การพัฒนาชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นทุนต่ำ สำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า

Development of a Low-Cost Synchronous Generator Experimental Test Bench for Power Grid Synchronization

สุนทร ปลื้มสง[1*]

Sunthorn Pluemsong[1*]

[1*]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช 1 หมู่ 4 ตำบลท่างิ้ว อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280
E-mail: yottong2000@gmail.com

[1*]Faculty of Industrial Technology Nakhon si Thammarat Rajabhat University
1 M. 4, Tha-ngew, Muang, Nakhon si Thammarat 80280 E-mail: yottong2000@gmail.com

วันที่รับบทความ 31 มีนาคม 2563 **วันที่รับแก้ไขบทความ** 14 มิถุนายน 2563 **วันที่ตอบรับบทความ** 15 มิถุนายน 2563
Received: Mar. 31, 2020 **Revised:** Jun. 14, 2020 **Accepted:** Jun. 15, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสราคาถูก เพื่อใช้ทดลองการต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า ชุดทดลองถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ดัดแปลงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟสแบบเพลาลอยทั่วไป พิกัด 220 V 50 Hz 2 kVA และใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องต้นกำลังขับโดยทำงานร่วมกับชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดทดลองที่ได้จากการวิจัยถูกนำไปทดสอบการต่อขนานกับระบบไฟฟ้า 380 V 50 Hz ณ ห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบพบว่าสามารถต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าได้ สามารถจ่ายกำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟเข้าโครงข่ายไฟฟ้าได้ และสามารถรับกำลังรีแอกทีฟจากโครงข่ายไฟฟ้าได้ตามต้องการ ข้อได้เปรียบของชุดทดลองนี้ คือ การที่สามารถผลิตขึ้นมาใช้งานเองโดยใช้ส่วนประกอบที่หาซื้อได้ภายในประเทศ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส, ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส, การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

Abstract

This research aimed to develop a low-cost synchronous generator experimental test bench (LCSGEB) for power grid synchronization. The LCSGEB was designed and built using a synchronous generator which was modified from a 1 phase 220 V 50 Hz 2 kVA brush alternator generator, and using an induction motor as the prime mover, working together with a synchronizing module. The LCSGEB was obtained by 380 V 50 Hz power grid synchronization testing based in the laboratory. The results revealed that the LCSGEB was able to synchronize the power grid, supply active and reactive power to the grid, and absorb reactive power from the grid as necessary. Furthermore,

the LCSGEB was able to be produced from local components reducing the cost, which is an advantage of this research.

Keywords: Synchronous Generator, Synchronous Generator Test Bench, Synchronous Generator line Synchronization

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยมีอัตราความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันมีสาเหตุมาจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่ขยายตัวขึ้นเรื่อย ๆ ทุกปี ตามข้อมูลสถิติความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 – 2561 (Electricity Generating Authority of Thailand, 2019) พบว่าค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของประเทศเพิ่มขึ้นจาก 26,942 MW เป็น 28,338 MW จากปัญหาดังกล่าวรัฐบาลจึงได้จัดทำแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าระยะยาวหรือแผน PDP ขึ้น เพื่อให้ประเทศมีความมั่นคงด้านพลังงาน โดยเฉพาะกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศจะต้องมีเพียงพอต่อการใช้งาน ปัจจุบันกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยส่วนใหญ่มาจากโรงไฟฟ้าของรัฐบาล (กฟผ.) และของเอกชน ทั้งรายใหญ่ รายเล็ก รายเล็กมาก จำนวนหลายต่อหลายโรงกระจายอยู่ทั่วประเทศ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกขนาน (Synchronize) เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Power Grid) เพื่อร่วมกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ขั้นตอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และการควบคุมการจ่ายกำลังของโรงไฟฟ้านั้น ถึงแม้จะมีระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย แต่ต้องกระทำโดยผู้มีความรู้และมีความชำนาญ ดังนั้นในส่วนของภาคการศึกษาซึ่งมีหน้าที่เตรียมกำลังคนออกไปทำงาน จึงจำเป็นต้องพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องดังกล่าว ซึ่งการใช้ชุดทดลองเข้ามาช่วยในการจัดการเรียนการสอนก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจได้ง่ายขึ้นจากการปฏิบัติจริง

จากการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่นิยมใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ประกอบด้วยชุด LabVolt Series ของ Festo Inc. ประเทศเยอรมัน (Festo Didactic Inc., 2017) และของ Nvis Technology ประเทศอินเดีย (Nvis Tecnologies Pvt., 2017) พบว่าในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผู้ผลิตใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส แบบแยกกระตุ้นที่ออกแบบมาสำหรับชุดทดลองนี้โดยเฉพาะ ส่วนเครื่องต้นกำลังขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชั้นท์ รวมไปถึงชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ และชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้หลอดไฟซิงโครไนซ์หรือซิงโครสโคป ปัญหาของชุดทดลองเหล่านี้คือมีราคาแพง เนื่องจากเป็นของต่างประเทศ ต้องใช้งบประมาณจัดซื้อที่สูง

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีแนวคิดว่าถ้าสามารถพัฒนาชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขึ้นมาใช้งานเอง โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ดัดแปลงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเพลาลอยทั่วไป ซึ่งหาซื้อได้ง่ายและราคาถูกแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับชุดทดลอง และใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งหาซื้อได้ง่ายและราคาถูกเช่นเดียวกันเป็นเครื่องต้นกำลังแทนการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันท์ รวมทั้งใช้ชุดขับเคลื่อนแปรผันความถี่ได้ (Variable Frequency Drive: VFD) หรือที่นิยมเรียกกันว่าเครื่อง VFD เป็นชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แทนชุดควบคุม

ความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในชุดทดลองจากต่างประเทศ รวมไปถึงดำเนินการออกแบบและสร้างส่วนประกอบอื่น ๆ ของชุดทดลองเพิ่มเติมขึ้นมา จะได้ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นแบบที่มีราคาถูกลง ทำให้เกิดประโยชน์ต่อการจัดการเรียนการสอนและช่วยชาติประหยัดงบประมาณได้มาก

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับโครงข่ายไฟฟ้าอยู่บ้าง ประกอบด้วย การออกแบบและสร้างชุดขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติต้นทุนต่ำโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เป็นตัวประมวลผลและใช้วงจรตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเข้าไปขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า (Sen, S. et al., 2014) นอกจากนั้นก็จะเป็นการพัฒนาชุดฝึกเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์ผ่านอินเตอร์เน็ต เพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนสำหรับนักศึกษาที่เรียนไปด้วยทำงานไปด้วยซึ่งกำลังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในยุโรป (Herrera, M.R.S. et al., 2013) และการวิจัยปฏิบัติการทดลองแบบเสมือนจริงผ่านทางระบบอินเตอร์เน็ต ในหัวข้อการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าสำหรับนักศึกษา เพื่อเตรียมตัวศึกษาก่อนลงปฏิบัติการจริงในห้องเรียน (Martis, C.S. et al., 2006)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อทดลองใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ดัดแปลงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเพลาลอยทั่วไป เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสของชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นทุนต่ำสำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า

2.2 เพื่อทดลองใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำร่วมกับเครื่อง VFD เป็นชุดเครื่องต้นกำลังขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นทุนต่ำ สำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า

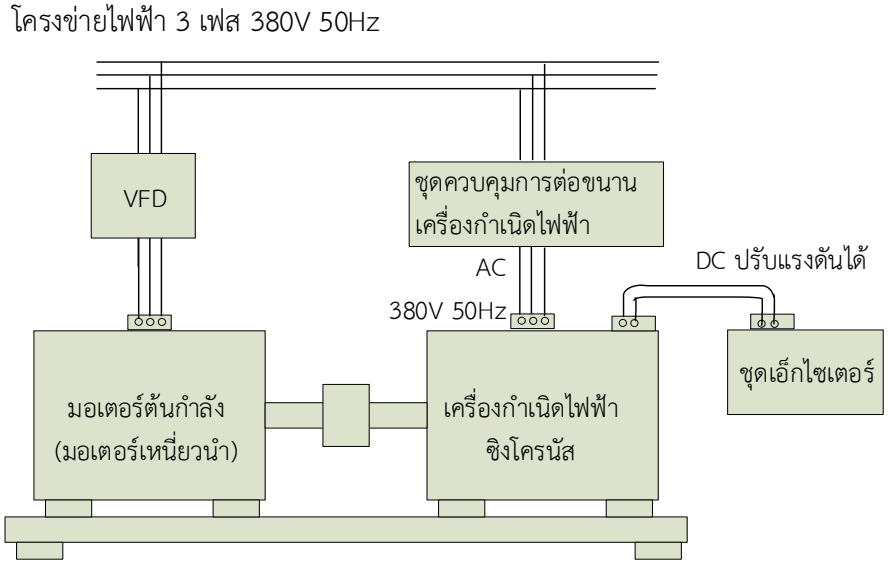
2.3 เพื่อพัฒนาต้นแบบชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นทุนต่ำสำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า สำหรับนำไปใช้จัดการเรียนการสอนแทนชุดทดลองจากต่างประเทศ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กรอบความคิดของชุดทดลองที่นำเสนอ

ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้าประกอบไปด้วย 5 ส่วนประกอบหลัก ๆ คือ 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2) มอเตอร์ต้นกำลังขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3) ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ 4) ชุดเอ็กไซเตอร์ หรือชุดจ่ายกระแสฟิลด์เพื่อกระตุ้นหรือทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 5) ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในชุดทดลองนี้ จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส แบบแยกกระตุ้น (Separately Excited) ซึ่งขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์จะถูกต่อออกไปภายนอกตัวเครื่อง เพื่อรับการกระตุ้นจากชุดเอ็กไซเตอร์ที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ เนื่องจากในการทดลองจะต้องมีการปรับค่ากระแสฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อย่างอิสระ การพัฒนาชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นทุนต่ำสำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้าในครั้งนี้

ได้กำหนดกรอบความคิดไว้ คือ ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะใช้การดัดแปลงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพลาลอยทั่วไป มอเตอร์ต้นกำลังจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จะใช้เครื่อง VFD ซึ่งทั้ง 3 ส่วนนี้สามารถหาซื้อได้จากร้านขายสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป ส่วนชุดเอ็กไซเตอร์และชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำขึ้นมาใช้เองเพื่อลดต้นทุนของชุดทดลองให้ได้มากที่สุด ภาพรวมทั้งหมดของชุดทดลองที่นำเสนอจะเป็นดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่นำเสนอ

3.2 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เลือกมาดัดแปลงใช้งานในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพลาลอยทั่วไป มีลักษณะดังภาพที่ 2 ก. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นตัวเอง (Self-Excited) ที่สเตเตอร์มีขดลวดอาร์เมเจอร์พันอยู่ ที่โรเตอร์เป็นขั้วแม่เหล็กแบบขั้วยื่น (Salient Pole) มีขดลวดสนามแม่เหล็กพันอยู่ ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบไปด้วยขดลวดกระตุ้นที่พันรวมอยู่กับขดลวดอาเมเจอร์ แรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดกระตุ้นเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ถูกนำมาผ่านไดโอดบริดจ์เพื่อแปลงผันให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ก่อนถูกส่งไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์โดยผ่านทางแปรงถ่านและสลิปริง ดังภาพที่ 2 ข. ในงานวิจัยได้เลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายี่ห้อ FUJIWA ขนาด 1 เฟส พิกัด 220 V 50 Hz 1,500 rpm 2 kVA ซึ่งเป็นรุ่นที่เล็กที่สุด นำมาดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส แบบแยกกระตุ้น

ก. สภาพภายนอกตัวเครื่อง ข. ส่วนของไดโอดบริดจ์ สลิปริง และแปรงถ่าน

ภาพที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เลือกมาใช้งาน

การดัดแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องนี้ ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส แบบแยกกระตุ้นนั้น ที่สเตเตอร์จะต้องรื้อขดลวดออกทั้งหมดแล้วพันขดลวดอาร์เมเจอร์ใหม่เป็นแบบ 3 เฟส ต่อขดลวดแบบ Y โดยพันขดลวดแบบเศษส่วนพิตช์ (Fractional Pitch) เพื่อลดฮาร์มอนิกในแรงดันไลน์ให้ได้มากที่สุด (Jha, R.K. et al., 2013) ส่วนระบบกระตุ้นเดิมทั้งขดลวดกระตุ้นและไดโอดบริดจ์จะถูกรื้อออก และทำการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกมาภายนอกโดยตรง โดยผ่านทางสลิปริงและแปรงถ่าน ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายหลังจากดัดแปลงแล้วเป็นไปตามตารางที่ 1

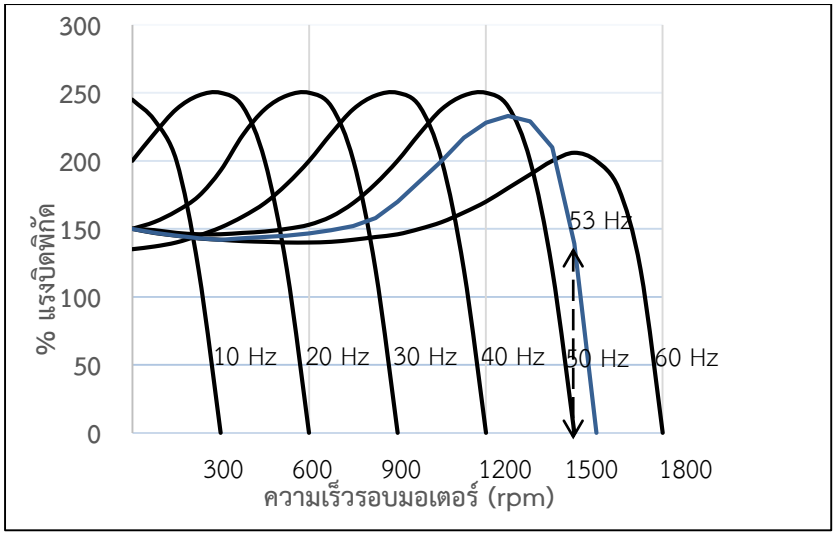
ตารางที่ 1 ค่าพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

กำลัง	**2 kVA**	**ความเร็วรอบ**	**1,500 rpm**
จำนวนเฟส	3	จำนวน pole	4
แรงดัน	380 V		
กระแส	3.0 A	แรงดันกระตุ้น	33 V
ความถี่	50 Hz	กระแสกระตุ้น	2 A

3.3 การออกแบบมอเตอร์ต้นกำลังและชุดควบคุมความเร็วรอบ

เลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2.2 kW 220/380 V 50 Hz 4 pole 1,420 rpm เป็นมอเตอร์ต้นกำลังของชุดทดลอง ส่วนเครื่อง VFD เลือกใช้ยี่ห้อ FUJI รุ่น FRENIC – Mini ขนาดพิกัด 2.2 kW เป็น VFD แบบ v/f คอนโทรล หลักการทำงานของเครื่อง VFD คือการเปลี่ยนความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ ทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบแปรผันไปตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้าจากเครื่อง VFD ดังนั้นการปรับเพิ่มความถี่ของเครื่อง VFD จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามภายหลังจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะคงที่ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 4 ขั้วแม่เหล็กที่ใช้งานในชุดทดลองนี้ เมื่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz ความเร็วรอบจะคงที่ที่ 1,500 rpm ทำให้มอเตอร์ต้นกำลังมีความเร็วรอบคงที่ 1,500 rpm ตามไปด้วย การปรับเพิ่มความถี่ของเครื่อง VFD ภายหลังการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จึงไม่ทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้

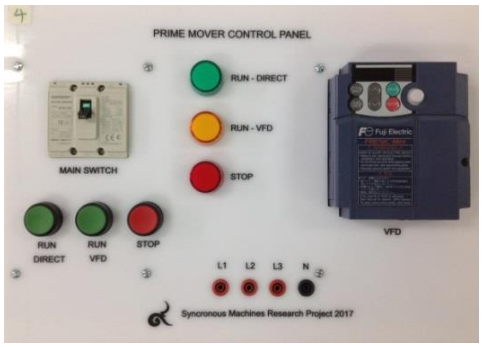
แรงบิดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นแทนดังภาพที่ 3 จากลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถควบคุมการจ่ายกำลังแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ จากการปรับความถี่ของเครื่อง VFD เครื่อง VFD ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ตามพิกัดของมอเตอร์ต้นกำลัง คือ 2.2 kW 380 V รวมทั้งปรับตั้งความถี่ฐานและความถี่สูงสุด ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 3 กราฟแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อถูกขับด้วยเครื่อง VFD

ตารางที่ 2 ค่าความถี่ปรับตั้งในเครื่อง VFD

รายการ	ค่าปรับตั้ง
Base Frequency	50 Hz
Maximum Frequency	60 Hz



ก. การจัดวางอุปกรณ์หน้าแผง

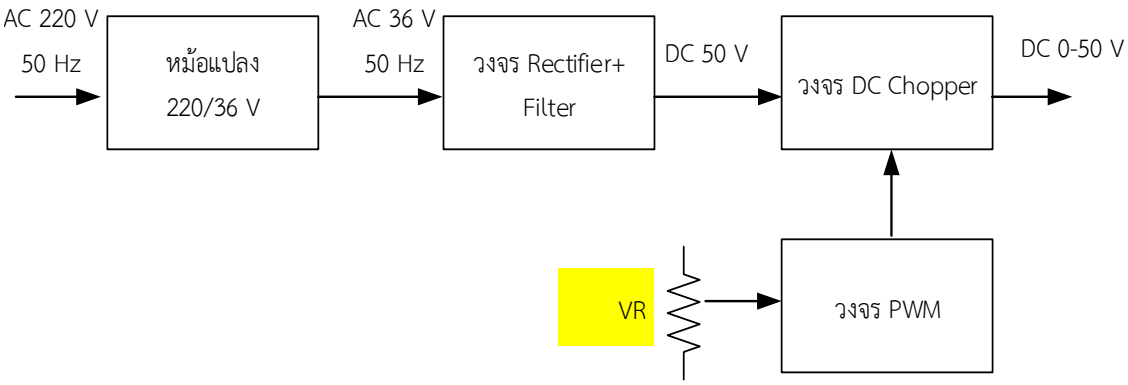
ข. เครื่อง VFD

ภาพที่ 4 ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ต้นกำลัง

3.4 การออกแบบชุดเอ็กไซเตอร์

ได้ออกแบบชุดเอ็กไซเตอร์ขึ้นมาใหม่แทนระบบกระตุ้นเดิมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ขนาด 50 V 2 A ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ คือ หม้อแปลง วงจรเรียงกระแส (Rectifier) และวงจรดีซีช็อปเปอร์ (DC Chopper) โดยมีการทำงานดังภาพที่ 5

แรงดันขาออกของชุดเอ็กไซเตอร์นี้ สามารถปรับได้จากการหมุนปุ่มตัวต้านทานแปรผันค่าได้ (Variable Resistor: VR) ในวงจร PWM ซึ่งเป็นส่วนควบคุมการสวิตช์ของวงจรดีซีช็อปเปอร์



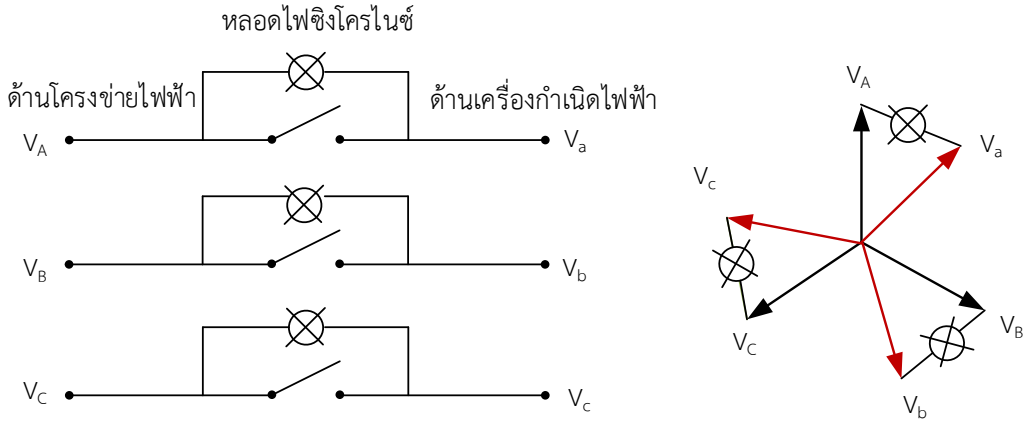
ภาพที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดเอ็กไซต์เตอร์

3.5 การออกแบบชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกออกแบบโดยใช้หลอดไฟซิงโครไนซ์เหมือนกับชุดทดลองที่ได้สำรวจมา และเลือกต่อวงจรแบบ Dark Lamp Method ซึ่งโดยวิธีนี้หลอดไฟซิงโครไนซ์ 3 ดวง จะถูกต่อระหว่างเฟสที่ตรงกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโครงข่ายไฟฟ้า ดังภาพที่ 6 ก. และสามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อหลอดไฟดับหมดทั้ง 3 ดวง ซึ่งหมายความว่าเป็นไปตามเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ ขนาดของแรงดันเท่ากัน ความถี่เท่ากัน และลำดับเฟสตรงกัน อย่างไรก็ตามถ้าหากความถี่ยังไม่เท่ากันหลอดไฟทั้ง 3 ดวงจะกระพริบติด-ดับ พร้อมกันเป็นจังหวะ หรือถ้าลำดับเฟสไม่ตรงกันหลอดไฟจะติด-ดับเรียงกันไปทีละหลอด อธิบายได้ด้วยแผนภาพเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ดังภาพที่ 6 ข.

3.6 การทดสอบการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโครงข่ายไฟฟ้า

ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่พัฒนาขึ้นถูกนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบการต่อขนานกับระบบไฟฟ้า 380 V 50 Hz ของ กฟภ. วิธีการทดสอบเริ่มจากทำการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีความเร็วรอบสูงกว่า 1,500 rpm เล็กน้อย พร้อมกับจ่ายกระแสฟิลด์เข้าไปกระตุ้นจนแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าที่จะต่อขนานเล็กน้อย ที่ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการสังเกตการ ติด-ดับ ของหลอดไฟซิงโครไนซ์ ตรวจสอบการเรียงลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแก้ไขให้ตรงกันกับระบบไฟฟ้าที่จะต่อขนาน เมื่อลำดับเฟสตรงกันแล้วหลอดไฟทั้ง 3 จะติด-ดับพร้อมกัน หลังจากนั้นทำการปรับลดความถี่เครื่อง VFD ลงเล็กน้อย เพื่อควบคุมให้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลงจนความถี่ของแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับความถี่ของระบบไฟฟ้ามากที่สุด ซึ่งส่งผลให้หลอดไฟซิงโครไนซ์ติด-ดับอย่างช้า ๆ และในจังหวะที่หลอดไฟดับหมดทุกดวงทำการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ก. การต่อวงจรหลอดไฟ ข. เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้า

ภาพที่ 6 การต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธี Dark Lamp Method

ก. ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ข. ชุดเอ็กไซเตอร์

ภาพที่ 7 ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดเอ็กไซเตอร์

3.7 การทดสอบการจ่ายและรับกำลังกับโครงข่ายไฟฟ้า

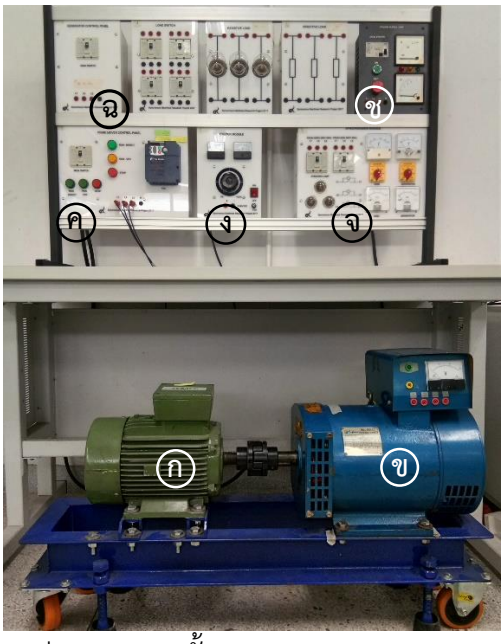
หลังจากขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แล้ว ชุดทดลองจะถูกทดสอบความสามารถในการจ่ายและรับกำลังกับโครงข่ายไฟฟ้า วิธีการทดสอบเริ่มจากทำการปรับค่ากระแสฟิลด์ให้สูงกว่าและต่ำกว่าค่ากระแสฟิลด์ตอนเริ่มขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยค่ากระแสฟิลด์อยู่ในช่วง 0 – 2 A ตามพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พร้อมกับทำการวัดกระแสไลน์ กำลังแอกทีฟ และตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละค่ากระแสฟิลด์ ต่อจากนั้นทำการปรับความถี่เครื่อง VFD ให้สูงขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย เพื่อเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ต้นกำลังให้สูงขึ้น แล้วทำการปรับค่ากระแสฟิลด์ในช่วง 0 – 2 A พร้อมวัดกระแสไลน์ กำลังแอกทีฟ และตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละค่ากระแสฟิลด์อีกครั้ง เสร็จแล้วนำค่ากระแสฟิลด์และกระแสไลน์ไปพล็อตกราฟ

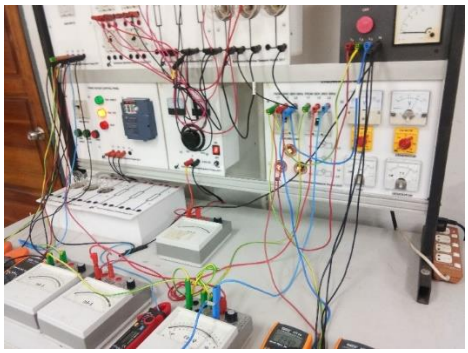
4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ได้จากการวิจัย

ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่พัฒนาขึ้น จากงานวิจัยนี้มีลักษณะดังภาพที่ 8 ก. ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่าง ๆ คือ ที่วางอยู่บนพื้นประกอบด้วยมอเตอร์ต้นกำลัง (ก)

และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (ข) ที่แผงด้านบนประกอบด้วยชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (ค) ชุดเอ็กไซเตอร์ (ง) ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (จ) และแผงอื่น ๆ เช่น แผงสวิตช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ฉ) แผงสวิตช์ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 3 เฟส ที่รับไฟมาจาก กฟภ. (ช) สำหรับค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดลองประมาณ 50,000 บาท (ไม่รวมโต๊ะและชั้นวางแผงทดลอง) ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับชุดทดลองจากต่างประเทศ ที่มีลักษณะเดียวกันซึ่งมีราคาไม่ต่ำกว่า 270,000 บาทต่อชุด





ก. ส่วนประกอบทั้งหมดของชุดทดลอง ข. ขณะกำลังทดสอบการต่อขนานกับโครงข่าย

ภาพที่ 8 ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

4.2 ผลการทดสอบการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโครงข่ายไฟฟ้า

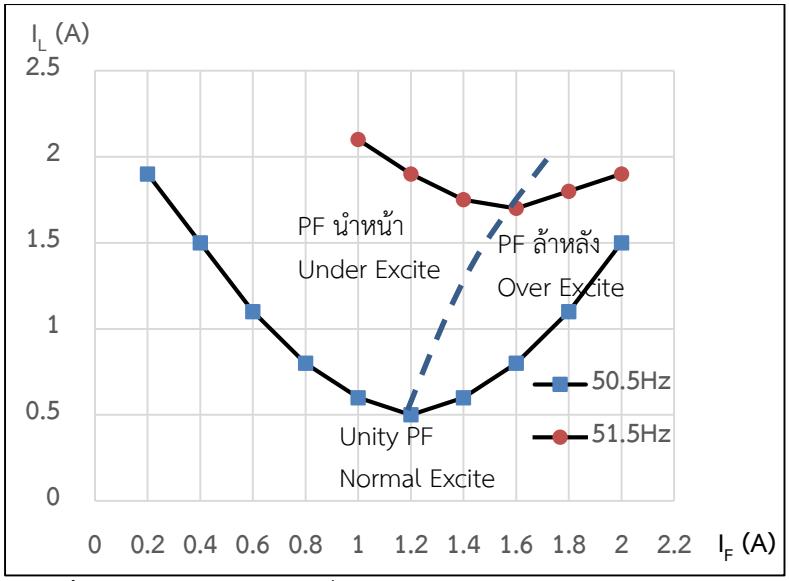
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการต่อขนานชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโครนัสกับโครงข่ายไฟฟ้า

ส่วนประกอบ	ผลการทดสอบ	หมายเหตุ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	ทำงานได้ตามต้องการ	จ่ายแรงดันได้ตามพิกัด 380 V 50 Hz
มอเตอร์ต้นกำลัง	ทำงานได้ตามต้องการ	ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงานถึงค่าพิกัดได้
ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์	ทำงานได้ตามต้องการ	ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ได้
ชุดเอ็กไซเตอร์	ทำงานได้ตามต้องการ	ปรับกระแสฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ตามพิกัด 0-2 A
ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ทำงานได้ตามต้องการ	ขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโครงข่ายไฟฟ้าได้

จากตารางที่ 3 พบว่า ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า 380 V 50 Hz ของ กฟภ. ได้ โดยส่วนประกอบทุกส่วนไม่ว่าจะเป็นตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มอเตอร์ต้นกำลัง ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ชุดเอ็กไซเตอร์ และชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถทำงานได้ตามต้องการ

4.3 ผลการทดสอบการจ่ายและรับกำลังกับโครงข่ายไฟฟ้า

จากการทดสอบการจ่ายและรับกำลังระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของชุดทดลองกับระบบไฟฟ้าของ กฟภ. เมื่อนำค่ากระแสฟิลด์ (I_F) และกระแสไลน์ (I_L) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาพล็อตกราฟจะได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กราฟรูปตัววีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

จากภาพที่ 9 กราฟเส้นแรกเป็นกราฟขณะเริ่มทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความถี่ของเครื่อง VFD ถูกปรับไว้ที่ 50.5 Hz มอเตอร์ต้นกำลังทำงานที่แรงบิดระดับหนึ่ง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังแอกทีฟให้ระบบไฟฟ้า 329 W กราฟเส้นที่ 2 เป็นกราฟขณะที่มอเตอร์ต้นกำลังมีแรงบิดสูงขึ้น โดยความถี่ของเครื่อง VFD ถูกปรับเพิ่มไปที่ 51.5 Hz ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังแอกทีฟให้ระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1,119 W เมื่อพิจารณากราฟแต่ละเส้นพบว่าเป็นกราฟรูปตัว V ที่จุดต่ำสุดของกราฟเป็นจุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกระตุ้นปกติ (Normal Excite) ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor: PF) เท่ากับ 1 กระแสไลน์จะมีค่าน้อยที่สุด ที่จุดนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายและไม่รับกำลังรีแอกทีฟ ส่วนทางด้านซ้ายของกราฟเป็นช่วงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกระตุ้นต่ำเกิน (Under Excite) ค่าตัวประกอบกำลังเป็นแบบนำหน้า (Leading) มีค่าต่ำกว่า 1 กระแสไลน์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรับกำลังรีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้า และทางด้านขวาของกราฟเป็นช่วงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกระตุ้นสูงเกิน (Over Excite) ค่าตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้าหลัง (Lagging) มีค่าต่ำกว่า 1 กระแสไลน์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ทั้งนี้การจ่าย - รับ กำลังรีแอกทีฟ

จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่ากระแสฟิลด์ ผลการทดสอบในขั้นตอนนี้มีความถูกต้องและตรงตามทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ Chapman, S.J. (1991). และ Guru, B.S. and Hiziroglu, H.R. (2001). กล่าวไว้ทุกประการ

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นทุนต่ำสำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า ได้ข้อสรุปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ดังนี้

5.1 สามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเพลาลอยทั่วไป มาดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสของชุดทดลองได้ โดยยกเลิกการใช้งานระบบกระตุ้นเดิมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ขดลวดกระตุ้นและไดโอดบริดจ์) และทำการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกมาภายนอกโดยตรงโดยผ่านทางสลิปริงและแปรงถ่าน เพื่อรับการกระตุ้นจากภายนอก

5.2 สามารถใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำร่วมกับเครื่อง VFD เป็นชุดต้นกำลังขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของชุดทดลองได้ โดยภายหลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับโครงข่ายไฟฟ้าแล้วการปรับเพิ่มความถี่ของเครื่อง VFD จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังแอกทีฟให้กับโครงข่ายไฟฟ้าได้มากขึ้นในขณะที่ความเร็วรอบมอเตอร์เท่าเดิม

5.3 การพัฒนาชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้นทุนต่ำ สำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้า มีข้อสรุปคือ

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสของชุดทดลอง สามารถใช้การดัดแปลงจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเพลาลอยทั่วไปตามข้อ 5.1 ขนาดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด คือ ขนาดพิกัด 2 kVA 220 V 50 Hz 1,500 rpm เนื่องจากมีขนาดเล็กที่สุดและราคาถูกที่สุด แต่เนื่องจากที่พิกัด 2 kVA จะมีเฉพาะขนาด 1 เฟส จึงต้องนำมาดัดแปลงพันขดลวดอาร์เมเจอร์ใหม่ให้เป็น 3 เฟส เสียก่อน

2) มอเตอร์ต้นกำลังขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของชุดทดลอง สามารถใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ร่วมกับเครื่อง VFD ได้ตามข้อ 5.2 โดยขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์และเครื่อง VFD ต้องไม่น้อยกว่าพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในงานวิจัยเลือกใช้มอเตอร์ขนาดพิกัด 2 kW 380V 50 Hz 4 Pole และเครื่อง VFD ขนาด 2.2 kW

3) ชุดเอ็กไซเตอร์ของชุดทดลอง สามารถออกแบบและสร้างขึ้นใหม่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ขนาด 50 V 2 A ตามพิกัดกระแสฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้วงจรเรียงกระแส และวงจรดีซีช็อปเปอร์ที่สามารถปรับแรงดันขาออกได้

4) ชุดควบคุมการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของชุดทดลอง สามารถออกแบบและสร้างขึ้นใหม่โดยใช้หลอดไฟซิงโครไนซ์ต่อวงจรแบบ Dark Lamp Method

5) ภายหลังจากนำชุดทดลองไปทดสอบการต่อขนานกับระบบไฟฟ้า 380 V 50 Hz ณ ห้องปฏิบัติการ ผลปรากฏว่าชุดทดลองสามารถต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าได้ รวมทั้งสามารถจ่ายกำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า และสามารถรับกำลังรีแอกทีฟจากโครงข่ายไฟฟ้าได้ เป็นการยืนยันว่าชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นทุนต่ำสำหรับต่อขนานกับโครงข่ายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณประจำปี พ.ศ.2560 ของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

7. เอกสารอ้างอิง

Chapman, S.J. (1991). **Electric Machinery Fundamentals**. Hightstown: McGraw-Hill.

Electricity Generating Authority of Thailand. (2019). **Statistical Data, Peak Demand**, [online], Available: https://www.egat.co.th/index.php?option= com_content& view=article&layout=edit&id=353&Itemid=200, access on February 22, 2019. (in Thai)

Festo Didactic Inc. (2017). **Electromechanical Training Systems LV Series 8001-1**, [online], Available: https://www.labvolt.com/solutions/6_electricity_ and_new_energy/59-8001-10_complete_0_2_kw_ems_modular, access on January 17, 2018.

Guru, B.S. and Hiziroglu, H.R. (2001). **Electric Machinery & Transformers**. London: Oxford University Press.

Herrera, M.R.S., Marquez, J.M.A., Borrero, A.M.B. and Sanchez, M.A.M. (2013). Testing Bench for Remote Practical Training in Electric Machines, **Proceeding of the 10th IFAC Symposium Advances in Control Education,** pp. 357 – 362.

Jha, R.K., Pande, A.S. and Singh, H. (2013). Design and Analysis of Synchronous Alternator for Reduction Harmonics and Temperature by Short Pitch Winding, **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol 3(10), Oct. 2013**, pp. 651 - 656.

Martis, C.S., Hedesiu, H.C., Szabo, L., Tataranu, B., Jurca, F. and Oprea, C. (2006). Electrical Machines Virtual Laboratory: Grid Connection of Synchronous Generator, **Proceeding of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE PEMC 2006),** pp. 1709 – 1714.

Nvis Technologies Pvt. (2017). **Synchronous Machine Training System Nvis 7018 Technical Specification**, [online], Available: https://www.nvistech.com/ images/pdf/NV7018.pdf, access on January 17, 2018.

Sen, S., Mazumder, P., Jamil, H. and Chowdhury, R. (2014). Design & Construction of a Low Cost Quasi Automatic Synchronizer for Alternators, **International journal of Engineering Research & Technology, Vol 3(5), May 2014**, pp. 1860 – 1864.