การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส แบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส

STATIC VAR COMPENSATOR CONTROL OF THREE-PHASE SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR OPERATING AS A SINGLE PHASE

ปริญญา มาโชติ
PARINYA MACHOT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2565

KMITL-2022-EN-M-020-074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STATIC VAR COMPENSATOR CONTROL OF THREE-PHASE SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR OPERATING AS A SINGLE PHASE

PARINYA MACHOT

THE THESIS SUBMITED IN PARTAIL FULFILMENT
OF THE REQUAMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022

KMITL-2022-EN-M-020-074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPY RIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส
นักศึกษา	นายปริญญา มาโชติ
รหัสประจำตัวนักศึกษา	61601102
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. เฉลิมชาติ มานพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้การชดเชยกำลังเสมือนแบบสแตติก เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยศึกษาสภาวะชั่วครู่ สภาวะคงตัว และสภาวะเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลด มีการวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองระบบการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และการทดสอบรวมถึงวิธีการการเลือกตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างแรงดันไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้น โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวต้นกำลังทางกลเพื่อใช้ในการขับแกนเพลาหรือโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบวงจรควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้คงที่ เมื่อความเร็วรอบจากตัวต้นกำลังหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยภาษาซีบน Arduino Software (IDE) ในการสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนให้กับไตรแอกจากชุดโมดูล AC Light Dimmer ร่วมกับชุดโมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM–004T สำหรับการวัดค่าแรงดันและกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อีกทั้งมีการแสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วย Node-red จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ โดยให้ผลใกล้เคียงกับผลการจำลองในเงื่อนไขต่าง ๆ อย่างเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Static Var Compensator Control of Three-Phase Self-Excited Induction Generator Operating as A Single Phase
Student	Mr. Parinya Machot
Student ID.	61601102
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Years	2022
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr Chalermchat Manop
Thesis Co-Advisor	Prof.Dr Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis presents a study of voltage regulation of a self-excited three-phase induction generator using a static var compensator when operating as a single-phase generator by studying transient state, steady state and the condition when the generator supplies the load. An analysis of the generator's operating characteristics is used to compare results between the Matlab/Simulink program and testing, including how to choose the suitable capacitor for the initial voltage build up process. A DC electric motor is used as a prime mover to drive the shaft or rotor of the induction generator. A static var compensator using a Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor type (FC-TCR) is designed to regulate the voltage of the induction generator when the rotational speed of the prime mover or load are changed by using a ESP32 microcontroller. Programming for controlling the operation is written in C language on Arduino Software (IDE) to generate the firing angle signal for the triac in an AC Light Dimmer Module together with the AC Voltage Measurement Module PZEM–004T for voltage and current measurements of an induction generator. Node-red is used to display parameters as well. The results of the tests demonstrate the self-excited induction generator's ability to regulate its voltage. The experimental results are very close to simulation results which are satisfied.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ที่ได้ให้ความรู้ทางวิชาการ แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

เพื่อนร่วมงาน บริษัท อัลสตอม (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้แนะนำและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ และการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับโปรแกรมมาโดยตลอด

ขอบคุณนักศึกษาทุกระดับชั้นในห้องแลป PMC ห้อง 405 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ผู้จัดทำคาดว่าวิทยานิพนธ์ที่ได้จัดทำขึ้นจะมีประโยชน์แก่วิศวกรที่ดูแลทางด้านคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และผู้ที่สนใจ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาให้ดีขึ้นต่อไป

ปริญญา มาโชติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I
Abstract II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญรูป VIII
สารบัญตาราง XII
คำศัพท์ย่อในงานวิจัย XIII
บทที่ 1 : บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา 2
1.4 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย 2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย 4
1.6 ขั้นตอนการศึกษาและการวิจัย 4
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ 5

บทที่ 2 : ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 บทนำ 7
2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก 8
2.2.1 สเตเตอร์ (Stator) 8
2.2.2 โรเตอร์ (Rotor) 8
2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 8
2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 10
2.5 การสูญเสียและการส่งผ่านของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 14
2.6 ตัวเก็บประจุ (Capacitor) 17
2.7 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) 19
2.8 ตัวประกอบกำลังและการชดเชย 22
2.8.1 การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน 22
2.8.2 ประโยชน์จากการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง 23
2.9 ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.10 ประเภทความไม่สมดุลทางไฟฟ้า 24
2.10.1 Single-phase Under voltage unbalance 24
2.10.2 Two-phase Under voltage unbalance 24
2.10.3 Three-phase Under voltage unbalance 24
2.10.4 Single-phase Over voltage unbalance 24
2.10.5 Two-phase Over voltage unbalance 25
2.10.6 Three-phase Over voltage unbalance 25
2.11 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันในสภาวะไม่สมดุล 25
2.12 แรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลัง 27
2.13 แรงดันเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง 28
2.14 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า 28
2.15 มาตรฐานฮาร์มอนิก 30
2.15.1 มาตรฐาน IEEE519-1992 30
2.15.2 มาตรฐานฮาร์มอนิกของประเทศอังกฤษ 30
2.15.3 มาตรฐานฮาร์มอนิกของประเทศสวีเดน 31
2.15.4 มาตรฐาน EN 50160-1999 31
2.15.5 มาตรฐาน IEC 61000-2-12 : 2003 32

บทที่ 3 : ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 33
3.1 บทนำ 33
3.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 33
3.3 การแปลงระบบไฟฟ้า 36
3.3.1 การแปลงระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง 36
3.3.2 การแปลงระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่งเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน........ 37
3.4 ระบบแรงดันไฟฟ้า 38
3.5 ระบบกระแสไฟฟ้า 39
3.6 ระบบกำลังไฟฟ้า 39
3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 40
3.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำร่วม 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.9 การคำนวณและการออกแบบขนาดตัวเก็บประจุ 46
3.9.1 การคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ 46
3.9.2 การคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุโดยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า 46
3.10 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 48
3.10.1 ความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ 48
3.10.2 ความสูญเสียทางแม่เหล็ก 49
3.10.3 ความสูญเสียทางกล 50
3.10.4 กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า 50
3.10.5 กำลังไฟฟ้าขาออก 50
3.11 ข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 50

บทที่ 4 : การออกแบบภาควงจรกำลังและวงจรควบคุม 52
4.1 บทนำ 52
4.2 ส่วนวงจรกำลัง 53
4.2.1 วงจรกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 53
4.2.2 วงจรกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (SVC) 53
4.3 ส่วนวงจรควบคุม 59
4.3.1 วงจรขับเกตไตรแอก (Triac Gate Drives) 59
4.3.2 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 61
4.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ 63
4.4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 63
4.4.2 การแปลงค่าแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 65
4.5 แผนผังโครงสร้างระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าของไมโครคอนโทลเลอร์ 65
4.6 รูปแบบการแสดงผลข้อมูลการทำงานบน Dashboard ด้วย Node-RED 69

บทที่ 5 : ผลการจำลองและผลการทดสอบ 71
5.1 บทนำ 71
5.2 ผลการจำลองและผลการทดสอบในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว 71
5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบเมื่อมีโหลด 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4 ผลการทดสอบเมื่อใช้ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก 84

บทที่ 6 : สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 97
6.1 สรุปผลการวิจัย 97
6.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย 98
6.3 ข้อเสนอแนะ 99

เอกสารอ้างอิง 100
ภาคผนวก 102
ก. วงจรต้นแบบในงานวิจัย 103
ข. เครื่องมือวัดในงานวิจัย 106
ค. โปรแกรมควบคุมการทำงาน 108
ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์ 116
ประวัติผู้จัดทำ 127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	7
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์	10
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป	12
รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	14
รูปที่ 2.5 การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	14
รูปที่ 2.6 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ	17
ก. โครงสร้างของตัวเก็บประจุ	17
ข. สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ	17
รูปที่ 2.7 ชนิดของตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลัง	19
ก. ตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง	19
ข. ตัวเก็บประจุ Start/run มอเตอร์	19
รูปที่ 2.8 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ	19
ก. ฟลักซ์แม่เหล็กรอบเส้นลวดตัวนำ	19
ข. สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ	19
รูปที่ 2.9 ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็ก	21
รูปที่ 2.10 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ	22
รูปที่ 2.11 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	23
รูปที่ 2.12 ประเภทความไม่สมดุลทางไฟฟ้า	25
รูปที่ 2.13 เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสในสภาวะสมดุล	26
รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสในสภาวะไม่สมดุล	27
รูปที่ 2.15 สัญญาณฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ	28
รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน	33
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่สภาวะคงตัว	34
รูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดภายในแบบ Star (L-L)	35
รูปที่ 3.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดภายในแบบ Star (L-N)	35
รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดภายในแบบ Delta-1	36
รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดภายในแบบ Delta-2	36
รูปที่ 3.7 ระบบสามเฟสและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง	37
รูปที่ 3.8 ระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่งและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน	38
รูปที่ 3.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส 41

ก. แกนอ้างอิง α 41

ข. แกนอ้างอิง β 41

รูปที่ 3.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเมื่อทำการจ่ายโหลด 45

ก. แกนอ้างอิง α 44

ข. แกนอ้างอิง β 45

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและตัวเก็บประจุ ... 47

ก. เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 47

ข. ตัวเก็บประจุ 47

รูปที่ 3.13 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง 47

รูปที่ 4.1 วงจรควบคุมแรงดันอัตโนมัติแบบควบคุมไทรีสเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ 52

รูปที่ 4.2 วงจรกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดแบบ Star (L-N) 53

รูปที่ 4.3 สัญญาณทางไฟฟ้าของชุดควบคุมไทรีสเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ 54

รูปที่ 4.4 ไทรีสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ 54

รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมเส้นเดียววงจรควบคุมไทรีสเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ 57

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของชุดชดเชยแบบสแตติกและมุมจุดชนวน 58

รูปที่ 4.7 ชุดโมดูล AC Light Dimmer 60

รูปที่ 4.8 วงจรกำลังและวงจรควบคุมของโมดูล AC Light Dimmer 60

รูปที่ 4.9 ชุดโมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM–004T 61

รูปที่ 4.10 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ Functional block diagram 62

รูปที่ 4.11 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ Schematic Drawing 63

รูปที่ 4.12 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 64

รูปที่ 4.13 การใช้งานขา GPIO ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 65

รูปที่ 4.14 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ 66

รูปที่ 4.15 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ 66

รูปที่ 4.16 แผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ 67

รูปที่ 4.17 แผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ 68

รูปที่ 4.18 รูปแบบการเขียน Flow สำหรับการแสดงผล 69

รูปที่ 4.19 การแสดงผลข้อมูลการทำงานบน Dashboard 70

รูปที่ 5.1 ป้ายชื่อ (Name plate) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างไลบรารี่ของโปรแกรม Matlab/Simulink 73
รูปที่ 5.3 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 73
รูปที่ 5.4 ชุดทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 74
รูปที่ 5.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสำหรับความคุมมอเตอร์กระแสตรง 74
รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวจากการจำลอง 75
รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวจากการทดสอบ 75
รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการจำลอง 76
รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการทดสอบ 76
รูปที่ 5.10 สัญญาณกระแสไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการจำลอง 77
รูปที่ 5.11 สัญญาณกระแสไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการทดสอบ 77
รูปที่ 5.12 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจากการจำลอง 78
รูปที่ 5.13 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ 78
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 79
รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการจำลอง 79
รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการทดสอบ 80
รูปที่ 5.17 สัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการจำลอง 80
รูปที่ 5.18 สัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการทดสอบ 81
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ความเร็วรอบและความถี่ 81
รูปที่ 5.20 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 80-375 VA และไม่มีชุดชดเชย 82
รูปที่ 5.21 กระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 80-375 VA และไม่มีชุดชดเชย 83
รูปที่ 5.22 ตัวประกอบกำลังและ Voltage regulation เมื่อไม่มีชุดชดเชย 84
รูปที่ 5.23 สัญญาณเฟสล็อกลูปและสัญญาณมอดูเลชั่น 84
รูปที่ 5.24 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดและมีชุดชดเชย 85
รูปที่ 5.25 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อปลดโหลดและมีชุดชดเชย 85
รูปที่ 5.26 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลด-ปลดโหลดและมีชุดชดเชย 86
รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 89-435 VA และมีชุดชดเชย 87
รูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 89-435 VA และชุดชดเชย 87
รูปที่ 5.29 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดทั้ง 2 กรณี 88
รูปที่ 5.30 ตัวประกอบกำลังและ Voltage regulation เมื่อมีชุดชดเชย 89
รูปที่ 5.31 สัญญาณแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีโหลด 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.32 หน้าต่างโปรแกรม Arduino 90
รูปที่ 5.33 ที่อยู่หรือ URL ของ Node-red 90
รูปที่ 5.34 วิธีการกรอกหมายเลข Modbus Register 91
รูปที่ 5.35 วิธีการกำหนดการแสดงผลของ Dashboard 91
รูปที่ 5.36 Dashboard แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อมีโหลดและชุดชดเชย 92
รูปที่ 5.37 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีชุดชดเชยจากการจำลอง 92
รูปที่ 5.38 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีชุดชดเชยจากการทดสอบ 93
รูปที่ 5.39 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดและชุดชดเชยบน Dashboard 93
ก. แรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดขนาด 80 VA 93
ข. แรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดขนาด 150 VA 93
ค. แรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดขนาด 200 VA 93
ง. แรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดขนาด 250 VA 93
รูปที่ 5.40 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์ 94
ก. การจำลองมุมจุดชนวน 120 องศา 94
ข. การทดสอบมุมจุดชนวน 120 องศา 94
ค. การจำลองมุมจุดชนวน 160 องศา 94
ง. การทดสอบมุมจุดชนวน 160 องศา 94
รูปที่ 5.41 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไตรแอก 94
ก. การจำลองมุมจุดชนวน 120 องศา 94
ข. การทดสอบมุมจุดชนวน 120 องศา 94
ค. การจำลองมุมจุดชนวน 160 องศา 94
ง. การทดสอบมุมจุดชนวน 160 องศา 94
รูปที่ 5.42 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนจากการจำลอง 95
รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 30
ตารางที่ 2.2 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐานประเทศอังกฤษ 30
ตารางที่ 2.3 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐานประเทศสวีเดน 31
ตารางที่ 2.4 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน EN 50160-1999 31
ตารางที่ 2.5 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-2-12 : 2003 32
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการใช้งานชุดโมดูล AC Light Dimmer 61
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติและการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP32 64
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 72
ตารางที่ 5.2 แรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการจำลองและการทดสอบ............................ 76
ตารางที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการจำลองและการทดสอบ 80
ตารางที่ 5.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดและไม่มีชุดชดเชย 82
ตารางที่ 5.5 กำลังไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีโหลดและไม่มีชุดชดเชย 83
ตารางที่ 5.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดและมีชุดชดเชย 86
ตารางที่ 5.7 กำลังไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีโหลดและมีชุดชดเชย 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำศัพท์ย่อในงานวิจัย

N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส
ω_s คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์
N_r คือ ความเร็วโรเตอร์
ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์
P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก
f คือ ความถี่แหล่งจ่ายไฟ
f_r คือ ความถี่โรเตอร์
s คือ ค่าสลิป
V_t คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์
E_g คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำช่องว่างอากาศ
I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์
R_s คือ ค่าความต้านทานสเตเตอร์
X_s คือ ค่าสีคเกจรีแอคแตนซ์ที่สเตเตอร์
I_ϕ คือ ค่ากระแสไฟฟ้ากระตุ้น
I_m คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็ก
I_c คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของแกนเหล็ก
L_{ls} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
R_r คือ ความต้านทานขดลวดทางโรเตอร์
L_{lr} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านโรเตอร์
R_c คือ ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก
L_m คือ ความเหนี่ยวนำร่วม
C_b คือ ขนาดของตัวเก็บประจุ
R_L คือ ความต้านทานของโหลด
L_L คือ ความเหนี่ยวนำของโหลด
$P_{cu,stator}$ คือ ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์
$P_{cu,rotor}$ คือ ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์
$B_{\max}$ คือ ค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
x คือ Steinmetz’s index มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5–2.5
K_h คือ ค่าคงที่ของ Hysteresis loss ขึ้นอยู่กับเนื้อสารของแม่เหล็ก
K_e คือ ค่าคงที่ของ Eddy Current ขึ้นอยู่กับเนื้อสารของแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำศัพท์ย่อในงานวิจัย (ต่อ)

t คือ ค่าความหนาของแผ่นเหล็กเคลือบฉนวน

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกต่อเฟส

I_o คือ กระแสไฟฟ้าขาออกต่อเฟส

$\cos\phi$ คือ ค่าตัวประกอบกำลัง

L คือ ค่าอินดักแตนซ์ของ TCR

α คือ มุมจุดชนวนของไทรีสเตอร์

X_{TCR} คือ อิมพีแดนซ์ของไทรีสเตอร์

X_{SVC} คือ อิมพีแดนซ์รวมของตัวชดเชย

Q_{SVC} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชย

Q_{CC} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุ

I_{CC} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

X_{CC} คือ ขนาดของคาปาซิแตนซ์

E_{rs} คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลโรเตอร์

E_{rotor} คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจริงที่โรเตอร์

a คือ Turn Ratio

Z_{rs} คือ อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่มีความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์

jX_r คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ที่ความถี่สลิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เพราะมีข้อดีในเรื่องขนาด ความแข็งแรงทนทาน บำรุงรักษาง่าย เมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทอื่น ในบางครั้งถูกนำมาประยุกต์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-excited Induction Generator : SEIG) ที่สามารถประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม หรือพลังงานน้ำ อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองยังมีข้อเสียในเรื่องการรักษาระดับแรงดันที่ขั้วให้คงที่ เมื่อความเร็วรอบจากตัวต้นกำลังหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ในการที่จะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะต้องมีสองเงื่อนไขในการพิจารณาดังนี้

1.1.1 ต้องมีสนามแม่เหล็กตกค้างในโรเตอร์เพียงพอ ที่จะทำให้เกิดการกระตุ้นด้วยตัวเอง อาจทำได้โดยการจ่ายไฟให้มอเตอร์เหนี่ยวนำก่อน

1.1.2 ต้องมีตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากเงื่อนไขข้างต้นดังกล่าว งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มาทำการออกแบบและสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงหน้าที่เป็นตัวต้นกำลังจ่ายกำลังทางกลให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับการวิเคราะห์ผลงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะชั่วครู่ สภาวะคงตัว และสภาวะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink และชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ และมีการออกแบบวงจรที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันที่ขั้วให้คงที่ เรียกว่าชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) โดยการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์หรือไตรแอก เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองชนิด 3 เฟส เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส โดยทำการศึกษาทั้งสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว รวมถึงการวิเคราะห์ค่าเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการสร้างแรงดันในช่วงเริ่มต้น (Build up voltage) ในการทดสอบได้มีการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink และแบบจำลอง เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดลองที่เกิดขึ้น ในการศึกษาได้ออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว เพื่อที่จะจ่ายกำลังเสมือน (Reactive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power) ในช่วงที่นำโหลดมาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบ ซึ่งส่งผลต่อทั้งแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและความถี่

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 ความสัมพันธ์ของค่าเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้นที่ใช้ในการคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ถ้าขนาดตัวเก็บประจุเล็กเกินไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะไม่สามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ จำเป็นต้องมีการออกแบบตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.3.2 ค่าสนามแม่เหล็กตกค้างบนโรเตอร์เป็นค่าเหนี่ยวนำเริ่มต้นในการกระตุ้นแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.3.3 เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนที่ความเร็ว 50 เฮิรตซ์ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุ เช่น เมื่อเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่าตัวเก็บประจุขนาดเล็ก

1.3.4 การเพิ่มหรือลดโหลดอย่างทันทีทันใด หรือความเร็วรอบของตัวต้นกำลังมีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลต่อแรงดัน และความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.4 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

งานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองทั้งการควบคุมแรงดันที่ขั้ว การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุ รวมถึงวิธีการอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประกอบด้วย

1.4.1 Thiraput Sattayatham และ Vijit Kinnares ได้นำเสนอบทความวิชาการในหัวข้อ Transient and steady state analysis of a two-phase self-excited induction generator using mathematical model โดยได้นำเสนอการวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่และภาวะคงตัว วิเคราะห์ร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์ในการเลือกขนาดตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส การควบคุมแรงดันที่ขั้วให้คงที่โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC 16F685 ในการสร้างสัญญาณควบคุมมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์เมื่อมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโหลด

1.4.2 Wutthichai Rodphum และ Chaiwut Chat-uthai ได้นำเสนอบทความวิจัยเรื่อง Optimal Capacitance Requirements for voltage Compensation of Self-Excited induction Generator ได้นำเสนอการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานและอนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เมื่อมีการจ่ายโหลดทางไฟฟ้าตามที่ต้องการ โดยแรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือ ± 6% และมีตัวประกอบโหลดที่ 0.86-0.99 ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ งานวิจัยนี้ยังนำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้สำหรับการหาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมร่วมกับวิธีจีเนติกอัลกอริทึม กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาดตั้งแต่ 0.75 kW, 2.2 kW และ 4.0 kW จากการทดสอบพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในค่ามาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

1.4.3 Prachuab Iamsamang และ Somboon Sangwongwanich ได้นำเสนองานวิจัย Improvement of Voltage quality of A Self-Excited induction Generator Using an Active Filter ในงานวิจัยได้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ตั้งแต่การเลือกขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการสร้างแรงดันในช่วงเริ่มต้น รวมทั้งการใช้วงจรกรองแอคทีฟต่อขนานกับตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงแรงดันไฟฟ้ารวมทั้งช่วยลดค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดที่ไม่สมดุล และโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่วงกรองแอคทีฟสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ช่วยในการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้คงที่ มีความสมดุลปราศจาคฮาร์มอนิก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ดีขึ้นเมื่อมีการชดเชยโดยวงจรกรองแอคทีฟ

1.4.4 S. S. Murthy, G. Bhuvaneswari, Sarsing Gao and Rajesh Kumar Ahuja ได้นำเสนอบทความวิชาการเรื่อง Self-Excited Induction Generator for Renewable Energy Applications to Supply Single-phase Loads in Remote Locations ได้เสนอวิธีการเลือกตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง พิกัด 7.5 kW, 415 V, 15 A โดยการดัดแปลงให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองชนิด 3 เฟส ให้จ่ายโหลด 1 เฟส โดยการต่อตัวเก็บประจุตั้งแต่ 2-3 ชุด บทความนี้ยังนำเสนอการต่อขดลวดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งแบบสตาร์และเดลต้า การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น แรงดัน กระแส รวมถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิด บทสรุปของการใช้วิธีการนี้ยังมีข้อเสียในเรื่องการรักษาสมดุลของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส เนื่องจากตัวเก็บประจุไม่ได้ต่อเข้ากับขดลวดให้ครบทั้ง 3 เฟส หรือแรงดันที่เกิดจากการต่อขดลวดแบบสตาร์ก็ไม่สามารถต่อเข้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส ได้โดยตรง เนื่องจากเป็นแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 400 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

การกำหนดขอบเขตงานวิจัย ประกอบด้วย

1.5.1 จำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยประเมินการทำงานของระบบจำลองเปรียบเทียบกับระบบการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบต้นแบบเพื่อยืนยันความถูกต้อง

1.5.2 สร้างชิ้นงานจริงเพื่อทดสอบการทำงานทั้งวงจรควบคุมชุดต้นกำลังและวงจรรักษาระดับแรงดัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

1.5.3 ทดสอบการทำงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าในสภาวะชั่วครู่ สภาวะคงตัวและสภาวะเมื่อทำงานร่วมกับชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

1.6 ขั้นตอนการศึกษาและการวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาและวิจัย มีลำดับงานดังนี้

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแรงดันในช่วงเริ่มต้น

1.6.2 ออกแบบและจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาพฤติกรรมแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อทำการทดสอบการเพิ่มหรือลดโหลดทางไฟฟ้า

1.6.3 ออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่เสมือนเครื่องต้นกำลัง และออกแบบวงจรควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) เพื่อใช้ในการจ่ายกำลังเสมือนให้กับระบบ

1.6.4 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองและมอเตอร์กระแสตรงรวมทั้งชุดอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.6.5 สร้างวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และออกแบบวงจรควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของระบบด้วยภาษาซีบนโปรแกรม Arduino IDE

1.6.6 ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับการจำลองที่ได้จากโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อตรวจสอบการทำงานที่ถูกต้อง พร้อมทั้งแก้ไขวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดและปรับปรุงโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม จนได้ผลลัพธ์ของการทำงานที่ถูกต้องและสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.7 เก็บข้อมูลผลการทดลองและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ จากการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

1.6.8 บันทึกผลการทดสอบและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล ทำการเขียนและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ เพื่อสรุปผลและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสภาวะชั่วครู่ สภาวะคงตัว และการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส งานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟสให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยรายละเอียดจำนวน 6 บท โดยมีเค้าโครงของแต่ละบทโดยสังเขปดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก (Squirrel cage type) ที่ประกอบด้วยส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่าสเตเตอร์ (Stator) และส่วนที่หมุนเรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) โดยจะกล่าวถึงสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรสมมูล และการสูญเสียในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ การสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ ในบทนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการควบคุมกำลังเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงมาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า เช่น แรงดันตก แรงดันเกิน และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล รวมถึงมาตรฐานของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่ 3 ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยนำเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบ เสมือนเป็นพลังงานกลจากภายนอกมาใช้ในการหมุนโรเตอร์ และบทนี้ยังได้นำเสนอความสัมพันธ์ของขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Built up voltage) รวมถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บทที่ 4 การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลัง บทนี้จะอธิบายถึงการออกแบบและสร้างวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ควบคุมมุมจุดชนวนของไทรีสเตอร์ด้วยวงจรขับเกต (Gate Drives) ทำหน้าที่เชื่อมโยงสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างสัญญาณควบคุมกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่อยู่ภายในชุดโมดูล AC Light Dimmer

บทที่ 5 ผลการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งในสภาวะชั่วครู่ สภาวะคงตัว และสภาวะที่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือปลดโหลดอย่างทันทีทันใด ประกอบด้วย แรงดัน กระแส และค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า รวมถึงเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยการควบคุมมุมจุดชนวนไตรแอกของชุดโมดูล AC Light Dimmer โดยใช้โมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM-004T วัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านการสื่อสารแบบ Serial port (RS-232) และแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องการ เช่น แรงดัน, กระแส, ความถี่ หรือมุมจุดชนวนผ่านการแสดงผลด้วย Dashboard จากเครื่องมือการจัดการแบบ Flow ที่มีชื่อเรียกว่า Node-red

บทที่ 6 การกล่าวสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาและอุปสรรค รวมถึงการวิเคราะห์ผลการจำลองและทดสอบ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง และในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา รวมถึงการประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยด้านอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Machine) เป็นอุปกรณ์แปรรูปพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับประเภทหนึ่งที่สามารถทำหน้าที่ได้ 2 ลักษณะ กล่าวคือ สามารถแปรรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเรียกว่า *"มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ"* และสามารถแปรรูปพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเรียกว่า *"เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ"* โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกสร้างเพื่อใช้งานในรูปแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบอยู่หลายประการด้วยกันเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง เช่น ความแข็งแรงทนทาน ความถี่ในการดูแลรักษาต่ำ ราคาหรือต้นทุนที่ต่ำกว่ารวมทั้งความสามารถในการทำงานในสภาพแวดล้อมที่สกปรก มีประกายไฟ ในอดีตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกนำมาใช้ในการขับเคลื่อนอัตราเร็วที่คงที่เท่านั้น นอกจากนั้นยังไม่สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่ได้เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไป ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและไมโครอิเล็กทรอนิกส์ถูกนำมาใช้งานเพื่อแก้ไขปัญหาการควบคุมอัตราเร็วและแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ส่งผลให้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรง

รูปที่ 2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก

โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก (Squirrel cage type) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่าสเตเตอร์ (Stator) และส่วนที่หมุนเรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ มีขั้วต่อสายไฟ (Terminal) เพื่อใช้สำหรับการต่อใช้งานกับระบบไฟฟ้าทั้งการต่อแบบสตาร์และเดลต้า ภายในมอเตอร์มีแกนเหล็กบาง ๆ (Laminated Sheet Steel) กันซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิคอน (Silicon Steel) และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสล็อตของแกนเหล็ก โดยจะมีการพันขดลวดแบบกระจายสนามแม่เหล็กแบบรูปคลื่นไซน์

2.2.2 โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์เป็นส่วนที่หมุนได้ของมอเตอร์ แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นลามิเนตเซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่าสล็อต (Slot) ตรงกลางถูกเจาะรูสำหรับสอดเพลา เมื่อนำแผ่นเหล็กมาอัดเข้ากันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ ที่ผิวของโรเตอร์จะมีสล็อตไปตามทางยาว และในสล็อตจะมีแท่งตัวนำทองแดงหรืออะลูมิเนียมฝังอยู่โดยรอบ ส่วนปลายเชื่อมติดกับแหวนโลหะลักษณะคล้ายกับกรงกระรอก

2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ขวดลวดสเตเตอร์ โดยที่สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์นี้จะยุบและพองตัวตามการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่เคลื่อนที่ไปตัดกับตัวนำในโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไปสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์นี้จะไปดึงดูดกับสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ความเร็วรอบของโรเตอร์จะหมุนต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed : ω_s, N_s) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$\omega_s = \frac{2\omega}{P} \tag{2.1}$$

จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนให้อยู่ในหน่วยรอบต่อนาที (RPM) ดังสมการที่ (2.2)

$$N_s = \frac{120f}{P} \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

N_s คือ ความเร็วซิงโครนัส

N_r คือ ความเร็วโรเตอร์

ω_s คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์

ω_r คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

f คือ ความถี่แหล่งจ่ายไฟ

จากสมการความเร็วซิงโครนัส (N_s) จะเห็นว่าความเร็วซิงโครนัสขึ้นอยู่กับความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายและจำนวนขั้วของมอเตอร์ และสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนได้ โดยสลับลำดับเฟสของสัญญาณทางไฟฟ้าคู่ใดคู่หนึ่ง ดังนั้นจะเห็นว่าแท่งตัวนำต่าง ๆ ที่วางอยู่บนโรเตอร์จะเกิดการตัดสนามแม่เหล็กหมุนทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าและกระแสเหนี่ยวนำขึ้นมาในแท่งตัวนำ ค่ากระแสจะส่งผลทำให้เกิดแรงบิดทางกลกระทำกับแท่งตัวนำต่าง ๆ ในทิศทางที่ทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ (N_r) ซึ่งความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าภาระทางกล

ความเร็วของโรเตอร์ (N_r) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามภาระทางกลสามารถอธิบายหลักการทำงานความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าความเร็วเรียกว่าสลิป (Slip) ดังสมการที่ (2.3)

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \tag{2.3}$$

เมื่อ (s) เป็นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีหน่วย และ N_s, N_r มีหน่วยรอบต่อนาที ซึ่งสามารถหาความเร็วมอเตอร์ได้จากสมการที่ (2.4)

$$N_r = (1 - s) N_s \tag{2.4}$$

ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเริ่มหมุนค่าสลิปจะเท่ากับ 1 ขณะที่ไม่มีภาระทางกลค่าสลิปจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นบวกอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 สามารถนำมาหาค่าความถี่ของโรเตอร์ (f_r) ได้จากสมการที่ (2.5)

$$f_r = sf \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

f_r คือ ความถี่โรเตอร์

f คือ ความถี่แหล่งจ่ายไฟ

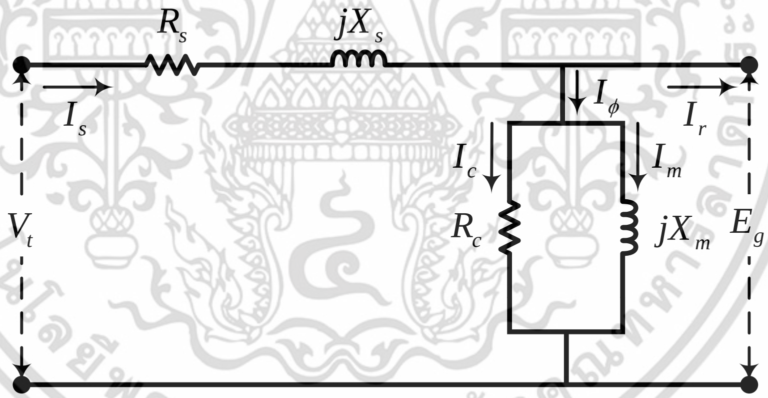
s คือ Per unit slip speed หรือค่าสลิป

2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีลักษณะเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า แตกต่างกันที่ขดลวดทุติยภูมิ กล่าวคือขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงจะไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ การพิจารณารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กเมื่อได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในสภาวะสมดุล สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.6)

$$V_t = E_g + I_s\left(R_s + jX_s\right) \tag{2.6}$$

สามารถแสดงวงจรสมมูลในส่วนของสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์

เมื่อ

V_t คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

E_g คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำช่องว่างอากาศ

R_s คือ ค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์

X_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์

I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์

I_r คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_c คือ ค่าความต้านทานสูญเสียแกนเหล็ก
I_c คือ ค่ากระแสไฟฟ้าค่าสูญเสียในแกนเหล็ก
X_m คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลในแกนเหล็ก
I_ϕ คือ ค่ากระแสไฟฟ้ากระตุ้น
I_m คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็ก

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ กระแสสเตเตอร์ (I_s) ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกทางด้านภาระ (I_r) เป็นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ และส่วนที่สองคือส่วนประกอบเพื่อกระตุ้นหรือกระแสกระตุ้น (I_ϕ) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศและเป็นฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_g) กระแสกระตุ้นถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกอยู่ในรูปของการสูญเสียในแกนเหล็ก (I_c) ซึ่งจะมีเฟสทับกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่วนที่สองอยู่ในรูปกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ซึ่งกระแสจะล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ 90 องศา และการสูญเสียในแกนเหล็กแสดงในรูปของ (R_c) ต่อขนานกับส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็ก (X_m) ทั้งสองส่วนที่จะต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาโรเตอร์ที่ความเร็วรอบและฟลักซ์เดียวกัน ใช้หลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า เรียกว่าหลักการเหนี่ยวนำด้วยการส่งผ่าน Transfer ส่วนประกอบทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) มาด้านปฐมภูมิ (Primary) ในรูปของ Turn Ratio ของขดลวดจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.7)

$$E_{rs} = aE_{rotor} \tag{2.7}$$

เมื่อ

E_{rs} คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลโรเตอร์
E_{rotor} คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจริงที่โรเตอร์
a คือ Turn Ratio

ในส่วนของความสัมพันธ์ด้านกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจริงที่โรเตอร์ (I_{rotor}) และกระแสในวงจรสมมูลของโรเตอร์ (I_{rs}) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.8)

$$I_{rs} = \frac{I_{rotor}}{a} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ (2.7) มาหารด้วยสมการที่ (2.8) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลโรเตอร์ $\left(Z_{rs}\right)$ และค่าอิมพีแดนซ์วงจรโรเตอร์จริง $\left(Z_{rotor}\right)$ ดังสมการที่ (2.9)

$$Z_{rs} = \frac{E_{rs}}{I_{rs}} = \frac{a^2 E_{rs}}{I_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \tag{2.9}$$

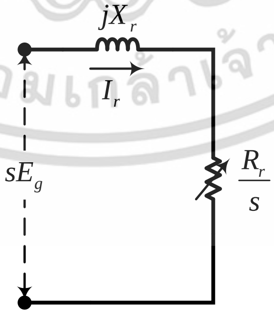
จากสมการที่ (2.7), (2.8) และ (2.9) ค่า $\left(E_{rs}\right)$, $\left(I_{rs}\right)$ และ $\left(Z_{rs}\right)$ เป็นค่าที่ได้จากการ Transfer ตัวแปรและพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์มาสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการของหม้อแปลงจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (Rotor Reference Frame) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.10)

$$\frac{E_{rs}}{I_{rs}} = Z_{rs} = R_r + s\left(jX_r\right) \tag{2.10}$$

เมื่อ

Z_{rs} คือ อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่มีความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์
R_r คือ ความต้านทานโรเตอร์ที่อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์
jX_r คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ที่ความถี่สลิป

จากสมการที่ (2.10) จะได้ค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) ที่มีค่าแปรผันกับค่าสลิปของมอเตอร์ โดยที่ $\left(X_r\right)$ เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่มีความถี่เดียวกับสเตเตอร์ เมื่อมองโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงจะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของโรเตอร์โดยมองจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์เมื่อมองจากด้านสเตเตอร์จะพบว่ารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงโครนัส โดยฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ซึ่งหากไม่มีผลของความเร็วโรเตอร์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านโรเตอร์จะเท่ากับสเตเตอร์ $\left(E_g\right)$ แต่เนื่องจากโรเตอร์ $\left(E_{rs}\right)$ หมุนด้วยความเร็วใด ๆ มีผลทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับค่าสลิป $\left(s\right)$ ซึ่งส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ดังสมการที่ (2.11)

$$E_{rs} = sE_g \tag{2.11}$$

ในส่วนประกอบทางด้านภาระ $\left(I_r\right)$ ของกระแสทางด้านสเตเตอร์ที่ใช้สำหรับสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อกระตุ้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์เพื่อรักษาระดับฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศไว้ โดยสมมติให้จำนวนรอบของขวดทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(I_r\right)$ และ $\left(I_{rs}\right)$ ดังสมการที่ (2.12)

$$I_{rs} = I_r \tag{2.12}$$

เมื่อนำสมการที่ (2.11) หารด้วยสมการที่ (2.12) จะได้สมการที่ (2.13)

$$\frac{E_{rs}}{I_{rs}} = \frac{sE_g}{I_r} \tag{2.13}$$

เมื่อนำผลความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ามาพิจารณาร่วมกับสมการที่ (2.11) และสมการที่ (2.13) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.14)

$$\frac{sE_g}{I_r} = \frac{E_{rs}}{I_{rs}} = R_r + jsX_r \tag{2.14}$$

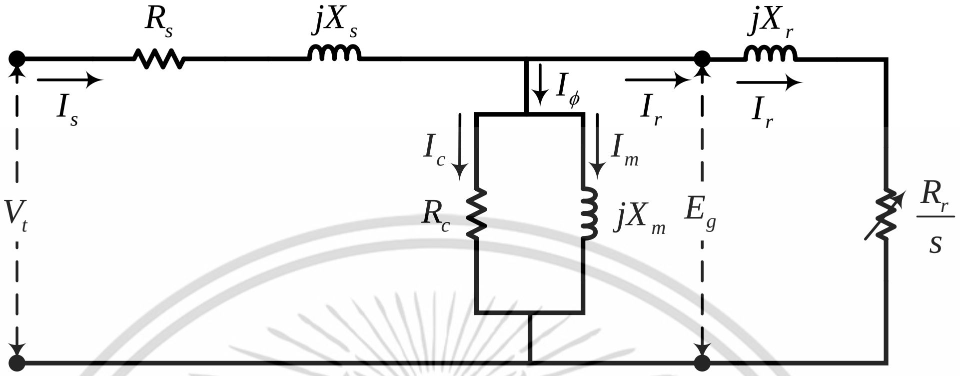
เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างของสมการที่ (2.14) จะได้สมการที่ (2.15)

$$\frac{E_g}{I_r} = \frac{R_r}{s} + jX_r \tag{2.15}$$

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์เมื่อพิจารณาทางกายภาพจะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์ซึ่งมีความถี่ $\left(sf\right)$ มีทิศทางไปทางเดียวกับโรเตอร์ซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

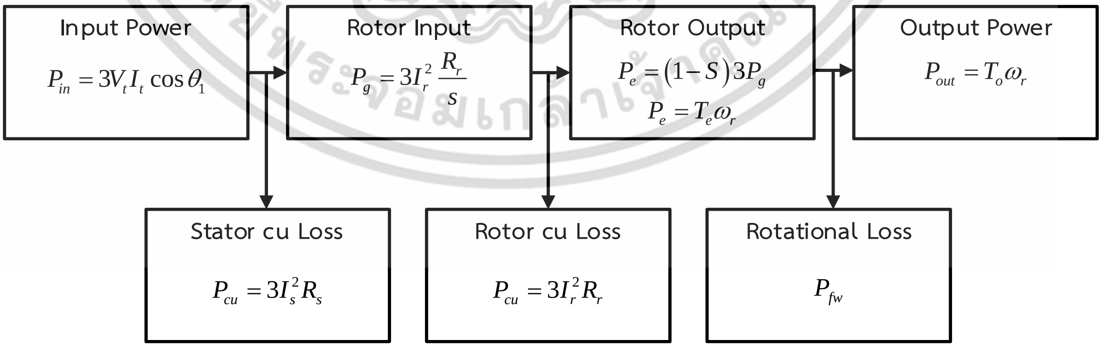
ความถี่เท่ากับ $(1-s)f$ ดังนั้นเมื่อมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่โรเตอร์มีความถี่เท่ากับ (sf) แต่เมื่อพิจารณาจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์จะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์จะมีความถี่เท่ากับความถี่ซิงโครนัส และเมื่อพิจารณาในรูปของวงจรสมมูลจะได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.5 การสูญเสียและการส่งผ่านของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายไฟให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำให้ขดลวดสเตเตอร์ มอเตอร์จะทำงานโดยหมุนที่ความเร็วพิกัด ขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กและค่าสลิป ในระหว่างที่มอเตอร์ทำงานนั้นจะเกิดค่าสูญเสียในรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานชนิดอื่น ๆ กระจายอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่กำลังสูญเสียในแกนเหล็กส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังกลที่ขับภาระ ความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากแผนภูมิการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จากรูปที่ 2.5 เมื่อจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature winding) จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดสูญเสียจากความต้านทานซึ่งเรียกว่า (Stator Copper Loss) และการสูญเสียจากแกนเหล็ก (Core Loss) ในรูปของความร้อนโดยที่กำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องอากาศให้กับโรเตอร์เรียกว่า กำลังงานในช่องอากาศ (Air-Gap Power) เมื่อถ่ายเทกำลังงานให้กับโรเตอร์ส่วนหนึ่งจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Rotor Copper Loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานที่ส่งออกจากโรเตอร์ซึ่งเป็นกำลังงานทางกล และเมื่อเปลี่ยนเป็นกำลังงานทางกลแล้วจะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมขนาดมอเตอร์เหนี่ยวนำตั้งแต่ความเร็วเริ่มต้นจนถึงค่าพิกัด จากนั้นกำลังงานที่เหลือจะเป็นกำลังงานทางกลไปใช้ในการขับภาระ การสูญเสียในแกนเหล็กจะเกิดขึ้นที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัส การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างผิวของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้การสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในส่วนของสเตเตอร์เท่านั้นในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้การสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านจากลมมากขึ้น อย่างไรก็ตามการสูญเสียในแกนเหล็กจะลดลง จึงรวมการสูญเสียเหล่านี้ไว้ด้วยกันเรียกว่า Rotational Loss and Core Loss และจะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (Input Power)

$$P_{in} = 3V_t I_s \cos\theta \quad (2.16)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss)

$$P_{cu} = 3I_s^2 R_s \quad (2.17)$$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องอากาศ (Air-Gap Power)

$$P_g = 3I_s^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.18)$$

กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ (Rotor Copper Loss)

$$P_{cu} = 3I_r^2 R_2 = sP_g = P_g - P_e \quad (2.19)$$

กำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์ (Rotor Copper Loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_e = P_g - P_{cu} = \left(1-s\right)P_g \tag{2.20}$$

กำลังไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำในโรเตอร์ (Electromagnetic Torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \tag{2.21}$$

กำลังขาออก (Output Power)

$$P_{out} = P_e - P_r = T_o \omega_r \tag{2.22}$$

แรงบิดทางกล (Output Torque)

$$T_o = \frac{P_{out}}{\omega_r} \tag{2.23}$$

โดยสามารถหาค่า ω_s ได้จากสมการที่ (2.24)

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \tag{2.24}$$

และสามารถหาค่า ω_r ได้จากสมการที่ (2.25)

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \tag{2.25}$$

จากรูปที่ 2.5 แสดงการส่งผ่านกำลังและกำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วยกำลังสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Copper Loss) ในสมการที่ (2.17) กำลังที่สูญเสียจากความต้านทานและขดลวดโรเตอร์ (Rotor Copper Loss) ในสมการที่ (2.19) และกำลังสูญเสียในช่วงของ Rotational and Core Loss เมื่อนำกำลังทั้ง 3 ส่วนรวมกัน จะได้กำลังสูญเสียทั้งหมดดังสมการที่ (2.26)

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

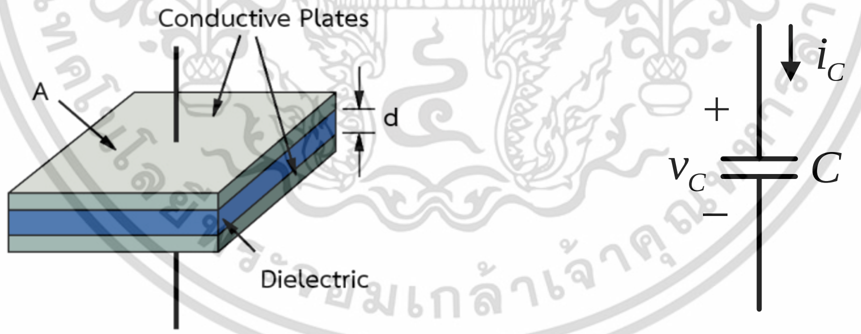
ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในสภาวะเป็นมอเตอร์นิยมใช้จำนวนในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ (2.27) และ (2.28)

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{2.27}$$

$$\%\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100 \tag{2.28}$$

2.6 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์พื้นฐานสองขาที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป โครงสร้างของตัวเก็บประจุแสดงดังรูป 2.6 ประกอบด้วย แผ่นเพลตนำไฟฟ้าสองแผ่นที่ถูกกั้นด้วยวัสดุไม่นำไฟฟ้าที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) หรือฉนวนไฟฟ้า (Insulator) โดยทั่ว ๆ ไปแล้วแผ่นเพลตนำไฟฟ้าจะทำจากอะลูมิเนียม ส่วนไดอิเล็กตริกจะใช้วัสดุจำพวกเซรามิกกระดาษ ไมกา หรือโพลิเมอร์ ดังนั้นในการใช้งานจริง การเลือกใช้ประเภทของตัวเก็บประจุ จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับงาน เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป วงจรสัญญาณความถี่สูง หรือวงจรไฟฟ้ากำลังเป็นต้น ซึ่งตัวเก็บประจุที่ใช้งานดังกล่าวจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน



ก) โครงสร้างของตัวเก็บประจุ ข) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

รูปที่ 2.6 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

จากโครงสร้างตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.6 ประจุที่แผ่นเพลตไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังแผ่นเพลตอีกด้านหนึ่งภายในตัวเก็บประจุได้ ดังนั้นการเคลื่อนย้ายประจุระหว่างแผ่นเพลตจะต้องผ่านวงจรภายนอกที่เชื่อมต่อเข้ากับขั้วของตัวเก็บประจุทั้งสอง จึงจะเกิดการเคลื่อนย้ายของประจุ สังเกตได้ว่าพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุจะอยู่ในรูปสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ (q) ที่สะสมในตัวเก็บประจุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q = Cv \tag{2.29}$$

เมื่อ

C คือ ค่าความเก็บประจุ
q คือ ประจุไฟฟ้า
v คือ แรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของประจุเทียบกับเวลา $(i = dq/dt)$ เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.29) สมการกระแสไฟฟ้าเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$i = C\frac{dv}{dt} \tag{2.30}$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.30) ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้า (v) มีค่าคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถขยายความได้ว่า *“ตัวเก็บประจุประพฤติตัวเป็นอุปกรณ์เปิดวงจร ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง”*

ในการออกแบบวงจรไฟฟ้า เราสามารถนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมหรือขนาน เพื่อให้ได้ค่าตัวเก็บประจุที่ต้องการ รูปแบบการต่อของตัวเก็บประจุจะตรงข้ามกับตัวต้านทาน ต้องคำนึงถึงสิ่งนี้ด้วย โดยทั่วแล้วตัวเก็บประจุที่มีการผลิตและจำหน่ายไม่ได้มีครบทุกค่าที่เราต้องการ สำหรับตัวเก็บประจุมีการต่อแบบอนุกรม ผลรวมของค่าส่วนกลับของความเก็บประจุ (N) ตัว มีค่าเท่ากับค่าส่วนกลับของความเก็บประจุสมมูล ดังสมการที่ (2.31)

$$\frac{1}{C_{equ}} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_N}\right) \tag{2.31}$$

สำหรับตัวเก็บประจุต่อแบบขนาน ผลของค่ารวมตัวเก็บประจุ (N) ตัวมีค่าเท่ากับความเก็บประจุสมมูล ดังสมการที่ (2.32)

$$C_{equ} = \left(C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_N\right) \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

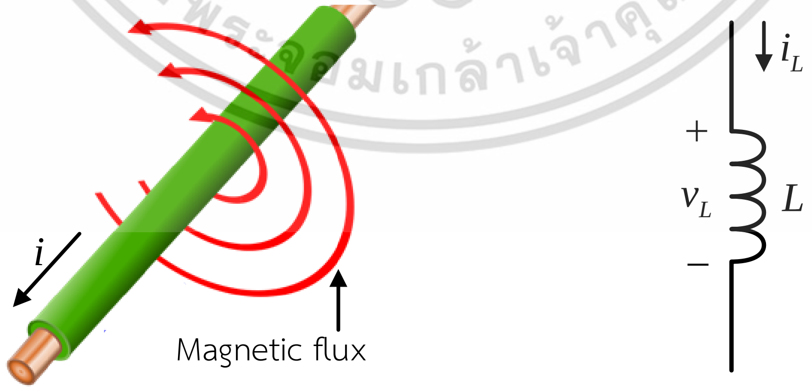
ปัจจุบันตัวเก็บประจุได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญอย่างมาก ถูกใช้งานตั้งแต่ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ จนถึงระดับแรงดันสูง หน้าที่หลัก ๆ ของตัวเก็บประจุสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ใช้สำหรับสตาร์ท-รันมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส หรือใช้ในการสร้างแรงดันเริ่มต้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง แสดงดังรูปที่ 2.7

ก) ตัวเก็บประจุปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ข) ตัวเก็บประจุ Start/run มอเตอร์

รูปที่ 2.7 ชนิดของตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.7 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์พาสซีฟที่สะสมพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถพิจารณาในเทอมของฟลักซ์แม่เหล็กที่จัดเรียงเป็นรูปวงปิดล้อมเส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านดังแสดงในรูปที่ 2.8



ก) ฟลักซ์แม่เหล็กรอบเส้นลวดตัวนำ ข) สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.8 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเส้นลวดมาพันหนึ่งรอบ พร้อมจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป พบว่ามีการกระจายฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) รอบเส้นตัวนำ สำหรับเส้นลวดที่มีการพันมากกว่าหนึ่งรอบฟลักซ์แม่เหล็กรวม (λ) ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\lambda = N\phi \tag{2.33}$$

เมื่อพิจารณาตัวเหนี่ยวนำเชิงเส้น ฟลักซ์แม่เหล็กรวมเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเอง ดังนั้นเราสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์อธิบายได้ดังนี้

$$\lambda = Li(t) \tag{2.34}$$

โดยที่ (L) เป็นค่าคงที่ความเหนี่ยวนำ (Inductance) มีหน่วยเป็นเวบเบอร์ต่อแอมแปร์ (WB/A) แต่หน่วยที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือเฮนรี่ (*H*) โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางแม่เหล็กของขดลวดตัวนำเอง ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่ใกล้เคียงสามารถประมาณได้จากขนาดของขดลวดตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.35)

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \tag{2.35}$$

เมื่อ

N คือ จำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำ
μ คือ ค่าซึมซับของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ
A คือ คือพื้นที่ของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ
l คือ ความยาวของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.34) จะพบว่าการเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวเหนี่ยวนำ จะมีผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กรวมเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ตัวเหนี่ยวนำเองดังสมการที่ (2.36)

$$v = \frac{d\lambda}{dt} \tag{2.36}$$

เมื่อแทนฟลักซ์แม่เหล็กด้วยสมการที่ (2.34) ทำให้สมการที่ (2.36) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = L\frac{di(t)}{dt} \tag{2.37}$$

จากสมการข้างต้น เราสามารถอธิบายได้ว่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเหนี่ยวนำเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่อเวลา นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ กล่าวได้ว่า *"ตัวเหนี่ยวนำประพฤติตัวเป็นอุปกรณ์ลัดวงจร ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง"*

เราสามารถนำตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมหรือต่อขนานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่นเพื่อลดขนาด หรือเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ การเชื่อมตัวเหนี่ยวนำ (N) ตัวแบบอนุกรม ผลรวมของค่าเหนี่ยวนำมีค่าดังสมการที่ (2.38)

$$L_{equ} = \left(L_1 + L_2 + L_3 + ... + L_N\right) \tag{2.38}$$

สำหรับกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำ (N) ตัวแบบขนาน ผลรวมของค่าส่วนกลับของค่าเหนี่ยวนำ (N) ตัว มีค่าเท่ากับค่าส่วนกลับของความเหนี่ยวนำสมมูลดังสมการที่ (2.39) กล่าวได้คือตัวเหนี่ยวนำที่ต่อแบบอนุกรมหรือขนาน การคำนวณจะเหมือนกับกรณีของตัวต้านทาน

$$\frac{1}{L_{equ}} = \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + ... + \frac{1}{L_N}\right) \tag{2.39}$$

ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก มีชื่อเรียกว่ารีแอคเตอร์กั้นกระแสไฟฟ้า (Blocking reactor) ดังรูปที่ 2.9 ทำหน้าที่เพิ่ม-ลด โดยการปรับค่าการทำงานด้วยการปรับมุมจุดชนวน ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ถัดไป

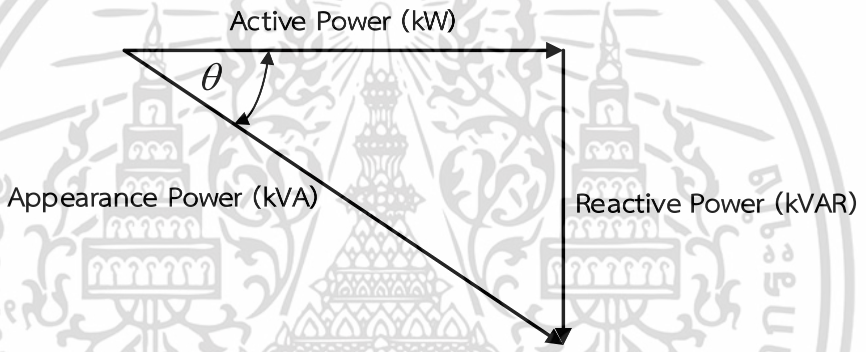
รูปที่ 2.9 ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ตัวประกอบกำลังและการชดเชย

โหลดในระบบไฟฟ้ากระแสสลับหลายอย่าง เช่น มอเตอร์ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า ต้องใช้ทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ในการทำงาน ทำให้ระบบไฟฟ้าโดยรวมมีตัวประกอบลัง (Power Factor) ที่ค่อนข้างต่ำ การที่ระบบไฟฟ้ามีตัวประกอบกำลังต่ำมีผลเสียหลายประการ เช่น กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น ระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ทำได้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า คือค่าคงที่ของโหลดตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งจะเป็นค่าบอกความสามารถในการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Appearance Power) ให้เป็นกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ดังรูปที่ 2.10 และเราสามารถหาค่าตัวประกอบกำลังจากอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏดังสมการที่ (2.40)



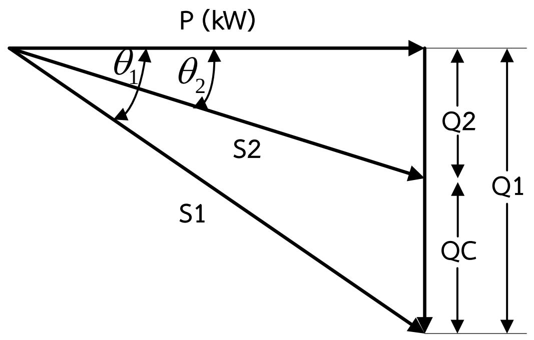
รูปที่ 2.10 กำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

$$PF = \frac{P(kW)}{S_{kVAR}} = \cos\theta \tag{2.40}$$

2.8.1 การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

โดยทั่วไปแล้วการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้านิยมใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.11 เพราะมีราคาถูก โดยใช้ Power Factor Controller ในการควบคุมการปลดสับชุด Magnetic contactor แต่จะมีปัญหาเมื่อโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพราะอาจนำไปสู่สภาวะเรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบ ส่งผลให้โหลดต่าง ๆ เสียหายรวมถึงระบบป้องกันทำงานผิดพลาด ดังนั้นจึงใช้ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกทดแทนการต่อตัวเก็บประจุเข้าโดยตรงกับระบบไฟฟ้า เพราะตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกจะทำหน้าที่ทั้งการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน และจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าระบบไฟฟ้าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.4 โหลดที่ได้รับกำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังเสมือนแบบล้าหลัง (Q_1) และกำลังปรากฏ (S_1) จะได้ค่าตัวประกอบกำลังคือ

$$\cos\theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \tag{2.41}$$

เมื่อต่อตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะได้สมการที่ (2.42)

$$\cos\theta_2 = \frac{P}{\sqrt{P_2^{\,2} + (Q_1 - Q_2)^2}} \tag{2.42}$$

2.8.2 ประโยชน์จากการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเพิ่มความสามารถในการรับโหลดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้เพิ่มขึ้นทั้งของผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบจำหน่าย ระบบส่งไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะเป็นการประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าและของประเทศชาติโดยรวมอันจะก่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าซึ่งจะสามารถพิจารณาความสามารถในการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าโดยสรุปได้ดังนี้

1) ระบบไฟฟ้าสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น
2) ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายไฟฟ้าและหม้อแปลง
3) ประหยัดการลงทุนในการขยายระบบไฟฟ้า
4) ลดขนาดของสายส่งไฟฟ้ากำลัง
5) แรงดันไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้น
6) ลดค่า kVAR Charge จากการไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Voltage Unbalance) เป็นปรากฏการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าต่างกัน โดยมีค่า Negative Sequence เกิดขึ้นส่งผลให้ขนาดแรงดันหรือมุมทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน ซึ่งจะแสดงในรูปแบบร้อยละของอัตราส่วนระหว่าง Negative Sequence ต่อ Positive Sequence หรืออัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของค่าเฉลี่ยแรงดันทั้งสามเฟส โดยทั่วไปแล้วความไม่สมดุลทางไฟฟ้าเกิดจากการใช้ไฟฟ้าแต่ละเฟสต่างกัน หรือการจัดเรียงสายที่ไม่สมมาตร

โดยทั่วไปแล้วสาเหตุหลักของการเกิดแรงดันไม่สมดุลเกิดจากการใช้งานกระแสไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน ตั้งแต่ 15-20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เรางานดึงกระแสที่ไม่เท่ากันในปริมาณที่มาก ๆ จะส่งผลให้เกิดกระแสไหลในสาย Neutral นอกจากนั้นถ้าในระบบมีเครื่องจักรหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะสร้างฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ (150 Hz) ไหลอยู่ในสาย Neutral อาจมีค่าสูงหรือใกล้เคียงกับกระแสเฟส ถึงแม้ว่าเกิดสภาวะไม่สมดุลเฟสเพียงเล็กน้อยในระบบส่งจ่ายก็อาจจะส่งผลปัญหาเกิดขึ้นได้ เช่น เกิดความสูญเสียในระบบ มอเตอร์เหนี่ยวนำร้อน หรือแรงบิดมอเตอร์ลดลง

2.10 ประเภทความไม่สมดุลทางไฟฟ้า

ความไม่สมดุลทางไฟฟ้า (Voltage Unbalance) เกิดได้ทั้งแรงดันและกระแสสามารถแบ่งได้หลายประเภทตั้งแต่หนึ่งเฟสจนถึงสามเฟส ขึ้นอยู่กับแหล่งจ่าย โหลดที่ใช้งาน หรือรูปแบบการจัดเรียงสายส่งที่ไม่มีการไขว้สาย (Transposition) ส่งผลให้ค่ารีแอคแตนซ์ของแต่ละเฟส ไม่เท่ากัน สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.10.1 Single-phase Under voltage unbalance

ในกรณีที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสใดเฟสหนึ่งในระบบสามเฟส มีภาระโหลดหนัก และการชดเชยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากระบบมีค่าไม่เพียงพอ ดังนั้นจะเป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าในเฟสที่มีโหลดหนักนี้มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าอีกสองเฟส

2.10.2 Two-phase Under voltage unbalance

เมื่อสองเฟสในระบบไฟฟ้าสามเฟสมีโหลดหนัก และมีการชดเชยที่ไม่เพียงพอทั้งสองเฟส ดังนั้นขนาดแรงดันไฟฟ้าในเฟสที่มีโหลดหนักทั้งสองเฟสนี้จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเฟสที่สาม

2.10.3 Three-phase Under voltage unbalance

เมื่อโหลดในระบบสามเฟสเป็นโหลดหนักทั้งหมด และมีการชดเชยค่ากำลังเสมือนทั้งสามเฟสที่ไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้ระบบเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส

2.10.4 Single-phase Over voltage unbalance

เพื่อรักษาแรงดันของระบบให้คงที่เนื่องจากมีการจ่ายโหลดที่หลากหลาย โดยเฉพาะโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ โหลดชนิดเครื่องเชื่อมไฟฟ้า หรือโหลดที่ใช้กับเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

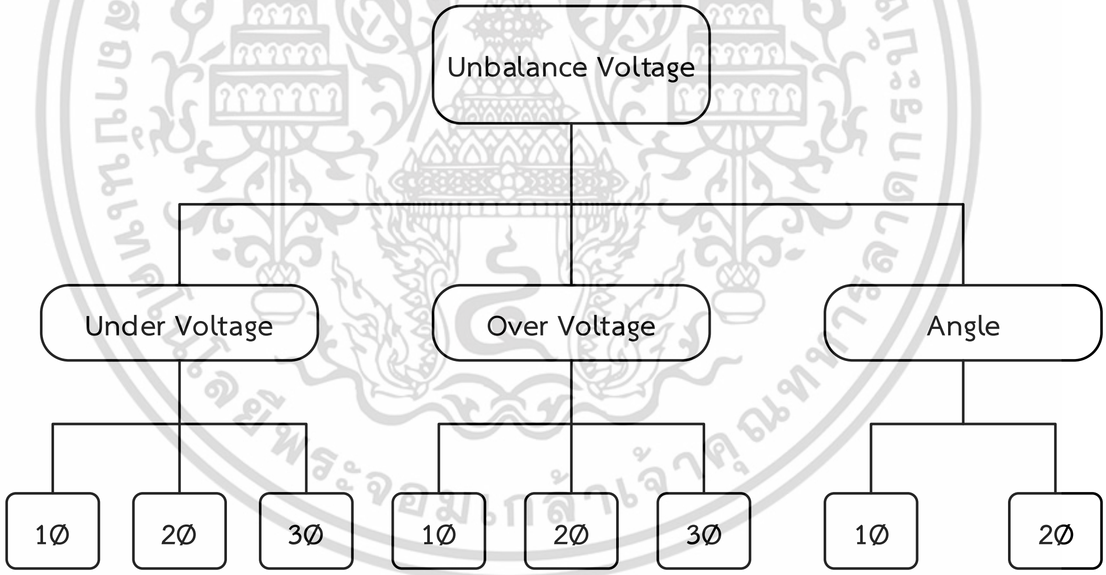
สำรองไฟฟ้าภายในสำนักงงาน ในสภาวะปกตินั้นจะนำตัวเก็บประจุหรือ Capacitor เข้ามาชดเชยกำลังเสมือนของระบบโดยการต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ถ้าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งถูกชดเชยมากเกินไปและไม่มีการต่อโหลดใช้งาน จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าเฟสอื่น ๆ ดังนั้นจะเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุลหนึ่งเฟส

2.10.5 Two-phase Over voltage unbalance

เมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสลดการใช้งานลงสองเฟส แต่ยังมีการชดเชยแรงดันทั้งสามเฟส จะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสองเฟสเกินกว่าค่าพิกัด ขนาดของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองเฟสจึงมีค่าสูงกว่าแรงดันเฟสที่สาม

2.10.6 Three-phase Over voltage unbalance

ทั้งสามเฟสได้รับโหลดหนัก และถูกชดเชยแรงดันทั้งสามเฟส ส่งผลให้แรงดันมากกว่าพิกัด และไม่เท่ากัน ในสภาวะนี้มักเกิดกับโรงงานอุตสาหกรรม ที่หยุดการผลิตแต่ไม่ปลดชุดชดเชยกำลังเสมือน หรือในบางครั้งเกิดจากค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกหรือการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน



รูปที่ 2.12 ประเภทความไม่สมดุลทางไฟฟ้า

2.11 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันในสภาวะไม่สมดุล

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล NEMA กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่เบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งกับค่าแรงดันเฉลี่ยทั้งสามเฟส ต่อค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.43)-(2.45)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%LVUR = \frac{V_{\max(\text{devition_from_average})}}{V_{avg}} \times 100 \tag{2.43}$$

$$= Max\left[\frac{V_{ab} - V_{avg}, V_{bc} - V_{avg}, V_{ca} - V_{avg}}{V_{avg}}\right] \times 100 \tag{2.44}$$

$$V_{avg} = \frac{V_{ac} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \times 100 \tag{2.45}$$

เมื่อ

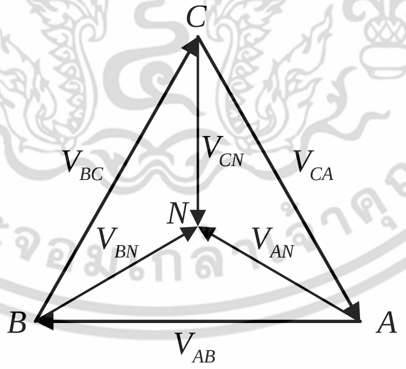
$\%LVUR$ คือ เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

V_{avg} คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟส

$V_{\max}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งกับแรงดันเฉลี่ย

$V_{ab,bc,ca}$ คือ แรงดันระหว่างเฟส

โดยทั่วไปผู้ที่ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดสามเฟส (Three Phase Load) คาดหวังว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากการไฟฟ้าจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีทั้งขนาดและมีมุมระหว่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน ดังรูปที่ 2.13

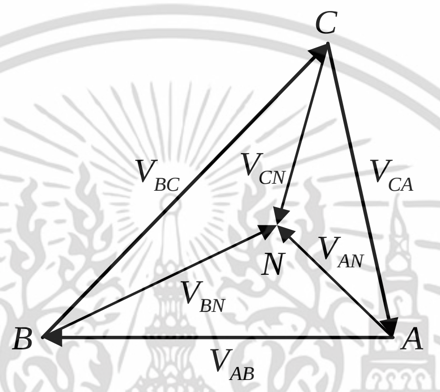


รูปที่ 2.13 เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสในสภาวะสมดุล

จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Phase-to-Phase จะมีค่าเท่ากันและมุมระหว่างเฟสจะห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า และในขณะเดียวกันแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสทั้งสาม เมื่อเทียบจุดเป็นกลาง (Neutral) ก็จะมีความสมดุลด้วยเช่นกัน หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความสมดุลกันทั้งสามเฟสนั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสทั้งสามเกิดความไม่สมดุลกัน (Phase-to-Phase Voltage Unbalance or Voltage Imbalance) ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสทั้งสามไม่สมดุลทั้งขนาดและมุม มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้า Phase-to-neutral เกิดความไม่สมดุลตามไปด้วย ดังนั้นจะเห็นว่าจุดเป็นกลาง (Neutral Point) จะเคลื่อนไปอยู่ที่ต่างจากรูปที่ 2.6 ผลของการเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลในลักษณะเช่นนี้ จะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดสามเฟส (Three Phase Load) เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ ชุดขับเพื่อปรับความเร็วรอบ มีประสิทธิภาพลดลง ชำรุดเสียหายหรือหยุดการทำงานได้ สามารถอธิบายเฟสเซอร์ของแรงดันในสภาวะไม่สมดุลได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสในสภาวะไม่สมดุล

เมื่อระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล จะส่งผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดความร้อนเนื่องจากมี Negative Sequence Voltage ของระบบไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ ดังนั้นเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่นำไปใช้กับระบบที่มีสภาวะไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า จำเป็นต้องพิจารณาถึงความสามารถและประสิทธิภาพของมอเตอร์ควบคู่ไปด้วย

2.12 แรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลัง

แรงดันตก (Voltage Drop) คือความแตกต่างระหว่างขนาดไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายต้นทาง และจุดรับไฟฟ้า เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายไฟฟ้าที่มีความต้านทาน (Impedance) ของสายไฟนั่นเอง แรงดันตกเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยมากในระบบไฟฟ้า และเกิดขึ้นเมื่อระบบมีการใช้ไฟฟ้ามากกว่าปกติ หรือปัญหาจากอุปกรณ์ปรับแรงดันอัตโนมัติของสถานีไฟฟ้าย่อยต้นทางของการไฟฟ้าโดยส่งผลต่อบริภัณฑ์ไฟฟ้าโดยตรง เช่น ความสว่างของหลอดไฟลดลง หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำกินกระแสเพิ่มขึ้น

กรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟส 400/230 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่า 5% วัดจากจุดสุดท้ายที่จ่ายโหลด แรงดันไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่า 380 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

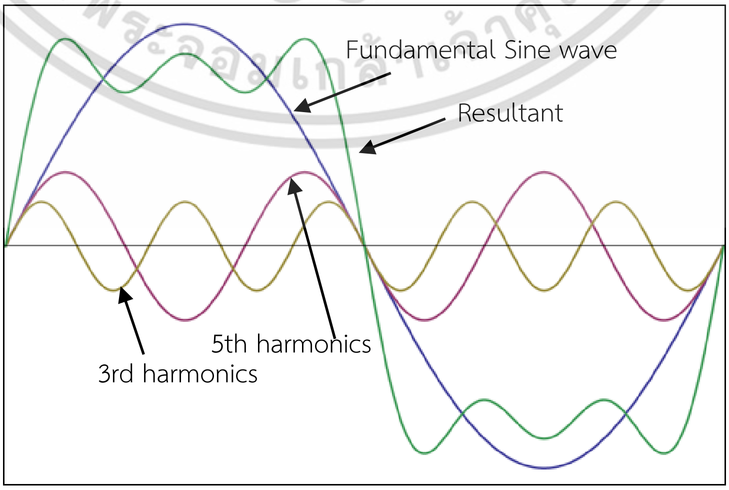
2.13 แรงดันเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง

แรงดันเกิน (Over Voltage) คือสภาวะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเป็นระยะเวลานาน โดยอาจจะมีสาเหตุต่างๆกัน เช่นเกิดจากตำแหน่งใช้งานที่ใกล้แหล่งจ่ายไฟฟ้า เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ การสวิตชิ่งตัวเก็บประจุเข้าระบบ หรือการปรับแท็ป (Tab) ของหม้อแปลงไม่เหมาะสม เป็นต้น

เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟสูงเกินไปแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์กลับมาเป็นฟลักซ์แม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของการสูญเสียเหล็กเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กทำให้การสูญเสียเหล็กเพิ่มขึ้นทำให้แกนมีความร้อนมากเกินไป การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กจะทำให้ส่วนประกอบของแรงกระตุ้นในปัจจุบันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียทองแดงของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดที่ร้อนมากเกินไป ดังนั้นเมื่อแรงดันไฟเกินแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ของมอเตอร์มอเตอร์จะร้อนมากเกินไป แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมควรมีแรงดันสูงไม่เกิน 5% จากค่าแรงดันที่ระบุบนบริภัณฑ์ไฟฟ้า เช่น เช่นระบบไฟฟ้า 3 เฟส 400 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าไม่ควรเกิน 420 โวลต์

2.14 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

ฮาร์มอนิก คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณไฟฟ้า ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency ในระบบไฟฟ้าประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 50 Hz) เช่น ลำดับที่ 3 มีค่าเป็น 150 Hz หรือลำดับที่ 5 มีค่าเป็น 250 Hz เป็นต้น การเกิดฮาร์มอนิกมักเกิดจากการทำงานของโหลดที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ผลของสัญญาณฮาร์มอนิกเมื่อรวมกับสัญญาณความถี่มูลฐานด้วยทางขนาดและมุมเฟส จะส่งผลให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีลักษณะผิดเพี้ยนดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.15 สัญญาณฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) เช่น เตาหลอมแบบอาร์ค คอนเวอร์เตอร์ หรือเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ เป็นต้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ บางครั้งเรียกว่า อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Inter Harmonic) หมายถึงส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน และฮาร์มอนิกที่มีรูปแบบ (Characteristic Harmonic) หมายถึงฮาร์มอนิกที่มีลำดับที่ชัดเจน เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์สารกึ่งตัวนำ ค่าความผิดเพี้ยนจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ เราสามารถหาค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total Harmonics Distortion : THD) ได้จากอัตราส่วนระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิผลของสัญญาณที่ผิดเพี้ยน (Distortion) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิผลของสัญญาณที่ค่าความถี่มูลฐาน การวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนรวมจะมีค่าดังสมการที่ (2.46)

$$\%THD_X = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_h^2}}{X_1} \times 100 \tag{2.46}$$

เมื่อ

$\%THD_X$ คือ ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า
X_1 คือ ระดับแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน
X_h คือ ระดับแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ฮาร์มอนิก

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก เช่น IEEE Std 519-1992 : IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems ได้ให้คำจำกัดความของ Distortion Factor : DF มีความหมายเดียวกับ %THD โดยที่ HF คือค่า Harmonic Factor สำหรับ Displacement Power Factor : DFP คืออัตราส่วนของกำลังงานจริงของรูปคลื่นความถี่มูลฐานต่อกำลังงานปรากฏของรูปคลื่นความถี่มูลฐานดังสมการที่ (2.47)

$$DPF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \tag{2.47}$$

ตัวประกอบกำลัง (Power Factor) คืออัตราส่วนของกำลังงานจริงต่อกำลังปรากฏซึ่งรวมผลของฮาร์มอนิกดังสมการที่ (2.48)

$$PF = \frac{P}{\sum_{i=1} V_i I_i} \tag{2.48}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 มาตรฐานฮาร์มอนิก

จากปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ว่าฮาร์มอนิก ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยตรง เช่น อุปกรณ์ป้องกัน (Protection relay) ทำงานผิดพลาด เนื่องจากไม่สามารถแยกสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ หรืออายุการใช้งานของอุปกรณ์น้อยลง เนื่องจากผลของค่ากระแสหรือแรงดันที่เกิดขึ้นจากฮาร์มอนิก จากปัญหาดังกล่าว หน่วยงานการไฟฟ้าได้นำข้อกำหนดมาบังคับใช้กับประเภทอุตสาหกรรม หรือการซื้อขายไฟฟ้า โดยอ้างอิงมาตรฐานต่าง ๆ ดังนี้

2.15.1 มาตรฐาน IEEE519-1992

มาตรฐาน IEEE519-1992 จะประเมินค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันที่จุดต่อร่วม (PPC) การรักษาคุณภาพของระบบไฟฟ้าเป็นเครื่องที่สำคัญมาก หน่วยงานการไฟฟ้าเลือกใช้ตัวชี้วัด 2 ตัวคือแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (THDv) และค่าฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (Individual Harmonic Voltage) หน่วยงานการไฟฟ้าจะพยายามรักษาระดับแรงดันผิดเพี้ยนที่จุดต่อร่วม (PCC) ด้วยการจำกัดค่ากระแสฮาร์มอนิกจากผู้ใช้ไฟฟ้า และสำหรับค่าจำกัดของระดับแรงดันผิดเพี้ยนจะแบ่งตามระดับแรงดัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992

Bus Voltage at PCC (Va)	Individual Harmonic Voltage Distortion (%)	Total Harmonic Distortion %THDv
Vn ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 ≤Vn ≤ 161 kV	1.5	2.5
Vn ≥ 161 kV	1.0	1.5

2.15.2 มาตรฐานฮาร์มอนิกของประเทศอังกฤษ

มาตรฐานฮาร์มอนิกของประเทศอังกฤษ แบ่งระดับแรงดันออกเป็น 3 กลุ่ม ตั้งแต่ไฟฟ้าแรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูงกำหนดให้มีค่าจำกัดฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม THDv ไม่เกิน 5% ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐานประเทศอังกฤษ

Voltage Level	Total Harmonic Distortion %THDv
Low voltage	5
Medium voltage	5
High voltage	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.3 มาตรฐานฮาร์มอนิกของประเทศสวีเดน

มาตรฐานฮาร์มอนิกของประเทศสวีเดน แบ่งระดับแรงดันออกเป็น 4 กลุ่ม กำหนดให้มีค่าจำกัดฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม THD ไม่เกิน 4% ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐานประเทศสวีเดน

Voltage Level	Individual Harmonic Distortion (%)	%THDv
V = 0.4 kV	3	4
3.3<V<24 kV	2.5	3
36<V<72 kV	1.5	2
V>84 kV	0.7	1

2.15.4 มาตรฐาน EN 50160-1999

มาตรฐาน EN 50160-1999 แบ่งระดับแรงดันออกเป็น 2 กลุ่ม คือแรงดันไม่เกิน 1 kV สูงกว่า 1 kV และมากกว่า 35 kV ทั้ง 2 กลุ่มกำหนดให้มีค่าจำกัด THD ไม่เกิน 8% ส่วน Vh แต่ละอันดับจะกำหนดกับอันดับฮาร์มอนิก ปัจจุบันค่าจำกัดของทั้ง 2 กลุ่มมีค่าเท่ากัน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน EN 50160-1999

Odd Hamonic				Even Harmonic	
Non-Multiples of 3		Multiples of 3			
Order, h	Relative Voltage (%)	Order, h	Relative Voltage (%)	Order, h	Relative Voltage (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6...24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

หมายเหตุ : ไม่มีการกำหนดลำดับของฮาร์มอนิกที่สูงกว่า 25 เนื่องจากสัญญาณมีขนาดเล็ก และส่วนใหญ่ไม่สามารถคาดเดาได้เนื่องจากผลกระทบของสภาวะเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.5 มาตรฐาน IEC 61000-2-12 : 2003

มาตรฐาน IEC 61000-2-12 : 2003 เป็นมาตรฐานที่ใช้กับระบบแรงดันปานกลาง ระหว่าง 1 kV และ 35 kV โดยกำหนดค่า THDv ไม่เกิน 8% สำหรับค่า Vh (รวมกับอินเตอร์ฮาร์มอนิก) จะกำหนดค่าจำกัดโดยขึ้นอยู่กับลำดับของฮาร์มอนิก รายละเอียดดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-2-12 : 2003

Odd Harmonic Non-Multiples of 3		Odd Harmonic Multiples of 3		Even Harmonic	
Order, h	Harmonic Voltage (%)	Order, h	Harmonic Voltage (%)	Order, h	Harmonic Voltage (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
17≤h≤49	2.27x(17/h)-0.27	21≤h≤45	0.2	10≤h≤50	2.25x(10/h)+0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

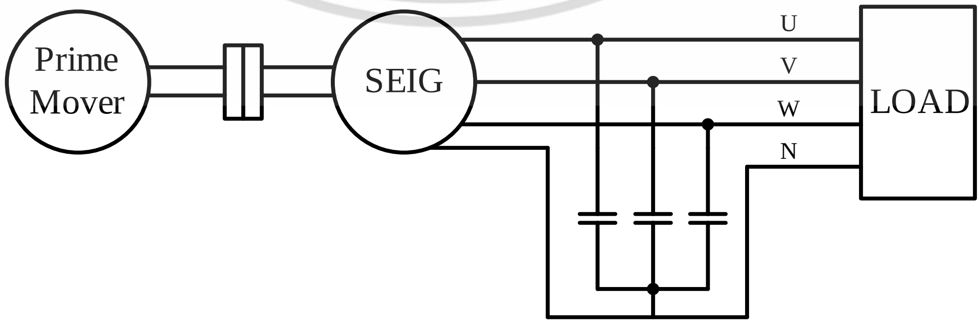
บทที่ 3
ทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานสภาวะชั่วครู่ สภาวะคงตัว และสภาวะพลวัตด้วยวงจรสมมูลบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส $(\alpha\beta)$ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขั้นตอนวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และวิเคราะห์พฤติกรรมค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่ส่งผลต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณและออกแบบหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นแรงดันไฟฟ้า และอธิบายประสิทธิภาพรวมถึงข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาเครื่องจักรกลกระแสตรงที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้มาใช้ในการจำลองเสมือนเป็นพลังงานลม โดยโครงสร้างจะประกอบไปด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดขับตัวต้นกำลังเพื่อใช้ขับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ และชุดตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในการสร้างแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

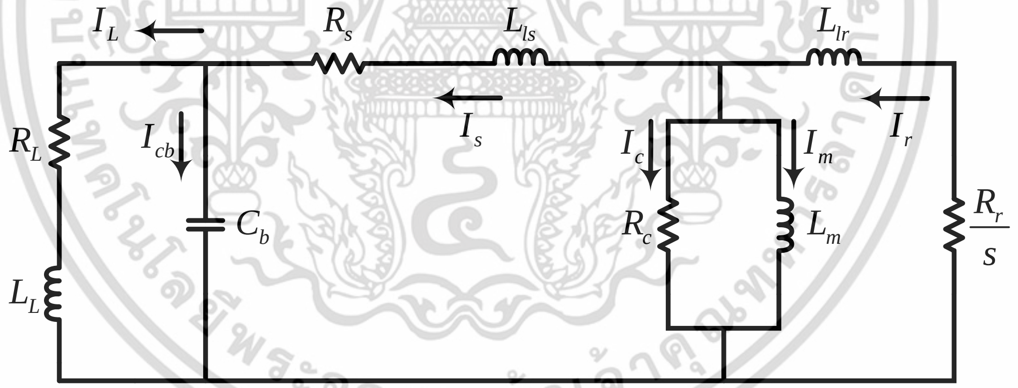
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้นจะมีการทำงานแยกจากระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีความจำเป็นที่จะต้องได้รับกระแสกระตุ้นจากตัวเก็บประจุต่อเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยจะต่อเป็น Delta หรือ Star ก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมหรือพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่ความถี่เดียวกันระหว่างค่าของ Capacitive Resistance และ Inductive Reactance $(X_c = X_m)$ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จะมีลักษณะค่อนข้างเหมือนกับหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยจะอาศัยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือการมีสนามแม่เหล็กตกค้างที่อยู่ภายในวงจรแม่เหล็กที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งโดยปกติจะมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่แล้ว ถ้าค่าสนามแม่เหล็กตกค้างที่แกนโรเตอร์มีค่าน้อยหรือมีค่าไม่เพียงพอ จะส่งผลให้ไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองเพื่อที่จะสร้างแรงดันไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้น ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสเตเตอร์ เพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างขึ้นในแกนโรเตอร์ หรือจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุก่อนนำไปต่อที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับปรากฏการณ์สร้างแรงดันไฟฟ้าสามารถอธิบายด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.2 เมื่อตัวต้นกำลังหมุนโรเตอร์ตัดกับขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่งซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นจะไปตกคร่อมตัวเก็บประจุส่งผลให้เกิดกระแสต่อเนื่องจากตัวเก็บประจุ (I_{cb}) ซึ่งกระแสในส่วนนี้จะไปช่วยเพิ่มในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ของส่วนกระแสกระตุ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าสูงขึ้นซึ่งเรียกว่าเป็นกระบวนการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่สภาวะคงตัว

เมื่อ

R_s คือ ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

L_{ls} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์

I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์

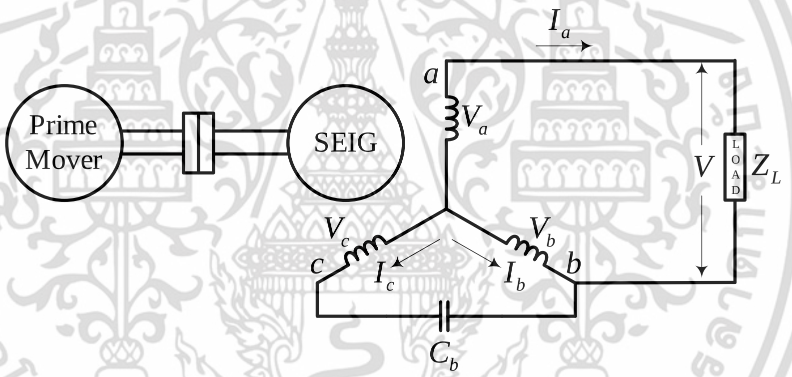
R_r คือ ความต้านทานขดลวดทางโรเตอร์

I_r คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์

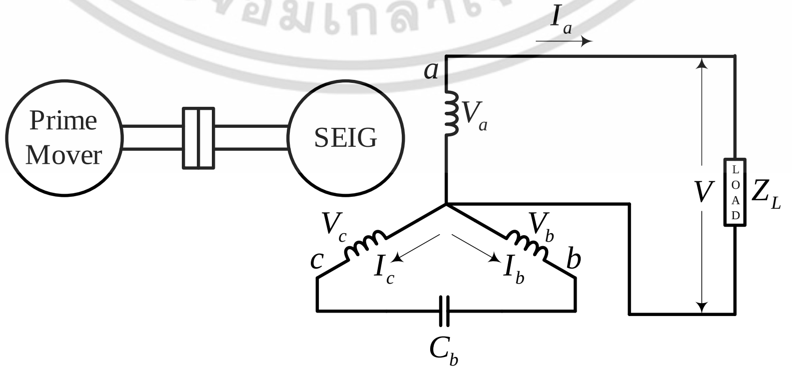
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_{lr} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านโรเตอร์
R_c คือ ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก
L_m คือ ความเหนี่ยวนำร่วม
I_m คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็ก
C_b คือ ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้า
I_{cb} คือ กระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
R_L คือ ความต้านทานของโหลด
L_L คือ ความเหนี่ยวนำของโหลด

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถดัดแปลงวงจรกำลังให้ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ด้วยการต่อตัวเก็บประจุอย่างน้อย 1 ชุดเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ ทั้งการต่อขดลวดแบบ Star หรือแบบ Delta ดังรูปที่ 3.3-3.6

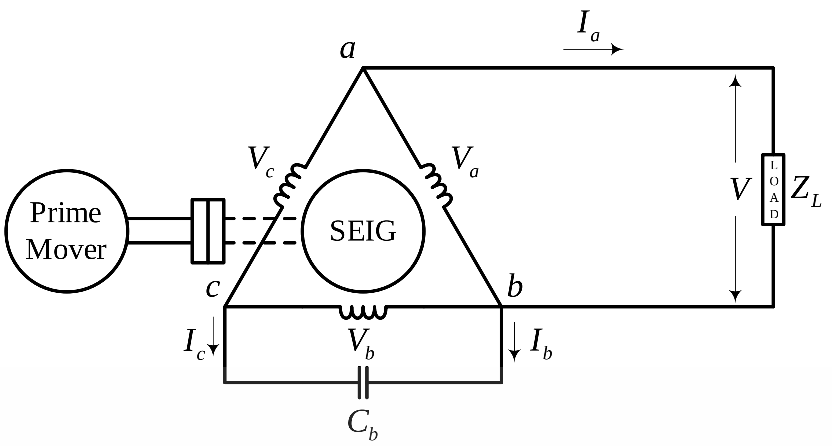


รูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดแบบ Star (L-L)

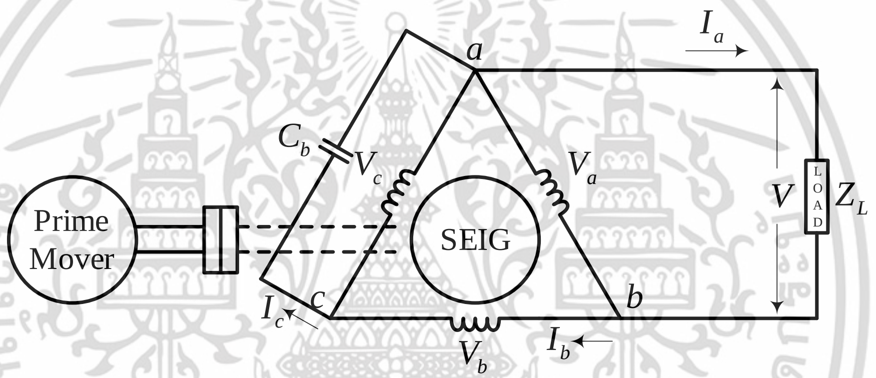


รูปที่ 3.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดแบบ Star (L-N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดแบบ Delta-1



รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดแบบ Delta-2

3.3 การแปลงระบบไฟฟ้า

การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการแปลงระบบสามเฟส (abc) มาเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง $(\alpha\beta)$ และแปลงเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน (dq) เป้าหมายของการแปลงระบบนั้นเพื่อช่วยในเรื่องของการลดรูปสมการ เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และคำนวณ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสะดวกในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับอีกด้วย

3.3.1 การแปลงระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง

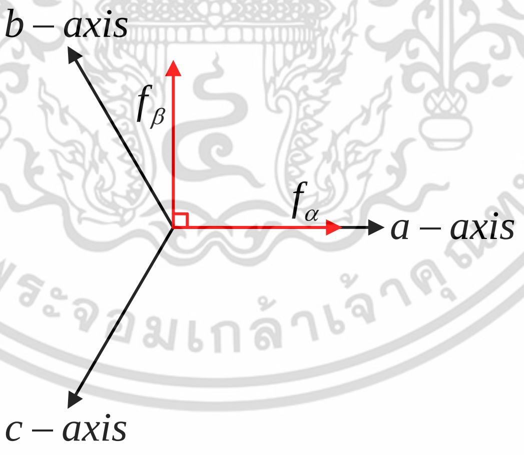
กำหนดให้ระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง (Stationary reference frame) เป็นแกนอ้างอิงในลักษณะสองเฟส ความเร็วของการหมุนของเฟรมอ้างอิงจะมีค่าเป็นศูนย์ $(\omega = 0)$ วางเปรียบเทียบกับระบบสามเฟส (abc) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งการแปลงระบบสามเฟสมาเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง $(\alpha\beta)$ นั้นสามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) จะเห็นว่ามีค่าตัวประกอบเท่ากับ $2/3$ ค่านี้จะเป็นส่วนที่สำคัญของการแปลงระบบ ที่ได้จากการปรับเวกเตอร์สามเฟสมาเป็นสองเฟส และสามารถแปลงกลับอยู่ในเป็นระบบสามเฟสได้เช่นเดิมดังแสดงในสมการ (3.2)

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.7 ระบบสามเฟสและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง

3.3.2 การแปลงระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่งเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน

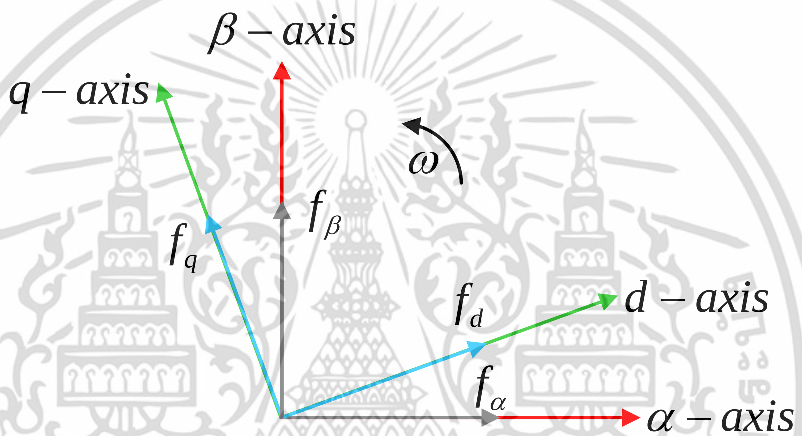
การแปลงระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง $(\alpha\beta)$ มาเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน (dq) จะเห็นว่ามีมุมหมุน (ωt) เข้ามาเกี่ยวข้อง และสามารถแปลงกลับมาเป็นในรูปแบบแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส $(\alpha\beta)$ ได้เหมือนเดิม ดังแสดงในสมการ (3.3)-(3.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

เราสามารถแปลงเฟรมอ้างอิงหมุนสองเฟสให้เป็นเฟรมอ้างอิงนิ่งสองเฟส $(dq-\alpha\beta)$ ได้จากสมการที่ 3.4 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.8

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.8 ระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่งและระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงหมุน

3.4 ระบบแรงดันไฟฟ้า

สำหรับระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (abc) แบบสมดุลนั้น สามารถแปลงเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง $(\alpha\beta)$ ได้ตามรูปแบบทั่วไปดังแสดงในสมการ (3.1) ระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลจะทำให้ค่าอ้างอิงศูนย์ (Zero sequence) มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถแสดงองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง $(\alpha\beta)$ ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าสามเฟสมีค่าดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_a = V_m \cos\omega t \tag{3.6}$$

$$v_b = V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.7}$$

$$v_c = V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.8}$$

3.5 ระบบกระแสไฟฟ้า

จากสมการ (3.1) แสดงถึงรูปแบบทั่วไปของการแปลงระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟสบนแกนอ้างอิงนิ่ง ดังนั้นจึงได้นำมาประยุกต์เข้ากับระบบกระแสไฟฟ้าสามเฟส สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

ถ้ากระแสไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมดุล จะทำให้ผลรวมของกระแสไฟฟ้าทุกเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ กระแสไฟฟ้าในแกนศูนย์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสามารถพิจารณาสมการ (3.9) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

3.6 ระบบกำลังไฟฟ้า

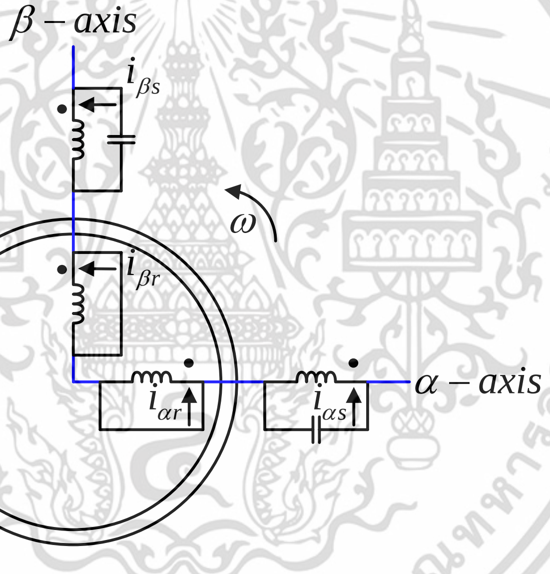
การหาค่ากำลังไฟฟ้าสามารถหาจากองค์ประกอบของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส ซึ่งต้องมีค่าตัวประกอบ $3/2$ คูณเข้าไป เพื่อรักษากำลังไฟฟ้ารวมให้มีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าในระบบสามเฟส ซึ่งสามารถแสดงสมการกำลังไฟฟ้าได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_e = \frac{3}{2}\left(i_\alpha v_\alpha + i_\beta v_\beta\right) \tag{3.11}$$

3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

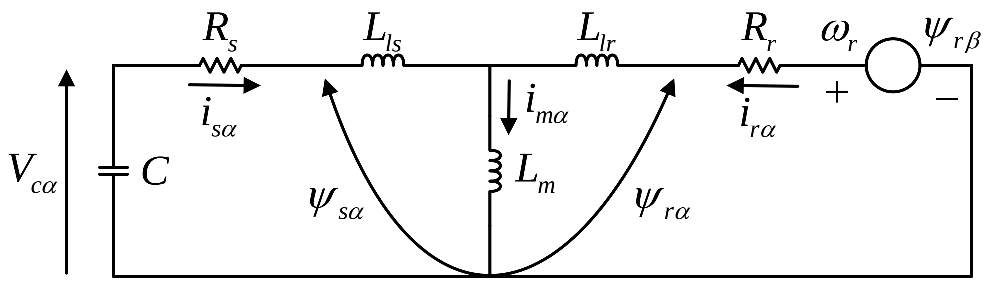
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง จะมีลักษณะของการวิเคราะห์เช่นเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่จะมีข้อแตกต่างในส่วนของการต่อชุดตัวเก็บประจุทางด้านขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งชุดตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่กระตุ้นการสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับจ่ายให้กับชุดโหลด และการที่จะให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะต้องมีชุดตัวขับต้นกำลังมาขับให้โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส ดังรูปที่ 3.9



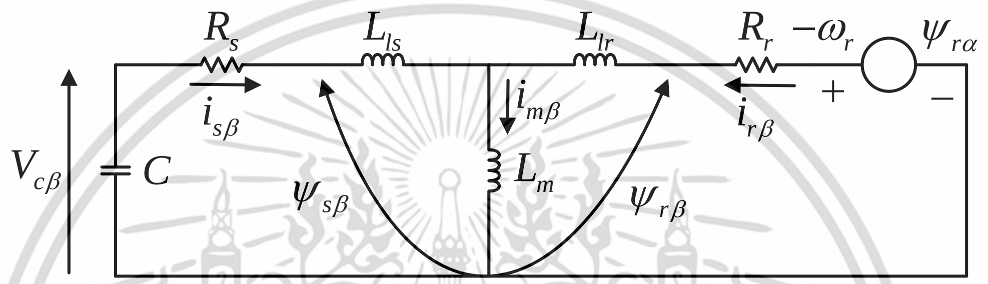
รูปที่ 3.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส

จากรูปที่ 3.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส $(\alpha\beta)$ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ Kron’s Primitive Machine เช่นเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สังเกตว่าทางขดลวดด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะถูกต่อเข้ากับชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor) และทางด้านปลายขดลวดโรเตอร์จะถูกต่อรวมกันลักษณะการต่อคล้ายกับการลัดวงจร ซึ่งในรูปที่ 3.9 สามารถวิเคราะห์เพื่อแสดงรายละเอียดให้อยู่ในรูปแบบวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส $(\alpha\beta)$ ได้ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) แกนอ้างอิง α



ข) แกนอ้างอิง β

รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส

รูปที่ 3.10 เป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส $(\alpha\beta)$ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเงื่อนไขที่จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถกระตุ้นตัวเองได้นั้นจะต้องมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ในตัวขดลวดโรเตอร์และตัวเก็บประจุที่นำมาต่อเข้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์จะต้องมีขนาดเหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.10 ขณะที่ยังไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุและโหลดนั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถแสดงสมการแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเทอมของแกนอ้างอิงนิ่ง $(\alpha\beta)$ ได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองนั้นจะต้องต่อตัวเก็บประจุเข้าทางด้านขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุได้จาก

$$V_{c\alpha} = \frac{1}{C}\int i_{c\alpha}dt + V_{c\alpha 0} \tag{3.13}$$

$$V_{c\beta} = \frac{1}{C}\int i_{c\beta}dt + V_{c\beta 0} \tag{3.14}$$

โดยที่ $V_{c\alpha 0}$ และ $V_{c\beta 0}$ คือค่าองค์ประกอบแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุบนแกนอ้างอิงนิ่งสองเฟส $(\alpha\beta)$ ตามลำดับ และในขดลวดโรเตอร์นั้นจะมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ภายในตัวโรเตอร์ สมการทางฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นตัวเองได้จาก

$$\psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} + \psi_{r\alpha 0} \tag{3.15}$$

$$\psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} + \psi_{r\beta 0} \tag{3.16}$$

โดย $\psi_{r\alpha 0}$ และ $\psi_{r\beta 0}$ เป็นองค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกค้างในแกนโรเตอร์ เมื่อมีพลังงานทางกลจากตัวขับต้นกำลังมาขับให้ขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุน จะทำให้สร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้มาจากแม่เหล็กตกค้างภายในตัวขดลวดโรเตอร์ โดยเขียนสมการได้เป็น

$$\omega_r \psi_{r\alpha} = \omega_r L_m i_{s\alpha} + \omega_r L_r i_{r\alpha} + \omega_r \psi_{r\alpha 0} \tag{3.17}$$

$$\omega_r \psi_{r\beta} = \omega_r L_m i_{s\beta} + \omega_r L_r i_{r\beta} + \omega_r \psi_{r\beta 0} \tag{3.18}$$

ดังนั้นสามารถแสดงรูปแบบสมการทั่วไปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองในเงื่อนไขที่ยังไม่ได้ต่อโหลด ซึ่งได้วิเคราะห์มาจากสมการ (3.12)-(3.18) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{c\alpha} \\ V_{c\beta} \\ \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -\omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการ (3.19) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสเตต (State equation) ได้เป็น

$$ApI_G + BI_G + V_G = 0 \tag{3.20}$$

เมื่อ

$$A=\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0L_m & 0_r & L_r \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_m & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix}, I_G=\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, V_G=\begin{bmatrix} V_{c\alpha} \\ V_{c\beta} \\ \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -\omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix}$$

จากสมการ (3.20) ใช้หลักการเมทริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) ในการแก้สมการ เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอนุพันธ์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้จาก

$$pI_G = -A^{-1}BI_G - A^{-1}V_G \tag{3.21}$$

$$\begin{bmatrix} pi_{s\alpha} \\ pi_{s\beta} \\ pi_{r\alpha} \\ pi_{s\beta} \end{bmatrix} = L_\sigma \left(\begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r L_m^2 & R_r L_m & \omega_r L_r L_m \\ -\omega_r L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_r L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_r L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_r L_s L_r \\ \omega_r L_s L_m & R_s L_m & \omega_r L_s L_r & -R_r L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_r V_{c\alpha} + L_m \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ -L_r V_{c\beta} - L_m \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ L_m V_{c\alpha} - L_s \omega_r \psi_{r\beta 0} \\ L_m V_{c\beta} + L_s \omega_r \psi_{r\alpha 0} \end{bmatrix} \right) \tag{3.22}$$

เมื่อ

$$L_\sigma = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}$$

เมื่อต่อโหลดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดได้ดังนี้

$$i_{c\alpha} = i_{s\alpha} - i_{L\alpha} \tag{3.23}$$

$$i_{c\beta} = i_{s\beta} - i_{L\beta} \tag{3.24}$$

$$v_{L\alpha} = R_L i_{L\alpha} + L_L pi_{L\alpha} \tag{3.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{L\beta} = R_L i_{L\beta} + L_L p i_{L\beta} \tag{3.26}$$

พิจารณาสมการ (3.13), (3.14), (3.23) และ (3.24) จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด ซึ่งเขียนในรูปสมการอนุพันธ์แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะต่อโหลดได้เป็น

$$p v_{L\alpha} = \frac{1}{C}\left(i_{s\alpha} - i_{L\alpha}\right) \tag{3.27}$$

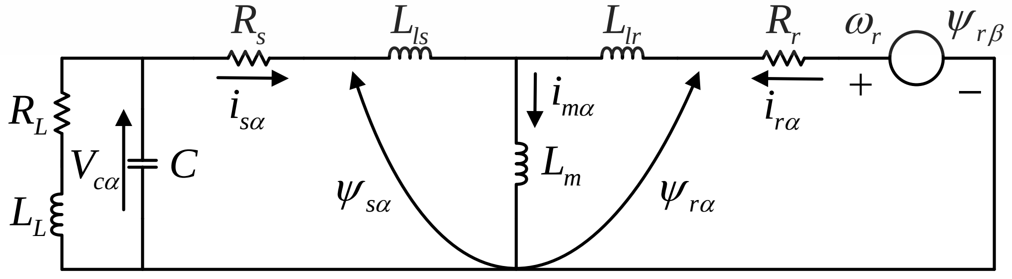
$$p v_{L\beta} = \frac{1}{C}\left(i_{s\beta} - i_{L\beta}\right) \tag{3.28}$$

และใช้สมการ (3.25) และ (3.26) ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลด ดังนั้นสามารถเขียนสมการอนุพันธ์กระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$p i_{L\alpha} = \frac{1}{L_L}\left(v_{s\alpha} - R_L i_{L\alpha}\right) \tag{3.29}$$

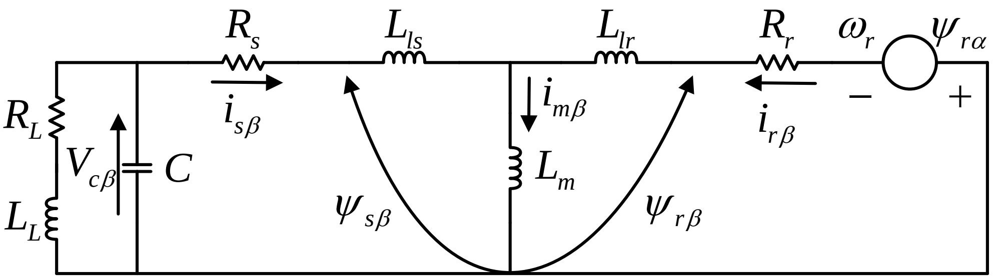
$$p i_{L\beta} = \frac{1}{L_L}\left(v_{s\beta} - R_L i_{L\beta}\right) \tag{3.30}$$

จากการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยอาศัยสมการที่ได้ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดดังกล่าวไว้ข้างต้นในการอธิบายถึงพฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองซึ่งสามารถที่จะนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณการทำงานในสภาวะชั่วขณะและสภาวะคงตัว



ก) แกนอ้างอิง α

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) แกนอ้างอิง β

รูปที่ 3.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเมื่อทำการจ่ายโหลด

3.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความเหนี่ยวนำร่วม

เมื่อทำการต่อโหลดเข้ากับขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) และค่ากระแสกระตุ้น (I_m) ไม่สามารถที่จะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ได้เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทั่วไป เพราะจะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นและทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อันจะส่งผลโดยตรงต่อการสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งในสภาวะพลวัตและสภาวะคงตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำร่วมกับกระแสกระตุ้น ซึ่งได้จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยอาศัยหลักการทดสอบแบบไร้โหลด (No-load test) โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เท่ากับแรงดันพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แล้วบันทึกค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ค่ากระแสกระตุ้นสามารถคำนวณหาได้จาก

$$I_m = \sqrt{\left(i_{s\alpha}+i_{r\alpha}\right)^2+\left(i_{s\beta}+i_{r\beta}\right)^2} \tag{3.31}$$

ค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากการทดสอบ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นที่ใช้ทดสอบค่าต่าง ๆ และจะใช้หลักการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) อธิบายลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว ด้วยฟังก์ชั่นพหุนามอันดับที่ 4 สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้น เพื่อที่จะนำไปสร้างแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วมมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้นทำงานอย่างมีเสถียรภาพตั้งแต่สภาวะปกติจนถึงสภาวะอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การคำนวณและการออกแบบขนาดตัวเก็บประจุ

กระบวนการกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้นนั้นจะต้องอาศัยตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม เนื่องจากจะมีผลในการสร้างแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ช่วงแรกจนถึงสภาวะคงตัว มีวิธีการดังนี้

3.9.1 การคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

วิธีการคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุ โดยใช้หลักการของวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งจะพิจารณาการต่อตัวเก็บประจุในสภาวะไร้โหลดเป็นหลัก เมื่อมีพลังงานทางกลจากตัวขับต้นกำลังขับให้โรเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบใด ๆ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากแม่เหล็กตกค้างในตัวโรเตอร์ โดยจะละเลยค่าแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์และสเตเตอร์ ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส $\left(V_{m\alpha\beta,ph}\right)$ มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุต่อเฟส $\left(V_{c\alpha\beta,ph}\right)$ จึงทำให้วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองกับค่ากระแสกระตุ้นมีลักษณะเป็นวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุต่อเฟสที่เหมาะสม กับขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จาก

$$V_{m\alpha\beta} = V_{c\alpha\beta,ph} \tag{3.32}$$

$$j\omega_r \psi_{m\alpha\beta} = \frac{i_{c\alpha\beta,ph}}{-j\omega_r C_{\min,ph}} \tag{3.33}$$

กำหนดให้ $\psi_{m\alpha\beta,ph} = L_m i_{m\alpha\beta,ph}$ และ $i_{m\alpha\beta,ph} = i_{c\alpha\beta,ph}$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในสภาวะไร้โหลดได้คือ

$$C_{\min,ph} = \frac{1}{\omega_r^2 L_m} \tag{3.34}$$

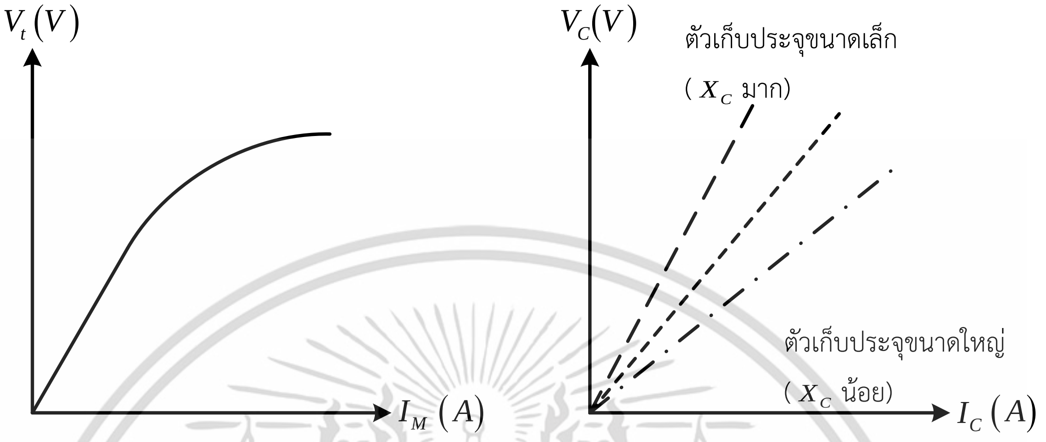
จากสมการ (3.55) ขนาดตัวเก็บประจุต่อเฟสที่เหมาะสมสำหรับกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้นั้น จะเลือกค่าความเหนี่ยวนำร่วมในช่วงไม่อิ่มตัว (Unsaturation) ค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่ได้จากการทดสอบโดย L_m = 383.79 mH เพราะฉะนั้นขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าเท่ากับ $C_{\min,ph}$ = 26.40 μF

3.9.2 การคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุโดยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากกราฟจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ในช่วงแรกเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งมีแรงดันน้อย แต่เมื่อแรงดันเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

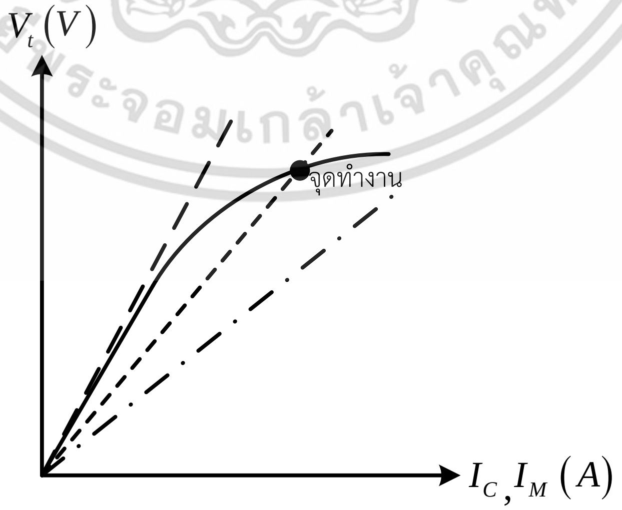
ความสัมพันธ์จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ส่วนกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุจะเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นดังรูปที่ 3.7 โดยความชันของกราฟขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุและความถี่ขณะใช้งาน



ก) เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ　　　　ข) ตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและตัวเก็บประจุ

เมื่อนำกราฟทั้งสองมาซ้อนทับกันจะได้จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเห็นว่าจุดตัดกันของความสัมพันธ์จะอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้ ถ้าตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลให้แรงดันที่ขั้วสูง แต่ถ้าตัวเก็บประจุขนาดเล็กก็จะส่งผลให้แรงดันต่ำ และถ้าตัวเก็บประจุขนาดเล็กเกินก็จะไม่มีจุดตัด ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้



รูปที่ 3.13 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามเราใช้ตัวเก็บประจุนี้เพื่อสร้างกระบวนการกระตุ้นตัวเองในสภาวะไร้โหลดเป็นหลัก หรืออิมพีแดนซ์โหลดมีค่าเป็นอนันต์ $\left(R_L + j\omega L_L = \infty\right)$ ดังนั้นจึงทำให้กระแสสเตเตอร์เท่ากับกระแสตัวเก็บประจุ $\left(I_s = I_{cb}\right)$ และค่าสลิป (s) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ในกรณีนี้เราไม่คิดความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก $\left(R_c\right)$ โดยที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ $\left(R_s\right)$ รวมกับแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์ $\left(L_{ls}\right)$ และความเหนี่ยวนำร่วม $\left(L_m\right)$ ดังสมการที่ (3.35)

$$I_{cb}\left(\frac{-j}{\omega C}\right) = -I_s\left[R_s + j\omega\left(L_{ls} + L_m\right)\right] \tag{3.35}$$

เนื่องจาก $I_s = I_{cb}$ ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนจินตภาพของสมการที่ (3.35) จะได้

$$C = \frac{1}{\omega^2\left(L_{ls} + L_m\right)} \tag{3.36}$$

เมื่อแทนค่าลงสมการสมการที่ (3.3) L_m = 383.79 mH , L_{ls} = 16 mH จะได้ขนาดของตัวเก็บประจุ C = 25.34 μF ซึ่งมาค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

3.10 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะรับกำลังงานกลจากตัวต้นกำลังทางด้านโรเตอร์ (Rotor) และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในด้านขาออก (Output) ที่ขดลวดสเตเตอร์ เนื่องจากกำลังงานกลที่ป้อนเข้าด้านขาเข้า (Input) ไม่เท่ากับพลังงานที่ได้ด้านขาออก เนื่องจากความสูญเสียรูปแบบต่าง ๆ เราเรียกพลังงานที่หายไปว่าเป็นความสูญเสียของระบบ เช่น การสูญเสียจากความร้อน หรือความสูญเสียจากแรงต้าน การคำนวณประสิทธิภาพหรือความสูญเสียของเครื่องกำนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.10.1 ความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

ความสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ เป็นกำลังสูญเสียในรูปความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ความสูญเสียนี้เป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.37)

$$P_{cu,stator} = 3I_s^2 R_s \tag{3.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$P_{cu,stator}$ คือ ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์
R_s คือ ค่าความต้านทานสเตเตอร์
I_s คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์

และค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.38)

$$P_{cu,rotor} = 3I_r^2 R_r \tag{3.38}$$

เมื่อ

$P_{cu,rotor}$ คือ ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์
R_r คือ ค่าความต้านทานโรเตอร์
I_r คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดโรเตอร์

3.10.2 ความสูญเสียทางแม่เหล็ก

ความสูญเสียทางแม่เหล็ก เป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากโลหะของเครื่องจักรกลสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมายถึงความสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งประกอบด้วยความสูญเสียฮีสเตอร์ริซีส (Hysteresis loss) และความสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy-current loss) ในส่วนของความสูญเสียฮีสเตอร์ริซีส (Hysteresis loss) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.39)

$$P_h = K_h f B_{\max}^x \tag{3.39}$$

เมื่อ

$B_{\max}$ คือ ค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก
f คือ ค่าความถี่ไฟฟ้า
x คือ Steinmetz’s index มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-2.5
K_h คือ ค่าคงที่ของ Hysteresis loss ขึ้นอยู่กับเนื้อสารของแม่เหล็ก

ค่ากำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy-current loss) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.40)

$$P_e = K_e f^2 B_{\max}^2 t^2 \tag{3.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

K_e คือ ค่าคงที่ของ Eddy Current ขึ้นอยู่กับเนื้อสารของแม่เหล็ก

t คือ ค่าความหนาของแผ่นเหล็กเคลือบฉนวน

3.10.3 ความสูญเสียทางกล

เป็นความสูญเสียที่กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากความเสียดทานซึ่งจะเกิดขึ้นจากความฝืดของแบริ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเริ่มหมุนตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงความเร็วที่ค่าพิกัด และความสูญเสียที่เกิดจากลมต้านจากพัดลมระบายความร้อน ความสูญเสียจะมีค่าคงที่เมื่อมีความเร็วคงที่ (P_{mech}) และเมื่อนำค่าความสูญเสียเหล่านี้ไปรวมกับความสูญเสียในแกนเหล็ก จะเรียกว่าความสูญเสียจาก การหมุน (Rotational loss)

3.10.4 กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (Input Power) เป็นค่ากำลังไฟฟ้าทางกลจากตัวต้นกำลัง (Prime mover) ขับแกนเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังสมการที่ (3.41)

$$P_{in} = P_{out} + P_c + P_{cu,s} + P_{cu,r} + P_{mech} \quad (3.41)$$

3.10.5 กำลังไฟฟ้าขาออก

กำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังสมการที่ (3.42)

$$P_{out} = 3V_o I_o \cos\phi \quad (3.42)$$

เมื่อ

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกต่อเฟส

I_o คือ กระแสไฟฟ้าขาออกต่อเฟส

$\cos\phi$ คือ ค่าตัวประกอบกำลัง

3.11 ข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อตัวเก็บประจุเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่าพิกัดกำลัง กระแส หรือแรงดันไฟฟ้า จึงขึ้นอยู่กับพิกัดของมอเตอร์ที่นำมาใช้งาน รวมถึงค่าของตัวเก็บประจุที่นำมาใช้งานด้วย ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตกำลังออกมามากเกินไปอาจทำให้ภาระเกิดความเสียหายได้ และถ้าภาระมีมากกว่าปริมาณกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อาจส่งผลให้ไม่เกิดการกระตุ้นด้วยตัวเอง ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานจึงต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

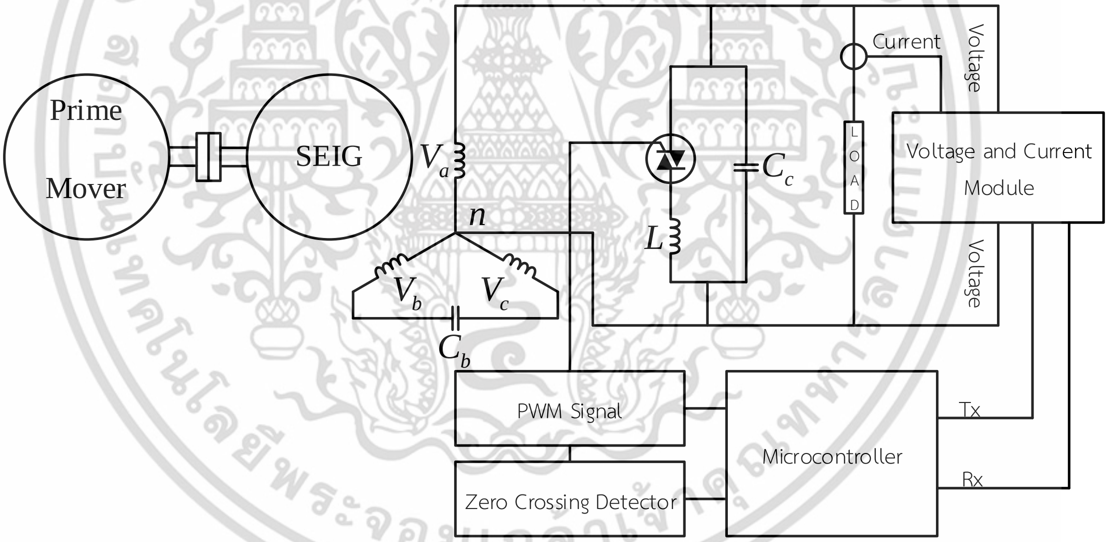
วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของภาระทางไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ และความถี่ของระบบ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระ แรงดันไฟฟ้าและความถี่ของระบบจะตกลงทันที ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ จำเป็นต้องมีการควบคุมตัวต้นกำลังให้คงที่ (Prime mover) รวมถึงกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายให้กับระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบภาควงจรกำลังและวงจรภาคควบคุม

4.1 บทนำ

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงหลักการออกแบบภาควงจรกำลัง วงจรตรวจจับสัญญาณไฟฟ้า และภาควงจรควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวต้นกำลัง เพื่อใช้ในการขับแกนเพลาหรือโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมีการควบคุมความเร็วรอบของตัวต้นกำลังให้คงที่ และควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด การทำงานของระบบทั้งหมดประมวลผลสัญญาณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ควบคุมมุมจุดชนวนของไตรแอกร่วมกับวงจร Zero crossing ซึ่งมีรายละเอียดโครงสร้างที่ออกแบบโดยรวมดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรควบคุมแรงดันอัตโนมัติแบบควบคุมไทรีสเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์

การควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน เช่น การควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ หรือการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยกำลังเสมือน จากรูปที่ 4.1 ได้แสดงโครงสร้างโดยรวมของชุดวงจรควบคุมแรงดันแบบอัตโนมัติแบบควบคุมไทรีสเตอร์ร่วมกับตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งองค์ประกอบหลักสามารถแบ่งออกเป็น 2 ภาคส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนวงจรกำลังและส่วนวงจรควบคุม ในการออกแบบชุดทดสอบสามารถอธิบายหัวข้อที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ส่วนวงจรกำลัง ประกอบด้วย

4.1.1 วงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

4.1.2 วงจรกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (FC-TCR)

4.2 ส่วนวงจรควบคุม ประกอบด้วย

4.2.1 วงจรขับเกตไตรแอก (Triac Gate Drives)

4.2.2 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

4.3 ส่วนประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ประกอบด้วย

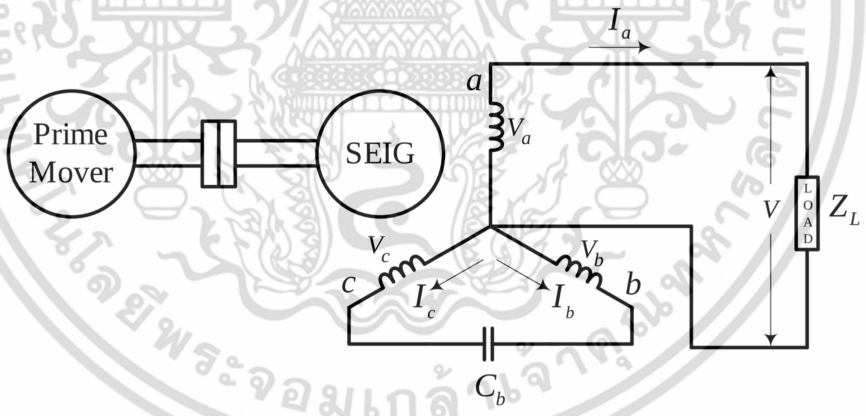
4.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

4.3.2 การแปลงค่าแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter)

4.2 ส่วนวงจรกำลัง

4.2.1 วงจรกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

วงจรกำลังสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ต่อแบบสตาร์ ทำการต่อตัวเก็บประจุระหว่างเฟส B และเฟส C เพียง 1 ชุด และใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวต้นกำลัง



รูปที่ 4.2 วงจรกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อขดลวดแบบ Star (L-N)

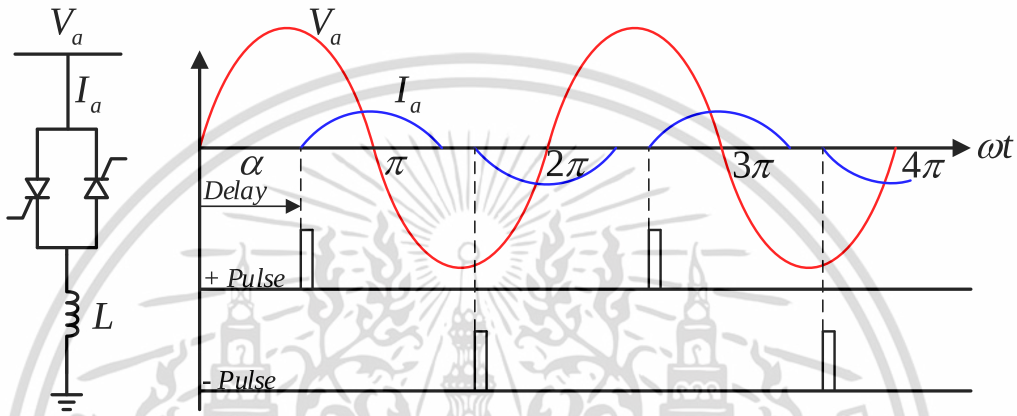
4.2.2 วงจรกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (SVC)

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (Static Var Compensator) หมายถึงตัวชดเชยที่สามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไม่มีการเคลื่อนที่ สามารถประยุกต์ใช้งานในการปรับปรุงหรือรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบในขณะที่แรงดันของระบบมีการเปลี่ยนแปลง หรือใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ในทางอุดมคติตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกจะสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และยังสามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้นำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์ มาใช้งานร่วมกับคาปาซิเตอร์ โดยจะนำชุดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนมาใช้รักษาระดับแรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมมุมจุดชนวน

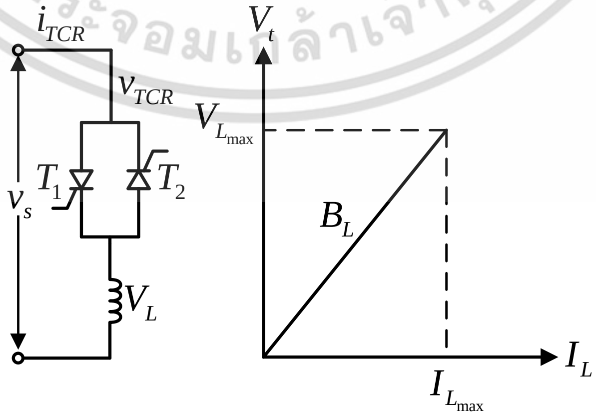
การควบคุมรีแอคเตอร์จะควบคุมมุมจุดชนวน (Firing Angle) สามารถใช้ไทรีสเตอร์หรือไตรแอก โดยกำหนดให้ทำงานตั้งแต่มุม 90-180 องศา ซึ่งข้อดีของไตรแอกเมื่อเทียบกับไทรีสเตอร์ คือใช้เพียงหนึ่งตัว และสามารถทำงานที่คาบเวลาทั้งซีกบวกและซีกลบ



รูปที่ 4.3 สัญญาณทางไฟฟ้าของชุดควบคุมไทรีสเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์

แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.1)

$$v_s(t) = V\sin\omega t \tag{4.1}$$



รูปที่ 4.4 ไทรีสเตอร์คอนโทรลรีแอคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) หรือในวงจร TCR สามารถพิจารณาแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (4.2)

$$L\frac{di}{td}-v_s\left(t\right)=0 \tag{4.2}$$

เมื่อ

L คือ ค่าอินดักแตนซ์ของ TCR

จากสมการที่ (4.2) เราสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร TCR ได้โดยการอินทริเกรตสมการที่ (4.2) จะได้สมการที่ (4.3)-(4.4) เป็นสมการที่ไหลในวงจร TCR

$$i\left(t\right)=\frac{1}{L}\int v_s\left(t\right)dt+C \tag{4.3}$$

เมื่อ

C คือ ค่าคงที่

$$i\left(t\right)=-\frac{1}{\omega L}\cos\omega t+C \tag{4.4}$$

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) $\omega t=\alpha=0$ จะได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร TCR สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (4.5)

$$i\left(t\right)=-\frac{v}{\omega L}\left(\cos\alpha-\cos\omega t\right) \tag{4.5}$$

เมื่อ

α คือ มุมจุดชนวนของไทรีสเตอร์

ใช้คณิตศาสตร์ฟูเรียร์ในการวิเคราะห์กระแสฟันดาเมนทอลที่ไหลในวงจร TCR สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (4.6)

$$I_1\left(\alpha\right)=a\cos\omega\mathrm{t}+b\sin\omega\mathrm{t} \tag{4.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$a=\frac{4}{\pi}\int_{0}^{T/2} f(x)\cos\frac{2\pi x}{T}dx$$

$$b=0$$

ผลจากการใช้อนุกรมฟูเรียในการวิเคราะห์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.7)

$$I_1(\alpha)=\frac{V}{\omega L}\left[1-\frac{2\alpha}{\pi}-\frac{1}{\pi}\sin 2\alpha\right] \tag{4.7}$$

นำสมการที่ (4.7) มาเขียนใหม่จะได้ดังสมการที่ (4.8)

$$I_1(\alpha)=VB_{TCR}(\alpha) \tag{4.8}$$

เมื่อ

$$B_{TCR}(\alpha)=B_{\max}\left[1-\frac{2\alpha}{\pi}\frac{1}{\pi}\sin 2\alpha\right]$$

$$B_{\max}=\frac{1}{\omega L}$$

โดยมุมจุดชนวน Firing angle (α) มีความสัมพันธ์กับมุมการนำกระแสไฟฟ้า Conduction angle (σ) ดังสมการที่ (4.9)

$$\alpha+\frac{\sigma}{2}=\pi \tag{4.9}$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (4.9) ลงในสมการที่ (4.7) จะได้ขนาดของกระแสมูลฐานของกระแสไฟฟ้าในวงจร TCR สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (4.10)-(4.11)

$$I_1(\sigma)=VB_{\max}\left[\frac{\sigma-\sin\sigma}{\pi}\right] \tag{4.10}$$

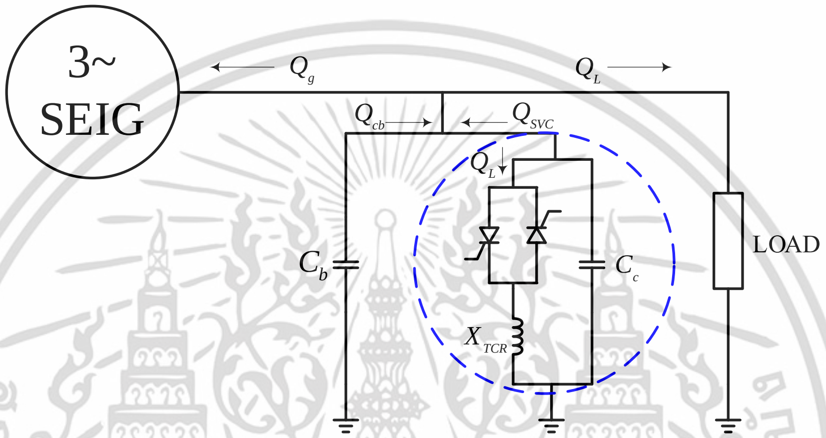
$$I_1(\sigma)=VB_{TCR}(\alpha) \tag{4.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$B_{TCR}(\alpha)=B_{\max}\left[\frac{\sigma-\sin\sigma}{\pi}\right]$$

ชุดชดเชยกำลังเสมือนแบบสแตติกที่นำมาใช้ในการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะอาศัยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบเพื่อจ่ายให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำงานโดยการจุดชนวนของไทรีสเตอร์ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะมีการต่อชุดชดเชยที่สเตเตอร์



รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมเส้นเดียววงจรควบคุมไทรีสเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยแบบ FC-TCR ที่ชดเชยให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของตัวชดเชยจะทำงานเป็นค่ารีแอกแตนซ์ที่ปรับค่าได้ ซึ่งจะทำให้สามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนได้อย่างอิสระ และกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เกิดจากผลรวมของของตัวเก็บประจุและรีแอคเตอร์ ดังนั้นขนาดอิมพีแดนซ์ของไทรีสเตอร์สามารถพิจารณาดังสมการที่ (4.12)

$$X_{TCR}=\frac{\pi X_L}{2\pi-2\alpha-\sin 2\alpha} \tag{4.12}$$

เมื่อต่อชุดไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ขนานกับตัวเก็บประจุ อิมพีแดนซ์รวมของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถพิจารณาได้สมการที่ (4.13)

$$X_{SVC}=\frac{\pi X_L X_C}{X_C(2\pi-2\alpha-\sin 2\alpha)-\pi X_L} \tag{4.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

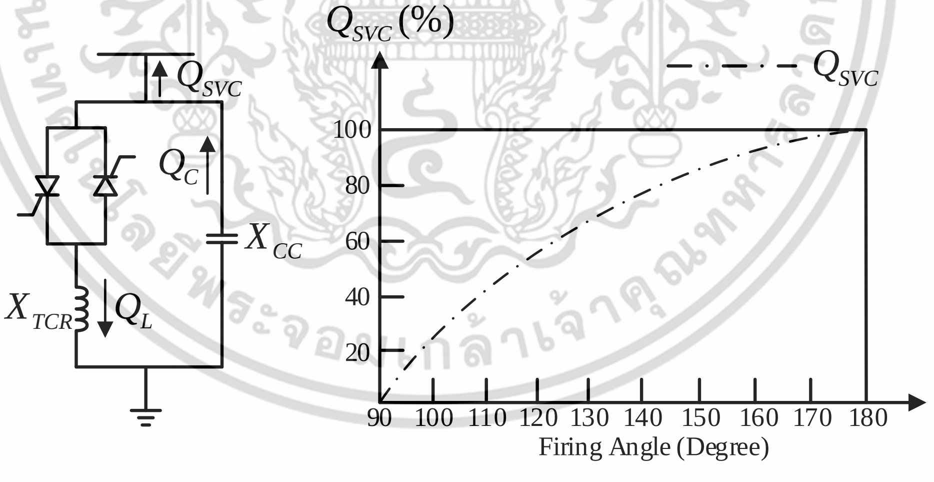
กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟหรือกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ที่เกิดขึ้นของชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกที่ชดเชยให้กับให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.14)

$$Q_{SVC} = \frac{V_t^2}{X_{SVC}} \qquad (4.14)$$

เมื่อ

X_{TCR} คือ อิมพีแดนซ์ของไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์
X_{SVC} คือ อิมพีแดนซ์รวมของตัวชดเชย
Q_{SVC} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชย

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกจากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าเกิดจากผลรวมกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าและรีแอคเตอร์ ขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชยแบบสแตติกจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีมุมจุดชนวนของไทรีสเตอร์ (α) ที่มุม 180 องศา สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของชุดชดเชยแบบสแตติกและมุมจุดชนวน

ดังนั้นขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือน และค่าของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจะสามารถพิจารณาจากสมการที่ (4.15)-(4.17)

$$Q_{SVC} = Q_{CC} \qquad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{CC} = \frac{aQ_{CC}}{V_t} \quad (4.16)$$

$$X_{CC} = \frac{V_t}{aI_{CC}} \quad (4.17)$$

ขณะเดียวกันขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดชดเชยจะมีค่าต่ำสุด เมื่อมุมจุดชนวนไทริสเตอร์ที่มุม 90 องศา ดังนั้นขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากตัวเก็บประจุสำหรับควบคุมแรงดันจะหักล้างกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่สร้างจากรีแอคเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.18)

$$X_{TCR} = X_{CC} \quad (4.18)$$

ดังนั้นขนาดของรีแอคเตอร์ของชุดกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.19)

$$L_{TCR} = \frac{X_{CC}}{2\pi f} \quad (4.19)$$

เมื่อ

Q_{CC} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุ
I_{CC} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ
X_{CC} คือ ขนาดของคาปาซิแตนซ์
X_{TCR} คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของรีแอคเตอร์

จากสมการข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าขนาดของรีแอคเตอร์หรือตัวเหนี่ยวนำและคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน $\left(X_{TCR} = X_{CC} \right)$ จะได้ขนาดตัวเหนี่ยวนำ 100 mH และขนาดคาปาซิเตอร์ 100 μF

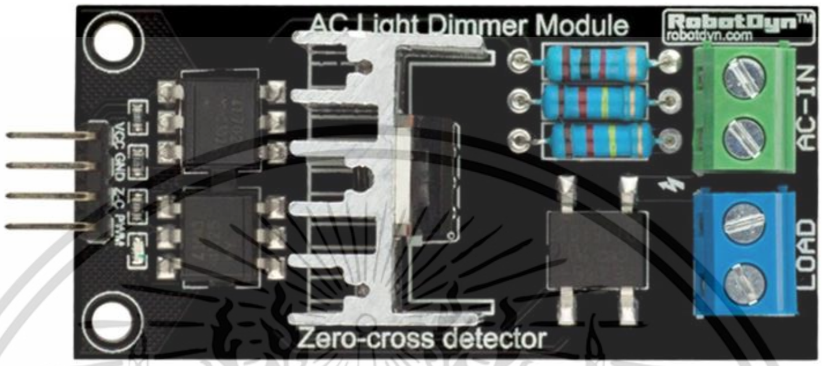
4.3 ส่วนวงจรควบคุม

4.3.1 วงจรขับเกตไตรแอก (Triac Gate Drives)

วงจรขับเกต (Gate Drive) เป็นส่วนหนึ่งของวงจรที่สำคัญที่สุด เนื่องจากทำหน้าที่เชื่อมโยงสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างสัญญาณควบคุมกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรกำลัง โดยไอซี Optocoupler–Isolator ที่มีหลักการทำงานโดยอาศัยหลักการส่งสัญญาณผ่านการเปล่งแสงและรับแสงของตัวหลอดแอลอีดี โดยสัญญาณจะถูกส่งผ่านตัวรับแสงที่อยู่อีกด้านของไอซี จึงทำให้ไอซีชนิดนี้

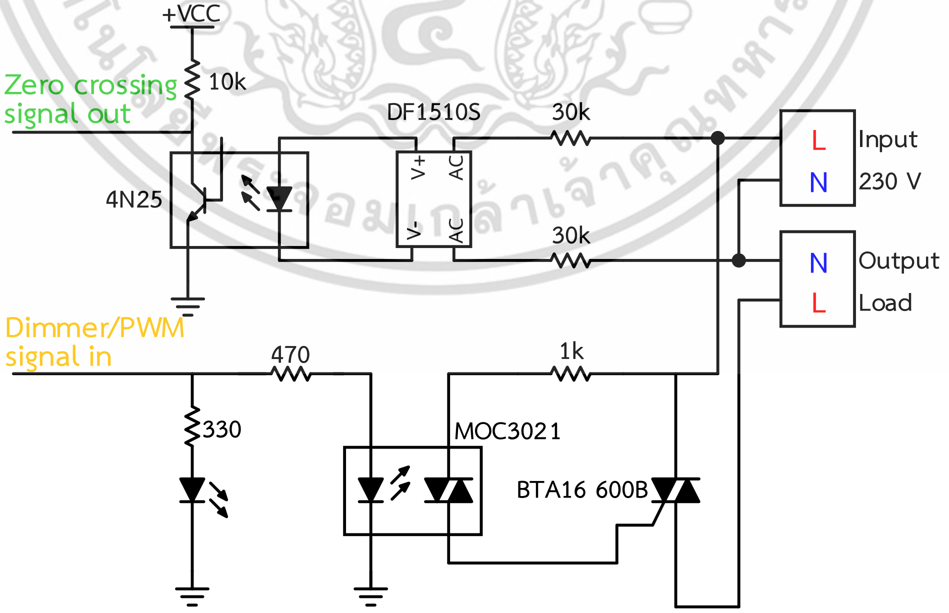
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถส่งสัญญาณโดยแยกลูปวงจรของวงจรกำลังและวงจรควบคุมตามเป้าหมายที่ต้องการออกแบบไว้ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ชุดโมดูล AC Light Dimmer โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง เช่น งานที่ใช้เกี่ยวกับการควบคุมเฟสเพื่อควบคุมความสว่างของหลอดไฟ หรืองานควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และที่สำคัญภายในชุดโมดูลมีวงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Zero Crossing Detector) เพื่อใช้งานร่วมกับการควบคุมเฟสที่ขา PWM ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ชุดโมดูล AC Light Dimmer

สำหรับชุดโมดูลนี้ยังรองรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 600V/16A หรือมากกว่านั้น ขึ้นอยู่กับขนาดของไตรแอก จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลายงาน เช่น ควบคุมแสงสว่าง หรือความเร็วรอบมอเตอร์ โดยมีวงจรการทำงานดังรูปที่ 4.8 และคุณสมบัติการใช้งานดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.8 วงจรกำลังและวงจรควบคุมของโมดูล AC Light Dimmer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการใช้งานชุดโมดูล AC Light Dimmer

Power (Triac)	Up to 600 V (16 A)
AC Frequency	50/60 Hz
Isolation	Optocoupler (MOC3021)
Logic level	3.3/5 V
Zero point	Logic level
Modulation (DIM/PSM)	Logic level ON/OFF TRIAC
Signal current	>10 mA
ROHS3	Compliant

4.3.2 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การออกแบบวงจรเพื่อตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจำเป็นต้องใช้การแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เลือกชุดโมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM–004T ดังรูปที่ 4.9

รูปที่ 4.9 ชุดโมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM–004T

โมดูลนี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น แรงดัน กระแส หรือค่าพลังงานไฟฟ้า และส่งข้อมูลผ่านการสื่อสารแบบ Serial (TX, RX) มีคุณสมบัติการใช้งานและสมรรถนะดังนี้

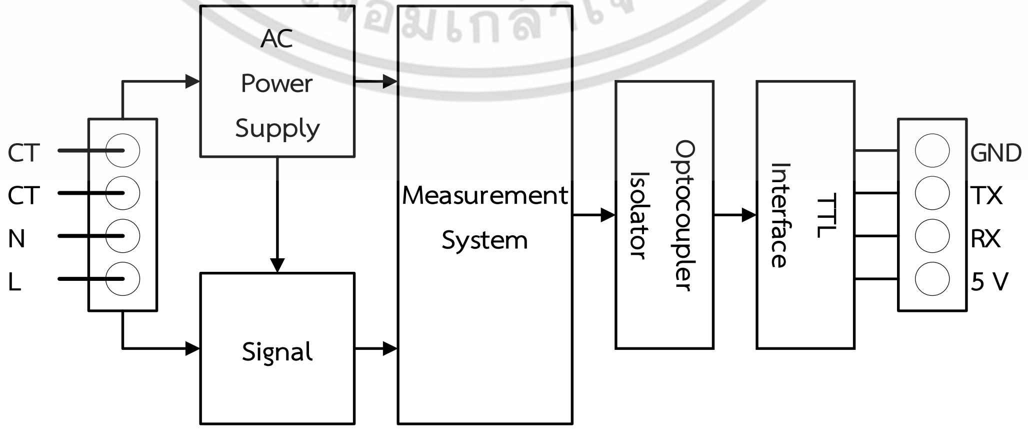
1. **แรงดันไฟฟ้า (Voltage)**
   - Measuring range: 80-260 V
   - Resolution: 0.1 V
   - Measurement accuracy: 0.5 %
2. **กระแสไฟฟ้า (Current)**
   - Measuring range: 0-100 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Starting measure current: 0.01 A
- Resolution: 0.001 A
- Measurement accuracy: 0.5 %

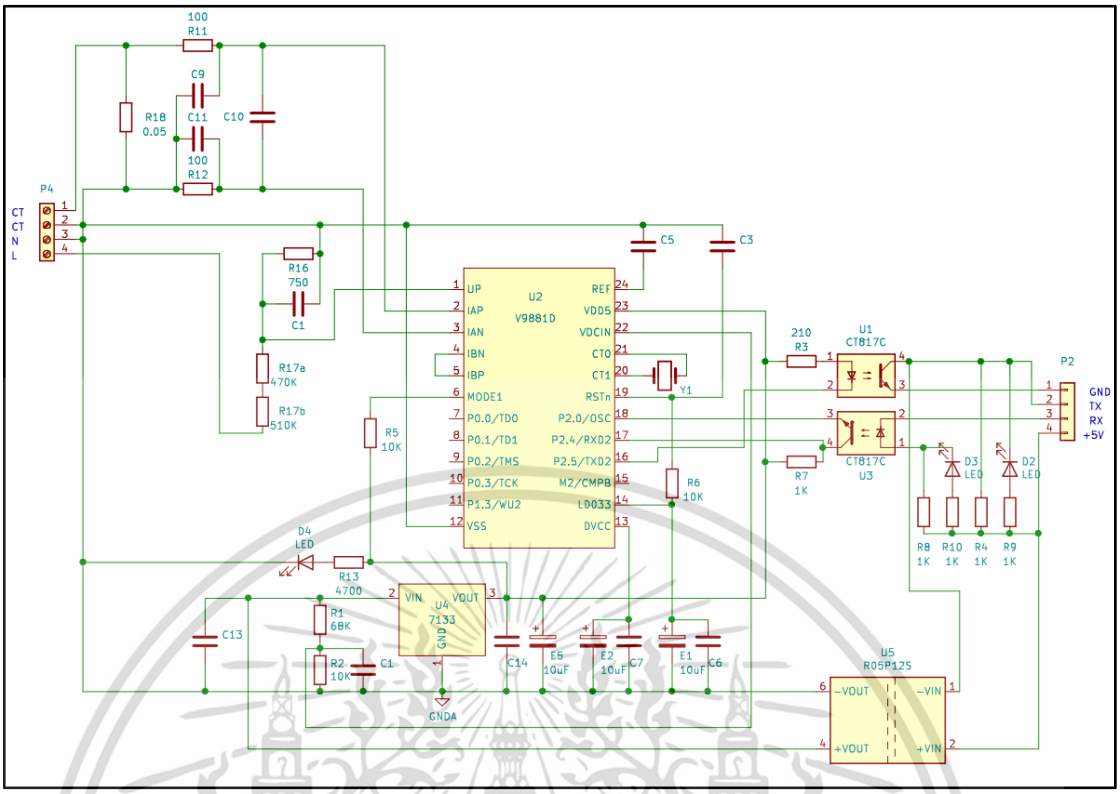
3. **ความถี่ (Frequency)**
   - Measuring range: 45-65 Hz
   - Resolution: 0.1 Hz
   - Measurement accuracy: 0.5 %
4. **ตัวประกอบกำลัง (Power factor)**
   - Measuring range: 0.00-1.00
   - Resolution: 0.01
   - Measurement accuracy: 1 %
5. **กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power)**
   - Measuring range: 0-23 kW
   - Starting measure power: 0.4 W
   - Resolution: 0.1 W
   - Reset energy: use software to reset.
6. **การติดต่อสื่อสาร (Communication interface)**
   - RS 485, 232

การใช้งานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น การตรวจวัดเฉพาะแรงดัน กระแส หรือการวัดค่าพลังงานที่เกิดขึ้นสามารถแสดงวงจรการทำงานในรูปแบบ Functional block diagram ดังรูปที่ 4.10 และแบบ Schematic Drawing ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ Functional block diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ Schematic Drawing

4.4 ไมโครคอนโทลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller หรือ MCU) คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กคล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ตต่าง ๆ โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายเช่น การควบคุมสัญญาณดิจิตอล หรือแอนะล็อกเพื่อควบคุมขา Input / Output สำหรับสั่งงานให้ไป ควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อีกด้วย

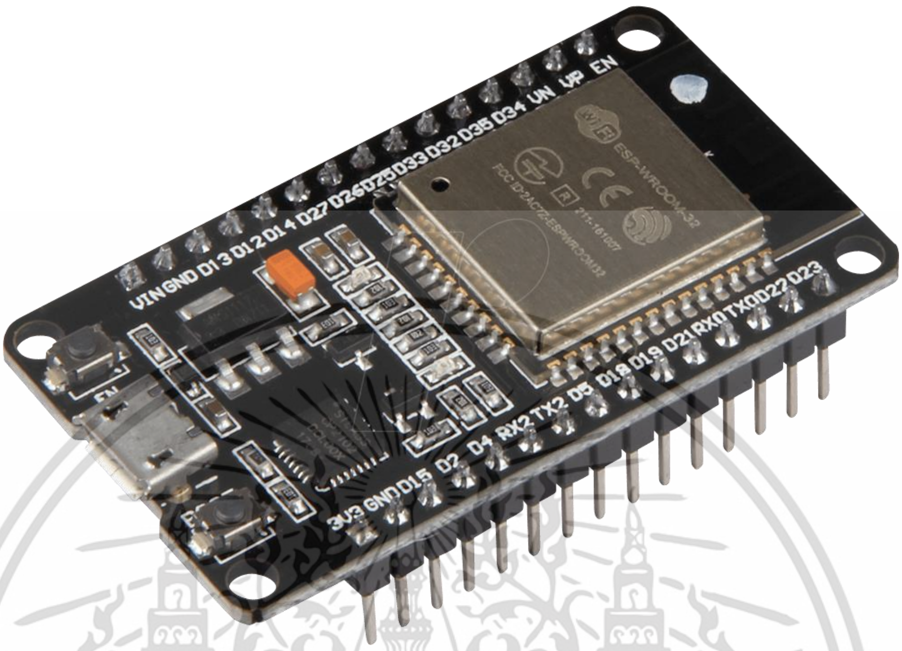
4.4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

กระบวนการทำงานของการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (FC-TCR) อุปกรณ์ที่ มีส่วนควบคุมการทำงานที่สำคัญคือไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ระบบที่ได้ออกแบบไว้มีการทำงานที่ถูกต้องสัมพันธ์กันระหว่างการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการควบคุมมุมจุดชนวนของไทรีสเตอร์นั้นจำเป็นต้องมีความแม่นยำ เนื่องจากมีผลต่อแรงดันในระบบ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP 32 ขนาด 32 บิต ที่มี WiFi และบลูทูธในตัว ผลิตโดยบริษัท Espressif ประเทศจีน ซึ่งเป็นรุ่นต่อของชิปไอซี ESP8266 รองรับการเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Arduino IDE และรองรับไลบรารี่ส่วนใหญ่ของ Arduino นอกจากนี้ราคายังถูกลงเรื่อย ๆ ทำให้ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การควบคุมกระบวนการทำงานของเครื่องจักร มอเตอร์ รีเลย์ หรือการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) โดยการใช้งาน (I/O) ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่ายมีคุณสมบัติการใช้งานและสมรรถนะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.2



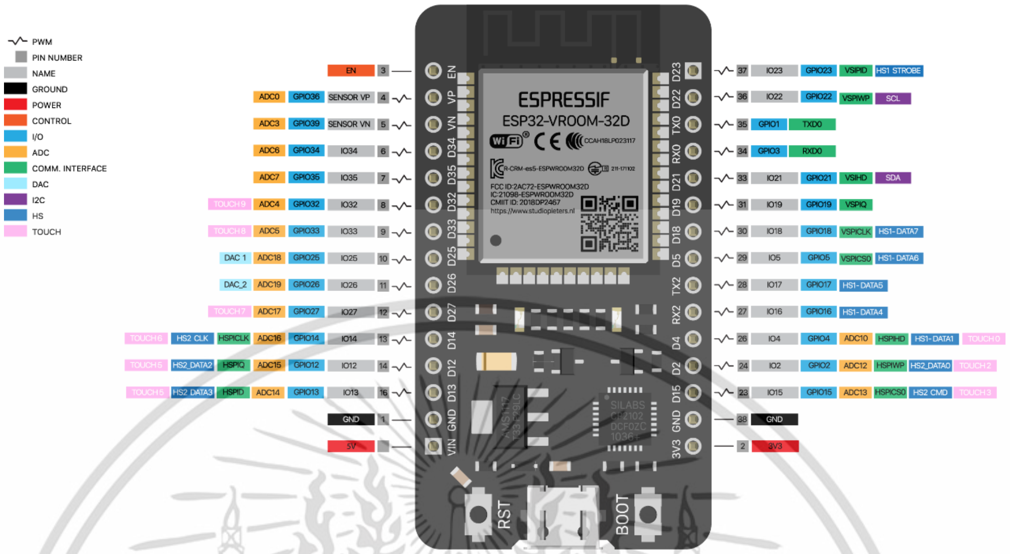
รูปที่ 4.12 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติและการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP32

Operating Voltage	2.2V to 3.6V
Architecture	32 bits
Clock Speed	Up to 240 MHz
Number of cores	2 Dual core
GPIO	30 points
ADC	14 points
DAC	2 points
SRAM	512 Kbyte
Wi-Fi	2.4 GHz
Bluetooth	V 4.2
Power consumption	350 mA
Flash memory	16 Mbyte
Working Temperature	- 40-125 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะอธิบายหลักการทำงานและข้อกำหนดต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ได้ง่ายขึ้นสามารถอธิบายดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การใช้งานขา GPIO ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32

4.4.2 การแปลงค่าแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

สัญญาณจากการตรวจจับสัญญาณจากขา PWM ของชุดควบคุมการทำงานของไทรีสเตอร์ต่อเข้ากับขา ADC3 หรือ GPIO39 สัญญาณเอาต์พุตจะมีขนาดแรงดันอยู่ในระดับช่วง 0.0-3.0 V ซึ่งเป็นขนาดแรงดันแอนะล็อกสูงสุดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับได้

สัญญาณแอนะล็อกที่ป้อนให้กับ Analog Modules (ADCs) ที่ได้มีความละเอียด 12 บิต หรือค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 0-4095 โดยค่าแรงดันที่วัดได้สูงสุดจะเรียกว่าแรงดันอ้างอิง เช่น หากวัดค่าได้เท่ากับ 3.3 V จะอ่านค่า ADC ได้ 4095 และถ้าหากวัดค่าได้ 1.65 V จะอ่านค่าจาก ADC ได้ 2048 แสดงได้ดังสมการที่ (4.20)

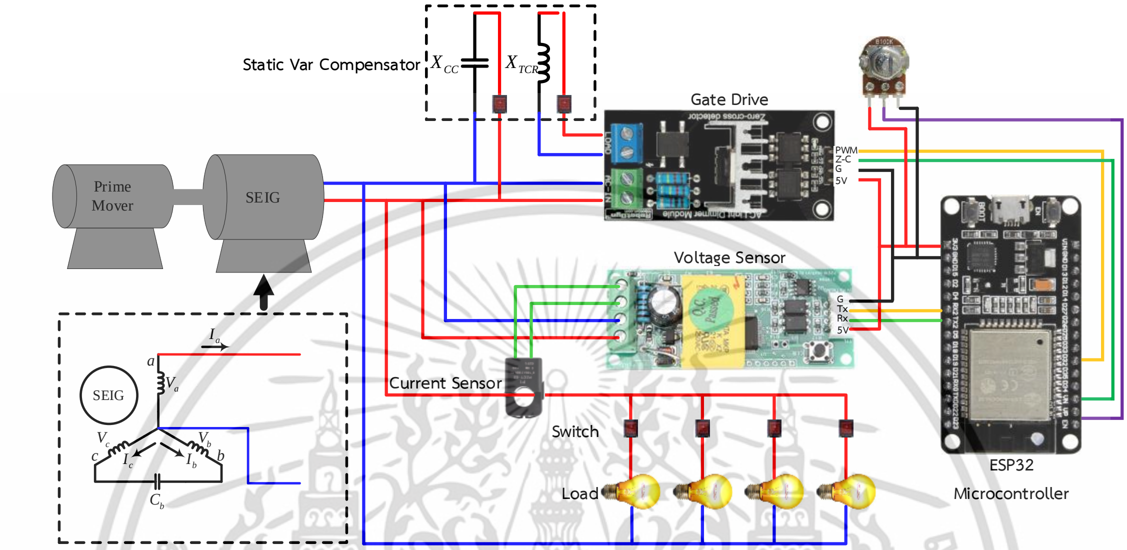
$$\begin{aligned} DigitalValue &= 2^{12bit} \\ &= 4095_{10} \end{aligned} \tag{4.20}$$

4.5 แผนผังโครงสร้างระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าของไมโครคอนโทลเลอร์

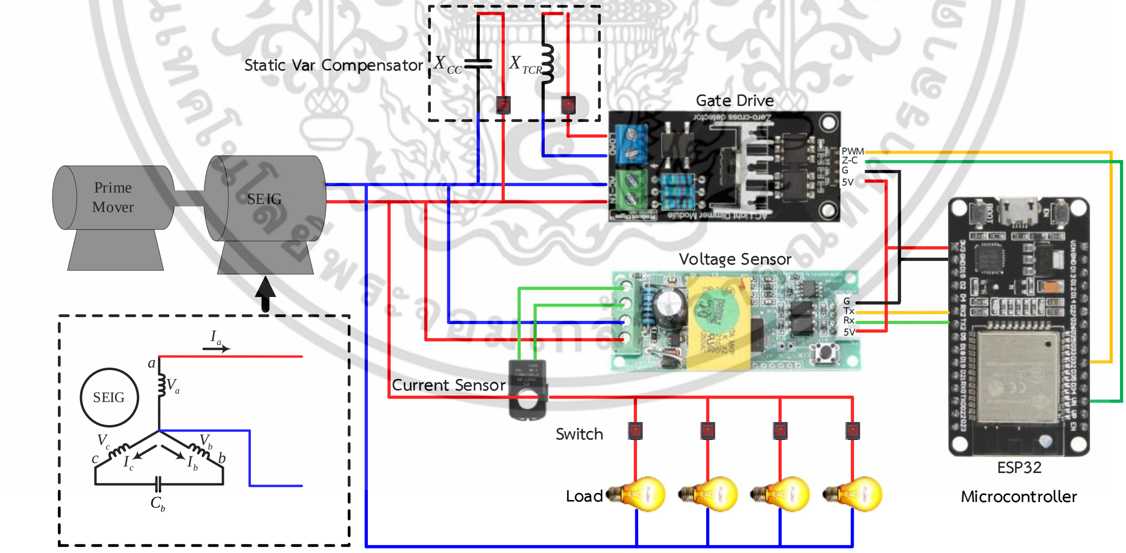
การควบคุมกระบวนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะไม่สามารถอ่านค่าแรงดัน กระแส หรือปรับมุมจุดชนวนได้ ถ้าไม่มีชุดไลบรารี่สำหรับโมดูลที่ใช้งานในการทดสอบ จำเป็นต้องลงไลบรารี่ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ (PZEM004Tv30) ซึ่งเป็นชุดไลบรารี่สำหรับโมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM-004T และ (RBDdimmer) สำหรับชุดโมดูล AC Light Dimmer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนโปรแกรมการทำงานทั้งแบบแบบไม่อัตโนมัติและแบบอัตโนมัติ โดยการปรับมุมจุดชนวนไตรแอกภายในชุดโมดูล AC Light Dimmer ได้ตั้งแต่ 0-180 องศา โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาด 5 กิโลโอห์ม แต่การทดสอบจะมีการตั้งค่ามุมจุดชนวนของไตรแอกที่ 90-180 องศา เพื่อทำให้ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเท่ากัน ดังรูปที่ 4.14-4.15



รูปที่ 4.14 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ



รูปที่ 4.15 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

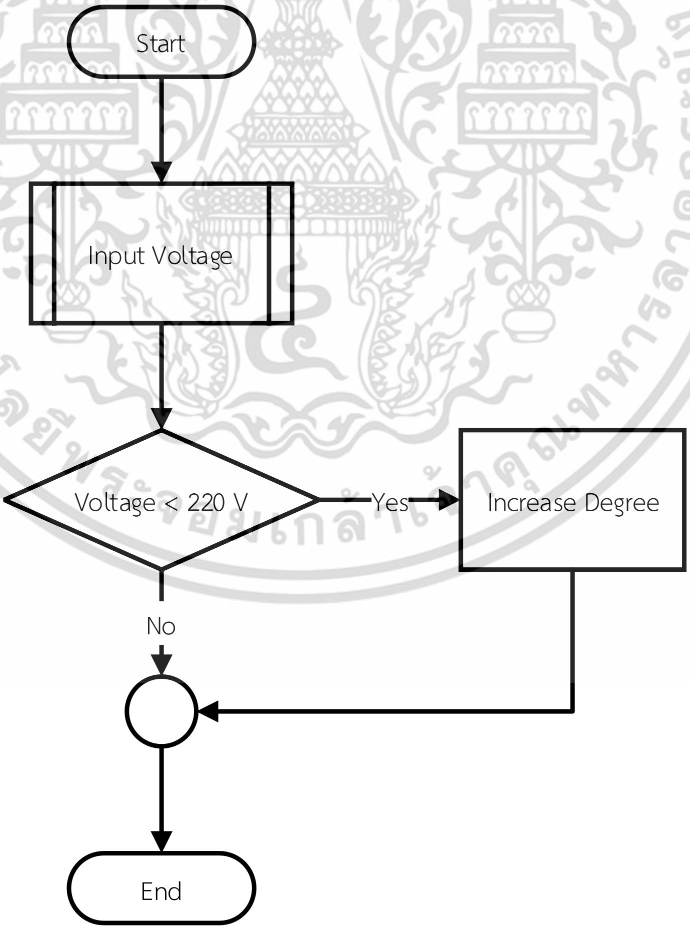
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสภาวะคงตัว โดยมีแรงดันอยู่ระหว่าง 220-240 โวลต์ โมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM-004T จะทำการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสสลับที่เกิดขึ้น ค่าแรงดันที่วัดได้จะส่งผ่านมาตรฐานการสื่อสารแบบ Serial port (RS 232, 485) ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลได้ครั้งละ 1 บิต ข้อดีของการสื่อสารแบบอนุกรมคือ สามารถส่งข้อมูลได้ระยะไกล โดยการรับส่งข้อมูลนั้นจะใช้สายไฟทั้งหมด 3 เส้น ดังนี้

1) Tx (Transmit Data) คือ สายส่งข้อมูล เป็นสายที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูล
2) Rx (Receive Data) คือ สายรับข้อมูล จะเป็นสายที่ทำหน้าที่รับข้อมูล
3) GND (Signal Ground) คือ สายกราวด์ เป็นสายเทียบหรืออ้างอิงแรงดันไฟฟ้า

RS232 และ RS485 เป็นรูปแบบการส่งข้อมูลดิจิตอลรูปแบบหนึ่ง จะประกอบด้วยตัวเลขเพียงสองตัว คือ 0 และ 1 เรียงต่อกันเป็นรหัสหรือชุดคำสั่งเพื่อสั่งงานอุปกรณ์ต่าง ๆ แรงดันที่วัดได้จะถูกส่งข้อมูลให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP 32 ที่ GPIO16 และ GPIO17 นอกจากค่าแรงดันไฟฟ้า ยังสามารถส่งค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ทางไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้า ความถี่ ตัวประกอบกำลัง หรือค่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น สำหรับโปรแกรมรักษาระดับแรงดันแบบไม่อัตโนมัตินั้นจะตั้งการทำงานการปรับมุมชนวนให้มากกว่า 90 องศาเป็นค่าเริ่มต้นเนื่องจากต้องการให้ค่า $\left(X_{TCR} = X_{CC}\right)$ สามารถแสดงโครงสร้างการทำงานได้ดังรูปที่ 4.16

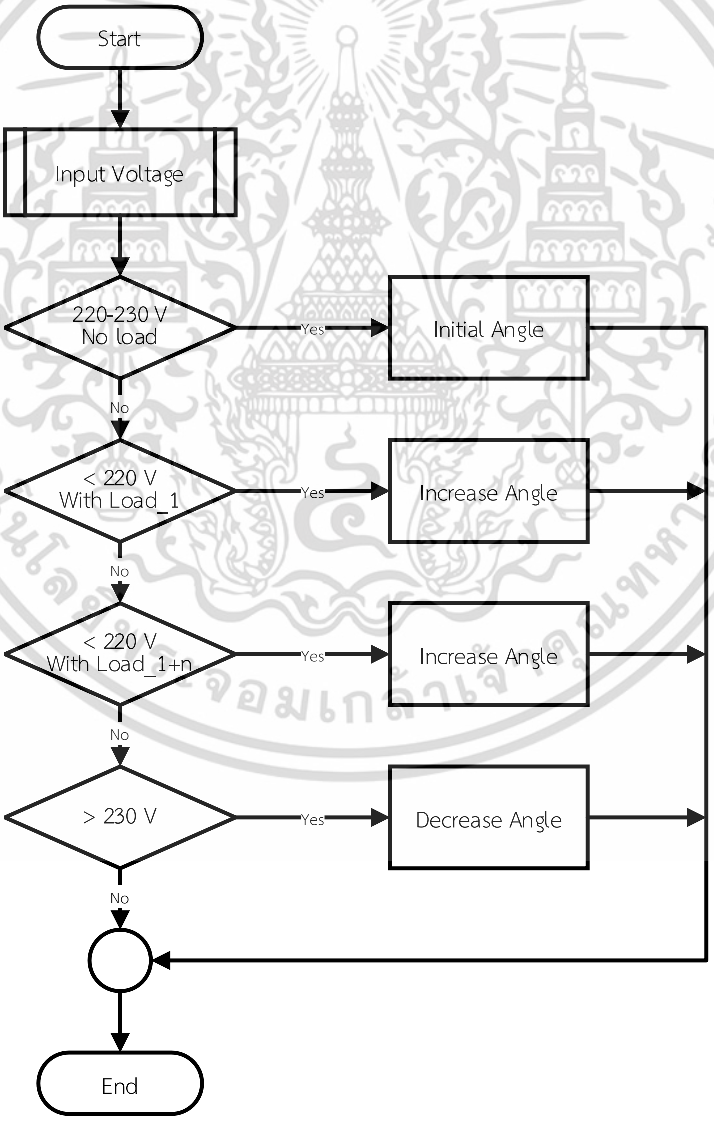


รูปที่ 4.16 แผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 คือโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมแรงดันแบบไม่อัตโนมัติ เมื่อมีโหลดในระบบจะส่งผลให้แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าน้อยกว่า 220 โวลต์ จากโปรแกรมสามารถปรับตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อปรับมุมของไตรแอกขึ้นให้มากกว่าค่าปกติ และเมื่อมีการปลดโหลดแรงดันของเครื่องกำเนิดจะสูงกว่า 230 โวลต์ สามารถปรับลดมุมจุดชนวนเพื่อให้แรงดันอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

การควบคุมแรงดันแบบอัตโนมัติ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำเปรียบเทียบทั้งค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยจะทำการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลักให้อยู่ระหว่าง 220-230 โวลต์ ถ้าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ำกว่า 220 โวลต์ จะมีการปรับมุมของไตรแอกขึ้นโดยอัตโนมัติ หรือถ้าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่า 230 โวลต์ จะมีการปรับลดมุมจุดชนวนของไตรแอกลงเพื่อให้แรงดันของเครื่องกำเนิดให้อยู่ในค่ามาตรฐานของแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถแสดงโครงสร้างการทำงานได้ดังรูปที่ 4.17



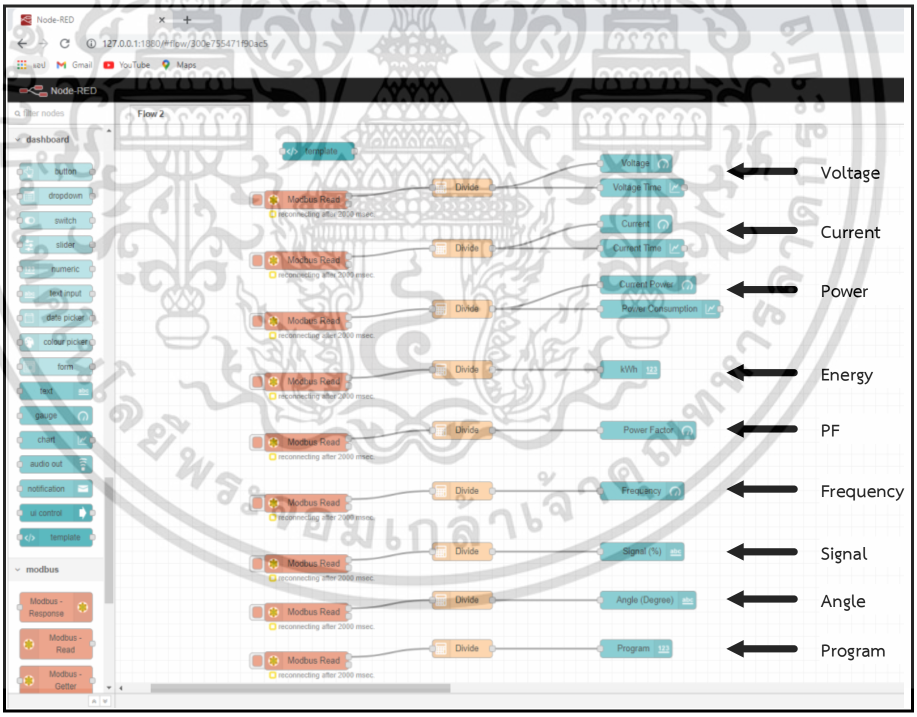
รูปที่ 4.17 แผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโปรแกรมควบคุมแรงดันแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการควบคุมมุมจุดชนวนของไตรแอก จะทำงานเป็นขั้นบันได (Step) คล้ายกับการทำงานของชุดเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ (On Load Tap Changer : OLTC)

4.6 รูปแบบการแสดงผลข้อมูลการทำงานบน Dashboard ด้วย Node-RED

Node-RED เป็นเครื่องมือจัดการและจัดการเหตุการณ์ขึ้นอยู่กับ Node.js แอปพลิเคชัน Node-RED มักทำงานเป็นเว็บเซิร์ฟเวอร์และผู้ใช้สามารถปรับแต่งและจัดการการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ และสร้างขั้นตอนการทำงานจากเบราว์เซอร์ของคอมพิวเตอร์เครื่องใดก็ได้ โดยการใช้โปรโตคอล Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) ที่ออกแบบมาเพื่อการเชื่อมต่อแบบ M2M (machine-to-machine) คือ อุปกรณ์ติดต่อหรือสื่อสารกับอุปกรณ์ โดยเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยี IoT (Internet of Things) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่อินเทอร์เน็ตเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ รถยนต์ เข้ากับอินเทอร์เน็ตทำให้สามารถเชื่อมโยงสื่อสารกับอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งจะทำให้สามารถ ควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ จากที่อื่นได้ ดังรูปที่ 4.18

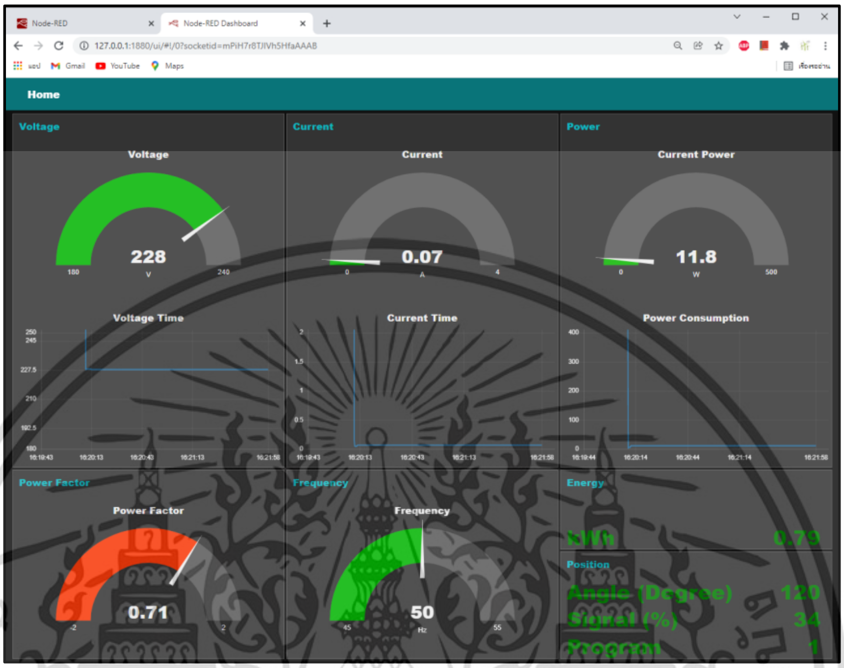


รูปที่ 4.18 รูปแบบการเขียน Flow สำหรับการแสดงผล

จุดเด่นของ Node-red ที่เห็นได้ชัดคือ ลดความยุ่งยากของการเขียนโปรแกรม เนื่องจากใช้ Flow ในการเขียน แล้วก็กำหนดค่าการทำงาน จากนั้นก็ลากสาย (Wiring) เชื่อมโยงกันไปมา ก็จะได้สิ่งที่ต้องการ dashboard นอกจากนี้ยังสามารถใช้หน้า dashboard การแสดงผลต่าง ๆ ออกมาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบ Graphic ได้ทันที อย่างไรก็แล้วแต่ผู้ใช้งานจำเป็นต้องลงไลบรารี่ที่เกี่ยวข้องในการแสดงผล ได้แก่ Dashboard และ Modbus หลังจากนั้นจะสามารถวาด Flow หรือการแสดงผลของข้อมูลได้ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 การแสดงผลข้อมูลการทำงานบน Dashboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการจำลองและผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

ในบทที่ 5 เป็นการนำเสนอการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-excited Induction Generator : SEIG) ด้วยแบบจำลองในโปรแกรม Matlab/Simulink และชุดทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกให้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะต่างที่แตกต่างกัน ดังนี้

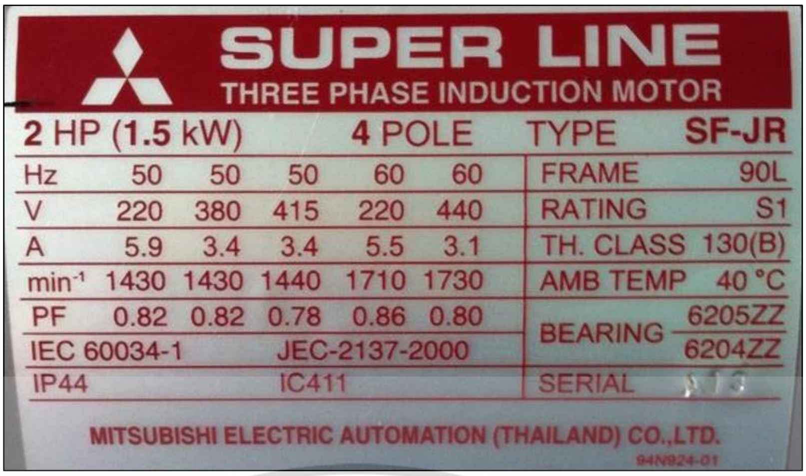
1) สภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว
2) สภาวะเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลด-ปลดโหลด
3) สภาวะเมื่อทำงานระหว่างโหลดร่วมกับชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกนั้นจำเป็นต้องใช้การควบคุมมุมจุดชนวนของไทรีสเตอร์หรือไตรแอก ผู้วิจัยได้เลือกใช้ชุดโมดูล AC Light Dimmer สำหรับควบคุมการจ่ายกำลังเสมือน ใช้ชุดโมดูล PZEM-004T ในการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผ่านสาย RS232 ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อนำไปใช้การควบคุม โดยเขียนโปรแกรมการทำงานผ่านโปรแกรม Arduino ด้วยภาษาซี และแสดงผลการทำงานบน Node-red Dashboard นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า และฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ

5.2 ผลการจำลองและผลการทดสอบในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว

เพื่อให้เห็นผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ ทั้งแบบจำลองในโปรแกรม Matlab/simulink และชุดทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยเลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1.5 kW โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อนแกนเพลาหรือโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็แล้วแต่ต้องมีการต่อตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นไม่สามารถสร้างแรงดันด้วยตัวเองจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายจากภายนอกเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ในบางครั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการสูญเสียสนามแม่เหล็กตกค้างจากการต่อโหลดระหว่างการสร้างแรงดันในช่วงเริ่มต้น หรือจากความร้อนในระบบ จำเป็นต้องจ่ายไฟเพื่อให้ทำงานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำก่อน หรือการจ่ายแรงดันให้ตัวเก็บประจุ สำหรับค่าพิกัดต่าง ๆ และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ป้ายชื่อ (Name plate) มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

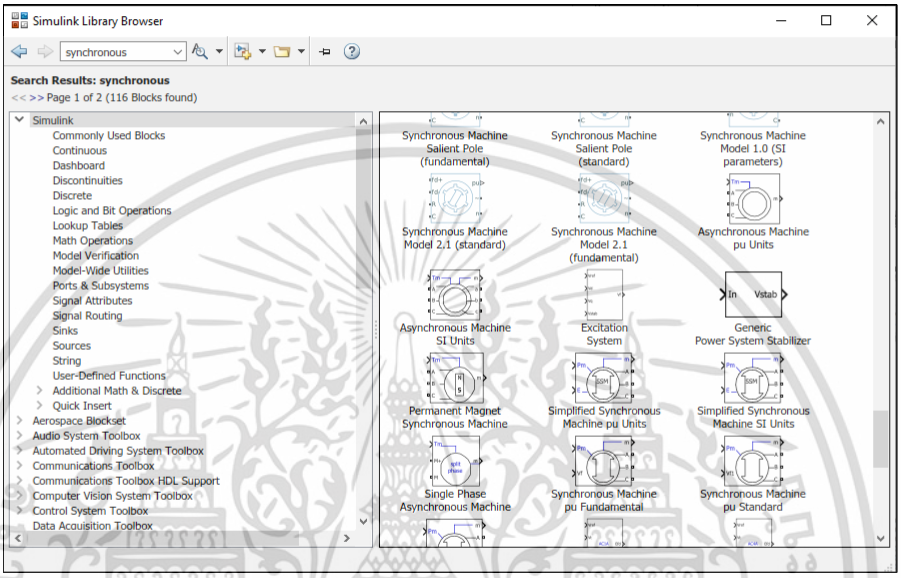
No-load test			Blocked-Rotor test			
Voltage	Current	Power	Frequency	Voltage	Current	Power
224.41	1.88	58.60	50.00	45.55	3.492	100.9
			12.50	29.40	3.53	98.30

Constants and summary of Equivalent circuit parameter

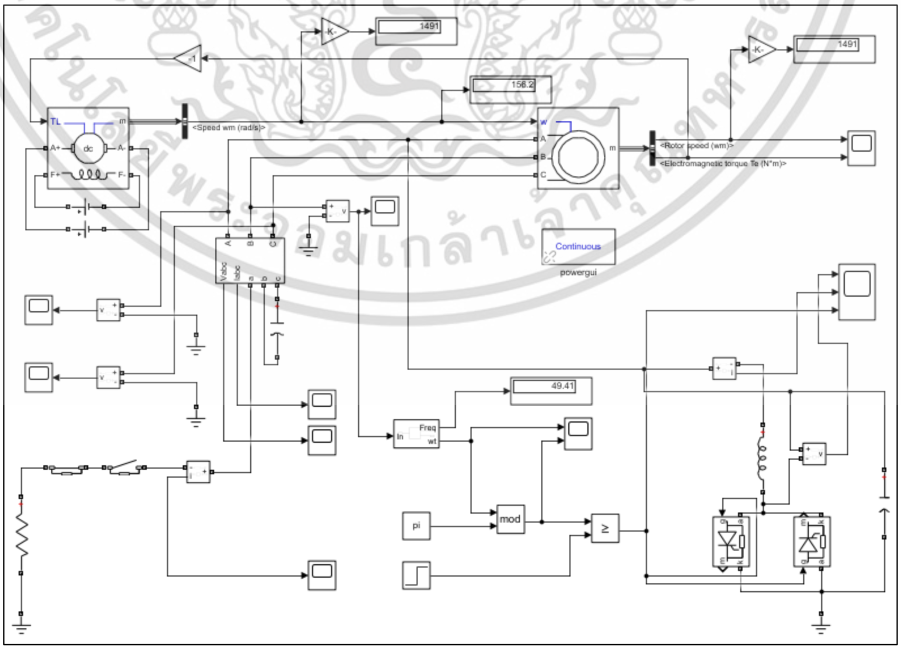
ความต้านทานสเตเตอร์, R_s	4.875 Ω	
ความต้านทานของโรเตอร์ R_r	3.4 Ω	
ความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก R_c	859.38 Ω	
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของแกนเหล็ก X_m	120 Ω	383.79 mH
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์ X_s	5.03 Ω	16 mH
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์ X_r	5.03 Ω	16 mH
$\left(X_s+X_r\right)$	10.095 Ω	
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์ X_s	5.03 Ω	12.5 Hz
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของสเตเตอร์ X_r	5.03 Ω	12.5 Hz
$\left(X_s+X_r\right)$	10.686 Ω	12.5 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองผลด้วยโปรแกรม Matlab/sumulink เป็นโปรแกรมที่ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมไฟฟ้า เนื่องจากชุดโปรแกรมมีไลบรารี่หรืออุปกรณ์ฟ้าสำเร็จรูป เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ ตัวต้านทาน หรือชุดเครื่องมือสำหรับวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ตัวอย่างดังรูปที่ 5.2 สำหรับการใช้งานเราสามารถเลือกอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ต้องการจากไลบรารี่มาเชื่อมต่อเป็นวงจรกำลังหรือวงจรควบคุมต่าง ๆ และแสดงผลในรูปแบบรูปคลื่นสัญญาณหรือตัวเลขดังรูปที่ 5.3



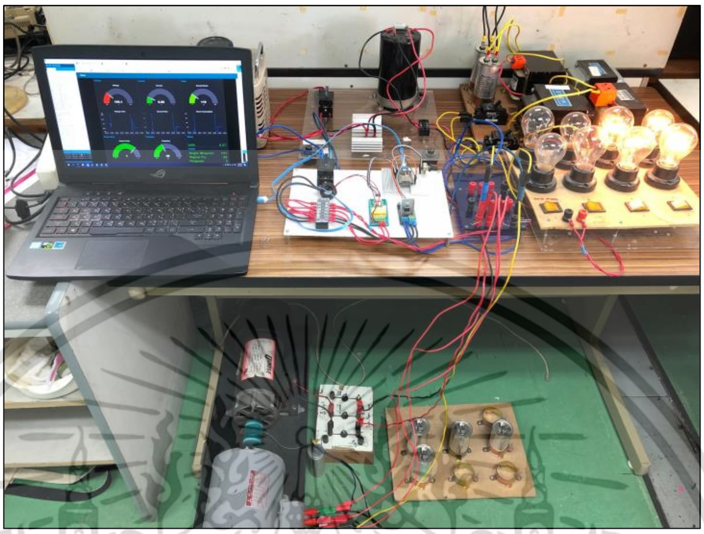
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างไลบรารี่ของโปรแกรม Matlab/Simulink



รูปที่ 5.3 แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ผู้วิจัยยังจัดทำชุดทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องภายในห้องปฏิบัติการ เช่น ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก ดังรูปที่ 5.4



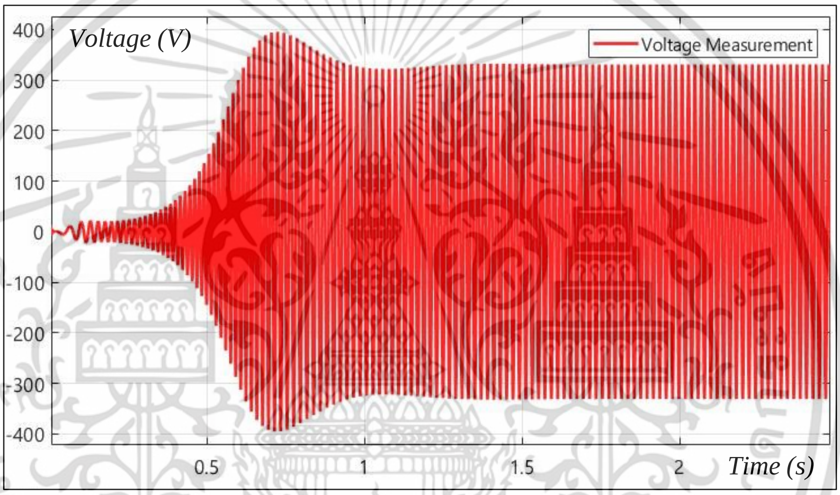
รูปที่ 5.4 ชุดทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

ตัวต้นกำลัง (Prime mover) หรือชุดผลิตพลังงานงานกลที่ใช้ในการทดสอบ ผู้วิจัยเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดพิกัด 3 kW, 1750 rpm ควบคุมความเร็วรอบโดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น โดยควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสด้วยหม้อแปลงปรับค่าแรงดันแบบแกนหมุน (Variable Voltage Transformer) ดังรูปที่ 5.5

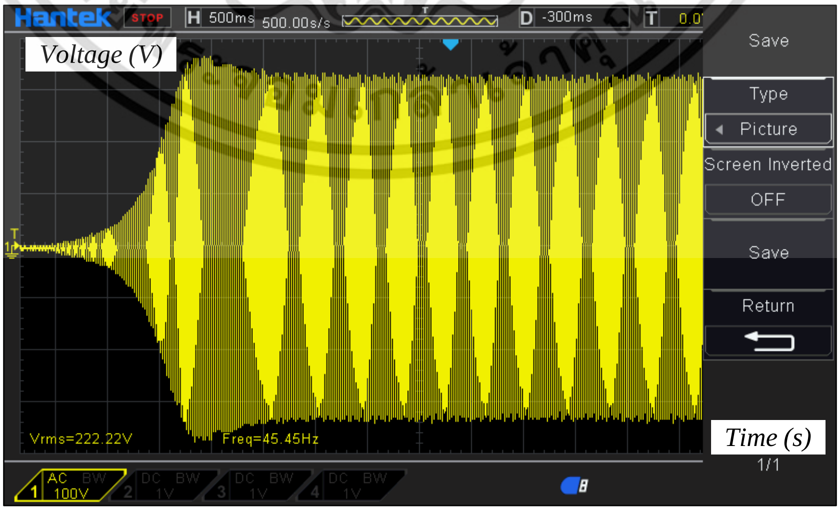
รูปที่ 5.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสำหรับควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 0-120 โวลต์ จะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากชุดวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นประมาณ 108.03 โวลต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะหมุนด้วยความเร็วจาก 0-1500 รอบต่อนาที จากนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างแรงดันไฟฟ้าค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่ง ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไปตกคร่อมตัวเก็บประจุส่งผลให้เกิดกระแสต่อเนื่องจากตัวเก็บประจุ (I_{cb}) ซึ่งกระแสในส่วนนี้ก็จะไปช่วยเพิ่มในส่วนของกระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ของส่วนกระตุ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าเป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build up voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้เวลาประมาณ 0.5-1 วินาทีเพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว แสดงผลในรูปแบบการสร้างแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 5.6–5.7 และแสดงผลในรูปแบบเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังรูปที่ 5.8-5.9

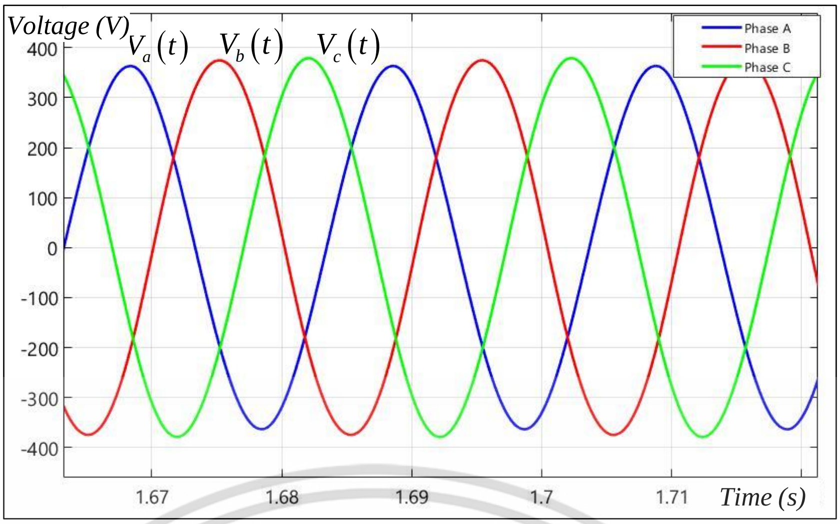


รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวจากการจำลอง

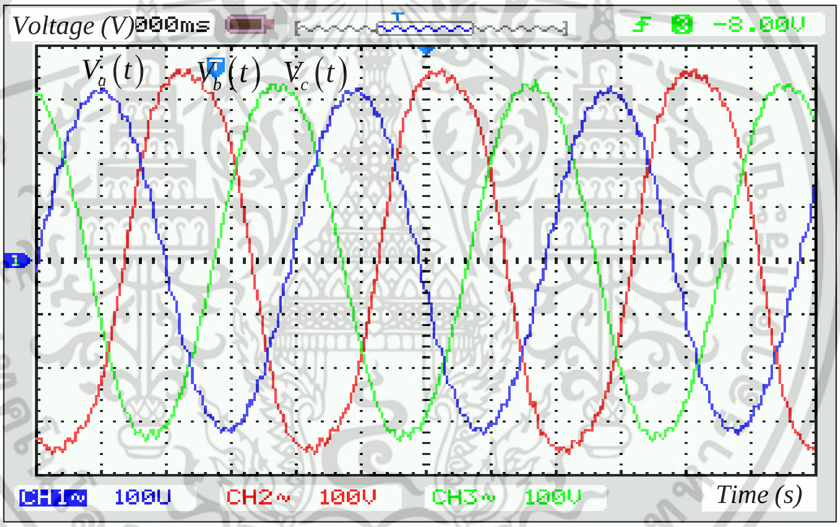


รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวจากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการจำลอง



รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการทดสอบ

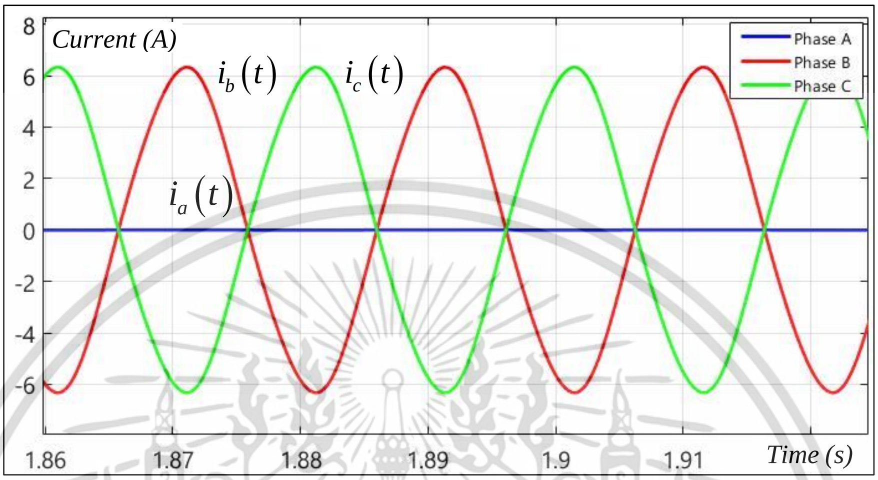
ตารางที่ 5.2 แรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการจำลองและการทดสอบ

แรงดัน (V)	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	$\%UV$
การจำลอง	412.8	422.7	414.2	233.4	243.2	244.8	2.95
การทดสอบ	423.5	432.7	400.7	225.9	262.7	236.7	8.66

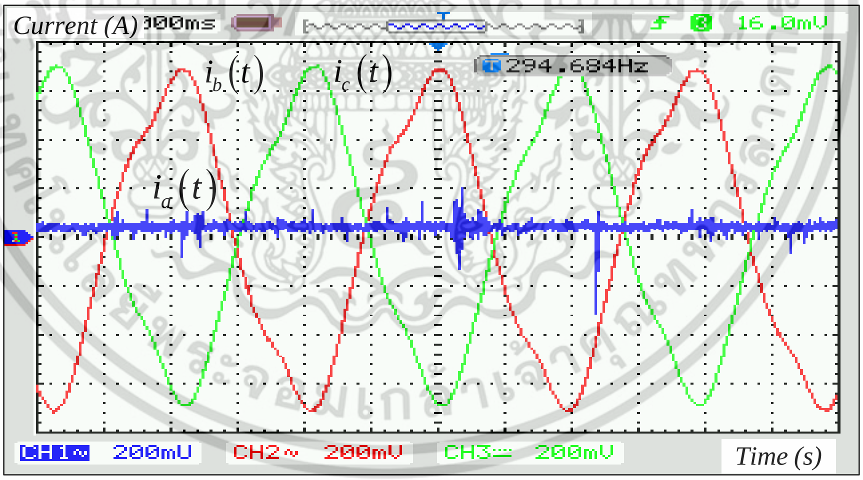
จากตารางที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งจากการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และจากผลการทดสอบในสภาวะไร้โหลด โดยค่าแรงดันไฟฟ้าจากการจำลองมีค่าระหว่าง 412-422 โวลต์ และค่าแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบมีค่าระหว่าง 400-432 โวลต์ และเกิดความไม่สมดุลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นประมาณ 2-8 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าผลลัพธ์ไปในทางเดียวกัน กล่าวคือเฟส B และ C เป็นเฟสที่มีการต่อตัวเก็บประจุจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าเฟสอื่น และมีค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากัน ในส่วนของเฟส A จะไม่มีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากยังไม่มีการจ่ายโหลด สามารถแสดงผลในรูปแบบเฟสเซอร์ไดอะแกรมทั้งแบบจำลองและการทดสอบดังรูปที่ 5.10–5.11



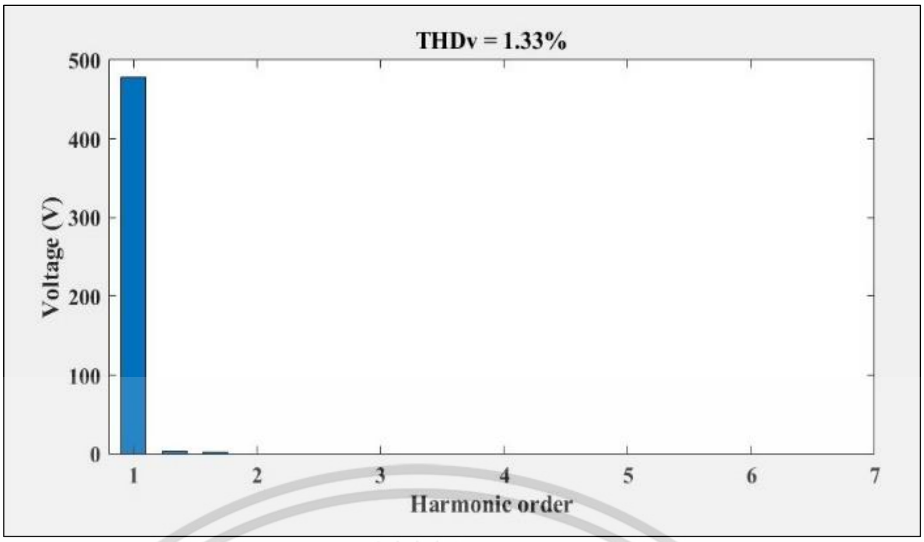
รูปที่ 5.10 สัญญาณกระแสไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการจำลอง



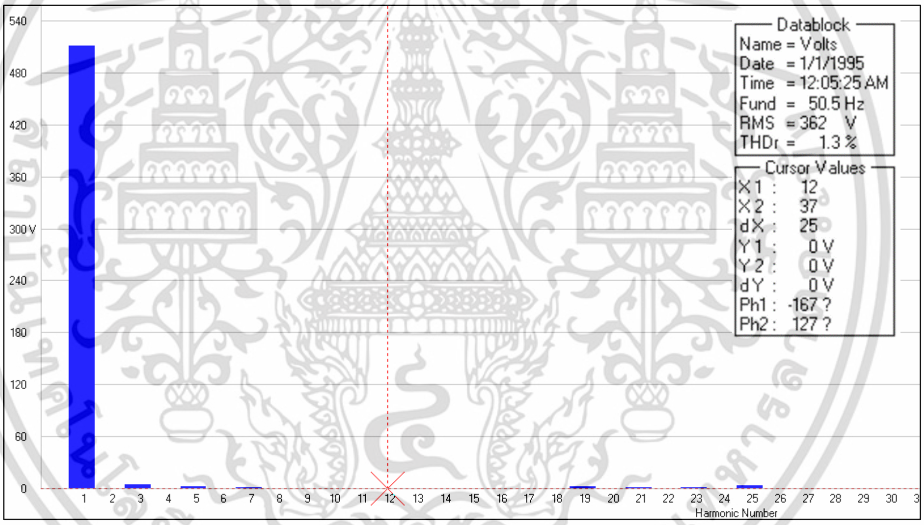
รูปที่ 5.11 สัญญาณกระแสไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากการทดสอบ

ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (Total harmonic distortion : THDv) ในสภาวะไร้โหลด (No-load) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระไฟฟ้าในสภาวะคงตัว โดยผลการจำลองและทดสอบมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นประมาณ 1.30-1.33 เปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 5.12-5.13 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความผิดเพี้ยนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในค่ามาตรฐานของค่าความผิดเพี้ยนของระบบที่แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 1,000 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



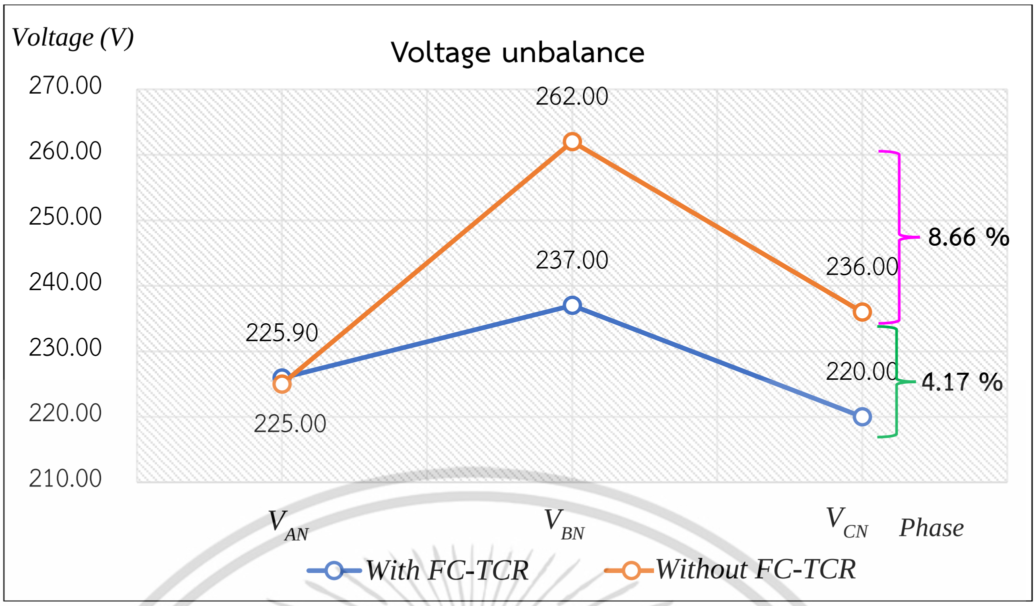
รูปที่ 5.12 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจากการจำลอง



รูปที่ 5.13 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ

การประยุกต์ใช้งานนั้น ผู้วิจัยได้ทำการต่อชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกเข้ากับเฟส A เทียบกับสายเส้นศูนย์ (Neutral) ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่มีตัวเก็บประจุต่อร่วมในการสร้างแรงดันไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้น และปรับมุมจุดชนวนของไตรแอกให้มากกว่า 90 องศา เพื่อให้กำลังไฟฟ้าเสมือนบางส่วนเข้ามาชดเชยให้กับเฟส A ที่มีค่าแรงดันต่ำกว่าเฟส B และ C โดยพบว่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวและไม่มีโหลด ค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่ารูปแบบแรก โดยที่ค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นประมาณ 4.17 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงค่าความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้ายังมีค่าลดลง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าบางส่วนถูกจ่ายไปยังชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนดังรูปที่ 5.14

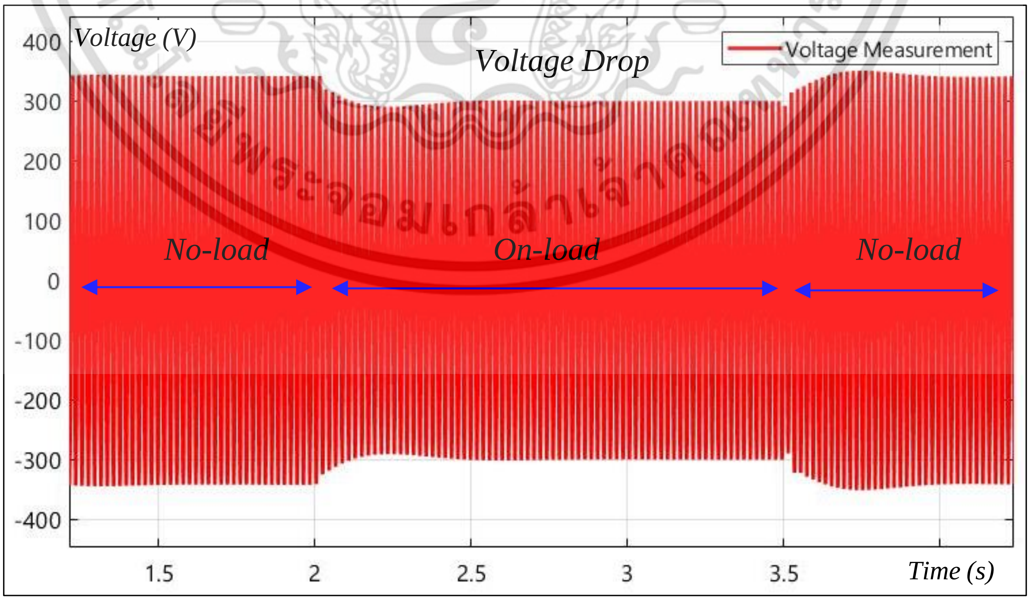
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า

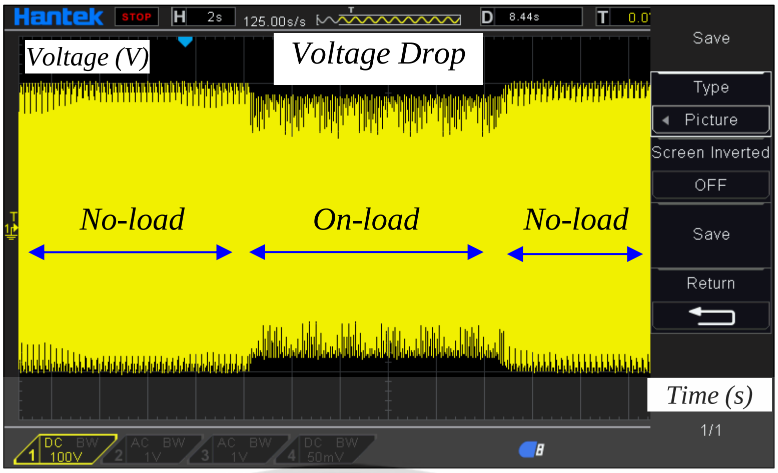
5.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบเมื่อมีโหลด

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะคงตัวและจ่ายโหลด แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลงทันที เนื่องจากกำลังไฟฟ้าจริงบางส่วนถูกจ่ายให้กับโหลดของระบบ และความเร็วรอบลดลง จากการจำลองและการทดสอบ โดยทำการจ่ายและปลดโหลดขนาด 80 VA จะเห็นว่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลงเมื่อมีโหลด และเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อปลดโหลด ดังรูปที่ 5.15-5.16



รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

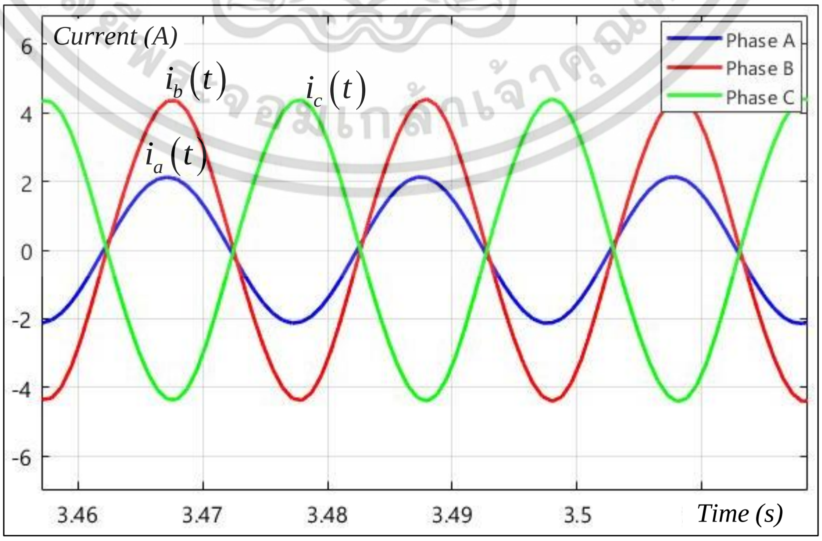


รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการทดสอบ

ตารางที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการจำลองและการทดสอบ

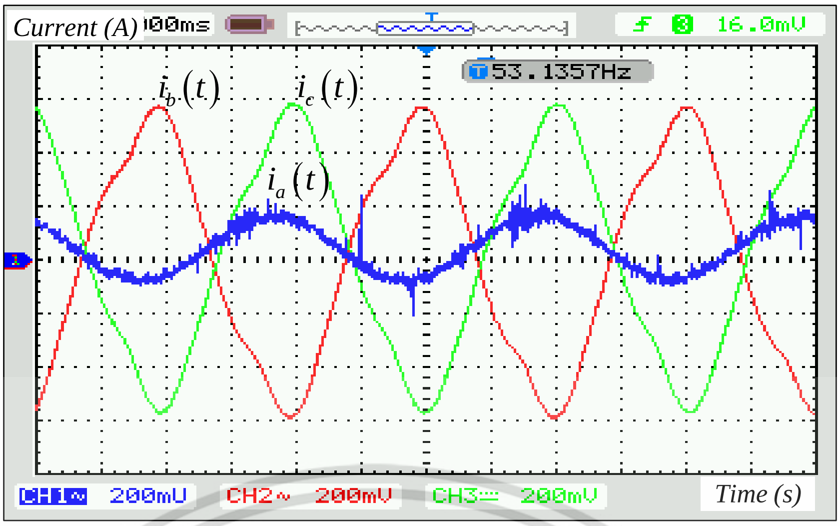
แรงดัน	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	$\%UV$
การจำลอง	344.0	405.5	384.7	186.1	211.6	256.3	17.56
การทดสอบ	414.7	427.6	391.0	218.1	260.2	233.4	9.68

จากตารางที่ 5.3 เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลด แรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสของระบบจะลดลงเนื่องจากกำลังเสมือนบางส่วนได้จ่ายให้กับโหลด ส่งผลให้ความเร็วรอบของตัวต้นกำลังลดลง ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสถาวะไรโหลดมีค่าประมาณ 9-17 เปอร์เซ็นต์และกระแสไฟฟ้าเฟส A มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากได้ทำการจ่ายโหลดดังรูปที่ 5.17-5.18



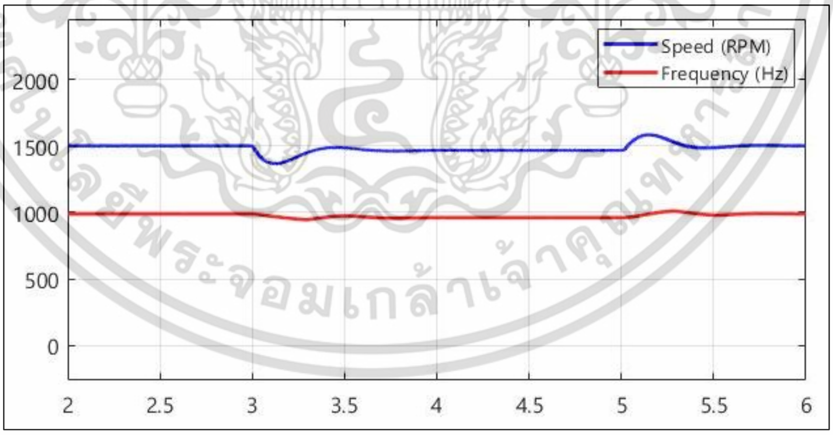
รูปที่ 5.17 สัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 สัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดจากการทดสอบ

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดวินาทีที่ 3 ความเร็วรอบและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อปลดโหลดออกจากระบบวินาทีที่ 5 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะกลับมาเท่าเดิม เพื่อให้ง่ายต่อการนำเสนอผู้วิจัยได้คูณค่าคงที่ (Gain = 20) ความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีค่าความถี่ประมาณ 1,000 เฮิรตซ์ เพื่อให้กราฟเส้นทั้งสองอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ความเร็วรอบและความถี่

เมื่อทดสอบจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นครั้งละ 70-80 VA โดยไม่ต่อชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน แล้วทำการบันทึกค่าแรงดัน กระแส ทั้งสามเฟสและกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเฉพาะเฟส A เนื่องจากเป็นเฟสที่ใช้ในการจ่ายโหลด พบว่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อมีทำการเพิ่มโหลด กระแสไฟฟ้าที่เฟส B และ C จะมีค่าเกินพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับค่ากระเสไฟฟ้าที่

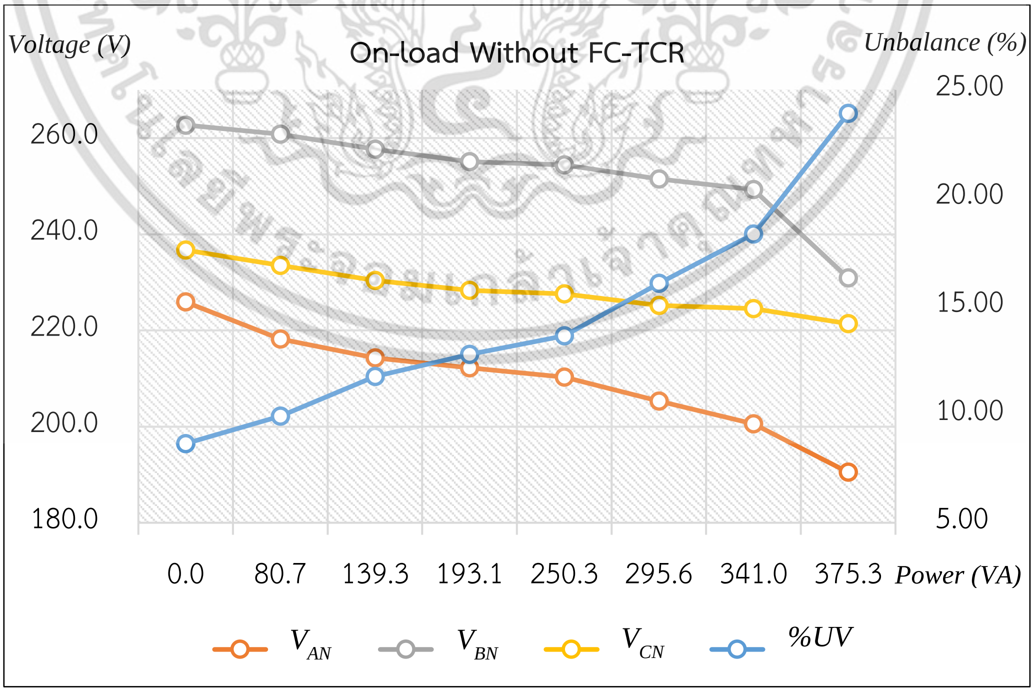
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟส A จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของโหลด โดยความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าแปรผันตรงกับโหลดที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความไม่สมดุลของกระแสจะมีค่าลดลง ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดและไม่มีชุดชดเชย

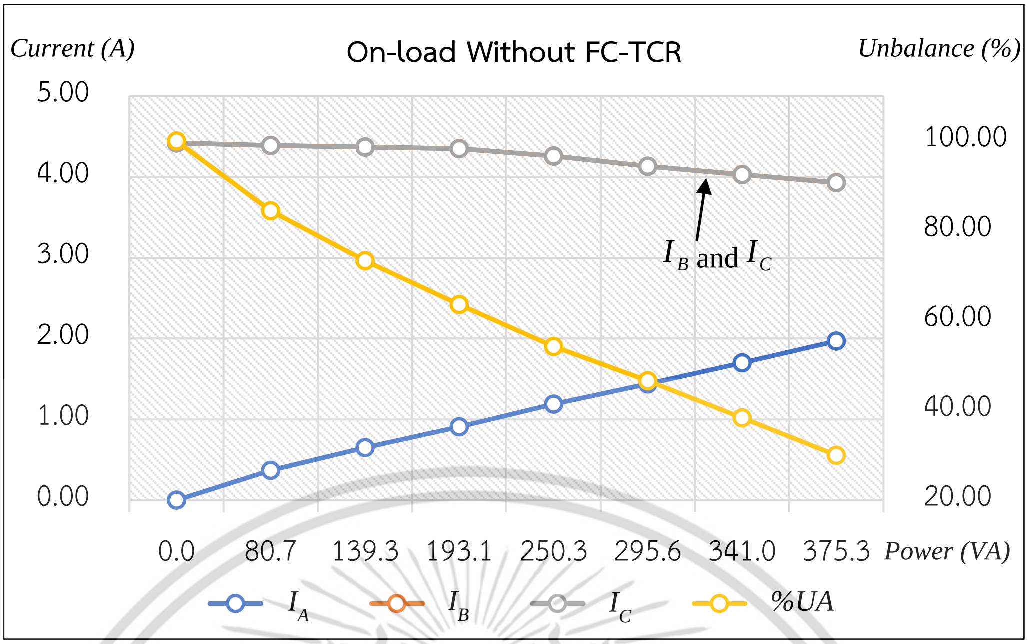
$S\,(VA)$	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	$\%UV$	I_A	I_B	I_C	$\%UA$
0.0	225.9	262.7	236.7	8.66	0.00	4.42	4.42	100.00
80.7	218.2	260.8	233.5	9.92	0.37	4.39	4.39	84.48
139.3	214.3	257.7	230.4	11.76	0.65	4.37	4.37	73.38
193.1	212.2	255.1	228.3	12.78	0.91	4.35	4.35	63.58
250.3	210.3	254.4	227.6	13.64	1.19	4.26	4.26	54.27
295.6	205.3	251.5	225.2	16.07	1.44	4.13	4.13	46.60
341.0	200.6	249.3	224.5	18.34	1.70	4.03	4.03	38.32
375.3	190.5	230.9	221.4	23.92	1.97	3.93	3.93	30.01

จากตารางที่ 5.4 สามารถแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส รวมถึงค่ากระแส และความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 5.20-5.21



รูปที่ 5.20 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 80-375 VA และไม่มีชุดชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 กระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 80-375 VA และไม่มีชุดชดเชย

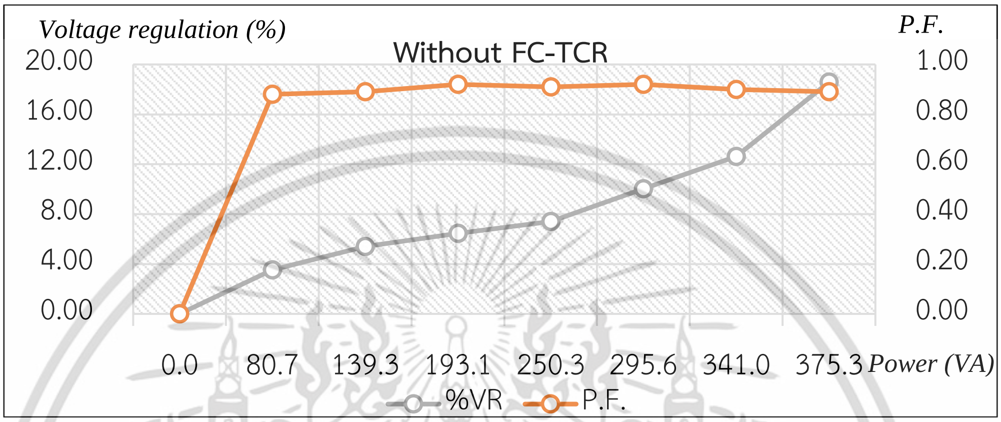
เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการดัดแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้จ่ายโหลด 1 เฟส และใช้เฟส A ในการจ่ายโหลด จึงจำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างของระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในสภาวะไร้โหลด (no-load) และสภาวะ (On-load) หรือในบ้างครั้งถูกเรียกว่าการรักษาระดับแรงดันขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลง (Voltage regulation) โดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็นร้อยละของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นร้อยละของความแตกต่างยิ่งต่ำคุณลักษณะในการทำงานหรือประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายิ่งดี จากผลการทดสอบเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลด สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 กำลังไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีโหลดและไม่มีชุดชดเชย

Step Load	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltage Phase A (V)	225.9	218.2	214.3	212.2	210.3	205.3	200.6	190.5
% Voltage Regulation	0.0	3.5	5.4	6.5	7.4	10.0	12.6	18.6
Current Phase A (A)	0.00	0.37	0.65	0.91	1.19	1.44	1.70	1.97
Apparent Power (VA)	0.0	80.7	139.3	193.1	250.3	295.6	341.0	375.3
Active Power (W)	0.0	71.0	124.0	177.7	227.7	272.0	306.9	334.0
Reactive Power (VAR)	0.0	38.3	63.5	75.7	103.8	115.9	148.6	171.1
P.F.	0.0	0.88	0.89	0.92	0.91	0.92	0.90	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

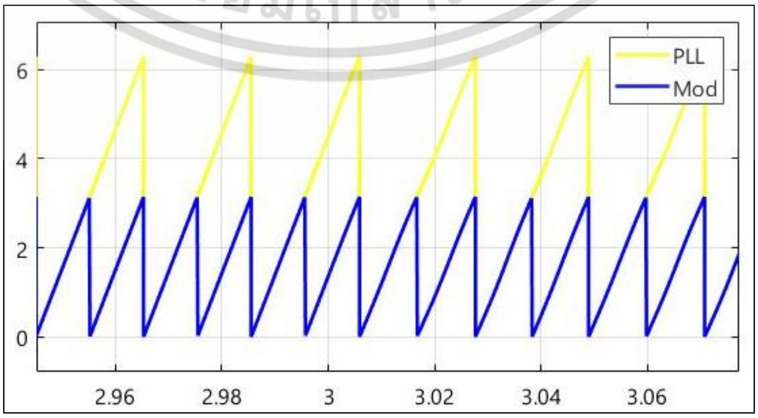
จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่เฟส A ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้ารวมถึงค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากโหลดตัวเหนี่ยวนำจะทำการดึงกำลังไฟฟ้าเสมือนบางส่วนจากตัวเก็บประจุที่ใช้สร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน กำลังไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ตัวประกอบกำลังและ Voltage regulation เมื่อไม่มีชุดชดเชย

5.4 ผลการทดสอบเมื่อใช้ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก

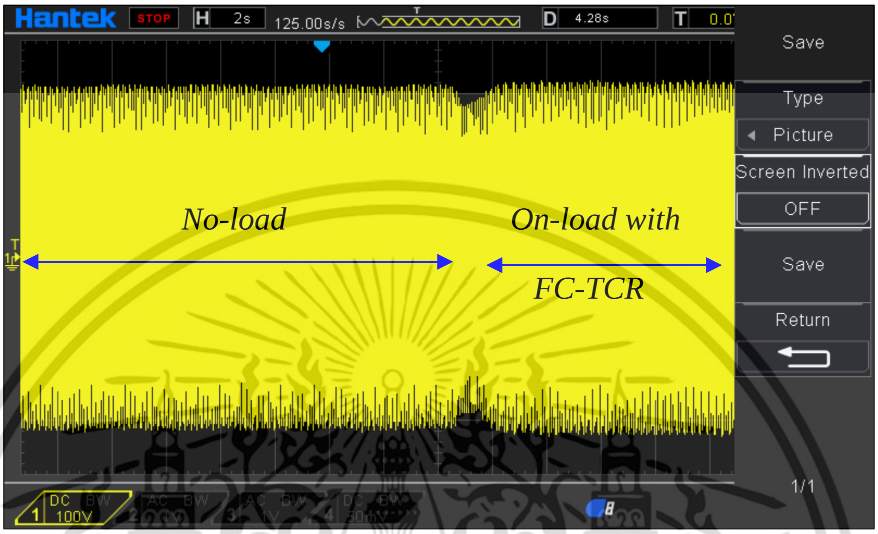
การทดสอบจะมีการจ่ายโหลดให้กับระบบขนาดแตกต่างกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างทันทีทันใดจะส่งผลให้ความถี่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลง เพื่อที่จะควบคุมมุมจุดชนวนของไตรแอกของชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนจำเป็นต้องเพิ่มฟังชันก์เฟสล็อกลูป (PLL) เพื่อใช้ควบคุมมุมเฟสของสัญญาณไซน์อ้างอิงควบคุมให้ตรงมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 สัญญาณเฟสล็อกลูปและสัญญาณมอดูเลชั่น

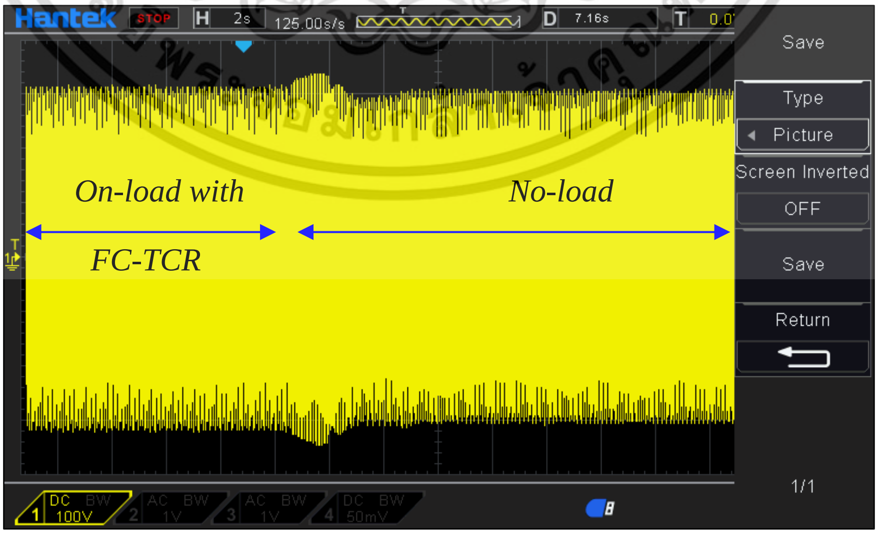
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะคงตัวและจ่ายโหลดร่วมกับชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน แรงดันไฟฟ้าลดลงในช่วงแรกและไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการตรวจจับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงและทำการปรับมุมจุดชนวนของไตรแอกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเสมือนจากชุดชดเชยจ่ายให้กับโหลด สามารถแสดงการตอบสนองของแรงดันที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดและมีชุดชดเชย

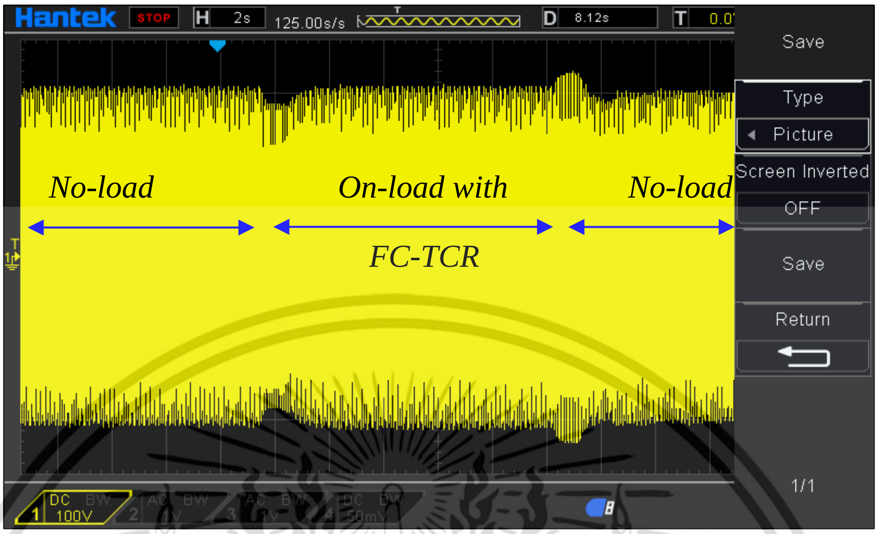
ในกรณีที่ลดโหลดอย่างทันทีทันใดจะส่งผลให้แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงกว่าค่าพิกัด แต่เมื่อมีชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนจึงส่งผลให้ไตรแอกลดมุมจุดชนวน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดลงและอยู่ในค่ามาตรฐานได้ ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อปลดโหลดและมีชุดชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อทดสอบความถูกต้องในการตอบสนองของโปรแกรมการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ผู้วิจัยได้แสดงการรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งกรณีจ่ายโหลดและปลดโหลด ดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลด-ปลดโหลดและมีชุดชดเชย

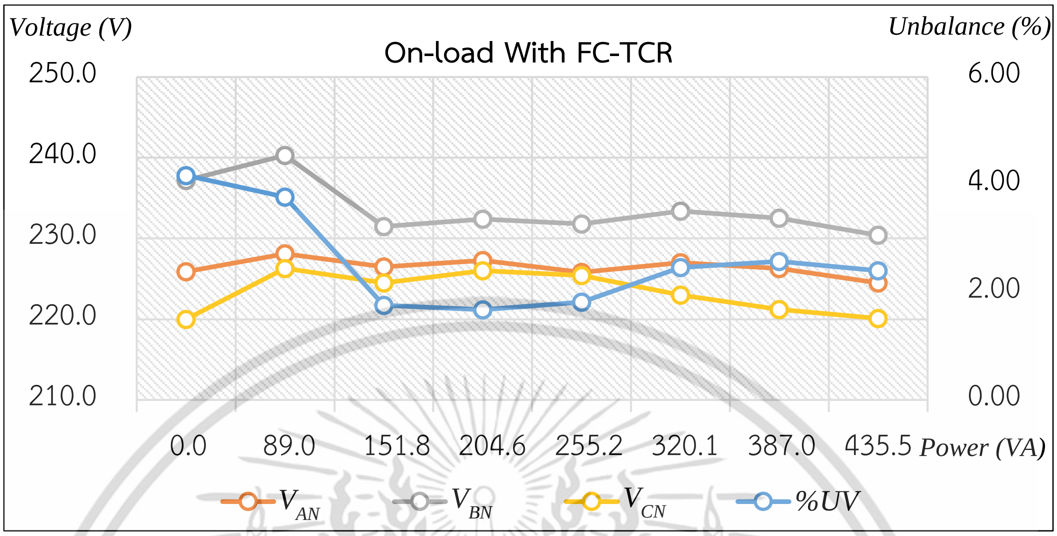
ทดสอบจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นครั้งละ 80-90 VA โดยบันทึกค่าแรงดัน กระแส ทั้งสามเฟสและกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเฉพาะเฟส A เนื่องจากเป็นเฟสที่ใช้ในการจ่ายโหลด พบว่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มีชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน กระเสไฟฟ้าที่เฟส A มีค่าเริ่มต้นประมาณ 2.02 แอมแปร์ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของโหลด ค่าความไม่สมดุลที่เกิดของแรงดันและกระแสมีค่าลดลง ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดและมีชุดชดเชย

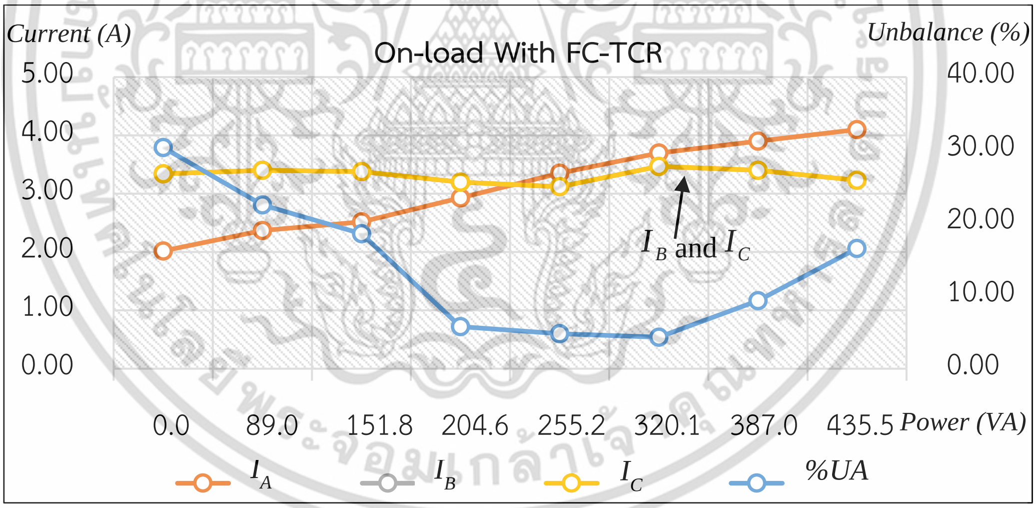
$S\,(VA)$	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	$\%UV$	I_{AL}	I_A	I_B	I_C	$\%UA$
0.00	225.9	237.2	220.0	4.17	0.00	2.02	3.34	3.34	30.34
89.0	228.1	240.3	226.3	3.77	0.39	2.37	3.40	3.40	22.46
151.8	226.5	231.5	224.5	1.76	0.67	2.52	3.38	3.38	18.53
204.6	227.3	232.4	226.0	1.68	0.90	2.93	3.20	3.20	5.79
255.2	225.8	231.8	225.4	1.82	1.13	3.35	3.12	3.12	4.80
320.1	227.0	233.4	223.0	2.46	1.41	3.70	3.47	3.47	4.32
387.0	226.3	232.5	221.2	2.57	1.71	3.90	3.40	3.40	9.35
435.5	224.5	230.4	220.1	2.40	1.94	4.10	3.23	3.23	16.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.6 สามารถแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส รวมถึงค่ากระแส และความไม่สมดุลที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 5.27-5.28



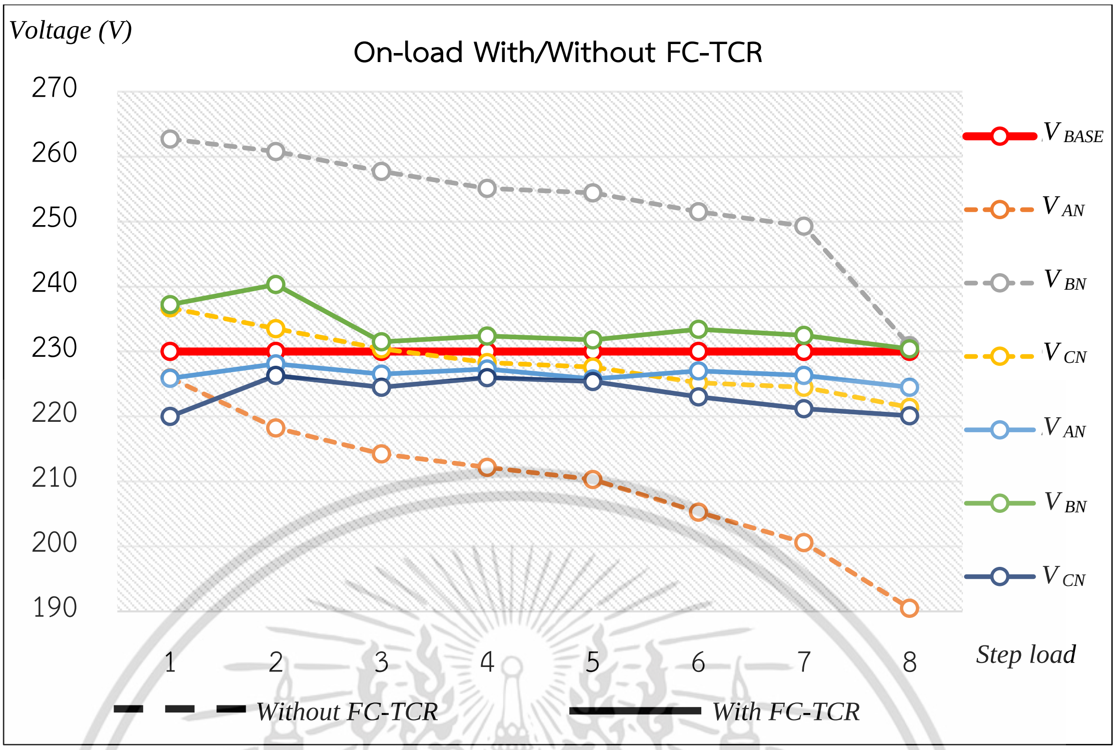
รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 89-435 VA และมีชุดชดเชย



รูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 89-435 VA และชุดชดเชย

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำการจ่ายโหลดขนาด 89-435 VA ตามลำดับ การทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมจะคล้ายกับชุดควบคุมแรงดันแบบอัตโนมัติ กล่าวคือแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น จากตัวเก็บประจุของชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เข้ามาในระบบ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 220-230 โวลต์ หรือมีค่าเข้าใกล้แรงดัน (Base) ในสภาวะปกติดังรูปที่ 5.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดทั้ง 2 กรณี

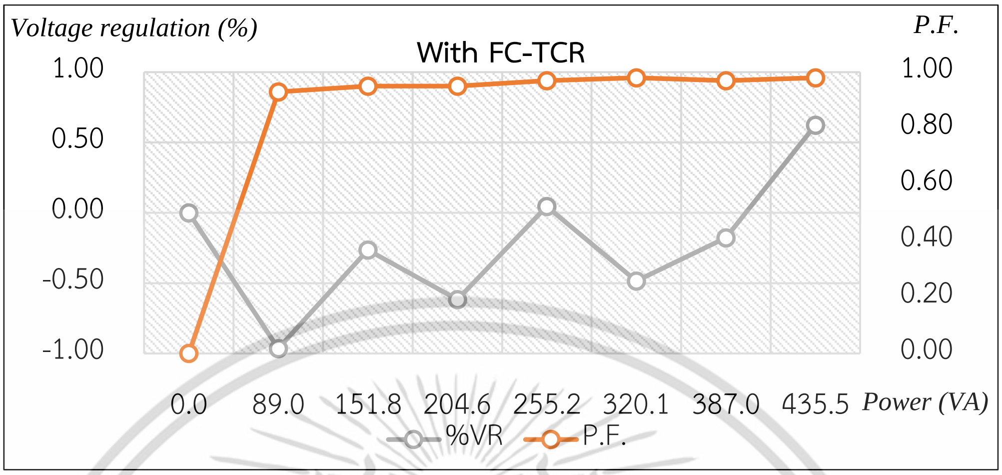
การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ารวมทั้งค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ เฉพาะเฟส A ซึ่งเป็นเฟสที่ใช้ในการจ่ายโหลดและต่อพ่วงเข้ากับชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน สามารถแสดงกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรวมทั้งระดับแรงดันไฟฟ้าขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลง (Voltage regulation) และตัวประกอบกำลังของระบบ ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 กำลังไฟฟ้าเฟส A เมื่อมีโหลดและมีชุดชดเชย

Step Load	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltage Phase A (V)	225.9	228.1	226.5	227.3	225.8	227.0	226.3	224.5
% Voltage Regulation	0.0	-1.0	-0.3	-0.6	0.0	-0.5	-0.2	0.6
Current Phase A (A)	0.00	0.39	0.67	0.90	1.13	1.41	1.71	1.94
Apparent Power (VA)	0.00	89.0	151.8	204.6	255.2	320.1	387.0	435.5
Active Power (W)	0.00	82.7	144.2	194.3	247.5	313.7	375.4	426.8
Reactive Power (VAR)	0.00	32.7	47.4	63.9	62.0	63.7	94.1	86.7
P.F.	0.00	0.93	0.95	0.95	0.97	0.98	0.97	0.98

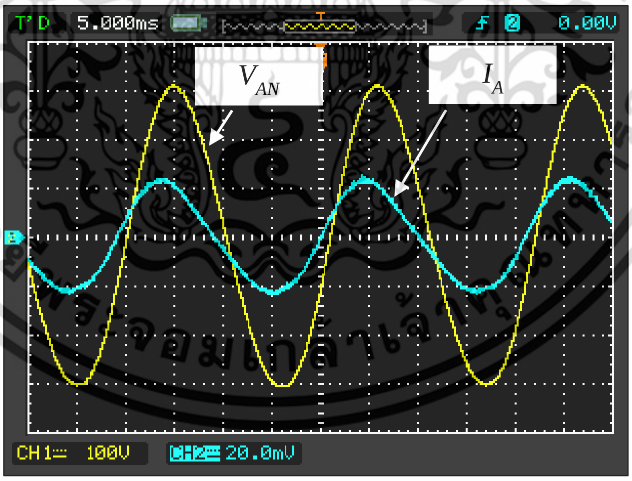
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง กำลังไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังที่เกิดขึ้นสามารถแสดงในรูปแบบกราฟ ดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 ตัวประกอบกำลังและ Voltage regulation เมื่อมีชุดชดเชย

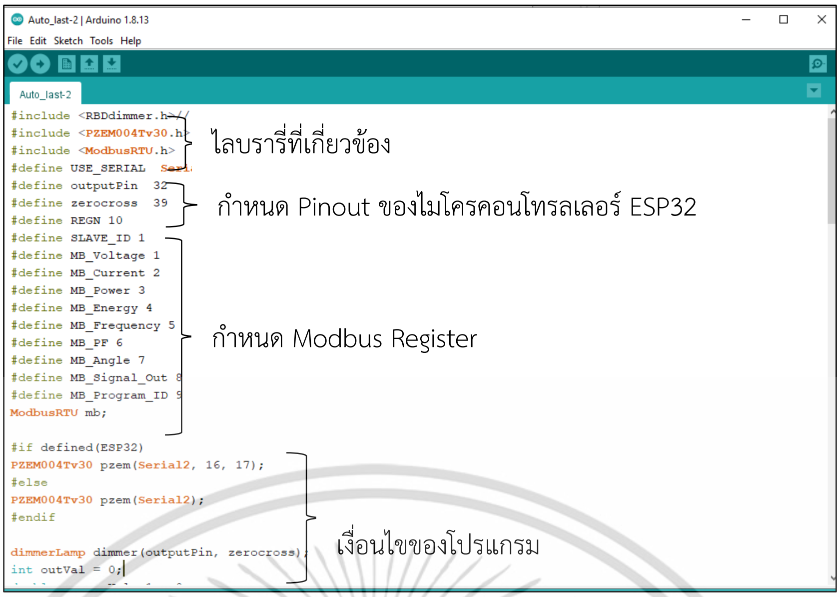
สัญญาณกระแสไฟฟ้าล้าหลัง (Lagging) แรงดันไฟฟ้าเล็กน้อย เนื่องจากโหลดที่เลือกใช้ในการทดสอบเป็นโหลดชนิดตัวต้านทานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 สัญญาณแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีโหลด

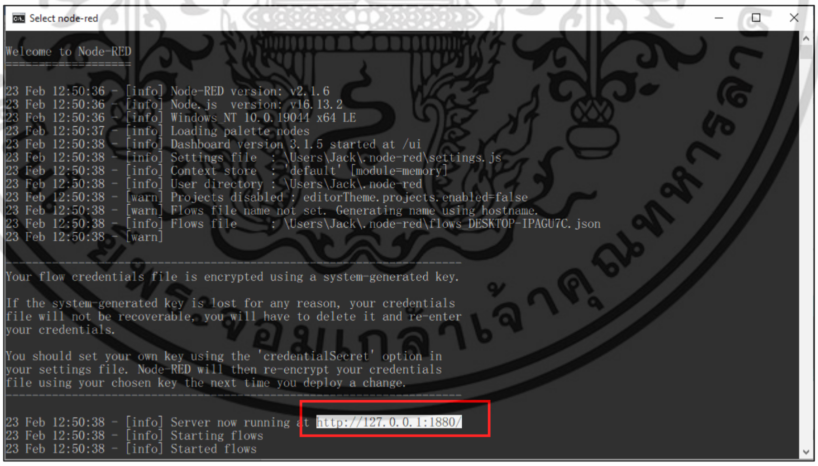
สำหรับการทดสอบเมื่อมีชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน ผู้วิจัยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีบนโปรแกรม Arduino Software (IDE) เพื่อใช้ในการควบคุมมุมจุดชนวนไตรแอก (Triac) ภายในชุดโมดูล AC Light Dimmer รวมถึงการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องจากโมดูลวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ PZEM–004T ดังรูปที่ 5.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.32 หน้าต่างโปรแกรม Arduino

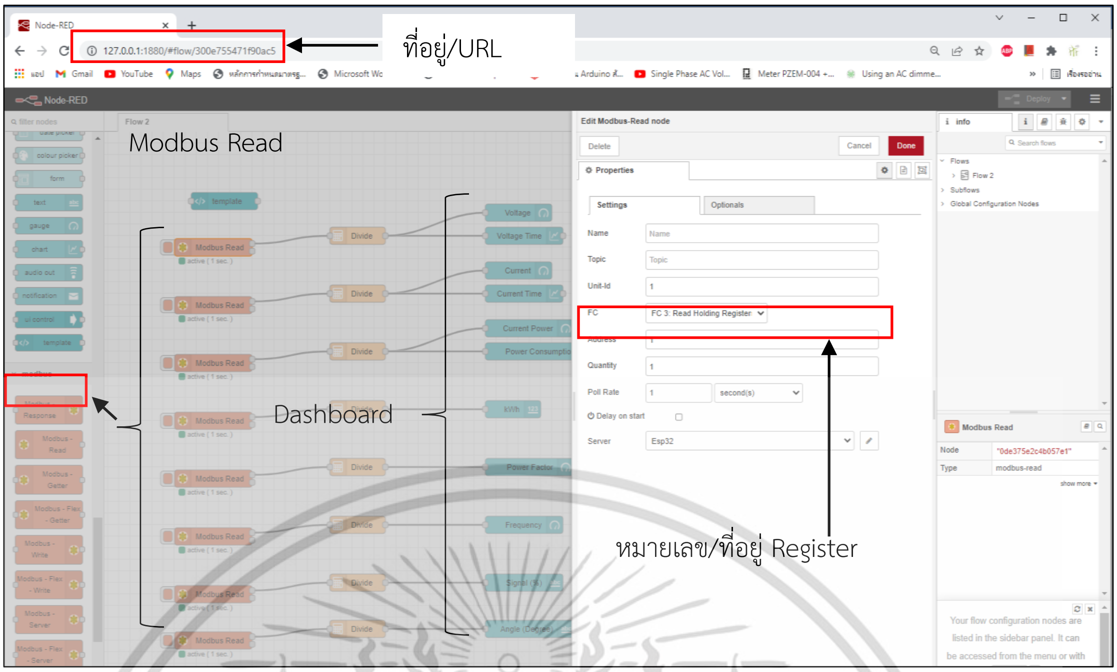
หลังจากเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานแล้วเสร็จ เราสามารถดูค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ถูกกำหนด Register ผ่านโปรแกรม Modbus Poll หรือสามารถดูได้จาก Node-red ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเรียกผ่าน Command Prompt จะได้ที่อยู่ http://127.0.0.1:1880/ ดังรูปที่ 5.33



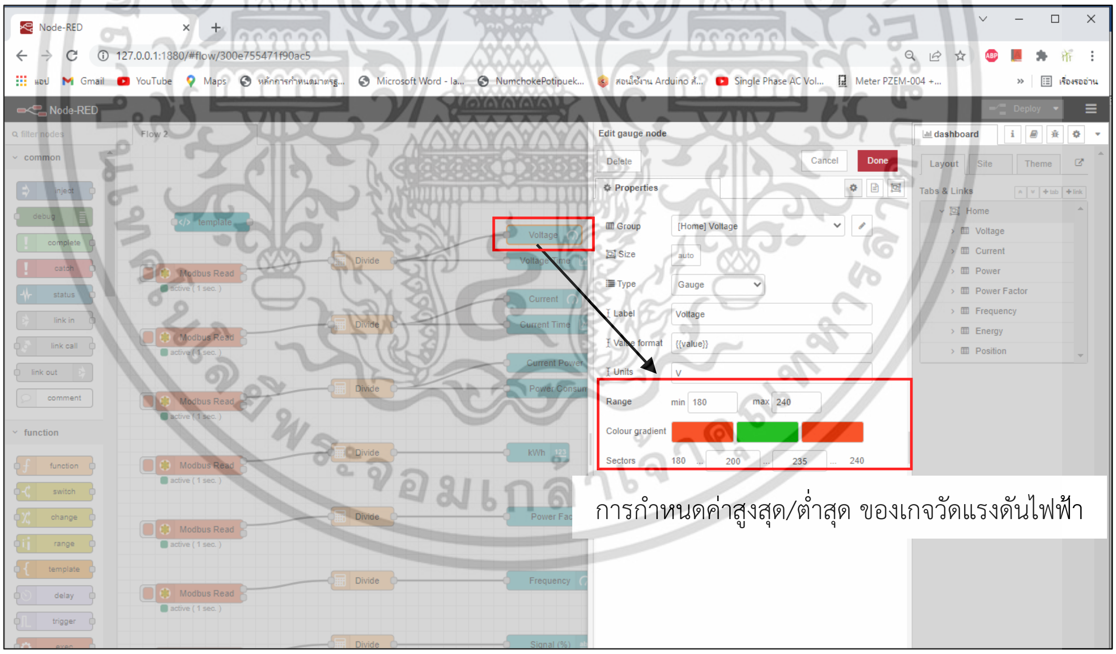
รูปที่ 5.33 ที่อยู่หรือ URL ของ Node-red

จากรูปที่ 5.33 เมื่อเราได้ที่อยู่หรือ URL ของ Node-red เพื่อใช้สำหรับการเข้าระบบจาก Command Prompt สามารถคัดลอกไปวางบนเว็บบราวเซอร์ และดึงบล็อกที่มีชื่อว่า Modbus Read มาวางบนหน้าต่างแสดงผล และใส่หมายเลข Register ที่ต้องการดังรูปที่ 5.34 และยังสามารถใช้ในการแสดงผล Dashboard ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น กราฟ เกจ หรือเวลา ดังรูปที่ 5.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



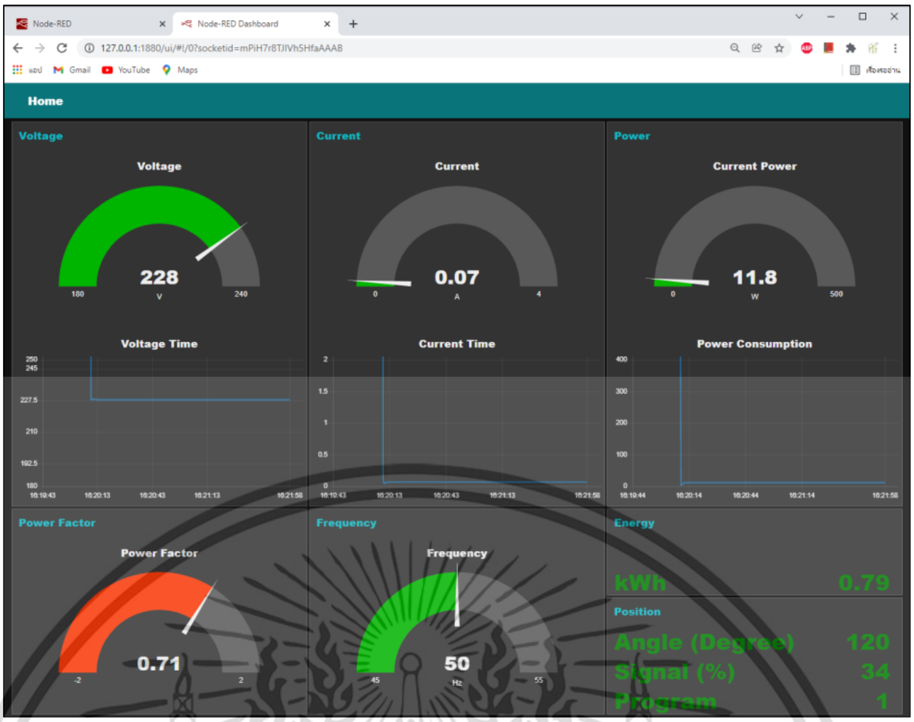
รูปที่ 5.34 วิธีการกรอกหมายเลข Modbus Register



รูปที่ 5.35 วิธีการกำหนดการแสดงผลของ Dashboard

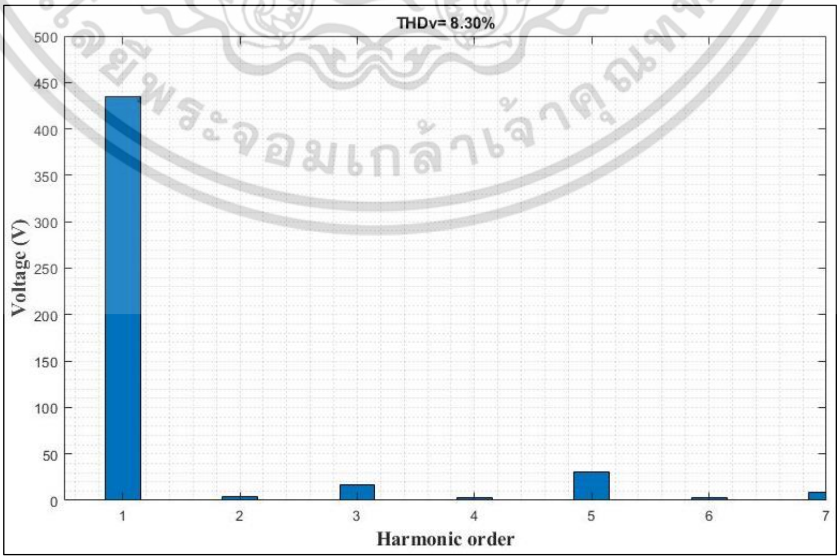
เมื่อทำการวาดส่วนแสดงผลหรือ Dashboard บนหน้าต่างของ Node-red ผู้ใช้งานสามารถแสดงผลการทำงานของโปรแกรมโดยกำหนดที่อยู่หรือ URL เพิ่มเติมจากเดิมด้วยการเพิ่มส่วนติดต่อระหว่างผู้ใช้กับระบบ (UI) จะได้ที่อยู่ใหม่ดังนี้ http://127.0.0.1:1880/ui ดังรูปที่ 5.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



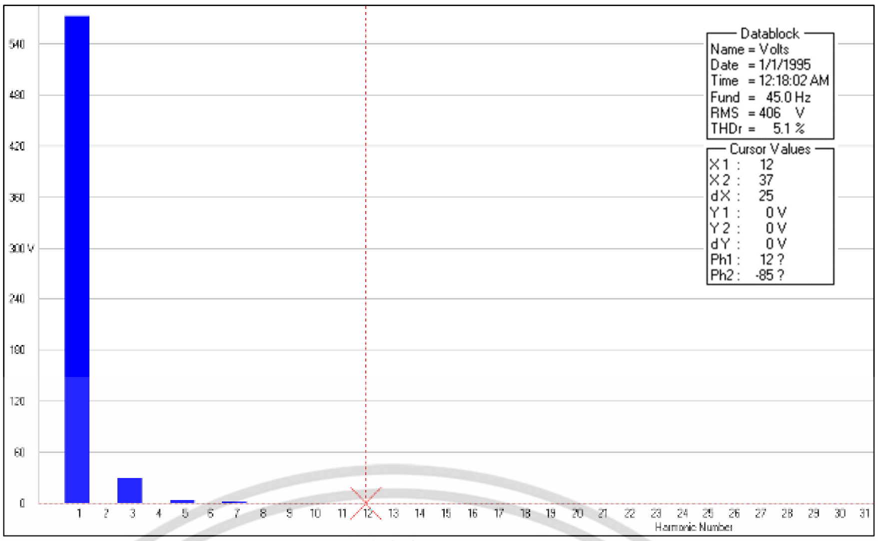
รูปที่ 5.36 Dashboard แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อมีโหลดและชุดชดเชย

การทดสอบสภาวะนี้ยังได้มีการทดสอบเพื่อหาค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้า (Total harmonic distortion : THDv) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีตัวชดเชยแบบสแตติกมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นประมาณ 5.10-8.15 เปอร์เซ็นต์ และเกินค่ามาตรฐานของความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ที่ 4-5 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 5.37-5.38



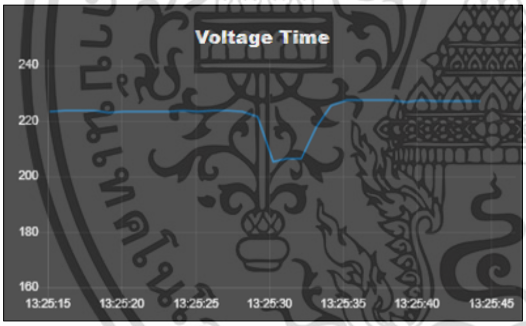
รูปที่ 5.37 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีชุดชดเชยจากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

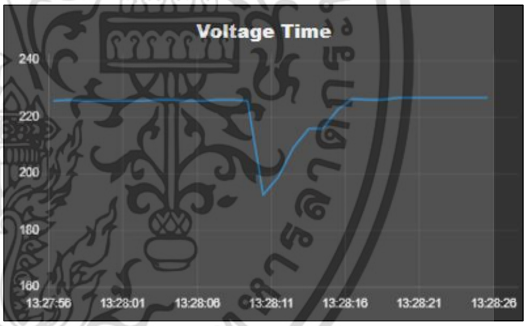


รูปที่ 5.38 ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีชุดชดเชยจากการทดสอบ

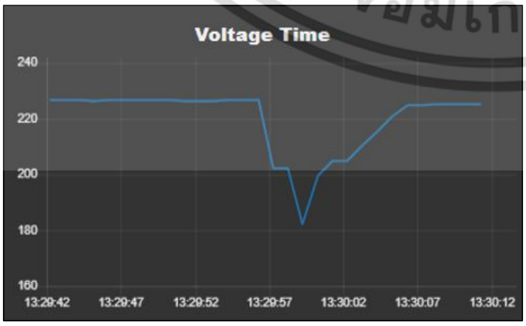
การตอบสนองของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงาน สามารถอธิบายโดยการใช้สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแสดงข้อมูลบน Dashboard ดังรูปที่ 5.39



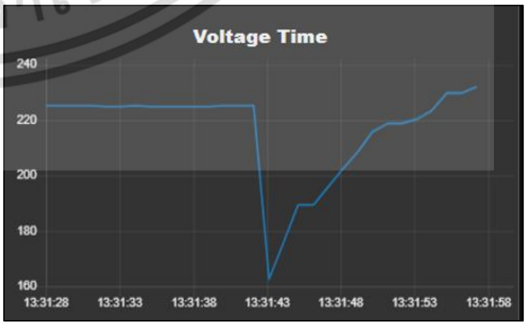
ก. แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 80 VA



ข. แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 150 VA



ค. แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 200 VA

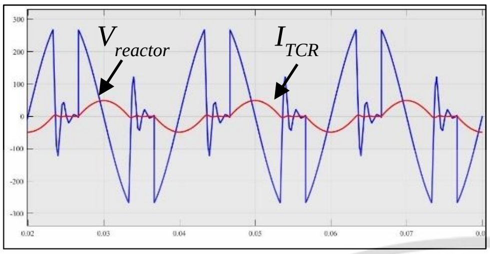


ง. แรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดขนาด 250 VA

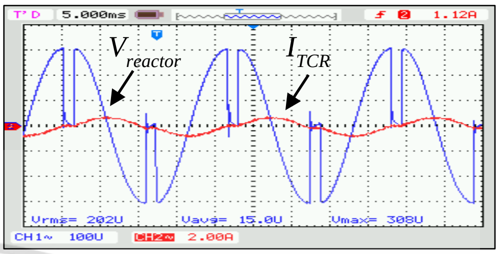
รูปที่ 5.39 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีโหลดและชุดชดเชยบน Dashboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

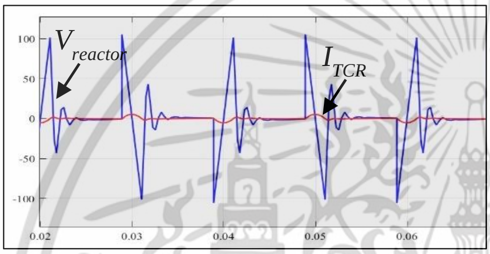
สัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์หรือตัวเหนี่ยวนำของชุดชดเชย และสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไตรแอก ทั้งการจำลองและการทดสอบที่ขนาดมุมจุดชนวนตั้งแต่ 120-160 องศา สามารถแสดงดังรูปที่ 5.40-5.41



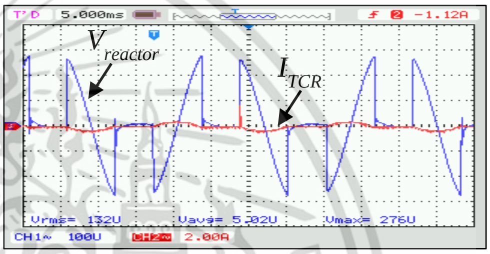
ก. การจำลองมุมจุดชนวน 120 องศา



ข. การทดสอบมุมจุดชนวน 120 องศา

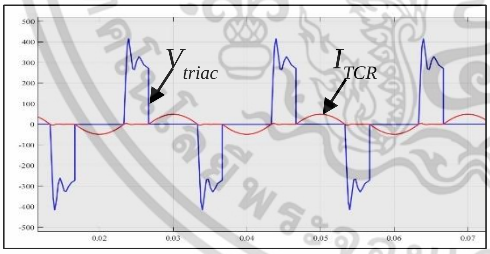


ค. การจำลองมุมจุดชนวน 160 องศา

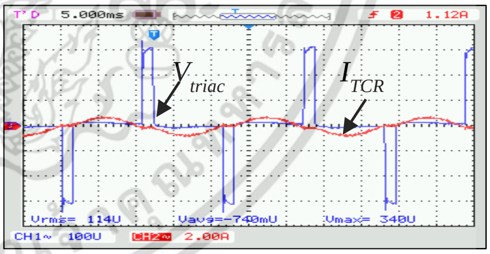


ง. การทดสอบมุมจุดชนวน 160 องศา

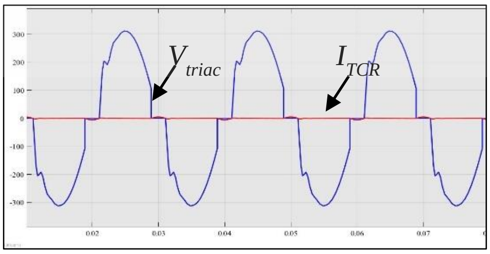
รูปที่ 5.40 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรีแอคเตอร์



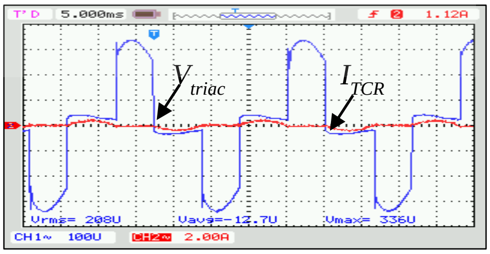
ก. การจำลองมุมจุดชนวน 120 องศา



ข. การทดสอบมุมจุดชนวน 120 องศา



ค. การจำลองมุมจุดชนวน 160 องศา

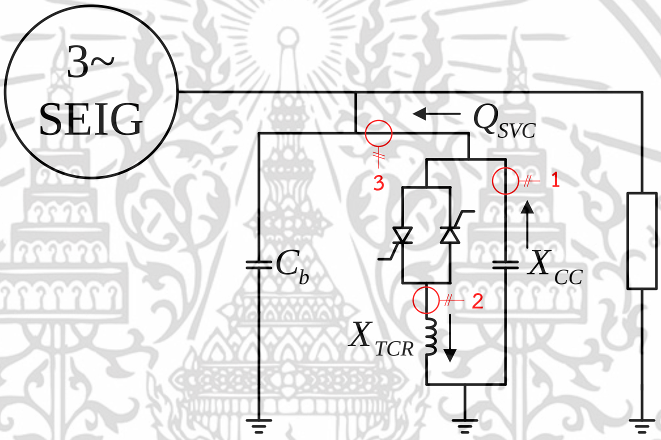


ง. การทดสอบมุมจุดชนวน 160 องศา

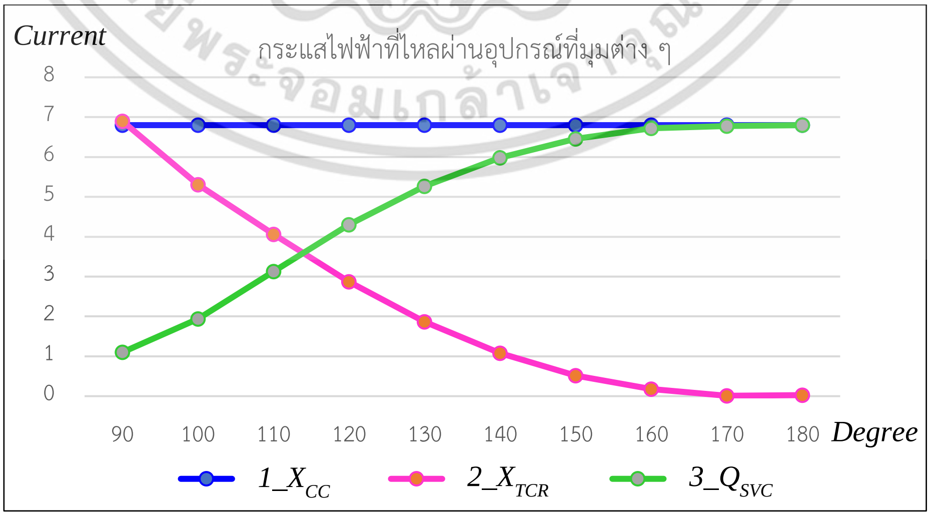
รูปที่ 5.41 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไตรแอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (FC-TCR) เมื่อมีการทำงานโดยการปรับมุมจุดชนวนตั้งแต่ 90-180 องศา ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าตรงกับทฤษฎีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก กล่าวคือเมื่อปรับมุมจุดชนวนของไตรแอกที่ 90 องศา กระแสไฟฟ้ารวม (หมายเลข 3) ที่เกิดขึ้นในวงจรจะมีค่าน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์ เนื่องจากสภาวะเรโซแนนซ์หรือในวงจรมีค่า $(X_L = X_C)$ แต่เมื่อมีการปรับมุมจุดชนวนให้มากกว่า 90 องศา กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (หมายเลข 2) จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่มุม 180 องศา ตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้ารวมของวงจรควบคุมกำลังเสมือนจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากความเหนี่ยวนำในวงจรลดลง สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีคงที่ตลอดเวลา (หมายเลข 1) ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนภาพ ระบุตำแหน่งของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.42-5.43



รูปที่ 5.42 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนจากการจำลอง



รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้ชุดควบคุมกำลังเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) เพื่อรักษาระดับแรงดันที่ขั้วให้คงที่ โดยอาศัยมุมจุดชนวนของไตรแอก ซึ่งมีการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจและสามารถรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ได้ โดยสามารถปรับมุมจุดชนวนตั้งแต่ 90-180 องศาและสามารถตอบสนองต่อโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงกะทันหันได้อย่างรวดเร็ว จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้พลังงานลมเป็นตัวต้นกำลังอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาและอุปสรรค รวมถึงการวิเคราะห์ผลการจำลองและทดสอบทั้งในสภาวะชั่วครู่ สภาวะคงตัว และสภาวะเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ที่นำได้เสนอทั้ง 3 เงื่อนไข และในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา รวมถึงการประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยด้านอื่น ๆ

6.1 สรุปผลการวิจัย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าขนาด 220-240 โวลต์ ความถี่ 48-51 Hz และมีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ โดยการควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการปรับมุมจุดชนวนของไตรแอกตั้งแต่ 90-180 องศา และสามารถตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว สามารถแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กตกค้างภายในโรเตอร์ที่เพียงพอ หรือมีตัวเก็บประจุที่เหมาะสมต่อเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ การสร้างแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น (Build up voltage) จาก 0-230V เข้าสู่สภาวะคงตัวจะใช้เวลาประมาณ 0.5-1 วินาที และค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฟ้า (THDv) ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองและผลการทดสอบทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ถ้ามีการต่อชุดชดเชยเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะสามารถลดค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า รวมถึงช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างกะทันกัน แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย กล่าวคือเมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้นในระบบ โดยเฉพาะโหลดตัวเหนี่ยวนำแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลง แต่เมื่อปลดหรือลดโหลดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเข้าสู่สภาวะปกติ โดยทั้งผลการจำลองและผลการทดสอบทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน

3. การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดโดยใช้ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติก (SVC) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมมุมจุดชนวนของไตรแอกตั้งแต่ 90-180 องศา ผลการทดสอบพบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถรักษาระดับแรงดันที่ขั้วได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

4. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟสร่วมกับชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถจ่ายโหลดได้ประมาณ 250 W หรือประมาณ 16.67 เปอร์เซ็นต์ จากพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่พิกัด 1.5 kW กระแสไฟฟ้า 3.4 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ทั้งการจำลองและการทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกันและเป็นไปตามทฤษฎี รวมถึงชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการควบคุมมุมจุดชนวนของไตรแอก สามารถชดเชยกำลังเสมือน ปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้สูงกว่า 0.93 และตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดได้อย่างรวดเร็ว โดยขึ้นอยู่กับการตั้งค่าความเร็วของหน่วยประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้งาน

6.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปลงจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยต่อตัวเก็บประจุให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งชุด ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้งานเครื่องจักรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบแรงดันแต่ละเฟสทุกเงื่อนไขการทำงาน เพื่อใช้เปรียบเทียบความแตกต่าง ทำให้แรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสเกิดสภาวะไม่สมดุล ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความสั่นสะเทือนเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว หรือมีโหลดในระบบสามารถสรุปปัญหาที่พบได้ดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Voltage Unbalance) เนื่องจากการทดสอบได้ทำการต่อตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งชุดเข้ากับเฟส B และ C ส่งผลให้แรงดันแต่ละเฟสมีความแตกต่าง โดยที่เฟสที่มีการต่อตัวเก็บประจุจะมีแรงดันที่สูงกว่าเฟสอื่น ๆ และจากความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้านั้นยังมีผลกระทบต่อความสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์เป็นอย่างมาก โดยเมื่อเกิดความไม่สมดุลทางไฟฟ้าเพียง 4-5 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้อุณหภูมิของมอเตอร์เพิ่มขึ้นถึง 25 เปอร์เซ็นต์ อาจส่งผลให้ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายหรืออายุการใช้งานสั้นลง

2. จากปัญหาแรงดันไม่สมดุลเนื่องจากการดัดแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้จ่ายโหลด 1 เฟส ยังส่งผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความสั่นสะเทือน และเมื่อมีโหลดในระบบจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสั่นสะเทือนมากกว่าปกติ

3. สภาวะไร้โหลดและไม่มีชุดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเชื่อมต่อที่เฟส A จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่เฟส B และ C มีค่าเกินพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน ๆ อาจส่งผลให้ขดลวดไหม้เสียหายได้

4. เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลด หรือปลดโหลดจะส่งผลให้ความเร็วรอบลดลงหรือเพิ่มขึ้นจากความเร็วพิกัด ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันของระบบสูงขึ้นหรือลดลงอย่างกะทันหัน ในบางครั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ เมื่อมีกำลังทางกลเข้ามากกว่าปกติเนื่องจากปัญหาทางด้านใด ๆ ก็แล้วแต่ อาจส่งผลให้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกินพิกัด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วของโรเตอร์ ยิ่งถ้าไม่มีการป้องกันอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสลิปภายในตัว ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีโหลดในระบบ แม้ว่าเราจะสามารถควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ก็ตาม กล่าวคือจะต้องควบคุมตัวต้นกำลังเพื่อให้ความถี่มีค่าคงที่ โดยการหมุนโรเตอร์ให้ความเร็วขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีโหลดในระบบ สำหรับชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR) สามารถประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมหรือสถานประกอบการณ์ได้ กล่าวคือเมื่อมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในระบบจะส่งผลให้ตัวประกอบกำลังของระบบลดลงบางครั้งอาจส่งผลให้โรงงานจ่ายค่าไฟในส่วนนี้ เนื่องจากตัวประกอบกำลังน้อยกว่าที่การไฟฟ้ากำหนด อย่างไรก็ตามในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปนั้นยังคงใช้การจ่ายตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบโดยตรง ส่งผลให้แรงดันในระบบอาจมีค่าสูงขึ้น หรือกำลังไฟฟ้าเสมือนมากกว่าปกติ แต่ถ้ามีการนำชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสแตติกมาใช้ จะช่วยให้ระบบสามารถควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนและแม่นยำกว่าระบบที่ใช้ในปัจจุบัน อย่างไรก็แล้วแต่เราสามารถเพิ่มชุดควบคุมเพิ่มเติมได้ดังนี้

1. ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่นำมาใช้ในการทดสอบสามารถจ่าย-รับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่อยู่ในช่วงการจ่ายโหลดให้กับระบบเท่านั้น เราสามารถประยุกต์การควบคุมตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่สูงกว่าปกติ โดยการใช้วงจรทีเอสซี (Thyristor Switched Capacitor: TSC)

2. ในบางครั้งโรงงานอุตสาหกรรมหรือสถานประกอบการณ์อื่น ๆ ที่ต้องควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่ระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง หรือแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ ยังสามารถใช้ Magnetic Contactor หรือ Circuit breaker ในการตัดต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ใช้ในการชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ถิรพุทธิ์ สัตยธรรม, **“การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองและการควบคุมแรงดันที่ขั้วด้วยตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบสติก”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555

[2] วุฒิชัย รอดพุ่ม, **“ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552

[3] พันรบ ชินบุตร, **“เทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยการใช้ตัวเก็บประจุ”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548

[4] สิรโรจน์ ใจขาน, **“แบบจำลองทางเวลาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552

[5] ประจวบ เอี่ยมสำอาง, **“การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองด้วยวิธีกรองแอคทีฟ”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

[6] ชวพร บำรุงพฤกษ์, **“การวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของแกนเหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำภายใต้การขับเคลื่อนด้วยแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์และ PWM อินเวอร์เตอร์”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549

[7] วัชริน ศรีรัตนาวิชัยกุล, **“การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบพีดับเบิลยูเอ็ม”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552

[8] รัฐไกร วัจนคุณอนันต์, **“การควบคุมกาลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง”**, วิทยานิพนธ์, (วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2556

[9] เสริมศักดิ์ ก.ศรีสุวรรณ และ พิชัย อารีย์, “การคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส”, **EECON 2018 – 41th Electrical Engineering Conference (EECON-41)**, Nov 2018. pp 61-64.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, **การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1**. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, กรุงเทพมหานคร : 2550.

[11] วีรเชษฐ์ ขันเงิน, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Power Electronics**. พิมพ์ครั้งที่ 9. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร : 2553.

[12] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, **การออกแบบระบบไฟฟ้า Electrical System Design**. พิมพ์ครั้งที่ 8. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร : 2563.

[13] M. Goboy Simoes, Felix A. Farret. **Renewable Energy System Design and Analysis with Induction Generator.** CRC Press LCC. Florida : 2004.

[14] B. Sawetsakulanond, V. Kinnares. “Investigation on the Behavior and Harmonic Voltage Distortion of Terminal Voltage by Static Var Compensators for a Three Phase Self-Excited Induction Generator.” **Power Electronics and Drive System, Bangkok, Thailand,** pp. 1313-1318, November 2007.

[15] T. Ahmed, O. Noro, E. Hiraki, and M. Nakaoka. “Terminal Voltage Regulation Characteristics by Static Var Compensator for a Three-Phase Self-Excited Induction Generator.” **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 40, no. 4, pp. 978-988, July/August 2005.

[16] S. S. Murthy, G. Bhuvaneswari, Sarsing Gao and Rajesh Kumar Ahuja. “Self Excited Induction Generator for Renewable Energy Applications to Supply Single-phase Loads in Remote Locations” **IEEE ICSET 2010**, 6-9 Dec 2010.

[17] S.N. Mahato, M.P. Sharma and S.P. Singh. “Transient Analysis of a Single-phase self-Excited Induction Generator using a Three-Phase Machine feeding Dynamic Load.” **IEEE Trans. Power Electron**, Vol 20, pp 711-803, Dec 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

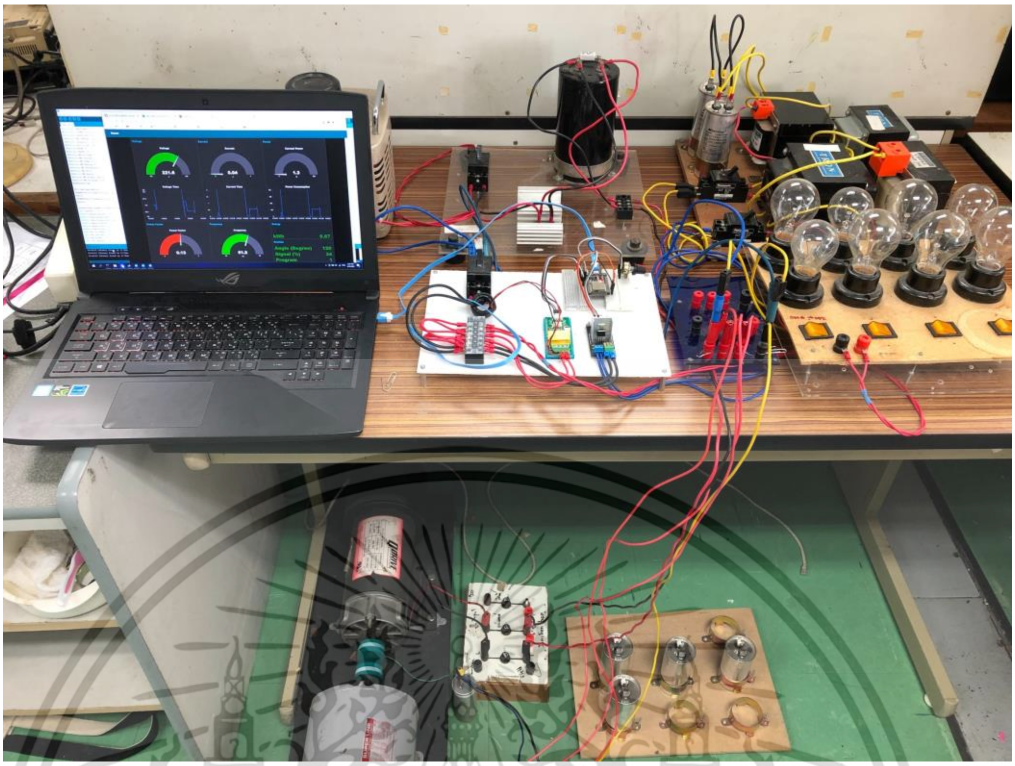
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

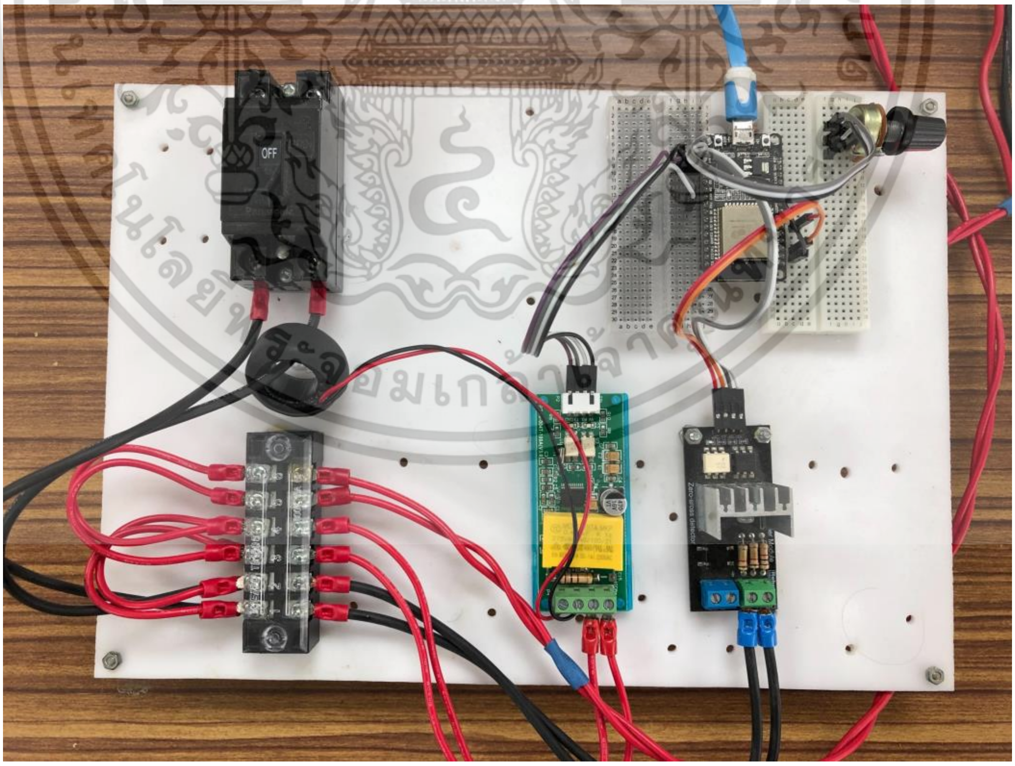
ภาคผนวก

ก. วงจรต้นแบบในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

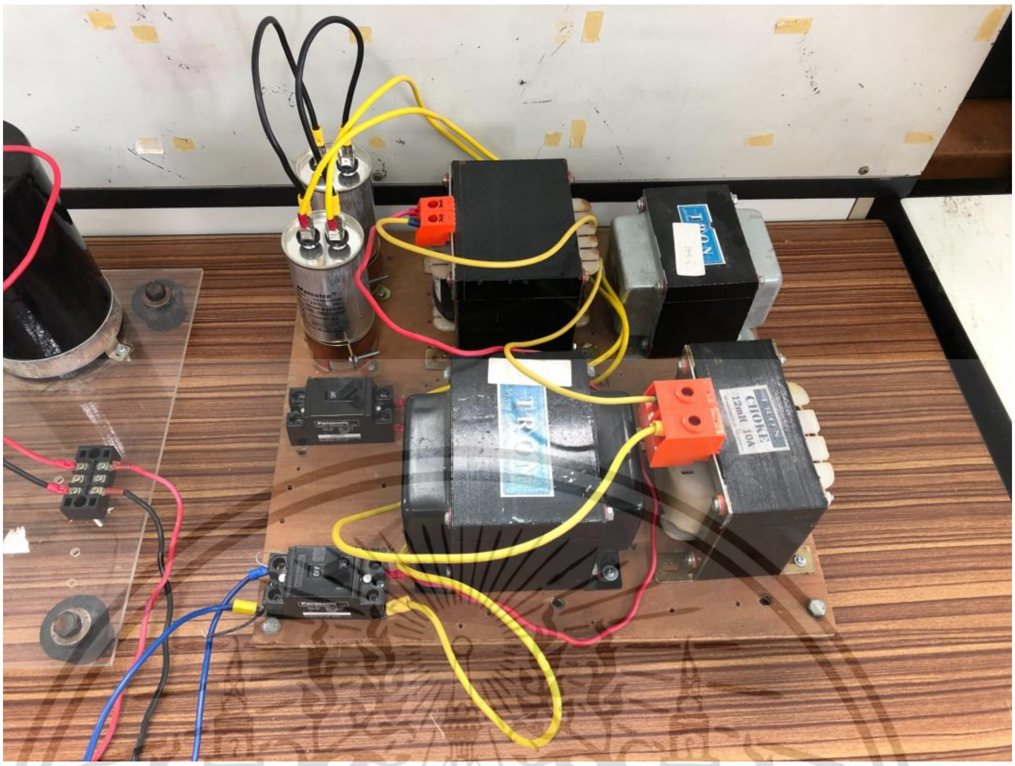


ก. วงจรต้นแบบในงานวิจัย

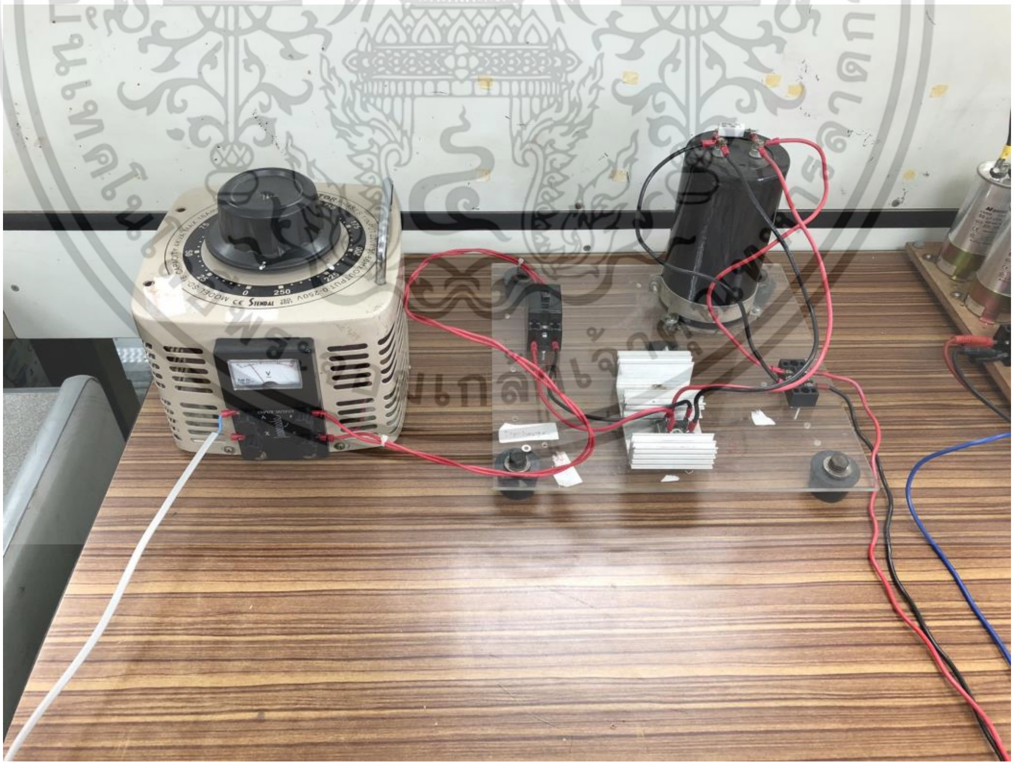


ข. ภาควงจรกำลังและวงจรควบคุมชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค. ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรีสเตอร์ควบคุมรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (FC-TCR)



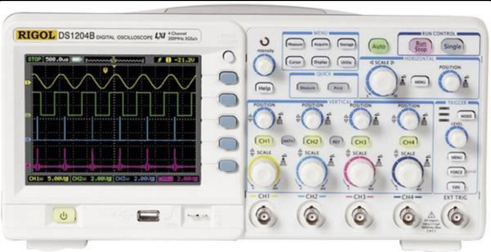
ง. วงจรควบคุมความเร็วรอบชุดต้นกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ข. เครื่องมือวัดในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัด	รายละเอียด
	Oscilloscope RIGOL รุ่น DS1104B
	Oscilloscope Hantek รุ่น DSO4084C
	Differential Voltage Probe YOKOGAWA รุ่น 700925
	Current Probe HP รุ่น 1146A
	Power Quality Analyzer FLUKE รุ่น 43B
	Digital Multimeter FLUKE รุ่น 115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ค. โปรแกรมควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 โปรแกรมควบคุมการทำงานแบบไม่อัตโนมัติ

```
#include <RBDdimmer.h>//
#include <PZEM004Tv30.h>
#define USE_SERIAL  Serial
#define outputPin  32
#define zerocross  39
#if defined(ESP32)
PZEM004Tv30 pzem(Serial2, 16, 17);
#else
PZEM004Tv30 pzem(Serial2);
#endif

dimmerLamp dimmer(outputPin, zerocross);
int outVal = 0;
double sensorValue1 = 0;
double analog_percent = 0;
double analog_percent_inv = 0;
double Angle_scale = 0;
double Angle_out = 0;
double analog_A0 = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  dimmer.begin(NORMAL_MODE, ON); //dimmer initialisation: name.begin(MODE,
STATE)
 }

void loop() {
    sensorValue1 = analogRead(A0);
  Serial.print("Custom Address:");
    Serial.println(pzem.readAddress(), HEX);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
float voltage = pzem.voltage();
float current = pzem.current();
float power = pzem.power();
float energy = pzem.energy();
float frequency = pzem.frequency();
float pf = pzem.pf();

if(isnan(voltage)){
    Serial.println("Error reading voltage");
} else if (isnan(current)) {
    Serial.println("Error reading current");
} else if (isnan(power)) {
    Serial.println("Error reading power");
} else if (isnan(energy)) {
    Serial.println("Error reading energy");
} else if (isnan(frequency)) {
    Serial.println("Error reading frequency");
} else if (isnan(pf)) {
    Serial.println("Error reading power factor");
} else {

    // Print the values to the Serial console
    Serial.print("Voltage: ");      Serial.print(voltage);      Serial.println("V");
    Serial.print("Current: ");      Serial.print(current);      Serial.println("A");
    Serial.print("Power: ");        Serial.print(power);        Serial.println("W");
    Serial.print("Energy: ");       Serial.print(energy,3);     Serial.println("kWh");
    Serial.print("Frequency: ");    Serial.print(frequency, 1); Serial.println("Hz");
    Serial.print("PF: ");           Serial.println(pf);
}

Serial.println();
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 analog_percent = map(sensorValue1, 0, 4095, 0, 100);
 analog_percent_inv = map(analog_percent, 0, 100, 100, 0);
 Angle_scale= map(analog_percent_inv, 0, 100, 180, 0);
 outVal = analog_percent_inv ; // output triac
 Angle_out = Angle_scale;
}
  Serial.print("INPUT Volt: ");
  Serial.println(analog_A0);
  Serial.print("Angle: ");
  Serial.println(Angle_out);
  Serial.print("%Signal Out: ");
  Serial.println(outVal);

  dimmer.setPower(outVal); // name.setPower(0%-100%)
  delay(200);
}
```

2 โปรแกรมควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ

```
#include <RBDdimmer.h>//
#include <PZEM004Tv30.h>
#include <ModbusRTU.h>
#define USE_SERIAL  Serial
#define outputPin  32
#define zerocross  39
#define REGN 10
#define SLAVE_ID 1
#define MB_Voltage 1
#define MB_Current 2
#define MB_Power 3
#define MB_Energy 4
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#define MB_Frequency 5
#define MB_PF 6
#define MB_Angle 7
#define MB_Signal_Out 8
#define MB_Program_ID 9
ModbusRTU mb;

#if defined(ESP32)
PZEM004Tv30 pzem(Serial2, 16, 17);
#else
PZEM004Tv30 pzem(Serial2);
#endif

dimmerLamp dimmer(outputPin, zerocross);
int outVal = 0;
double sensorValue1 = 0;
double analog_percent = 0;
double analog_percent_inv = 0;
double Angle_scale = 0;
double Angle_out = 0;
double analog_A0 = 0;
int Int_voltage = 0;
int Int_current = 0;
int Int_power = 0;
int Int_energy = 0;
int Int_frequency = 0;
int Int_pf = 0;
int Int_Angle_out = 0;
int Int_outVal = 0;
int program_id = 0;
float voltage = 0;
float current = 0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
float power = 0;
float energy = 0;
float frequency = 0;
float pf = 0;

void setup() {
  Serial.begin(19200, SERIAL_8N1);

  #if defined(ESP32) || defined(ESP8266)
  mb.begin(&Serial);
#else
  mb.begin(&Serial);
  //mb.begin(&Serial, RXTX_PIN);  //or use RX/TX direction control pin (if required)
  mb.setBaudrate(19200);
#endif
  mb.slave(1);
  mb.addHreg(MB_Voltage);
  mb.addHreg(MB_Current);
  mb.addHreg(MB_Power);
  mb.addHreg(MB_Energy);
  mb.addHreg(MB_Frequency);
  mb.addHreg(MB_PF);
  mb.addHreg(MB_Angle);
  mb.addHreg(MB_Signal_Out);
  mb.addHreg(MB_Program_ID);
  dimmer.begin(NORMAL_MODE, ON); //dimmer initialisation: name.begin(MODE,
STATE)
}
void loop()
{
  {
  sensorValue1 = analogRead(A0);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    voltage = pzem.voltage();
    current = pzem.current();
    power = pzem.power();
    energy = pzem.energy();
    frequency = pzem.frequency();
    pf = pzem.pf();

  if (voltage > 230 ) outVal = 37,program_id= 7;
  if (voltage > 200 and voltage < 230 ) outVal = 34,program_id =1;
  if (voltage < 220 and current < 0.3 ) outVal = 30,program_id= 2;
  if (voltage < 220 and (current > 0.3 and current < 0.6  )) outVal = 22,program_id= 3;
  if (voltage < 220 and (current > 0.6 and current < 0.9  )) outVal = 18,program_id= 4;
  if (voltage < 220 and (current > 0.9 and current < 1.2  )) outVal = 15,program_id= 5;
  if (voltage < 220 and (current > 1.2 and current < 2.5  )) outVal = 13,program_id= 6;
}

Int_voltage = voltage*100;
Int_current = current*100;
Int_power = power*100;
Int_energy = energy*100;
Int_frequency = frequency*100;
Int_pf = pf*100;
Angle_scale = map(outVal, 0,100,180,0);
Int_Angle_out = Angle_out;
Angle_out = Angle_scale;
Int_outVal = outVal*100;
mb.Hreg(MB_Voltage, Int_voltage);
mb.Hreg(MB_Current, Int_current);
mb.Hreg(MB_Power, Int_power);
mb.Hreg(MB_Energy, Int_energy);
mb.Hreg(MB_Frequency, Int_frequency);
mb.Hreg(MB_PF, Int_pf);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mb.Hreg(MB_Angle, Int_Angle_out);
mb.Hreg(MB_Signal_Out, Int_outVal);
mb.Hreg(MB_Program_ID, program_id);
dimmer.setPower(outVal); // name.setPower(0%-100%)

  mb.task();
  yield();
  ///delay(200);
  }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามไม่ให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 11
11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET2019)

การศึกษาสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส

Transient and Steady State Study of Three-phase Self-excited Induction Generator Operating as a single Induction Generator

ปริญญา มาโชติ วิจิตร กิณเรศ และ เฉลิมชาติ มานพ
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 02-326-4550 E-mail : parinya.machot@gmail.com, kkwijit@hotmail.com and kmchaler@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-excited Induction Generator : SEIG) เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส การทดสอบได้มีการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองระบบการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ บทความนี้ยังได้นำเสนอการเลือกตัวเก็บประจุที่เหมาะสม เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build up voltage) และศึกษาผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดหรือปลดโหลดออกจากระบบ และจากการศึกษายังได้ทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบ จากการศึกษาพบว่ากำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันให้คงที่ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดให้กับระบบ และช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส, กำลังไฟฟ้าเสมือน

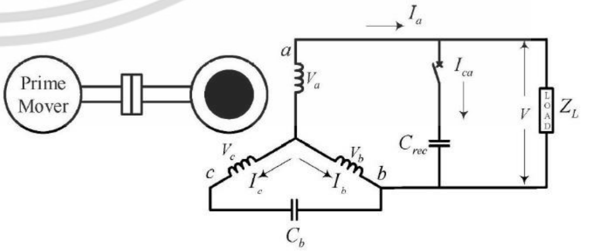
Abstract

This paper presents the results of the transient and steady state of three-phase Self-excited Induction Generator (SEIG) when operating as a single-phase generator. The analysis is comparison between model with Matlab/Simulink and experimental in the laboratory In this paper presents an approach to determine a suitable size of capacitor for building up voltage and studying the effects of changing voltages. When the generator supply to load or disconnect the system. And the study also supply reactive power to the system. From the study, it was found that can adjust the terminal voltage when the generator supply to load system. And can support the system to be stable, able to support changes in the load

Keywords: Three-phase Self-excited Induction Generator, Reactive Power

1. บทนำ

ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เพราะมีข้อดีในเรื่องขนาด ความแข็งแรงทนทาน เมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทอื่น ในบางครั้งถูกนำมาประยุกต์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [1] ในบทความนี้ได้นำเอาเครื่องจักรกลกระแสตรงที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้มาใช้ในการจำลอง เสมือนเป็นพลังงานลมโดยโครงสร้างจะประกอบไปด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ตัวขับต้นกำลัง ชุดโหลด และชุดตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในการสร้างแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



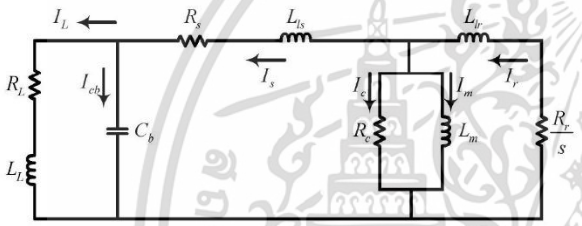
รูปที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสกับตัวเก็บประจุ 1 ชุด

2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำเป็นต้องมีตัวเก็บประจุ (C_b) ที่เหมาะสมค่าหนึ่งต่อเข้ากับขดลวดสเต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น [2] โดยปรากฏการณ์ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าสามารถอธิบายด้วยวงจรสมมูล ดังรูปที่ 2 ซึ่งก็คือเมื่อตัวต้นกำลังหมุนโรเตอร์ตัดกับขดลวดอาเมเจอร์ที่สเตเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าน้อยๆ ค่าหนึ่ง ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นก็จะไปตกคร่อมตัวเก็บประจุส่งผลให้เกิดกระแสต่อเนื่องจากตัวเก็บประจุ (I_c) ซึ่งกระแสในส่วนนี้ก็จะไปช่วยเพิ่มในส่วนของกระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ของส่วนกระตุ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าเป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build up voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง [2]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่สภาวะคงตัว

เมื่อ R_s คือความต้านทานขดลวดสเตเตอร์
L_{ls} คือความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
R_r คือความต้านทานขดลวดโรเตอร์
L_{lr} คือความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านโรเตอร์
R_c คือความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก
L_m คือความเหนี่ยวนำร่วม
C_b คือขนาดของตัวเก็บประจุ
R_L คือความต้านทานของโหลด
L_L คือความเหนี่ยวนำของโหลด

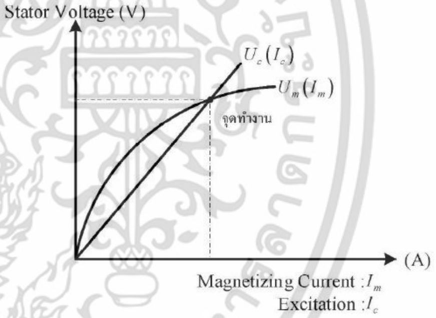
สำหรับกระบวนการกระตุ้นตัวเอง (Self-excitation) นั้นจะต้องมีตัวเก็บประจุที่เหมาะสมค่าหนึ่งต่อเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [3] อย่างไรก็ตามเราใช้ตัวเก็บประจุนี้เพื่อสร้างกระบวนการกระตุ้นตัวเองในสภาวะไร้โหลดเป็นหลัก หรืออิมพีแดนซ์โหลดมีค่าเป็นอนันต์ ($R_L + j\omega L_L = \infty$) ดังนั้นจึงทำให้กระแสสเตเตอร์เท่ากับกระแสตัวเก็บประจุ ($I_s = I_{cb}$) และค่าสลิป (S) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ในกรณีนี้เราไม่คิดความต้านทานสูญเสียในแกนเหล็ก (R_c) โดยที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ (R_s) รวมกับแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์ (L_{ls}) และความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) ดังสมการที่ 1

$$I_{cb}\left(\frac{-j}{\omega C}\right) = -I_s\left[R_s + j\omega\left(L_{ls} + L_m\right)\right] \quad (1)$$

และเนื่องจาก $I_s = I_{cb}$ และตัวเก็บประจุได้เชื่อมต่อระหว่างเฟส b และ c ทำให้ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดสองเท่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนจินตภาพของสมการที่ 1 จะได้

$$C = \frac{1}{\omega^2 + \left(L_{ls} + L_m\right)} \times 2 \quad (2)$$

เมื่อเราใช้ค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้จากสมการที่ (2) จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะที่ ($I_m = I_c$) เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของ (L_m) สภาวะนี้ก็คือบริเวณจุดตัดระหว่าง Magnetization Curve ($U_m - I_m$) กับความสัมพันธ์แรงดัน-กระแสของตัวเก็บประจุ ($U_c - I_c$) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

3. การจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

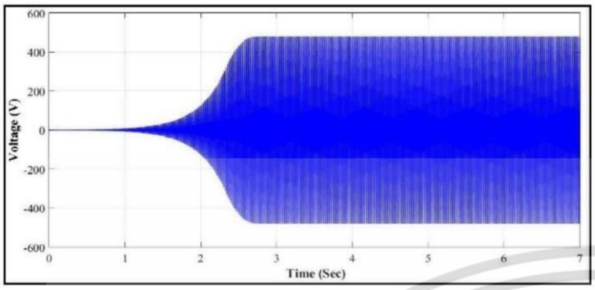
ในบทความนี้ใช้ DC Motor เป็นชุดต้นกำลัง เพื่อใช้ในการจำลองแทนพลังงานลมขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และใช้ตัวเก็บประจุขนาด 50 μF ต่อวงจรดังรูปที่ 1 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในหน่วยโอห์ม

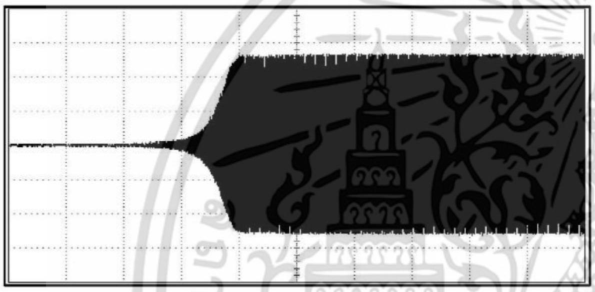
พิกัด (kW)	R_s	X_s	R_r	X_r	R_c	X_m
1.5	4.87	5.03	3.40	5.03	859.38	120.57

โดยเพิ่มความเร็วตั้งแต่ 0 – 1,500 รอบต่อนาที พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำค่อยๆ เพิ่มจากศูนย์จนถึงสภาวะคงตัวดังรูปที่ 4 และ 5

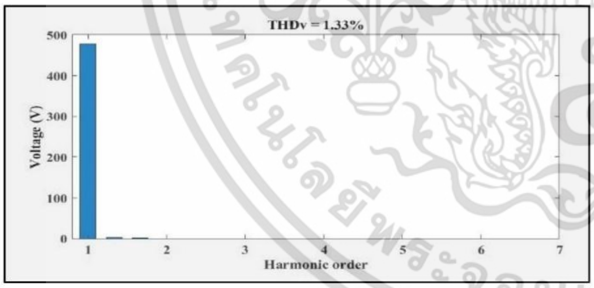
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าจากการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink



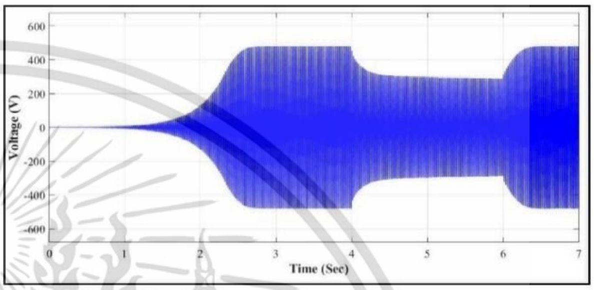
รูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



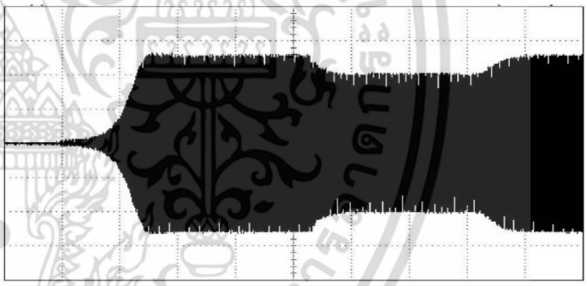
รูปที่ 6 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม [4] ภายใต้การเชื่อมต่อขดลวดแบบ Star (Y) แรงดันที่สร้างออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเหมือนกับแรงดันของระบบสามเฟส เนื่องจากเป็นแรงดันระคร่อมระหว่างขดลวด 2 ชุด จำเป็นต้องแปลงระดับแรงดันให้เหมาะสมกับโหลดประเภทหนึ่งเฟส ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการทำงานในโหมดนี้

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลดเมื่อเวลาวินาทีที่ 5 เป็นต้นไปโดยใช้โหลดตัวต้านทานขนาด 80 Ω อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 200 mH สังเกตได้ว่าแรงดันของระบบจะตกลงจากจุดเดิม เนื่องจากโหลดที่มีค่าเหนี่ยวนำ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเองก็จำเป็นต้องอาศัยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากตัวเก็บประจุในการสร้างฟลักซ์และแรงดัน ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงไม่สามารถจ่ายกำลังเสมือนไปยังโหลดได้ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูง และเมื่อปลดโหลดเมื่อวินาทีที่ 6 เป็นต้นไป แรงดันของระบบก็จะเข้าสู่สภาวะเดิม ดังรูปที่ 7 และ 8

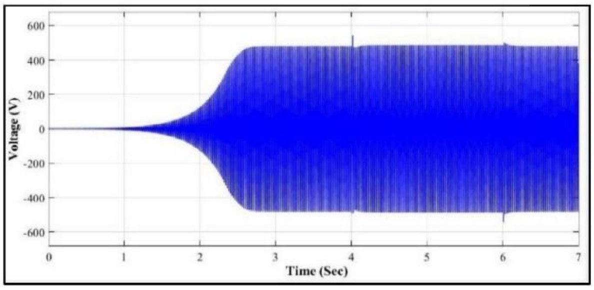


รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าจากการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดและปลดโหลด



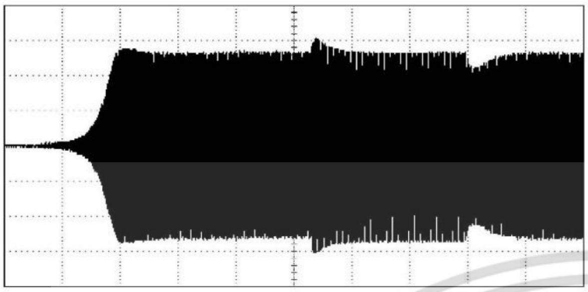
รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดและปลดโหลด

เมื่อทำการจ่ายกำลังเสมือนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเวลาวินาทีที่ 5 และปลดออกจากระบบเมื่อวินาทีที่ 6 พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ดังรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าจากการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังเสมือนเมื่อจ่ายโหลดและปลดโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังเสมือนเมื่อจ่ายโหลดและปลดโหลด

สามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3

$$X_c = \frac{V^2}{Q} \tag{3}$$

4. สรุป

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จำลองระบบการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีการเปรียบเทียบผลการจำลองที่สภาวะแตกต่างกัน ผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี แต่ระบบยังไม่มีความเสถียรในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดแรงดันในระบบก็จะแปรผัน ซึ่งในงานวิจัยต่อไปจะนำเสนอแนวทางการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยระบบ Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR) และนำระบบควบคุมแรงดันและป้อนกลับอัตโนมัติ เพื่อที่จะช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่คงที่ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความมนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ (PMC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนบทความนี้จนประสบผลสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] ถิรพุทธิ์ สัตยธรรม, วิจิตร กิณเรศ, “การวิเคราะห์ภาวะชั่วครู่และภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,* ปีที่ 22, ฉบับที่ 2, หน้า 285 – 294, พฤษภาคม - สิงหาคม 2555

[2] วุฒิชัย รอดพุ่ม, “ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.” *วิทยานิพนธ์ฉบับปีการศึกษา 2552*, บัณฑิตวิทยาลัย สจล.

[3] ประจวบ เอี่ยมสำอาง, “การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองด้วยวงจรกรองแอคทีฟ.”*วิทยานิพนธ์ฉบับปีการศึกษา 2546*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[4] S. S. Murthy, G. Bhuvaneswari, Sarsing Gao and Rajesh Kumar Ahuja, “Self Excited Induction Generator for Renewable Energy Applications to Supply Single-phase Loads in Remote Locations.” *IEEE ICSET 2010,* 2010.

นายปริญญา มาโชติ สำเร็จการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา (วศ.ม.) ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ECTI-CON 2021 – *Smart Electrical Systems & Technology*

2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) | 978-1-6654-0382-5/20/$31.00 ©2021 IEEE | DOI: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454845

Study of Three-phase Self-excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator Supplying Non-linear Load

Panurak Nakorn
Electrical Engineering Dept.
School of Engineering.
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kheabvioza@gmail.com

Parinya Machot
Electrical Engineering Dept.
School of Engineering.
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
parinya.machot@gmail.com

Vijit Kinnares
Electrical Engineering Dept.
School of Engineering.
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kkwijit@hotmail.com

Chalermchat Manop
Electrical Engineering Dept.
School of Engineering.
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kmchaler@hotmail.com

***Abstract*— This paper presents the operating study of three-phase to single-phase for a self-excited induction generator (SEIG). The Simulation model is analyzed by using Matlab/Simulink for explaining behavior or effect of this model, when the SEIG supplies power to loads under various conditions such as startup, dynamic response, steady state, on load, linear load and non-linear load. The study proposes appropriate capacitor for building up voltage. From the study, it is found that additional reactive power supplied to the load system is needed for maintaining terminal voltage.**

Keywords— Induction generator, Self-excited, Non-linear load, Self-excited induction generator (SEIG)

I. Introduction

The increasing need of energy, environmental concerns, reduction of existing crude oil and natural gas and the high cost of delivering power to remote area in many developing and underdeveloped countries need for solutions of development. Presently a three-phase induction motor is popular in industrial applications such as chiller, fan, conveyer and pump etc. Because of smaller size, more ruggedness, more durability and lower maintenance cost than others [1]. But mostly electrical appliance for household use single-phase supply. Sometimes the three-phase induction motor can be used to be a single-phase induction generator as a self-excited generator (SEIG) for stand alone applications for rural areas where most of home appliances are supplied by single-phase system.

This paper will focus on the study of the behavior of the proposed SEIG modified from an existing three-phase squirrel cage induction generator under various conditions such startup, steady state, on load, linear and nonlinear loads. Various capacitances for voltage build up and voltage regulation are used to investigate performance of the proposed SEIG. Research results can be used for development of the prime energy system.

II. Prosed SEIG

The three-phase to single-phase induction motor can be made to operate as a self-excited generator, when the rotor is driven by a prime mover at suitable speed. The excitation is provided by connecting a capacitor bank at the stator terminal for build-up voltage in Fig. 1.

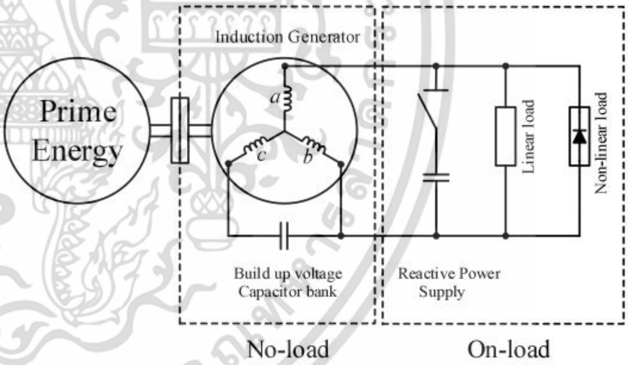


Fig. 1. The proposed SEIG of single-phase operation.

The SEIG needs the capacitor at stator terminal for build magnetic field to generate voltage. The equivalent circuit is shown in Fig. 2. When the rotor cuts off the magnetic field on the stator winding to create a magnetic field at the rotor, it intersects with the stator winding, causing the voltage across the capacitor (V_t) to be a continuous current to collect at capacitor current (I_{cb}). So the current from the capacitor for the auxiliary magnetic field (I_m) of the self-exited part of the induction generator is added to the voltage at the stator terminal, this is called the voltage Build up of SEIG [2-4].

978-0-7381-1127-8/21/$31.00 ©2021 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Authorized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on July 29,2021 at 05:54:07 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

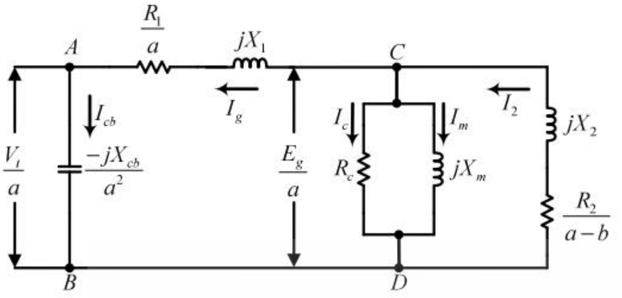


Fig. 2. Equivalent circuit of the SEIG

where

R_1	is resistance of stater coil
jX_1	is reactance leak of stater side
R_2	is resistance of rotor
jX_2	is reactance leak of rotor side
R_c	is resistance of coil loss
jX_m	is reactance of magnetic field
$-jX_{cb}$	is reactance of capacitor

The process of build-up voltage at no-load can be determined as impedance is infinity ($R_L+j\omega X_L=\infty$). Therefore the stator current equals current of a capacitor ($I_g = I_{cb}$) and a slip (s) of the induction generator is almost zero. By neglecting core loss resistance (R_c) the relation between voltage across capacitor and voltage drop at stator coil (R_1), voltage drop at leakage reactance of stator side (jX_1) and reactance of magnetic field (jX_m) can be determined as Eq.1.

$$I_{cb}(-jX_{cb})=-I_q[R_1+j(X_1+X_m)] \quad (1)$$

According to Eq.1, at no-load, $I_{cb} = I_g$ and capacitor connected between A and B in Fig.2 must have capacitor value in 2 times. When discuss especially imaginary part, we can obtain C_{base} as

$$jX_{cb} = j(X_1+X_m)x2 \quad (2)$$

$$C_{base} = \frac{1}{2\pi f(jX_{cb})} \quad (3)$$

where

C_{base} is build-up capacitor value

The capacitor value can be achieved from Eq3. It will be working point of SEIG ($I_m = I_c$). The magnetization curve crossing of non-linear of (jX_m) and linear of ($-jX_{cb}$) is shown in Fig. 4.

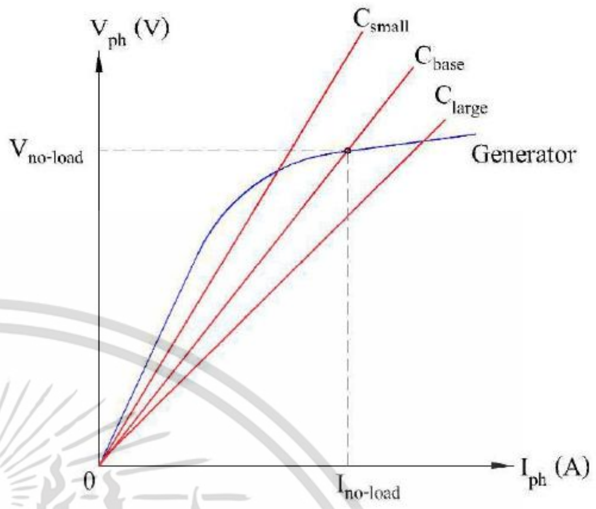


Fig. 4. The working point of build-up voltage of SEIG.

The capacitance of a capacitor has the effect on steady state voltage on the relationship between the magnetization curve and voltage-current characteristic of the capacitor in Fig. 4.

The build-up voltage can be generated by C_{base}. To generate more voltage, the capacitance increases to C_{large}. And less voltage can be generated with a small capacitance value C_{small} [6].

III. Simulation Model

This paper proposes simulation model of the proposed SEIG. It consists of mechanical energy input for constant speed, the proposed SEIG, build-up capacitor, additional capacitors for supplying reactive power for voltage regulation. Linear and nonlinear loads. The parameters of the machine are illustrated in Table I. The proposed single-phase SEIG is modified from a 1.5kW , 4P, 220 / 380V 6.0 / 3.5A delta / star type connection, three-phase squirrel cage induction machine. Various conditions such as start up with various capacitances, no load and on load conditions, linear and nonlinear load conditions have been conducted in order to observe the behavior of the proposed SEIG.

TABLE I. Parameter of Machine

Rated	R_1	R_2	R_c	X_1	X_2	X_m
1.5 kW	4.87 Ω	5.03 Ω	3.40 Ω	5.03 Ω	859.38 Ω	120.57 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Authorized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on July 29,2021 at 05:54:07 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

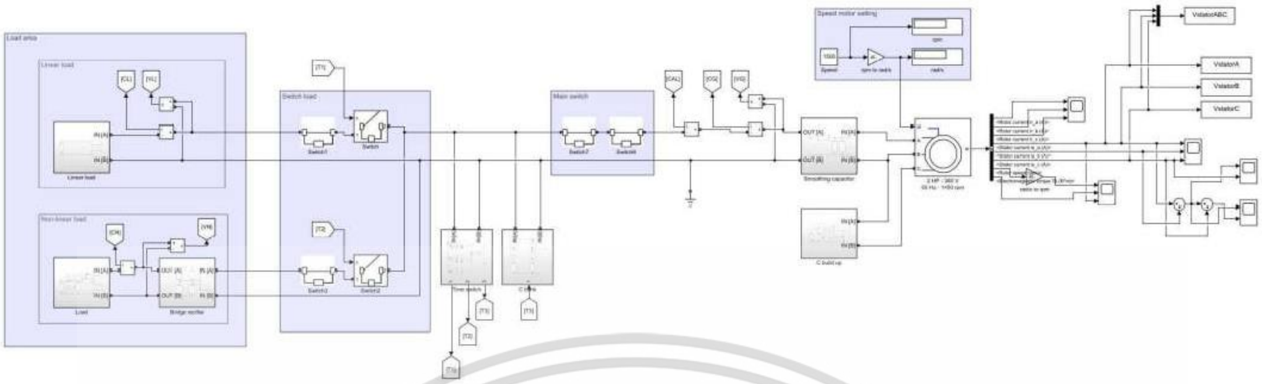


Fig. 4. Simulation model of SEIG.

IV. Results and Discussion Ease of Use

A. Startup Performance

At constant speed of 1500 rpm, the terminal voltages for two capacitor values are built-up from 0 V to steady state as shown in Fig 5. The high value of the capacitor (60 µF) offers faster build up process but too high terminal voltage.

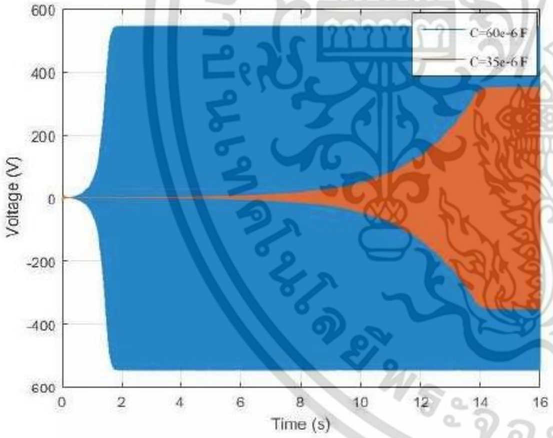


Fig. 5. Voltage build-up with 35 and 60 µF capacitors.

However appropriate capacitor to build-up appropriate voltage is 35 µF but longer time to build voltage to steady state at 325 V_{peak} or 249 V_{rms}. Note that in case of the capacitor value lower than 35 µF, it cannot successful build-up voltage because current for creating magnetic field is not enough.

B. The Non-linear Load of SEIG Model

Simulations and tests to study behavior have been conducted , when the SEIG has constant speed at 1,500 rpm, 35 µF and 60 µF capacitors of build-up to reduce time to steady state, on-off linear load of resistor (R_L = 100 Ω) and inductor (L_L = 20 mH) and non-linear load of resistor (R_{NL} = 2500 Ω) and capacitor (C_{NL} = 1000 µF) in a single-phase full bridge rectifier circuit. The simulation results are shown in Figs. 6-7.

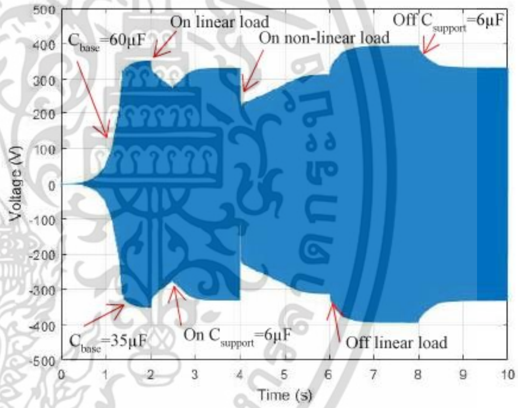


Fig. 6. Voltage of SEIG when connecting linear and non-linear loads.

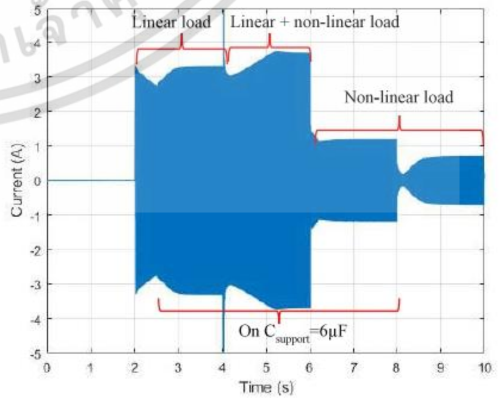


Fig. 7. Current of SEIG when connecting linear and non-linear load.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Authorized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on July 29,2021 at 05:54:07 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

Initially, at no-load, build-up voltage capacitor with 60 µF is used for reduced time to generate voltage between 0 to 1.5 sec. Then the capacitor value is switched to 35 µF for adjusting appropriate voltage at steady state of a single-phase system. At t = 2 sec. linear is connected, the voltage will be decreased since the linear load draws reactive power but SEIG does not provide enough. Note that the reactive power from build-up capacitor serves to create magnetic field for SEIG only in Figs. 6-7.

Therefore, the additional capacitor is required to support reactive load at t = 2.5 sec. As a consequence the voltage is recovered. At t = 4 sec., when connected together with non-linear load, the voltage will be instant reduced but return to normally at t = 5 sec. At t = 6 sec., the linear load is disconnected from the system, the voltage will be increased because the reactive power from $C_{support}$ being to transfer to the SEIG. At t = 8 sec. $C_{support}$ is disconnected there is only non-linear load left. The voltage will be decreased to almost value of steady state. However the non-linear load injects harmonics in system affecting power quality of voltage as shown in Figs. 8-9.

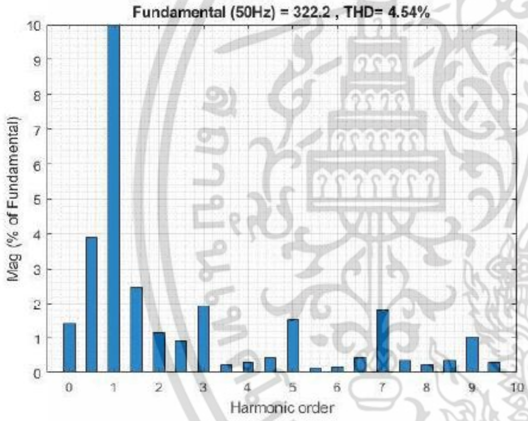


Fig. 8. THDv of linear and non-linear loads.

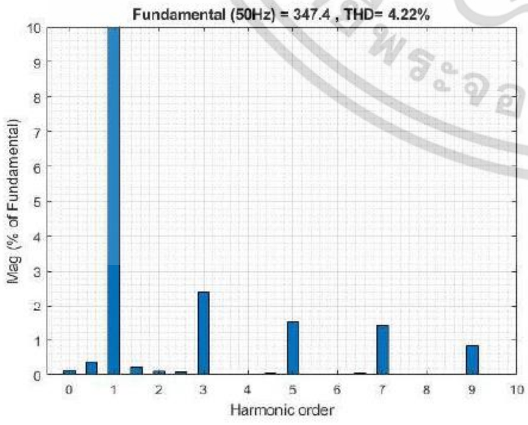


Fig. 9. THDv of only non-linear load.

V. CONCLUSINE

The paper has shown the simulation results of a three-phase induction generator operating as a single-phase induction generator. Various operating conditions have been investigated. The build up capacitor and additional capacitor for reactive compensation are considered. The behavior and effect from harmonics due to nonlinear load and a change in voltage as the load changes, which supports single-phase electrical appliances are studied. Although the SEIG has capacitor for voltage build-up, when connected with loads, the reactive power is not enough. Harmonics associated eith non linear load may cause additional power loss of the SEIG.

REFERENCES

[1] G. Raina and O.P. Malik, "Wind Energy using A Self-Excited Induction Generator," IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.PAS -102, No.12, pp.3933-3936, December 1983.

[2] B. Sawetsakulanond, V. Kinnares, "A simple Approach to Capacitance Determination of Self-Exited Induction Generators for Terminal Voltage Regulation," in Proc. Power Electronics and Drive System, Bangkok, Thailand., pp.1319-1324, November 2007.

[3] B. Sawetsakulanond, V. Kinnares, "Analysis and Comparative Study on the Performance between Standard and High Efficiency Induction Machines operating as Self - Excited Induction Generators," in Proc. Power Electronics and Drive System, Bangkok, Thailand., pp.1313-1318, November 2007.

[4] B. Sawetsakulanond, V. Kinnares, "Investigation on the Behavior and Harmonic Voltage Distortion of Terminal Voltage Regulation by Static Var Compensators for a Three Phase Self-Exited Induction Generator," in Proc. Power Electronics and Drive System, Bangkok, Thailand., pp.483-488, November 2008.

[5] S. S. Murthy, G. Bhuvaneswari, Sarsing Gao and Rajesh Kumar Ahuja, "Self Excited Induction Generator for Renewable Energy Applications to Supply Single-phase Loads in Remote Locations." IEEE ICSET 2010, 2010.

[6] Khaled S. Sakkoury, Safaa Emara, Mohammed Kamal Ahmed, "Analysis of wind driven self-excited induction generator supplying isolated DC loads." Journal of Electrical Systems and Information Technology 4 (2017), 257–268.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Authorized licensed use limited to: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet. Downloaded on July 29,2021 at 05:54:07 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล นายปริญญา มาโชติ

E-mail 61601102@kmitl.ac.th
parinya.machot@gmail.com

วัน เดือน ปีเกิด 20 สิงหาคม 2534

ที่อยู่ 88/68 คอนโด Life Pinklao ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงบางยี่ขัน เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร 10700 โทรศัพท์ 082-246-9153

มัธยมศึกษา โรงเรียนผดุงนารี ถนนนาควิชัย ตำบลตลาด อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150

ปริญญาตรี สำเร็จหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง พ.ศ. 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2564-ปัจจุบัน	Power Supply Engineer - PSY (Monorail) บริษัท อัลสตอม (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ.2563-2564	Electrical Project Engineer บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน)
พ.ศ.2560-2563	Electrical Project Engineer บริษัท ยูนิเวอร์แซล ยูทีลิตี้ส์ จำกัด (มหาชน)
พ.ศ.2557-2560	Field Service Engineer บริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด

ผลงานวิจัย พ.ศ.2562 - **การศึกษาสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งเฟส**, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 11 (The 11th Conference of Electrical Engineering Network 2019: EENET 2019).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2564 - **Study of Three-phase Self-excited Induction Generator Operating as Single-phase Induction Generator Supplying Non-linear Load,** 2021 IEEE 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2021), Chiang Mai, Thailand , 19-22 May 2021.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้