การควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

Voltage and Power Control for Three-Phase Generator

มนัส บุญเทียรทอง

สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

หัวข้องานวิจัย การควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส
ผู้รับผิดชอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเทียรทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์
สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีงบประมาณ 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะการทำงานต่างๆ โดยจำลองรูปแบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้อยู่ตามสถานประกอบการซึ่งใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นพลังงานสำรองเพื่อทดแทนแหล่งพลังงานหลักของผู้จำหน่ายไฟฟ้า ในงานนี้สามารถทดสอบการเริ่มเดินหรือการหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร2ต่างๆในขณะนั้น โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกนำมาใช้งานเมื่อระบบไฟฟ้าหลักของผู้จำหน่ายไฟฟ้าเกิดข้อผิดพลาด และเครื่องกำเนิดจะถูกปลดออกเมื่อระบบพลังงานไฟฟ้าหลักของผู้จำหน่ายไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติ

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส,ค่าพารามิเตอร์

Research Topics Voltage and Power Control for Three-Phase Generator
By Asst. Prof. Dr.Manat Boonthienthong
Asst. Prof. Dr.Sakhon Woothipatanapan
Affiliation Faculty of Engineering RMUTP
Budget Year 2019

Abstract

This research presents the simulation of a three-phase generator. The aim is to study and analyze the condition of the generator functions. By simulating the operation of the generator used in factory, which use this generator as a backup power source to replace primary power source of electricity-supplier. In this test can start or stop the generator to determine the parameters at that time. The generator is used when the main electrical power distribution error, and the generator is disabled when electric power system of electricity-supplier back to normal.

Keywords**:** Three Phase Generator, parameters

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ข้อมูล ขอบพระคุณอาจารย์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสำเร็จแต่มิได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้จัดทำใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่ให้การสนับสนุนด้านทุนทรัพย์และให้กำลังใจในการทำงาน ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้เป็นประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้าต่อผู้สนใจและเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

มนัส บุญเทียรทอง
สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส	3
2.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส	12
2.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสเข้าสู่ระบบ	17
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	19
3.1 เงื่อนไขในการออกแบบชุดจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	19
3.2 การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	20
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่จ่ายโหลด	28
4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด	31
4.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ	36

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	40
5.1 ปัญหาที่พบระหว่างการทดลอง	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
บรรณานุกรม	41
ประวัติผู้วิจัย	42

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่ไม่จ่ายโหลด 30
4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด (Load = 900 W) 35
4.3 ก่อนทำการ ขนานขาไป (Load 40%) (Load = 360 W) 37
4.4 หลังทำการ ขนานขาไป (Load 40%) (Load = 360 W) 38
4.5 หลังทำการ ขนานขากลับ (Load 40%) (Load = 360 W) 38
4.6 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ (Load 40%) (Load = 360 W) 38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส	3
2.2 หลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ	4
2.3 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งต่าง ๆ	5
2.4 การต่อปลายขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส	6
2.5 รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส	7
2.6 เปรียบเทียบ Slot ขนาดใหญ่และขนาดเล็กที่บรรจุขดลวด	8
2.7 End connection reactance แต่ละการพันขดลวด	9
2.8 เปรียบเทียบตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กกับร่องสล็อท	9
2.9 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดขณะมีโหลด	10
2.10 เฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีพาวเวอร์แฟคเตอร์เป็น 1	11
2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีพาวเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง	11
2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมพาวเวอร์แฟคเตอร์นำหน้า	12
2.13 ตัวอย่างรูปแบบการควบคุมแบบอัตโนมัติ	13
2.14 กระแสอาเมเจอร์ที่พาวเวอร์แฟคเตอร์ต่างๆ	14
2.15 วิธีซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ในสภาวะวงจรเปิด	15
2.16 วิธีซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ในสภาวะวงจรปิด	16
2.17 กราฟความสัมพันธ,ระหว่าง If กับ Iscc	16
2.18 อุปกรณ์ควบคุมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	17
3.1 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์	20
3.2 โวล์ทมิเตอร์ (Volt Meter)	21
3.3 เฮิร์ทมิเตอร์ (Hz Meter)	21
3.4 วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter)	22
3.5 แอมป์มิเตอร์ (Amp Meter)	22
3.6 เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์ (Power Factor Meter)	23
3.7 หลอดไฟ (Phasing lamps)	23
3.8 ซีเลคเตอร์สวิตซ์ (selector switch)	24
3.9 แบบของตู้อะคริลิคที่ทำการออกแบบ	24
3.10 ตู้อะคริลิคจริงจากการประกอบสร้าง	25
3.11 ไดอะแกรมวงจรของชุดควบคุมเครื่องกำเนิด	25

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ซีเลคเตอร์สวิตซ์ (selector switch)	26
3.13 หลอดไส้ (incandescent)	27
3.14 ไดอะแกรมวงจรของชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า	27

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้า เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งสำหรับการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทั้งการสื่อสารการคมนาคมในภาคอุตสาหกรรม โรงพยาบาล และที่พักอาศัย เป็นต้น ไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจ การเพิ่มผลผลิตทั้งเกษตรรวมและอุตสาหกรรมที่ทันสมัยและสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันในด้านผลผลิตการขายสินค้า ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจ แต่ในทุกวันนี้ไม่ว่าจะเป็นในภาคอุตสาหกรรม โรงพยาบาล หรือแม้กระทั้งสถานที่สำคัญอื่นๆก็ตาม ซึ่งถ้าขาดพลังงานไฟฟ้า ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งอาจเกิดจากระบบไฟฟ้าหลักขัดข้องจะส่งผลต่อเครื่องจักรภายในอุตสาหกรรม หรือเครื่องช่วยผู้ป่วยภายในโรงพยาบาลทำให้เกิดความเสียหายตามมาเป็นมูลค่ามหาศาล ดังนั้นจึงต้องมีระบบไฟฟ้าสำรองขึ้นมาทดแทนพลังงานไฟฟ้าหลัก นั้นคือ ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสมาทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองเข้าไปในระบบเพื่อรักษาเสถียรภาพนั้นเอง

สิ่งสำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการผลิตพลังงานไฟฟ้า คือการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยจะต้องมีความรู้ความเข้าใจในลักษณะคุณสมบัติการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละประเภทจะมีข้อแตกต่างกัน จึงต้องมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ เพื่อที่จะได้ออกแบบและสามารถควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสได้เป็นอย่างดี เมื่อศึกษาจนเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสดีแล้ว จะทำให้สามารถออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้นการออกแบบชุดจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส ประกอบกับการศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส จะทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจได้ดียิ่งขึ้น จึงได้มีการสร้างชุดจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสขึ้น เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสในสภาวะจริงทั้งขณะจ่ายโหลดและไม่มีโหลด ทั้งนี้มีการจำลองการนำเอาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสขนานเข้าสู่ระบบ เพื่อให้ผู้ที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้เข้าใจถึงคุณลักษณะและการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

1.2.วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 0.8 กิโลวัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์

1.3.2 วัดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้คือ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า และตัวประกอบกำลัง

1.3.3 ในการทดสอบจะเลือกใช้โหลดประเภทสมดุล

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทบทวนวรรณกรรม

1.4.2 ศึกษาข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.4.3 ศึกษาทฤษฎีการควบคุมแรงดัน

1.4.4 กำหนดรูปแบบปัญหา เพื่อทำการทดสอบ

1.4.5 สร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

1.4.6 ประมวลผลทดสอบ และวิเคราะห์ผล

1.4.8 สรุปผลการทดสอบ

1.4.9 รวบรวมข้อมูล เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดทำเอกสารรายงานผลการวิจัยและเผยแพร่ผลงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้หลักการควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

1.5.2 สามารถวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในโครงการนี้ โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสกล่าวถึงคุณลักษณะและพฤติกรรมต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะต่าง ๆ ในการทำงาน การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล่าวถึงหลักการและรูปแบบในการควบคุม และสุดท้ายการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบกล่าวถึงหลักการและรูปแบบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเมื่อเกิดความผิดพลาดจากระบบจ่ายไฟหลัก

2.1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เหมือนกัน คือ ผลิตแรงดันไฟฟ้า แต่มีข้อแตกต่างกันคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขดลวดอาเมเจอร์เป็นส่วนหมุนและขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ อาจจะใช้ขดลวดอาเมเจอร์เป็นส่วนหมุน หรือส่วนที่อยู่กับที่ก็ได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่เป็นขั้วแม่เหล็กหมุนเพราะว่า

1. กระแสที่นำไปใช้กับโหลด ไม่ต้องผ่านสปริง จึงลดปัญหาเรื่องฉนวนไฟฟ้า
2. ผลิตแรงดันได้สูงถึง 30 กิโลโวลต์
3. ขนาดของส่วนหมุนลดลง ขนาดพื้นที่หน้าตัดขดลวดอาเมเจอร์น้อยกว่าขดลวดสนามแม่เหล็ก จึงใช้กระแสฟิลด์น้อยประมาณ 100 ถึง 250 โวลต์

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบซิงโครนัส แสดงในรูปที่ 2.1 เป็น เครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัสขนาดเล็กแบบกระตุ้นตัวเอง โดยไม่ต้องมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงมากระตุ้นจากภายนอก นิยมใช้ทั่วไปในงานอุตสาหกรรม

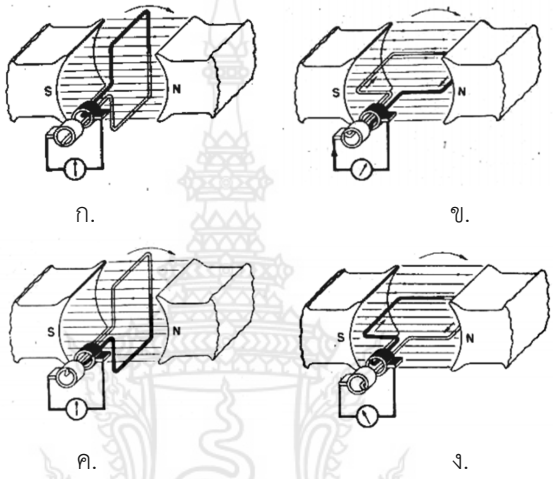
รูปที่ 2.1 เครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส

2.1.1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

2.1.1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรูปคลื่นไซน์และองศาไฟฟ้า

1. แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรูปคลื่นไซน์

จากรูปที่ 2.2 ก. ขั้วแม่เหล็กมีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมากที่สุดที่กึ่งกลางขั้ว และความหนาแน่นน้อยลงไปทางด้านข้างทั้ง 2 ขั้วแม่เหล็ก เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งศูนย์



รูปที่ 2.2 หลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ

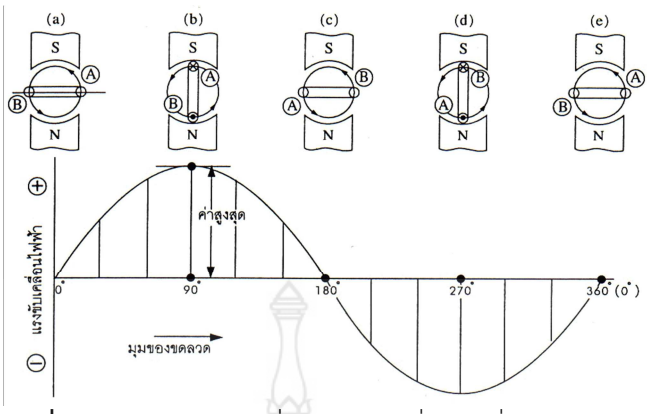
ระหว่างขั้วแม่เหล็ก N-S จะไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตัดขดลวด เนื่องจากขดลวดวางขนานกับเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้ไม่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อหมุนขดลวดไปเรื่อยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นเรื่อย จนมากที่สุดเมื่อขดลวดตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กดัง รูปที่ 2.2 ข. เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ต่อไป

เส้นแรงแม่เหล็กตัดขดลวดน้อยลงทำให้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลง เมื่ออยู่ในตำแหน่งดังในรูปที่ 2.2 ค.

เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ต่อไป จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กตัดขดลวดมากขึ้น ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าสูงสุดดังรูปที่ 2.2 ง.

เนื่องจากตัวต้นกำลังหมุนอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ มีแรงเคลื่อนสูงสุดและต่ำสุด ดังรูปที่ 2.3 รูปคลื่นดังกล่าวจะเกิดขึ้นเป็น

คาบเวลา เรียกว่า หนึ่งไซเคิล



รูปที่ 2.3 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งต่าง ๆ

2. องศาไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะประกอบด้วย ขั้วแม่เหล็ก 1 คู่ และขดลวดอาเมเจอร์ 1 ชุด เมื่อขดลวดอาเมเจอร์เคลื่อนที่หมุนครบ 1 รอบ จะได้มุม 360 องศา จำนวนองศาไฟฟ้ามีค่าเท่ากับจำนวนองศาทางกล แต่เมื่อมีขั้วแม่เหล็กขึ้น 2,4,...n คู่ จำนวนองศาทางไฟฟ้าจะเป็น 2,3,4...,n เท่า ของจำนวนองศาทางไฟฟ้าของขั้วแม่เหล็ก 1 คู่

องศาทางไฟฟ้า = องศาทางกล x จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก

2.1.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว (N) ความถี่ (f) จำนวนโพล (P)

ตัวนำที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก 1 รอบ ในจำนวนขั้วแม่เหล็ก จะได้รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าออกมา 1 รอบ

ให้ P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

N = ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)

จำนวนรอบต่อการเคลื่อนที่ = P/2

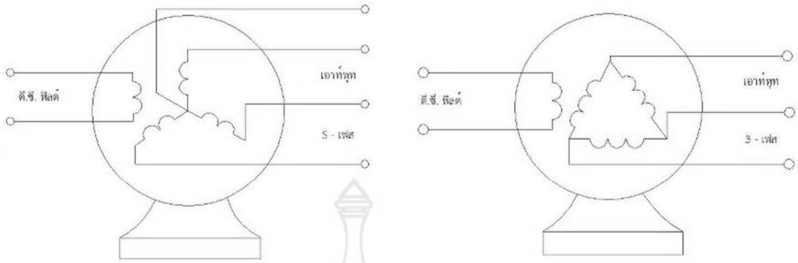
และการเคลื่อนที่ต่อวินาที = N/60

จำนวนรอบต่อนาที = (P/2) x (N/60)

$$N = (120f)/P \text{ rpm} \quad (2.1)$$

$$f = (PN)/120 \text{ Hz} \quad (2.2)$$

2.1.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส



ต่อแบบสตาร์ ต่อแบบเดลต้า

รูปที่ 2.4 การต่อปลายขดลวดอาเมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้ในแต่ละเฟส เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส แต่ต่างกันตรงที่ การต่อปลายขดลวดอาเมเจอร์ซึ่งมี 2 แบบคือ สตาร์และเดลต้า ดังรูปที่ 2.4 การหาค่าแรงดันเฟสและแรงดันสายจึงมีค่าต่างกัน ดังนี้

แบบสตาร์ – เดลต้า

$$E_{LINE} = \sqrt{3} \times E_{PHASE} \quad (2.3)$$

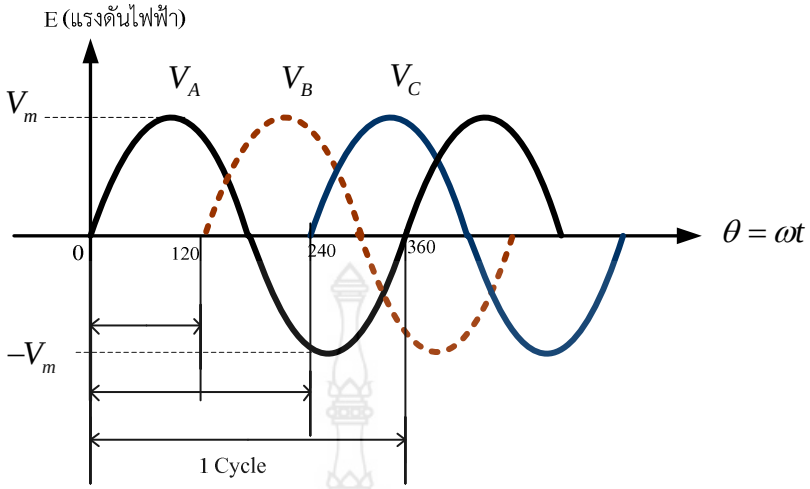
$$I_{LINE} = I_{PHASE} \quad (2.4)$$

แบบสตาร์ – สตาร์

$$E_{LINE} = E_{PHASE} \quad (2.5)$$

$$I_{LINE} = \sqrt{3} \times I_{PHASE} \quad (2.6)$$

และรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จะทำมุมต่างกัน 120 องศา แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

2.1.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

2.1.3.1 ขณะที่ไม่มีโหลด (No – Load)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำงานขณะที่ไม่มีโหลด ที่ปลายสายไม่มีโหลดต่ออยู่ แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายของขดลวดแต่ละเฟส จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาเมเจอร์แต่ละเฟส

$$V = E_{PHASE} = 4.44 \times f \times N \times \phi \times K_P \times K_D \qquad (2.7)$$

เมื่อไม่มีโหลดต่อที่ปลายขดลวดอาเมเจอร์ ทำให้วงจรขดลวดอาเมเจอร์ไม่ครบวงจร ทำให้ไม่มีกระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้น ดังนั้น

$$I = 0$$

2.1.3.2 ขณะที่มีโหลด (On - load)

เมื่อมีโหลดมาต่อเข้าที่ปลายสายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายลดลง ทำให้มีกระแสไหลครบวงจรอาเมเจอร์ สาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าปลายสายลดลง มีดังนี้

1. Armature Resistance (I_aR_a)

ตามปกติการพันขดลวด ที่ลงสล๊อทของสเตเตอร์ มีความยาวทำให้เกิดความต้านทานขึ้น ดังนั้นเมื่อกระแสไหลในอาเมเจอร์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม

(IARA) ตามปกติ ความต้านทานประสิทธิผล (Effective Resistance) มีค่าสูงกว่าความต้านทานกระแสตรง ประมาณ 115 – 175 % ในทางคำนวณใช้ค่าประมาณ 150 % ทางการค้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ ค่า Armature Resistance ไม่คิดเพราะน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า Reactance (XS = XA+ XL)

$$R_{ac} = 1.5 \times R_{dc} \tag{2.8}$$

2. Leakage flux Reactance ($I_a X_L$)

เมื่อกระแสไหลเข้าสู่ขดลวด จำนวนรอบการพันขดลวดทำให้เกิด Leakage Flux ซึ่งฟลักซ์จะไปเหนี่ยวนำจำนวนรอบการพันของอีกขดลวดหนึ่ง ทำให้เกิดค่า Inductance ของขดลวดขึ้น

$$X_L = 2\pi fL \tag{2.9}$$

เมื่อกระแสไหลผ่านทำให้เกิด Reactance Drop

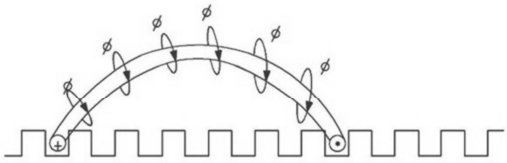
$$X_L = 2\pi fL \tag{2.10}$$

การเกิด Leakage Flux Reactance มีสาเหตุอยู่ 3 ประการคือ

Slot Reactance แต่ละจำนวนรอบของขดลวด จะสร้างฟลักซ์ซึ่งฟลักซ์จะไปเหนี่ยวนำกับขดลวดอื่น ๆ ดังนั้นถ้าสล็อตแคบและลึกทำให้ค่าReluctance สร้างฟลักซ์ขึ้นมาได้มาก จึงเกิด Reactance สูง ดังรูปที่ 2.6

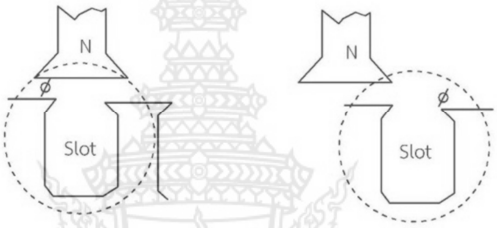
รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบ Slot ขนาดใหญ่และขนาดเล็กที่บรรจุขดลวด

วิธีแก้ไขสร้างสล็อตให้มีขนาดใหญ่กว่าและตื้น Reactance จะต่ำ End Connection Reactance แต่ละการพันขดลวด ที่พันเมื่อมีกระแสผ่านฟลักซ์ยิ่ง End Connection ยาวจะทำให้ Reactance สูง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 End connection reactance แต่ละการพันขดลวด

Tooth Tip of Slot Reactance ตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กตรงกับขดลวดในร่องสล๊อท ทำให้ฟลักซ์เพราะมีค่า Reluctance ต่ำ และตรงข้ามกันคือฟลักซ์ต่ำ Reluctance สูง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กกับร่องสล็อท

3. Armature Reaction (I_aX_a)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ Armature Recation เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปยังขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งจะสร้าง สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ซึ่งมีทิศทางเสริมหรือต้านกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นจากขั้วแม่เหล็ก จะมีอยู่ 3 ลักษณะคือ

3.1. โหลดมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์เป็น 1 (Unity P.F.) กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีเฟสเดียวกัน (Inphase) เมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนจะเกิดแรงเคลื่อนฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุดเนื่องจากขดลวดอาเมเจอร์เคลื่อนที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กตรงกึ่งกลางขั้วพอดี

ผ่านขดลวดอาเมเจอร์ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะสมมาตร เมื่อต่อโหลดเข้าไป จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กขั้ว N และ S จะบิดเบนไป ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กด้านซ้ายมือจะน้อยกว่าด้านขวามือ

3.2. โหลดมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง กระแสล้าหลังแรงดันไฟฟ้าประมาณ 90 องศา เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอาเมเจอร์มีทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็ก ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็กลงลด ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าลดลงด้วย ในกรณีจะต้องเพิ่มการกระตุ้นที่ขดลวดฟิลด์คอยล์ เพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น

3.3. โหลดมีค่าพาวอร์แฟคเตอร์นำหน้า กระแสจะนำหน้าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 90 องศา เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดอาเมเจอร์ จะมีทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเสริมกับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงสูงขึ้น เมื่อต้องการให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ต้องลดกระแสที่ขดลวดฟิลด์ให้ลดลง

2.1.4 เวกเตอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสขณะมีโหลด

กำหนดให้

E_0 = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

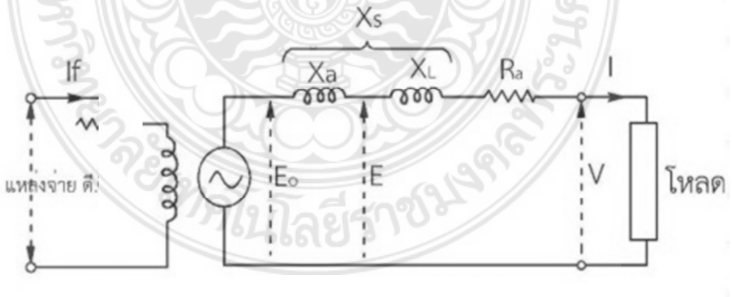
E = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีโหลด

เป็นแรงดันเกิดขึ้นหลังจากการเกิดอาเมเจอร์รีแอกชั่นซึ่งค่าน้อยกว่า

E_0 เท่ากับ IX_a

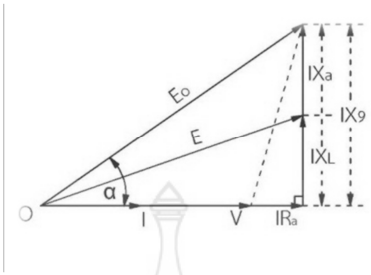
V = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสาย มีค่าน้อยกว่า E_0 เท่ากับ IZ_S หรือน้อยกว่า

E อยู่ IZ เมื่อ $Z_S = R_a + j(X_S)$



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดขณะมีโหลด

2.1.4.1. กรณีที่ โหลดมีพาวเวอร์แฟคเตอร์เป็น 1



รูปที่ 2.10 เฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีพาวเวอร์แฟคเตอร์เป็น 1

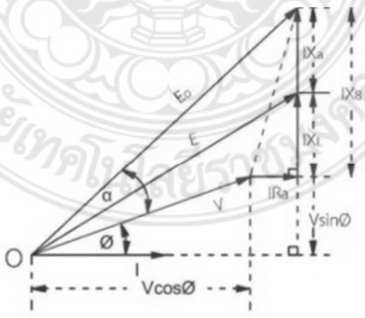
เมื่อเขียนเวกเตอร์ในรูปที่ 2.10 เป็นสมการเฟสเซอร์จะได้ว่า

$$E_0 = \left(V + IR_a\right) + j\left(IX_a + IX_1\right) \tag{2.11}$$

หาขนาดของสมการแฟกเตอร์

$$E_0 = \sqrt{\left(V + IR_a\right) + j\left(IX_a + IX_1\right)} \tag{2.12}$$

2.1.4.2. กรณีที่ โหลดมีพาวเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรม กรณีพาวเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง

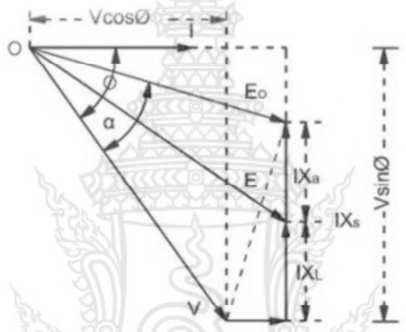
เมื่อเขียนเวกเตอร์ในรูปที่ 2.11 เป็นสมการเฟสเซอร์จะได้ว่า

$$E_0 = \left(V\cos\theta + IR_a\right) + j\left(V\sin\theta IX_a + IX_1\right) \quad (2.13)$$

หาขนาดของสมการแฟกเตอร์

$$E_0 = \sqrt{\left(V\cos\theta + IR_a\right) + j\left(V\sin\theta IX_a + IX_1\right)} \quad (2.14)$$

2.1.4.3. กรณีที่ โหลดมีพาวเวอร์แฟคเตอร์นำหน้า



รูปที่ 2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมพาวเวอร์แฟคเตอร์นำหน้า

เมื่อเขียนเวกเตอร์ในรูปที่ 2.16 เป็นสมการเฟสเซอร์จะได้ว่า

$$E_0 = \left(V\cos\theta + IR_a\right) + j\left(-V\sin\theta IX_a + IX_1\right) \quad (2.15)$$

หาขนาดของสมการแฟกเตอร์

$$E_0 = \sqrt{\left(V\cos\theta + IR_a\right) + j\left(-V\sin\theta IX_a + IX_1\right)} \quad (2.16)$$

2.2 การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส

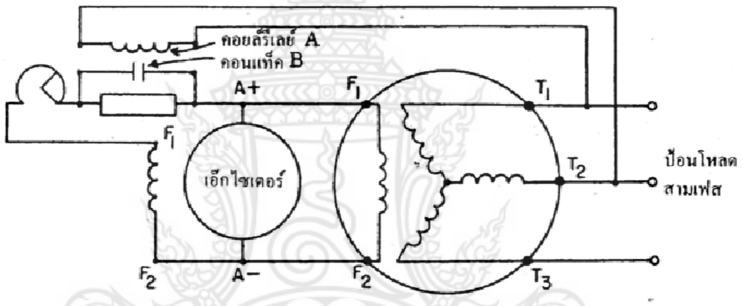
ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำงานนั้น โหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้แรงดันปลายสายเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับโหลด ซึ่งโหลดอาจหยุดทำงานหรือเผาไหม้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโหลด ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการควบคุมได้หลายวิธี สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.2.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยมือ

เป็นวิธีการที่นิยมใช้กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสและมีกำลังเอาท์พุตไม่สูงนักการควบคุมโดยปรับเปลี่ยนความเร็วของตัวต้นกำลังให้น้อยลงหรือปรับกระแสไฟที่ป้อนขดลวดสนามแม่เหล็กให้น้อยลง แต่ข้อเสีย คือ ความแม่นยำน้อยและไม่รวดเร็ว

2.2.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยระบบอัตโนมัติ

เป็นวิธีที่นิยมใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ ที่มีกำลังเอาท์พุตสูง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง กระแสโหลดและเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลดจะเปลี่ยนแปลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าปลายสายเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนแรงดันเพื่อ รักษาระดับให้คงที่ ตัวอย่างการควบคุมดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างรูปแบบการควบคุมแบบอัตโนมัติ

การทำงานในรูปที่ 2.13 ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานป้อนแรงดันให้กับโหลด ขดลวดรีเลย์ A จะบังคับให้คอนแทค B เปิดและปิดหลายครั้ง ในเวลา 1 วินาที ทำให้เอ็กไซด์เตอร์ป้อนแรงดันและกระแสไฟตรงให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยขนาดคงที่ ถ้าแรงดันโหลดลดลง แรงดันที่รีเลย์ A จะลดลงด้วย ทำให้คอนแทค B ปิดแรงดันและกระแสไฟตรงจากเอ็กไซด์เตอร์ป้อนให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดจะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้แรงดันปลายสายที่ป้อนให้กับโหลดเพิ่มขึ้น แต่แรงดันที่ป้อนโหลดสูงขึ้นเท่าเดิม แรงดันที่รีเลย์ A จะสูงขึ้นด้วย ทำให้คอนแทค B สั่นเปิดและปิดหลายครั้ง ทำให้ความต้านทานที่ต่อกับวงจรสูงขึ้น ทำให้แรงดันและกระแสที่อ็กไซด์เตอร์ป้อนให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กเครื่องกำเนิดลดลง ทำให้แรงดันปลายสายป้อนโหลดลดลงเท่าเดิม ในปัจจุบันจะนิยมการควบคุมแรงดันแบบอัตโนมัติ ซึ่งมีความแม่นยำและรวดเร็ว ซึ่งมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์มาควบคุม ทำให้ความแม่นยำสูงขึ้น

2.2.3 โวลต์เตจเรกกูเรชั่น

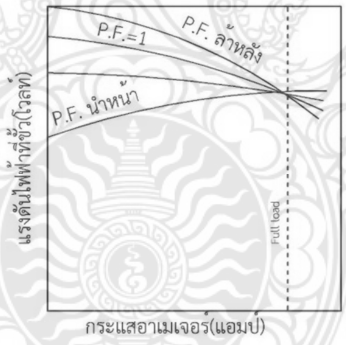
เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงด้วย ไม่ได้ขึ้นกับกระแสของโหลดเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นกับเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลด การหาค่าโวลต์เตจเรกูเรชั่นเมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายโหลดเต็มพิกัด (full-load) การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกูเรชั่นหาได้ดังนี้

$$\text{โวลท์เตจเรกูเรชั่น} = \frac{\left(E_0 - V\right)}{V} \tag{2.17}$$

$$\%\ \text{โวลท์เตจเรกูเรชั่น} = \frac{\left(E_0 - V\right)}{V} \times 100 \tag{2.18}$$

เมื่อ

E_0 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
= แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อไม่มีโหลด
V = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อมีโหลดเต็มพิกัด



รูปที่ 2.14 กระแสอาเมเจอร์ที่พาวเวอร์แฟกเตอร์ต่างๆ

เมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายโหลดที่มีเพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะสูงกว่าตอนไม่มีโหลด แต่เมื่อจ่ายโหลดมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ล้าหลังแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลงมากกว่าเมื่อโหลดมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็น 1 หรือ 100% ดังรูปที่ 2.14

2.2.4 การหาค่าของโวลต์เตจเรกกูเรชั่น

ในกรณีเป็นเครื่องกำเนิดขนาดเล็ก การหาค่าโวลต์เตจเรกูกเรชั่นสามารถหาได้โดยการต่อโหลดเข้าไปที่ขั้วของเครื่องกำเนิดโดยตรง ทำได้ดังนี้

ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส แล้วปรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้ได้ค่าแรงดันเต็มพิกัด จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มโหลดเข้าไป จนกระทั่งวัตต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์

แสดงค่าเต็มพิกัดที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ตามต้องการหลังจากนั้นจึงปลดโหลดออกทั้งหมด แล้วอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจากโวลต์มิเตอร์จะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อไม่มีโหลดดังในสมการ (2.18)

2.2.5. วิธีซิงโครนัสอิมพีแดนซ์

ลำดับขั้นตอนทดสอบมีดังนี้

1. วัดและคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์แต่ละเฟส ด้วย ดี.ซี. โวลต์มิเตอร์และ ดี.ซี. แอมป์มิเตอร์ แล้วนำมาคำนวณหาค่า Ra จากสมการ

$$R_a \text{(effective armature resistance)} = 1.5R_{dc} \qquad (2.20)$$

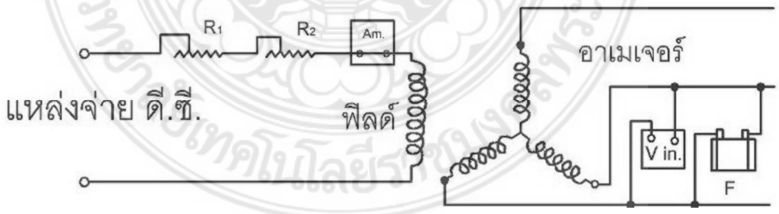
หรือจะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าไปในขดลวดอาเมเจอร์แต่ละเฟส แล้ววัดกระแสและวัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้โหลดขดลวด คำนวณจากสมการ

$$R_a \text{(effective armature resistance)} = \frac{P}{I_2} \qquad (2.21)$$

2. ค่าซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ (ZS) หาได้จากการทดสอบในสภาวะวงจรเปิดและการทดสอบในสภาวะลัดวงจร

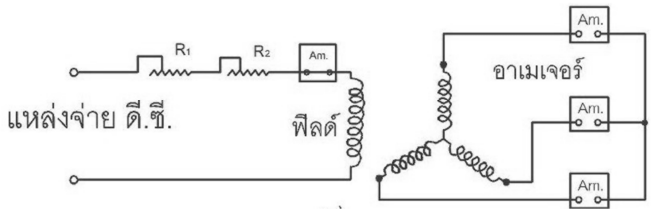
2.1. ทดสอบในสภาวะวงจรเปิด

1. ต่อขดลวดสนามแม่เหล็ก ของเครื่องกำเนิดเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรงโดยผ่านดี.ซี. แอมป์มิเตอร์ และรีโอสตาท
2. ต่อ เอ.ซี. โวลต์มิเตอร์ระหว่างปลายสายขดลวดอาเมเจอร์คู่หนึ่งดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วิธีซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ในสภาวะวงจรเปิด

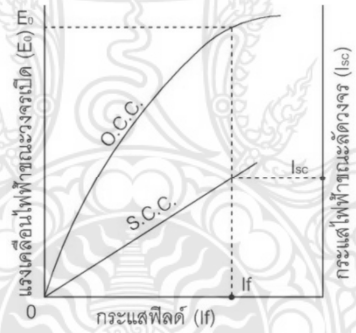
3. ขับเครื่องกำเนิดให้หมุนด้วยความเร็วเต็มพิกัด หรือความเร็วซิงโครนัส
4. บันทึกค่า If และ E0 ที่เกิดขึ้น โดยปรับค่ากระแสฟิลด์ จาก If = 0 จนกระทั่ง E0 มีค่าประมาณ 1.5 เท่าของแรงดันดันเต็มพิกัด
5. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับกระแสฟิลด์



รูปที่ 2.16 วิธีซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ในสภาวะวงจรปิด

2.2. การทดสอบในสภาวะวงจรปิด

1. ต่อ เอ.ซี.แอมป์มิเตอร์อนุกรมกับขดลวดอาเมเจอร์แต่ละเฟสลัดวงจรดังรูป 2.16
2. ขับเครื่องกำเนิดให้หมุนด้วยความเร็วเต็มพิกัด
3. ปรับ $I_f = 0$ จนกระทั่งกระแสลัดวงจร I_{sc} มีค่าประมาณ 1.5 เท่าของกระแสเต็มพิกัด
4. บันทึกค่า I_f และ I_{scc} แล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_f และ I_{scc} ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง If กับ Iscc

การหาค่าทำได้ดังนี้

$$E_0 = I_{scc} Z_s \tag{2.22}$$

$$Z_s = \frac{E_{0(occ)}}{I_{sc(scc)}} \tag{2.23}$$

$$X_a = \sqrt{(Z_a)_2 - (R_a)_2} \tag{2.24}$$

เมื่อทราบค่า R_a และ X_a ของเครื่องกำเนิด สามารถหาค่า E_0 เมื่อโหลดมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่าง ดังในสมการ (2.17) และสมการ (2.18)

2.3. การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสเข้าสู่ระบบ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถนำมาขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือกับไฟหลวงได้ แต่ก่อนที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสองแหล่งจะขนานกันได้นั้น ชุดควบคุมการขนานจะต้องเช็ค โวลต์ ความถี่ และ มุมเฟส ให้ตรงกันก่อน ซึ่งเงื่อนไขสำคัญในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบ คือ

1. แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่ระบบที่ขนานเข้าไปต้องมีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน
2. ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่ระบบที่ขนานเข้าไปต้องมีค่าเท่ากัน
3. มุมเฟสจะต้องตรงกัน (In-Phase)

รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ควบคุมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ส่วนลักษณะของการขนานนั้น โดยทั่วไปมักจะเรียกว่า ขนานขาไป กับ ขนานขากลับ โดยปกติเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามักจะทำงานอัตโนมัติ ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลาประมาณ 15 วินาที หลังจากไฟฟ้าระบบหลักหายไฟจึงจะสามารถจ่ายไฟเข้าสู่ระบบได้ (ซึ่งเวลาดังกล่าวสามารถปรับตั้งได้) เพื่อเป็นการป้องการสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไม่จำเป็น เพราะบางเวลาระบบไฟฟ้าหลักอาจเกิดการ บราวเอาท์ และกลับคืนมาได้ในเวลาสั้น ๆ และหลังจากที่ระบบไฟฟ้าหลักกลับคืนมาในระหว่างที่ถ่ายโหลดจากจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไประบบไฟฟ้าหลัก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะเดินเครื่อง (Cool Down) ไปอีกประมาณ 5 นาที (เวลา Cool Down สามารถปรับได้เช่นกัน) แล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะดับเองโดยอัตโนมัติ

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามี 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. ขนานขาไป

ขนานขาไป คือ สถานการณ์ที่ทราบแล้วว่าไฟของการไฟฟ้าจะดับ ดังนั้นจึงสั่งสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วนำไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานเข้ากับไฟหลวงก่อนที่ไฟจะดับ ซึ่งเมื่อไฟหลวงดับไปแล้วแต่ก็ยังมีไฟจากเจนคอยจ่ายให้กับโหลดอยู่นั่นเอง (สังเกตว่าลักษณะการทำงานเช่นนี้จะไม่มีไฟขาดหายไปเลย) หรืออาจจะเป็นลักษณะของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลาย ๆ เครื่องเข้าด้วยกันก่อนแล้วขนานกับไฟหลวงอีกทีก็ได้ ตัวอย่างการใช้งานเช่นนี้พบได้มากในยุคที่ราคาของน้ำมันดีเซลยังราคาถูก ก็จะเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟให้กับโหลดเพื่อตัดพีคของการไฟฟ้า แต่ในปัจจุบันราคาน้ำมันดีเซลสูงเกินกว่าที่จะเดินเครื่องเพื่อตัดพีคแล้ว

2. ขนานขากลับ

ขนานขากลับ คือ สถานการณ์ที่ไฟดับไปแล้ว และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟให้กับโหลดอยู่ และหลังจากที่ไฟของการไฟฟ้ากลับมาก็จะนำไฟหลวงมาขนานเข้ากับไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนแล้วจึงค่อยปลดไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออก (สังเกตว่าลักษณะเช่นนี้ก็จะไม่มีไฟขาดหายไปเช่นกัน)

บทที่ 3
การออกแบบการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและประกอบสร้างแบบจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสสำหรับควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้า โดยเนื้อหาจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ส่วนที่ 1 คือ เงื่อนไขในการออกแบบชุดจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสสำหรับควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้า ส่วนที่ 2 เป็นชุดการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมถึงการออกแบบวงจรการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสุดท้ายส่วนที่ 3 คือ ชุดจำลองภาระทางไฟฟ้ากล่าวถึงอุปกรณ์ที่เลือกใช้เป็นภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมถึงรูปแบบการต่อวงจรของภาระทางไฟฟ้า

3.1 เงื่อนไขในการออกแบบชุดจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เนื่องจากในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากใน ภาคอุตสาหกรรม โรงพยาบาล และบ้านพักที่อยู่อาศัยเป็นต้น เมื่อเกิดเหตุขัดข้องจะต้องมีการสำรองพลังงานไฟฟ้าเข้ามาทดแทนระบบหลักเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพและสร้างความเชื่อถือได้ของระบบ จึงได้สร้างชุดจำลองนี้ขึ้นเพื่อทำการสำรองระบบไฟฟ้าเข้าสู่ระบบหลักเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต่อโหลด และการออกแบบนั้นจะต้องตอบคำถามของโครงการในครั้งนี้ได้ คำถามของโครงนี้มีด้วยกันทั้งหมด 3 ข้อ คือ

1. ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะไม่จ่ายโหลดมีอะไรบ้าง มีลักษณะ และมีความแตกต่างระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบหลักอย่างไร

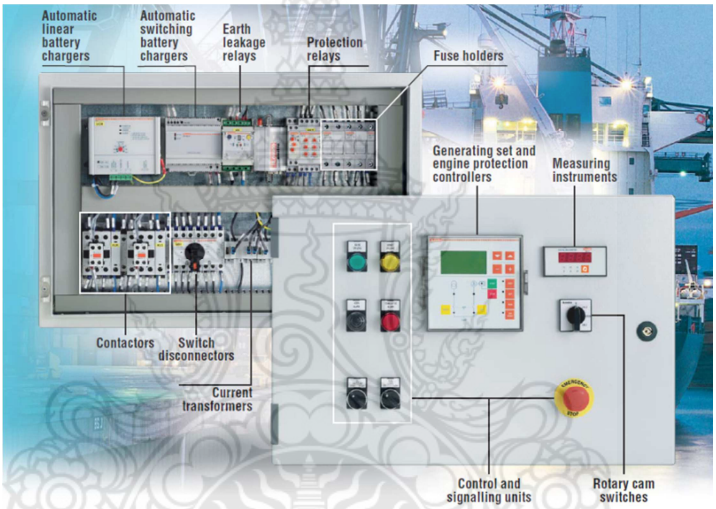
2. ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่จ่ายโหลดมีอะไรบ้าง มีลักษณะ และมีความแตกต่างระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบหลักอย่างไร

3. สามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบเพื่อทดแทนระบบหลักเมื่อเกิดเหตุขัดข้องมีหลักและวิธีการอย่างไร เมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายโหลดแล้วมีความแตกต่างกับระบบไฟหลักหรือไม่ และเมื่อระบบหลักกลับมาสู่สภาวะปกติสามารถขนานกลับไปจ่ายโหลดตามเดิมแล้วปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบจะมีความแตกต่างหรือไม่

3.2 การออกแบบและประกอบสร้างชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1. เครื่องควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เนื่องจากในปัจจุบันการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้อย่างแพร่หลาย เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง สามารถทำงานแบบอัตโนมัติได้ และในขณะเดียวกันยังสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบได้ภายในตัวเอง แต่ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นมีราคาค้อนข้างสูงด้วยเช่นกันจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ศึกษาทดลองในห้องแล็ป ดังนั้นจึงสร้างชุดจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นมาเป็นแบบอนาล็อกซึ่งมีราคาต้นทุนต่ำกว่า ทั้งยังสามารถควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้เช่นกัน



รูปที่ 3.1 ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 3.1 เป็นชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.จะเห็นได้ว่าเป็นชุดควบคุมที่มีราคาค่อนค้างสูงจึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงออกแบบชุดควบคุมเป็นแบบอนาล็อกใช้อุปกรณ์ดังนี้

1.1. โวล์ทมิเตอร์ (Volt Meter)

รูปที่ 3.2 โวล์ทมิเตอร์ (Volt Meter)

จากรูปที่ 3.2 โวล์ทมิเตอร์ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าของระบบหลักและแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งใช้ในเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบอีกทั้งวัดแรงดันระหว่างสาย

1.2. เฮิร์ทมิเตอร์ (Hz Meter)

รูปที่ 3.3 เฮิร์ทมิเตอร์ (Hz Meter)

จากรูปที่ 3.3 เฮิร์ทมิเตอร์ ใช้วัดความถี่ของระบบไฟฟ้าหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งใช้ในเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบหลัก

1.3. วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter)

รูปที่ 3.4 วัตต์มิเตอร์ (Watt Meter)

จากรูปที่ 3.4 วัตต์มิเตอร์ใช้วัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลด

1.4. แอมป์มิเตอร์ (Amp Meter)

รูปที่ 3.5 แอมป์มิเตอร์ (Amp Meter)

จากรูปที่ 3.5 แอมป์มิเตอร์ใช้วัดกระแสในสายที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบจ่ายให้กำโหลด

1.5. เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์ (Power Factor Meter)

รูปที่ 3.6 เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์ (Power Factor Meter)

จากรูปที่ 3.6 เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์ใช้วัดมุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบจ่ายให้กำโหลด

1.6. หลอดไฟ (Phasing lamps)

รูปที่ 3.7 หลอดไฟ (Phasing lamps)

จากรูปที่ 3.7 หลอดไฟ (Phasing lamps) ใช้สำหรับตรวจสอบลำดับเฟสซึ่งเป็นเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบ

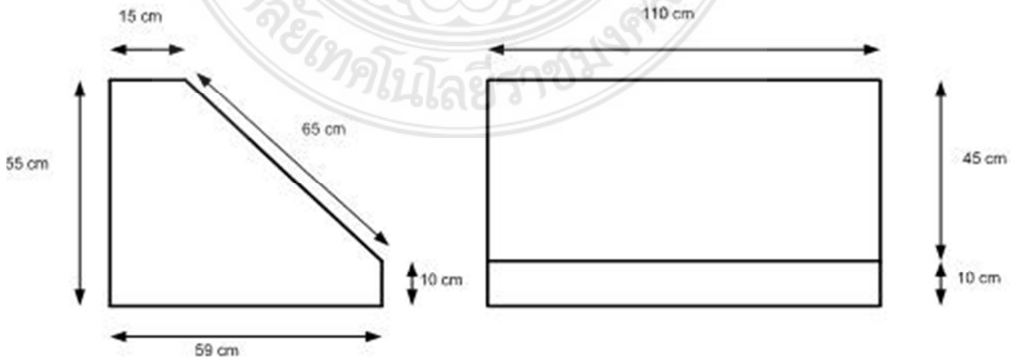
1.7. ซีเลคเตอร์สวิตซ์ (selector switch)

รูปที่ 3.8 ซีเลคเตอร์สวิตซ์ (selector switch)

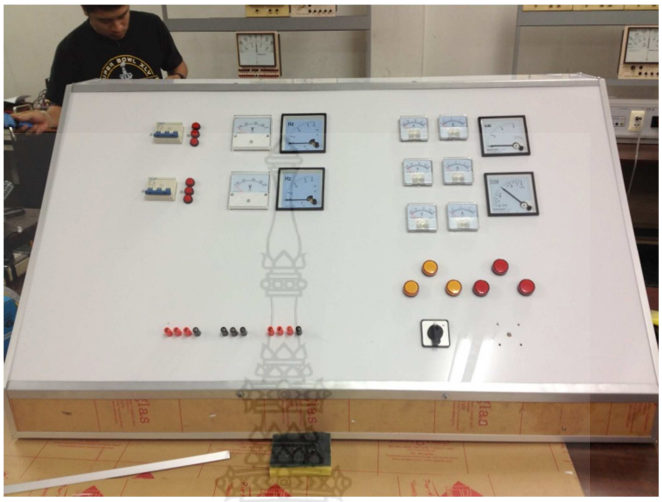
จากรูปที่ 3.8 ซีเลคเตอร์สวิตซ์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเลือกตำแหน่งของวงจรต่าง ๆ แล้วแต่การนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรนั้น โดยซีเลคเตอร์สวิตซ์ที่ใช้ในการสร้างชุดจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิด ใช้ซีเลคเตอร์สวิตซ์ 1 ระดับ 3 ขั้ว 2ตัว คือ เป็นสวิตช์จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบหลัก 1 ตัวและเป็นสวิตช์จ่ายพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด 1 ตัว

2. ตู้อคริลิคสำหรับประกอบชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เป็นตู้โลหะที่สั่งทำขึ้นเพื่อประกอบชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ภายในแบ่งออกเป็นสองชั้น สำหรับชุดควบคุมเครื่องกำเนิด และ ชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า เพื่อสะดวกในการขนย้าย และสะดวกต่อการทดลอง รายละเอียดของตู้โลหะแสดงในรูปที่ 3.9



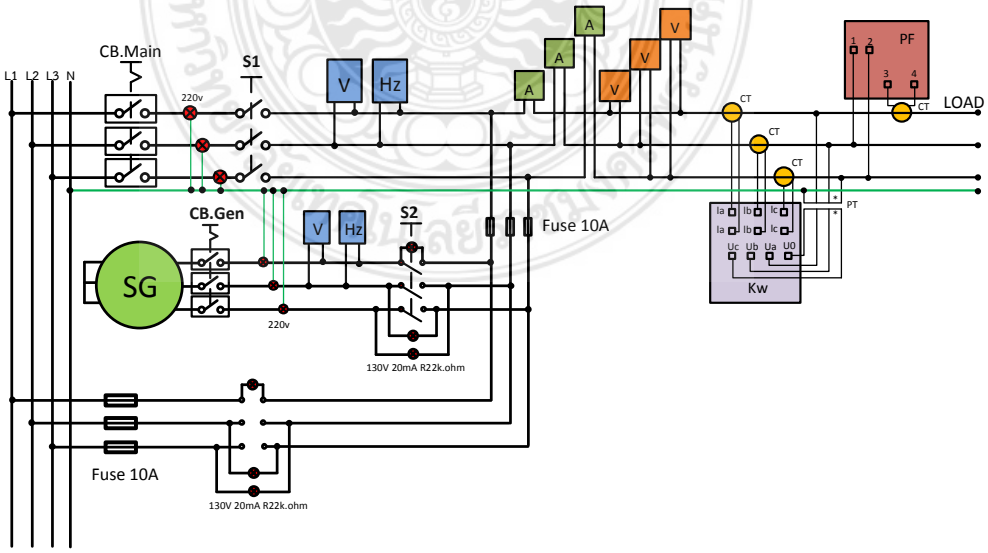
รูปที่ 3.9 แบบของตู้อะคริลิคที่ทำการออกแบบ



รูปที่ 3.10 ที่ ตู้อะคริลิคจริงจากการประกอบสร้าง

3. การประกอบสร้างชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การประกอบสร้างชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำการประกอบสร้างที่ด้านในของตู้ควบคุมและด้านหน้าของตู้จะแสดงหน้าปัดมิเตอร์ต่างๆที่ใช้แสดงผลรวมถึงการต่ออินพุทและเอาท์พุทกับชุดควบคุม ไดอะแกรมการต่อวงจรของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์ แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมวงจรของชุดควบคุมเครื่องกำเนิด

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า

จากความต้องการในการศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จำเป็นจะต้องมีการปรับเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ จึงได้ทำการออกแบบภาระทางไฟฟ้าที่สามารถปรับระดับได้ โดยสามรถปรับระดับได้ 5 ระดับ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์คุณลักษณะและพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของภาระทางไฟฟ้าได้ อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า มีดังนี้

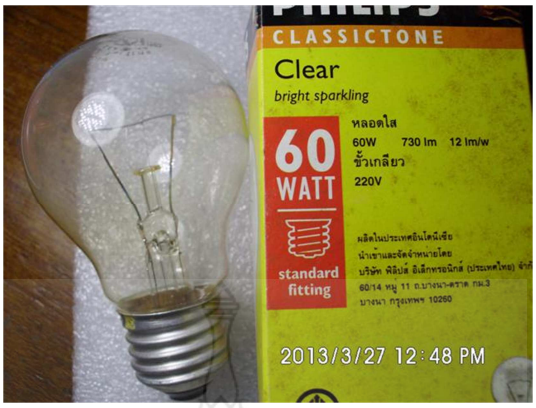
1. ซีเลคเตอร์สวิตซ์ (selector switch)

ซีเลคเตอร์สวิตซ์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเลือกตำแหน่งของวงจรต่าง ๆ แล้วแต่การนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรนั้น โดยซีเลคเตอร์สวิตซ์ที่ใช้ในการสร้างชุดจำลองภาระทางไฟฟ้าได้ใช้ ซีเลคเตอร์สวิตซ์ 5 ระดับ 3 ขั้ว เพราะวงจรภายในของซีเลคเตอร์สวิตซ์เองสามารถนำมาใช้ในการออกแบบได้อย่างเหมาะสม แสดงในรูปที่ 3.12.

รูปที่ 3.12 ซีเลคเตอร์สวิตซ์ (selector switch)

2. หลอดไส้ (incandescent)

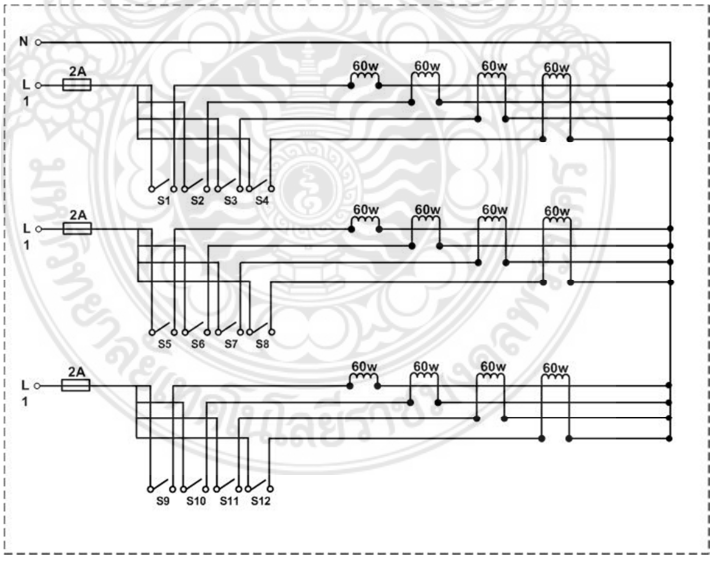
หลอดไส้เป็นโหลดที่มีราคาถูกและแสดงผลได้อย่างชัดเจนเหมาะสำหรับการนำมาทดลองเพราะในการทดลองนั้นมีการปรับระดับแรงดันและความถี่ถ้าเป็นอุปกรณ์อื่นอาจเสียหายได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.13.



รูปที่ 3.13 หลอดไส้ (incandescent)

3. การประกอบสร้างชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า

การประกอบสร้างชุดจำลองภาระทางไฟฟ้าต้องการให้สามารถปรับระดับเพิ่มหรือลดลงได้โดยกำหนดให้ปรับได้ 4 ระดับ โดยแบ่งจากโหลดทั้งหมด 100% ให้ปรับเพิ่มระดับในแต่ละระดับเป็น 25% จาก 0% ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนเต็ม 100% เพื่อศึกษาผลจากการเพิ่มหรือลดลงขอภาระทางไฟฟ้าส่งผลอย่างไรต่อระบบบ้าง โดยชุดจำลองภาระทางไฟฟ้านี้จะประกอบสร้างเป็นชุดภาระทางไฟฟ้าแบบโหลดสมดุล สามารถนำภาระทางไฟฟ้ามาต่อเพิ่มได้ ไดอะแกรมการต่อวงจรของชุดจำลองภาระทางไฟฟ้ารวมทั้งอุปกรณ์ แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมวงจรของชุดจำลองภาระทางไฟฟ้า

บทที่ 4
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองอุปกรณ์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณี ด้วยกัน คือ เครื่องกำเนิดขณะที่ไม่จ่ายโหลด เครื่องกำเนิดขณะจ่ายโหลด การขนานเครื่องกำเนิดเข้าระบบ ซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดรวมถึงขั้นตอนและวิธีการในการขนานเครื่องกำเนิดเข้าสู่ระบบเมื่อระบบไฟหลักเกิดเหตุขัดข้อง ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในปัจจุบัน

4.1 ใบประลองที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่ไม่จ่ายโหลด

วัตถุประสงค์

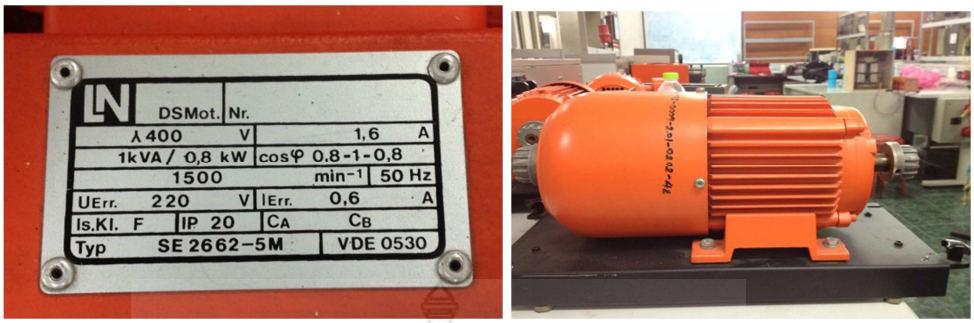
1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่ไม่จ่ายโหลด
2. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบไฟหลักกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องต้นกำลัง (Engine Prime Mover) เป็นมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อนำไปฉุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สามารผลิตไฟฟ้า จ่ายไปยังโหลดที่ต้องการได้ ดังแสดงในรูป

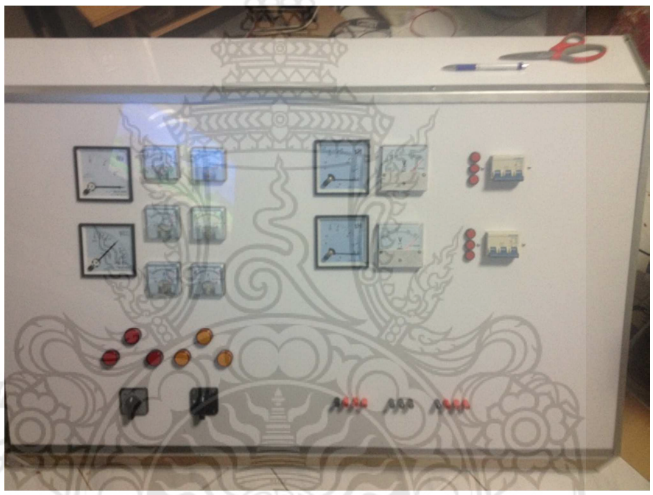
รูปที่ 4.1 เครื่องต้นกำลัง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Alternator) คือ คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (A.C. Generator or Generator) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ Rotor, Stator, Exciter field, AVR (Automatic Voltage Regulator), PMG (Permanent Magnet Generator)



รูปที่ 4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงผลแบบอนาล็อก



รูปที่ 4.3 เครื่องควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่ไม่มีโหลด (No – Load)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำงานขณะที่ไม่มีโหลด ที่ปลายสายไม่มีโหลดต่ออยู่ แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายของขดลวดแต่ละเฟส จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ขดลวดอาเมเจอร์แต่ละเฟส

$$V = E_{PHASE} = 4.44 \times f \times N \times \phi \times K_P \times K_D$$

เมื่อไม่มีโหลดต่อที่ปลายขดลวดอาเมเจอร์ ทำให้วงจรขดลวดอาเมเจอร์ไม่ครบวงจร ทำให้ไม่มีกระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้น ดังนั้น

$$I = 0$$

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
2. แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
3. ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้าสามเฟส เข้ากับชุดควบคุม
2. ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส เข้ากับชุดควบคุม
3. สตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส
4. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง MCB **และ Gen.CB**
5. **เปิดสวิตช์ s_1 เพื่อทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบหลัก**
6. บันทึกค่าที่อ่านได้จากชุดควบคุม
7. ปิดสวิตช์ s_1 ทำการหยุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบหลัก
8. เปิดสวิตช์ s_2 เพื่อทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิด
9. บันทึกค่าที่อ่านได้จากชุดควบคุม
10. ปิดสวิตช์ s_2 ทำการหยุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิด
11. คำนวณค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์แต่ละค่าระหว่างระบบไฟหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงในตาราง Accuracy (%)

ตารางที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่ไม่จ่ายโหลด

Input / Parameter	Main	Generator	Accuracy (%)
Line voltage L1,L2 (V)	392	395	0.765
Line voltage L2,L3 (V)	395	393	0.506
Line voltage L3,L1 (V)	396	391	1.262
Frequency (Hz)	50	50	0
Current (A)	-	-	-
True Power (W)	-	-	-
Power Factor	-	-	-

สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองพบว่าเมื่อไม่มีภาระทางไฟฟ้าก็จะไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบและเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าก็จะไม่มีค่ากำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วยในระบบ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$P=E \times I \times \cos(\theta)$ เมื่อ I = 0 เมื่อแทนค่าไปในสมการจะทำให้ P ได้ = 0

เมื่อกำลังไฟฟ้าของระบบมีค่าเป็น 0 ทำให้พิจาณาได้เพียงแรงดันของระบบไฟฟ้าหลัก กับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกัน โดยที่แรงดันของระบบไฟฟ้าหลักมีค่ามากกว่าเนื่องมาจากการปรับแทปของหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะไฟที่มาจากระบบหลักเป็นการจ่ายโหลดส่วนรวมจึงต้องส่งแรงดันมาให้มากกว่าหรือน้อยกว่า 380 โวลต์แต่สำหรับเครื่องกำเนิด เป็นการผลิตและจำหน่ายเพื่อสำหรับชุดทดลองเพียงอย่างเดียว จึงทำให้สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับ 380 โวลต์หรือมากกว่าเพราะไม่มีโหลดตัวอื่นมาเกี่ยวข้องและยังมีเสถียรภาพและความเที่ยงตรงมากกว่าระบบไฟฟ้าหลัก

4.2 ใบประลองที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด

วัตถุประสงค์

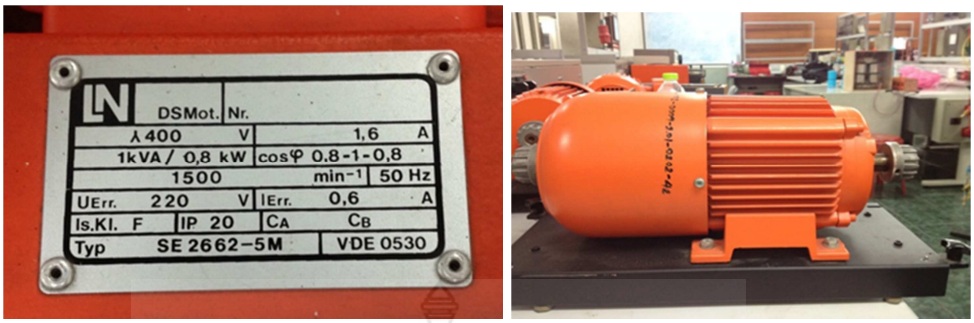
1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีภาระทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องต้นกำลัง (Engine Prime Mover) คือเครื่องยนต์ที่ผลิตพลังงานกล เพื่อนำไปฉุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สามารผลิตไฟฟ้า จ่ายไปยังโหลดที่ต้องการได้

รูปที่ 4.4 เครื่องต้นกำลัง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Alternator) คือ คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (A.C. Generator or Generator) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ Rotor, Stator, Exciter field, AVR (Automatic Voltage Regulator), PMG (Permanent Magnet Generator)



รูปที่ 4.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงผลแบบอนาล็อก

รูปที่ 4.6 เครื่องควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่มีโหลด (On – Load)

เมื่อมีโหลดมาต่อเข้าที่ปลายสายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายลดลง ทำให้มีกระแสไหลครบวงจรอาเมเจอร์ สาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าปลายสายลดลง มีดังนี้

1. Armature Resistance
2. Leakage flux Reactance
3. Armature Reaction

1. Armature Resistance

ตามปกติการพันขดลวด ที่ลงสล๊อทของสเตเตอร์ มีความยาวทำให้เกิดความต้านทานขึ้น ดังนั้นเมื่อเกิดกระแสไหลในอาเมเจอร์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม (IARA) ตามปกติ ความต้านทานประสิทธิผล (Effective Resistance) มีค่าสูงกว่าความต้านทานกระแสตรง ประมาณ 115-175% ในทางคำนวณใช้ค่าประมาณ 150% ทางการค้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ ค่า Armature Resistance ไม่คิดเพราะน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า Reactance (XS = XA+ XL)

$$R_{ac} = 1.5 \times R_{dc}$$

2. Leakage Flux Reactance

เมื่อกระแสไหลเข้าสู่ขดลวด จำนวนรอบการพันขดลวดทำให้เกิด Leakage Flux ซึ่งฟลั๊กนี้จะไปเหนี่ยวนำจำนวนรอบการพันของอีกขดลวดหนึ่ง ทำให้เกิดค่า Inductance ของขดลวดขึ้น

$$X_L = 2\pi fL$$

เมื่อกระแสไหลผ่านทำให้เกิด Reactance Drop

$$IX_L = I \times 2\pi \times f \times L$$

3. Armature Reaction

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ Armature Recation เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปยังขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งจะสร้าง สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำซึ่งมีทิศทางเสริมหรือต้านกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นจากขั้วแม่เหล็ก จะมีอยู่ 3 ลักษณะคือ

1. โหลดมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์เป็นหนึ่ง กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีเฟสเดียวกัน (Inphase) เมื่อขดลวดสนามแม่เหล็กหมุน จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุด เนื่องจากขดลวดอาเมเจอร์เคลื่อนที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กตรงกึ่งกลางขั้วพอดี แต่ไม่มีกระแสไหลผ่าน ขดลวดอาเมเจอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะสมมาตร เมื่อ ต่อ โหลดเข้าไป จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กขั้ว N และ S จะบิดเบนไป ความหนาแน่น เส้นแรงแม่เหล็กด้านซ้ายมือจะน้อยกว่าด้านขวามือ
2. โหลดมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลัง กระแสล้าหลังแรงดันไฟฟ้าประมาณ 90 องศา เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอาเมเจอร์มีทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็ก ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็กลงลด ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าลดลงด้วย ในกรณีจะต้องเพิ่มการกระตุ้นที่ขดลวดฟิลด์คอยล์ เพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น

3. โหลดมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์นำหน้า กระแสจะนำหน้าแรงดันไฟฟ้า ประมาณ 90 องศา เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดอาเมเจอร์ จะมีทิศทางเดียวกับเส้นแรง แม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเสริมกับ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงสูงขึ้น เมื่อต้องการให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ต้องลดกระแสที่ขดลวดฟิลด์ให้ลดลง

โดยปกติขนาดหรือพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะบอกเป็นหน่วย กิโลโวลต์แอมแปร์ หรือ เมกกะโวลต์แอมแปร์ เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่โหลดและพาวเวอร์แฟคเตอร์แตกต่างกัน ในบางครั้งจะบอกเป็น กิโลวัตต์ หรือ เมกกะวัตต์ เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าป้อนให้โหลด และบอกค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ของโหลดด้วย ถ้าไม่บอก ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ให้ตั้งสมมุติฐานว่า โหลดมีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์นำเป็น 1 หรือ 100% และหน่วยเป็น กิโลโวลต์แอมแปร์ หรือ เมกกะโวลต์แอมแปร์

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
2. แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
3. ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้าสามเฟส เข้ากับชุดควบคุม
2. ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส เข้ากับชุดควบคุม
3. สตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส
4. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง MCB และ Gen.CB
5. เปิดสวิตช์ s1 เพื่อทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบหลักไปยังภาระทางไฟฟ้า
6. ปรับระดับภาระทางไฟฟ้าตามตารางที่ 4.2 บันทึกค่าที่อ่านได้จากชุดควบคุม
7. ปิดสวิตช์ s1 ทำการหยุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระบบหลัก
8. เปิดสวิตช์ s2 เพื่อทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไปยังภาระทางไฟฟ้า
9. ปรับระดับภาระทางไฟฟ้าตามตารางที่ 4.2 บันทึกค่าที่อ่านได้จากชุดควบคุม
10. ปิดสวิตช์ s2 ทำการหยุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิด
11. คำนวณค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์แต่ละค่าระหว่างระบบไฟหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงในตาราง Accuracy (%)

ตารางที่ 4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด **(Load = 720 W)**

Step / Parameter	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)	4 (100%)
Line voltage L1,L2 (V)	378.7	385.4	389.4	392.6
Line voltage L2,L3 (V)	378.3	384.4	385.8	389.7
Line voltage L3,L1 (V)	375.6	383.9	387.4	388.0
Frequency (Hz)	50	50	50	50
Current (A)	1	1	1	1
True Power (W)	179	356	540	719
Power Factor	0.99	0.95	0.94	0.97

สรุปผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีภาระทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในระบบจึงเกิดกำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้ดังนี้

- Apparent power $S = V \times I$ (VA)
- Real power $P = V \times I \times \cos(\theta)$ (W)
- Reactive power; $Q = V \times I \times \sin(\theta)$ (VAR)

และทำให้เกิดค่าพาวเวอร์ขึ้น ซึ่งค่าพาวเวอร์นี้เป็นตัวประกอบของกำลังไฟฟ้าที่กำหนดให้ต้องใช้กำลังไฟฟ้าปรากฏมากหรือน้อยในการที่จะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเป็นไปตามสามเหลี่ยมของกำลังไฟฟ้า ในกรณีนี้ภาระทางไฟฟ้า ใช้ Load –R L และพารามิเตอร์ไม่สูงมากทำให้มีค่าพาวเวอร์ที่ใกล้เคียงกับ 1 ถ้าหากมีการประยุกต์ใช้ Load – C เข้ามาในระบบอาจทำให้การทดลองมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

เมื่อทำการปรับระดับของภาระทางไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น พบว่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการแกว่งเล็กน้อย แต่น้อยมากจนไม่ส่งผลต่อระบบและค่อนข้างจะมีความเสถียรทั้งแรงดันและความถี่เนื่องจากเป็นการผลิตและจ่ายให้กับชุดจำลองเพียงอย่างเดียว ซึ่งในภาระทางไฟฟ้า จริงของระบบอาจจะมีภาระทางไฟฟ้า จำพวก L หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำให้เกิด ฮาร์โมนิกส์ ซึ่งส่งผลต่อแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้า

4.3 ใบประลองที่ 3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ (ขนานขาไป,ขนานขากลับ)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนขนานและหลังจากขนานเข้าระบบ
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนขนานและหลังจากขนานเข้าระบบ
3. เพื่อมีความรู้และความเข้าใจในขั้นตอนและวิธีการ ซิงค์ขาไป และ ซิงค์ขากลับ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถนำมาเดินขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือกับไฟหลวงได้ แต่ก่อนที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสองแหล่งจะขนานกันได้นั้น ชุดควบคุมการขนานจะต้องเช็ค โวลต์ ความถี่ และ มุมต่างเฟส ให้ตรงกันเสียก่อนที่จะสับให้ไฟเข้ามาขนานกันเพื่อจ่ายโหลดต่อไป ซึ่งลักษณะของการซิงค์นั้น โดยทั่วไปมักจะเรียกว่า ขนานขาไป กับ ขนานขากลับ

รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ควบคุมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขนานขาไป หมายถึง สถานการณ์ที่ทราบแล้วว่าไฟของการไฟฟ้าจะดับ ดังนั้นจึงสั่งสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วนำไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานเข้ากับไฟหลวงก่อนที่ไฟจะดับ ซึ่งเมื่อไฟของการไฟฟ้าดับไปแล้วแต่ก็ยังมีไฟจากเจนคอยจ่ายให้กับโหลดอยู่นั่นเอง (สังเกตว่าลักษณะการทำงานเช่นนี้จะไม่มีไฟขาดหายไปเลย) หรืออาจจะเป็นลักษณะของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลาย ๆ เครื่องเข้าด้วยกันก่อนแล้วขนานกับไฟหลวงอีกทีก็ได้ ตัวอย่างการใช้งานเช่นนี้พบได้มากในยุคที่ราคาของน้ำมันดีเซลยังราคาถูก ก็จะเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟให้กับโหลดเพื่อตัดพีค ของการไฟฟ้า แต่ในปัจจุบันราคาน้ำมันดีเซลสูงเกินกว่าที่จะเดินเครื่องเพื่อตัดพีคแล้ว

ขนานขากลับ หมายถึง สถานการณ์ที่ไฟดับไปแล้ว และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟให้กับโหลดอยู่ และหลังจากที่ไฟของการไฟฟ้ากลับมาก็จะนำไฟของการไฟฟ้ามาขนานเข้ากับไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อน แล้วจึงค่อยปลดไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออก (สังเกตว่าลักษณะเช่นนี้ก็จะไม่มีไฟขาดหายไปเช่นกัน)

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
2. แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
3. ชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสามเฟส เข้ากับชุดควบคุม
2. ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส เข้ากับชุดควบคุม
3. สตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟส
4. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง MCB และ Gen.CB
5. ทำการเปิดสวิตช์ S_1 เพื่อทำการจ่ายระบบไฟฟ้าหลักไปยังภาระทางไฟฟ้า
6. ทำการขนานเครื่องกำเนิดตามเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสกับระบบไฟฟ้าหลักโดยทำการเปิดสวิตช์ S_2 เพื่อทำการขนาน
7. อ่านและบันทึกค่าที่ได้จากชุดควบคุม
8. ทำการปลดระบบไฟฟ้าหลักโดยการปิดสวิตช์ S_1
9. อ่านและบันทึกค่าที่ได้
10. ทำการขนานระบบไฟฟ้าหลักกลับเข้าไปอีกครั้งโดยเปิดสวิตช์ S_1
11. อ่านและบันทึกค่าที่ได้
12. ทำการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสออกจากระบบโดยปิดสวิตช์ S_2 และทำการปิดสวิตช์ S_1 เพื่อหยุดจ่ายโหลดปิด MCB และ Gen.CBจบการทดลอง
13. สรุปผล

ตารางที่ 4.3 ก่อนทำการ ขนานขาไป **(Load 50 %) (Load = 360W)**

Input / Parameter	Main	Generator	Accuracy (%)
Line voltage L1,L2 (V)	395	385	2.531
Line voltage L2,L3 (V)	385	384	0.259
Line voltage L3,L1 (V)	383	386	0.783
Frequency (Hz)	50	50	0
Current (A)	1	1	0
True Power (W)	359	356	0.835
Power Factor	0.97	0.95	2.061

ตารางที่ 4.4 หลังทำการ ขนานขาไป **(Load 50 %) (Load = 360W)**

Input / Parameter	Main	Generator	Accuracy (%)
Line voltage L1,L2 (V)	395	385	2.531
Line voltage L2,L3 (V)	385	387	0.519
Line voltage L3,L1 (V)	383	382	0.261
Frequency (Hz)	50	50	0
Current (A)	1	1	0
True Power (W)	359	358	0.278
Power Factor	0.97	0.95	2.061

ตารางที่ 4.5 หลังทำการ ขนานขากลับ **(Load 50 %) (Load = 360W)**

Input / Parameter	Main	Generator	Accuracy (%)
Line voltage L1,L2 (V)	395	386	2.278
Line voltage L2,L3 (V)	385	383	0.519
Line voltage L3,L1 (V)	383	385	0.522
Frequency (Hz)	50	50	0
Current (A)	1	1	0
True Power (W)	359	358	0.278
Power Factor	0.97	0.95	2.061

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ
(Load 50 %) (Load = 360W)

State of Gen. / Parameter	ก่อนทำการขนาน	ขนานขาไป	ขนานขากลับ
Line voltage L1,L2 (V)	395	385	386
Line voltage L2,L3 (V)	385	387	383
Line voltage L3,L1 (V)	383	382	385
Frequency (Hz)	50	50	50
Current (A)	1	1	1
True Power (W)	359	356	358
Power Factor	0.99	0.98	0.98

สรุปผลการทดลองที่ 3

จากการทดลองทำให้ทราบถึงขั้นตอนการขนานขาไปและขนานขากลับ

จากตารางที่ 4.3 พบว่าขณะนี้ระบบไฟฟ้าหลักทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ แล้วทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเดินเครื่องรอไว้สาเหตุต้องเดินเครื่องรอไว้ เนื่องจากเป็นเพียงแค่การทดลองที่จำลองขึ้นมาในปกติที่ใช้อยู่ทั่วไปจะเป็นการสั่งให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโดยอัตโนมัติ แต่มีการใช้ค่าใช้จ่ายสูงมาก ด้วยเหตุผลขั้นต้นจึงต้องมีการเดินเครื่องรอรอไว้เพื่อที่จะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบ

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ขณะนี้ระบบไฟฟ้าหลักได้หายไปหรือเกิดความผิดพลาดขึ้นทำให้ภาระทางไฟฟ้าถูกถ่ายไปที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบนั้นจะหน่วงเวลาไว้ที่ 15 วินาที เพื่อเป็นการป้องกันการเกิด บราวเอาท์ ของระบบ ซึ่งเป็นการที่ระบบหายไปแล้วสามารถกลับคืนมาได้เองในระยะเวลาสั้น ๆ หากนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบแล้วก็จะเป็นการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น

จากตารางที่ 4.5 พบว่าขณะนี้ระบบไฟฟ้าหลักได้กลับมาสู่ภาวะปกติแล้ว จากนั้นทำการหน่วงเวลา 15 วินาที เพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบกลับมาอย่างถาวร เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกปลดออกจากระบบและนำระบบไฟฟ้าหลักเข้ามาจ่ายภาระทางไฟฟ้าแทน

จากตารางที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก่อนทำการขนานขาไป และ ขนานขากลับ

บทที่ 5
ปัญหาและข้อเสนอแนะ

โครงงานนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อสร้างชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 380 โวลต์แอมแปร์ 0.8 กิโลวัตต์ 50 เฮิร์ท และสามารถแสดงค่าต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมทั้งยังมีการจำลองภาระทางไฟฟ้า เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดในขณะที่ยังทำการจ่ายโหลด หรือ ขณะที่ขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเมื่อระบบหลักเกิดความผิดพลาด และนำระบบหลักกลับมาจ่ายโหลดอีกครั้งเมื่อระบบหลักกลับสู่สภาวะปกติ

5.1 ปัญหาที่พบระหว่างการทดลอง

1. เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้การสตาร์ทด้วยมือจึงไม่สามารถสั่งให้ทำงานโดยอัตโนมัติได้จึงทำให้ใช้เวลานาน 3-4 นาที ทำให้ในกรณีขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงต้องสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารอไว้ก่อนถ้าเป็นแบบที่ใช้ในอาคารทั่วไปจะเป็นแบบอัตโนมัติ
2. เนื่องจากอุปกรณ์มิเตอร์ต่างๆเป็นอนาล็อกจึงทำให้มีความแม่นยำต่ำในการอ่านค่า
3. เนื่องจากขั้นตอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้านั้นไม่มี ซิงโครสโคปช่วยในการสับสวิตช์ จึงใช้เวลานานและอาจทำให้การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากเครื่องกำเนิดที่ใช้นั้นเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจึงไม่ค่อยเกิดปัญหาเท่าไหร่

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำ ซิงโครสโคป มาต่อเข้ากับชุดทดลองเพื่อสะดวกขึ้นในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. ควรเลือกใช้แอมป์มิเตอร์ที่มีย่านวัดกระแสเหมาะสมกับค่ากระแสที่วัดจะเหมาะสมกว่า

บรรณานุกรม

[1] สรรเพชร นุศรีอัน, 2531, การตรวจและซ่อมอัลเทอร์เนเตอร์.กรุงเทพฯ

[2] สุรศักดิ์ นิ่มวิลัย, 2547, การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดฝึกอบรมการทำงานระบบกระตุ้นและรักษาระดับแรงดันอัตโนมัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ.กรุงเทพฯ

[3] สุขสันต์ หวังสถิตวงษ์ และ สมชาย ฉัตรรัตนา, 2533, การจำลองแบบเวลา-จริงสำหรับชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.กรุงเทพฯ

[4] ธวัชชัย อัตถวิบูลย์กุล, 2540, เครื่องกลไฟฟ้า 3 ทฤษฎีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ซิงโครนัส.นนทบุรี

[5] มงคล ทองสงคราม, 2535, เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ.กรุงเทพฯ

[6] O.Drubel, Member “Challenges in Calculation and Design of Large Synchronous Generators” IEEE, VDE

[7] HAI Tao, CHEN Kuai “The researches on adaptive synchronized gridconnected of small generator” 2011 IEEE

[7] C.Phillipson, M.Kansara and P.G.Holmes “Three-phase VSCF induction generator synchronised by a single-phase supply through a passive single-element phase converter” Vol. 146, No. 3, May 1999

[9] J. Driesen, Member “Virtual Synchronous Generators” 2008 IEEE.

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเทียรทอง
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: manat.b@rmutp.ac.th

การศึกษา

ปร.ด. (เทคโนโลยีเทคนิคศึกษา)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ค.อ.ม. (เทคโนโลยีเทคนิคศึกษา)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วศ.บ. (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์)	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

งานวิจัยที่สนใจ

- ความปลอดภัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้า
- เทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: sakhon.w@rmutp.ac.th

การศึกษา

วศ.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (มทร.ธัญบุรี)

งานวิจัยที่สนใจ

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และระบบไฟฟ้ากำลัง

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)