

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับ  
การประยุกต์ใช้กับพลังงานลม

Three-Phase Self-Excited Induction Generator for Wind Energy Application



T119556



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 119556  
วัน,เดือน,ปี..... 8 S.A. 2554

119556  
b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับ  
การประยุกต์ใช้กับพลังงานลม

Three-Phase Self-Excited Induction Generator for Wind Energy Application



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองสำหรับการประยุกต์ใช้กับ  
พลังงานลม

ผู้จัดทำ



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง สำหรับการประยุกต์ใช้กับพลังงานลม

นาย จิรายุ เจริญตั้งสินชัย

นาย ธีรัฐดนัย ชะนะพะเนาวิ

นาย ธีรัฐพล วงศ์เควัน

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

## บทคัดย่อ

โครงการนี้กล่าวเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง โดยประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม โดยอาศัยการรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน (SVC) แบบไทรแอกคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Triac Controlled Reactor, FC-TCR) ซึ่งจะปรับให้แรงดันที่ขั้วสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้เมื่อความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง (SEIG) มีการเปลี่ยนแปลงและในสภาวะโหลดต่างๆ โดยได้อธิบายลักษณะในการสร้างสัญญาณกระตุ้นให้กับไทรแอกโดยใช้ TCA785 และการออกแบบวงจรป้อนกลับโดยใช้ Microcontroller เพื่อควบคุมการทำงานของ TCA785 และได้ อธิบายถึงการวิเคราะห์ห้ระดับแรงดันที่ความเร็วรอบต่างๆ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหลดระหว่าง SEIG ที่ใช้ SVC และไม่ใช่ SVC พร้อมทั้งแสดงระดับแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนไปของรีแอคเตอร์เมื่อ SVC ทำหน้าที่ในการรักษาระดับแรงดันในขณะที่ความเร็วรอบและโหลดต่างๆ

## Three-Phase Self-Excited Induction Generator for Wind Energy Application

Jirayu Charoentungsinchai

Nutdanai Chanapanao

Nattapon Wongkewan

Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinares Supervisor

2010

### Abstract

This project is concerned with a 3 phase self-excited induction SEIG wind energy application by keeping the voltage level at the terminals of self-excited inductive generator by using compensated reactive power. A Fixed Capacitor Triac Controlled Reactor (FC-TCR) type is used to adjust the terminal voltage to be constant when under changes of the speed and loads. This thesis describes pulse-triggering generation for the triac. TCA785 is used to generate the trigger signals. The design of feedback control using a microcontroller for controlling TCA785 is given. Finally, the analysis of the obtain results of the voltage level change under speed and load changes with and without SVC is given. In addition, the reactor voltages and currents are demonstrated when the SVC acts a voltage regulator as the loads and speeds vary.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากการช่วยเหลือ สนับสนุนจากหลายท่าน โดยเฉพาะ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาและแนวคิดทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหามาอย่างต่อเนื่องให้กับคณะผู้จัดทำ โดยมีเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญาณิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อย

นอกจากนั้นคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญาโท เพื่อนร่วมห้องและเพื่อนร่วมโครงการที่คอยเป็นที่ปรึกษาตลอดเวลา ที่สำคัญคือความร่วมมือและความสามัคคีของคณะผู้จัดทำเอง

ท้ายที่สุดนี้คณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงที่คอยสนับสนุนทางการศึกษาทางด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงคอยให้กำลังใจที่ดีในทุกๆเรื่อง

คณะผู้จัดทำ



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	4
2.3 หลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	6
2.3.1 ความเร็วเชิงโคโรนัสและค่าสลลิป.....	6
2.3.2 การเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	7
2.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	11
2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง.....	15
2.5.1 สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง.....	15
2.5.2 Voltage Regulation.....	19
2.5.3 Magnetizing curve และ Self – Excitation.....	20
2.5.4 คุณสมบัติของแรงบิดและความเร็วของ Induction generator.....	23
2.5.5 คุณสมบัติระหว่างกำลังงานและกระแส.....	25

## IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	27
3.1.1 การทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล (No-load test).....	27
3.1.2 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Blocked-rotor test).....	28
3.1.3 การทดสอบ VI-method test.....	29
3.1.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์.....	29
3.2 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุสำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน .....	33
3.3 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำสำหรับชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน.....	35
3.4 การออกแบบชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน.....	36
3.5 การรักษาระดับแรงดันโดยใช้ Microcontroller.....	38
บทที่ 4 การทดสอบชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไดเรกต์คอนโทรล .....	40
รีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ในการรักษาระดับแรงดัน	
4.1 บทนำ.....	40
4.2 การทดสอบในสภาวะไม่มีภาระ.....	41
4.3 การทดสอบในสภาวะมีภาระ.....	42
4.4 การทดสอบในสภาวะมีภาระกะทันหัน.....	44
4.5 การทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน.....	47
4.6 สรุปผลการทดลอง.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน .....	50
5.1 สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ.....	50
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย.....	50
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก ก.....	52
ภาคผนวก ข.....	55

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	3
2.2 สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	4
2.3 โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก.....	5
2.4 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	11
2.5 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป .....	13
2.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	15
2.7 Capacitor self-excited induction generator star.....	17
2.8 Capacitor self-excited induction generator delta.....	17
2.9 วงจรสมมูลต่อเฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	18
2.10 Magnetizing curve ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	21
2.11 การชดเชยค่า Residual Magnetism.....	22
2.12 คุณลักษณะของแรงบิด-กำลังงาน-ความเร็วรอบของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ.....	24
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	26
3.1 วงจรการทดสอบ No-load test.....	28
3.2 วงจรการทดสอบ VI-method test.....	29
3.3 กราฟผลการทดสอบ VI-method test.....	30
3.4 กราฟผลการทดสอบหาความถี่และแรงต้านลม.....	32
3.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	33
3.6 แผนภาพ single line ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	33
แบบกระตุ้นตัวเอง	
3.7 แผนภาพ single line ของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไดรแอก.....	35
คอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์	
3.8 โครงสร้างการจูนขนาดของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบต่อเฟส .....	37
3.9 โครงสร้างการสั่งการ TCA785 โดยใช้ microcontroller ในการควบคุม .....	38
แบบป้อนกลับ	
3.10 วงจรการรักษาระดับแรงดันอัตโนมัติแบบไดรแอกคอนโทรล .....	39
รีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์	
4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเอง.....	40
4.2 การ build up แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง .....	41

4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นและแรงดันที่ชั่ว... ..42
	ของผลการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดชุดเซยกำลัง
	ไฟฟ้าเสมือนและไม่ได้ติดตั้ง
4.4	จุดที่ทำการวัด.....42
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่เพิ่มขึ้นและแรงดันกระแสตรง... ..43
	ที่ชั่วของผลการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดชุดเซย
	กำลังไฟฟ้าเสมือนและไม่ได้ติดตั้ง
4.6	จุดที่ทำการวัด.....44
4.7	ผลการตอบสนองของแรงดันกระแสสลับหลังการเพิ่มขึ้นของโหลด.....45
	กะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือน
4.8	ผลการตอบสนองของแรงดันกระแสตรงหลังการเพิ่มขึ้นของโหลด.....45
	กะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือน
4.9	ผลการตอบสนองของแรงดันกระแสสลับหลังการเพิ่มขึ้นของโหลด... ..46
	กะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้งชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือน
4.10	ผลการตอบสนองของแรงดันกระแสตรงหลังการเพิ่มขึ้นของโหลด.....46
	กะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้งชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือน
4.11	จุดที่ทำการวัด.....47
4.12	ผลการวัดแรงดันและกระแสของรีแอคเตอร์ของชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้า .....48
	เสมือนที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการรักษาระดับแรงดัน
4.13	ผลการวัดแรงดันและกระแสของไดรแอคของชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้า.. .....48
	เสมือนที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการรักษาระดับแรงดัน
4.14	จุดที่ทำการวัด.....49

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	รายละเอียด Nameplate ของ Induction motor.....27
3.2	ผลการทดสอบ VI-method test.....30
3.3	ผลการทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล No-load Test.....31
3.4	ผลการทดสอบยัดโรเตอร์ ( Blocked-rotor test ).....31
3.5	ผลการทดสอบ $P_{f&w}$ .....31
3.6	ค่า $X_1$ และ $X_m$ จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996 .....32
4.1	สรุปผลการทดลองในการรักษาระดับแรงดัน.....49



## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานของมนุษย์เพิ่มมากขึ้นตลอดเวลา แต่แหล่งพลังงานจากธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน หรือแก๊สธรรมชาตินั้นมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งการใช้ทรัพยากรเหล่านี้ก็ได้สร้างมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นมนุษย์จึงมีแนวคิดที่จะหันมาใช้แหล่งพลังงานใหม่ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและราคาถูก แหล่งพลังงานดังกล่าวเรียกว่าแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ หรือฝายทดน้ำขนาดเล็ก ซึ่งเราสามารถนำพลังงานเหล่านี้มาใช้ในหลายๆ ลักษณะงานรูปแบบหนึ่งคือพลังงานของตัวต้นกำลังสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

การใช้พลังงานลมมาเป็นตัวต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสแบบกระตุ้นตนเองนั้นก็เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่เราพูดถึงหรือที่ในปัจจุบันเราเรียกว่า พลังงานทดแทน ซึ่งปัญหาของการนำพลังงานลมมาใช้ผลิตไฟฟ้านั้นก็คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมที่มีอยู่ตลอดเวลา หรือการเปลี่ยนแปลงของภาระซึ่งทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงไป จึงต้องมีการสร้างชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้ามาเพื่อรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน
2. เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง เมื่อความเร็วลมและภาระเปลี่ยนแปลง
3. ออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อรักษาระดับแรงดันแบบอัตโนมัติ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพื่อสร้างแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง พิกัด 1.5 KW และสร้างชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อความเร็วลมและภาระเปลี่ยนแปลงไฟและออกแบบและสร้างชุดป้อนกลับเพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่เพื่อการนำแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาและออกแบบสร้างชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ Static VAR
2. สร้างวงจรจุดขนวนไตรแอดโดยใช้ TCA785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองการปรับมุมจุดชนวนของไตรแอกจาก TCA785
4. คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ
5. ออกแบบวงจร Rectifier 3 เฟส
6. ออกแบบวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ
7. ทดสอบการรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและ  
สรุปผลโครงการ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงหลักการในการสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง
2. เข้าใจถึงหลักการในการรักษาระดับแรงดันของชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน
3. เป็นต้นแบบในการพัฒนาการสร้างชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองต่อไป

## 1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบและทดลองการสร้างชุดชดเชยแรงดันแบบ Static VAR และใช้การควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวถึงในปฏิญานิพนธ์แบ่งเป็นบทได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย ขอบเขต โครงสร้างวิทยานิพนธ์และประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อธิบายถึงหลักการและทฤษฎีที่สำคัญที่นำมาอ้างอิงในโครงการ

บทที่ 3 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบ Static VAR

บทที่ 4 ผลการทดลองตามขอบเขตที่กำหนด เก็บข้อมูลและบันทึกผลการทดลอง

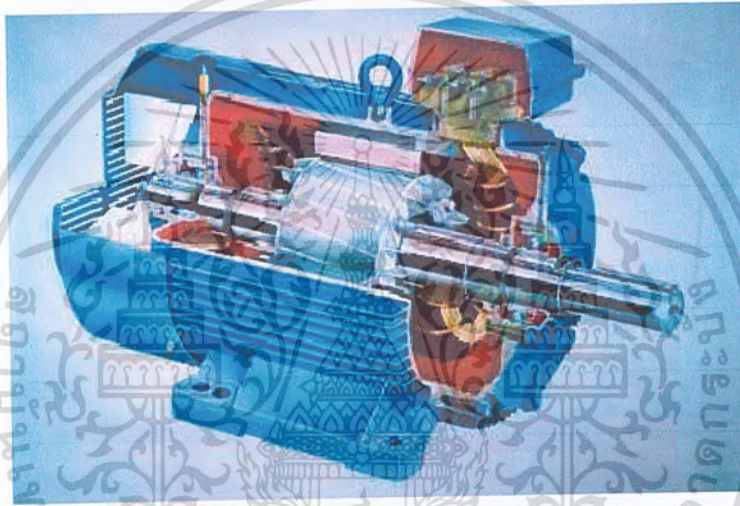
บทที่ 5 บทสรุปและเสนอแนวทางที่จะดำเนินการ เป็นการสรุปผล ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทกระแสสลับโดยอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และโรงงานขนาดเล็ก โดยส่วนใหญ่จะนำมาใช้งานในรูปแบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งแปลงเปลี่ยนรูปกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านโรเตอร์ของมอเตอร์แปลงเป็นกำลังงานกลได้จากการเหนี่ยวนำ การหมุนของมอเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดสเตเตอร์ที่มีผลต่อตัวนำในโรเตอร์



รูปที่ 2.1 ลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ปกติเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถทำงานได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อก้าวถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมักหมายถึง มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นส่วนใหญ่เพราะราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีความเร็วรอบเกือบคงที่ คือความเร็วลดลงจากสภาวะไม่มีภาระทางกล จนกระทั่งขั้วภาระทางกลเต็มที่เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียคือ

- ควบคุมความเร็วยาก
- ขณะมีภาระทางกลน้อยจะทำงานที่ Power Factor ต่ำและเป็นแบบล้าหลัง (lagging power factor)
- กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนมีค่าประมาณ 5 เท่า ถึง 8 เท่า ของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด

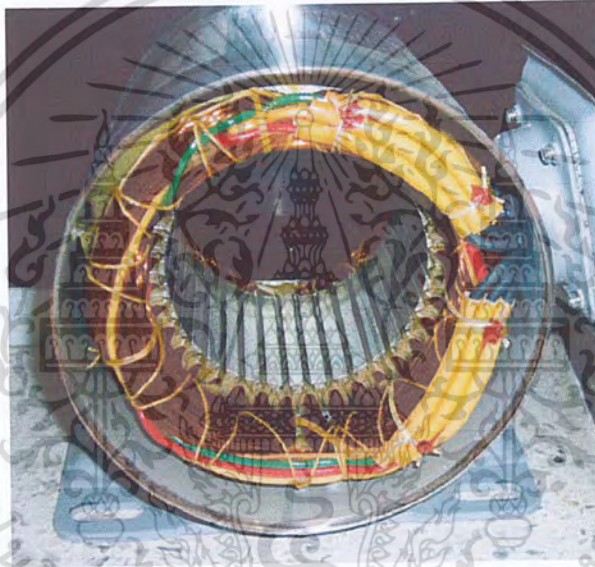
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือสเตเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และโรเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่มีแกนเป็นแผ่นลามีเนทประกบกัน ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิคอน และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ฝังตัวอยู่ในร่องสลิตของแกนเหล็กภายในของส่วนที่อยู่กับที่ โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจายเพื่อทำให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กแบบไซน์ซอยด์ (Sinusoidal) ซึ่งรูปร่างของสเตเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

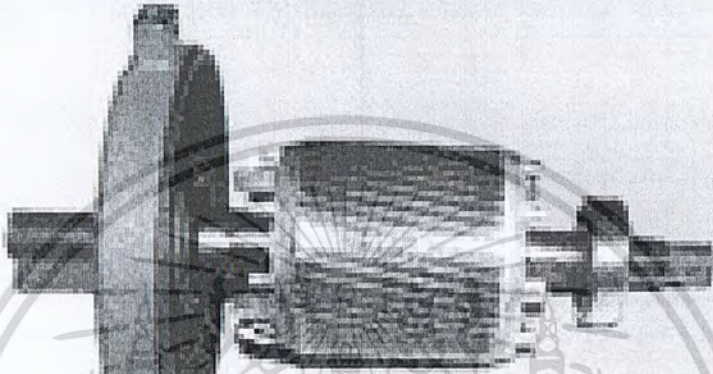
### 2.2.2 โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นโรเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น (non-salient-pole) หรือทรงกระบอก (cylindrical rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 2.2.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้จะมีความแข็งแรงทางกลสูงและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ (wound rotor) ส่วนประกอบของโรเตอร์จะมีแท่งตัวนำซึ่งมีการต่อลัดวงจรทางด้านหัวและท้ายของแท่งตัวนำ แท่งตัวนำดังกล่าวจะฝังตัวอยู่ในเหล็กกล้าซิลิคอน โดยชนิดของแท่งตัวนำจะเป็นอลูมิเนียมหรือทองแดงขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็กกว่า 250 kW จะใช้อลูมิเนียมเป็นแท่งตัวนำ ถ้าขนาดพิกัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงกว่า 250 kW จะใช้ทองแดงเป็นแท่งตัวนำ จำนวนขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์นี้ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์เสมอ โรเตอร์ลักษณะนี้จะมีราคาถูก แข็งแรง แต่จะมีแรงบิดเริ่มแรกต่ำ โรเตอร์แบบนี้ส่วนใหญ่แล้วจะมีตัวนำฝังลงไปในช่วงเฉียงกับแกน (skew slot) ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรหมุนได้เรียบขึ้น โดยจะไปทำการปรับลดค่า แมกเนติกฮัม (magnetic hum) ลักษณะของสลิตของโรเตอร์มีผลต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะแรงบิดกับความเร็รรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รูปร่างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกแสดงดังรูปที่ 2.3



**รูปที่ 2.3** โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor)

### 2.2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสลิตเช่นเดียวกับสเตเตอร์ พบมากในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส แกนขดลวดทำด้วยเหล็กแผ่นลามิเนตเป็นร่องสลิตแล้วนำมาอัดติดกันเป็นทรงกระบอก โดยมีขดลวดทองแดงอาบน้ำยาฉนวนไฟฟ้าพันอยู่ในร่องสลิต โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (slip ring) และมีส่วนแปลงถ่านสัมผัสอยู่โดยแปลงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรมอเตอร์ภายนอกเพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์ทหรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้จะมีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ นอกจากนี้ยังราคาสูงเมื่อเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอก

## 2.3 หลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 2.3.1 ความเร็วซิงโครนัสและค่าสลิป

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลประเภทกระตุ้นเดี่ยว (single excited) ซึ่งอาศัยการป้อนพลังงานเข้าทางสเตเตอร์ พลังงานดังกล่าวจะถูกส่งไปยังสเตเตอร์โดยการเหนี่ยวนำ เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ผ่านช่องอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้แก่สเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ช่องว่างอากาศที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของแหล่งจ่าย ซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ดังสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

โดยที่  $N_s$  = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

$f$  = ความถี่ของแหล่งจ่าย (Hz)

$P$  = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

เมื่อมีการป้อนแรงดันให้กับขดลวดสเตเตอร์และทำการล๊อคโรเตอร์ให้อยู่กับที่จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในโรเตอร์ตามหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งความถี่ของแรงดันและกระแสทางด้านโรเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับทางด้านสเตเตอร์ ระดับแรงดันและกระแสของโรเตอร์จะแปรตามอัตราส่วนรอบ (turn ratio) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ในสภาวะนี้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีสภาพเหมือนหม้อแปลงที่ลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ แต่ถ้าหากว่าป้อนโรเตอร์ของเครื่องจักรกลให้อิสระ โรเตอร์จะหมุนทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนแต่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน เนื่องจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศ ที่ทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วโรเตอร์ (rotor speed ;  $N_r$ ) และความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (synchronous speed :  $N_s$ ) จะเรียกว่าค่าสลิป (slip) ซึ่งค่าของสลิปจะแสดงในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์สลิป (per-unit slip) ตามสมการ

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.2)$$

เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใด ๆ ที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสจะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าเปอร์เซ็นต์สลิปกับความถี่ของกระแสที่ป้อนเข้าทางด้านสเตเตอร์

### 2.3.2 การเกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อมีกระแสไหลในสเตเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ จะมีฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้นระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องระหว่างขดลวดทั้งสองเรียกว่าฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (mutual flux) ซึ่งเป็นฟลักซ์ส่วนมากที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าและเป็นฟลักซ์แม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในส่วนของฟลักซ์แม่เหล็กส่วนน้อยที่ไม่ได้ผ่านช่องอากาศเรียกว่าฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหล (leakage flux) ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดแรงบิด แต่มีผลต่อสมรรถภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในการพิจารณาการเกิดแรงบิดจะพิจารณาจากฟลักซ์ร่วมลัพธ์ (resultant mutual flux) โดยพิจารณาในเทอมของ magnetic co-energy ที่สะสมอยู่ในช่องอากาศในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ กับโรเตอร์และมุม  $\delta_{sr}$  ระหว่างแกนแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งแรงบิดสามารถคำนวณได้จากการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนของ co-energy กับมุม  $\delta_{sr}$

ในการพิจารณากำหนดให้สนามแม่เหล็กในแนวเส้นสัมผัสมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะเส้นแรงแม่เหล็กในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น เมื่อทำการอินทิเกรตเชิงเส้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านช่องว่างอากาศจะได้เท่ากับ  $Hg$  ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์  $\mathfrak{F}_{sr}$

$$Hg = \mathfrak{F}_{sr} \quad (2.3)$$

สัญลักษณ์  $\mathfrak{F}_{sr}$  แสดงให้เห็นว่าค่า mmf wave ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมรอบเส้นรอบวงของสเตเตอร์ เวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์  $F_{sr}$  เกิดจากผลรวมทางเวกเตอร์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์  $F_s$  และโรเตอร์  $F_r$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการการรวมกันของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr} \quad (2.4)$$

ค่า  $F$  แทนค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ดังนั้นสนามแม่เหล็กลัพธ์  $H$  มีการกระจายตัวแบบ ไชนูซอยด์ ซึ่งค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กลัพธ์หาได้จากสมการ

$$H_{peak} = \frac{F_{sr}}{g} \quad (2.5)$$

ค่าของ co-energy ในช่องว่างอากาศ ณ จุดใด ๆ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเท่ากับ  $H$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{\mu_0}{2} H^2$  ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ co-energy density มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ค่าเฉลี่ยของ co-energy density} &= \frac{\mu_0}{2} \frac{H_{peak}^2}{2} \\ &= \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่  $\mu_0$  = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ  
 $F_{sr}$  = ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก  
 $g$  = ระยะระหว่างช่องอากาศ  
 $H_{peak}$  = ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็ก

ดังนั้นค่า co-energy ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} W'_{fd} &= (\text{ค่าเฉลี่ยของ co-energy density})(\text{ปริมาตรของช่องว่างอากาศ}) \\ &= \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \pi D l g \\ &= \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} F_{sr}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่  $D$  = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างอากาศ  
 $l$  = ความยาวในแนวแกนของช่องว่างอากาศ

จากสมการที่ 2.4 จะได้ค่า co-energy ที่สะสมอยู่ในช่องอากาศในรูปของค่าสูงสุดของขนาดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการ

$$W'_{fd} = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} (F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos \delta_{sr}) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 สามารถหาสมการของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยการหาอนุพันธ์เชิงซ้อนระหว่าง co-energy และมุมระหว่างแกนของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งจะได้แรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสองขั้วดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = + \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \delta_{sr}} = - \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (2.9)$$

ในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีจำนวน  $p$  ขั้ว จะได้สมการแรงบิดในรูปแบบ

$$T = - \frac{P}{2} \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (2.10)$$

$F_r \sin \delta_{sr}$  เป็นส่วนประกอบของ  $F_r$  ในแนวตั้งฉากกับ  $F_s$  และ  $F_s \sin \delta_{sr}$  ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ  $F_s$  ในแนวตั้งฉากกับ  $F_r$  ซึ่งสมการที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดแปรผันกับผลคูณเชิงเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ จะได้รับความสัมพันธ์

$$F_s \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_r \quad (2.11)$$

$$F_r \sin \delta_{sr} = F_{sr} \sin \delta_s \quad (2.12)$$

จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.11 และ สมการที่ 2.12 เมื่อทำการแปลงรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์จะได้

$$T = - \frac{P}{2} \frac{\pi \mu_0 D l}{2g} F_s F_{sr} \sin \delta_s \quad (2.13)$$

$$T = - \frac{P}{2} \frac{\pi \mu_0 D l}{2g} F_r F_{sr} \sin \delta_r \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.10, 2.13, 2.14 เป็นการนำเสนอรูปแบบของสมการแรงบิดใน 2 รูปแบบคือ

1. แสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแต่ละส่วนโดยแยกเป็นส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ดังสมการที่ 2.10
2. แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์และส่วนของสเตเตอร์หรือโรเตอร์ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

จากสมการที่ 2.10, 2.13 และ 2.14 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กจะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าสูงสุดของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ถ้ากำหนดให้แกนเหล็กไม่มีการอิ่มตัว จะพบว่าค่าสนามแม่เหล็กจะสามารถนำเสนอในรูปค่าสูงสุดของคลื่นของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กหรือฟลักซ์ต่อขั้ว ดังนั้นค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  จะหาได้จากสมการ  $\mu_0 \frac{F}{g}$  เมื่อ  $F$  แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กตั้งนั้นจากสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 เมื่อต้องการที่จะนำเสนอแรงบิดในรูปของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์สามารถได้ดังสมการ

$$T = -\frac{P}{2} \frac{\pi D l}{2} B_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (2.15)$$

ในการออกแบบอุปกรณ์ทางด้าน electromagnetic จะมีข้อจำกัดอยู่ที่การอิ่มตัวของสารแม่เหล็กซึ่งค่าสูงสุดของรูปคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B_{sr}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 T เพื่อให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเคลื่อนจักรกลไฟฟ้าดังนั้นจึงสามารถแปลงรูปสมการให้อยู่ในรูปของฟลักซ์แม่เหล็กได้โดย

$$\Phi = (\text{ค่าเฉลี่ยของ } B \text{ ในแต่ละขั้ว})(\text{พื้นที่ของขั้วแม่เหล็ก}) \quad (2.16)$$

ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นสัญญาณในรูปของไซน์ขอยต์ในครึ่งลูกคลื่นมีค่าเท่ากับ  $\frac{2}{\pi}$  คูณกับค่าสูงสุดของรูปคลื่นดังสมการ

$$T = -\frac{\pi}{2} B \frac{\pi D l}{P} = \frac{2 D l}{P} B \quad (2.17)$$

ค่า  $B$  แทนค่าสูงสุดของรูปคลื่นของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังนั้นผลลัพธ์ของสมการที่ 2.15 คือ

$$T = -\frac{\pi}{2} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (2.18)$$

โดยที่  $\Phi_{sr}$  = ฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างโดยสเตเตอร์และโรเตอร์  
 $\delta_r$  = มุมระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์กับแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

จากสมการที่ 2.18 สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$T = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) |\bar{\psi}_m| I_r \sin \delta_r \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $|\overline{\psi}_m|$  คือ ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก  
 $|I_r|$  คือ ค่าสูงสุดของกระแสบนโรเตอร์

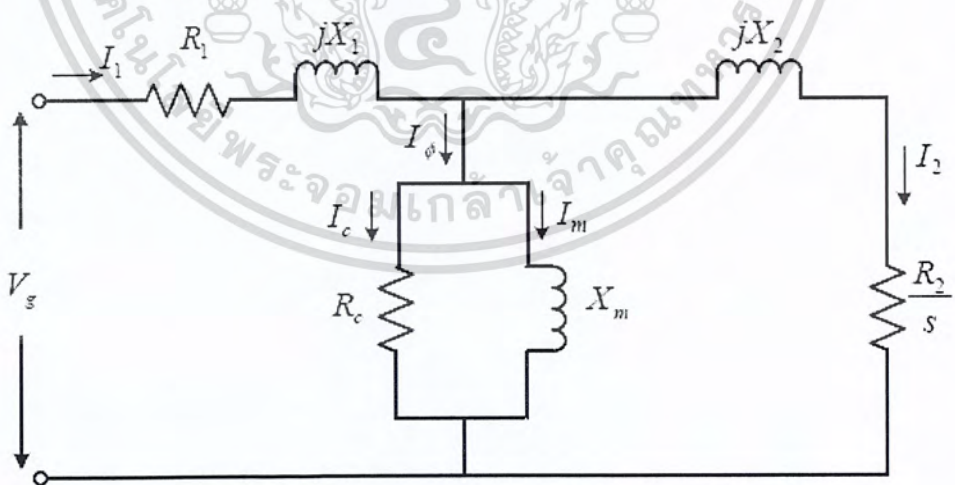
## 2.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปแบบหนึ่งในการพิจารณารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กคือการพิจารณาจากวงจรสมมูลโดยพิจารณาให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสสมดุล ในการพิจารณาวงจรสมมูลนั้นจะทำการพิจารณาแยกเป็นเฟสไปโดยกำหนดให้มีการต่อวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเดลต้า และแรงดันที่ปรากฏที่ขั้วของวงจรสมมูลเป็นแรงดันเฟส ส่วนกระแสเป็นกระแสไลน์ ลักษณะของวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเหมือนกับหม้อแปลงโดยเริ่มพิจารณาจากทางด้านสเตเตอร์ก่อน ซึ่งสามารถอธิบายวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ เป็นดังนี้

$$V_1 = E_1 - I_1 (R_1 + jX_1) \quad (2.20)$$

โดยที่  $V_1$  = แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์  
 $E_1$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ  
 $I_1$  = กระแสสเตเตอร์  
 $R_1$  = ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์

ซึ่งสามารถเขียน Stator equivalent circuit ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $I_\phi$  = Exciting current (แอมป์)  
 $I_m$  = Magnetizing current component (แอมป์)  
 $I_c$  = Core-loss current component (แอมป์)

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.4 กระแสเตเตอร์ ( $I_1$ ) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนโดยส่วนแรกคือส่วนประกอบทางด้านภาระ (load component) ( $I_2$ ) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ และส่วนที่สองคือ ส่วนประกอบทางด้านกระตุ้นหรือกระแสกระตุ้น (exciting component) ( $I_\phi$ ) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศและเป็นฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $E_1$ ) กระแสกระตุ้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกอยู่ในรูปการสูญเสียที่แกนเหล็ก ( $I_c$ ) ซึ่งจะมีเฟสทับกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่วนที่สองอยู่ในรูปของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก ( $I_m$ ) ซึ่งจะล่าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อยู่ 90 องศา ซึ่งในวงจรสมมูลจะแสดงการสูญเสียในแกนเหล็กในรูปของ  $R_c$  ต่อขนาดอยู่กับส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กในรูปของ  $X_m$  ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาโรเตอร์ที่ความเร็วรอบและฟลักซ์เดียวกันโดยใช้หลักการเดียวกับของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการ transfer ส่วนประกอบทางด้าน Secondary มาด้าน Primary โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Primary และ Secondary ในรูปของ turn ratio

$$E_{2s} = aE_{rotor} \quad (2.21)$$

โดยที่  $E_{2s}$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของโรเตอร์ (โวลท์)  
 $E_{rotor}$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงที่โรเตอร์ (โวลท์)  
 $a$  = turn ratio

ในส่วนของความสัมพันธ์ทางด้านกระแสก็เช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจริงที่โรเตอร์  $I_{rotor}$  และกระแสในวงจรสมมูลของโรเตอร์  $I_{2s}$  เป็นดังสมการที่ 2.22

$$I_{2s} = \frac{I_{rotor}}{a} \quad (2.22)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.21 มาหารด้วยสมการที่ 2.22 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance ของวงจรสมมูลของโรเตอร์  $Z_{2s}$  และค่า Impedance ของวงจรโรเตอร์จริง  $Z_{rotor}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{2s} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{a^2 E_{2s}}{I_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.21 , 2.22 และ 2.23 ค่า  $E_{2s}$  ,  $I_{2s}$  และ  $Z_{2s}$  เป็นค่าที่ได้จาก transfer ตัวแปรและพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์มาทางสเตเตอร์โดยอาศัยหลักการของหม้อแปลง โดยมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (Rotor reference frame) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.24

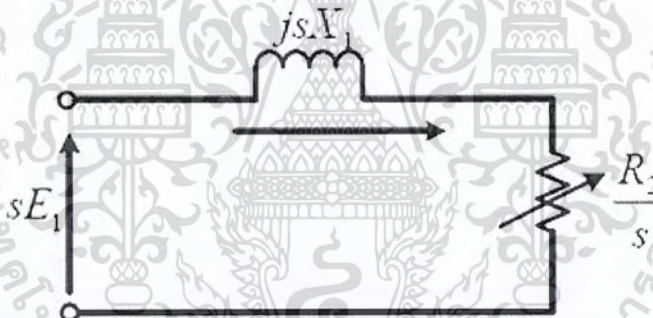
$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \quad (2.24)$$

โดยที่  $Z_{2s}$  = ค่า impedance ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์

$R_2$  = ค่าความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (โอห์ม)

$sX_2$  = ค่า reactance ของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ที่ความถี่สลิป (โอห์ม)

จากสมการที่ 2.24 จะได้ค่า Reactance มีค่าแปรผันกับค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่  $X_2$  เป็นค่า reactance ที่ความถี่เดียวกับสเตเตอร์ เมื่อมองโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (rotor reference frame) จะได้วงจรสมมูลดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆของโรเตอร์โดยมองจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์(stator reference frame) พบว่าเมื่อมองจากด้านสเตเตอร์จะพบว่ารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์  $E_1$  และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์  $E_{2s}$  ซึ่งหากว่าไม่มีผลจากความเร็วของโรเตอร์ (โรเตอร์หยุดนิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเตเตอร์) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์จะเท่ากับสเตเตอร์ แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วใดๆ ทำให้มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่าง สเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับ  $s$  ซึ่งส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ดังสมการที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{2s} = sE_1 \quad (2.25)$$

ในส่วนประกอบทางด้านภาระ ( $I_2$ ) ของกระแสทางด้านสเตเตอร์ใช้สำหรับสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์เพื่อรักษาระดับฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศไว้ และเนื่องจากสมมติให้จำนวนรอบของขดลวดทางด้านโรเตอร์ และสเตเตอร์มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_2$  และ  $I_{2s}$  เป็นดังสมการที่ 2.26

$$I_{2s} = I_2 \quad (2.26)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.25 หาดด้วยสมการที่ 2.26 จะได้

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{sE_1}{I_2} \quad (2.27)$$

เมื่อนำผลของความเร็รรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ามาพิจารณาร่วมกับสมการที่ 2.25 และสมการที่ 2.27 จะได้ความสัมพันธ์

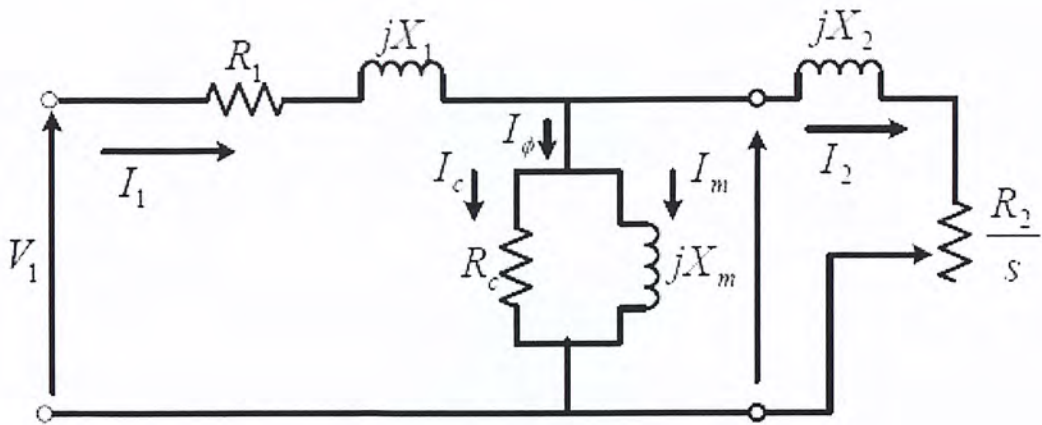
$$\frac{sE_1}{I_2} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (2.28)$$

เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างของสมการที่ 2.28 จะได้

$$\frac{E_1}{I_1} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2.29)$$

เป็นการพิจารณาองค์ประกอบของโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์

เมื่อพิจารณาทางกายภาพพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์ซึ่งมีความถี่  $sf$  โดยมีทิศทางไปในทางเดียวกับโรเตอร์ ซึ่งมีความถี่เท่ากับ  $(1-s)f$  ดังนั้นเมื่อมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่โรเตอร์มีความถี่เท่ากับ  $sf$  แต่เมื่อพิจารณาจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์จะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์จะมีความถี่เท่ากับ ความถี่ซิงโครนัสนั่นเอง (Synchronous frequency) เมื่อพิจารณาในรูปของวงจรมมูลจะได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

## 2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง

เป็นการอธิบายข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยธรรมชาติแล้วเมื่อนำมาต่อร่วมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแล้วจะต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ซึ่งจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ (Stator winding) ซึ่งแหล่งจ่ายนี้เองจะกำเนิดกำลังไฟฟ้าเสมือนซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก และเมื่อตัวนำโรเตอร์ (Rotor winding) ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิด นอกจากจะใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนจากภายนอกแล้วยังมีอีกวิธีที่ใช้ในการสร้างแรงดันเหนี่ยวนำนี้ นั่นคือ การใช้อำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) ร่วมกับตัวเก็บประจุจากภายนอก กำเนิดกระแสโดยการให้โรเตอร์เคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กนี้ ซึ่งเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันได้เช่นกัน

### 2.5.1 สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง

การเกิดผลกระทบในระหว่างสภาวะการต่อใช้งานกับแหล่งจ่ายปฐมภูมิ (Primary source) ของกำลังงาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระบวนการกระตุ้นตัวเองและสภาวะของโหลดจะกำหนดโดยคุณสมบัติของโรงจักร (Power Plant) สมรรถนะที่ดีนั้นมักขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของกำลังงานปฐมภูมิ และวิธีจ่ายโหลดไปสู่ผู้ใช้ ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองจะขึ้นอยู่กับรายละเอียด และขั้นตอนการออกแบบอันเหมาะสมของโรงจักร ดังต่อไปนี้

ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

- แรงดันใช้งาน
- พิกัดกำลัง
- พิกัดความถี่ที่ใช้ในการวัด

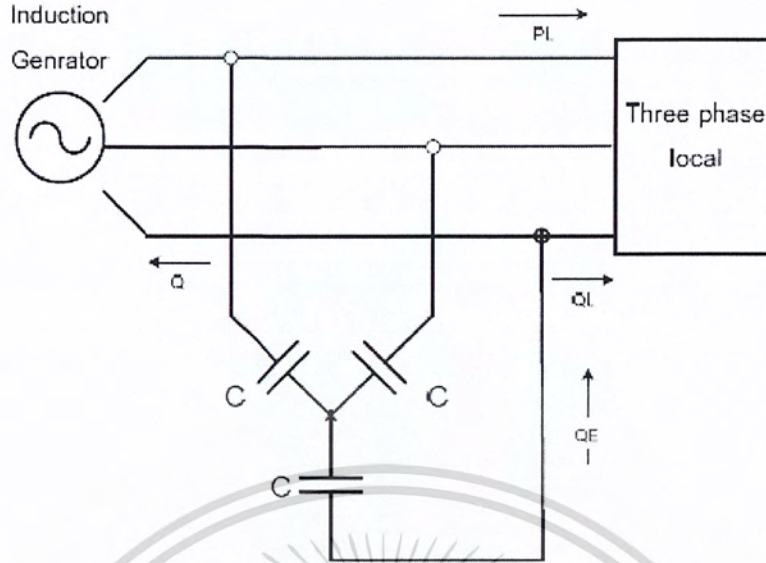
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องจักร
- ความเร็วโรเตอร์
- อัตราเร่ง
- Isolation Class
- อุณหภูมิขณะใช้งาน
- ชนิดของโครงเครื่องจักร
- ระบบการระบายอากาศ
- Service factor
- เสียงรบกวน
- ค่าพารามิเตอร์ของโหลด
- ค่าตัวประกอบกำลัง
- แรงบิดเริ่มต้น
- กระแสเริ่มต้น
- แรงบิดและกระแสสูงสุด
- การเกิดฮาร์โมนิกส์
- รูปแบบการต่อสู่โหลด : เป็นการต่อตรงสู่ระบบจำหน่ายหรือไปยัง Converters

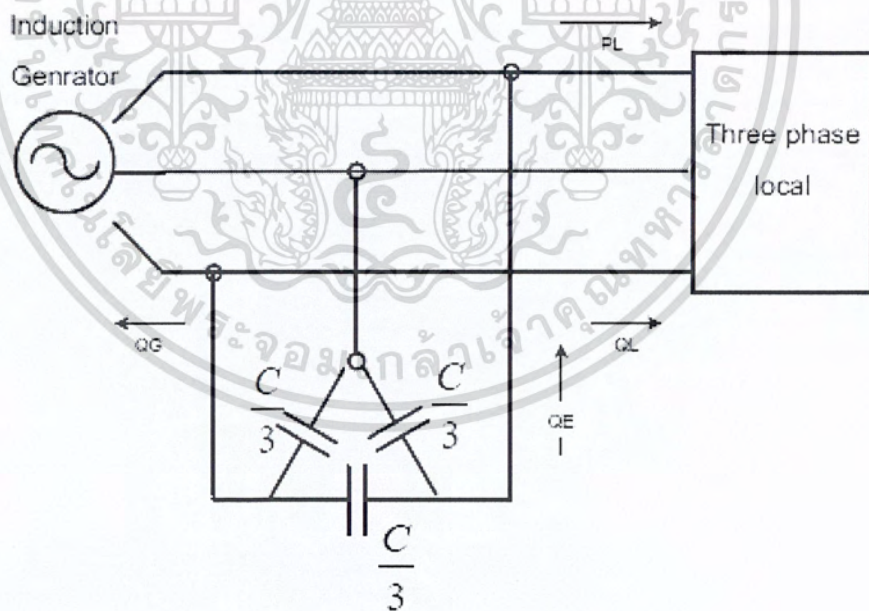
โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างเช่นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ Power converter มักจะกำเนิดความถี่ฮาร์โมนิกส์ แล้วยังมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลัง ฮาร์โมนิกส์สามารถที่จะลดลงให้น้อยที่สุดด้วยการติดตั้งฟิลเตอร์ แต่โดยทั่วไปแล้วต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการควบคุมฮาร์โมนิกส์โดยใช้ Passive filter นั้นสูงมาก เมื่อเทียบกับการควบคุมความถี่ด้วยการควบคุมความเร็ว โดยมาตรฐาน IEEE std. 519 ได้จำกัดเสถียรภาพของฮาร์โมนิกส์ไว้ที่ 2% สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส และ 3 เฟส ซึ่งในการต่อวงจรของ Capacitor แบบ Star จะมีอัตราของค่ามากกว่า 3 เท่าของการต่อแบบ Delta

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.7 Capacitor self-excited induction generator star



รูปที่ 2.8 Capacitor self-excited induction generator delta

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

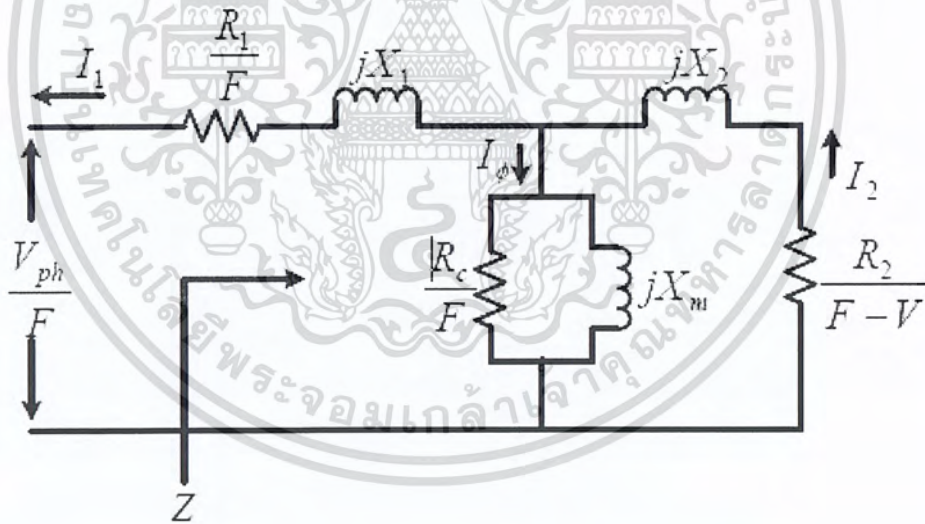
119556

ในกรณีของโรงจักรแบบ Stan - alone จำเป็นจะต้องต่อตัวเก็บประจุพร้อมที่ขั้ว (Terminal) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.7 และ รูปที่ 2.8 เพื่อจ่าย Reactive Power ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการต่อตัวเก็บประจุกระตุ้น ซึ่งความต้องการค่าความจุจะขึ้นอยู่กับพลังงานปฏิกิริยาและโหลดชั่วขณะ

วงจรมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งได้กำหนดเป็นแบบต่อหน่วย (Per unit) ความถี่อื่นเนื่องจากค่า Reactance ควรจะนำมาพิจารณาถ้าหากใช้ความถี่จากค่าความถี่พื้นฐาน ในที่นี้ถ้าให้  $F$  คือความถี่ p.u. จะสามารถหาความสัมพันธ์ โดยการกำหนดค่าระหว่าง ความถี่ไปกระตุ้น (Self - excitation frequency ;  $f_{exc}$ ) และ ความถี่พื้นฐาน ( $f_b$ )

$$F = \frac{f_{exc}}{f_b} = \frac{\omega_{exc}}{\omega_b} \quad (2.30)$$

โดยทั่วไปค่า Inductive reactance จะสามารถกำหนดโดยความถี่พื้นฐานได้เป็น  $X = F\omega L$  ดังรูปที่ 2.9 แสดงวงจรมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองซึ่งทุกๆค่าพารามิเตอร์ในวงจรจะถูกหารด้วยค่า  $F$  โดยจะสร้างแหล่งจ่ายแรงดันเท่ากับ  $\frac{V_{ph}}{F}$  จากการกำหนดความต้านทานโรเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรมูลต่อเฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ซึ่งค่าความต้านทานของโรเตอร์นี้เป็นค่าความถี่ p.u. จากสมการ

$$\frac{R_2}{F_2} = \frac{R_2}{F(1 - \frac{n_r}{n_s})} = \frac{R_2}{F-v} \quad (2.31)$$

โดยที่  $n_r$  คือ ความเร็วโรเตอร์ (p.u.) อ้างอิงจากความเร็วโรเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 Voltage Regulation

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่า Impedance ของวงจรจะมองจากจุดของ Voltage terminal ของสเตเตอร์ ที่ความเร็วซิงโครนัส ( $F=1$ ) สามารถเขียนได้ตามสมการ

$$Z = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{R_2 + jX_2}} \quad (2.32)$$

โดยที่

$$s = 1 - \frac{n_r}{n_s} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s}, \text{ นั่นคือ } n_r = (1 - s)n_s$$

ในบางครั้งเพื่อความสะดวกจะสามารถใส่ค่าความถี่ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดในครั้งแรก เมื่อใช้การหมุนทางกล ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าของตัวแปรนี้จึงเป็น ดังสมการที่ 2.33

$$\omega_r = \frac{p}{2} \left( 2\pi \frac{n_r}{60} \right) = \frac{p}{2} \omega_r' \quad (2.33)$$

โดยที่  $n_r$  = ความเร็วทางกลของโรเตอร์ (rpm)

$$\omega_r' = 2\pi \frac{n_r}{60}$$

$P$  = จำนวนขั้ว (pole) ของเครื่องจักร

ใน Complex terms ของสมการที่ 2.16 ยังสามารถที่จะแยกส่วนจริงออกจากส่วนจินตภาพ ได้เป็น

$$Z = \left( R_1 + \frac{a}{a^2 + b^2} \right) + j \left( X_1 + \frac{b}{a^2 + b^2} \right) \quad (2.34)$$

เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ Polar form จะได้

$$Z = |Z| \angle \theta \quad (2.35)$$

โดยที่

$$a = \frac{\cos(\theta_2)}{|Z_2|} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \frac{1}{X_m} + \frac{\sin(\theta_2)}{|Z_2|} \quad (2.37)$$

$$|Z_2| = \sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + SX_2^2} \quad (2.38)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{SX_2}{R_2}\right) \quad (2.39)$$

$$|Z| = \sqrt{\left(R_1 + \frac{a}{a^2+b^2}\right)^2 + \left(X_1 + \frac{b}{a^2+b^2}\right)^2} \quad (2.40)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{(a^2+b^2)X_1+b}{(a^2+b^2)R_1+a} \right] \quad (2.41)$$

### 2.5.3 Magnetizing curve และ Self – Excitation

Magnetizing curve เป็นลักษณะการอิ่มตัว (Saturated) หรือ เป็น Excitation curve ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องโดยตรงกับคุณภาพของแกนเหล็ก ขนาดและรูปร่างทั้งหมด รวมทั้งขดลวดอีกด้วย อาจกล่าวได้ว่า คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถพิจารณาได้จากกราฟที่ Terminal voltage ให้ Magnetizing current ไปยังขดลวด โดยทั่วไปแล้ว Magnetizing curve จะอยู่ในพจน์ของ Polynomial หรือนิพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$L_m = a_0 + a_1 V_{ph} + a_2 V_{ph}^2 + a_3 V_{ph}^3 + a_4 V_{ph}^4 \quad (2.42)$$

$$X_m = F\omega_s L_m = \frac{V_g}{I_m} = F(K_1 e^{K_2 I_m^2} + K_3) \quad (2.43)$$

เครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นก่อนที่จะทำงานเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ จำเป็นจะต้องป้อนกระแส Magnetizing current ( $I_m$ ) ก่อนเพื่อสร้าง Residual Magnetism โดยการป้อนแรงดันเข้าไปที่ Terminal เพื่อให้ทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยปราศจากโหลดแล้ว ทำการวัดกระแสเปรียบเทียบกับแรงดัน โดยกราฟนี้จะเริ่มต้นที่ค่าของ Residual Magnetism (กระแสเป็นศูนย์) ซึ่งยังมีตกค้างอยู่ก่อนจะเริ่มการทดสอบ Hysteresis curve ในแกนเหล็กของเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่น่าสนใจของจุดนี้คือเมื่อเปรียบเทียบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator) ตัวเก็บประจุกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำหน้าที่เสมือนขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาดเริ่มต้นทำงาน Residual Magnetism ในขดลวดสนามจะกำเนิดแรงดันเริ่มต้นขึ้นซึ่งจะสร้างกระแสสนามขึ้น ภายในขดลวดก็จะสร้างแรงดันสนามมากขึ้นและต่อเนื่อง กระบวนการ การกระตุ้นตัวเองที่เกิดขึ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งในกรณีนี้ Residual Magnetism ภายในสเตเตอร์จะสร้างแรงดันเล็กๆขึ้นมาค่าหนึ่งหรือเรียกว่าการสร้าง Capacitive current ขึ้น กระแสดังกล่าวนี้จะไปสร้างให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นและแรงดันที่เพิ่มขึ้นนี้ก็จะไปกระตุ้นให้ Capacitive current เพิ่มสูงขึ้นไปอีกอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าหากปราศจาก Residual Magnetism เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะไม่สามารถสร้างแรงดันใดๆได้



รูปที่ 2.10 Magnetizing curve ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นการยากมากที่ Residual Magnetism จะเกิดการสูญเสียไปโดยสมบูรณ์ เพราะจะยังมีค่าน้อยๆตกค้างอยู่เสมอ แต่ถ้าหากมีการสูญเสียอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นด้วยวิธีใดก็แล้วแต่ โดยปกติจะมี 4 วิธีที่สามารถทำให้ Residual Magnetism ฟั่นตัวได้อีกครั้ง ดังนี้

1. โดยการป้อนแรงดันพิกัดให้เครื่องจักรหมุนด้วยความเร็วสูงๆ โดยแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ ในขณะที่ไม่มีโหลด จนกระทั่ง Residual Magnetism ฟั่นคืนตัวอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้เบตเตอร์จ่ายกระแสสูง (Current surge) เข้าที่ขดลวดเพียงชุดเดียวของเครื่องจักร
3. ทำการประจุตัวเก็บประจุที่ค่าสูงๆ เพื่อจะทำให้เกิด Current surge เช่นเดียวกับวิธีที่ผ่านมา
4. ใช้วงจรเรียงกระแส เพื่อใช้แทนเบตเตอร์ดังในวิธีที่สอง

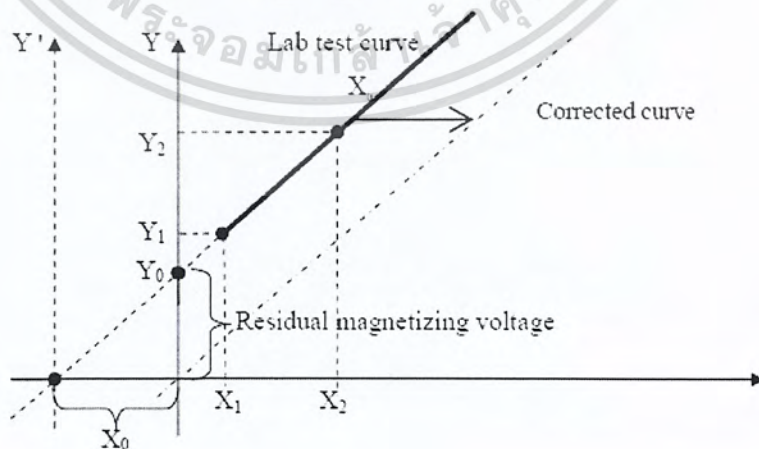
จากรูปที่ 2.10 เป็นเส้นโค้ง Magnetizing curve ที่ความถี่จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ โดยที่ค่าพารามิเตอร์จะนำมาใช้ในการชับแกนเพลลาของเครื่องจักร ในที่นี้จะให้การหมุนคงที่ระหว่างทำการทดสอบ หากควบคุมให้ได้แรงดันตามต้องการอาจจะต้องปรับเพิ่มหรือลดความเร็ว และการเปลี่ยนแปลงของความถี่นั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของโรเตอร์เช่นกัน

สำหรับการต่อใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบเดี่ยว (Stand-alone) ควรจะต่อสามเฟส Capacitor bank ดังเช่นเส้นโค้งการกระตุ้น(Excitation curve) ค่า Capacitor Reactance จะเป็นเส้นตรงผ่านไปยังจุดศูนย์ ซึ่งความชันเป็น

$$X_c = \frac{1}{\omega c} \quad (2.44)$$

ยังสามารถกล่าวได้อีกว่า ค่า Magnetizing current ล้าหลังแรงดันอยู่ประมาณ 90 องศา พร้อมยังขึ้นกับความสูญเสียของมอเตอร์ในกรณีไร้โหลด ในขณะนั้นกระแสที่ไหลไปยังตัวเก็บประจุจะมีมุมนำหน้าประมาณ 90 องศา

การชดเชยค่า Residual Magnetism นี้จะเป็นไปตามสมการที่ 2.45 และ 2.46 ซึ่งจากรูปที่ 2.11 เส้นประจะแสดงการชดเชยค่าอันเหมาะสม



**รูปที่ 2.11** การชดเชยค่า Residual Magnetism

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{x_2 + x_0}{x_1 + x_0} \quad (2.45)$$

จะได้

$$x_0 = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{y_1 - y_2} \quad (2.46)$$

สามารถหาค่า  $x_0$  จากค่าของ Residual Magnetism และจากจุดแรก ได้เป็น

$$x_0 = \frac{x_1 y_0}{y_1 y_0} \quad (2.47)$$

เราจะเห็นได้ว่าค่า Mutual inductance เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้เกิดการไม่เป็นเชิงเส้นขึ้น ในการคำนวณควรรพิจารณาสำหรับแต่ละกระแส Magnetism ( $I_m$ ) ชั่วขณะ

#### 2.5.4 คุณสมบัติของแรงบิดและความเร็วของ Induction generator

เราสามารถคำนวณแรงบิดและความเร็วของ Induction generator ได้ โดยการละลายค่า ความสูญเสีย Magnetizing ( $R_c$ ) จะได้สมการที่ใช้ในการหาค่า Air-gap power จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการหาค่ากำลังงานและแรงบิดได้ดังนี้

$$P_{\text{airgap}} = \frac{3I_2^2 R_2}{s} = \frac{3V_{\text{ph}}^2 R_2 / s}{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (2.48)$$

$$P_{\text{converted}} = (1 - s) P_{\text{airgap}} \quad (2.49)$$

$$T_{\text{converted}} = \frac{P_{\text{airgap}}}{\omega_s} \quad (2.50)$$

จากการหาค่ากำลังงานเอาท์พุท จะสามารถคำนวณหา Stray losses ความฝืดและความต้านทานอากาศ ได้เป็น

$$P_{\text{out}} = P_{\text{max}} - P_{\text{losses}} = -3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} - 3I_1^2 R_1 - \frac{3E_1^2}{R_m} - 3I_2^2 R_2 - P_{\text{frict+air}} - P_{\text{stray}} \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

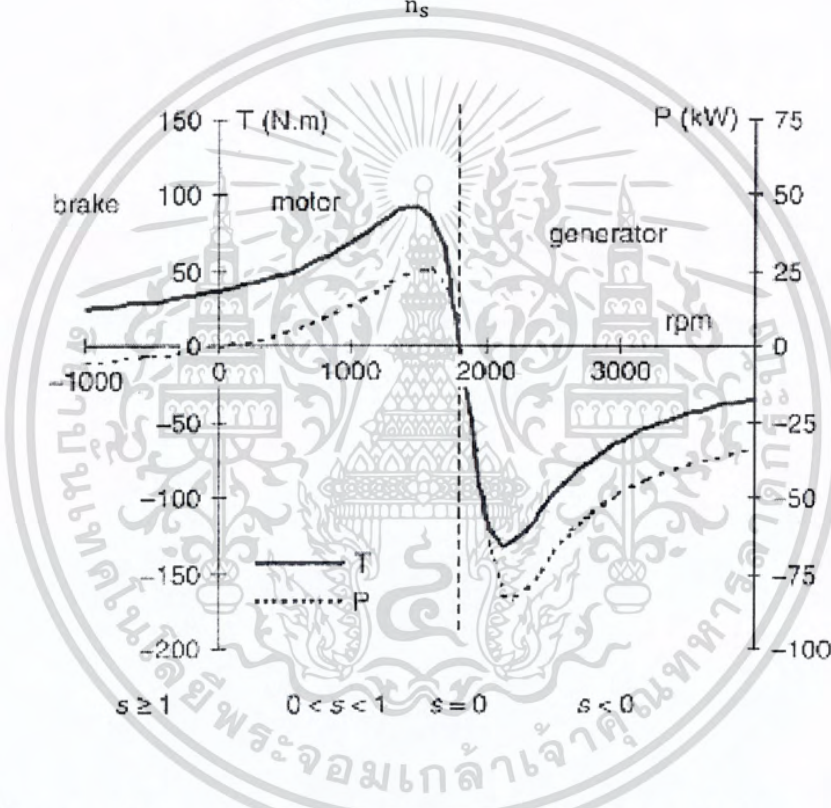
$$P_{out} = P_{airgap} - P_{losses} = -3I_2^2 R_2 \frac{1}{s} - 3I_1^2 R_1 - \frac{3E_1^2}{R_m} - P_{frict+air} - P_{stray} \quad (2.52)$$

แทนค่าสมการที่ 2.48 ลงในสมการที่ 2.50 จะได้

$$T_{converted} = \frac{\frac{3V_{ph}^2 R_2}{s}}{\omega_s [(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2]} \quad (2.53)$$

โดยที่

$$s = 1 - \frac{n_r}{n_s} \quad (2.54)$$



**รูปที่ 2.12** คุณลักษณะของแรงบิด-กำลังงาน-ความเร็วรอบของเครื่องจักรเหนี่ยวนำ  
ขณะทำงานในสภาวะ Break , Motor และ Generator

จากรูปที่ 2.12 จุดยอดของกำลังงานที่จ่ายออกโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต่างกันเพียงเล็กน้อยกับแรงบิดสูงสุด โดยธรรมชาติแล้วจะไม่มีกำลังงานไฟฟ้าที่จะแปลงไปอยู่ในรูปของกำลังงานทางกลเมื่อโรเตอร์หยุดนิ่ง ในทางเดียวกันก็ไม่ใช่ผลดีกับการหมุนด้วยเช่นกัน ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงโหลด แต่คุณลักษณะของ Torque-speed จะทำงานหนักขึ้นในการต่อใช้งานยานปกติ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงความถี่รวม ควรจะจำกัดไม่ให้มากกว่า 5% ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้ของโหลดส่วนใหญ่ในโรงจักรชนิด Stand-alone

### 2.5.5 คุณสมบัติระหว่างกำลังงานและกระแส

วิธีการอันเหมาะสมในการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสิ่งสำคัญคือต้องทราบคุณลักษณะของกำลังทางกลกับกระแสโหลด และจากการกำหนดกำลังทางกลของโรเตอร์ จากกำลังงานที่กระจายอยู่ในโรเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P_{mec} = 3I_2^2 \left( \frac{R_2}{s} - R_2 \right) \quad (2.55)$$

จากรูปที่ 2.12 ทำให้สมการที่ 2.55 ไม่ขึ้นกับค่าสลิป(s) และจากสมการที่ 2.48 สามารถหาค่า  $I_2$  ได้ ดังนี้

$$I_2 = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2.56)$$

จะได้

$$\frac{R_2}{s} = \left( \frac{V_{ph}}{I_2} \right)^2 - (X_1 + X_2)^2 - R_1 \quad (2.57)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.57 ลงใน สมการที่ 2.55 จะได้

$$P_{mec} = 3I_2^2 \left[ \sqrt{\left( \frac{V_{ph}}{I_2} \right)^2 - (X_1 + X_2)^2} - (R_1 + R_2) \right] \quad (2.58)$$

ส่วนที่สำคัญในสมการที่ 2.58 คือ

$$\left( \frac{V_{ph}}{I_2} \right)^2 \geq (X_1 + X_2)^2 \quad (2.60)$$

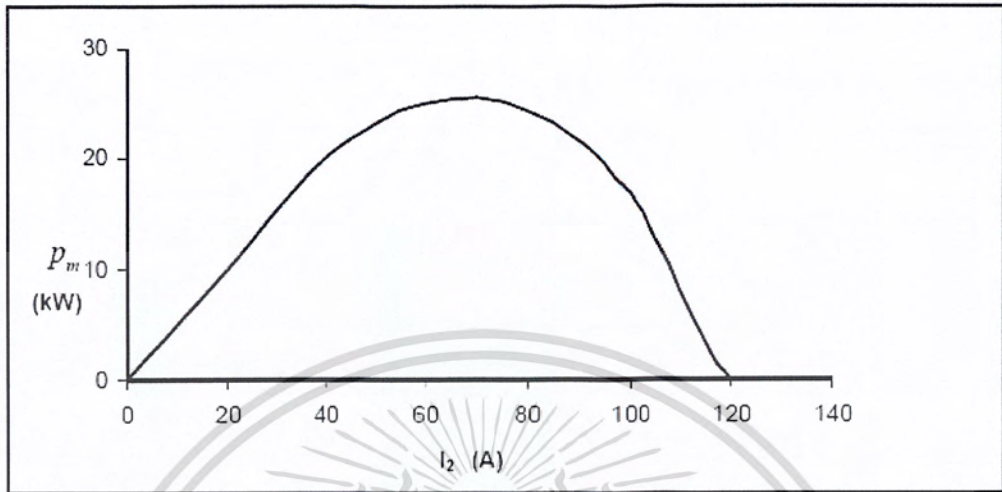
หรือ ได้ว่า

$$I_2 \leq \frac{V_{ph}}{X_1 + X_2} \quad (2.61)$$

กำลังงานสูงสุดหาได้โดยการแทนค่า อสมการที่ 2.61 แทนลงในสมการที่ 2.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{\text{mec(max)}} = -I_2^2(R_1 + R_2) \quad (2.62)$$



**รูปที่ 2.13** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $V_{\text{ph}}=220$ )

ข้อสังเกตคือ  $I_2$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $I_1$  เมื่อละเลย Excitation admittance เครื่องหมายลบในสมการที่ 2.61 คือกำลังงานที่ไหลย้อนกลับไปสู่ Terminal ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สมการที่ 2.58 สามารถนำมาพล็อตได้ดังรูปที่ 2.13 เมื่อสมมติให้แรงดันเอาต์พุตคงที่

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนั้นการที่เราจะออกแบบสร้างชุดชุดเซยกกำลังฟ้าเสมือนได้นั้นเราต้องหาค่าตัวเก็บประจุที่จะใช้ในการสร้างแรงดันที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองที่เรานำมาทดสอบ ต่อมาคือการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ ออกแบบวงจรชุดชนวนไดรแอกและการออกแบบวงจรป้อนกลับเพื่อควบคุมการปรับมุมจุดชนวนของไดรแอกเพื่อรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง

#### 3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์จะทำการทดสอบในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าสมดุล (Balance Phase) มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งมีรายละเอียดของ Nameplate ดังนี้

**ตารางที่ 3.1** รายละเอียด Nameplate ของ Induction motor

Three Phase Induction Motor		
2 HP 4 POLE TYPE SF-JR 50 Hz		
VOLT	220	380
AMP	6.0	3.5
RPM	1450	1450

##### 3.1.1 การทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล (No-load test)

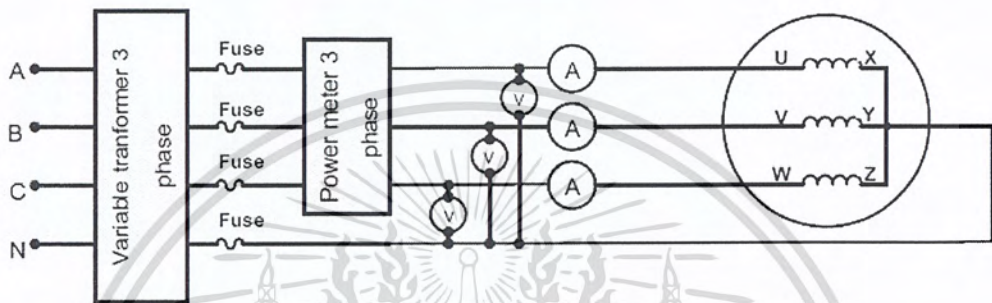
เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- |   |           |
|---|-----------|
| 1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 Hp 4 pole 220/380 V | 1 ตัว     |
| 2. Voltage regulator 3 เฟส 0-400 V              | 1 เครื่อง |
| 3. Digital Multi meter                          | 1 ตัว     |
| 4. Digital Power meter                          | 1 เครื่อง |
| 5. Tachometer                                   | 1 ตัว     |
| 6. Fuse 10 A                                    | 3 ตัว     |
| 7. แผงต่อวงจร                                   | 2 ชุด     |
| 8. สายต่อวงจร                                   | 20 เส้น   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

1. ต่อดวงจรดังรูป 3. 1
2. ทำการทดสอบ No-load test โดยการปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ได้แรงดันเท่ากับแรงดันที่พิกัดของมอเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกล
3. วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า , กระแสไฟฟ้า , กำลังไฟฟ้า ของ แต่ละเฟส แล้วปรับแรงดันไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์



รูปที่ 3.1 วงจรการทดสอบ No-load test

#### 3.1.2 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Blocked-rotor test)

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

- |   |           |
|---|-----------|
| 1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 Hp 4 pole 220/380 V | 1 ตัว     |
| 2. Voltage regulator 3 เฟส 0-400 V              | 1 เครื่อง |
| 3. Digital Multi meter                          | 1 ตัว     |
| 4. Digital Power meter                          | 1 เครื่อง |
| 5. Fuse 10 A                                    | 3 ตัว     |
| 6. แผงต่อดวงจร                                  | 2 ชุด     |
| 7. สายต่อดวงจร                                  | 20 เส้น   |

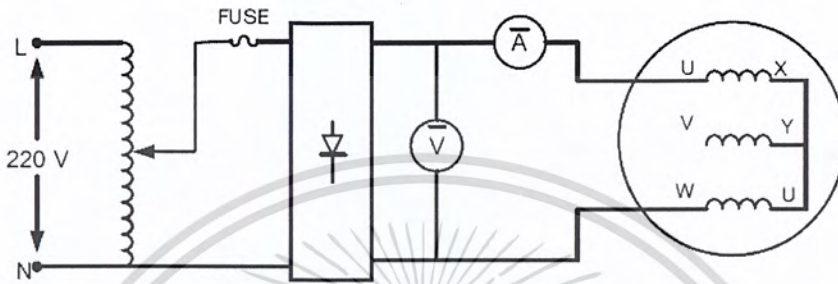
### ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

1. ต่อดวงจรเหมือนการทดสอบแบบ No-load test
2. บล็อกโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อยู่นิ่ง
3. จ่ายกระแสพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
4. วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า , กระแสไฟฟ้า , กำลังไฟฟ้า ของ แต่ละเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การทดสอบ VI-method test โดยที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวด ค่อยๆ ปรับแรงดันที่น้อยจนถึงพิกัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แล้วทำการ วัดและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ในแต่ละขั้นที่เพิ่ม จนถึงพิกัดกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบนี้ คือ จากการทดสอบรูปที่ 3.2

$$R_1 = \frac{1\Delta V_{dc}}{2\Delta I_{dc}} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบ VI-method test

3.1.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณหาตามมาตรฐาน IEEE Std. 122-1996 จะมีวิธีการและการคำนวณดังต่อไปนี้

1. หาค่า  $X_m$  จากสมการที่ (3.3) โดยสมมติค่า  $\frac{X_1}{X_m}$  และ  $X_m$  ขึ้นมาก่อน

$$\text{เมื่อ} \quad VAR_0 = \sqrt{(mV_0 I_0)^2 - P_0^2} \quad (3.2)$$

$$\text{จะได้} \quad X_m = \frac{mV^2}{VAR_0 - mI_0^2 X_1 \left[ \frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_m}} \right]^2} \quad (3.3)$$

2. หาค่าของ  $X_{1br}$  จากสมการที่ (3.5) โดยใช้ค่าของ  $\frac{X_1}{X_m}$  จากขั้นตอนที่ 1

$$\text{เมื่อ} \quad VAR_{br} = \sqrt{(mV_{br} I_{br})^2 - P_{br}^2} \quad (3.4)$$

$$\text{จะได้} \quad X_{1br} = \frac{VAR_{br}}{mI_{br}^2 \left( 1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right)} \left( \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right) \quad (3.5)$$

3. หาค่า  $X_1$  จากสมการ (3.6)

$$X_1 = \frac{f}{f_b} X_{1br} \quad (3.6)$$

4. หาค่าของ  $X_m$  จากสมการที่ (3.3) โดยใช้ค่าของ  $X_1$  จากขั้นตอนที่ 3 และอัตราส่วนของ  $\frac{X_1}{X_m}$  จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คำนวณไปจนกระทั่งค่าของ  $X_1$  และ  $X_m$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือจนกระทั่งมีค่าผิดพลาดประมาณ 0.1 % หรือน้อยกว่า
6. นำค่าของ  $X_1$  และ  $X_m$  ที่ได้ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$X_2 = \frac{X_1}{\frac{X_1}{X_2}} \quad (3.7)$$

$$P_{\text{core}} = P_0 - P_{f\&w} - ml_0^2 R_1 \quad (3.8)$$

$$g_c = \frac{P_{\text{core}}}{mV_0^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_2}\right) \quad (3.9)$$

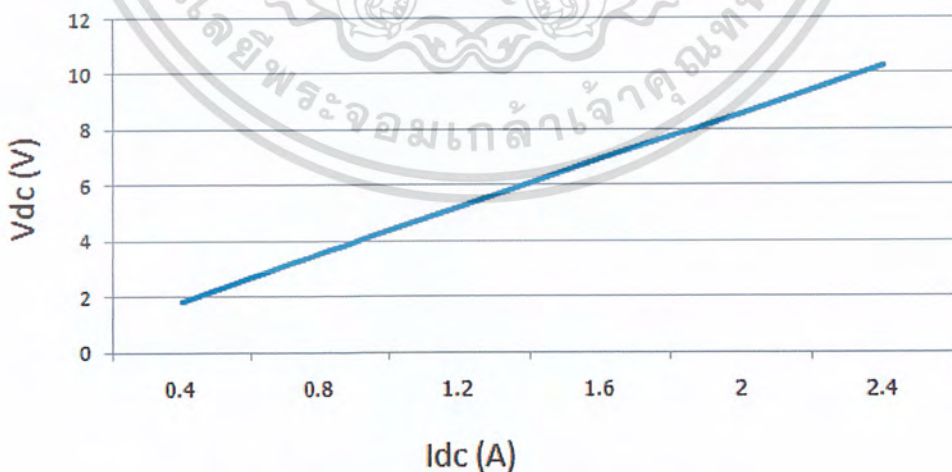
$$R_c = \frac{1}{g_c} \quad (3.10)$$

$$R_2 = \left(\frac{W_L}{ml_{br}^2} - R_1\right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2 - \left(\frac{X_1}{X_2}\right)^2 (X_{1br} g_c) \quad (3.11)$$

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบ VI-method test

VI - method						
$V_{dc}$ (V)	1.856	3.593	5.230	6.950	8.540	10.290
$I_{dc}$ (A)	0.4	0.8	1.2	1.4	1.6	1.8

สามารถหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_1$ ) ได้โดยทำการพล็อตกราฟหาค่าความชันดังรูป 3.5



รูปที่ 3.3 กราฟผลการทดสอบ VI-method test

คำนวณหาความต้านทาน  $R_1$  ได้ โดยอาศัยสมการ (3.1) จากกราฟได้สมการเส้นตรง

$$y = 4.21x + 0.1782 \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่า  $R_1$  ได้เท่ากับ 4.31 โอห์ม

**ตารางที่ 3.3** ผลการทดสอบเมื่อไร้ภาระทางกล No-load Test

$V_{in}$ (V)			$I_{in}$ (A)			$P_{in}$ (W)		
$V_a$	$V_b$	$V_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$P_a$	$P_b$	$P_c$
220.6	221.9	222.4	1.64	1.65	1.76	60	60	80

**ตารางที่ 3.4** ผลการทดสอบยึดโรเตอร์ ( Blocked-rotor test )

$V_{in}$ (V)			$I_{in}$ (A)			$P_{in}$ (W)		
$V_a$	$V_b$	$V_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$P_a$	$P_b$	$P_c$
73.1	72.4	72.4	6.00	5.86	5.95	310	300	290

**ตารางที่ 3.5** ผลการทดสอบ  $P_{f\&w}$

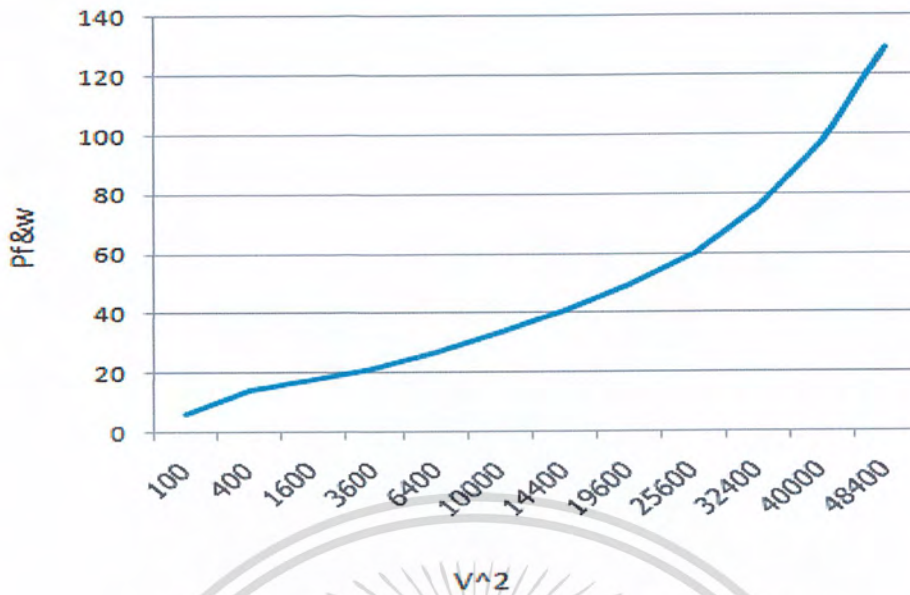
$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (V)	$P_{in}$ (W)	$V_{in}^2$ (V)	$P_{f\&w}$ (W)
221.63	1.68	66.67	49121.33	28.07
201.50	1.44	53.33	40602.25	25.09
181.03	1.25	43.33	32773.07	22.05
160.77	1.08	33.33	25845.92	17.45
140.70	0.94	23.33	19796.49	11.30
120.70	0.80	23.00	14568.49	14.62
100.53	0.67	13.00	10106.95	2.28
80.43	0.53	10.00	6468.52	6.13
60.67	0.41	10.00	3680.44	7.71
40.46	0.29	5.33	1636.74	4.21
20.23	2.67	2.67	409.12	2.16

จากตาราง 3.5 เราสามารถหาค่าของกำลังสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม (Friction and Windage loss) ได้จากการพล็อตกราฟ โดยให้แกน X เป็นค่าของแรงดันไฟฟ้ากำลังสอง ( $V_{in}^2$ ) ส่วนแกน Y ให้เป็นค่า กำลังสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม ( $P_{f\&w}$ ) ซึ่งหาจากสมการ

$$P_{f\&w} = P_{in} - 3I_0^2 R_1 \quad (3.13)$$

ซึ่งจากกราฟจะได้ค่ากำลังความสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลมได้เท่ากับ 3.62 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กราฟผลการทดสอบหาความผิดและแรงต้านลม

จากข้อมูลข้างต้นสามารถคำนวณค่าของ  $X_1$  และ  $X_m$  ได้จากสมการ (3.3) และ (3.6) โดยทำการคำนวณตามขั้นตอนการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996

ตารางที่ 3.5 ค่า  $X_1$  และ  $X_m$  จากการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE Standard 112-1996

รอบที่	$X_m$	$X_1$	%Error $X_1$	%Error $X_2$
1	99.139	7.837	-	-
2	120.462	4.055	21.51	48.26
3	127.365	3.993	5.73	1.53
4	127.886	3.992	0.41	0.02
5	127.919	3.991	0.02	0.02

จากตารางได้ค่าของ  $X_1$  เท่ากับ 3.991 โอห์ม และ  $X_m$  เท่ากับ 127.919 โอห์ม จากสมการที่ (3.8)

$$P_{core} = (3 \times 66.67) - 3.62 - (3 \times 1.68^2 \times 4.31) = 159.74 \text{ W}$$

จากสมการที่ (3.9)

$$G_c = \frac{159.74}{3 \times 221.63^2} \left(1 + \frac{3.991}{127.919}\right)^2 = 0.001153$$

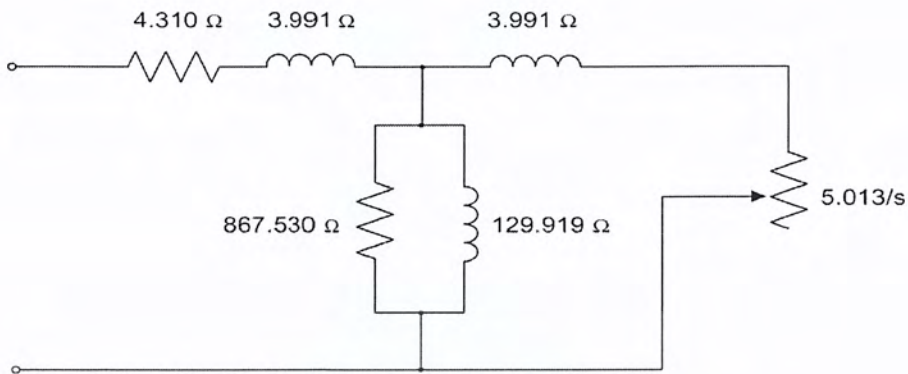
จากสมการที่ (3.10)

$$R_c = \frac{1}{0.0011523} = 867.5305 \text{ Ohm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ (3.11) สามารถหา  $R_2$  ได้เท่ากับ 5.013 โอห์ม

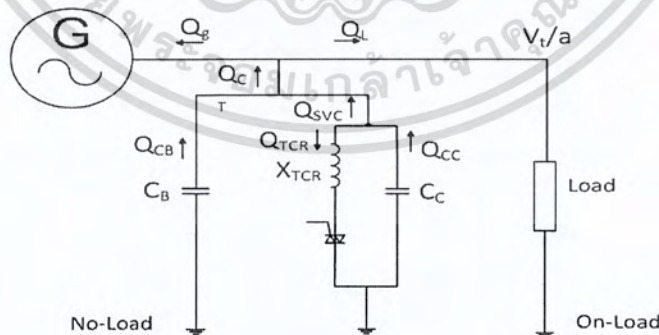
จากการคำนวณได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 3.2 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุสำหรับชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไตรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์

สำหรับการต่อตัวเก็บประจุกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองเข้าสู่ระบบแสดงได้ในรูปที่ 3.8 ซึ่งตัวเก็บประจุประกอบด้วย ตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $C_b$ ) และตัวเก็บประจุของชุดชดเชยสแตติควาร์ ( $C_c$ ) ตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $C_b$ ) จะทำหน้าที่สร้างแรงดันขึ้นในขณะที่ไม่มีการทางไฟฟ้า ในขณะที่ตอนมีการทางไฟฟ้าเราใช้ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไตรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Triac Controlled Reactor, FC-TCR) ซึ่งจะใช้  $C_c$  ในการทำงาน



รูปที่ 3.6 แผนภาพ single line ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง ชนิดตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบคาปาซิเตอร์ (FC) และไตรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Triac Controlled Reactor, FC-TCR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ( $C_b$ )สามารถหาได้จากสมการ

$$C_b = \frac{1}{\{2\pi f_b Z_b a_{\max}^2 (X_1 + X_{CD})\}} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $Z_b$  คือค่าอิมพีแดนซ์หน่วย

$f_b$  คือ ค่าความถี่ต่อหน่วย

$a_{\max}$  คือค่า coefficient

ซึ่งสามารถหาค่า  $a_{\max}$  ได้จากสมการ

$$a_{\max} = b - \frac{b}{2} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{b_c}{b}\right)^2}}{1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)\left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2} \right] \quad (3.15)$$

และสามารถหาค่า  $b_c$  ได้จาก

$$b_c = \frac{2R_1}{X_m} \sqrt{\frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{X_2}{X_m}\right)^2} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $b_c$  คือค่า critical speed

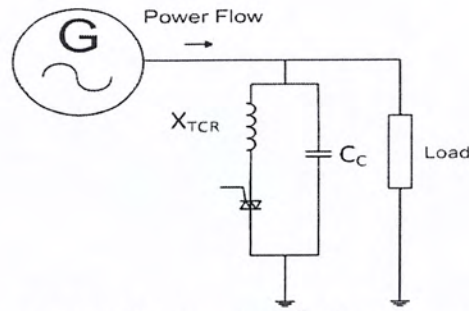
และหาค่า  $X_{CD}$  ได้จากสมการ

$$X_{CD} = \frac{R_2^2 X_m + (a-b)^2 X_m X_2 (X_m + X_2)}{R_2^2 + (a-b)^2 (X_m + X_2)^2} \quad (3.17)$$

เมื่อ  $a$  คือค่าความถี่ต่อหน่วย

$b$  คือค่าความเร็วรอบต่อหน่วย

จากสมการข้างต้นทำให้เราสามารถหาค่า ตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้เท่ากับ 24  $\mu\text{F}$  แต่ในการออกแบบสร้างตัวขดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือนเราจะสร้างตัวขดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไตรแอกคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Triac Controllerd Reactor, FC-TCR) ดังรูป 3.9



**รูปที่ 3.7** แผนภาพ single line ของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไตรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ (Fixed Capacitor Triac Controller Reactor, FC-TCR)

จากรูปเราจะใช้ตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวโดยรวมตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของชุดชดเชยสเตตติควาร์ไว้ด้วยกันซึ่งตัวเก็บประจุที่จะเลือกใช้นี้ต้องมีค่ามากกว่าค่าตัวเก็บประจุสำหรับสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เราสามารถคำนวณได้ข้างต้น เพื่อที่จะสามารถชดเชยแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ซึ่งเราเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ( $C_c$ ) เท่ากับ  $60 \mu\text{F}$

### 3.3 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำสำหรับชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไตรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์

จากรูปที่ 3.8 เราสามารถคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$Q_{ct} = Q_g + Q_L \quad (3.18)$$

$$Q_L = \frac{(V_t/a)^2}{X_L} \quad (3.19)$$

$$Q_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2} = I_g^2 x_1 + I_0^2 x_m + I_2^2 x_2 \quad (3.20)$$

เมื่อ	$S_g$	คือ	กำลังไฟฟ้าปรากฏของ SEIG ต่อเฟส
	$P_g$	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG ต่อเฟส
	$Q_g$	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนของ SEIG ต่อเฟส
	$Q_L$	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนของ Load ต่อเฟส
	$Q_{ct}$	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนทั้งหมดของตัวเก็บประจุต่อเฟส
	$a$	คือ	ความเร็วรอบต่อหน่วย

สำหรับตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนคือ

$$Q_{svc} = Q_{ct} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $Q_{svc}$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชย ต่อเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดชดเชยจะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมจุดชนวนไทรแอกที่มุม 180 องศา ซึ่งขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุสำหรับรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจะหาได้จาก

$$Q_{svc} = Q_{cc} \quad (3.22)$$

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t/a} \quad (3.23)$$

$$X_{cc} = \frac{V_t/a}{I_{cc}} \quad (3.24)$$

ขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดชดเชยจะมีค่าต่ำสุดเมื่อมุมจุดชนวนไทรแอกที่มุม 90 องศา ดังนั้น

$$X_{TCR} = X_{cc} \quad (3.25)$$

$$L_{TCR} = \frac{X_{cc}}{2\pi f} \quad (3.26)$$

เมื่อ	$Q_{cc}$	คือ	กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุ ต่อเฟส
	$I_{cc}$	คือ	กระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ ชดเชยเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
	$X_{cc}$	คือ	ค่าคาปาซิแตนซ์ต่อเฟส
	$X_{TCR}$	คือ	ขนาดอิมพีแดนซ์ของรีแอกเตอร์

จากสมการข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 170 mH

### 3.4 การออกแบบชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไทรแอกคอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์

ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนถูกใช้ในการรักษาระดับแรงดันที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองโดยการเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบเพื่อการปรับค่าตัวประกอบกำลัง โดยที่จะอาศัยไทรแอกต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำและขนานอยู่กับตัวเก็บประจุ แสดงแบบต่อเฟสได้ในรูปที่ 3.8 โดยสำหรับการแสดงแบบสามเฟสทำได้โดยการใช้ตัวชดเชยสแตติกวาร์ 3 ชุดต่อแบบเดลต้า

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{SVC} = \frac{\pi X_L X_C}{X_C(2\pi - 2\alpha + \sin \alpha) - \pi X_L} \quad (3.28)$$

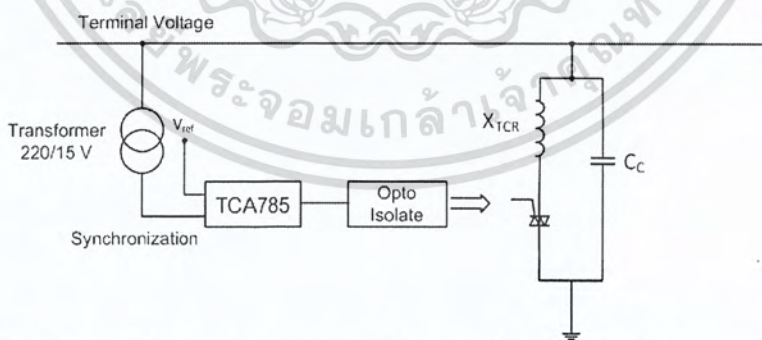
$$Q_{SVC} = \frac{V_t^2}{X_{SVC}} \quad (3.29)$$

- เมื่อ  $X_{TCR}$  คือ อิมพีแดนซ์ของไทรแอกควบคุมรีแอกเตอร์  
 $X_{SVC}$  คือ อิมพีแดนซ์รวมของตัวชดเชย  
 $Q_{SVC}$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชย

สำหรับการควบคุมรีแอกเตอร์จะใช้ไทรแอกซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับการนำเอาเอสซีอาร์ 2 ตัวมาต่อขนานกันในลักษณะกลับขั้ว ส่วนขาเกตต่อร่วมเข้าด้วยกัน ดังนั้นไทรแอกจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม ระบบไฟได้ทั้งแบบไฟตรง และไฟสลับ นั่นคือความสามารถในการนำกระแสได้ทั้งสองทิศทาง

จุดเด่นของไทรแอกคือ

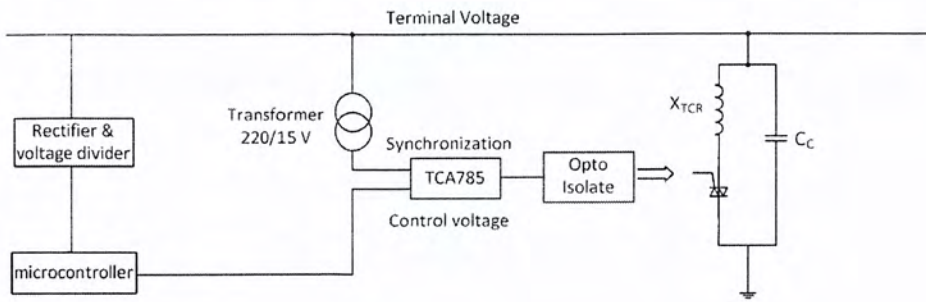
1. ไทรแอกสามารถทนการกระชากของกระแสได้สูง เช่นโดยปกติสำหรับไทรแอกที่ทนกระแสปกติได้ 10 แอมแปร์ (rms) สามารถทนการกระชากของกระแสในช่วงหนึ่ง คาบเวลาของไฟ 60 เฮิร์ตซ์ได้สูงถึง 100 แอมแปร์
2. ถ้าในกรณีที่ MT2 และ MT1 ถูกป้อนด้วยแรงดันบวกและลบตามลำดับไทรแอกจะถูกกระตุ้นให้ทำงานได้โดยการป้อนสัญญาณพัลส์เพียงสั้น ๆ ที่เกิดของมัน โดยจะมีแรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 โวลต์ เท่านั้น และก็เช่นกันคือเมื่อไทรแอกเริ่มทำงานแล้ว ก็จะสามารถคงสภาพการทำงานอยู่เช่นนั้นต่อไปเรื่อย ๆ ตรวจจับที่ยังมีกระแสไหลผ่านตัวมันอย่างต่อเนื่องสำหรับโครงสร้างการควบคุมสัญญาณเกตของไทรแอกนั้นจะใช้โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3.8 โครงสร้างการจุดชนวนของตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบต่อเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การรักษาระดับแรงดันโดยใช้ Microcontroller ในการควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 3.9 โครงสร้างการสั่งการ TCA785 โดยใช้ microcontroller ในการควบคุมแบบป้อนกลับ

ในการรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของ SEIG ในสภาวะต่างๆสามารถอธิบายด้วยหลักการง่ายๆ คือ เมื่อแรงดันสูงขึ้นจากการเพิ่มความเร็วรอบหรือการลดลงของโหลดไดรแอกจะต้อง On เพื่อสวิตซ์รีแอคเตอร์เข้าสู่ระบบให้แรงดันลดลงสู่ในระดับที่ต้องการใช้งานและเมื่อแรงดันที่ขั้วลดลงจากการที่ความเร็วรอบลดลงหรือโหลดมีการเพิ่มขึ้นนั้นไดรแอกจะต้องค่อยๆ off เพื่อให้รีแอคเตอร์ออกจากระบบจนกว่าแรงดันที่ขั้วจะเพิ่มขึ้นจนถึงในระดับที่ต้องการใช้งาน

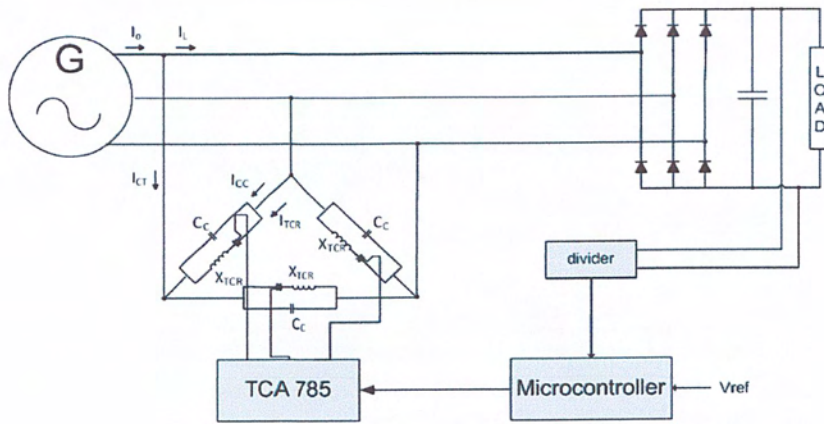
สำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับนั้นจะอาศัยการทำงานของ Microcontroller แสดงในรูปที่ 3.10 โดยใช้ PIC 16f877 ในการสร้างสัญญาณ PWM ส่งไปยังขาเกตของ MOSFET เพื่อลดทอนแรงดัน สำหรับ Duty cycle ของสัญญาณ PWM นั้น Microcontroller จะรับค่าแรงดันป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

เมื่อ  $V_f < V_{ref}$  Duty cycle จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

$V_f > V_{ref}$  Duty cycle จะลดลงเรื่อยๆ

และ  $V_f = V_{ref}$  Duty cycle จะคงค่าไว้

และการ on-off ของไดรแอกนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนเข้าสู่ขา 11 ของ TCA785 โดยช่วงที่ ไดรแอกจะ on-off จะอยู่ในช่วงแรงดันระหว่าง 5-8 V โดยแรงดันในช่วงนี้จะเมื่อนำไปป้อนเข้าที่ขา 11 ของ TCA785 จะทำการปรับมุมจุดชนวนไดรแอกซึ่งอยู่ในช่วง 90-180 องศา จากหลักการนี้ทำให้เราสามารถรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตนเองได้ ซึ่งไดอะแกรมการทำงานของระบบแสดงดังรูป 3.11



รูปที่ 3.10 วงจรการรักษาระดับแรงดันอัตโนมัติแบบไดรแอกคอนโทรล  
รีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบไดรแอกคอนโทรลรีแอกเตอร์ ร่วมกับคาปาซิเตอร์ในการรักษาระดับแรงดัน

#### 4.1 บทนำ

สำหรับการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเองนั้นมีขนาด 1.5 kW 4 ขั้วแม่เหล็ก 220 โวลต์ กระแสฟลักซ์ 6 แอมป์ ดังรูปที่ 4.1 โดยชุดชดเชยที่ออกแบบมีขนาดคาปาซิเตอร์ 60  $\mu\text{F}$  และรีแอกเตอร์มีขนาด 170 mH จำนวนอย่างละ 3 ตัว โดยต้นกำลังใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสมมุติแทนแรงขับจากลม



รูปที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเอง

การทดสอบแบ่งเป็นในสถานะมีภาระและไม่มีภาระและการเปลี่ยนแปลงสถานะของความเร็วลมรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของภาระขนาดต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่มีชุดชดเชยและไม่มีชุดชดเชยเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลสำหรับการติดตั้งเพื่อบรรลุเป้าหมายในการรักษาระดับแรงดันที่สถานะต่างๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบในสภาวะไม่มีภาระ

สำหรับการทดสอบโดยไม่มีภาระนั้นจะทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่มีชุดชดเชยและไม่มีชุดชดเชยโดยจะวิเคราะห์ผลการ build up แรงดันเมื่อความเร็วลมค่อยๆ เพิ่มขึ้นและแสดงผลในรูปกราฟ

### 4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

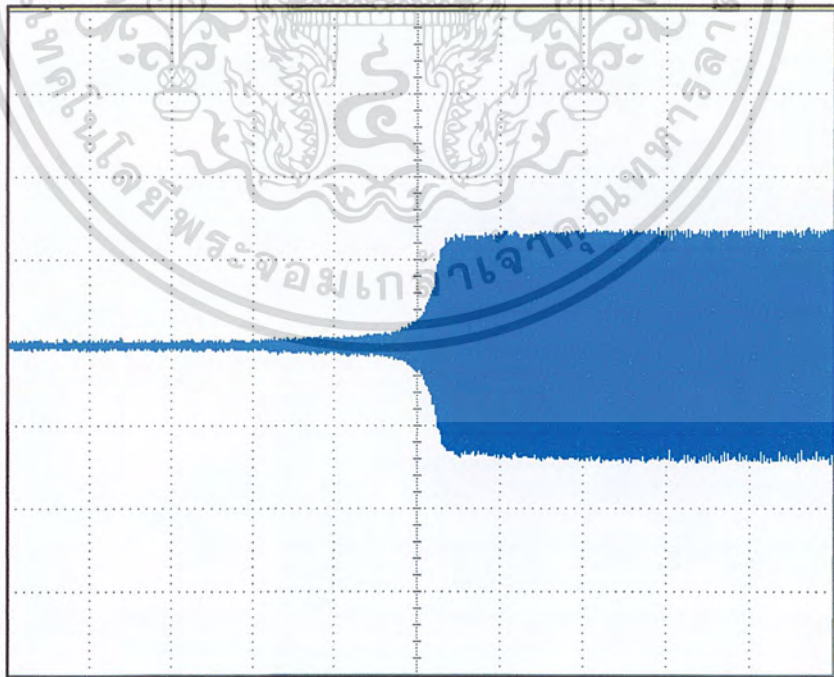
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2HP 4 pole 220/380	1 ตัว
- ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน	1 ชุด
- Volt meter	1 ตัว
- ชุดต้นกำลังประกอบด้วยมอเตอร์ 5.5HP และ Inverter	1 ชุด
- Oscilloscope	1 ตัว

### 4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ต่อชุดชดเชยเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- Oscilloscope จับที่ตำแหน่ง Line-Line
- Volt meter จับที่ตำแหน่ง Line-Line
- ควบคุมความเร็วรอบที่ Inverter ค่อยๆ เพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 1250 รอบ
- วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่เพิ่มขึ้นกับแรงดัน Line-Line ผลการทดลองดัง

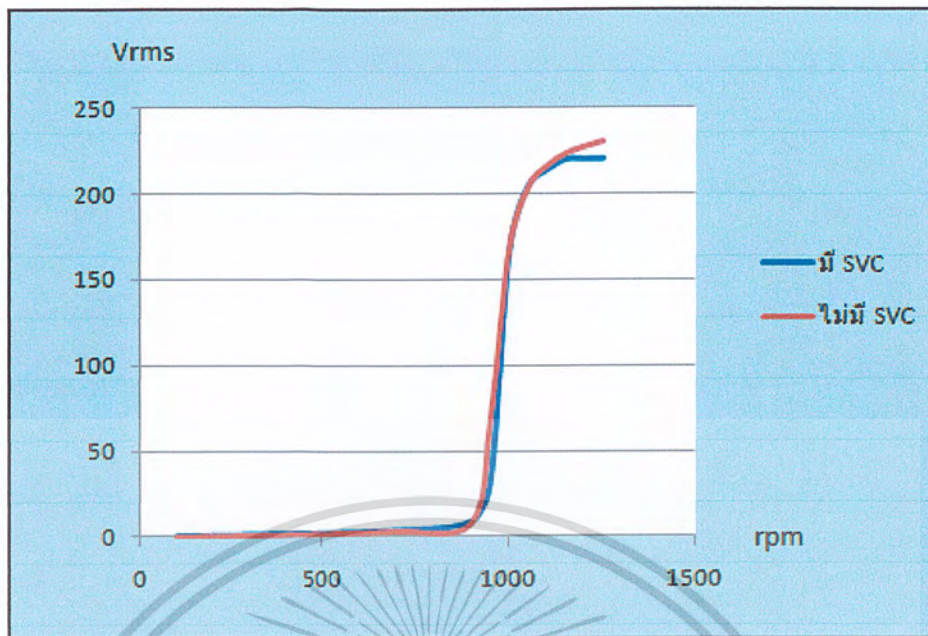
รูปที่ 4.3

- ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยไม่ต้องนำชุดชดเชยต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

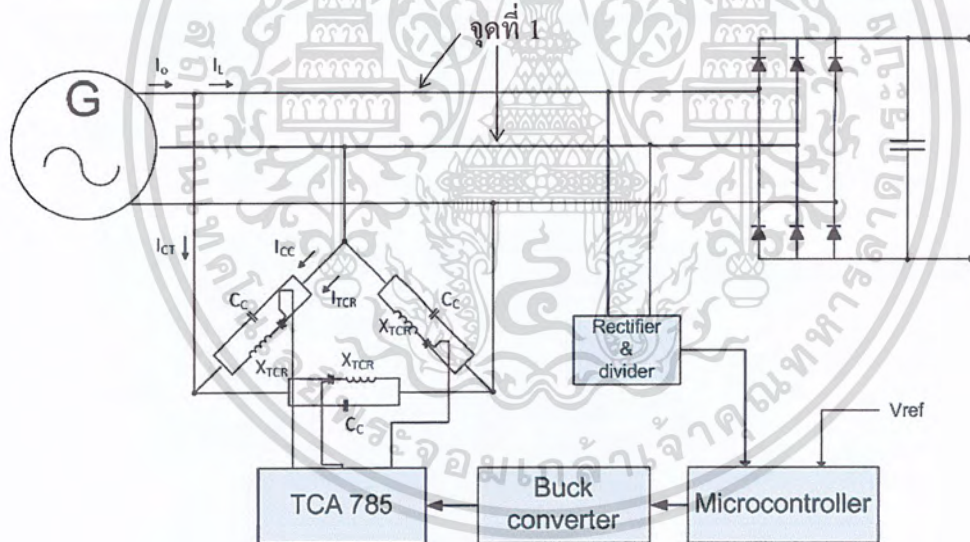


รูปที่ 4.2 การ build up แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นและแรงดันที่ขั้วของผลการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนและไม่ได้ติดตั้ง



รูปที่ 4.4 จุดที่ทำการวัด

### 4.3 การทดสอบในสภาวะมีภาระ

สำหรับการทดสอบโดยมีภาระนั้นเราจะค่อยๆเพิ่มโหลดขึ้นในสภาวะคงตัวที่แรงดัน DC 311 Volt โดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีชุดชดเชยและไม่มีชุดชดเชย แสดงผลในรูปกราฟเปรียบเทียบโดยภาระมากที่สุดที่ทดสอบคือ 800W

#### 4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

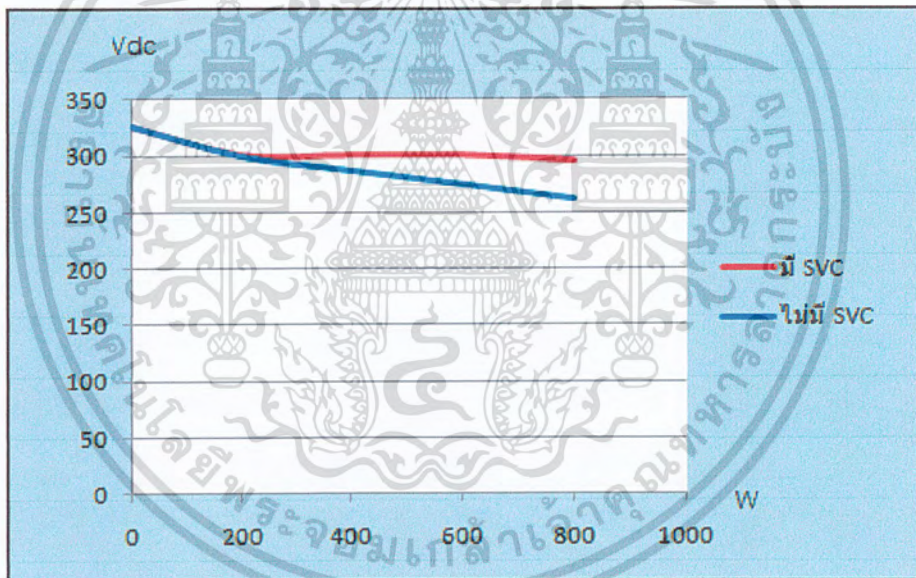
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2HP 4 pole 220/380 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชุดชุดเซยกำลังไฟฟ้าเสมือน	1 ชุด
- Volt meter	1 ตัว
- ชุดต้นกำลังประกอบด้วยมอเตอร์ 5.5HP และ Inverter	1 ชุด
- Oscilloscope	1 ตัว
- แผงโหลดขนาด 800W	1 ตัว

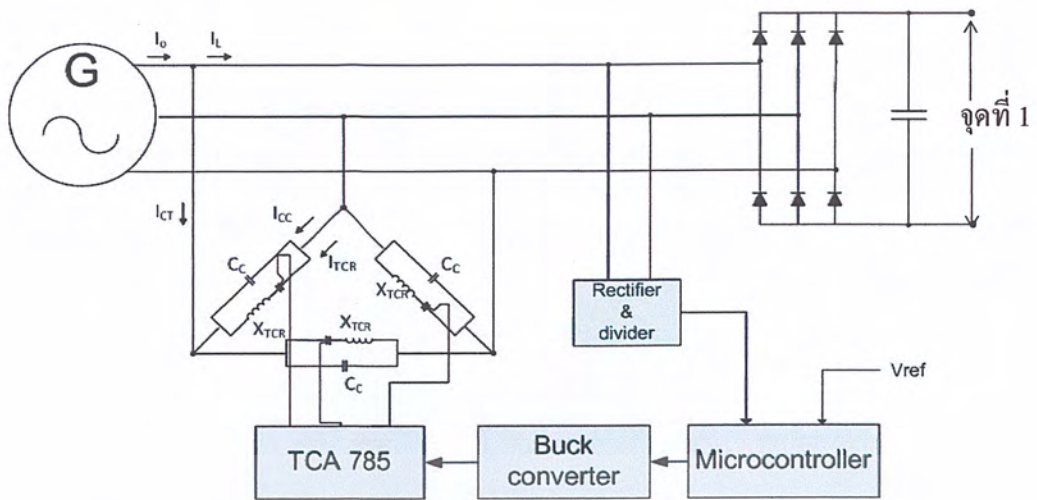
#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ต่อชุดเซยกเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- Oscilloscope จับที่ตำแหน่ง Line-Line
- Volt meter จับที่ตำแหน่ง Line-Line
- ควบคุมความเร็วรอบที่ Inverter ค่อยๆเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อยๆจนถึง 1250 รอบ
- ค่อยๆเพิ่มโหลดขึ้นทีละ 200W จนถึง 800W
- วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5
- ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยไม่ต้องนำชุดเซยกต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่เพิ่มขึ้นและแรงดันกระแสตรงที่ขั้วของผลการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดเซยกกำลังไฟฟ้าเสมือนและไม่ได้ติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 จุดที่ทำการวัด

#### 4.4 การทดสอบในสภาวะมีภาระกะทันหัน

สำหรับการทดสอบโดยมีภาระกะทันหันนั้นเราจะเพิ่มโหลดขึ้นในสภาวะคงตัวที่แรงดัน DC 311 Volt AC 220 Volt โดยวิเคราะห์การทำงานระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีชดชดเชยและไม่มีชดชดเชย แสดงผลในรูปกราฟแต่ละรูป

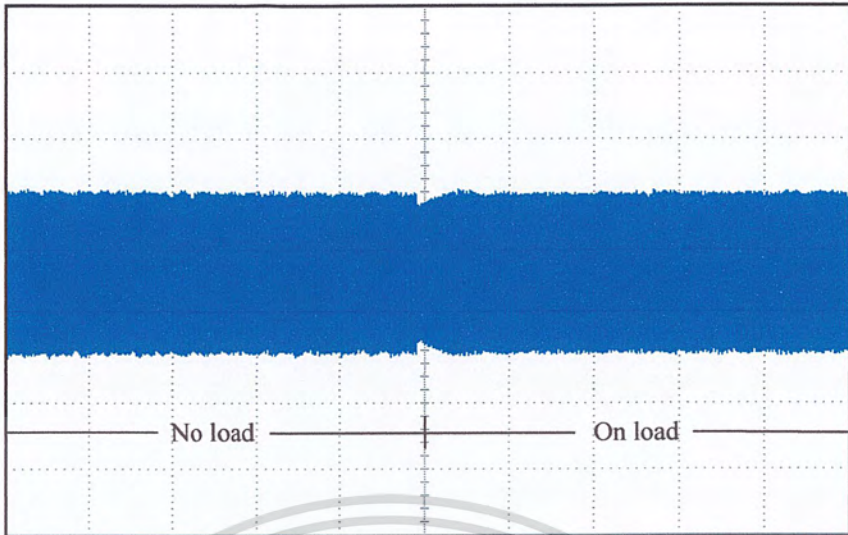
##### 4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- |   |       |
|---|-------|
| - เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2HP 4 pole 220/380 | 1 ตัว |
| - ชดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน                                   | 1 ชุด |
| - Volt meter  | 1 ตัว |
| - ชุดต้นกำลังประกอบด้วยมอเตอร์ 5.5HP และ Inverter           | 1 ชุด |
| - Oscilloscope  | 1 ตัว |
| - แผงโหลดขนาด 800W  | 1 ตัว |

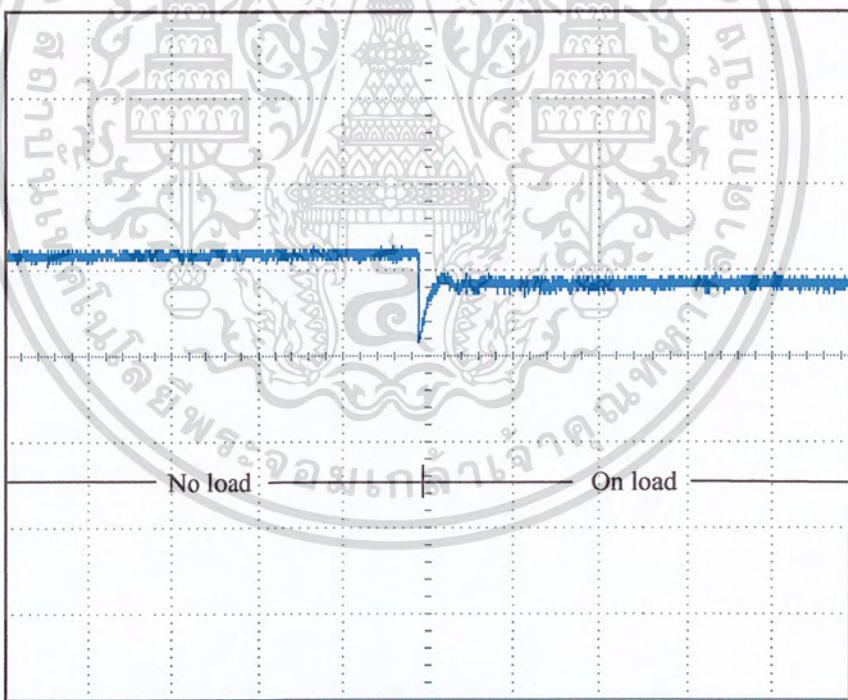
##### 4.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ต่อชดชดเชยเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- Oscilloscope จับที่ตำแหน่ง Line-Line
- Volt meter จับที่ตำแหน่ง Line-Line
- ควบคุมความเร็วรอบที่ Inverter ค่อยๆเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อยๆจนถึง 1250 รอบ
- เพิ่มโหลดขึ้น 600W
- วิเคราะห์ผลการตอบสนองของแรงดันหลังการเพิ่มขึ้นของโหลด ผลการทดลองของแรงดัน AC แสดงดังรูปที่ 4.7 และแรงดัน DC แสดงดังรูปที่ 4.8

- ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยไม่ต้องนำชดชดเชยต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลการทดลองของแรงดัน AC แสดงดังรูปที่ 4.9 และแรงดัน DC แสดงดังรูปที่ 4.10

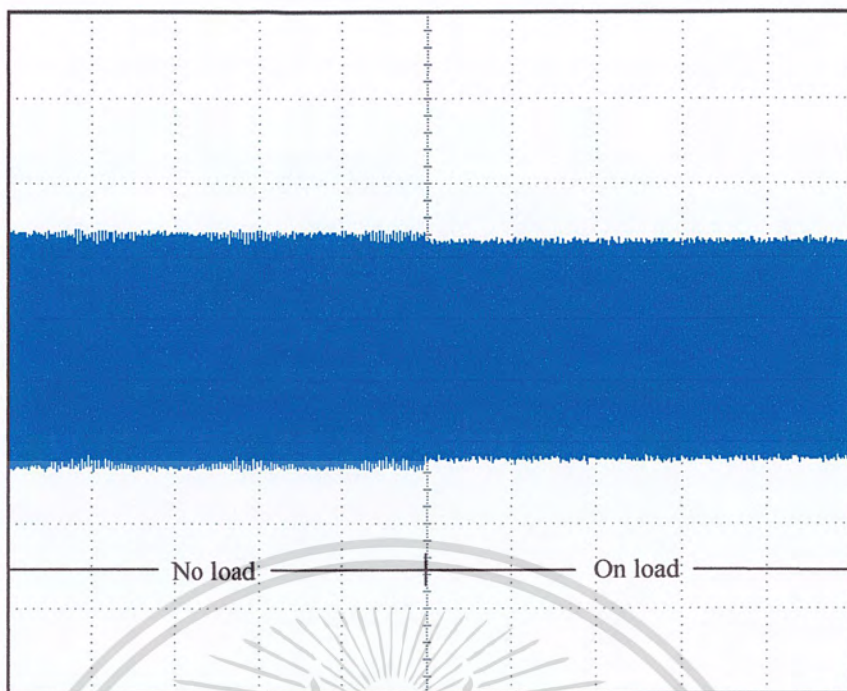


รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองของแรงดันกระแอสลับหลังการเพิ่มขึ้นของโหลดกะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

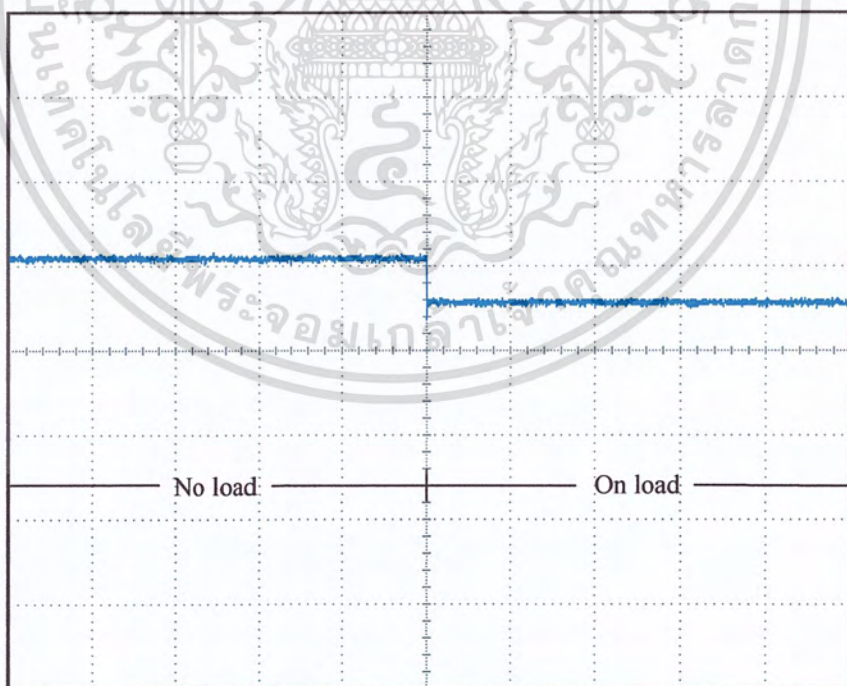


รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองของแรงดันกระแสตรงหลังการเพิ่มขึ้นของโหลดกะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

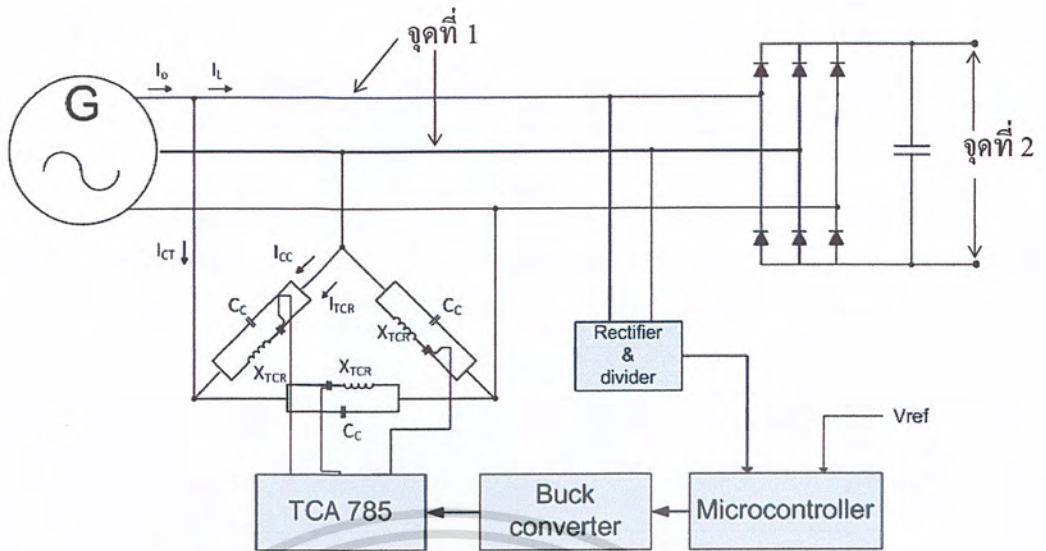


รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองของแรงดันกระแสสลับหลังการเพิ่มขึ้นของโหลดกะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้งชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน



รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองของแรงดันกระแสตรงหลังการเพิ่มขึ้นของโหลดกะทันหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้งชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 จุดที่ทำการวัด

#### 4.5 การทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน

การทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นจะทดลองโดยการเพิ่มความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรื่อยๆ แล้ววิเคราะห์ผลการนำรีแอกเตอร์เข้าสู่ระบบเพื่อการรักษาระดับแรงดันเมื่อยังคงเพิ่มความเร็วรอบต่อไป

##### 4.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

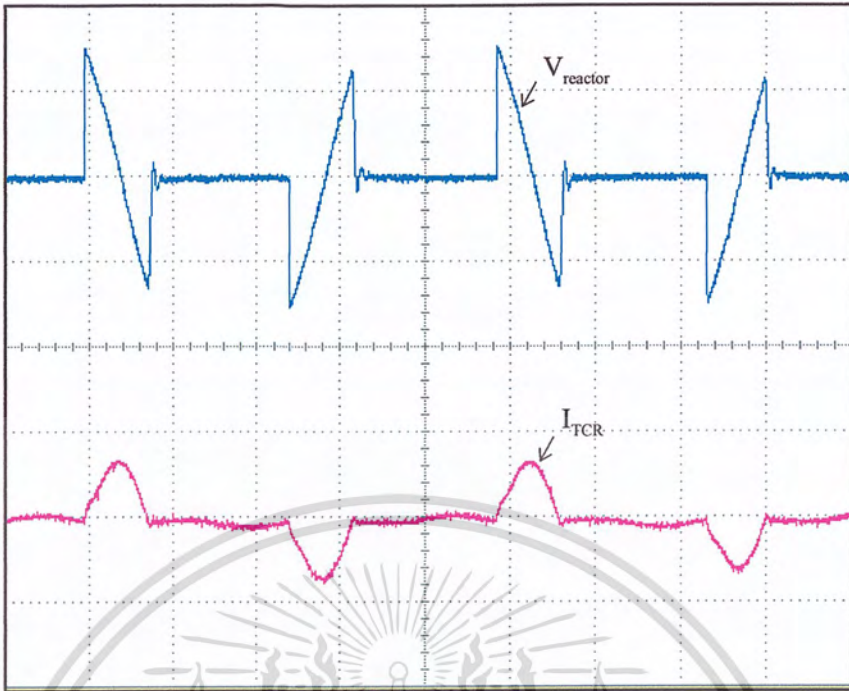
- |   |       |
|---|-------|
| - เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 2HP 4 pole 220/380 | 1 ตัว |
| - ชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน                                  | 1 ชุด |
| - Volt meter  | 1 ตัว |
| - ชุดต้นกำลังประกอบด้วยมอเตอร์ 5.5HP และ Inverter           | 1 ชุด |
| - Oscilloscope  | 1 ตัว |

##### 4.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

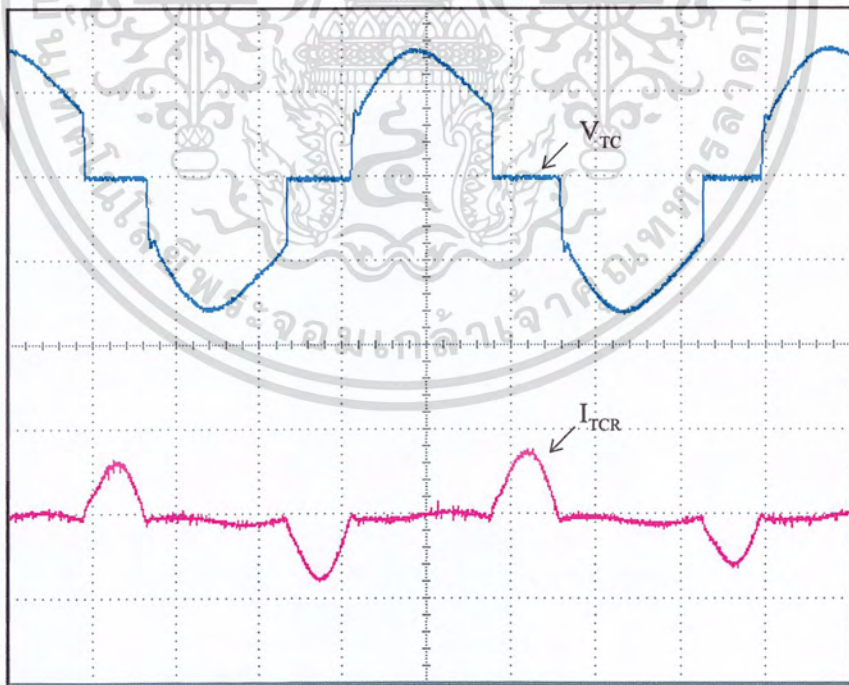
- ต่อชุดชดเชยเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- Oscilloscope จับที่ตำแหน่งแรงดันและกระแสของรีแอกเตอร์และไตรแอก
- Volt meter จับที่ตำแหน่ง Line-Line
- ควบคุมความเร็วรอบที่ Inverter ค่อยๆเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อยๆจนถึง 1150 รอบ
- จากนั้นค่อยๆเพิ่มความเร็วรอบขึ้นไปอีกจนถึง 1250 รอบ
- วิเคราะห์ผลการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ผลการวัดแรงดันและกระแสของรีแอกเตอร์

แสดงดังรูปที่ 4.12 ผลการวัดแรงดันและกระแสของไตรแอกแสดงดังรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

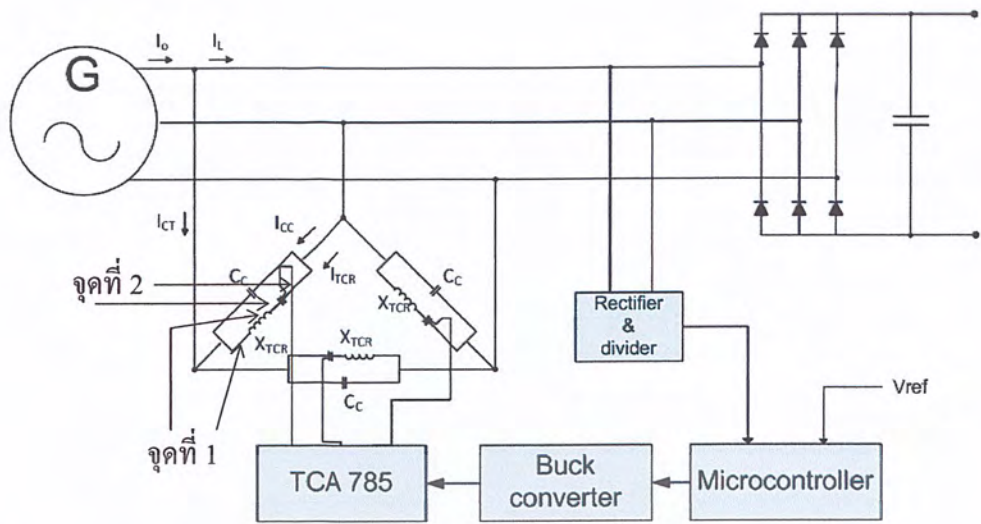


รูปที่ 4.12 ผลการวัดแรงดันและกระแสของรีแอคเตอร์ของชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการรักษาระดับแรงดัน



รูปที่ 4.13 ผลการวัดแรงดันและกระแสของไทรแอกของชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการรักษาระดับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 จุดที่ทำการวัด

#### 4.6 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลจากการการศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ตัวชดเชยแบบไดรแอคคอนโทรลรีแอกเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่โดยอาศัยการปรับมุมจุดชนวนของไดรแอคโดยผ่านการควบคุมของ TCA785 ได้ผลตอบสนองโดยสามารถปรับช่วงมุมจุดชนวนได้ตั้งแต่ 90-180 โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3, 4.5, 4.7, 4.8, 4.12 และ 4.13 ซึ่งชุดชดเชยที่ได้ทำการออกแบบมานั้นสามารถรักษาระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดได้ในกรอบที่สามารถยอมรับได้เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไปหรือได้รับภาระที่เปลี่ยนแปลงไป แต่จะรักษาระดับแรงดันได้ในความเร็วรอบช่วง ๆ หนึ่งเท่านั้น ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและค่าคาปาซิเตอร์และรีแอกเตอร์ที่ออกแบบ

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดลองในการรักษาระดับแรงดัน

	ความเร็วลม(rpm)			เพิ่มโหลด(W)ที่ความเร็วรอบ 1250 rpm				เพิ่มโหลดกะทันหัน(W)
	1150	1200	1250	200	400	600	800	600
มี SVC	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้
ไม่มี SVC	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ

สำหรับปัญหาของการนำพลังงานลมมาใช้เนื่องจากความเร็วลมและโหดมีการเปลี่ยนแปลงทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ นั้นสามารถแก้ไขได้โดยใช้ชุดขดเชยแบบไดรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ได้โดยอาศัยการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับการ build up แรงดันขึ้นมาซึ่งใช้การควบคุมแบบป้อนกลับในการทำให้ชุดขดเชยทำงานรักษาระดับแรงดันได้อัตโนมัติ

#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

จากการศึกษาและออกแบบชุดขดเชยแบบไดรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์นั้นเจอปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ดังนี้

- 5.2.1 การรักษาระดับแรงดันให้คงที่นั้นแรงดันที่ต้องการรักษายังคงมีความแกว่งเนื่องจากวงจรควบคุมแบบป้อนกลับนั้นรับค่าป้อนกลับมาเพียงเฟสเดียวจึงทำให้แรงดันใช้งานแกว่งและไม่ Balance
- 5.2.2 วงจร Buck converter ถือเป็น loss ของวงจรและเป็นการทำงานซ้ำซ้อนส่งผลให้การป้อนกลับมีการตอบสนองได้ช้า

#### 5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ

ชุดขดเชยแบบไดรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ สามารถนำไปใช้ได้จริงสำหรับการประยุกต์ใช้กับพลังงานลมเช่นการนำไปชาร์จกับแบตเตอรี่โดยสามารถนำแนวทางในการพัฒนาโครงการต่อดังนี้

- 5.3.1 ชุดขดเชยแบบไดรแอคคอนโทรลรีแอคเตอร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์นั้นการออกแบบอาศัยเรื่อง cost เป็นสำคัญการใช้ไดรแอคในการเป็นอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรซึ่งมีราคาถูกนั้นมีเสถียรภาพต่ำกว่าการใช้ SCR ซึ่งมีราคาสูงกว่า สำหรับการนำไปใช้งานจริงในทางเชิงพาณิชย์นั้นการออกแบบควรใช้อุปกรณ์ที่มีเสถียรภาพสูงกว่า
- 5.3.2 เพื่อการตอบสนองได้รวดเร็วและมีระดับแรงดันใช้งานไม่แกว่งการออกแบบวงจรป้อนกลับควรรับค่าป้อนกลับทั้งสามเฟสเพื่อให้การตอบสนองมีเสถียรภาพมากกว่านี้และแรงดันแต่ละเฟส Balance กัน ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันแกว่งน้อยลง แรงดันกระแสตรงก็จะมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] A.K. Al Jabri and A.I. Alolah, "Capacitance Requirements for Self-Excited Induction Generators," *Proceedings of IEE*, Vol.137, No.3, pp. 154-159, May 1990.
- [2] S.P Singh, B.S Singh and M.P. Jain, "Comparative study on the performance of a commercially designed induction generator with induction motor operating as self excited induction generators," *Proceedings of the IEE*, Vol.140, NO.5, pp.374-380, September 1993.
- [3] 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-Excited Induction Generator," in *Proc. Power Electronics and Drive System*, Bangkok, Thailand., pp.1313-1318, November 2007.
- [4] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Device Without Energy Storage Components," *IEEE Trans. On Industry Application*, Vol. IA-20, pp. 625-630, 1984.
- [5] IEEE std 112- 1996, "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators ," pp.28-53, 1996.
- [6] S.S. Murthy, O.P. Malik, and A.K. Tandon, "Analysis of self- excited induction generators," *Proceedings of the IEE*, Vol.129, No.6, pp.260-265, November 1982.

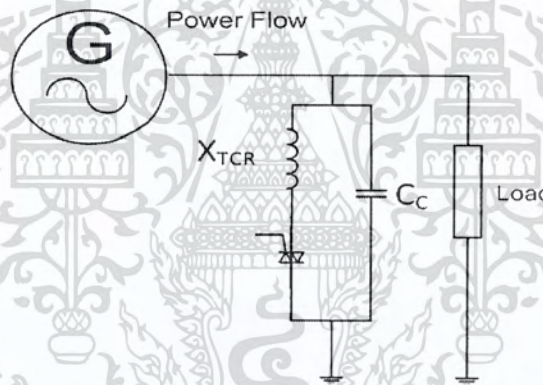
## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์สมการโหมตการทำงานของวงจรชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบต่อเฟสด้วยวงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง

การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์ของชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นจะอาศัยการแสดงแบบต่อเฟสโดยแบ่งเป็นลำดับโหมตการทำงานต่าง ๆ เนื่องจากผลของการปรับมุมจุดชนวนของไทรแอกนั้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนภายในชุดชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนซึ่งแบ่งเป็นโหมตต่าง ๆ ได้ 2 โหมตดังนี้

#### ก-1 การทำงานในขณะที่ยังไม่ต้องการรักษาระดับแรงดัน

โดยการทำงานในช่วงนี้จะมีจุดประสงค์เพื่อ Build up แรงดันขึ้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดกระตุ้นตัวเองโดยอาศัยคาปาซิเตอร์ทั้งสามตัวในการสร้างสนามแม่เหล็กแก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น



**รูปที่ ก-1** การ Build up แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นตัวเองโดยใช้อาศัยคาปาซิเตอร์ในแต่ละเฟส

ซึ่งในโหมตการทำงานนี้

$$X_{TCR} = \infty \quad (ก-1)$$

ซึ่งจะยังไม่มีการรักษาระดับแรงดันในโหมตนี้ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมาจากคาปาซิเตอร์เท่านั้นซึ่งหมายความว่าไทรแอกจะมีสถานะ off ซึ่งมีมุมจุดชนวนเท่ากับ 180 องศา

$$Q_{svc} = Q_{cc} \quad (ก-2)$$

$$I_{cc} = \frac{Q_{cc}}{V_t/a} \quad (ก-3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{cc} = \frac{V_t/a}{I_{cc}} \quad (\text{ก-4})$$

ขนาดของตัวเก็บประจุของชุดชดเชยสแตติกวาร์ต่อเฟสหาได้จาก

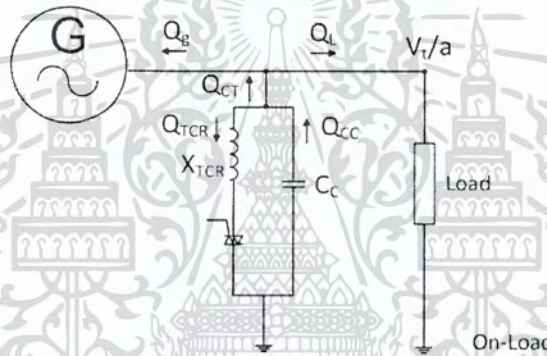
$$C_c = \frac{1}{2\pi f X_{cc}} \quad (\text{ก-5})$$

เมื่อ  $Q_{cc}$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุ ต่อเฟส

$I_{cc}$  คือ กระแสไฟฟ้าต่อเฟสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ชดเชยเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

## ก-2 การทำงานในขณะที่ต้องการรักษาระดับแรงดัน

การทำงานในโหมดนี้นั้นจะเริ่มทำงานเมื่อต้องการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่แรงดันใช้งานโดยจะเริ่มลดมุมจุดชนวนของไทรแอกลงเพื่อให้ไทรแอกค่อยๆ on ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ ก-2 แผนภาพ single line ของชุดชดเชยในขณะที่ทำการรักษาระดับแรงดัน

$$Q_{ct} = Q_g + Q_L \quad (\text{ก-6})$$

$$Q_L = \frac{(V_t/a)^2}{X_L} \quad (\text{ก-7})$$

$$Q_g = \sqrt{S_g^2 - P_g^2} = I_g^2 x_1 + I_0^2 x_m + I_2^2 x_2 \quad (\text{ก-8})$$

เมื่อ  $S_g$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของ SEIG ต่อเฟส

$P_g$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงของ SEIG ต่อเฟส

$Q_g$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของ SEIG ต่อเฟส

$Q_L$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของ Load ต่อเฟส

$Q_{ct}$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดชดเชยต่อเฟส

$a$  คือ ความเร็วรอบต่อหน่วย

ขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดชดเชยจะมีค่าต่ำสุดเมื่อมุมจุดชนวนไทรแอกที่มุม 90 องศา ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{TCR} = X_{cc} \quad (\text{ก-9})$$

$$L_{TCR} = \frac{X_{cc}}{2\pi f} \quad (\text{ก-10})$$

$X_{cc}$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ต่อเฟส

$X_{TCR}$  คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของรีแอกเตอร์

ซึ่งสามารถหาขนาดของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มุมจุดชนวนต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (\text{ก-11})$$

$$X_{SVC} = \frac{\pi X_L X_C}{X_C(2\pi - 2\alpha + \sin \alpha) - \pi X_L} \quad (\text{ก-12})$$

$$Q_{SVC} = \frac{V_t^2}{X_{SVC}} \quad (\text{ก-13})$$

เมื่อ  $X_{TCR}$  คือ อิมพีแดนซ์ของไตรแอกควบคุมรีแอกเตอร์

$X_{SVC}$  คือ อิมพีแดนซ์รวมของตัวชดเชย

$Q_{SVC}$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวชดเชย

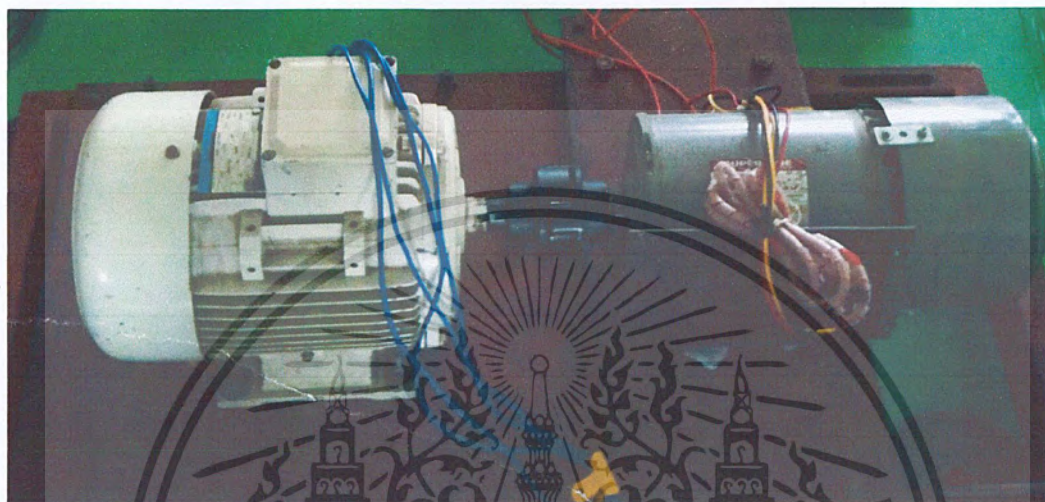


## ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ข-1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบนั้นเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิด Self-Excited ซึ่งสำหรับการทดสอบนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาด 2 HP



รูปที่ ข-1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบซึ่งมีขนาดพิกัด 2 HP

ข-2 ชุดตัวเก็บประจุ 3 เฟส

เป็นอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อสร้างแรงดันขึ้นโดยทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสกระตุ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

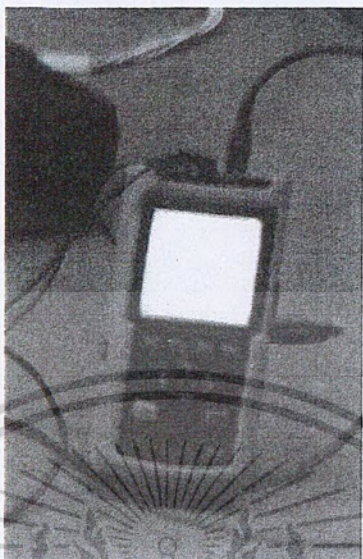


รูปที่ ข-3 ชุดตัวเก็บประจุ 3 เฟส

ข-3 เครื่องวัดทางไฟฟ้า

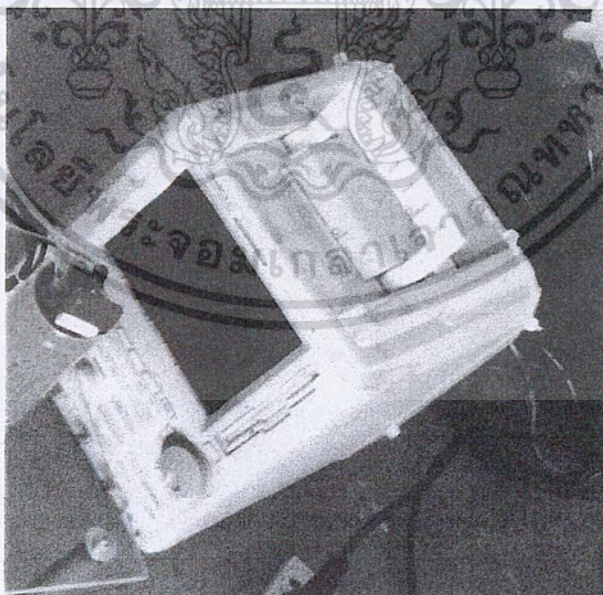
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าได้แก่ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า พาวเวอร์ แฟคเตอร์และความถี่ทางไฟฟ้า



รูปที่ ข-4 พาวเวอร์มิเตอร์

ข-4 เครื่องวัดสัญญาณและรูปคลื่นทางไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดสัญญาณและรูปคลื่นของแรงดัน กระแส โดยแสดงผลเป็นภาพบน เครื่อง



รูปที่ ข-5 Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้