การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรตามแนวแกน แบบ 3 เฟส หล่อด้วยเรซิ่น

Design and Build for 3 Phases Resin Cast Axial Flux Permanent Magnet Generator

พีรวัจน์ มีสุข[1*], ประจักษ์ บุญภักดี[1], พรชัย พรหฤทัย[1], นฏกร สิริมงคลกาล[1],
ธิดาธิป หารชุมพล[1] และ กวินชัย ต้องตรงทรัพย์[2]
Peerawat Meesuk[1*], Prajak Bunpakdee[1], Pornchai Pornharuthai[1], Natakron Sirimongkolgal[1],
Thidathip Haanchumpol[1] and Kawinchai Tongtrongsub[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
[1]Department of Electrical Engineering and Automation control systems, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Bansomdejchaopraya Rajabhat University
[2]Department of Electromechanic Menufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Bansomdejchaopraya Rajabhat University
*Email: peerawat.me@bsru.ac.th
Received: February 28, 2022; Revised: July 26, 2022; Accepted: July 27, 2022

บทคัดย่อ

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรสำหรับการใช้งานในที่อยู่อาศัยขนาดเล็กเป็นแบบ 1 สเตเตอร์ 2 โรเตอร์ หล่อทับด้วยเรซิ่นสำหรับจับยึดกับโครงสร้าง โดยโรเตอร์ประกอบด้วย 2 ชุดโดยวางประกบกับสเตเตอร์ให้ตำแหน่งของแม่เหล็กตัดแผ่นขดลวดทั้งสองข้างของสเตเตอร์ ผลการทดสอบที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที ขณะที่ไม่มีโหลดต่อวงจรแบบสตาร์วัดแรงดันได้ 235 โวลท์ และในขณะที่จ่ายโหลดเต็มพิกัด ต่อวงจรแบบสตาร์วัดกระแสไฟฟ้าได้ 6.49 แอมแปร์ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ 53 โวลท์ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าที่ 343.97 วัตต์ มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 34.60 เปอร์เซ็นต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าที่ต้องการเช่นกังหันลมและกังหันน้ำได้

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร, พลังงานลม, การทดสอบประสิทธิภาพ

Abstract

The design and construction of a permanent magnet generator for small residential applications is a 1-stator, 2-rotor, cast over resin for bonding to the structure. The rotor consists of 2 sets, placed in conjunction with the stator to position the magnet, cut the coil sheets on both sides of the stator. Test results at 1500 rpm with no load in star connection, 235 volts and with full load Connected the star circuit,

measure electricity at 6.49 amperes, measure voltage to 53 volts , the generator a power of 343.97 watts with an efficiency of 34.60 percent. The generator can be applied to demanding power systems such as wind turbines and water turbines.

Keywords : Permanent magnet generator, Wind Energy, Efficiency Test

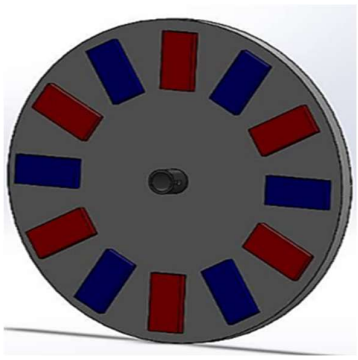
1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้านับว่ามีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิตประจำวัน ซึ่งสถานการณ์การใช้พลังงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่แหล่งเชื้อเพลิงประเภท น้ำมัน ถ่านหิน หรือก๊าซธรรมชาติ มีแต่จะลดลง พลังงานหมุนเวียนจึงเป็นทางเลือกที่กำลังเป็นที่ให้ความสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาวะสิ่งแวดล้อม ในขณะที่บางพื้นที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้าใช้เนื่องจากข้อจำกัดบางประการ จึงทำให้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม หรือพลังงานชีวมวล เป็นต้น มีความสำคัญและนำมาใช้มากขึ้น โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปพลังงานระหว่างพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย [1]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Generator : PMG) มีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวแกน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวรัศมี ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องมาจากเครื่องกำเนิดชนิดนี้ ถ้าเป็นเครื่องกำเนิดขนาดใหญ่จะถูกจำกัดด้วยในเรื่องของโครงสร้างที่ยุ่งยากและมีปัญหาในด้านความร้อนเกิดขึ้นกระจายจากขดลวดอาเมเจอร์ และอีกประเด็นถ้าทำเป็นขนาดเล็กแล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบฟลักซ์ตามแนวรัศมีพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบฟลักซ์ตามแนวแกนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกใหญ่กว่าจึงทำให้มีจำนวนขั้วได้มากกว่า ส่งผลให้เหมาะสมในการนำมาใช้ในงานที่ต้องการความถี่สูงหรืองานที่ใช้ความเร็วรอบต่ำ [2-3]

ในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรแบบให้มีความเร็วรอบต่ำมีการใช้แบบ 2 สเตเตอร์ 3 โรเตอร์ ส่งผลให้ผลิตไฟฟ้าได้เยอะแต่มีการลงทุนที่มากขึ้น [4] ประกอบกับประเทศไทยมีความเหมาะสมกับกังหันลมขนาดเล็ก ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำถึงปานกลาง ติดตั้งได้ในระดับความสูงไม่เกิน 30 เมตร [5] ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรตามแนวแกนสำหรับใช้ในครัวเรือน โดยใช้มอเตอร์จำลองความเร็วลมเป็นตัวให้กำลัง ให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในรูปแบบง่ายและใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบฟลักซ์ตามแนวรัศมีสามารถนำไปเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นพลังงานทดแทน และทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

รูปที่ 1 สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.1 โครงสร้างหลักของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ

- ส่วนที่ติดอยู่กับที่เรียกว่าสเตเตอร์ (Stator) สเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวดเบอร์ 22 สามารถทนกระแสได้สูงสุด 2.95 แอมแปร์ จำนวน 220 รอบต่อขั้ว จำนวน 9 ขด แสดงดังรูปที่ 1

- ส่วนที่เคลื่อนที่เรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) โรเตอร์ประกอบด้วย แม่เหล็กถาวรคุณภาพสูง จำนวน 24 ชุด 12 ขั้ว แสดงดังรูปที่ 2

2.2 การคำนวณพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำได้โดยการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังกำลังโดยใช้ตัวจับยึดแกนเพลาเป็นตัวเชื่อมและควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มีความเร็วตามต้องการ ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนจะมีผลต่อกับแรงดันและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ต้องการใช้ในได้จากสมการ (1)

$$N = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุนโรเตอร์ (rpm.)

f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (Hz)

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ต้องการความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 50 เฮิรตซ์.และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 220 – 240 โวลต์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีจำนวนขั้วแม่เหล็กจำนวน 12 ขั้ว ดังนั้นจึงต้องมีความเร็วรอบเท่ากับ500 รอบต่อนาที ตามสมการที่ (2) จึงจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ที่ต้องการ

$$E_{ave} = \frac{2ABPNZ}{60} \quad (2)$$

โดยที่ E_{ave} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฉลี่ย (V)

A คือ พื้นที่หน้าตัดแม่เหล็กถาวร (m^2)

B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กถาวร (pole)

N คือ จำนวนรอบของการหมุนโรเตอร์ (rpm)

Z คือ จำนวนรอบของขดลวดต่อขด

ใช้แม่เหล็กถาวร ขนาดพื้นที่หน้าตัด เท่ากับ 0.001 ตารางเมตร และมีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 0.4 เทสล่า จากค่าต่าง ๆ ที่กำหนดมาข้างต้นสามารถคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เท่ากับ 17.6 โวลต์ และการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าในงานนี้ได้เลือกใช้ขดลวดเบอร์ 16 เนื่องจากทนกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 3.7 แอมแปร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$I_A = \frac{P_A}{1.732 \times E_{ave}} \quad (3)$$

โดยที่ I_A คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในขดลวดเฟส A (A)

P_A คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านในเฟส A (W)

E_{ave} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกระบบทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ทำการออกแบบโดยการใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังขับทำให้โรเตอร์หมุน พบว่าอัตราความเร็วลมเฉลี่ยในประเทศไทย มีศักยภาพลมไม่สูงมากแต่ก็สามารถใช้ผลิตไฟฟ้าได้ โดยเฉลี่ยประมาณ 4 – 6 เมตรต่อวินาที โดยจากอัตราเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดที่ทราบสามารถแปลงหน่วยความเร็วให้เป็นรอบต่อนาที โดยคิดจากกังหันลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ได้เท่ากับ 382 รอบต่อนาที โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) [6]

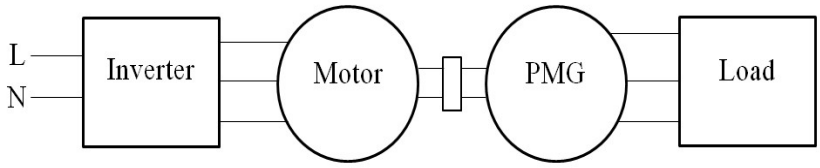
$$RS = \frac{v \times TSR \times 60}{\pi \times D} \quad (4)$$

โดยที่ RS คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (rpm)

V คือ อัตราความเร็วลม (m/s)

TSR คือ อัตราส่วนความเร็ว ณ ปลายในพัดเมื่อเทียบกับความเร็วลม (Tip Speed Ratio) ซึ่งใบพัดชนิด 3 ใบมีค่าเท่ากับ 5 เท่าของความเร็วลม

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกังหันลม (m)



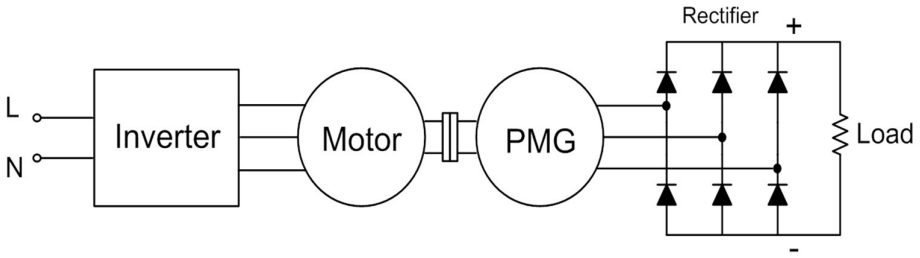
รูปที่ 3 ไดอะแกรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

หลังจากที่ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงดำเนินการสร้างตามแบบ ซึ่งไดอะแกรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3 กำหนดค่าโหลดไฟฟ้า เท่ากับ 300 วัตต์ แต่เนื่องออกแบบให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 3 เฟสสมดุล จึงแบ่งโหลดออกเป็น เฟสละ 100 วัตต์ จะได้ค่ากระแสโหลดแต่ละเฟสเท่ากับ 3.28 แอมแปร์

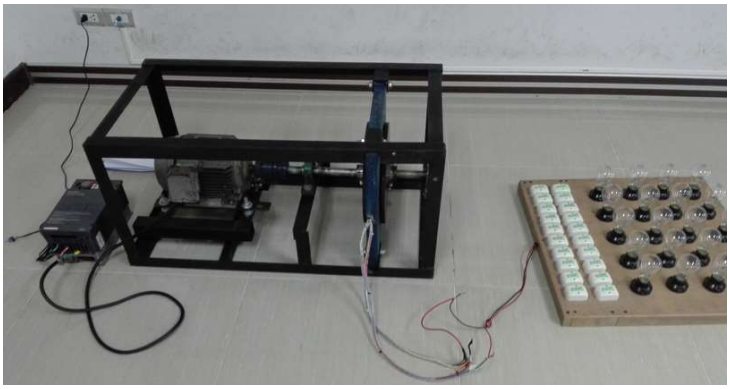
3.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำโดยการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า แทนการใช้พลังงานลมเพราะสามารถควบคุมและสร้างเงื่อนไขในการทดลองได้ง่ายตามที่ต้องการ วงจรการทดลองที่ใช้แสดงดังรูปที่ 4 [7] และการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างแสดงได้ดังรูปที่ 5

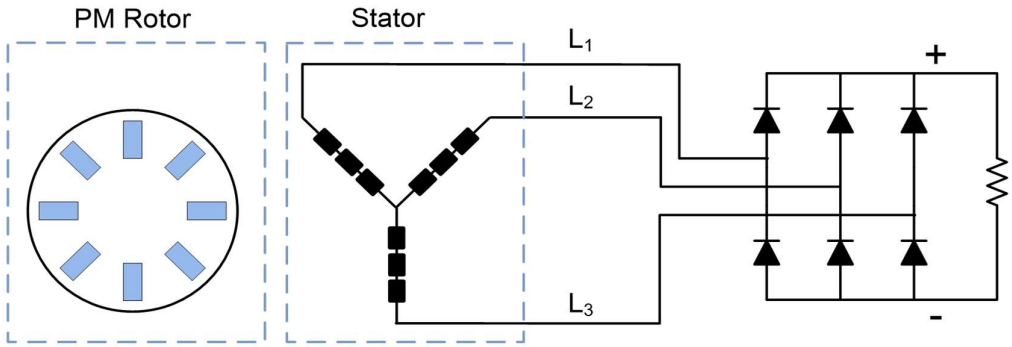
ดำเนินการกำหนดวิธีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.โดยแบ่งออกเป็นการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการต่อวงจรแบบสตาร์ แสดงดังรูปที่ 6 และการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการต่อวงจรแบบเดลต้า แสดงดังรูปที่ 7 [8]



รูปที่ 4 ไดอะแกรมวงจรการทดลอง



รูปที่ 5 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้น



รูปที่ 6 การต่อวงจรขดลวดสเตเตอร์แบบสตาร์

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะความเร็วรอบคงที่.1500 รอบต่อนาที โดยมีการเพิ่มโหลดเป็นลำดับขั้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) เชื่อมต่อเพลาของมอเตอร์เข้ากับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยคัปปลิ้ง

2) ต่อวงจรทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสตาร์ ต่อสายไฟเข้ากับเข้ากับชุดวงจรเรียงกระแสและต่อเข้ากับโหลด

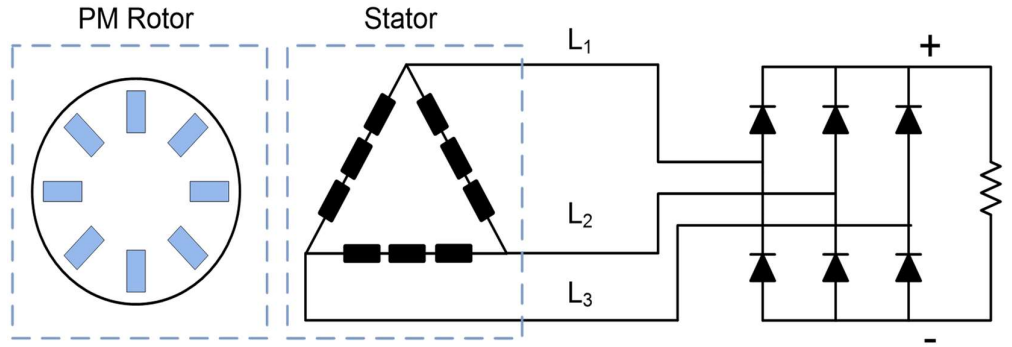
3) ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที โดยมีการเพิ่มโหลดเฟสละ 100 วัตต์ รวมครั้งละ 300 วัตต์ และบันทึกผลการทดลอง

4) ทำการทดลองขั้นตอนที่ 3 ซ้ำ โดยปรับโหลดเพิ่มขึ้นครั้งละ 300 วัตต์ ไปจนถึง 3000 วัตต์ และบันทึกผลการทดลองทุกระดับความเร็ว

5) เปลี่ยนการต่อวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบต่อขดลวดสเตเตอร์แบบเดลต้า จากนั้นทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4

4. ผลการวิจัย

ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการต่อวงจรขดลวดสเตเตอร์แบบสตาร์และแบบเดลต้า, แล้วทำการเพิ่มโหลดเป็นลำดับขั้น โดยผลการทดสอบเป็นดังนี้



รูปที่ 7 การต่อวงจรขดลวดสเตเตอร์แบบเดลต้า

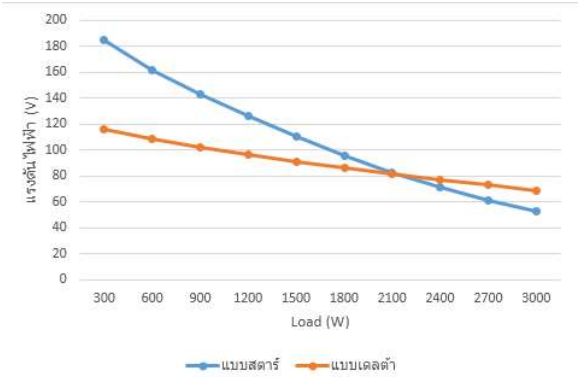
ตารางที่ 1 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะความเร็วรอบคงที่โดยการต่อวงจรแบบสตาร์

$Load$ (W)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)	η (%)
300	1492	185.16	1.48	274.03	18.37
600	1492	161.53	2.52	407.05	27.28
900	1492	142.86	3.41	487.15	32.65
1200	1492	126.10	4.20	529.62	35.50
1500	1492	110.10	4.83	531.78	35.64
1800	1492	95.43	5.37	512.45	34.35
2100	1492	82.50	5.72	471.90	31.63
2400	1492	71.13	6.08	432.47	28.99
2700	1492	61.40	6.33	388.66	26.05
3000	1492	53.00	6.49	343.97	23.05

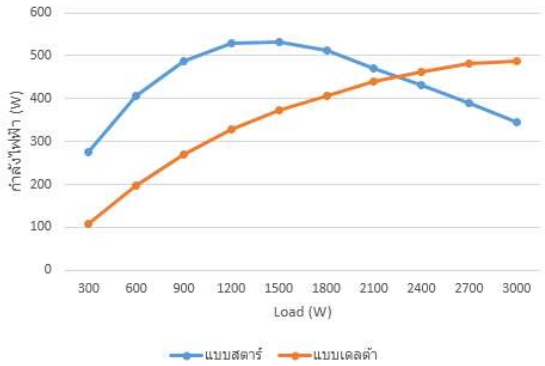
ตารางที่ 2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะความเร็วรอบคงที่โดยการต่อวงจรแบบเดลต้า

$Load$ (W)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)	η (%)
300	1492	116.10	0.92	106.81	7.16
600	1492	108.43	1.83	198.42	13.30
900	1492	102.20	2.63	268.78	18.01
1200	1492	96.20	3.41	328.04	21.99
1500	1492	90.53	4.12	372.98	25.00
1800	1492	86.20	4.71	406.00	27.21
2100	1492	81.86	5.37	439.58	29.46
2400	1492	77.30	5.99	463.02	31.03
2700	1492	73.36	6.56	481.24	32.25
3000	1492	68.26	7.13	486.69	32.62

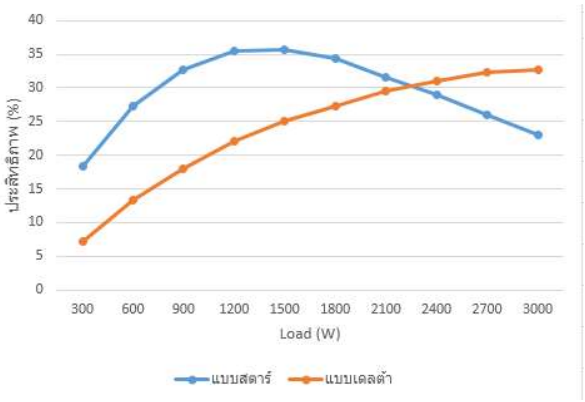
จากตารางที่ 1 และ 2 สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและโหลดที่เป็นหลอดอินแคนเดนเซนต์ ดังรูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและโหลด ดังรูปที่ 9 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและโหลด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดไฟฟ้าและประสิทธิภาพ

จากความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและแรงดันไฟฟ้าในสภาวะความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที และเพิ่มโหลดที่ใช้หลอดอินเคนเดสเซนต์เป็นลำดับขั้นครั้งละ 300 วัตต์ จะเห็นได้ว่า ในขณะที่ทำการเพิ่มโหลดให้กับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นค่อยๆลดลง เนื่องจากกระแสโหลดที่เกิดจากการเพิ่มโหลดหลอดอินแคนเดนเซนต์ในการทดสอบการต่อวงจรขดลวดสเตเตอร์แบบสตาร์และแบบเดลต้ามีแรงดันตกไม่เท่ากันเนื่องการต่อขดลวดทั้งสองแบบมีความต้านทานของขดลวดไม่เท่ากัน ในขณะโหลดมีค่าน้อยแรงดันไฟฟ้าของการต่อขดลวดสเตเตอร์แบบสตาร์จะมีค่าสูงกว่า แต่ในขณะที่จ่ายโหลดเต็มที่ที่ 3000 วัตต์แบบเดลต้าจะมีแรงดันสูงกว่า

ระหว่างโหลดและกำลังไฟฟ้าด้านออกที่เกิดขึ้นในการทดสอบในสภาวะความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที พบว่า ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานและมีการเพิ่มโหลดส่งผลให้กำลังและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยการต่อวงจรแบบสตาร์จะมีกำลังไฟฟ้าขาออกสูงกว่าแบบเดลต้า เนื่องจากความต้านทานโหลดแบบสตาร์มีค่าน้อยกว่าส่งผลให้มีกระแสโหลดมากกว่า โดยแบบสตาร์จะมีกำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 531.78 วัตต์

ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าขาออก เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้พิจารณากำลังขาเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกำลังขาออกของมอเตอร์ต้นกำลังและกำหนดให้คงที่ โดยการต่อแบบสตาร์จะมีประสิทธิภาพสูงสุด 35.64 เปอร์เซนต์ที่โหลด 1,500 วัตต์ และแบบเดลต้ามีประสิทธิภาพสูงสุด 32.62 เปอร์เซนต์ที่โหลด 3,000 วัตต์

5. สรุปผลการวิจัย

ในการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรได้ออกแบบเพื่อทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรโดยชุดการทดสอบได้ออกแบบให้สอดคล้องกับสภาพที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับพลังงานหมุนเวียนในระดับครัวเรือนรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานน้ำ และ พลังงานลม โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรทำงานได้ดีที่สุด คือ การต่อขดลวดสเตเตอร์แบบสตาร์ อยู่ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที โหลด 1,500 วัตต์ ได้แรงดันไฟฟ้า 110.10 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 531.78 วัตต์ และประสิทธิภาพ 35.64 เปอร์เซ็นต์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] C.Hinkerd, *Electrical Machine 1* . Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan) : TPA, 2019 (in Thai).

[2] JF. Gieras, RJ. Wang and MJ. *Kamper, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. in Principles of AFPM Machines. (2nd ed.), Springer, 2008.

[3] P. Wannakarn, "Single-Phase Grid Connected Axial Flux Permanent Magnet Generator System with Reduced Switching Loss and Harmonic Compensation for Various Types of Nonlinear Loads," D.Eng.dissertation, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, 2018 (in Thai).

[4] A. Sanpin, W.Muangjai and T.Somsak2, "Design and Performance Testing of Two rotors Three Stators Permanent Magnet Generator for Cross Flow Turbine," *Pathumwan Academic Journal*, vol. 7, no. 19, pp15-31, May - August 2017. (in Thai).

[5] C.Kasagepongsarn, K.Boonma and M.Suklueng. "The Development of Low-Speed Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) For Small-Scale Wind Turbine," Thaksin.J., vol.20 (1) January-June 2017. pp.75-87 (in Thai).

[6] C. Wisutthirat. *Design and Optimal Parameter Identification of Axial Flux Permanent Magnet Generator,* 2011 (in Thai).

[7] Mittle, V. N., and Mittle, A. *Design of electrical machines.* Standard Publishers, 1996.

[8] J. Ruksakulwittaya, T. Chiangjukong, W. Khoomsiriwong. , J. Eakburanawat, and P. Meesuk. " Analysis of Efficiencyof Permanent Magnet Generator Effect from an Air-Gap," *In Proceedings of The 7th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC- 7)*, 2014 ,pp.55-60 (in Thai).