Half Coil Winding มีค่ามากกว่าแบบ Whole Coil Winding

ผลจากรูปแบบการพันขดลวดสเตเตอร์ที่ความเร็วรอบต่างๆ ส่งผลให้เกิดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป และมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c) ที่เปลี่ยนไปตามสมการ 20

$$P_c = K_h f B_m^k + K_e f^2 B_m^2 \quad (20)$$

เมื่อ

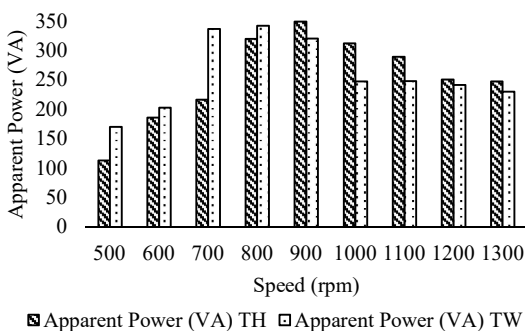
f คือ ความถี่ของเครื่องกำเนิด (Hz)

K_h คือค่าคงที่ฮีสเตอร์ซิสของวัสดุแกนเหล็ก

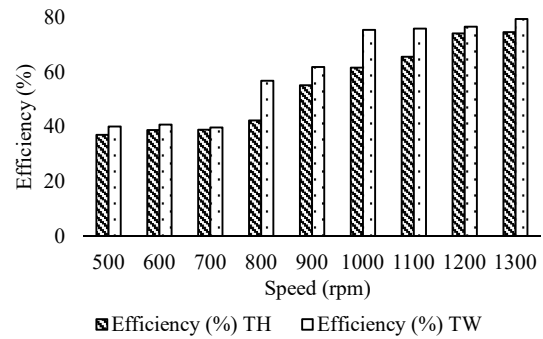
K_e คือค่าคงที่กระแสไหลวน

B_m คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแม่เหล็กสูงสุด (T)

ที่ระดับความเร็วต่างๆ จากการจำลองในคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผลจากกำลังสูญเสียในขดลวดและแกนเหล็กทำให้กำลังไฟฟ้าปรากฏและประสิทธิภาพมีค่าเปลี่ยนตามรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าปรากฏ



รูปที่ 13 ประสิทธิภาพ

7. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับการทดสอบจริง เพื่อเปรียบเทียบประเภทการพันขดลวดสเตเตอร์ 2 แบบ ระหว่างพันขดลวดแบบ Whole Coiled และ Half Coiled พบว่าประเภทการพันขดลวดแบบ Whole Coiled จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากกว่าการพันขดลวดแบบ Half Coiled ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ระยะพิตช์ของขดลวดและการวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้พัน การพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วน จะช่วยขจัดฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด แต่จะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบระยะพิตช์

กิตติกรรมประกาศ

ในบทความนี้คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์และบุคลากรในการทำงานเพื่อบทความวิจัยนี้ และบทความวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนเงินทุนในการศึกษาจากโครงการวิจัยชื่อ “การพัฒนานวัตกรรมสำหรับผู้สูงอายุ” สัญญาเลขที่ R2563B007 กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (NSRF) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fitzgerald AE, Kingsley JC, Umas SD. *Electric Machinery*. UK: McGraw-Hill; 1990.
- [2] Anpalahan P, Lamperth M. Design of multi-stack axial flux permanent magnet generator for a hybrid electric vehicle. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'06)*. IEEE; 2006. P. 1938-8756
- [3] Chan TF, Wang W, Lai LL. Magnetic Field in a Transverse and Axial Flux Permanent magnet synchronous generator from 3 - D FEA. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012; 48(2): 1055-1058.
- [4] Davila JM, Mishra RS. Performance of a hydrokinetic energy system using an axial-flux permanent magnet generator. *Energy*. 2014; 65: 631-638.
- [5] Ahmad G, Amin U. Design construction and study of small-scale vertical axis wind turbine based on a magnetically levitated axial flux permanent magnet generator. *Renewable Energy*. 2017; 101: 286-292.
- [6] Fei W, Luk PCK, Jinupun K. Design and analysis of high- speed coreless axial flux permanent magnet generator with circular magnets and coils. *IET Electric Power Applications*. 2010; 4(9): 739-747.
- [7] Soderlund L, Koski A, Vihriala H, Eriksson JT, Perala R. Design of an axial flux permanent magnet wind power generator. In: *1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives*. Cambridge; 1997. p. 224-228.
- [8] Walid GA, Ahmed H, Hamdy A. A comparative study of winding configuration effect on the performance of low speed PMSG using FEM. In: *Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. Cairo Egypt; 2016. p.27-29
- [9] Flur IR, Viacheslav E, Vavilov D, Gusakov V. Synchronous electric machines with tooth-coil winding and magnetic flow barrier. In: *Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*, 27-28 July. Bhubaneswar India; 2018.
- [10] Li G, XBin X, Yun F, Hualin S. Study on performance of permanent magnet synchronous generator based on winding structure. In: *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 11-14 Aug. Harbin China; 2019.
- [11] Ducar M, Ion CP. Design of a PMSG for micro hydro power plants. In: *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 24-26 May. Brasov Romania; 2012.
- [12] Mihail P, Andreea M, Rares C, Sergiu N, Adrian N, Gabriela O. Finite element analysis of a low-speed permanent magnets synchronous generator with direct drive. In: *8th international symposium on advanced topics in electrical engineering (ATEE)*, 23- 25 May. Bucharest Romania; 2013.
- [13] Chengyuan H, Thomas W. Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2019; 3(1): 94 – 100.
- [14] Department of electrical engineering, King Mongkut's university of technology North Bangkok. *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. 2011.
- [15] Crooks MJ, Litvin DB, Matthew PW, Macaulay R, Shaw J. One-piece Faraday generator. In: *A paradoxical experiment from 1851*. 1978; 46(7): 729-731.
- [16] มงคล ทองสงคราม. เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ. กรุงเทพมหานคร : รามการพิมพ์; 2535.