

การออกแบบและทดสอบสมรรถนะทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร แบบสองโรเตอร์สามสเตเตอร์สำหรับกังหันน้ำแบบไหลขวาง

Design and Performance Testing of Two rotors Three Stators Permanent Magnet Generator for Cross Flow Turbine

อัสวเทพ สารปิน¹ วรจักร เมืองใจ² และ วีระศักดิ์ สมศักดิ์^{2,*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 52200

²วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ 50300

Assawathep Sanpin¹, Worrajak Muangjai² and Teerasak Somsak^{2,*}

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai, 52200

²College of Integrated Science and Technology,

Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai, 50300

บทคัดย่อ

การออกแบบและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามแนวแกนแบบแม่เหล็กถาวรชนิด 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์สำหรับกังหันน้ำแบบไหลขวางสำหรับแหล่งน้ำที่มีหัวน้ำสูทหรืออยู่ในช่วง 3-5 เมตร อัตราการไหล 7-20 ลิตรต่อวินาที ในพื้นที่ที่ระบบสายส่งปกติเข้าไม่ถึงหรือพื้นที่ห่างไกล ได้ออกแบบขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่พิกัด 600 วัตต์ ที่ 500 รอบต่อนาที 3 เฟส 17 โวลต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร ประกอบด้วย สเตเตอร์ 2 ชุดและโรเตอร์ 3 ชุดโดยชุดสเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์ขนาด 17 AWG จำนวน 6 ขด ในแต่ละขดพันขดลวดจำนวน 140 รอบวางตามแนวรัศมีต่อขดลวดแบบอนุกรมจำนวน 3 คู่ และหล่อทับด้วยเรซินสำหรับจับยึดกับโครงสร้าง สำหรับแผ่นโรเตอร์ประกอบด้วย 3 ชุดโดยวางลักษณะสลับกับชุดโรเตอร์ให้ตำแหน่งของแม่เหล็กตัดแผ่นขดลวดทั้งสอง ข้างของสเตเตอร์ สำหรับแผ่นโรเตอร์ตรงกลางระหว่างแผ่นสเตเตอร์ทำจากเหล็กแผ่นหนา 12 มิลลิเมตรและเจาะรูสำหรับวางแม่เหล็กถาวรโดยแม่เหล็กถาวรที่เป็นชนิดนีโอไดเมียมมีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก 200 มิลลิเทสลา และทำการทดสอบสมรรถนะทางเทคนิคภายในห้องปฏิบัติการจากผลการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณี 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ ที่ต่อขดลวดแบบสตาร์และเคลด้าทุกความเร็วรอบ ตั้งแต่ 200-600 รอบต่อนาที นั้นเมื่อแรงบิดเพิ่มสูงขึ้นจะให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ สำหรับประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดที่การต่อทั้งสองแบบอยู่ในช่วง 30-50% ในส่วนความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ผลิตได้นั้นเป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์

แปรผันพลังงานหรือการออกแบบแบตเตอรี่ให้สามารถใช้งานได้ครอบคลุมทุกความเร็วรอบหรือแปรเปลี่ยนของแหล่งน้ำที่มีการปรับเปลี่ยนตามฤดูกาล เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าที่ต้องการ ความเร็วรอบต่ำเช่นกังหันลมได้

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามแนวแกน, กังหันน้ำ, แม่เหล็กถาวร, นีโอดีเมียม

Abstract

This project describes the development of a permanent magnet generator type 2 stators 3 rotors with cross flow turbine at total head range 3-5 meter and 7-20 liter per second for remote area. The generator had a rated power 600 Watt, 500 round per minute and 3 phase 17 Volt. The diameter has 0.3 meter with 2 stator and 3 rotors. The copper winding AWG 17 was used to make a form with 140 rounds per coil and 6 coils per stator. The resin has been applied to stator structure and neodymium permanent magnet at 200 mT. The genertor has been tested under testrig in labolatory to find out the eletricle parameters. The results found that the relation of torque and power generated of 2 stators 3 rotors permanet magnet generator with internal coil wiring in star and delta with various speed 200 to 600 round per minute is higher than the 1 stator 2 rotors. The conversion energy of mechanical power to electrical power is around 30-50% within rage of testing. In order to development the scheme of converter and battery management, this experiment results in term of current and voltage is not only utilized for the devoloping converter to receive the energy at various seasoning but also applied to the low speed source of energy application such as wind generator.

Keywords: axial generator, hydro turbine, permanent magnet, neodymium

1. บทนำ

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ในพื้นที่ซึ่งอยู่นอกเขตบริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในภาคเหนือส่วนใหญ่เป็นชุมชนชนบทบนพื้นที่สูง ปัจจุบันชุมชนส่วนใหญ่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก ข้อจำกัดของชุมชนบนพื้นที่สูงคือลักษณะภูมิประเทศ และภูมิอากาศ ที่ไม่เอื้อต่อการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น แผงโซลาร์เซลล์ถูกบังเงาจากภูเขาหรือเมฆหมอก ประกอบกับการมีช่วงฤดูฝนที่ยาวนาน ปัญหาเหล่านี้ส่งผลต่อชั่วโมงการรับแสงของแผงเซลล์ทำให้ปริมาณการผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอ พลังงานน้ำจึงเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกอีกแหล่งหนึ่งที่ควรนำมาพิจารณา เนื่องจากทรัพยากรน้ำบริเวณชุมชนบนพื้นที่สูงหลายแห่งมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตั้งแต่ในพื้นที่ที่มีความหลากหลายทางด้านภูมิประเทศ ศักยภาพของแหล่งน้ำก็เช่นเดียวกัน โดยทั่วไปแหล่งน้ำที่อยู่ใกล้กับชุมชนมีหัวน้ำสุทธิไม่สูงมากนัก อยู่

ในช่วงประมาณ 3-5 เมตร อัตราการไหล 7-20 ลิตรต่อวินาที ดังนั้นกังหันน้ำที่มีความเร็วรอบไม่สูงมากจึงเป็นทางเลือกสำหรับการนำมาใช้งาน เนื่องจากความเร็วรอบของกังหันขึ้นอยู่กับหัวน้ำสุทธิและเพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงต้องเป็นเครื่องที่อาศัยความเร็วรอบที่ต่ำเพื่อลดการสูญเสียทางกล เมื่อมีการปรับหรือเพิ่มรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเช่นกัน

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือไดนาโมได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยชาว ไมเกิล ฟาราเดย์ ในปี ค.ศ. 1821 ด้วยการใช้เส้นแรงแม่เหล็กตัดกับขดลวด เรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced current) โดยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ตัดกันของสนามแม่เหล็กกับขดลวดเท่านั้น ถ้าหยุดเคลื่อนที่กระแสไฟฟ้าก็หายไปและมีแนวคิดที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลอยู่ตลอดเวลาจึงหมุนขดลวดตัดกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลาเกิดสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่าไดนาโมหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเวลาต่อมา [1] ด้วยหลักการนี้ทางคณะทำงานได้ได้ออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Permanent Magnet Generator (PMG) โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet Generator) มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรตามแนวแกน (Axial flux Generator) และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรตามแนวรัศมี (Radius flux Generator) [3-7] โดยแล้วเครื่องกำเนิดทั้ง 2 ชนิดนี้ถูกพัฒนา มานานมากกว่า 150 ปีแล้ว แต่ในตอนนี้จะกล่าวถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรตามแนวแกน (Axial flux Generator) ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Generator) เนื่องจากเครื่องกำเนิดชนิดนี้ ถ้าเป็นเครื่องกำเนิดขนาดใหญ่จะถูกจำกัดด้วยในเรื่องของโครงสร้างที่ยุ่งยากและมีปัญหาในด้านความร้อนเกิดขึ้นกระจายขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Windings) [8-10] และอีกประเด็นถ้าทำเป็นขนาดเล็กแล้ว เครื่องกำเนิดชนิดนี้จะสร้างขึ้นได้ง่ายมีประสิทธิภาพพอเหมาะกับการใช้งานในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากอยู่ในพื้นที่ที่เป็นภูเขา และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กได้ ส่วนใหญ่ในปัจจุบันมีการสร้างเครื่องกำเนิดชนิดนี้เพื่อนำเอากระแสไฟฟ้าไปประจุเก็บไว้ในแบตเตอรี่และยังเป็นที่นิยมใช้งานสำหรับระบบกังหันลม [11-13]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรตามแนวแกน (Axial flux Generator) พัฒนาโดยการเพิ่ม โรเตอร์ และ สเตเตอร์ จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรชนิด 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรชนิด 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานแหล่งน้ำที่มีหัวน้ำสุทธิอยู่ในช่วง 1-3 เมตร และมี อัตราการไหลประมาณ 10 – 20 ลิตร/วินาที ที่เหมาะสมกับกังหันน้ำแบบไหลขวางในพื้นที่ห่างไกล

2. การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรแบบหมุนตามแนวแกน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเรื่องการคำนวณการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรชนิด 3 โรเตอร์ 2 สเตเตอร์ ขั้นตอนการดำเนินการในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การออกแบบส่วนที่เคลื่อนที่ การออกแบบส่วนที่อยู่กับที่และ การสร้างโครงสำหรับจับยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.1 การออกแบบเครื่องกำเนิดทางไฟฟ้า

2.1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กตามเวลาหรือสนามแม่เหล็กไดนามิกส์ หมายถึงการตัดผ่านระหว่างแม่เหล็กและตัวนำที่ความเร็วหนึ่งย่อมทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ Electromotive Force (emf) เป็นโวลต์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็คือแหล่งที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อตัวนำดังกล่าวมี N รอบ จะได้สมการของ emf ใหม่ดังนี้

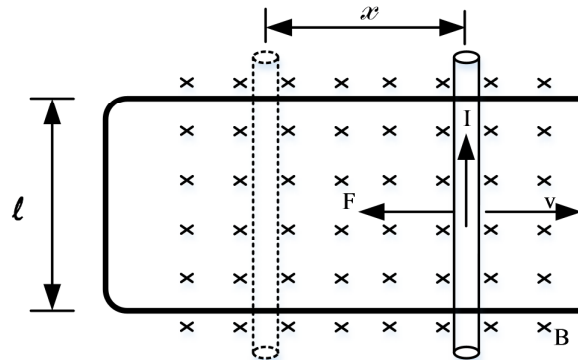
$$emf = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

เมื่อ $d\phi$ = ฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง

dt = เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์แม่เหล็ก

N = จำนวนรอบของขดลวด

จากสมการกำหนดให้มีค่าเป็นลบ หมายความว่า emf ที่เกิดขึ้นได้สร้างสนามแม่เหล็กใหม่ มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กเดิมที่ทำให้สนามแม่เหล็กในวงจรลดลง



รูปที่ 1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการเคลื่อนตัวนำตัดฟลักซ์แม่เหล็ก

จากรูปที่ 1 เมื่อเคลื่อนตัวนำไปทางขวา ฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านเส้นลวด คือ

$$\phi = AB = (lx)B \quad (3)$$

$$\text{จาก } e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{Bldx}{dt} = -\frac{Blvdt}{dt}$$

$$e = -Blv \quad (4)$$

เมื่อ e คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)

B คือความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Wb/m^2)

v คือ ความเร็ว (m/s)

l คือ ความยาวของขดลวดตัวนำ (m)

กรณีนี้เป็นกรณีที่ลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดฉากกับสนามแม่เหล็ก หากลวดตัวนำเคลื่อนที่โดยมีทิศการเคลื่อนที่ทำมุม θ ใดๆ กับทิศสนามแม่เหล็ก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5

$$e = -Blv \sin \theta \quad (5)$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างทิศทางและความเร็วที่ทำกับทิศของสนามแม่เหล็กแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า (I) ขึ้นในวงจร สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6

$$I = \frac{e}{R} = \frac{Blv}{R} \quad (6)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานของขดลวด

เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดทำให้เกิดแรงต้านเกิดขึ้นในตัวนำกระทำต่อขดลวด มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ แรงนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 7

$$F = IlB = \frac{B^2 l^2 v}{R} \quad (7)$$

เมื่อแรงบิดที่เกิดขึ้นในตัวนำ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 8

$$\tau = BIlr \quad (8)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการนำไปใช้งาน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 9

$$I = \frac{\tau}{Blr} \quad (9)$$

เมื่อ τ คือ แรงบิด ($N-m$)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำ (A)

r คือ รัศมีของรูปทรงกระบอก (m)

2.1.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

จากสมการที่ 10 สามารถหาค่าของกำลังงานทางกลด้านขาเข้าได้ดังนี้

$$P_{in} = \tau_{app} \omega_m \quad (10)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังทางกลขาเข้า มีหน่วยเป็นวัตต์

τ_{app} คือ แรงบิดทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมทางกล มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (11)$$

เมื่อ P_{out} คือกำลังไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นวัตต์

P_{in} คือกำลังไฟฟ้าขาเข้า มีหน่วยเป็นวัตต์

2.1.3 พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ (ดังตารางที่ 1) จะนำไปสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร ชนิด 3 โวลต์ 2 สเตเตอร์ แบบหมุนตามแนวแกน

ตารางที่ 1 ตัวแปร สมการและพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ

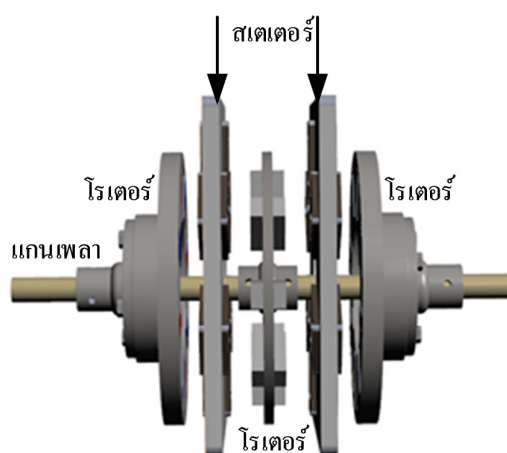
ตัวแปร	สมการ	พารามิเตอร์
1) คำนวณหาอัตราเร็ว (v) ในการหมุนของโรเตอร์ กำหนด ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที และมีระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 0.24 เมตร คำนวณหาอัตราเร็วในการหมุนของโรเตอร์	$v = \frac{\pi D n}{60}$ เมื่อ $D =$ ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (m) $n =$ จำนวนรอบต่อนาที (rpm)	6.28 m/s

ตารางที่ 1 ตัวแปร สมการและพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ (ต่อ)

ตัวแปร	สมการ	พารามิเตอร์
2) คำนวณหาความยาวของขดลวด (l_1) ต่อเฟส กำหนด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 17 โวลต์ อัตราเร็วในการหมุนของโรเตอร์ 6.28 เมตรต่อวินาที ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้ อยู่ที่ 0.2 เทสลา คำนวณหาความยาวของขดลวดต่อเฟส ในสมการ	$l_1 = \frac{e}{vB}$ เมื่อ $e =$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V) $v =$ อัตราเร็วในการหมุนของโรเตอร์ (m/s) $B =$ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (T)	13.54 m
3) คำนวณหาความยาวของขดลวด (l_2) ต่อขด กำหนดให้มีขดลวดจำนวน 9 ขด เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส จึงทำให้มีขดลวดจำนวน 3 ชุดๆ ละ 2 ขด	$l_2 = \frac{l_1}{n_1}$ เมื่อ $n_1 =$ จำนวนขดลวดต่อเฟส	6.77 m
4) คำนวณหาจำนวนรอบต่อขด (n) กำหนด แม่เหล็กถาวรมีพื้นที่หน้าตัด 0.05 เมตร	$n = \frac{l_2}{A}$ เมื่อ $A =$ พื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็ก (m)	136 รอบ หรือ $\approx$ 140 รอบ
5) คำนวณหาแรงบิด (τ) กำหนด เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์	$\tau = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} \times 60 \text{ N.m}$ เมื่อ $P =$ กำลังไฟฟ้า (W) $n =$ จำนวนรอบต่อวินาที (rpm)	5.73 N.m
6) คำนวณหากระแส (I) เพื่อเลือกขนาดของขดลวด	$I = \frac{P}{e}$ เมื่อ $P =$ กำลังไฟฟ้า (W) $emf =$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)	17.65 A เลือกใช้ขดลวดเบอร์ 17 A.W.G. ทนกระแสได้ 19 A

2.2 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางกล

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเรื่องการคำนวณการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร ชนิด 3 โรเตอร์ 2 สเตเตอร์ ขั้นตอนการดำเนินการในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การออกแบบส่วนที่เคลื่อนที่ การออกแบบส่วนที่อยู่กับที่และ การสร้างโครงสำหรับจับยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือส่วนที่เคลื่อนที่ หรือที่เรียกว่าโรเตอร์ ส่วนที่อยู่กับที่หรือที่เรียกว่าสเตเตอร์และ โครงสร้างสำหรับการจับยึดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการกันดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

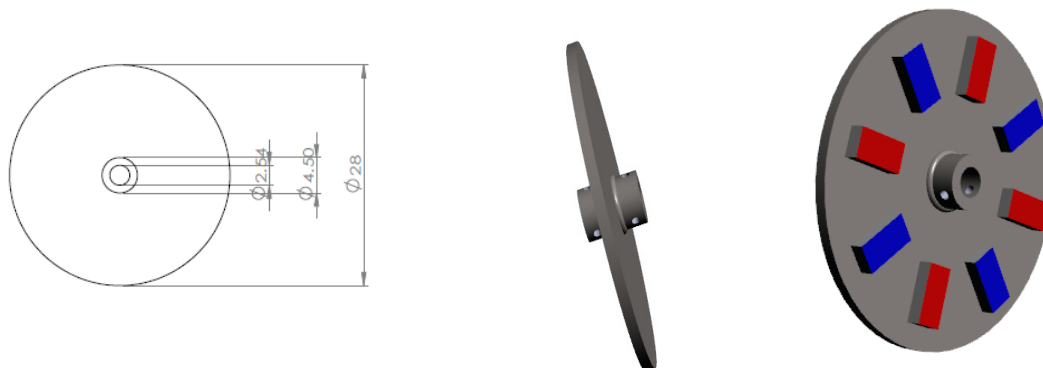
2.2.1 การออกแบบส่วนที่เคลื่อนที่หรือโรเตอร์

ส่วนที่เคลื่อนที่หรือโรเตอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือ ส่วนตรงกลาง และ ส่วนข้างทั้ง 2 ข้าง ในส่วนของ โรเตอร์ด้านข้างทั้ง 2 ข้าง จะถูกออกแบบโดยใช้จานดิสเบรกของรถยนต์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 280 มิลลิเมตร ทำการกลึงปาดหน้าในส่วนที่ต้องการวางแม่เหล็กเพื่อให้หน้าสัมผัสมีความเรียบเสมอกัน และกลึงปาดอกแกนจับ สำหรับจับยึดกับแกนเพลลาซึ่งแกนเพลลามีขนาด 1 นิ้ว 1 หุน ดังรูปที่ 3(ก) ขึ้นต่อไปทำการกลึงจานดิสเบรกให้เป็น ร่องโดยวัดจากขอบ 14 มิลลิเมตร แล้วทำการกลึงเป็นร่องลึกลงไป 10 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 266 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3(ข) เพื่อวางแม่เหล็กถาวรขนาด กว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร จำนวน 8 ก้อน โดยจะวางสลับขั้วกันเป็นมุม 45 องศา แล้วทำการหล่อเรซินทับลงไป เพื่อให้แม่เหล็กยึดติดกับตัว โรเตอร์ ดังรูปที่ 3(ค)



(ก) ลักษณะของมอเตอร์ (ข) ลักษณะของมอเตอร์ที่กลึงเสร็จ (ค) ลักษณะการวางขั้วแม่เหล็ก
รูปที่ 3 การออกแบบมอเตอร์ด้านข้าง

ในส่วนของมอเตอร์ตรงกลางจะออกแบบโดยการกลึงเหล็กแผ่นหนา 12 มิลลิเมตร ให้เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 280 มิลลิเมตร แล้วทำการกลึงปากหน้าแผ่นเหล็กให้มีความเรียบเสมอกัน และให้เหลือขนาดความหนา 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4(ก) แล้วทำการกลึงปลอกแกนจับสำหรับจับยึดกับเพลานาขนาด 1 นิ้ว 1 หุนแล้วเชื่อมแกนจับเพลาลงแผ่นเหล็กดังรูปที่ 4(ข) และวางแม่เหล็กถาวรลงไป ด้านละ 8 ก้อน โดยวางสลับขั้วกันเป็นมุม 45 องศาแล้วทำการหล่อเรซินทับลงไป เพื่อให้แม่เหล็กยึดติดกับตัวมอเตอร์ ดังรูปที่ 4(ค)

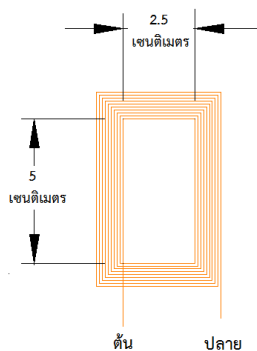


(ก) การออกแบบมอเตอร์ (ข) ลักษณะของมอเตอร์ (ค) การวางขั้วแม่เหล็ก
รูปที่ 4 แสดงการออกแบบมอเตอร์ตรงกลาง

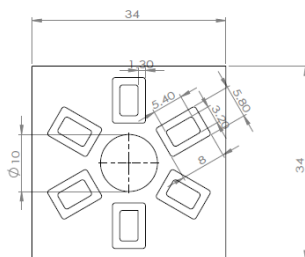
2.2.2 การออกแบบส่วนที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์

ในส่วนแรกจะออกแบบพร้อมในการพันขดลวดโดยขนาดของขดลวดจะขึ้นอยู่กับขนาดของแม่เหล็กที่ใช้ ซึ่งแม่เหล็กที่ใช้มีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร ดังนั้นช่องว่างของขดลวดจึงเท่ากับขนาดของ

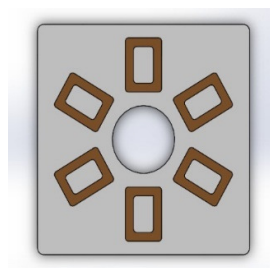
แม่เหล็กหรือใหญ่กว่าได้เพื่อให้แม่เหล็กตัดผ่านขดลวดได้เต็มพื้นที่หน้าตัดของแม่เหล็กเอง โดยจะใช้ลวดเบอร์ 17 A.W.G ในการพันขดลวดจำนวน 6 ขด แต่ละขดจะพัน 140 รอบ เท่ากัน ดังรูปที่ 5 (ก) และวางขดลวดแต่ละขดเป็นมุม 60 องศา ในแต่ละเฟสจะมีขดลวดต่ออนุกรมกัน 2 ขดต่อหนึ่งเฟส โดยแต่ละเฟสจะต่ออนุกรมกับขดที่อยู่ตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 5 (ข) แล้วทำการหล่อเรซินทับลงไปเพื่อยึดติดกับโครงสร้างดังรูปที่ 5 (ค)



(ก) การออกแบบขดลวด



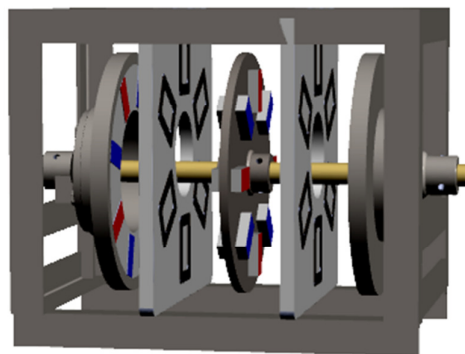
(ข) ลักษณะการวางขดลวด
รูปที่ 5 การสร้างสเตเตอร์



(ค) หล่อเรซินที่สเตเตอร์

2.2.3 การออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โครงสร้างนี้ทำมาจากเหล็กฉากขนาด 1 นิ้ว แล้วเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างที่มี ขนาด กว้าง 32 นิ้ว ยาว 44 นิ้ว สูง 32 นิ้ว โครงสร้างนี้สร้างขึ้นมาเพื่อยึดติดกับตัวโรเตอร์ และ สเตเตอร์ดังรูปที่ 6 โดยโครงสร้างนี้ได้ถูกออกแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อสะดวกในการประกอบกับตัวต้นกำลังในห้องปฏิบัติการ

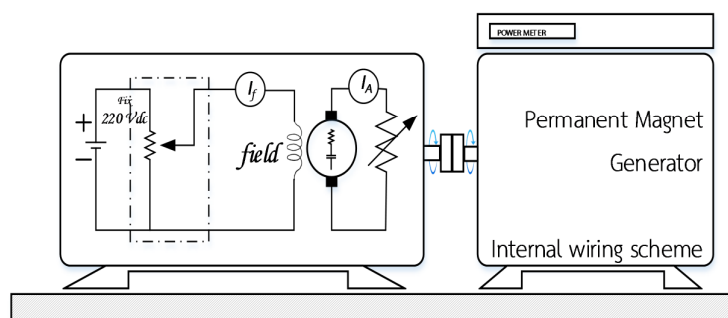
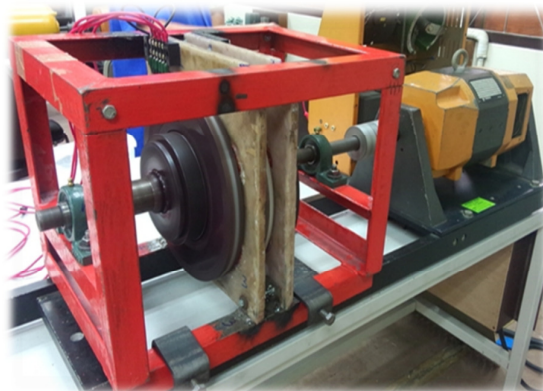


รูปที่ 6 การออกแบบโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3. การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรหมุนตามแนวแกนในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรหมุนตามแนวแกนได้ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับกังหันน้ำแบบไหลขวางในพื้นที่แหล่งน้ำมีหัวน้ำสุทธิไม่สูงมากนัก อยู่ในช่วงประมาณ 3-5 เมตร อัตราการไหล 7-20 ลิตรต่อวินาทีนั้นได้ออกแบบการทดสอบในห้องปฏิบัติมีลักษณะการวางอุปกรณ์และวงจรการต่อดังรูปที่ 7 และวงจรการต่อขดลวดภายในของเครื่องกำเนิดแสดงดังตารางที่ 2

การออกแบบการทดสอบได้อ้างอิงการทดสอบคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับห้องปฏิบัติการและการต่อวงจรการทดสอบนั้นได้ออกแบบให้ตรงกับการนำไปใช้ประโยชน์โดยระบบที่ผลิตไฟฟ้าได้จะถูกนำไปประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) ที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะต้องขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นสองแบบคือแบบสตาร์และเดลต้าเนื่องจากจะมีผลของความสัมพันธ์ของลักษณะกระแส แรงดันกับความเร็วมอเตอร์ แรงบิดโดยผลการทดสอบที่ได้จะนำไปพิจารณาความเหมาะสมของวิธีการต่อและขนาดของแบตเตอรี่ โดยในที่นี้ไม่พิจารณาเรื่องคุณภาพไฟฟ้าที่ผลิตได้เพราะลักษณะการใช้งานของระบบเป็นแบบอิสระที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบสายส่งปกติ



รูปที่ 7 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหมุนตามแนวแกนบนแท่นทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2 วงจรการต่อขดลวดการทดสอบแบบต่างๆ

ลำดับ	ลักษณะการต่อขดลวด	วงจรการต่อ
1	1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ต่อ ขดลวดวงจรแบบสตาร์	
2	2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ต่อ ขดลวดวงจรแบบสตาร์	
3	1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ต่อ ขดลวดวงจรแบบเคลต้า	
4	2 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ต่อ ขดลวดวงจรแบบเคลต้า	

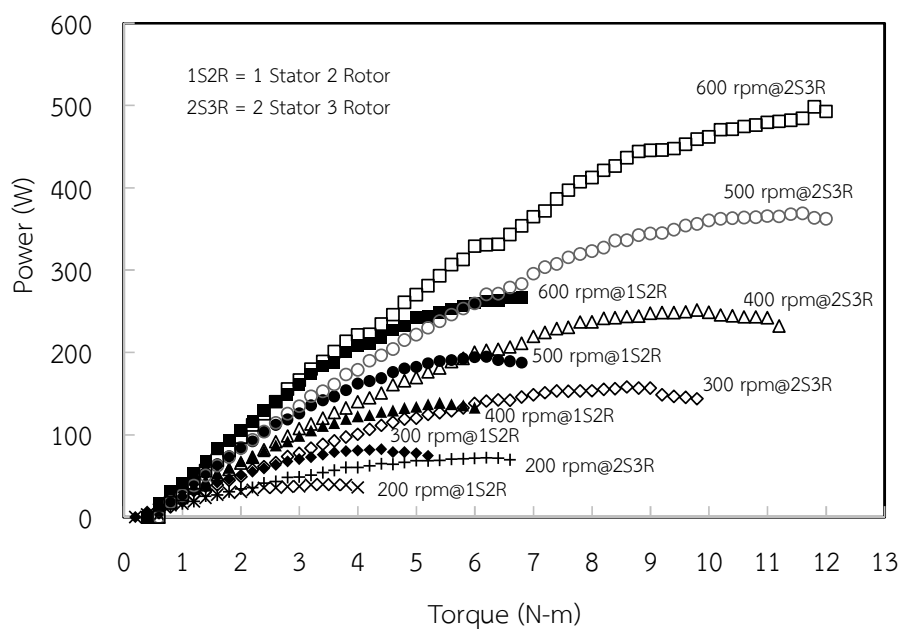
4. ผลการทดลอง

ทางคณะทำงานได้ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรชนิดหมุนตามแนวแกนแบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ และแบบ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ โดยทั้งสองแบบต้องวงจรขดลวดแบบสตาร์และเคลต้า ดังตารางที่ 2 และมีผลการทดลองดังรูปที่ 8 – 12 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

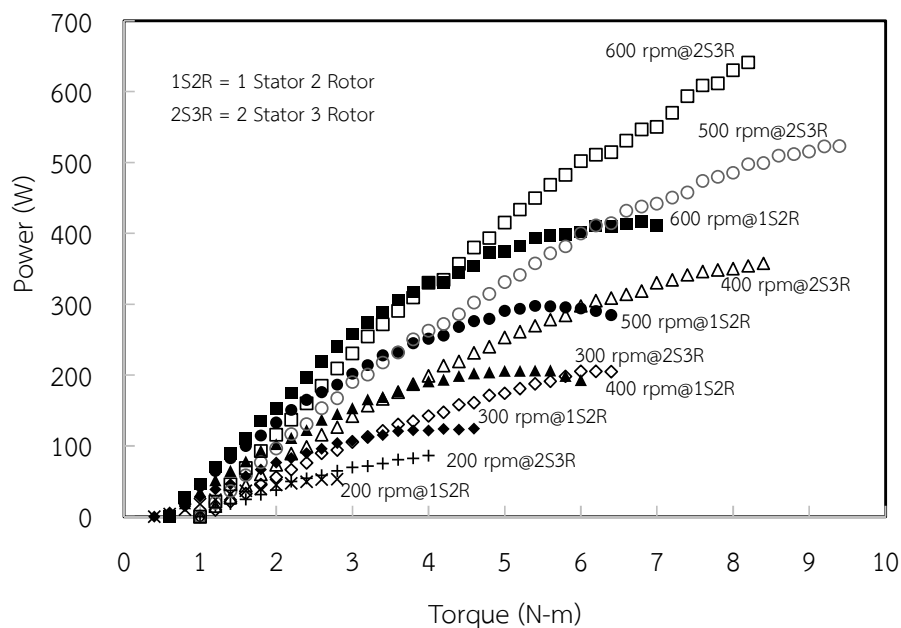
จากรูปที่ 8 และ 9 คือผลการทดสอบจากการหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้านด้านกระแสลับที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าฯ ผลิตได้และแรงบิดด้านอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรชนิดหมุนตามแนวแกนแบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ และแบบ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ ที่ต่อวงจรขดลวดแบบสตาร์และเคลต้า โดยปรับ

ความเร็วรอบของการหมุนที่ 200, 300, 400, 500 และ 600 รอบต่อนาทีพบว่าเมื่อให้แรงบิดด้านอินพุตเพิ่มสูงขึ้น จะให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแบบ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ประมาณสองเท่า ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกแบบพิกัด 300 วัตต์ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีของเครื่องกำเนิดแบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์กับผลการทดลองนั้นกรณีที่ต่อขดลวดแบบเคลด้าได้ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 290 วัตต์และกรณีที่ต่อขดลวดแบบสตาร์ได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 194 วัตต์ที่ ณ ที่ขนาดแรงบิด 6.2 นิวตันเมตรเท่ากัน สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ถ้าต่อขดลวดต่อสตาร์ ได้กำลังไฟฟ้า ที่ผลิตได้สูงสุดที่ 370 วัตต์ ที่แรงบิด 11.6 นิวตันเมตร และถ้าต่อขดลวดต่อแบบเคลด้าได้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ สูงสุดที่ 520 วัตต์ ที่แรงบิด 9.2 นิวตันเมตรตามลำดับ

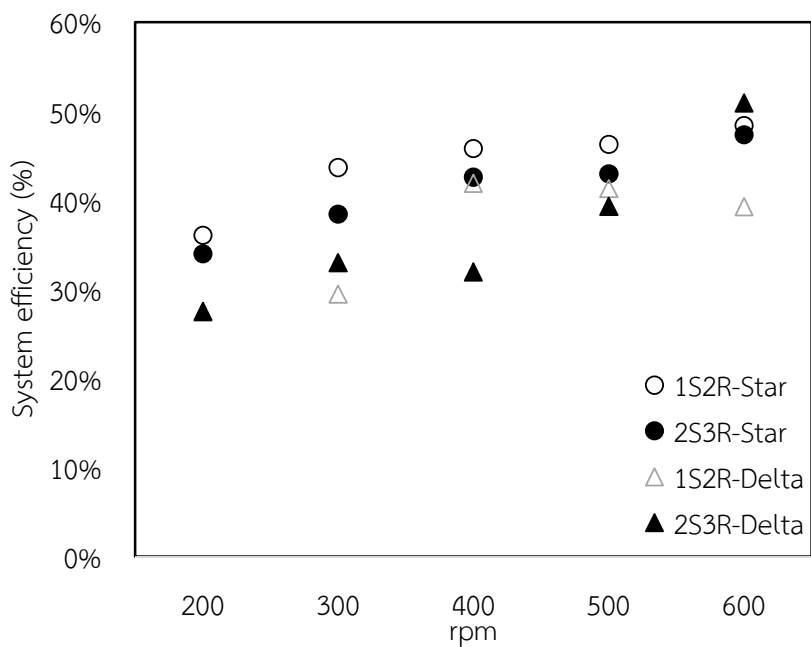
ด้านความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการ ใช้งานนั้นพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 1 สเตเตอร์ 2 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ที่ต่อ ขดลวดแบบสตาร์และเคลด้าประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 30-50% แสดงดังรูปที่ 10



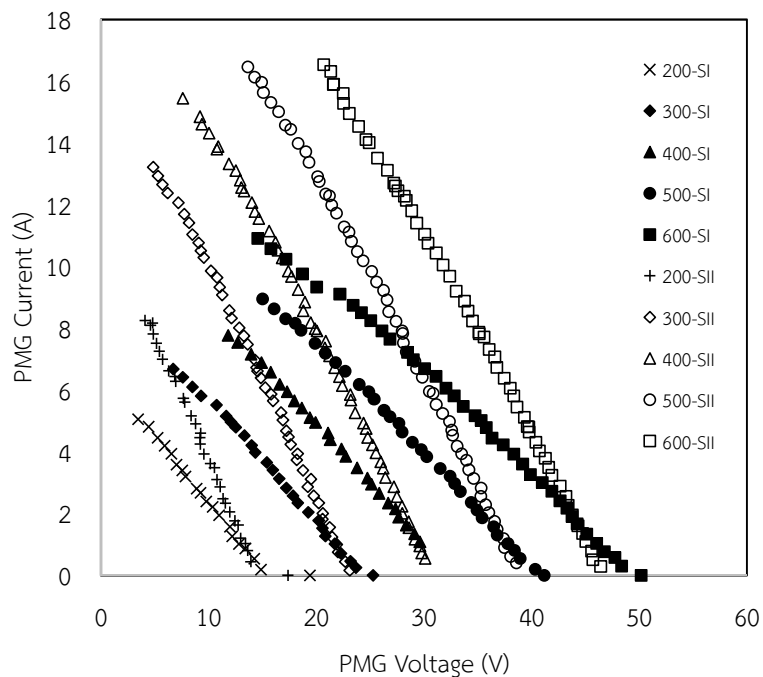
รูปที่ 8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ประกอบด้วย 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ ต่อแบบสตาร์



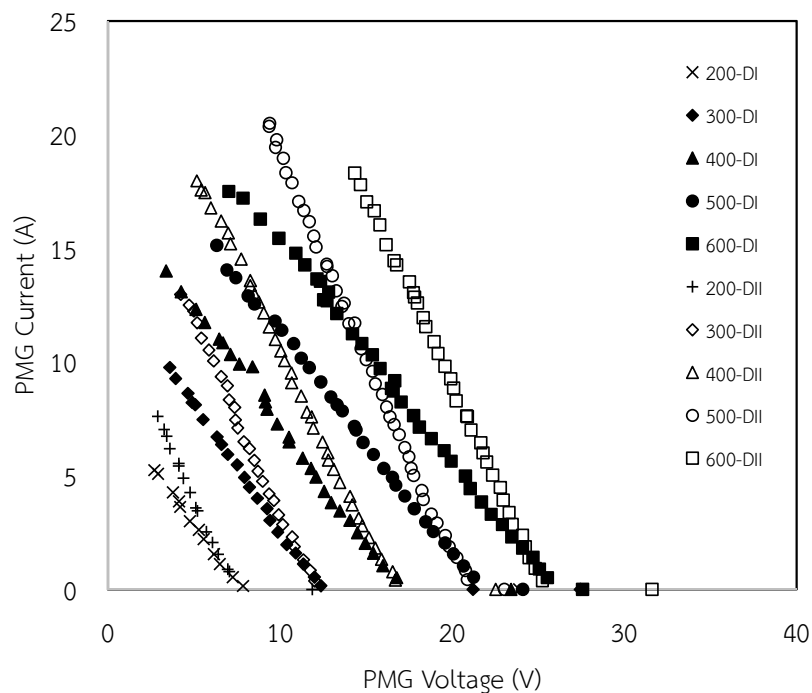
รูปที่ 9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ประกอบด้วย 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ ต่อแบบเดลต้า



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบและความเร็วรอบที่การต่อวงจรภายในแบบต่างๆ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่ต่อวงจรภายในเป็นแบบ
เซลล์แบบ 1 โรเตอร์ 2 สเตเตอร์และ 3 โรเตอร์ 2 สเตเตอร์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่ต่อวงจรภายในเป็นแบบ
เซลล์แบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ และ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์

ผลของความความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่ต้องวงจรภายในเป็นเซลล์และสตาร์ชนิด 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ และ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ ดังรูปที่ 11 และ 12 นั้น พบว่าสามารถใช้ประโยชน์จากกราฟทั้งสองสำหรับหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเพื่อรองรับการออกแบบระบบประจุแบตเตอรี่ ระบบแปรผันพลังงานและการต่อวงจรแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเป็นต้น อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ของการดึงพลังงานที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ครอบคลุมทุกความเร็วรอบหรือแปรเปลี่ยนของแหล่งน้ำที่มีการปรับเปลี่ยนตามฤดูกาล

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรเพื่อทำการทดสอบสมรรถนะทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กชนิดหมุนตามแนวแกนแบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ และแบบ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ ที่ต้องวงจรขดลวดแบบสตาร์และเซลล์ โดยปรับความเร็วรอบของการหมุนที่ 200, 300, 400, 500 และ 600 รอบต่อนาที ได้ทดสอบในห้องปฏิบัติการเครื่องกลไฟฟ้าหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาปัจจัยทางเทคนิคที่มีผลกระทบของการผลิตพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร ในรูปแบบต่างๆ เช่น ลักษณะการต่อขดลวดภายใน การแปรเปลี่ยนพลังงานทางกลเป็นไฟฟ้า ผลของตำแหน่งติดตั้งระยะห่างของช่องอากาศที่ส่งผลต่อแรงเครื่องเหนี่ยวนำไฟฟ้า ค่าความเข้มของแม่เหล็กถาวร และการทดสอบภาคสนามโดยค่าที่ทดสอบได้นี้จะนำไปสู่การปรับปรุงให้มีประโยชน์ทางวิชาการที่สามารถทำงานได้จริงทั้งนี้ ข้อมูลจากการทดสอบสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับประสิทธิภาพ และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ที่จะได้ดำเนินการต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะทำงานขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2559 และขอขอบคุณ ศูนย์ความร่วมมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเพื่อมูลนิธิโครงการหลวงและกิจกรรมวิชาการที่เอื้อเพื่อข้อมูลความต้องการในพื้นที่ และขอขอบคุณคณะทำงานกลุ่มวิจัยระบบพลังงานสะอาด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่สนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E. Fitzgerald, Jr. C. Kingsley and S.D. Umas. *Electric Machinery*, UK: McGraw-Hill, 1990, pp. 95-132.
- [2] บัลลังก์ เนียมมณีและสุขสันต์ หวังสฤติชัยย์. เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ. กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2555, หน้า. 1-15

- [3] คุสิต สุรย์ราช. ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ. กรุงเทพฯ, ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, 2550, หน้า. 1-30
- [4] ไชยหาญ หินเกิด. เครื่องกลไฟฟ้า 1. กรุงเทพฯ, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2537, หน้า. 1-40
- [5] P. Anpalahan and M. Lamperth, "Design of multi-stack axial flux permanent magnet generator for a hybrid electric vehicle," presented at Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC '06. IEEE, 2006.
- [6] T. F. Chan, W. Wang and L. L. Lai, "Magnetic Field in a Transverse- and Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator From 3-D FEA," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, 2012, pp. 1055-1058.
- [7] J. M. Davila-Vilchis and R. S. Mishra, "Performance of a hydrokinetic energy system using an axial-flux permanent magnet generator," Energy, vol. 65, 2014, pp. 631-638.
- [8] G. Ahmad and U. Amin, "Design, construction and study of small scale vertical axis wind turbine based on a magnetically levitated axial flux permanent magnet generator," Renewable Energy, vol. 101, 2017, pp. 286-292.
- [9] W. Fei, P. C. K. Luk and K. Jinupun, "Design and analysis of high-speed coreless axial flux permanent magnet generator with circular magnets and coils," in IET Electric Power Applications, vol. 4, no. 9, 2010, pp. 739-747.
- [10] L. Soderlund, A. Koski, H. Vihriala, J. T. Eriksson and R. Perala, "Design of an axial flux permanent magnet wind power generator," 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444), Cambridge, 1997, pp. 224-228.
- [11] J. R. Bumby and R. Martin, "Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines," Electric Power Applications, IEE Proceedings -, vol. 152, 2005, pp. 1065-1075.
- [12] B. J. Chalmers and E. Spooner, "An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 2, 1999, pp. 251-257.
- [13] G. C. Lee and T. U. Jung, "Design of dual structural axial flux permanent magnet generator for small wind turbine," IEEE 2013 Tencon - Spring, Sydney, NSW, 2013, pp. 90-94.