

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสความเร็วต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบ

Design and Development of a Low-Speed Horizontal Permanent-Magnet Synchronous Generator

ศิริพร เทศทอง¹ ยมลพร เดชบุญ¹ สุดารัตน์ อีร์พิสิฐ¹ ชัยนุสนธ์ เกษตรพงศ์ศาล²
และศุภวุฒิ เบ็ญจุกุล^{1*}

Siriporn Testhong¹, Yamonporn Dechaboon¹, Sudarat Theerapisit¹, Chainuson Kasetphongsarn²
and Supphawut Benjakul^{1*}

¹สาขาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช

²สาขานวัตกรรมเทคโนโลยีพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี

¹Program in Physics, Faculty of Education, Nakhon Si Thammarat University, Nakhon Si Thammarat

²Renewable Energy Technology Innovation Program, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University,
Surat Thani

*Corresponding author e-mail: s.benjakul25@gmail.com

(Received: April 29, 2024, Revised: July 8, 2024, Accepted: December 5, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบ ผลงานที่สร้างขึ้นประกอบจากชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นใหม่ทั้งหมด และนำมาทดสอบการทำงานที่ความเร็วรอบ 100–500 รอบต่อนาที ผลการทดสอบพบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1 กิโลวัตต์ โดยให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น และให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 250 วัตต์ที่สภาวะทดสอบจริง นอกจากนี้ มุมเฟสของแรงดันและกระแสมีค่า 120 องศาทางไฟฟ้า แสดงถึงการทำงานแบบสามเฟสที่ถูกต้อง จึงสรุปได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้จริงและเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วรอบต่ำ

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ อัตราเร็วซิงโครนัส แม่เหล็กถาวรแบบวางราบ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า

ABSTRACT

This research aims to design, construct, and test a low-speed, horizontally mounted permanent-magnet synchronous generator. The prototype was fully fabricated from newly manufactured components and evaluated at operating speeds ranging from 100 to 500 rpm. The test results show that the generator can produce a maximum electrical power output of 1 kW, with the three-phase output voltage increasing proportionally with the rotational speed. Under practical test conditions, the generator delivered an electrical power of approximately 250 W. In addition, the voltage and current exhibited a phase angle of 120 electrical degrees, confirming proper three-phase operation. These findings indicate that the developed generator operates effectively and is well suited for low-speed applications.

Keywords: low-speed generator, synchronous speed, horizontal permanent-magnet type, voltage, current

บทนำ

สถานการณ์ปัจจุบัน ประเทศไทยได้มีการพัฒนาทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง การผลิตกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้ามีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในงานดังกล่าวนี้ ต้องการการควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว และการควบคุมการขับเคลื่อนเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้าที่มีการตอบสนองที่รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง จึงได้มีการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส ความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบ เพื่อตอบสนองการควบคุมที่รวดเร็วกว่า และสามารถลดภาระค่าใช้จ่าย [1], [2]

การพัฒนาสำรวจหาแหล่งพลังงานทดแทน เพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานมีจำนวนมาก การนำพลังงานไปเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง หรือ ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอุปกรณ์ ซึ่งมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงาน เช่น กังหันลมเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นพลังงานสะอาด รวมถึงช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน เพื่อเป็นประโยชน์ต่อชุมชนที่อยู่ห่างไกลที่ไฟฟ้าไม่สามารถเข้าถึงได้ รวมถึงเป็นการเพิ่มขีดความสามารถและพัฒนาแหล่งพลังงานใหม่ให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนราคาพลังงานและการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้ ดังนั้น เมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบทั่วไปมาใช้งานกับแหล่งพลังงานทางเลือกที่อาศัยพลังงานจลน์เป็นต้นกำลัง เช่น พลังงานลมและพลังงานน้ำ มักเกิดปัญหาด้านกำลังไม่เพียงพอ เนื่องจากจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์มีน้อย จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ [3], [4]

ผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบ ซึ่งเหมาะกับกังหันลมความเร็วรอบต่ำ มีประสิทธิภาพสูง และยังมีข้อได้เปรียบด้านราคาจากการลดจำนวนชิ้นส่วนอุปกรณ์ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [5], [6], [7]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบ
2. เพื่อศึกษาและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังกล่าว

การดำเนินงานวิจัย

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

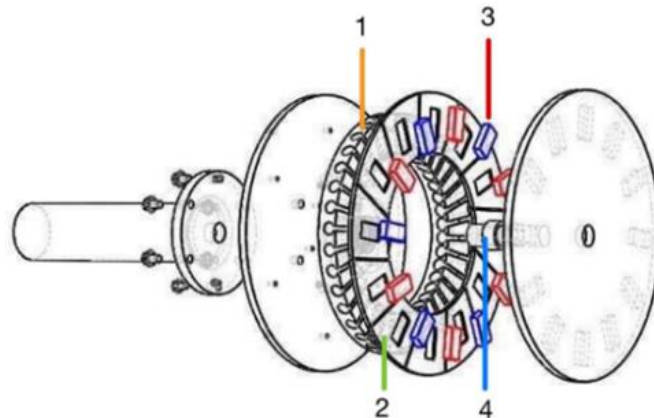
- 1.1 เครื่องวิเคราะห์กำลังการผลิต (VEGA78 Power Quality Analyzer [8])
- 1.2 มอเตอร์ต้นกำลัง
- 1.3 กล่องเกียร์ (อัตราทด 10 : 1) พร้อมชุด coupling
- 1.4 โหลดเทียม (dummy load)
- 1.5 เครื่องปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ต้นกำลัง Delta Inverter VFD220C43A 30 HP 3 Phase [9]

2. การออกแบบ

2.1 การออกแบบสเตเตอร์ (stator design) การออกแบบสเตเตอร์ได้ผสมผสานระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร สามารถแสดงภาพแกนเหล็กสเตเตอร์ โดยมีช่องสลอตสำหรับไว้ใส่ชุดขดลวดสเตเตอร์ โดยแกนเหล็กสเตเตอร์ทำจากแผ่นเหล็กซิลิกอน ซึ่งนำมาอัดแน่นให้ได้ขนาดของแกนเหล็กสเตเตอร์ตามต้องการ โดยระหว่างแผ่นเหล็กซิลิกอนมีฉนวนเคลือบ ดังชิ้นส่วนหมายเลข 1 ในภาพที่ 1

2.2 การออกแบบโรเตอร์ (rotor design) การออกแบบโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถอธิบายได้จากลักษณะของชิ้นส่วนสำคัญสองส่วนที่ทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ ส่วนแรก คือ แกนเหล็กของโรเตอร์ ซึ่งผลิตขึ้นจากกระบวนการหล่อและกลึง เพื่อให้ได้รูปทรงตามต้องการ บริเวณรอบแกนเหล็กมีการเจาะรูหลายตำแหน่ง เพื่อช่วยระบายความร้อนระหว่างการทำงาน อีกทั้งยังช่วยลดน้ำหนักของโรเตอร์ ทำให้การหมุนมีประสิทธิภาพมากขึ้น บริเวณกึ่งกลางของโรเตอร์ถูกออกแบบให้มีรูสำหรับสวมเพลลา เพื่อเป็นจุดศูนย์กลางในการถ่ายเทแรงบิดจากต้นกำลังมาสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ส่วนที่สอง คือ แม่เหล็กถาวร ซึ่งยึดติดอยู่บริเวณรอบแกนเหล็กของโรเตอร์ ดังชิ้นส่วนหมายเลข 2 ในภาพที่ 1 แม่เหล็กเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการสร้างสนามแม่เหล็กที่จำเป็นต่อการผลิตแรงดันไฟฟ้า เมื่อตัวโรเตอร์หมุนผ่านขดลวดสเตเตอร์ โดยการจัดวางแม่เหล็กและการยึดติดอย่างมั่นคงช่วยให้เกิดสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอและลดการสูญเสียระหว่างการทำงาน ทำให้โรเตอร์สามารถหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ประสิทธิภาพสูงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 1 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

2.3 การออกแบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet design) แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการออกแบบเป็นแม่เหล็กนีโอไดเมียม-เหล็ก-โบรอน (NdFeB) ทำให้มีความเหนียวแม่เหล็กสูงและให้สนามแม่เหล็กคงที่อย่างมีประสิทธิภาพ แม่เหล็กเหล่านี้ถูกนำมาติดตั้งบนผิวของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโคจรด้วยความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวร (หมายเลข 3 ในภาพที่ 1) การจัดวางแม่เหล็กบนโรเตอร์ช่วยให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมต่อการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนียวแม่เหล็กโรเตอร์หมุน ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการผลิตแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ การเลือกใช้แม่เหล็กแรงสูงยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แม้ที่ความเร็วรอบต่ำก็สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งาน

2.4 การออกแบบเพลลา เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโคจรชนิดแม่เหล็กถาวร (หมายเลข 4 ในภาพที่ 1) เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานเชิงกลจากต้นกำลังไปยังโรเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วคงที่ตามการทำงานของระบบไฟฟ้า เพลลาผลิตจาก เหล็กเหนียว (mild steel) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง เหนียว และทนต่อแรงดัดและแรงบิดได้ดี จึงเหมาะสมต่อการใช้งานในสภาวะที่ต้องรับแรงหมุนต่อเนื่องเป็นเวลานาน

3. การสร้างและติดตั้งอุปกรณ์

3.1 การสร้างสเตเตอร์ (stator creation) สเตเตอร์ถูกสร้างจากแผ่นเหล็กซิลิคอนความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นผ่านกระบวนการปั๊มขึ้นรูปตามแบบของช่องใส่ขดลวด (slots) จากนั้น นำมาเรียงซ้อนและอัดรวมกันจนแน่น เพื่อให้ได้แกนสเตเตอร์ที่มีความหนาและคุณสมบัติทางแม่เหล็กตามที่ออกแบบไว้ ก่อนพันขดลวดทองแดงลงในร่องสเตเตอร์ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไหลผ่าน

3.2 การสร้างโรเตอร์ (rotor creation) การสร้างโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซึ่งโคจรชนิดแม่เหล็กถาวร เริ่มจากการขึ้นรูปแกนเหล็กด้วยกระบวนการหล่อโลหะให้ได้รูปร่างพื้นฐานตามแบบที่กำหนด หลังจากนั้น จึงนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึง เพื่อให้ได้ความเที่ยงตรงด้านขนาดและผิวสัมผัสที่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณรอบนอก ซึ่งต้องใช้สำหรับติดตั้งแม่เหล็กถาวร นอกจากนี้ ยังมีการเจาะช่อง หรือ ร่อง เพื่อใช้เป็นตำแหน่งยึดแม่เหล็กแรงสูง รวมถึงเพื่อช่วยในการระบายความร้อนของโรเตอร์ขณะหมุนด้วยความเร็วสูง

เมื่อเตรียมแกนเหล็กเสร็จแล้ว จึงทำการติดตั้งแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียมแบบกำลังสูงลงบนผิวของแกนโรเตอร์ทีละชั้น โดยต้องจัดวางขั้วแม่เหล็กให้สลับกันอย่างถูกต้องตามแบบจำลองสนามแม่เหล็ก หลังจากติดแม่เหล็กแล้ว จึงติดกาวเพื่อยึดให้แข็งแรง เพื่อป้องกันการหลุดออกจากแรงเหวี่ยงขณะหมุน และทำให้โรเตอร์มีความแข็งแรงและสมดุลในการทำงาน กระบวนการทั้งหมดนี้ช่วยให้โรเตอร์มีความทนทานต่อแรงกลและแรงเหวี่ยง พร้อมทั้งมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่เหมาะสมสำหรับใช้งานร่วมกับสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

3.3 การสร้างเพลลา (shaft creation) เพลลาถูกกลึงขึ้นรูปด้วยวิธีการชุบเคลือบผิวอย่างแม่นยำ เพื่อให้มีความกลมและสมดุลสูง ลดการสั่นสะเทือนในระหว่างการทำงาน ส่วนปลายเพลลาถูกออกแบบให้สามารถยึดติดกับใบพัด หรือ ชุดส่งกำลังจากภายนอกได้อย่างมั่นคง ขณะที่บริเวณกึ่งกลางเพลลาเป็นตำแหน่งที่เชื่อมต่อกับชุดโรเตอร์ โดยโรเตอร์ (หมายเลข 2 ในภาพที่ 1) ถูกสวมและยึดเข้ากับเพลลาอย่างแน่นหนา เพื่อให้การหมุนของเพลลาส่งผลโดยตรงต่อการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามหลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

อีกด้านหนึ่งของเพลลาถูกออกแบบให้สอดเข้าไปในแบริ่งที่ติดตั้งอยู่ภายในสเตเตอร์ (ชิ้นส่วนหมายเลข 1 ในภาพที่ 1) ทำให้เพลลาสามารถหมุนได้อย่างลื่นไหลโดยมีแรงเสียดทานต่ำ ทั้งยังช่วยรักษาระยะห่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการสัมผัสโดยตรงระหว่างกัน ซึ่งอาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายได้

3.4 การติดตั้งแม่เหล็กแรงสูง (magnet creation) แม่เหล็กแรงสูงเป็นแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียม มีลักษณะโค้งตามผิวโรเตอร์มีจำนวนขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 12 ขั้วประกอบด้วย วงในที่มีขั้วเหนือต่อขั้วใต้ จำนวน 24 ขั้ว แม่เหล็กแรงสูงที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเป็นแม่เหล็ก NdFeB ตามที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งมีค่าแรงยึดเหนี่ยวแม่เหล็กสูงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการฟลักซ์แม่เหล็กหนาแน่นและคงตัว แม้ขนาดจะเล็กกระทัดรัด วัสดุชนิดนี้ถูกผลิตผ่านกระบวนการผงโลหะ (powder metallurgy) จากนั้น ขึ้นรูปด้วยแรงกดและผ่านการเผา (sintering) เพื่อให้ได้โครงสร้างผลึกที่แข็งแรงและมีสมบัติแม่เหล็กสูงสุด

แม่เหล็กแต่ละชิ้นถูกออกแบบให้ โค้งตามผิวโรเตอร์ เพื่อให้แนบสนิทกับแกนโรเตอร์ ทำให้ลดช่องว่างอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางแม่เหล็กดีขึ้น แม่เหล็กทั้งหมดมี 12 ขั้ว และในแต่ละขั้วประกอบด้วยโครงสร้างขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกัน รวมเป็น 24 ขั้วย่อยในวงใน เพื่อสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่สม่ำเสมอและเพิ่มความหนาแน่นของฟลักซ์ในช่องอากาศ เพื่อให้แม่เหล็กยึดติดกับโรเตอร์ได้อย่างปลอดภัย ได้ใช้กาวอีพ็อกซีทนความร้อนเพื่อป้องกันแรงเหวี่ยง (centrifugal force) ขณะที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูง จากภาพที่ 3 ได้แสดงลักษณะของกาวที่ปรากฏรอบแม่เหล็กแต่ละชิ้น ซึ่งมีสีขาวขุ่นและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ การเลือกใช้กาวอีพ็อกซีทนความร้อนถือว่าเหมาะสมสำหรับโรเตอร์ประเภทความเร็วรอบต่ำถึงปานกลาง เนื่องจากกาวประเภทนี้มีคุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่ดี ได้แก่

1. แรงยึดเกาะสูงต่อโลหะและแม่เหล็กถาวร
2. ทนต่อแรงสั่นสะเทือนและแรงเหวี่ยงระดับปานกลาง
3. ทนความร้อนได้ตั้งแต่ 120–180 °C ตามชนิดของกาว

อย่างไรก็ตาม สำหรับโรเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงขึ้น การใช้กาวเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการรับแรงเหวี่ยงที่เพิ่มขึ้น แนะนำให้ใช้แผ่นยึดแม่เหล็ก หรือ โครงครอบเพิ่มเติม

3.5 การพันขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) จากภาพที่ 2 แสดงกระบวนการพันขดลวดสเตเตอร์แบบโครงสร้างรอบวง (distributed winding) โดยลวดทองแดงถูกพันเข้าในร่องสลิตต่ออย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ต่อเนื่อง เมื่อมีกระแสไหล กระบวนการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญดังนี้

1. ติดตั้งแผ่นไมก้าฉนวนในสล็อต เพื่อป้องกันการลัดวงจรจากขอบคมของแผ่นเหล็กซิลิคอน
2. พันลวดทองแดงด้วยจำนวนรอบตามแบบ โดยใช้เครื่องนับรอบและตัวดึงลวด เพื่อควบคุมความตึง
3. การขึ้นรูปขดลวด (coil shaping) ให้เป็นลักษณะโค้งรับกับแกนสเตเตอร์
4. ตรวจสอบค่าความต้านทานและความต่อเนื่อง (continuity test) ก่อนนำไปประกอบจริง
5. เคลือบวานิชฉนวน (insulating varnish) เพื่อเพิ่มความคงทนต่อความร้อนและการสั่นสะเทือน



ภาพที่ 2 การพันขดลวดสเตเตอร์



ภาพที่ 3 การประกอบแม่เหล็กถาวรกับโรเตอร์

3.6 การประกอบเพลา (shaft) เข้ากับโรเตอร์ (rotor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขั้นตอนนี้เป็น การสร้างส่วนที่หมุน (rotating assembly) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการผลิตกระแสไฟฟ้า (โดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก)

ขั้นตอนย่อยที่สำคัญ

3.6.1 การกดอัดโรเตอร์เข้ากับเพลา (rotor press-fit) นำโรเตอร์ (ส่วนที่เป็นแกนเหล็กที่มีขดลวดพันอยู่ตามภาพที่ 4) มากดอัด (press) หรือ สวม (shrink-fit) เข้ากับเพลา โดยใช้เครื่องมือเฉพาะทาง (hydraulic press) เพื่อให้แน่ใจว่าทั้งสองส่วนยึดติดกันอย่างแน่นหนาและศูนย์กลางตรงกัน (concentricity) การประกอบต้องแม่นยำสูง เพื่อลดการสั่นสะเทือนขณะทำงาน

3.6.2 การถ่วงสมดุล (balancing) เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากทางวิศวกรรม ส่วนที่หมุนทั้งหมด (เพลาและโรเตอร์) ต้องถูกนำไปถ่วงสมดุลแบบไดนามิก (dynamic balancing) เพื่อกำจัดความไม่สมดุลของมวล (mass imbalance) ซึ่งช่วยลดการสั่นสะเทือน และยืดอายุการใช้งานของตลับลูกปืน (bearings)

3.7 การประกอบโรเตอร์เข้ากับโครงสเตเตอร์ (stator frame) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังภาพที่ 4 ขั้นตอนนี้เป็น การนำส่วนที่หมุน (rotating assembly) ไปติดตั้งในส่วนที่อยู่กับที่ (stationary part) เพื่อให้เกิดช่องว่างอากาศ (air gap) ที่

เหมาะสม โดยมีขั้นตอนย่อยที่สำคัญ ดังนี้

3.7.1 การติดตั้งตลับลูกปืน (bearing installation) ติดตั้งตลับลูกปืนเข้ากับปลายทั้งสองด้านของเพลลาอย่างระมัดระวัง โดยใช้ความร้อนหรือแรงกด ตลับลูกปืนทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของโรเตอร์และยอมให้เพลลาหมุนได้อย่างราบรื่น

3.7.2 การสวมโรเตอร์เข้าสู่สเตเตอร์ นำเพลลาและโรเตอร์ที่ประกอบแล้วมาสวมเข้าไปในโครงสเตเตอร์ (stator frame) โดยตลับลูกปืนต้องเข้าที่ตรงเบ้า (housing) ที่เตรียมไว้ ขั้นตอนนี้ต้องใช้ความแม่นยำ เพื่อรักษาช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ให้สม่ำเสมอที่สุด

3.7.3 การเชื่อมต่อทางไฟฟ้า เชื่อมต่อปลายขดลวดของสเตเตอร์เข้ากับแผงขั้วต่อ (terminal box) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อนำกระแสไฟฟ้าออกไปใช้งาน



ภาพที่ 4 การประกอบสเตเตอร์ โรเตอร์ และเพลลา

3.8 การติดตั้งและการยึดโครงสร้าง (mounting and final assembly) หลังจากประกอบส่วนแกนกลางแล้ว จากนั้น จึงเป็นการยึดโครงสร้างภายนอก เพื่อความมั่นคงและปลอดภัย แบ่งเป็น

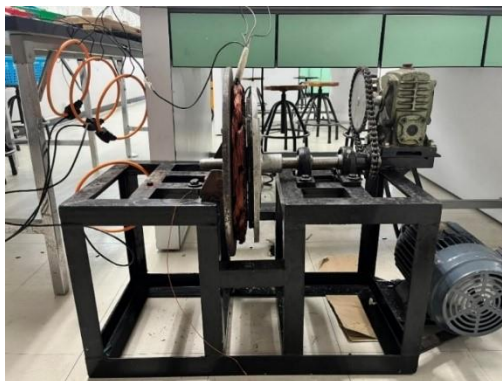
3.8.1 การยึดโครงสร้างเข้ากับฐาน ชุดโรเตอร์/สเตเตอร์ที่ประกอบแล้ว ถูกนำมายึดเข้ากับฐานโครงสร้างเหล็ก (steel frame) ที่แข็งแรงด้วยสลักเกลียวและน็อต (bolts and nuts) เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือน และการเคลื่อนที่ระหว่างการดำเนินงาน

3.8.2 การติดตั้งชุดขับเคลื่อน (coupling to drive mechanism) เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกต่อเข้ากับมอเตอร์ขับเคลื่อนภายนอก (prime mover) ผ่านระบบโซ่และเฟือง (chain and sprocket system) เพื่อควบคุมความเร็วรอบในการหมุน (RPM) ให้แม่นยำตามที่ต้องการทดสอบ โดยได้แสดงภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตามภาพที่ 5

4. การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้า

หลังจากประกอบและยึดเหนี่ยวทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ซึ่งถือว่าได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พร้อมทำงาน จากนั้น เข้าสู่ขั้นตอนการทดสอบคุณลักษณะ เพื่อประเมินประสิทธิภาพ โดยแบ่งเป็น

4.1 การตรวจสอบการหมุน ทำการทดสอบการหมุนเบื้องต้น โดยไม่มีโหลด (no-load test) เพื่อตรวจสอบความราบรื่นในการหมุนและการสั่นสะเทือน โดยทำการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วรอบการหมุนที่กำหนด (rated RPM) คือ 100 ถึง 500 รอบต่อนาที ทำการวัดค่าต่าง ๆ ดังนี้ แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส (line-to-line voltage) แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบนิวตรอน (line-to-neutral voltage) และความถี่ (frequency) ที่ผลิตได้ จากนั้น ตรวจสอบความเสถียรของความถี่ที่ผลิตได้ ตรวจสอบการดึงกระแสไฟฟ้าออกไปใช้งาน โดยได้แสดงการทดสอบดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การติดตั้งและทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 6 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

ผลการวิจัย

เพื่อให้การออกแบบและการทดสอบมีประสิทธิภาพ จึงต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างชัดเจน จากตารางที่ 1 ได้สรุปคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญและค่าตัวแปรหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลเฉพาะทางที่ใช้เป็นพื้นฐานในการประกอบ การตั้งค่า และการวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าในขั้นตอนต่อไป

การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกดำเนินการในสภาวะเปิดวงจร (no-load condition) โดยมีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนกับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ การควบคุมความเร็วรอบ ในการทดสอบนี้ ได้ใช้เครื่องปรับความเร็วรอบ Variable Frequency Drive รุ่น Delta Inverter VFD220C43A 30 HP 3 Phase เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ต้นกำลังอย่างละเอียด ตั้งแต่ 100 รอบต่อนาที จนถึง 500 รอบต่อ นาที สำหรับการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกวัดและบันทึกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า Power Quality Analyzer รุ่น VEGA78 ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้าสามเฟสได้อย่างแม่นยำ จากตารางที่ 2 เป็นผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าในสภาวะไม่มีภาระ กล่าวคือ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส โดยวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างคู่เฟส เช่น ระหว่างเฟส 1 กับ 2 และบันทึกค่าในแต่ละช่วงความเร็วรอบ วัดแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบนิวตรอน โดยวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างแต่ละเฟสกับจุดนิวตรอน และบันทึกค่าในแต่ละช่วงความเร็วรอบ

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าในสภาวะเปิดวงจร ตามที่แสดงในตารางที่ 2 ยืนยันถึงหลักทำงานพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส โดยพบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้แปรผันโดยตรงกับความเร็วรอบการหมุน

ตารางที่ 1 ค่าของตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนิสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบ (3 เฟส)

ตัวแปร	ค่า
ความเร็วรอบในการหมุน	100 - 500 รอบ/นาที
ความแตกต่างของมุมเฟส	0, 120 และ 240 องศา
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	12 ขั้ว
ความถี่ที่ผลิตได้	50 เฮิร์ตซ์
กระแส	8 แอมแปร์
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	1 กิโลวัตต์

ตารางที่ 2 แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส สามเฟสเทียบนิวตรอน และค่าเฉลี่ยของแรงดันทั้งสอง แต่ละความเร็วรอบ

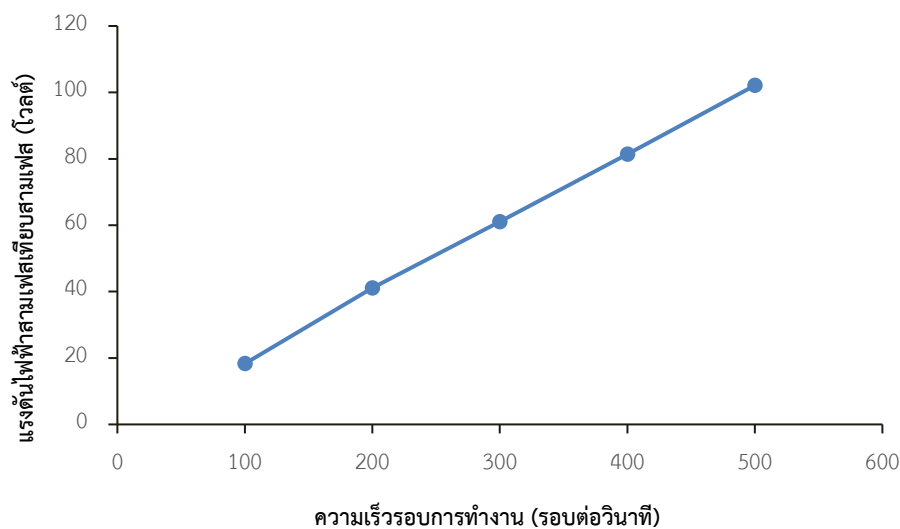
ความเร็วรอบการหมุน (รอบต่อวินาที)	แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสาม เฟส (โวลต์)			แรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบ นิวตรอน (โวลต์)			แรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
	เฟส 1	เฟส 2	เฟส 3		เฟส 1	เฟส 2	เฟส 3	
100	18.3	19.2	17.4	18.3	11.3	11.7	11.5	11.5
150	27.9	29.2	28.7	28.6	17.0	16.6	17.1	16.9
200	39.4	43.1	40.7	41.1	23.7	24.1	24.7	24.2
250	48.6	52.1	49.1	49.9	28.7	29.2	29.6	29.2
300	59.5	63.9	59.9	61.1	35.0	35.8	36.1	35.6
350	71.0	73.9	70.1	71.7	41.6	42.0	41.8	41.8
400	80.4	84.0	79.9	81.4	47.1	47.5	47.5	47.4
450	90.0	94.8	90.8	91.9	53.0	53.1	53.9	53.3
500	100.0	105.3	101.0	102.1	59.1	59.0	59.8	59.3

แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟสเฉลี่ย (V_{LL} , avg) มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มจาก 18.3 V ที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็น 102.1 V ที่ความเร็วสูงสุด 500 รอบ/นาที ดูการนำเสนอความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้ได้ในภาพที่ 7

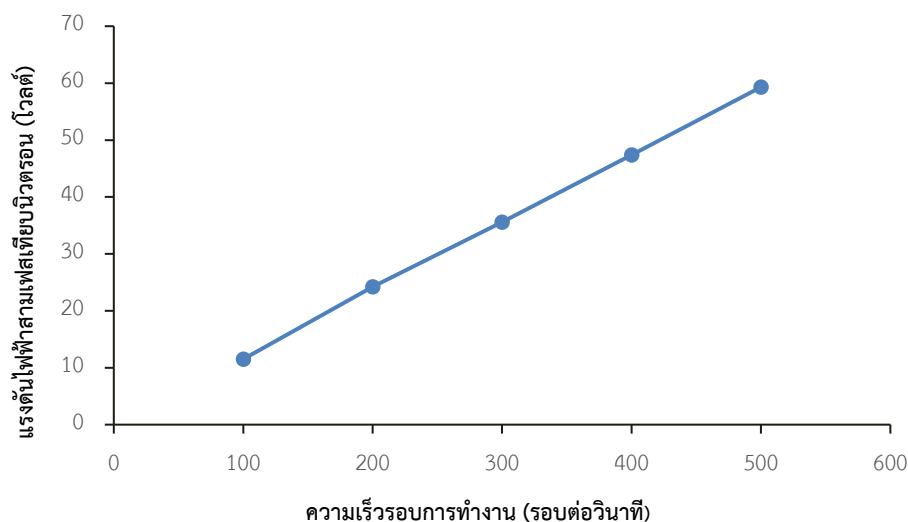
ในทำนองเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบนิวตรอนเฉลี่ย (V_{LN} , avg) ก็แสดงแนวโน้มเชิงเส้นที่สอดคล้องกับ V_{LL} , avg โดยเพิ่มจาก 11.5 V เป็น 59.3 V ในช่วงความเร็วรอบเดียวกัน การวิเคราะห์ความสัมพันธ์นี้ถูกนำเสนอโดยกราฟในภาพที่ 8 การวิเคราะห์ค่าความลาดชัน (slope) ของความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้ช่วยระบุถึงค่าคงที่ของการผลิตแรงดันไฟฟ้าต่อหน่วยความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

นอกจากแนวโน้มเชิงเส้นแล้ว ข้อมูลในตารางที่ 2 ยังให้ข้อสรุปเกี่ยวกับการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส โดยพบว่า ความสมมาตรของการผลิตแรงดันไฟฟ้าในทุกช่วงความเร็วรอบ ทั้งค่า V_{LL} และ V_{LN} ของทั้งสามเฟส (เฟส 1, เฟส 2, เฟส 3) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่า ขดลวดของสเตเตอร์ถูกจัดเรียงอย่างสมมาตร และสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่สมดุล

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งสองรูปแบบ พบว่า ค่า $V_{LN, avg}$ ที่วัดได้เป็นไปตามความสัมพันธ์ทางทฤษฎีในระบบสามเฟสที่ต่อแบบสตาร์ (Wye connection) นั่นคือ $V_{LN} \approx V_{LL} / \sqrt{3}$ การสอดคล้องนี้ยืนยันความถูกต้องของวิธีการวัดและคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้าที่ผลิตได้



ภาพที่ 7 แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเฉลี่ยสามเฟสที่ขึ้นกับความเร็วรอบ



ภาพที่ 8 แรงดันไฟฟ้าสามเฟสเฉลี่ยนิวตรอนที่ขึ้นกับความเร็วรอบ

การทดสอบคุณลักษณะการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ถูกดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีภาระทางไฟฟ้า โดยใช้โหลดเทียม dummy load ขนาด 220 วัตต์ ซึ่งถูกควบคุมให้ดึงกระแสไฟฟ้าออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในปริมาณที่กำหนดไว้ การกำหนดภาระลักษณะนี้ส่งผลให้ กระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าคงที่ 2.2 แอมแปร์ ตลอดช่วงการทดสอบความเร็วรอบ ตั้งแต่ 200 รอบ/นาทิจ ถึง 500 รอบ/นาทิจ ดังที่ปรากฏในตารางที่ 3

การที่กระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากันและคงที่ 2.2 แอมแปร์นั้น ชี้ให้เห็นว่าการทดสอบนี้ เป็นการศึกษาคคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้ภาระไฟฟ้าที่มีความสมดุล (balanced load) และมีการกำหนดกระแสใช้งานไว้ล่วงหน้า

แม้ว่ากระแสไฟฟ้าถูกควบคุมให้คงที่ แต่พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) มีการแปรผันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้น จาก 56.0 วัตต์ ที่ 200 รอบ/นาทิจ เป็น 250.0 วัตต์ ที่ 500 รอบ/นาทิจ การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าเป็นผลโดยตรงจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส V_{LL} ซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วรอบการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ ตามผลของค่า V_{LL} จากตารางที่ 2 โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส ดังนี้

$$P = \sqrt{3} V_{LL} I \cos \theta \quad (1)$$

โดย $\cos \theta$ คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เนื่องจากกระแสไฟฟ้า I มีค่าคงที่ 2.2 A ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า V_{LL} ตามความเร็วรอบ จึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายให้กับโหลดเทียมมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 3 กระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟสและกำลังไฟฟ้า ซึ่งขึ้นกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

ความเร็วรอบการ ทำงาน (รอบต่อนาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) เฟส 1	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) เฟส 2	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) เฟส 3	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
100	-	-	-	-	-
150	-	-	-	-	-
200	2.2	2.2	2.2	2.2	56.0
250	2.2	2.2	2.2	2.2	90.0
300	2.2	2.2	2.2	2.2	120.0
350	2.2	2.2	2.2	2.2	150.0
400	2.2	2.2	2.2	2.2	188.0
450	2.2	2.2	2.2	2.2	221.0
500	2.2	2.2	2.2	2.2	250.0

สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

ผลการวิจัยยืนยันว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารี่ความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรแบบวางราบที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นจากชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นใหม่ทั้งหมด สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีโครงสร้างการทำงานแบบแกนดิสก์ (axial flux) ซึ่งประกอบด้วยสเตเตอร์ที่มีการพันขดลวดทองแดงสามเฟสอย่างสมมาตร และโรเตอร์ที่มีการติดตั้งแม่เหล็กถาวรนีโอไดเมียม NdFeB จำนวน 12 ขั้ว การออกแบบนี้มุ่งเน้นการเพิ่มความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่ำตามความต้องการของงานวิจัย

เริ่มต้นจากการทดสอบในสภาวะเปิดวงจร (no-load) ซึ่งปรากฏผลในตารางที่ 2 ว่า แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจนและแปรผันตรงกับความเร็วรอบการหมุน อันเป็นไปตามกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ โดยแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟสเฉลี่ย $V_{LL, avg}$ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 18.3 V ที่ความเร็ว 100 รอบ/นาที ไปจนถึง 102.1 V ที่ 500 รอบ/นาที (แสดงในภาพที่ 7) และแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบนิวตรอนเฉลี่ย $V_{LN, avg}$ ก็มีแนวโน้มเดียวกัน (แสดงในภาพที่ 8) นอกจากนี้ แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังแสดงถึงความสมดุลของเฟสที่สูง ซึ่งยืนยันความสมมาตรของการออกแบบขดลวดสเตเตอร์

สำหรับการทดสอบในสภาวะมีภาระทางไฟฟ้า ซึ่งใช้โหลดเทียบขนาด 220 วัตต์ที่ถูกควบคุมให้ดึงกระแสไฟฟ้าคงที่ 2.2 แอมแปร์ พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีการแปรผันโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าตามความเร็วรอบ เนื่องจากกระแสไฟฟ้า I_L มีค่าคงที่ตามการควบคุมของภาระไฟฟ้า ส่งผลให้กำลังไฟฟ้า P เพิ่มขึ้นจาก 56.0 วัตต์ ที่ 200 รอบ/นาที เป็น 250.0 วัตต์ ที่ 500 รอบ/นาที อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 3 ชี้ให้เห็นว่าไม่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าได้ที่ความเร็วรอบ 100 และ 150 รอบ/นาที แม้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการหมุนอยู่ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ในย่านความเร็วต่ำนี้ ยังไม่สูงพอที่จะเอาชนะแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำเพื่อการกระตุ้น (minimum activation voltage) ของโหลดเทียบให้สามารถเริ่มดึงกระแส 2.2 แอมแปร์ ได้อย่างสมบูรณ์ จึงสรุปได้ว่า ค่าความเร็ว 200 รอบ/นาที คือ ความเร็วรอบเริ่มต้นทำงาน (cut-in speed) ขั้นต่ำสำหรับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับภาระไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะเฉพาะนี้

ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบคุณลักษณะการผลิตกำลังไฟฟ้าภายใต้ภาระ (on-load testing) ควรพิจารณาเพิ่มขนาดของภาระไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบให้ใกล้เคียงกับพิกัดสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้จากการทดสอบจริง คือ 250 วัตต์ ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าตามพิกัดถึง 1 กิโลวัตต์ การใช้โหลดทดสอบ 18 ดวง ในปัจจุบัน อาจเป็นภาระไฟฟ้าที่มีค่าจำกัดเกินไป เมื่อเทียบกับศักยภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น การเพิ่มภาระไฟฟ้าทดสอบให้มีขนาดประมาณ 200 วัตต์ ขึ้นไป หรือ เพิ่มจำนวน/ขนาดของโหลดเทียบ จะช่วยให้สามารถสังเกตและวิเคราะห์ความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เข้าใกล้พิกัด 1 กิโลวัตต์ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] พีรวัจน์ มีสุข, ชุมพล วันศรี และกวินชัย ต้องตรงทรัพย์, “การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์,” วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม: เทพสตรี I-TECH, ปีที่ 16, ฉ. 2, pp. 78-86, 2564.

- [2] ภัทรา กุลเดชชัยชาญ, “ศึกษาการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร,” ปริญญานิพนธ์ ปริญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, 2551.
- [3] กานต์ธิดา บุญมา, (2561, 16 ตุลาคม), การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอัตราเร็วรอบต่ำด้วยแม่เหล็กแรงสูง, [ออนไลน์]. จาก: <https://sci.sru.ac.th/wp-content/uploads/2021/02/the-development-of-low-speed-permanent-magnet-synchronous-generator-pmsg-for-small-scale-wind-turbine.pdf>
- [4] ชัยนุสนธ์ เกษตรพงศ์ศาล, กานต์ธิดา บุญมา และมนตรี สุขเลื่อง, “การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กแรงสูงสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก,” *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 20, ฉ. 1, pp. 75-87, 2560.
- [5] วิฑิต วรรณเลิศลักษณ์, (2560, 11 มิถุนายน), กฎของฟาราเดย์, [ออนไลน์]. จาก: <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7238-2017-06-11-14-17-45>
- [6] ชัยนุสนธ์ เกษตรพงศ์ศาล, “การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 25, ฉ. 3, 2558.
- [7] A. Habib, H. S. Che, N. A. Rahim, M. Tousizadeh and E. Sulaiman, “A fully coreless Multi-Stator Multi-Rotor (MSMR) AFPM generator with combination of conventional and Halbach magnet arrays,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 2, pp. 589–600, 2020.
- [8] HT Instruments, (2025, December 10), VEGA 78 4 CTs HTFLEX33D for CAT IV Power Quality Analyzer and Energy Logger, [Online]. Available: <https://www.tequipment.net/HT-Instruments/VEGA-78/Power-Quality-Analyzer/>
- [9] I. D. System, (2025, December 10), Delta Inverter C2000 Series, Model: VFD220C43A-21 22kW 30HP 460V 3-Phase, [Online]. Available: <https://www.intechdelta-online.net/product/326/delta-inverter-c2000-series-model-vfd220c43a-21-22kw-30hp-460v-3-phase>