

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
Grid connection of Induction Generator



เลขหมู่..... 72871
เลขทะเบียน..... 25 ส.ย. 2550
วัน,เดือน,ปี.....

b. 11223222
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
Grid connection of Induction Generator



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล้ายอง
อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นาย นิธ ฐานะภักดิ์
2. นาย บัณฑูร นาคะศิริ
3. นาย วิริวัต โคตรโมลี
4. นาย วุฒิพันธ์ ปรีโยทัย



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ พิเชิด ล้ายอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

นาย นิธ	ธนะภักดิ์	
นาย บัณฑูร	นาคะศิริ	
นาย วิธวัต	โคตรโมลี	
นาย วุฒิพันธ์ุ์	ปรีโยทัย	
รศ. พิชิต	ลำยอง	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. เปี่ยมภูมิ	สุฤกพฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549		

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันมีการสนับสนุนให้ใช้พลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น ซึ่งพลังงานลมเป็นทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยม การผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานลมส่วนมากจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ในการแปลงรูปพลังงานจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โครงการนี้จึงทำการศึกษาการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะแรงดันไฟฟ้าผิดปกติ โดยศึกษาทฤษฎีหลักการส่วนประกอบสมมาตร เพื่อใช้ในการคำนวณหาจุดที่เหมาะสมในการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อทำงานในสถานะแรงดันไฟฟ้าผิดปกติ ซึ่งจากการทดสอบสามารถกำหนดขอบเขตการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ทำงานในช่วงที่เหมาะสม เพื่อให้การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุดและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grid connection of Induction Generator

Nitron	Tanapak	
Buntoon	Nakasiri	
Vitivat	Krotmolee	
Wutthipan	Pariyothai	
Assoc.Prof. Phichit Lumyong	Advisor	
Peampoom	Sarikprueck	Advisor

2006

ABSTRACT

According to a supporting of using alternative energy in the way of the electrical productivity, an alternative energy is one of the choices, especially energy by wind. An induction generator is one of the machine can transfer mechanical energy to electrical energy by wind turbine. By The Symmetrical Component Theory, This project has been studied about the effect from the using of an induction generator grid connect in an abnormal voltage condition to calculate a optimum point that an induction generator can compensate any energy loss when an induction generator work in an abnormal voltage condition and studied about the efficiency of a induction generator in an abnormal voltage condition. Because of the working test, we can specify the working boundary of an induction generator to work in a suitable time for the most efficiency and damage prevention

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้ ถ้าหากไม่ได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีจากท่านผู้มีพระคุณหลายๆท่านต่อไปนี้

ขอขอบคุณ รศ. พิชิต ล้ายอง และ อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ ของโครงการทุกๆเรื่องด้วยดีเสมอมา ทั้งยังคอยแนะนำสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อคณะผู้จัดทำในอนาคต

ขอขอบคุณ คุณประสิทธิ์ภาพ ปัญญาพันธ์ นักศึกษาปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งช่วยให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ เป็นประโยชน์ต่อโครงการ และยังได้เอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณธนาพันธ์ แสนสุข นักศึกษาปริญญาโทคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ที่สามารถแนะนำได้

ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมห้องเรียนและห้องโครงการ ที่ให้ความร่วมมือในการทำการทดสอบต่างๆ และความทรงจำที่ดี ตลอดเวลาที่ได้ทำงานร่วมกันมา ถึงแม้จะเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ ก็ตาม

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุพการี ของคณะผู้จัดทำทุกท่าน ที่ส่งเสียให้คณะผู้จัดทำได้รับการศึกษาที่ดีมาจนถึงระดับปริญญาตรี ทั้งยังคอยให้ความรัก ความห่วงใย และกำลังใจที่ดี แก่บุตรเสมอมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
2.1 ทฤษฎีการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
2.1.1 โหมดการทำงานเป็นมอเตอร์	4
2.1.2 โหมดทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	4
2.1.3 โหมดการทำงานโดยโรเตอร์กลับทิศทาง	5
2.2 ลักษณะการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับระบบเครือข่าย	5
บทที่ 3 วงจรสมมูลเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	7
3.1 รูปแบบวงจรสมมูล	7
3.1.1 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส	7
3.1.2 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส	9
3.2 วิธีทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์	11
3.2.1 การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล	11
3.2.2 การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	12
3.2.3 การทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์	13
3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	16
4.1 วิธีการคำนวณแบบ Symmetrical component	16
4.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อรับแรงดันไม่สมดุล	21
บทที่ 5 การทดสอบ	25
5.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะไม่สมดุล	25
5.1.1 อุปกรณ์การทดลอง	26
5.1.2 ขั้นตอนการทดลอง	27
5.1.3 ผลการทดลอง	28
5.1.4 สรุปผลการทดลอง	40
5.2 การทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดันผิดปกติ	41
5.2.1 อุปกรณ์การทดลอง	41
5.2.2 ขั้นตอนการทดลอง	41
5.2.3 ผลการทดลอง	43
5.2.4 สรุปผลการทดลอง	50
5.3 การทดสอบเพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นขณะ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล	51
5.3.1 อุปกรณ์การทดลอง	51
5.3.2 ขั้นตอนการทดลอง	51
5.3.3 ผลการทดลอง	51
5.3.4 สรุปผลการทดลอง	53
บทที่ 6 สรุป	54
กิตติกรรมประกาศ	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก ก Nameplate	58
ภาคผนวก ข ภาพอุปกรณ์การทดลอง	60
ประวัติผู้เขียน	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V
สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า	15
5.1	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	25
5.2	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าสมดุล (Balance)	28
5.3	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 5% 1 เฟส สูงกว่าปกติ (5% 1 - O)	29
5.4	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 5% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ (5% 1 - U)	30
5.5	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 5% 2 เฟส สูงกว่าปกติ (5% 2 - O)	31
5.6	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 5% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ (5% 2 - U)	32
5.7	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 5% 3 เฟส สูงกว่าปกติ (5% 3 - O)	33
5.8	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 5% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ (5% 3 - U)	34
5.9	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 7% 1 เฟส สูงกว่าปกติ (7% 1 - O)	35
5.10	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 7% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ (7% 1 - U)	36
5.11	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 7% 2 เฟส สูงกว่าปกติ (7% 2 - O)	37
5.12	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุล 7% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ (7% 2 - U)	38
5.13	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบที่ 5.2	42
5.14	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญัตราวง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
5.15	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส	44
5.16	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส	45
5.17	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส	46
5.18	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 3 เฟส	47
5.19	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 3 เฟส	48
5.20	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ	49
5.21	แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VI
สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ภาพโหมดการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
2.2	แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่าย	6
3.1	รูปแบบวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส	7
3.2	การพัฒนาวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	9
3.3	ไดอะแกรมแสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	11
3.4	วงจรสมมูลจากการทดสอบขณะเปิดวงจร	12
3.5	วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	12
3.6	วงจรสมมูลจากการทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์	13
4.1	แสดงเฟสเซอร์ของ Symmetrical Component	16
4.2	การต่อภาระทางไฟฟ้าแบบ Star with neutral	19
4.3	วงจรสมมูลเมื่อใช้วิธี Symmetrical Component	19
4.4	การต่อภาระทางไฟฟ้าแบบ Delta	20
4.5	วงจรสมมูลเมื่อใช้วิธี Symmetrical Component	20
4.6	วงจรสมมูลของ Positive Sequence Voltage	21
4.7	วงจรสมมูลของ Negative Sequence Voltage	22
4.8	วงจรสมมูลของ Zero Sequence Voltage	22
4.9	วงจรสมมูลเมื่อเปลี่ยนจาก Symmetrical เป็นระบบจริง	24
5.1	แสดงการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง	26
5.2	กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการทดลองกับการคำนวณที่แรงดันไฟฟ้าสมดุล	39
5.3	กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการทดลองกับการคำนวณที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1 เฟส สูงกว่าปกติ	39
5.4	กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการทดลองกับการคำนวณที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ	40
5.5	กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.6	กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้า ป้อนเข้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ	50
5.7	แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แรงดันป้อนเข้า สมดุล	51
5.8	แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แรงดันป้อนเข้า 10 % Over 3 เฟส	52
5.9	แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แรงดันป้อนเข้า 10 % Under 3 เฟส	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันพบว่าแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ลดน้อยลงและมีแนวโน้มที่จะเกิดการขาดแคลนในไม่ช้าจึงมีการมองหาพลังงานทดแทนจากธรรมชาติที่ใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานน้ำ, พลังงานลม, พลังงานชีวมวล และพลังงานความร้อนใต้พิภพ โดยใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นตัวแปรรูปพลังงานดังกล่าว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ประเภทหนึ่งที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยพลังงานลมในการขับเคลื่อน เพื่อเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เราจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการส่งจ่ายกำลังงานเข้าระบบไฟฟ้าที่สภาวะปกติ และในกรณีที่เกิดความผิดปกติในแบบต่างๆ

โครงการนี้จะทำการศึกษาถึงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าเป็นหลัก โดยทำการทดสอบหาค่าวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากวงจรสมมูลกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเข้ากับระบบที่สภาวะปกติและในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าผิดปกติ เช่น แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสูงหรือต่ำกว่าปกติ, แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปแนวทางในการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบไฟฟ้าที่สภาวะปกติจะ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ค่าหนึ่ง แต่เมื่อมีเหตุผิดปกติเกิดขึ้น เช่นเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกิดการสั้น, ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยลง, มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับความเสียหายหรืออายุการใช้งานสั้นลง เราจึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นขณะเกิดเหตุผิดปกติ เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์และสรุปแนวทางในการออกแบบวงจรป้องกันและสร้างวงจรการเชื่อมต่อที่ดีได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาทฤษฎีการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 1.2.2 ศึกษาการส่งจ่ายพลังงานเข้ากับระบบไฟฟ้า
- 1.2.3 ทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีผิดปกติแบบต่างๆ
- 1.2.4 สรุปแนวทางในการออกแบบและสร้างวงจรการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า
- 1.2.5 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการจ่ายกำลังงานคืนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) เป็นตัวต้นกำลัง
- ศึกษาทฤษฎีการคำนวณด้วยวิธี Symmetrical Component เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
- ศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะทำงานที่สภาวะปกติ และในกรณีที่เกิดความผิดปกติต่างๆ เช่น การทำงานที่สภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ (Under Voltage), แรงดันสูงกว่าปกติ (Over Voltage), แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Unbalance Voltage)
- นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- 1.4.2 ศึกษาการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ
- 1.4.3 จัดทำฐานรองรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และทำการติดตั้งกับชุดทดสอบ
- 1.4.4 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้วิธี No-Load test และ Block Rotor test เพื่อนำค่าไปคำนวณหา R_c , X_m , R_1 , R_2 , X_1 , X_2 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า
- 1.4.5 ทำการทดสอบเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าปกติ เพื่อศึกษาการทำงานขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 1.4.6 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเรื่อง symmetrical component เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล
- 1.4.7 ทำการทดสอบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะแรงดันไฟฟ้าผิดปกติทั้งในกรณีแรงดันไฟฟ้าสูงเกินพิกัด, แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัด, แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงและต่ำกว่าพิกัด โดยแรงดันที่ใช้ในการทดสอบคำนวณได้จากสมการตามมาตรฐาน IEEE Std 141
- 1.4.8 ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ
- 1.4.9 สรุปผลการทดสอบและสรุปการป้องกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า ผลที่ได้คือ ทำให้มีความเข้าใจและคุ้นเคยกับเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการควบคุม และการวัด ทำให้ได้ฝึกแก้ปัญหาจากอุปสรรคต่างๆในการทำงานวิจัย และทำให้ทราบถึงพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะทำงานที่สภาวะปกติ, ในกรณีที่เกิดความผิดปกติต่างๆ เช่น การทำงานที่สภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ (Under Voltage), แรงดันสูงกว่าปกติ (Over Voltage) และแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล (Unbalance Voltage) ซึ่งเมื่อทราบถึง พฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นแล้ว จะทำให้สามารถเลือกพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันได้ถูกต้องและ สามารถสร้างวงจรการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพได้



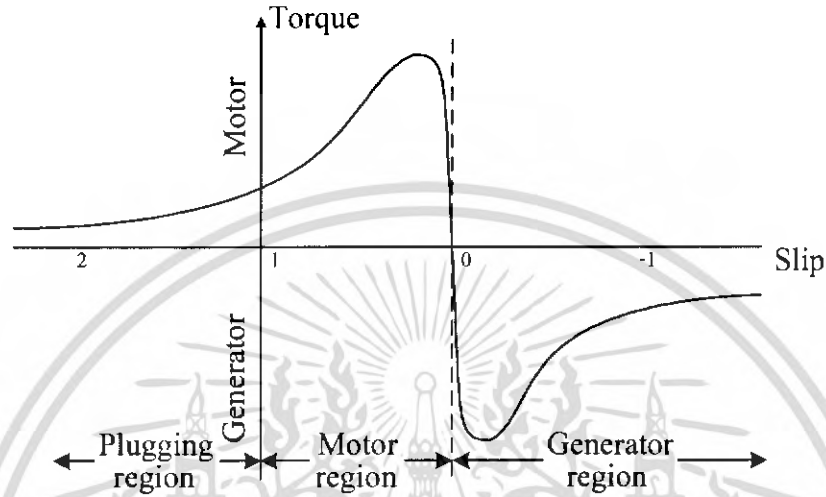
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

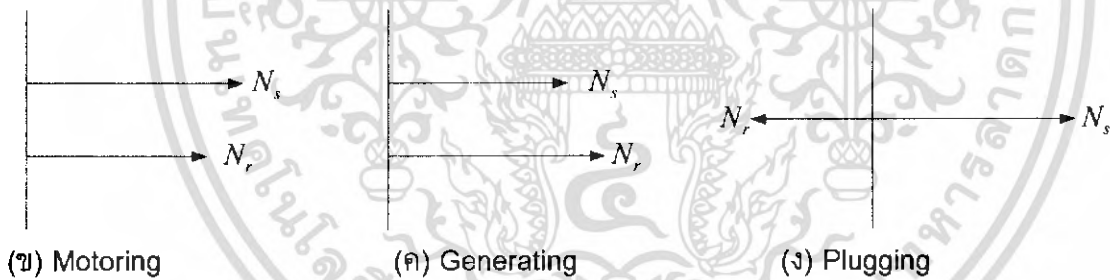
ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1 ทฤษฎีการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 3 โหมดการทำงาน ดังรูปที่ 2.1



(ก) คุณลักษณะแรงบิดกับค่าสลิปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 ภาพโหมดการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1.1 โหมดการทำงานเป็นมอเตอร์ (Motoring)

ถ้าขดลวดสเตเตอร์ถูกต่ออยู่กับแหล่งจ่าย 3 เฟส โรเตอร์จะหมุนในทิศทางตามสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ซึ่งถือว่าเป็นโหมดการทำงานตามปกติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยที่ความเร็ว $N_r < N_s$ มีค่าสลิป $0 < s < 1$ ดังรูปที่ 2.1 (ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 โหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating)

ในกรณีที่ปรับความเร็วของระบบขับเคลื่อนให้มีความเร็วกว่าความเร็ว N_s และการหมุนของระบบยังอยู่ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ดังรูปที่ 2.1 (ค.) เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างแรงบิดที่เรียกว่า "Generating torque" แรงบิดดังกล่าวนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศการหมุนของโรเตอร์ (หรือตรงกันข้ามกับทิศการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์) ซึ่งการทำงานในโหมดนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์ในการหยุดการหมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนที่เรียกว่า "Regenerative braking" โดยที่ความเร็ว $N_r > N_s$ มีค่าสลลิป $s < 0$

2.1.3 โหมดการทำงานโดยความเร็วโรเตอร์กลับทิศทาง (Plugging)

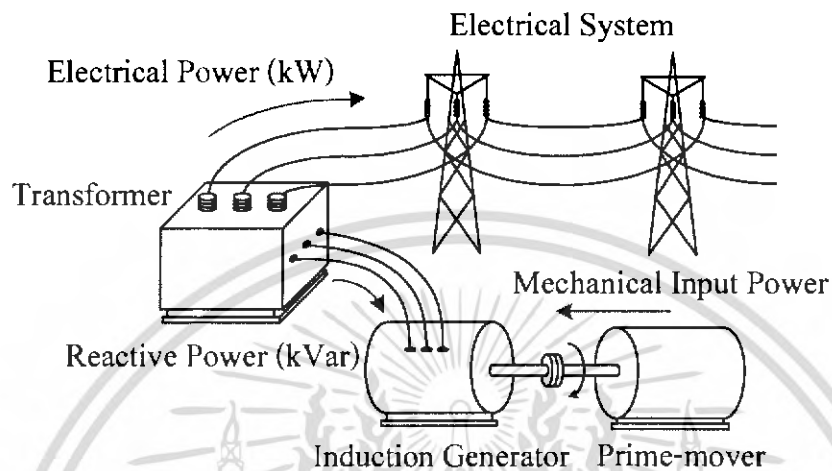
โหมดการทำงานนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการหยุดการหมุนของมอเตอร์อย่างทันทีทันใดได้ โดยอาศัยการทำให้สนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศการหมุนของโรเตอร์ และขบวนการดังกล่าวนี้ เรียกว่า "Plugging operation" มีค่าสลลิป $s > 1$ ดังรูปที่ 2.1 (ง.) ซึ่งจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงจนเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วและความเร็วจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามจนกว่าแหล่งจ่ายจะถูกปลดออก

2.2 ลักษณะการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้งานแบบเชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย (Grid-connected Induction Generator)

หลักการทำงานเมื่อต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบเครือข่าย (Grid-system) โดยตรงซึ่งยังไม่มีตัวต้นกำลัง (Prime-mover) ตัวเครื่องจักรกลจะแสดงพฤติกรรมทำงานเป็นมอเตอร์ และรับกำลังไฟฟ้าจากระบบเครือข่าย โดยโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed) ซึ่งต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส เนื่องจากมีค่าสลลิป แต่เมื่อเราต่อตัวต้นกำลังเข้ากับโรเตอร์โดยให้ทิศทางการหมุนตรงกันกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์จนความเร็วของโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัส ขณะนี้เองที่ทิศทางการไหลของกระแสจะไหลกลับเข้าสู่ระบบเครือข่าย ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบเครือข่าย ซึ่งเป็นสภาพที่เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีข้อจำกัดคือ ถึงแม้ว่าจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) ให้กับระบบเครือข่ายได้ก็ตาม แต่ไม่สามารถสร้างกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ในทางตรงข้ามกลับมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบเครือข่ายเพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic field) ที่ส่วนกระตุ้น (exciting) สำหรับแรงดันไฟฟ้าและความถี่จะขึ้นอยู่กับระบบเครือข่ายที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ แต่จะไม่ขึ้นกับความเร็วโรเตอร์

ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อกับระบบเครือข่าย มีข้อดีที่สำคัญคือระบบการทำงานที่ง่ายไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการตัวต้นกำลัง (Prime-mover) ที่มีความเร็วคงที่ แต่ต้องการตัวต้นกำลังที่มีความเร็วของโรเตอร์มากกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น จึงพบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ได้อย่างแพร่หลายในระบบพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาจากพลังงานลม โดยใช้กังหันลมขนาดกลาง (Medium) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wind Turbine) และขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine) ที่ใช้สำหรับผลิตกำลังไฟฟ้าแบบต่อเชื่อมกับเครือข่าย ส่วนใหญ่จะมีการติดตั้งหลายๆ ตัวลักษณะเป็นทุ่งกังหันกันลม (Wind Turbine Farm) มีทั้งบนบกและในทะเล ซึ่งในส่วนของประเทศไทยนั้น ระบบนี้ได้นำมาใช้ที่สถานีพลังงานทดแทนแหลมพรหมเทพ อยู่ที่แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต



รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่อเข้ากับระบบเครือข่าย

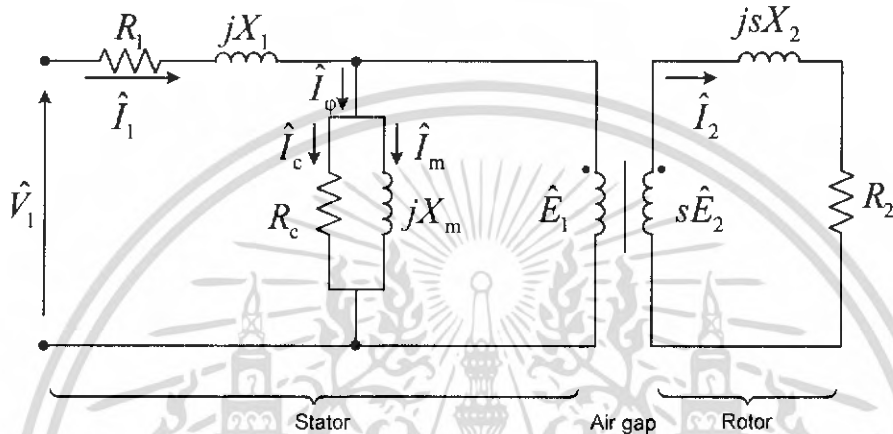
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.1 รูปแบบวงจรสมมูล (Equivalent circuit model)

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพิจารณาจากวงจรสมมูล โดยมีลักษณะเหมือนกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งข้อแตกต่างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าคือมีช่องว่างอากาศ (Air gap) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแบบวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส

3.1.1 วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Stator Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 (ก)

เมื่อกำหนดให้

\hat{V}_1 คือแรงดันไฟฟ้าพิกัดของสเตเตอร์

\hat{E}_1 คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ

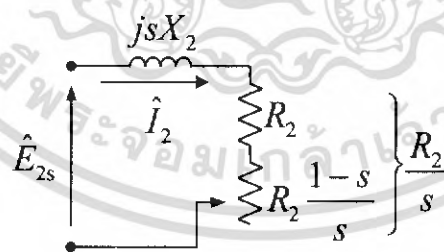
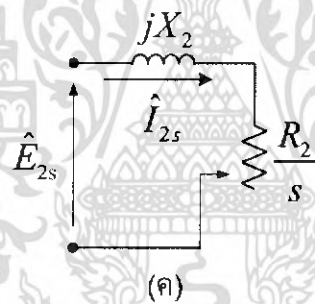
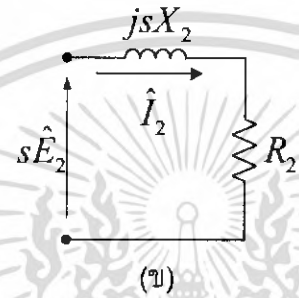
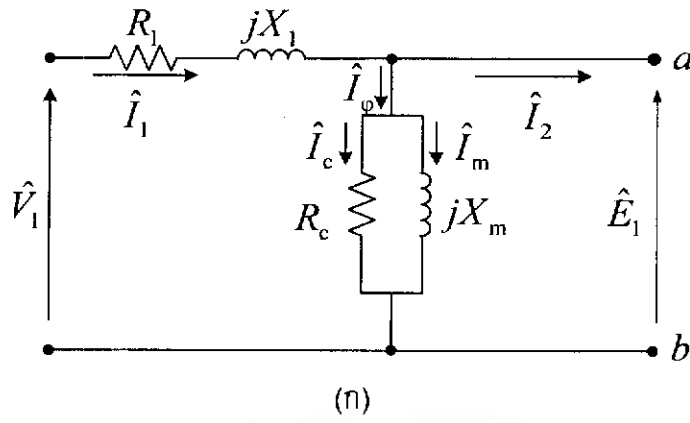
R_1 คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

X_1 คือค่าลิกเกจรแอกแดนซ์ (Leakage reactance) ต่อเฟสที่สเตเตอร์

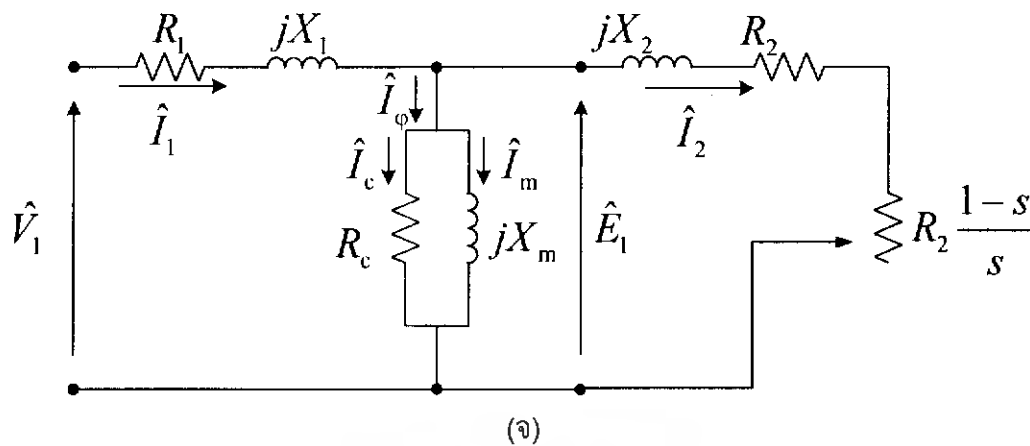
X_m คือค่าลิกเกจรแอกแดนซ์จากการทำแม่เหล็ก (Magnetizing reactance) ที่สเตเตอร์ต่อเฟส

R_c คือค่าความต้านทานจากการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core loss resistance) ที่สเตเตอร์ต่อเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การพัฒนาวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.1.2 วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Rotor Equivalent Circuit)

ค่าความถี่ของวงจรโรเตอร์จะเปลี่ยนไปตามค่าสลิป วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่สลิป s ใดๆ แสดงดังรูปที่ 3.2 (ข) ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป

$$X_{2s} = sX_2 \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้

X_{2s} คือค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสของโรเตอร์ที่ค่าสลิปใดๆ

X_2 คือค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสของโรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง

$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_2 \quad (3.2)$$

เมื่อกำหนดให้

\hat{E}_2 คือค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

\hat{E}_{2s} คือค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ต่อเฟสที่ค่าสลิปใดๆ

และสำหรับกระแสในวงจรสมมูลโรเตอร์ \hat{I}_{2s} ที่ความถี่ด้านโรเตอร์ กำหนดได้ตามสมการที่ (3.3)

$$\hat{I}_{2s} = \frac{s\hat{E}_2}{R_2 + jsX_2} \quad (3.3)$$

เมื่อกำหนดให้

R_2 คือค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ต่อเฟสขณะหยุดนิ่ง

X_2 คือค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟสที่ขดลวดโรเตอร์

ในส่วนประกอบทางภาระ (Load component) \hat{I}_2 ของกระแสทางด้านสเตเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์เพื่อรักษาระดับ ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศไว้ และสมมติให้จำนวนรอบของขดลวดด้านสเตเตอร์และด้านโรเตอร์เท่ากัน ดังนั้นค่ากระแสทางด้านสเตเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์ \hat{I}_2 และกระแสในวงจรสมมูลของโรเตอร์ \hat{I}_{2s} จึงมีความสัมพันธ์เป็น

$$\hat{I}_2 = \hat{I}_{2s} \quad (3.4)$$

จากสมการ(3.4) จะทำให้สามารถเขียนสมการ (3.3) ใหม่ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{i}_2 = \frac{\hat{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (3.5)$$

จากวงจรสมมูลรูปที่ 3.2 (ค) ค่ากำลังไฟฟ้าต่อเฟสที่ส่งผ่าน (Transfer) ผ่านช่องว่างอากาศ (Power transfer across air gap) P_g จะได้

$$P_g = I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (3.6)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากขดลวดทองแดงที่โรเตอร์ต่อเฟสซึ่งเกิดขึ้นในรูปความร้อนสามารถหาได้จาก

$$P_{cu,2} = I_2^2 R_2 = sP_g \quad (3.7)$$

กำลังไฟฟ้าที่ออกจากโรเตอร์ (Rotor output – electromagnetic power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} \quad (3.8)$$

ดังนั้นจากรูป 3.2 (ง) จะเห็นว่าความเร็วขึ้นอยู่กับเทอม $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ ดังนั้น กำลังทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

$$P_e = (1-s)P_g = I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \quad (3.9)$$

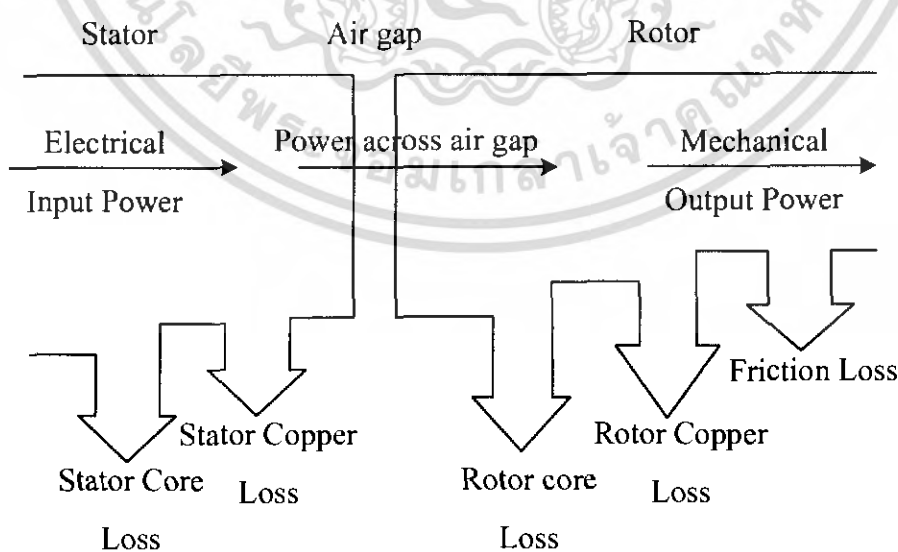
ค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (3.10)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากมอเตอร์ (Output power – mechanical power)

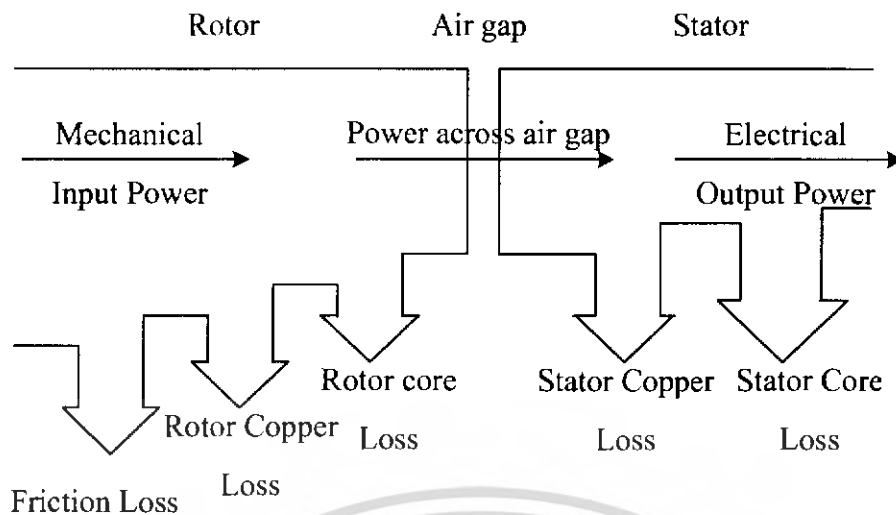
$$P_o = P_e - \text{Rotational and Core loss} \quad (3.11)$$

สามารถเขียนไดอะแกรมได้เป็นดังรูปที่ 3.3



(ก) Motoring mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) Generating mode

รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมแสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

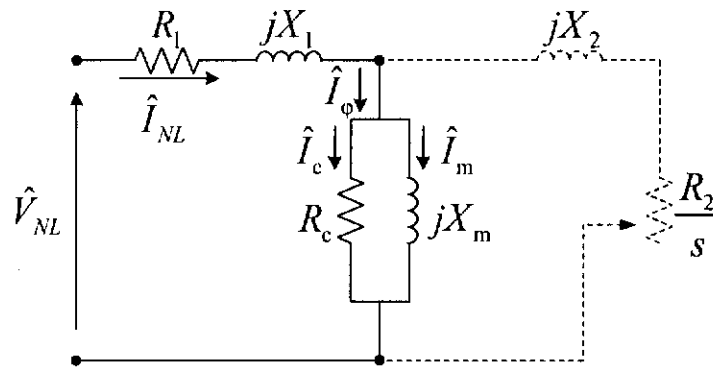
3.2 วิธีการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล R_c, X_m, R_1, R_2, X_1 และ X_2 สามารถคำนวณได้จากผลการทดสอบขณะไร้โหลด (No – load test) การทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์ให้อยู่นิ่ง (Blocked – rotor test) และจากการวัดความต้านทานโดยตรง (DC resistance) ของขดลวดสเตเตอร์

3.2.1 การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล (No – load test)

การทดสอบขณะไม่มีภาระทางกล ทำได้เช่นเดียวกับการทดสอบขณะเปิดวงจร (Open circuit test) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทำให้ทราบค่ากระแสกระตุ้น (exciting current) และการสูญเสียเนื่องจากการหมุน (rotational losses)

จากรูปที่ 3.2 (จ) ขณะไม่มีภาระทางกลความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าเกือบเท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน จึงทำให้ค่าสลิปมีค่าต่ำมากมีค่าเกือบศูนย์ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านส่วน ของ $\frac{R_2}{s}$ ค่าน้อยมาก ด้วยเหตุนี้จึงสมมติให้ไม่มีกระแส I_2 ไหลในวงจร ดังนั้นจะไม่คิดค่ากระแสตั้งกล่าว สามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลจากการทดสอบขณะเปิดวงจร

- ทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์ไม่มีภาระทางกล
- จดบันทึกค่า แรงดันไฟฟ้า V , กระแสไฟฟ้า I , และกำลังไฟฟ้า W และต้องเปลี่ยนให้เป็นค่าต่อเฟส V_o, I_o, W_o

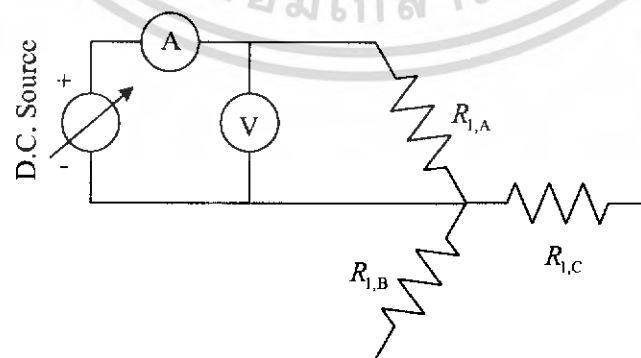
$$\phi_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o} \quad (3.12)$$

$$R_c = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (3.13)$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} \quad (3.14)$$

3.2.2 การทดสอบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง(Direct – Current test)

เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ค่ารีแอคแตนซ์จะไม่มี เพราะความถี่กระแสตรงมีค่าเป็นศูนย์ปรับแรงดันไฟฟ้าที่ DC source เพื่อทำการวัดกระแส Direct – current ของความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์ R_1 ด้วยการประยุกต์ใช้กฎของโอห์ม การต่อวงจรขดลวดสเตเตอร์เป็นไปตามรูปที่ 3.5



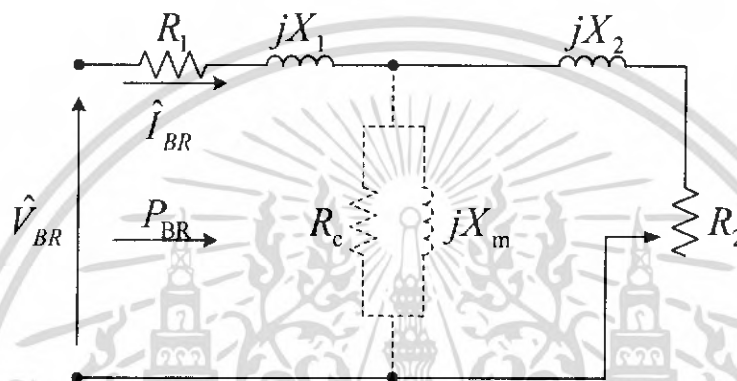
รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (3.15)$$

3.2.3 การทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์ (The Blocked – Rotor Test)

การทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์ให้อยู่นิ่งนั้น ทำได้เหมือนกับการทดสอบขณะลัดวงจร (Short circuit test) ในหม้อแปลง ซึ่งทำให้ทราบค่าลึคเกจิมพีแดนซ์ (leakage impedance) โดยการทดสอบดังกล่าวนี้กระทำภายใต้เงื่อนไขของกระแสโรเตอร์ และความถี่เดียวกัน สำหรับข้อกำหนด IEEE ความถี่จะลดลง 25% จากความถี่ที่พิกัดขณะทดสอบด้วยการยึดตัวโรเตอร์ให้อยู่นิ่ง



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลจากการทดสอบโดยยึดตัวโรเตอร์

- ทดสอบที่พิกัดกระแสไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์อยู่ในสภาพยึดโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6
- จดบันทึกค่า แรงดันไฟฟ้า V , กระแสไฟฟ้า I , และกำลังไฟฟ้า W , และต้องเปลี่ยนให้เป็นค่า ต่อเฟส V_b, I_b, W_b

$$\phi_b = \cos^{-1} \frac{P_b}{V_b I_b} \quad (3.16)$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = R_b + jX_b \quad (3.17)$$

$$R_b = \frac{P_b}{I_b^2} \quad (3.18)$$

$$X_b = \sqrt{(Z_b)^2 - (R_b)^2} = \frac{V_b \sin \phi_b}{I_b} \quad (3.19)$$

$$R_b = R_1 + R_2 \quad (3.20)$$

$$X_b = X_1 + X_2 \quad (3.21)$$

$$\text{การสูญเสียที่แกนเหล็กต่อเฟส} = I_c^2 R_c \quad (3.22)$$

$$\text{การสูญเสียจากแรงเสียดทานต่อเฟส} = I_2^2 R_2 \left[\frac{1 - s_{no-load}}{s_{no-load}} \right] \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะทดสอบกำหนดให้ความถี่ที่สเดเตอร์เท่ากับความถี่ที่ใช้ทดสอบและเท่ากับความถี่โรเตอร์ เพราะสลิปมีค่าเป็นหนึ่ง ถ้ากำหนดให้ $X'_b = X'_1 + X'_2$ คือค่าลีสเกจรีแอกแตนซ์ที่ความถี่ทดสอบ f_1

$$X_b = X_1 + X_2 = \frac{f_b}{f_1} X'_b \quad (3.24)$$

3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

ซึ่งได้ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 1HP, 220 V/380V, 4 pole, 50Hz เป็นดังนี้

No-load : $V = 219.2V$, $I = 1.073A$, $\phi = 81.897^\circ$, $P_o = 33.141\text{watts}$

Blocked-rotor : $V = 51.76V$, $I = 2.025A$, $\phi = 45.70^\circ$, $P_o = 73.24\text{watts}$

DC resistance : $R_{ux} = 8.91\Omega$, $R_{vy} = 8.92\Omega$, $R_{wz} = 8.93\Omega$

$\therefore R_1 = 8.92\Omega$, $R_2 = 9.43\Omega$

จากค่าที่ได้จากการทดสอบนำมาใช้คำนวณตามสมการข้างต้นได้ว่า

$$R_c = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{219.2^2}{33.141} = 1449.808 \Omega$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \sin \phi_o} = \frac{219.2}{1.073 \times \sin 81.897^\circ} = 206.424 \Omega$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = R_b + jX_b = \frac{51.76}{2.025 \angle -45.70^\circ} = 17.85 + j18.294\Omega$$

$$R_2 = R_b - R_1 = 17.85 - 8.92 = 8.93\Omega$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_b}{2} = \frac{18.294}{2} = 9.147\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณได้ดังนี้

R_1	8.92 Ω
R_2	8.93 Ω
X_1	9.147 Ω
X_2	9.147 Ω
R_c	1449.808 Ω
X_m	206.424 Ω

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1 แรงม้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

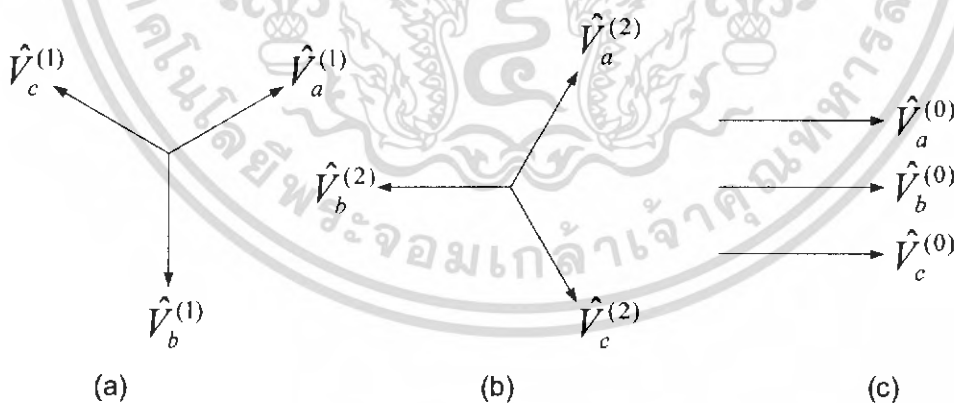
การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อรับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

4.1 วิธีการคำนวณแบบ Symmetrical Component

Symmetrical Component ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับวงจรหลายเฟสในสภาวะไม่สมดุล โดย C. L. Fortescue เป็นผู้นำเสนอ Fortescue พิสูจน์ว่า ในระบบ n เฟส ที่ไม่สมดุลสามารถที่จะแก้ปัญหาด้วยระบบ n เฟส ที่สมดุลได้ โดยเรียกว่า Symmetrical Component ในระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส การมีภาวะ 1 เฟสต่ออยู่ในระบบที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสไม่เท่ากันทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลขึ้นในระบบ โดยสมมุติให้ระบบเป็น Linear System การหากระแสไฟฟ้าในระบบไม่สมดุลสามารถใช้วิธีการ Superposition โดยการพิจารณาแยกแต่ละ Sequence ของกระแสไฟฟ้า

จาก Fortescue's Theorem ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ไม่สมดุลสามารถที่จะคำนวณในแบบสมดุลได้ โดยใช้ระบบสมดุลดังต่อไปนี้

- Positive Sequence Components ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120 องศา โดยมี Phase Sequence เหมือนกับระบบเดิม
- Negative Sequence Components ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 120 องศา โดยมี Phase Sequence ตรงข้ามกับระบบเดิม
- Zero Sequence Components ประกอบด้วยเฟสเซอร์ 3 เฟสเซอร์ มีขนาดเท่ากันวางห่างกัน 0 องศา แสดงดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 4.1 แสดงเฟสเซอร์ของ Symmetrical Component

การแก้ปัญหาวีธีการคำนวณความไม่สมดุลของระบบโดยใช้ Symmetrical Component สมมุติให้ระบบเป็นระบบ abc Phase Sequence ของ Positive Sequence Components คือ abc ด้วย และ Negative Sequence Components คือ acb อักษรย่อของแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้เป็น \hat{V}_a , เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\hat{V}_b และ \hat{V}_c ตามลำดับการกำหนด Sequence ใช้เลข 1 แทน Positive Sequence Components ($\hat{V}_a^{(1)}$) และ 2, 3 แทน Negative Sequence Components ($\hat{V}_a^{(2)}$) และ Zero Sequence Components ($\hat{V}_a^{(0)}$) ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 (a) แสดงเฟสเซอร์ของ Positive Sequence Components , (b) แสดงเฟสเซอร์ของ Negative Sequence Components และ 4.1 (c) แสดงเฟสเซอร์ของ Zero Sequence Components สามารถจัดรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสให้อยู่ในรูปของ Sequence Components ได้ดังนี้

$$\hat{V}_a = \hat{V}_a^{(0)} + \hat{V}_a^{(1)} + \hat{V}_a^{(2)} \quad (4.1)$$

$$\hat{V}_b = \hat{V}_b^{(0)} + \hat{V}_b^{(1)} + \hat{V}_b^{(2)} \quad (4.2)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_c^{(0)} + \hat{V}_c^{(1)} + \hat{V}_c^{(2)} \quad (4.3)$$

ทำการลดตัวแปร \hat{V}_b และ \hat{V}_c โดยทำการแปลงตัวแปรผ่าน \hat{a} Operator ($(\hat{a} = \angle 120^\circ)$) ให้อยู่ในตัวแปร \hat{V}_a เพียงตัวเดียวได้ดังสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned} \hat{V}_b^{(0)} &= \hat{V}_a^{(0)} & \hat{V}_c^{(0)} &= \hat{V}_a^{(0)} \\ \hat{V}_b^{(1)} &= \hat{a}^2 \hat{V}_a^{(1)} & \hat{V}_c^{(1)} &= \hat{a} \hat{V}_a^{(1)} \\ \hat{V}_b^{(2)} &= \hat{a} \hat{V}_a^{(2)} & \hat{V}_c^{(2)} &= \hat{a}^2 \hat{V}_a^{(2)} \end{aligned} \quad (4.4)$$

นำสมการที่ 4.4 ไปแทนสมการที่ 4.1 , 4.2 และ 4.3 จะได้

$$\hat{V}_a = \hat{V}_a^{(0)} + \hat{V}_a^{(1)} + \hat{V}_a^{(2)} \quad (4.5)$$

$$\hat{V}_b = \hat{V}_a^{(0)} + \hat{a}^2 \hat{V}_a^{(1)} + \hat{a} \hat{V}_a^{(2)} \quad (4.6)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_a^{(0)} + \hat{a} \hat{V}_a^{(1)} + \hat{a}^2 \hat{V}_a^{(2)} \quad (4.7)$$

หรืออยู่ในรูปแบบเมตริกคือ

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_a^{(0)} \\ \hat{V}_a^{(1)} \\ \hat{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{V}_a^{(0)} \\ \hat{V}_a^{(1)} \\ \hat{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

เมื่อ

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

ทำการ Invert A

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

แล้วนำมาหาค่า $\hat{V}_a^{(0)}$ $\hat{V}_a^{(1)}$ และ $\hat{V}_a^{(2)}$ โดยนำ A^{-1} คูณตลอดจะได้สมการที่ 4.11

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a^{(0)} \\ \hat{V}_a^{(1)} \\ \hat{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าได้จากสมการที่ 4.12 และ 4.14

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a^{(0)} \\ \hat{I}_a^{(1)} \\ \hat{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{I}_a^{(0)} \\ \hat{I}_a^{(1)} \\ \hat{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

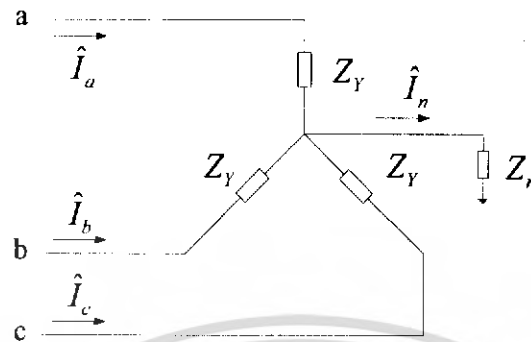
$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a^{(0)} \\ \hat{I}_a^{(1)} \\ \hat{I}_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$S_{3\phi} = 3 \begin{bmatrix} \hat{V}_a^{(0)} & \hat{V}_a^{(1)} & \hat{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a^{(0)} \\ \hat{I}_a^{(1)} \\ \hat{I}_a^{(2)} \end{bmatrix}^* \quad (4.14)$$

$$\hat{S}_{3\phi} = 3\hat{V}_a^{(0)}\hat{I}_a^{(0)} + 3\hat{V}_a^{(1)}\hat{I}_a^{(1)} + 3\hat{V}_a^{(2)}\hat{I}_a^{(2)} \quad (4.15)$$

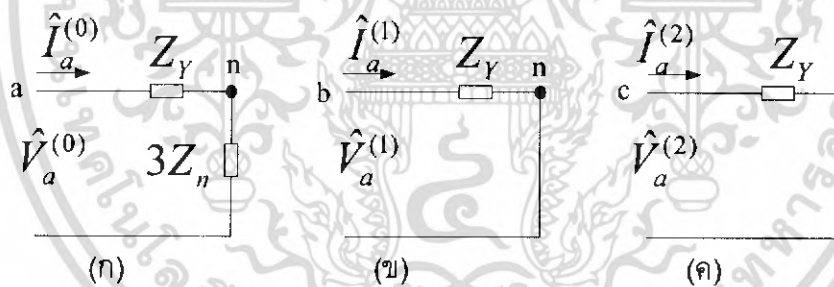
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส สามารถต่อ Impedance ได้ 2 แบบ คือ Star และ Delta การต่อ 2 ลักษณะนี้มีวงจรสมมูลใน Symmetrical Component ไม่เหมือนกัน



รูปที่ 4.2 การต่อภาระทางไฟฟ้าแบบ Star with neutral

จากรูปที่ 4.2 แสดงการต่อ Impedance แบบ Star with neutral มีกระแสไฟฟ้า \hat{I}_a , \hat{I}_b , \hat{I}_c ไหลเข้าวงจร \hat{I}_n คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากจุดต่อรวมของโหลดลง Ground โดยผ่าน Z_n เป็น Impedance ที่ต่อจากจุดรวมของโหลดลง Ground สามารถเขียนวงจรสมมูลที่ใช้กับ Symmetrical Component ได้ 3 วงจร



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลเมื่อใช้วิธี Symmetrical Component

จากรูปที่ 4.3 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้

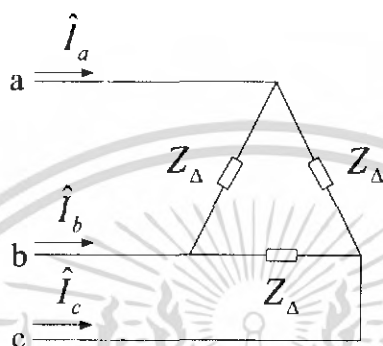
$$\hat{V}_a^{(0)} = (Z_Y + 3Z_n)\hat{I}_a^{(0)} = Z_0\hat{I}_a^{(0)} \quad (4.16)$$

$$\hat{V}_a^{(1)} = Z_Y\hat{I}_a^{(1)} = Z_1\hat{I}_a^{(1)} \quad (4.17)$$

$$\hat{V}_a^{(2)} = Z_Y\hat{I}_a^{(2)} = Z_2\hat{I}_a^{(2)} \quad (4.18)$$

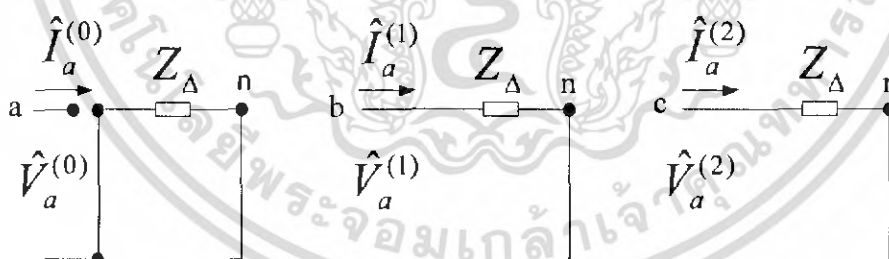
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 (ก) เรียกว่า Zero Sequence Circuit และ Z_1 เรียกว่า Impedance to Zero Sequence Current รูปที่ 4.3 (ข) เรียกว่า Positive Sequence Circuit และ Z_2 เรียกว่า Impedance to Positive Sequence Current รูปที่ 4.3 (ค) เรียกว่า Negative Sequence Circuit และ Z_0 เรียกว่า Impedance to Negative Sequence Current จะเห็นได้ว่า Z_1 และ Z_2 มีค่าเท่ากัน และในการทดลอง $Z_0 = 0$ เนื่องจาก neutral ของโหลดต่อเข้ากับ neutral ของแหล่งจ่ายโดยตรง



รูปที่ 4.4 การต่อภาระทางไฟฟ้าแบบ Delta

จากรูปที่ 4.4 เป็นการต่อแบบ Delta สามารถเขียนวงจรสมมูลที่ใช้กับ Symmetrical Component ได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลเมื่อใช้วิธี Symmetrical Component

วงจรสมมูลที่ใช้กับ Symmetrical component สำหรับการต่อแบบ Star และ Delta จากรูปที่ 4.3 และ 4.5 จะเห็นว่า Positive Sequence Circuit และ Negative Sequence Circuit เหมือนกัน แต่มี Zero Sequence Circuit ที่แตกต่างกัน แต่เมื่อเทียบการต่อแบบ Star isolated Neutral กับ Delta แล้วจะไม่มี Zero Sequence Current เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

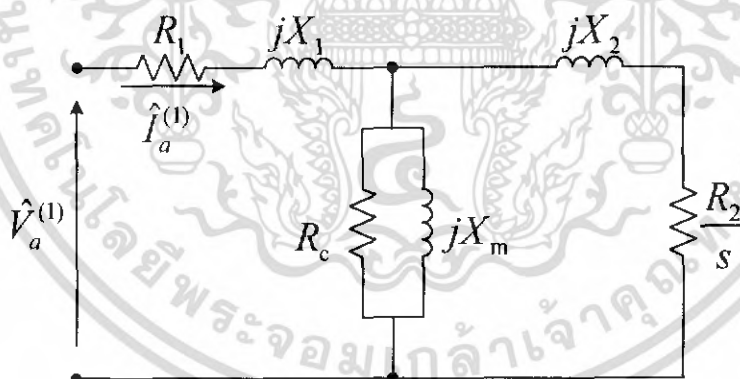
วิธีการ Symmetrical Component มักถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาด้าน Power System เพราะในระบบเกิดสภาวะไม่สมดุลอยู่ตลอดเวลา เพื่อหาค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าในสภาวะแรงดันไม่สมดุล หรือเกิดการลัดวงจรในแบบต่างๆ การนำ Symmetrical Component มาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นบนเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล จาก Symmetrical Component สามารถแยกแรงดันไฟฟ้าได้ 3 Sequence จะทำให้เกิดวงจรสมมูลของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 วงจรแตกต่างกันตามแรงดันป้อนเข้าดังนี้

เมื่อ Positive Sequence Voltage ป้อนเข้าเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ วงจรสมมูลยังคงเหมือนเดิม เพราะ Positive Sequence Voltage มี Sequence เดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า หาค่า Slip ได้จากสมการ

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (4.19)$$

$$N_r = N_s(1-s) \quad (4.20)$$

สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลของ Positive Sequence Voltage

Negative Sequence Voltage มี Sequence ตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ทำให้สร้างสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของ Rotor โดยยึดทิศทางการสนามแม่เหล็กเป็นหลัก ทิศทางการหมุนของ Rotor จึงเป็นลบ หาค่า Slip Negative ได้จากสมการ

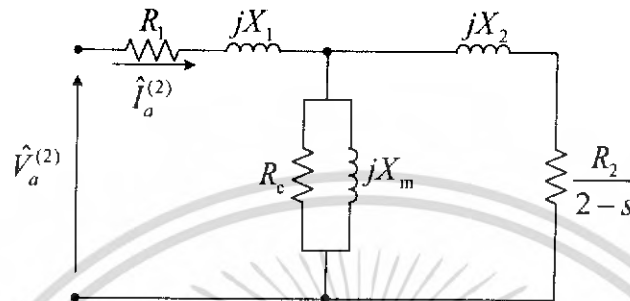
$$s^{(2)} = \frac{N_s + N_r}{N_s} \quad (4.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ 4.21 แทนในสมการที่ 4.20 ได้ความสัมพันธ์ Slip Negative กับ Slip ได้

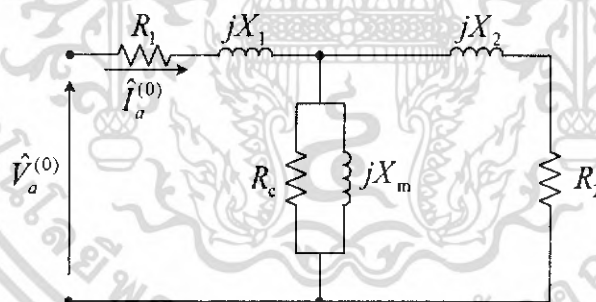
$$s^{(2)} = (2-s) \quad (4.22)$$

โดยมี Parameter เหมือนกับ Positive Sequence Circuit สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูป 4.7 วงจรสมมูลของ Negative Sequence Voltage

จากนิยามของ Zero Sequence Components เปรียบเสมือนกับแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส ที่มี Line 3 เส้น ดังนั้นเมื่อ Zero Sequence Voltage ป้อนเข้า Stator จะไม่สร้างสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้เครื่องจักรเหนี่ยวนำไม่หมุน Slip มีค่าเท่ากับ 1 สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลของ Zero Sequence Voltage

จากวงจรสมมูลทั้ง 3 วงจรสามารถหาสมการกระแส และกำลังได้โดยกำหนดให้

$$\hat{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad (4.23)$$

$$\hat{Z}_\phi = \frac{R_c \times jX_m}{R_c + jX_m} \quad (4.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{Z}_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (4.25)$$

ค่า \hat{Z}_0 และ \hat{Z}_1 มีค่าเท่ากันใน Positive, Negative และ Zero Sequence แต่ค่า \hat{Z}_2 ใน Positive, Negative และ Zero Sequence มีค่าตามสมการด้านล่าง

$$\hat{Z}_2^{(1)} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (4.26)$$

$$\hat{Z}_2^{(2)} = \frac{R_2}{(2-s)} + jX_2 \quad (4.27)$$

$$\hat{Z}_2^{(0)} = R_2 + jX_2 \quad (4.28)$$

Impedance รวมของแต่ละ Sequence

$$\hat{Z}_t^{(1)} = \hat{Z}_1^{(1)} + \left(\frac{\hat{Z}_\phi^{(1)} \hat{Z}_2^{(1)}}{\hat{Z}_\phi^{(1)} + \hat{Z}_2^{(1)}} \right) \quad (4.29)$$

$$\hat{Z}_t^{(2)} = \hat{Z}_1^{(2)} + \left(\frac{\hat{Z}_\phi^{(2)} \hat{Z}_2^{(2)}}{\hat{Z}_\phi^{(2)} + \hat{Z}_2^{(2)}} \right) \quad (4.30)$$

$$\hat{Z}_t^{(0)} = \hat{Z}_1^{(0)} + \left(\frac{\hat{Z}_\phi^{(0)} \hat{Z}_2^{(0)}}{\hat{Z}_\phi^{(0)} + \hat{Z}_2^{(0)}} \right) \quad (4.31)$$

สมการที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 คือ Impedance ของ Positive, Negative และ Zero Sequence Circuit ตามลำดับ สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าใน Sequence ต่างๆได้

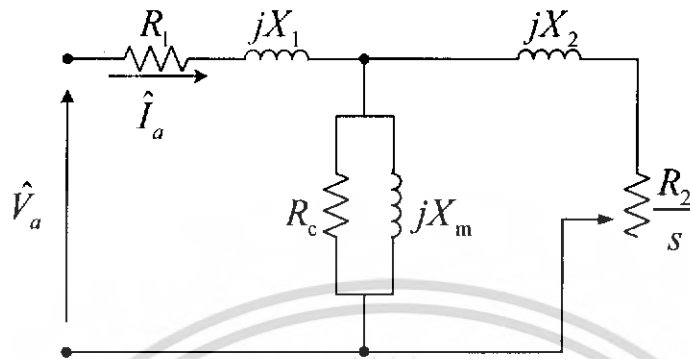
$$I_a^{(1)} = \left(\frac{V_a^{(1)}}{Z_t^{(1)}} \right) \quad (4.32)$$

$$I_a^{(2)} = \left(\frac{V_a^{(2)}}{Z_t^{(2)}} \right) \quad (4.33)$$

$$I_a^{(0)} = \left(\frac{V_a^{(0)}}{Z_t^{(0)}} \right) \quad (4.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบ Symmetrical Component ได้แล้ว จะทำการเปลี่ยนค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้ากลับสู่ระบบจริงได้โดยใช้สมการที่ 4.12 และสามารถหากำลังไฟารวมได้จากสมการ 4.15



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลเมื่อเปลี่ยนจาก Symmetrical เป็นระบบจริง

การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวงจรสมมูลในสภาวะปกติ เมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล สมการในการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะปกติไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากขอบเขตของสมการกำหนดให้ใช้ได้เฉพาะในสภาวะแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสมดุลเท่านั้น ดังนั้นเพื่อจะสามารถวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลได้จึงนำวิธี Symmetrical Component มาประยุกต์ใช้กับสมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยแยกวงจรสมมูลออกเป็น 3 วงจร และใช้วิธี Superposition แยกคำนวณและนำกลับมารวมกันอีกครั้งเพื่อหาค่าจริง ขอบเขตของวิธี Symmetrical Component คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องใช้งานในช่วง Linear เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบ

5.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

ในการกำหนดแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ใช้ในการทดสอบ เราจะใช้สูตรในการคำนวณตามสมการที่ 5.1

$$\%PVUR = \frac{\text{Max}\{|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|\}}{V_{avg}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (5.2)$$

%PVUR = Percentage phase voltage unbalance

V_{avg} = แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

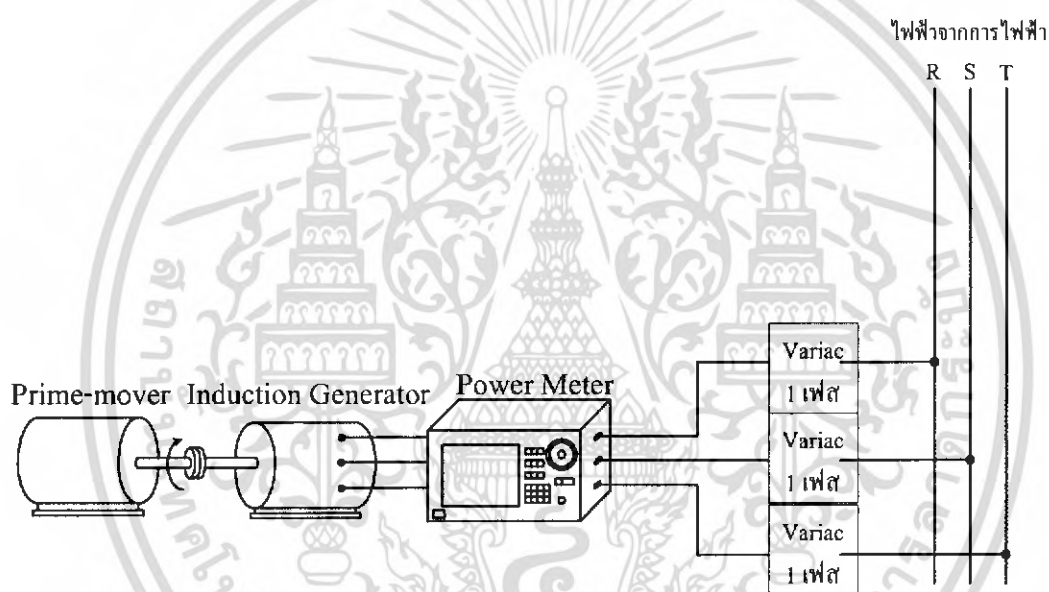
ตารางที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

%PVUR	V_a	V_b	V_c	สัญลักษณ์	ความหมาย
0	220	220	220	B	แรงดันไฟฟ้าสมดุล
5	220	237	220	5% 1 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1 เฟส สูงกว่าปกติ
5	220	220	204	5% 1 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ
5	237	237	220	5% 2 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 2 เฟส สูงกว่าปกติ
5	220	204	204	5% 2 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ
5	250	236	228	5% 3 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 3 เฟส สูงกว่าปกติ
5	190	200	210	5% 3 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ
7	220	220	244	7% 1 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 1 เฟส สูงกว่าปกติ
7	220	198	220	7% 1 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ
7	220	244	244	7% 2 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 2 เฟส สูงกว่าปกติ
7	198.4	198.4	220	7% 2 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

Primover (DC Motor & Drive)	1	ชุด
Torque meter	1	ชุด
Tachometer	1	เครื่อง
VOM	1	เครื่อง
Power meter (รุ่น PZ 4000)	1	เครื่อง
Induction motor (1HP)	1	ตัว
Variac	3	ชุด



รูปที่ 5.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรการทดลองดังรูป 5.1 โดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นแบบสตาร์
2. ตรวจสอบทิศทางการหมุนของตัวต้นกำลัง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน
3. ป้อนแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีแรงดันป้อนเข้า ตามตารางที่ 5.1
4. ปรับความเร็วรอบของตัวต้นกำลังให้ได้ความเร็วรอบเท่ากับ synchronous speed จากนั้นเพิ่มความเร็วรอบของตัวต้นกำลังขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น และจดบันทึกค่าจนกว่ากระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถึงพิกัดกระแส
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 3 และ 4 โดยเปลี่ยนแรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามตารางที่ 5.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าสมดุล (Balance)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
0.2	1500	0.000	219.92	219.68	221.29	1.09	1.07	1.07	82.73	82.56	81.87	30.26	30.40	33.46	94.12	-	
-0.49	1510	-0.007	220.22	219.58	221.17	1.11	1.10	1.10	91.29	91.20	90.71	-5.64	-5.22	-3.28	-14.14	20.25	
-1.1	1520	-0.013	219.58	218.74	221.19	1.17	1.11	1.15	99.15	97.46	97.19	-41.06	-31.74	-31.78	-104.58	-79.14	
-2.04	1530	-0.020	220.90	220.74	221.41	1.29	1.24	1.27	107.18	107.13	105.70	-84.58	-80.90	-76.02	-241.50	-179.34	
-2.68	1540	-0.027	220.05	219.59	221.67	1.41	1.34	1.35	112.57	112.69	110.70	-119.28	-113.48	-105.92	-338.68	-280.23	
-3.4	1550	-0.033	220.83	220.11	221.49	1.50	1.45	1.47	116.51	116.63	115.49	-147.86	-142.80	-139.98	-430.64	-381.71	
-4.12	1560	-0.040	220.47	220.04	221.29	1.61	1.59	1.54	119.69	119.99	118.86	-176.06	-174.72	-165.08	-515.86	-483.64	
-4.58	1570	-0.047	220.87	220.01	222.39	1.72	1.66	1.66	121.85	122.77	120.59	-200.76	-197.50	-187.78	-586.04	-585.89	
-5.35	1580	-0.053	220.20	219.26	221.78	1.83	1.79	1.78	124.48	125.64	123.33	-228.44	-229.04	-216.98	-674.46	-688.34	
-5.94	1590	-0.060	220.22	219.58	221.56	1.96	1.91	1.92	126.42	127.19	125.84	-255.98	-254.04	-249.24	-759.26	-790.82	
-6.48	1600	-0.067	220.00	219.24	221.25	2.06	2.01	2.01	127.61	128.36	127.12	-276.26	-273.24	-268.30	-817.80	-893.19	
-6.94	1610	-0.073	220.15	219.60	221.64	2.16	2.11	2.12	128.69	129.27	128.06	-297.84	-293.40	-289.16	-880.40	-995.30	

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1 เฟส สูงกว่าปกติ (5% 1 - O)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
0.1	1500	0.000	220.74	237.57	220.75	1.00	1.61	0.95	90.79	74.21	89.37	-3.00	104.00	2.30	103.30	-	
-0.4	1510	-0.007	220.10	237.81	220.82	0.99	1.61	0.99	98.28	79.89	96.83	-31.40	67.20	-26.10	9.70	26.51	
-1.4	1520	-0.013	220.19	237.96	220.15	1.12	1.67	1.10	111.52	86.94	109.28	-90.60	21.10	-80.20	-149.70	-78.06	
-2.2	1530	-0.020	220.03	237.52	220.05	1.23	1.71	1.22	118.02	91.07	115.63	-126.90	-7.60	-115.90	-250.40	-183.49	
-3	1540	-0.027	220.27	237.94	220.15	1.40	1.80	1.40	124.28	95.93	122.13	-173.10	-44.30	-163.70	-381.10	-289.65	
-3.6	1550	-0.033	220.10	237.78	220.06	1.48	1.83	1.48	126.90	98.34	124.67	-195.80	-63.20	-185.40	-444.40	-396.42	
-4.4	1560	-0.040	220.39	237.16	220.31	1.63	1.92	1.62	130.04	102.99	127.95	-231.70	-102.30	-220.00	-554.00	-503.67	
-5.4	1570	-0.047	220.44	237.16	220.31	1.75	2.04	1.74	132.68	107.12	130.95	-261.90	-142.20	-250.60	-654.70	-611.26	
-6.15	1580	-0.053	220.55	237.31	220.34	1.85	2.14	1.83	133.89	109.49	132.40	-282.86	-169.10	-271.89	-723.85	-719.05	
-7.1	1590	-0.060	220.22	237.70	219.50	2.04	2.19	2.01	138.03	113.53	137.11	-334.01	-207.82	-323.24	-865.07	-826.88	

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ (5% 1 - U)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.05	1500	0.000	219.95	203.87	220.17	1.14	0.74	1.23	77.56	97.05	87.31	54.30	-18.50	12.70	48.50	-	
-0.5	1510	-0.007	220.77	204.32	220.37	1.19	0.79	1.24	84.06	108.36	92.56	27.10	-51.00	-12.20	-36.10	23.88	
-1.1	1520	-0.013	220.57	204.70	220.74	1.21	0.89	1.29	89.75	118.24	96.82	1.20	-86.20	-33.80	-118.80	-70.74	
-2.15	1530	-0.020	220.08	204.45	220.40	1.30	1.09	1.33	98.25	129.02	103.86	-41.00	-140.70	-73.00	-254.70	-166.14	
-2.8	1540	-0.027	220.21	204.14	220.06	1.37	1.22	1.46	101.99	133.77	108.64	-62.50	-172.00	-103.00	-337.50	-262.21	
-3.3	1550	-0.033	220.97	204.38	220.21	1.45	1.34	1.55	105.42	137.85	112.54	-85.10	-199.80	-130.70	-415.60	-358.82	
-3.95	1560	-0.040	220.91	203.88	220.99	1.54	1.50	1.67	109.82	140.47	115.36	-115.10	-236.40	-157.60	-509.10	-455.87	
-4.7	1570	-0.047	220.35	203.66	219.55	1.65	1.66	1.75	113.49	141.46	119.34	-144.70	-264.10	-188.10	-596.90	-553.23	
-5.4	1580	-0.053	221.09	204.31	220.59	1.78	1.82	1.89	116.67	142.87	121.70	-176.30	-295.90	-218.70	-690.90	-650.76	
-6.35	1590	-0.060	220.78	205.52	220.93	2.01	2.08	2.17	122.43	144.80	125.79	-238.30	-350.10	-280.30	-868.70	-748.34	

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 2 เฟส สูงกว่าปกติ (5% 2 - O)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.05	1500	0.000	220.83	237.52	237.72	0.87	1.48	1.38	93.89	80.76	78.91	-13.1	56.5	62.9	106.30	-	
-0.6	1510	-0.007	220.91	237.81	237.92	0.92	1.48	1.41	102.94	86.06	84.75	-45.3	24.2	30.6	9.50	27.60	
-1.5	1520	-0.013	220.07	237.84	238.01	1.02	1.53	1.49	116.24	92.30	91.48	-99.1	-14.6	-9.1	-122.80	-82.30	
-2.3	1530	-0.020	220.53	237.55	237.87	1.17	1.54	1.56	122.69	97.56	96.40	-139	-49.5	-41.4	-229.90	-193.08	
-3	1540	-0.027	220.91	237.04	237.43	1.31	1.64	1.64	127.01	102.10	101.02	-174.5	-81.6	-74.3	-330.40	-304.64	
-4	1550	-0.033	221.11	237.67	237.36	1.53	1.78	1.78	132.06	107.10	105.94	-226.8	-124.4	-116.3	-467.50	-416.84	
-4.7	1560	-0.040	220.62	238.00	237.22	1.68	1.89	1.85	135.07	109.52	109.60	-262.4	-150.1	-147.3	-559.80	-529.55	
-5.9	1570	-0.047	220.95	237.79	237.65	1.90	2.07	2.02	137.16	114.28	113.42	-308.4	-202.2	-190.9	-701.50	-642.61	
-6.3	1580	-0.053	220.67	237.16	237.18	2.00	2.12	2.12	138.01	116.33	115.51	-328.1	-223.4	-216.7	-768.20	-755.88	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ (5% 2 - U)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.1	1500	0.000	220.02	204.25	204.34	1.31	0.80	0.87	76.59	36.34	95.69	66.80	10.50	-17.50	59.80	-	
-0.6	1510	-0.007	220.64	204.29	204.22	1.34	0.82	0.91	82.79	95.93	104.31	37.10	-17.40	-47.60	-27.90	22.94	
-1.3	1520	-0.013	221.01	204.61	204.51	1.38	0.92	1.00	88.28	107.19	115.15	9.20	-55.50	-87.10	-133.40	-67.05	
-1.9	1530	-0.020	220.93	204.75	204.64	1.43	1.03	1.13	89.01	115.45	122.54	-16.60	-90.60	-124.60	-231.80	-157.76	
-2.5	1540	-0.027	220.40	204.97	204.23	1.46	1.11	1.22	96.65	113.92	126.83	-37.20	-110.40	-149.10	-296.70	-249.11	
-3.3	1550	-0.033	220.31	204.01	204.14	1.55	1.26	1.40	101.66	126.61	131.51	-69.10	-154.30	-189.80	-413.20	-340.99	
-3.8	1560	-0.040	220.22	203.96	203.67	1.59	1.35	1.48	103.72	128.60	133.78	-82.80	-172.30	-209.00	-464.10	-433.28	
-4.7	1570	-0.047	220.99	204.62	204.65	1.71	1.52	1.66	108.01	132.12	135.99	-116.70	-208.30	-245.00	-570.00	-525.86	
-5.1	1580	-0.053	219.41	204.22	204.85	1.79	1.70	1.85	113.17	134.56	136.64	-154.30	-244.10	-275.10	-673.50	-618.60	
-5.7	1590	-0.060	220.48	204.35	204.06	1.96	1.84	2.00	115.05	136.66	139.90	-182.60	-272.90	-311.90	-767.40	-711.39	
-6.2	1600	-0.067	220.49	204.28	204.02	2.05	2.01	2.12	117.11	137.96	140.78	-206.30	-304.94	-335.50	-846.74	-804.08	

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 3 เฟส สูงกว่าปกติ (5% 3 - O)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.05	1500	0.000	250.93	236.78	228.93	1.79	1.25	1.07	74.80	84.47	101.60	116.9	28.6	-49.4	96.10	-	
-0.7	1510	-0.007	250.88	236.69	228.02	1.79	1.30	1.14	79.80	90.14	110.31	79.3	-0.8	-90.1	-11.60	30.39	
-1.65	1520	-0.013	250.98	236.85	228.13	1.81	1.39	1.29	85.55	97.24	118.34	35.3	-41.4	-140	-146.10	-85.93	
-2.3	1530	-0.020	250.29	236.05	228.30	1.83	1.45	1.40	89.57	102.56	122.37	3.4	-74.2	-171.7	-242.50	-203.19	
-3.3	1540	-0.027	250.21	236.09	228.29	1.90	1.57	1.60	94.62	108.52	127.62	-38.3	-117.9	-222.9	-379.10	-321.27	
-4.1	1550	-0.033	250.12	236.05	228.23	1.97	1.69	1.76	98.09	112.70	130.70	-69.4	-153.8	-262.3	-485.50	-440.03	
-5.1	1560	-0.040	250.28	236.19	228.34	2.09	1.86	1.98	102.22	117.11	133.62	-110.5	-200.6	-311.3	-622.40	-559.33	
-6	1570	-0.047	250.22	236.23	228.26	2.20	2.02	2.15	105.35	119.95	135.32	-145.4	-238	-349.1	-732.50	-679.00	

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ (5% 3 - U)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.05	1500	0.000	190.64	200.25	210.79	0.61	0.94	1.21	92.27	91.82	78.58	-4.59	-5.9	50.5	40.01	-	
-0.65	1510	-0.007	190.38	199.71	210.37	0.64	0.95	1.25	107.52	98.16	85.54	-36.88	-27	20.4	-43.48	22.14	
-1.3	1520	-0.013	190.71	200.79	210.32	0.75	1.02	1.29	121.71	104.83	91.39	-75.61	-52.7	-6.6	-134.91	-60.00	
-1.8	1530	-0.020	190.65	199.81	210.19	0.87	1.07	1.34	127.89	111.47	94.91	-101.5	-78.3	-24.1	-203.85	-142.81	
-2.4	1540	-0.027	190.80	200.39	210.71	1.01	1.19	1.42	134.96	118.08	99.52	-136.8	-112	-49.7	-298.50	-226.20	
-3.1	1550	-0.033	190.83	200.48	210.76	1.17	1.31	1.51	139.17	123.12	103.83	-168.6	-143	-75.8	-387.40	-310.06	
-3.7	1560	-0.040	190.80	200.53	210.76	1.32	1.44	1.59	141.89	126.89	107.75	-197.7	-173.1	-102.2	-473.00	-394.30	
-4.3	1570	-0.047	190.63	200.42	210.63	1.47	1.57	1.68	143.90	129.82	111.16	-226	-201.2	-127.9	-555.10	-478.81	
-4.9	1580	-0.053	190.82	200.56	210.71	1.61	1.69	1.77	145.52	131.87	114.93	-253.2	-226.2	-157.2	-636.68	-563.47	
-5.5	1590	-0.060	190.45	200.62	210.35	1.75	1.81	1.85	146.80	132.98	117.07	-278.9	-247.6	-177.1	-703.53	-648.17	
-6.1	1600	-0.067	190.76	200.12	210.48	1.90	1.94	1.98	148.28	134.31	121.57	-308.3	-271.2	-218.2	-797.69	-732.78	
-6.7	1610	-0.073	190.34	200.45	210.52	2.05	2.08	2.12	150.22	135.98	124.86	-338.7	-299.8	-255.1	-893.58	-817.16	

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันที่ไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 1 เฟส สูงกว่าปกติ (7% 1 - O)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.05	1500	0.000	220.93	221.09	244.66	0.87	1.04	1.77	92.08	100.99	77.05	-6.90	-43.60	97.10	46.60	-	
-0.75	1510	-0.007	220.31	220.53	244.46	0.91	1.06	1.79	100.16	106.08	80.42	-35.30	-64.50	73.00	-26.80	32.12	
-1.6	1520	-0.013	220.94	220.55	244.02	1.05	1.17	1.82	109.42	116.13	86.71	-77.10	-114.10	25.50	-165.70	-74.63	
-2.2	1530	-0.020	221.04	219.98	244.24	1.13	1.28	1.85	114.22	121.81	88.93	-102.10	-143.50	3.40	-242.20	-182.25	
-3.1	1540	-0.027	220.13	220.33	244.62	1.28	1.46	1.94	123.01	127.32	93.17	-153.90	-195.40	-26.20	-375.50	-290.62	
-3.95	1550	-0.033	219.66	220.08	244.71	1.42	1.59	2.01	127.25	130.69	96.04	-188.50	-227.90	-51.90	-468.30	-399.61	
-4.85	1560	-0.040	220.42	220.93	244.28	1.61	1.80	2.08	130.37	132.80	100.39	-229.50	-270.20	-91.60	-591.30	-509.09	
-5.6	1570	-0.047	220.76	221.24	244.76	1.77	1.96	2.18	132.56	134.61	102.98	-263.80	-305.00	-119.60	-688.40	-618.92	
-6	1580	-0.053	220.24	220.61	243.36	2.00	2.06	2.24	134.34	136.27	106.22	-307.85	-328.30	-152.20	-788.35	-728.94	

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ (7% 1 - U)

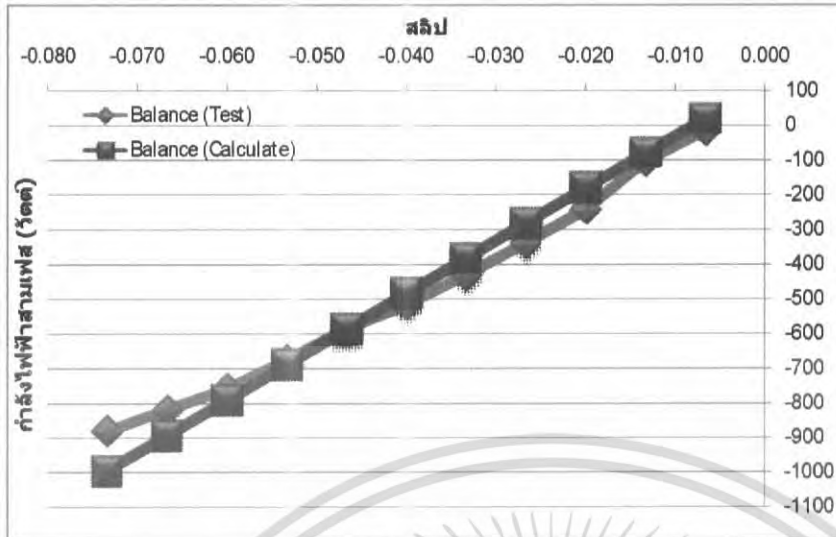
Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
0.1	1500	0.000	219.76	197.48	220.48	1.21	0.58	1.30	73.06	100.35	81.70	77.60	-20.60	41.50	98.50	-	
-0.6	1510	-0.007	219.64	197.47	220.14	1.22	0.66	1.31	81.28	117.86	89.86	40.60	-61.30	0.70	-20.00	27.63	
-1.2	1520	-0.013	219.65	198.23	220.48	1.25	0.85	1.34	88.48	130.44	94.92	7.30	-108.80	-25.40	-126.90	-65.24	
-2	1530	-0.020	220.05	197.82	219.95	1.34	1.03	1.39	94.03	138.95	100.94	-20.80	-154.20	-58.20	-233.20	-158.87	
-2.7	1540	-0.027	219.90	198.19	220.33	1.40	1.22	1.50	99.63	143.11	106.19	-51.50	-193.30	-92.00	-336.80	-253.16	
-3.4	1550	-0.033	220.46	198.10	220.16	1.49	1.35	1.57	102.95	145.76	110.18	-73.50	-221.40	-119.40	-414.30	-347.98	
-4.35	1560	-0.040	220.36	198.10	220.44	1.58	1.53	1.66	106.76	147.77	113.66	-100.90	-256.20	-146.60	-503.70	-443.23	
-5	1570	-0.047	220.42	198.43	220.77	1.72	1.77	1.84	112.69	148.99	117.89	-146.40	-301.80	-189.70	-637.90	-538.78	
-5.4	1580	-0.053	219.97	198.75	219.98	1.82	1.89	1.98	116.00	149.46	122.21	-175.10	-322.90	-225.60	-723.60	-634.51	
-6	1590	-0.060	219.69	198.54	219.78	2.01	2.04	2.08	118.63	149.85	123.15	-211.58	-350.60	-250.50	-812.68	-730.27	

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการทดลองกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 2 เฟส สูงกว่าปกติ (7% 2 - O)

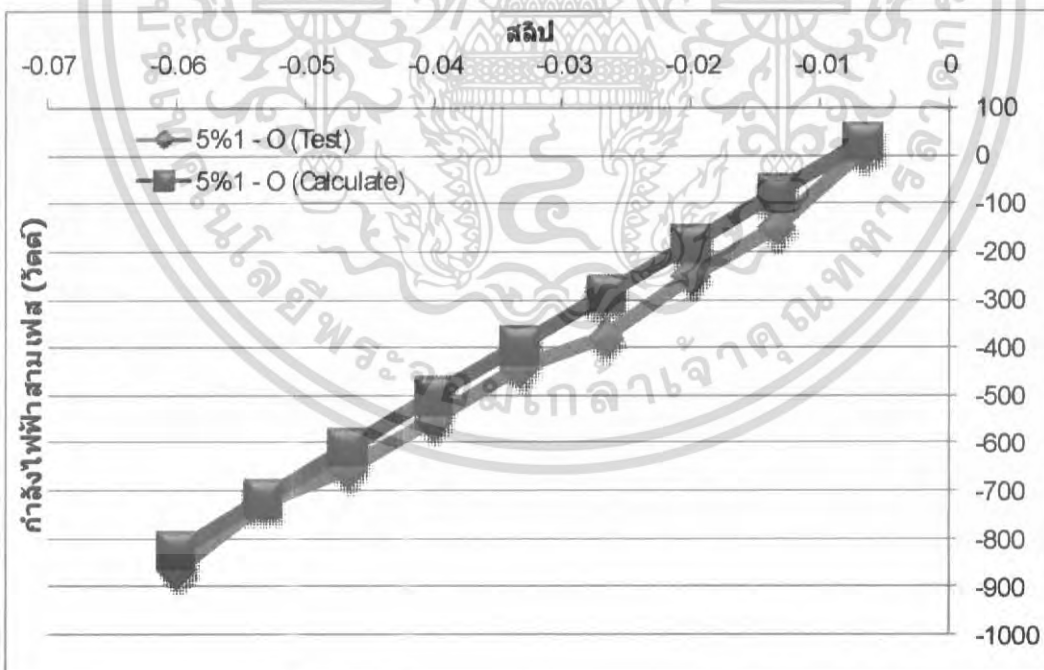
Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.1	1500	0.000	220.72	244.38	244.63	0.83	1.66	1.53	106.74	81.31	78.75	-52.6	61.1	73.1	81.60	-	
-0.8	1510	-0.007	220.29	244.02	244.21	0.89	1.65	1.55	113.93	84.72	82.43	-79.3	36.9	49.9	7.50	33.68	
-1.7	1520	-0.013	220.43	243.97	244.07	1.05	1.68	1.60	123.37	90.73	88.18	-126.9	-5.3	12.4	-119.80	-80.69	
-2.5	1530	-0.020	220.70	244.53	244.77	1.27	1.76	1.72	131.31	96.00	94.05	-184.6	-44.9	-29.6	-259.10	-196.00	
-3.3	1540	-0.027	220.11	243.90	244.35	1.42	1.81	1.78	135.14	99.52	97.50	-221.7	-72.8	-56.7	-351.20	-312.10	
-4	1550	-0.033	219.96	243.50	244.05	1.58	1.88	1.85	137.63	103.26	100.86	-256.2	-105	-84.2	-445.40	-428.88	
-4.9	1560	-0.040	220.18	243.86	244.00	1.82	2.05	2.00	140.34	108.07	105.99	-308.7	-155	-134.4	-598.10	-546.17	
-5.9	1570	-0.047	220.32	243.90	244.36	2.00	2.14	2.10	141.51	110.64	108.33	-344.9	-184.2	-161.6	-690.69	-663.85	

ตารางที่ 5.12 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 7% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ (7% 2 - U)

Tavg	Nr	Slip	V1	V2	V3	Test										Calculate	
						I1	I2	I3	degree1	degree2	degree3	P1	P2	P3	Ptot	Ptot	
-0.05	1500	0.000	220.49	198.09	197.71	1.45	0.69	0.77	74.87	88.64	99.84	83.60	3.30	-26.00	60.90	-	
-1.1	1510	-0.007	219.87	198.06	198.22	1.44	0.74	0.84	80.54	99.63	109.24	52.10	-24.30	-54.60	-26.80	26.35	
-1.25	1520	-0.013	220.40	198.41	198.23	1.49	0.80	0.91	84.99	109.29	118.83	28.60	-52.70	-86.90	-111.00	-60.23	
-2	1530	-0.020	220.38	198.35	197.89	1.54	0.97	1.09	90.47	120.83	129.21	-2.80	-98.10	-136.30	-237.20	-147.52	
-2.65	1540	-0.027	220.42	198.38	19.34	1.59	1.06	1.20	93.86	125.58	132.55	-23.60	-122.00	-160.60	-306.20	-235.41	
-3.3	1550	-0.033	220.31	198.42	197.99	1.64	1.21	1.36	97.67	130.28	136.99	-48.20	-154.80	-196.50	-399.50	-323.81	
-4.05	1560	-0.040	219.99	198.37	198.12	1.70	1.31	1.49	100.91	133.15	138.86	-70.60	-178.10	-222.00	-470.70	-412.60	
-4.6	1570	-0.047	220.79	198.84	198.27	1.78	1.52	1.67	104.33	136.21	141.46	-97.30	-218.10	-259.20	-574.60	-501.68	
-4.75	1580	-0.053	220.01	197.89	197.83	1.84	1.61	1.79	106.95	138.35	142.19	-118.20	-238.00	-279.90	-636.10	-590.91	
-5.4	1590	-0.060	219.61	197.71	197.69	1.93	1.75	1.92	109.92	139.72	143.00	-144.40	-263.30	-303.50	-711.20	-680.19	
-5.9	1600	-0.067	220.75	197.94	198.18	2.01	1.88	2.04	111.08	140.86	143.67	-159.60	-288.00	-325.40	-773.00	-769.37	
-6.4	1610	-0.073	220.49	197.78	197.79	2.12	2.02	2.21	113.60	141.83	144.48	-187.50	-314.10	-355.50	-857.10	-858.32	

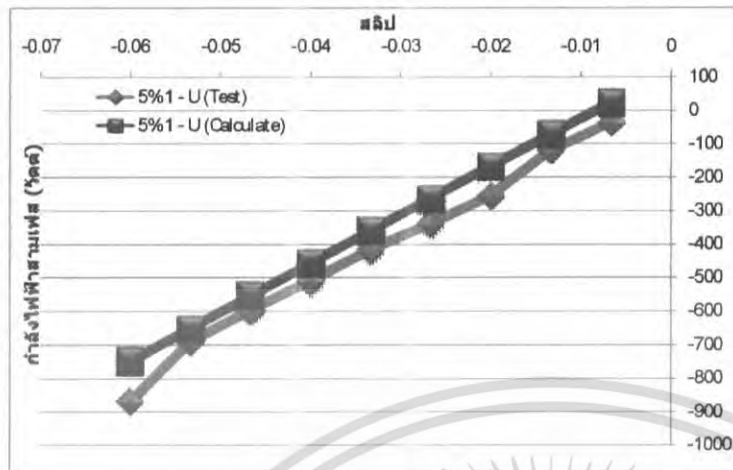


รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการทดลองกับการคำนวณที่แรงดันไฟฟ้าสมดุล



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการทดลองกับการคำนวณที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% เฟส สูงกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการทดลองกับการคำนวณที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 5% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ

5.1.4 สรุปผลการทดลองที่ 5.1

จากกราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากการทดลองกับการคำนวณ พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองพบว่า ถ้าต้องการ Power Output ที่ค่าๆ หนึ่งเมื่อเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สมดุลมากขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องการ Power Input มากขึ้น

5.2 การทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แรงดันผิดปกติต่าง ๆ

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทำการวัด Power Output ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานที่แรงดันผิดปกติต่าง ๆ เมื่อกำหนดให้ Power Input ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่

5.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

Prime-mover (DC Motor & Drive)	1	ชุด
Torque meter	1	ชุด
Tachometer	1	เครื่อง
VOM	1	เครื่อง
Power meter (รุ่น PZ 4000)	1	เครื่อง
Induction motor (1HP)	1	ตัว
Variac	3	ชุด

5.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อบริการทดลองดังรูป 5.1 โดยต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นแบบสตาร์
2. ตรวจสอบทิศทางการหมุนของตัวต้นกำลัง และเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน
3. ป้อนแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้มีแรงดันป้อนเข้าเท่ากับ 220
4. ปรับความเร็วรอบของตัวต้นกำลังจนกระแสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำถึงพิกัดกระแส บันทึกค่า Power Input ที่ได้
5. ปรับแรงดันป้อนเข้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามตารางที่ 5.1 โดยใช้ Power Input จากข้อที่ 4 บันทึกค่า แรงดัน, กระแส, มุมระหว่างแรงดันกับกระแส และค่า Power Output
6. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 5 โดยเปลี่ยนแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบที่ 5.2

%PVUR	V_a	V_b	V_c	สัญลักษณ์	ความหมาย
0	220	220	220	B	แรงดันไฟฟ้าสมดุล
2	226.7	220	220	2% 1 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 2% 1 เฟส สูงกว่าปกติ
2	213.4	220	220	2% 1 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 2% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ
2	226.7	226.7	220	2% 2 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 2% 2 เฟส สูงกว่าปกติ
2	213.5	213.5	220	2% 2 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 2% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ
2	222	227.6	230	2% 3 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 2% 3 เฟส สูงกว่าปกติ
2	216	208	211.3	2% 3 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 2% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ
4	233.5	220	220	4% 1 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 4% 1 เฟส สูงกว่าปกติ
4	207.1	220	220	4% 1 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 4% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ
4	233.7	233.7	220	4% 2 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 4% 2 เฟส สูงกว่าปกติ
4	207.3	207.3	220	4% 2 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 4% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ
4	222	232.8	239	4% 3 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 4% 3 เฟส สูงกว่าปกติ
4	216	207.1	200	4% 3 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 4% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ
6	240.4	220	220	6% 1 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 6% 1 เฟส สูงกว่าปกติ
6	200.8	220	220	6% 1 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 6% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ
6	241	241	220	6% 2 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 6% 2 เฟส สูงกว่าปกติ
6	201.3	201.3	220	6% 2 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 6% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ
6	222	235	241.4	6% 3 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 6% 3 เฟส สูงกว่าปกติ
6	216	203	192.3	6% 3 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 6% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ
8	247.5	220	220	8% 1 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 8% 1 เฟส สูงกว่าปกติ
8	194.6	220	220	8% 1 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 8% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ
8	248.1	248.1	220	8% 2 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 8% 2 เฟส สูงกว่าปกติ
8	195.6	195.6	220	8% 2 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 8% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ
8	222	248	254	8% 3 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 8% 3 เฟส สูงกว่าปกติ
8	216	195	178.1	8% 3 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 8% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ
10	254.7	220	220	10% 1 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 1 เฟส สูงกว่าปกติ
10	188.6	220	220	10% 1 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 1 เฟส ต่ำกว่าปกติ
10	256.7	256.7	220	10% 2 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 2 เฟส สูงกว่าปกติ
10	190	190	220	10% 2 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 2 เฟส ต่ำกว่าปกติ
10	222	257	261	10% 3 - O	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 3 เฟส สูงกว่าปกติ
10	216	195	178.1	10% 3 - U	แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 3 เฟส ต่ำกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 1 เฟส

%PVUR	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	P1	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2.000	1.99	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
2% 1 - O	226.00	220.82	221.22	1.997	1.969	2.125	122.70	128.10	130.13	-243.9	-268.3	-303.1	-815.3	0.801199
4% 1 - O	232.85	220.67	221.02	2.057	1.949	2.161	115.32	130.17	132.93	-204.9	-277.4	-325.3	-807.6	0.793632
6% 1 - O	240.46	220.55	220.29	2.156	1.947	2.201	108.03	131.71	136.34	-160.4	-285.7	-350.8	-796.9	0.783117
8% 1 - O	246.70	220.67	220.33	2.282	1.958	2.239	102.70	133.30	138.12	-123.8	-296.4	-367.3	-787.5	0.773880
10% 1 - O	254.31	220.62	220.44	2.435	1.963	2.283	96.97	135.56	140.01	-75.20	-309.2	-385.6	-770	0.756682

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 1 เฟส

%PVUR	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	PI	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2	1.99	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
2% 1 - U	213.26	221.57	220.73	1.979	1.987	2.065	135.84	123.61	125.13	-302.8	-243.7	-262.3	-808.8	0.794811
4% 1 - U	206.6	221.41	220.69	2.009	1.986	2.048	142.38	121.89	122.13	-328.8	-232.2	-240.4	-801.4	0.787539
6% 1 - U	200.92	221.24	220.37	2.045	1.997	2.042	147.6	120.25	120.07	-346.9	-222.5	-225.5	-794.9	0.781152
8% 1 - U	195.09	221.12	220.16	2.104	2.002	2.032	152.47	118.64	117.49	-363.9	-212.2	-206.5	-782.6	0.769064
10% 1 - U	188.4	221.46	220.24	2.189	2.028	2.041	157.75	116.73	114.73	-381.6	-202	-188	-771.6	0.758255

ตารางที่ 5.16 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 2 เฟส

%PVUR	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	P1	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2	1.99	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
2% 2 - 0	226.86	226.68	220.37	2.009	1.97	2.122	123.67	121.04	131.98	-252.7	-230.2	-312.7	-795.6	0.78184
4% 2 - 0	233.73	233.63	220.48	2.059	2.011	2.177	199.28	155.6	135.86	-235.3	-203	-344.4	-782.7	0.769163
6% 2 - 0	241.15	241.64	220.56	2.143	2.111	2.268	115.49	109.32	139.59	-222.4	-168.8	-380.9	-772.1	0.758746
8% 2 - 0	248.35	248.1	220.69	2.255	2.2	2.355	110.72	105.13	142.61	-198.1	-142.4	-412.8	-753.3	0.740271
10% 2 - 0	256.16	256.81	221.29	2.376	2.346	2.459	106.9	99.61	145.38	-176.9	-100.6	-447.7	-725.2	0.712657

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.17 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 2 เฟส

%PVUR	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	P1	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2	1.99	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
2% 2 - U	212.78	213.51	220.48	1.935	1.936	2.054	132.42	131.02	122.52	-277.7	-271.4	-243.4	-792.5	0.778823
4% 2 - U	206.54	207.15	220.67	1.891	1.985	2.072	136.18	135.88	118.23	-281.8	-289.7	-216.4	-787.9	0.774273
6% 2 - U	201.24	201.92	221.2	1.875	1.941	2.094	139.23	140.04	114.21	-285.7	-300.5	-189.9	-776.1	0.762677
8% 2 - U	195.75	195.36	221.33	1.862	1.993	2.125	142.11	145.07	110.07	-287.6	-319.3	-161.4	-768.3	0.755012
10% 2 - U	190.54	190.35	221.06	1.847	1.995	2.167	145.04	147.81	107.04	-288.4	-321.3	-140.4	-750.1	0.737127

ตารางที่ 5.18 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 3 เฟส

%PVUR	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	P1	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2	1.99	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
2% 3 - 0	222.23	227.23	230.03	2.008	2.005	2.131	130.61	123.18	120.73	-290.4	-249.3	-250.4	-790.1	0.776435
4% 3 - 0	221.72	232.37	239.32	2.017	2.041	2.185	135.16	121.07	112.95	-317.1	-244.7	-203.9	-765.7	0.752457
6% 3 - 0	221.85	234.88	241.08	2.034	2.049	2.206	136.09	119.33	111.65	-325	-235.7	-196.2	-756.9	0.743809
8% 3 - 0	222.11	248.05	254.06	2.205	2.232	2.362	142.32	111.12	103.74	-387.7	-199.5	-142.5	-729.7	0.717079
10% 3 - 0	222.49	257.64	261.5	2.343	2.37	2.475	145.62	104.82	100.26	-430.3	-156.2	-115.3	-701.8	0.689662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.19 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลต่ำกว่าปกติ 3 เฟส

%PVUR	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	P1	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2	1.99	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
2% 3 - U	215.76	208.55	211.05	1.918	1.85	2.05	124.3	132.84	131.37	-233.2	-262.3	-285.9	-781.4	0.767885
4% 3 - U	216.27	207.21	200.12	1.945	1.845	2.067	120.17	129.47	141.55	-211.4	-243	-323.9	-778.3	0.764839
6% 3 - U	217.1	203.74	192.39	1.979	1.816	2.123	115.85	129.9	147.68	-187.3	-237.3	-345.1	-769.7	0.756388
8% 3 - U	217.27	198.73	185.96	2.018	1.788	2.185	111.88	132.21	151.56	-163.3	-238.7	-357.3	-759.3	0.746207
10% 3 - U	216.79	194.21	177.66	2.05	1.73	2.231	108.06	132.7	156.57	-137.8	-227.9	-363.6	-729.3	0.716686

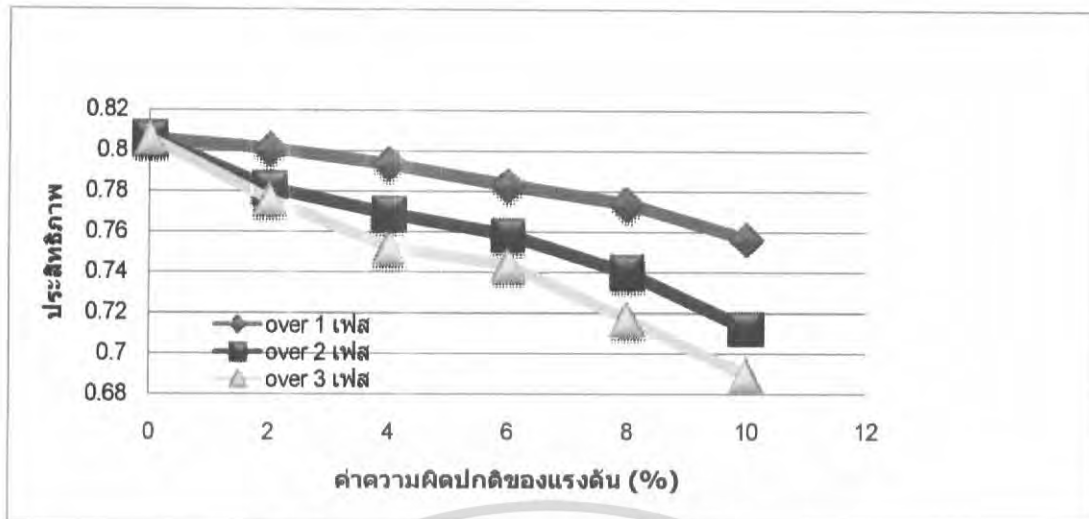
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.20 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ

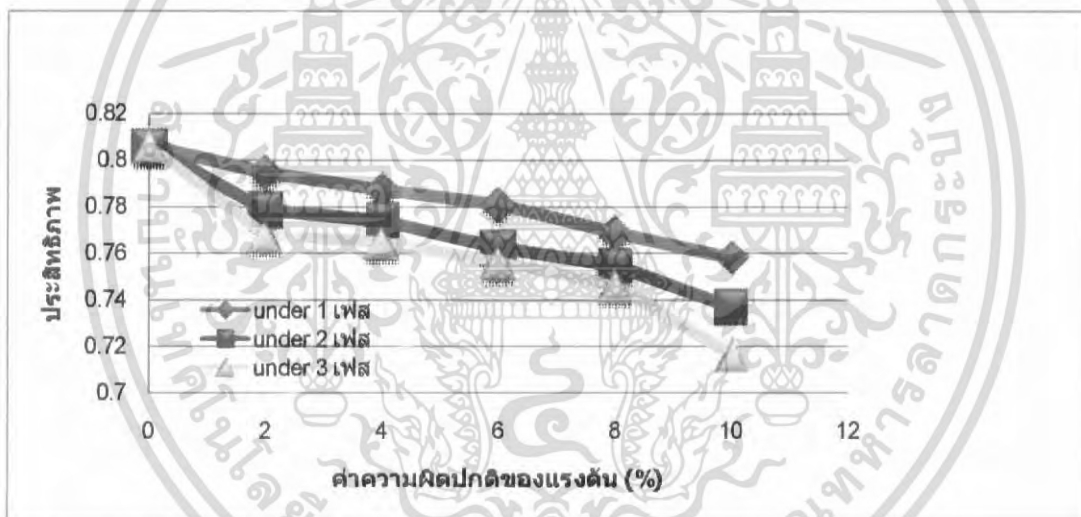
%Voltage	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	P1	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2	1.99	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
5%	231.81	232.07	231.53	2.072	2.073	2.046	124.66	122.52	125.62	-273.1	-258.6	-275.8	-807.5	0.793534
10%	241.52	242.12	242.2	2.185	2.158	2.171	121.12	118.32	121.13	-272.8	-247.8	-271.8	-792.4	0.778695
15%	253.58	253.53	253.49	2.331	2.326	2.305	115.9	113.44	117.33	-258.2	-234.6	-268.2	-761	0.747838

ตารางที่ 5.21 แสดงผลการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ

%Voltage	V1	V2	V3	Test										
				I1	I2	I3	degree 1	degree 2	degree 3	P1	P2	P3	Ptot	%Eff
Balance	220.46	220.25	220.45	2.000	1.990	2.018	128.67	127.26	128.95	-275.5	-265.3	-279.6	-820.4	0.806211
5%	209.71	209.7	209.61	1.953	1.934	1.945	131.50	130.12	131.50	-271.3	-261.3	-284	-816.6	0.802476
10%	198.51	198.36	198.17	1.915	1.902	1.912	134.14	133.45	134.60	-264.8	-259.5	-279.9	-804.2	0.790291
15%	186.97	187.55	186.8	1.918	1.900	1.896	137.21	135.34	137.00	-263.1	-253.5	-272.7	-789.3	0.775649



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล สูงกว่าปกติ



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าไม่สมดุล ต่ำกว่าปกติ

5.2.4 สรุปผลการทดลองที่ 5.2

จากกราฟแสดงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถสรุปได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีเปอร์เซ็นต์ความผิดปกติมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อจำนวนเฟสที่เกิดความผิดปกติมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำลดลงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดสอบเพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ขณะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นขณะที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สมดุล โดยใช้เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ Rotor ไม่มีแท่งตัวนำ แต่จะทำการพันขดลวดเข้าไปแทน เพื่อวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนปลายขดลวด

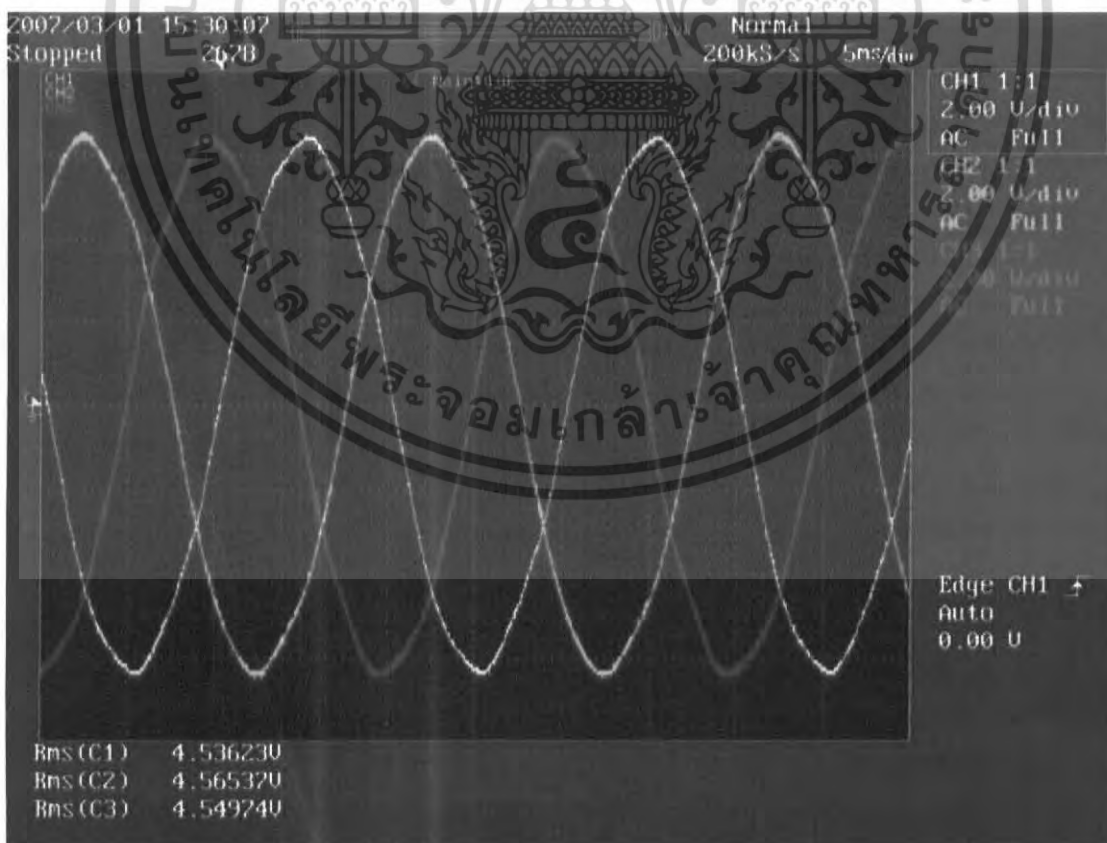
5.3.1 อุปกรณ์การทดลอง

Power meter (รุ่น PZ 4000)	1	เครื่อง
Induction motor (1HP) ที่ Rotor ไม่มีแท่งตัวนำ	1	ตัว
Variac	3	ชุด

5.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

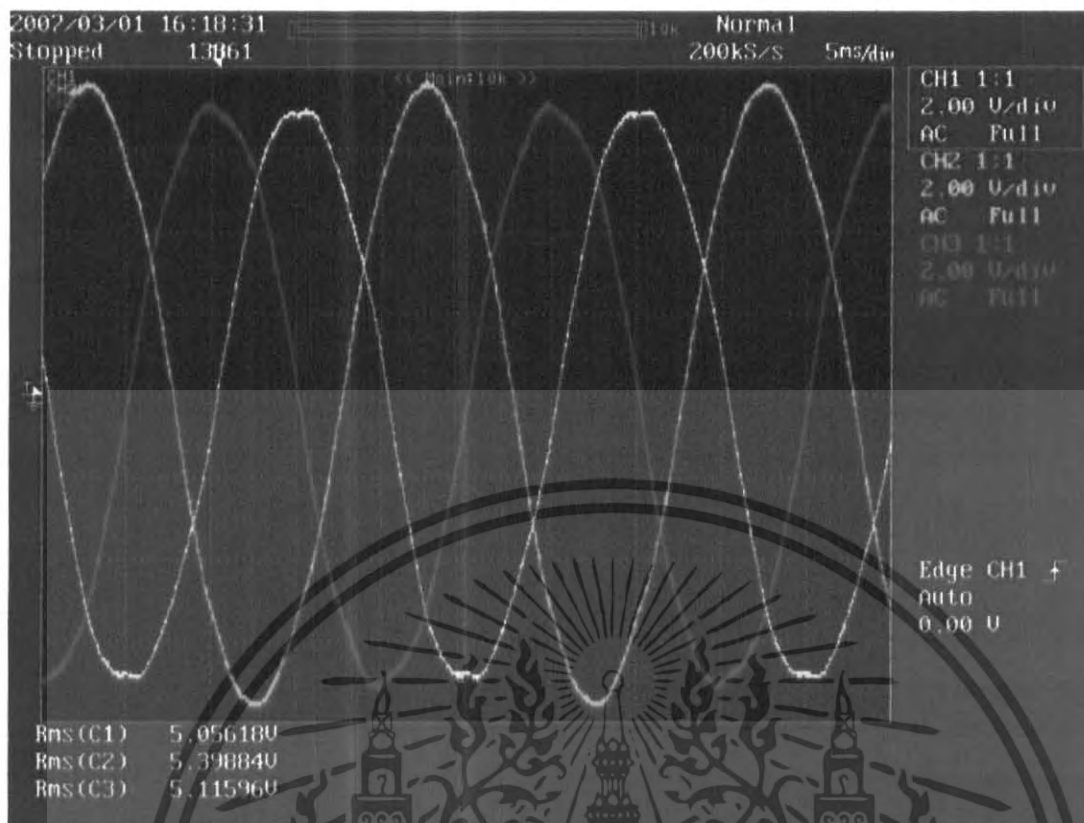
1. ป้อนแรงดัน 220 V ที่ขั้วของชุดทดลอง บันทึกรูปคลื่น และค่าแรงดัน
2. ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 1 โดยเปลี่ยนแรงดันที่ขั้วของชุดทดลองเป็น แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 3 เฟสสูงกว่าปกติ และ แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล 10% 3 เฟสต่ำกว่าปกติ ตามลำดับ

5.3.3 ผลการทดลอง

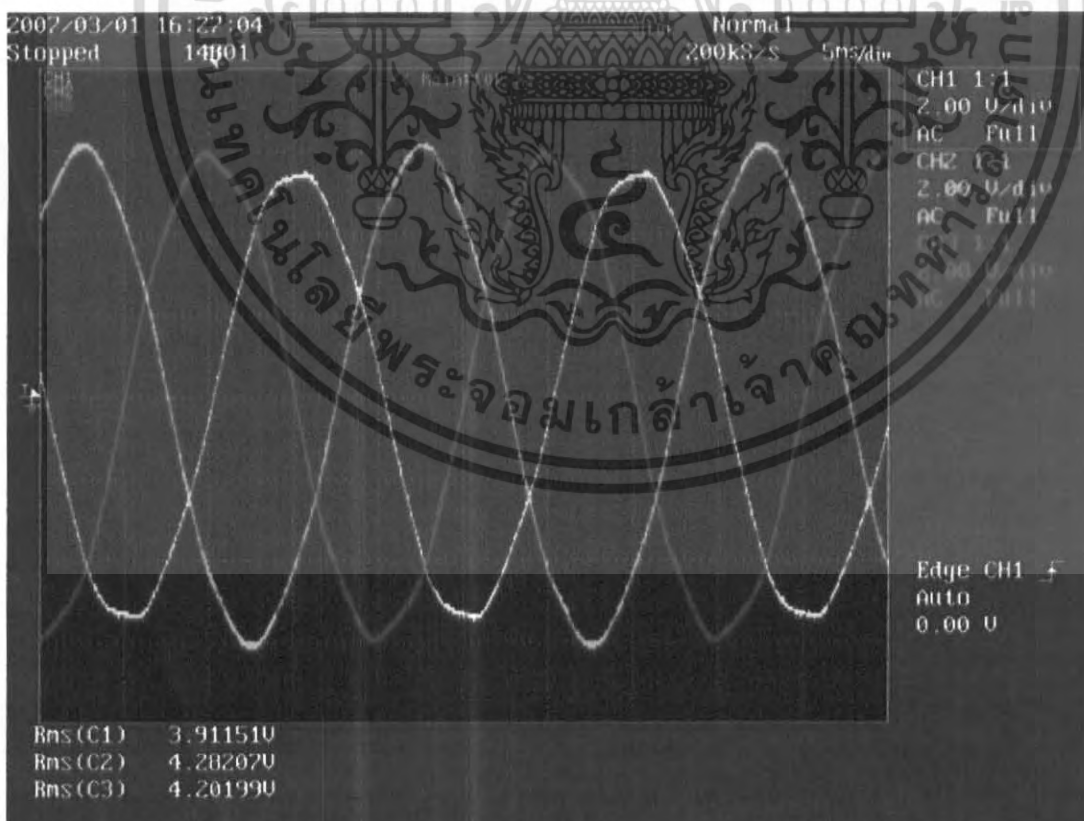


รูปที่ 5.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แรงดันป้อนเข้า 10 % Over 3 เฟส



รูปที่ 5.9 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แรงดันป้อนเข้า 10 % Under 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 สรุปผลการทดลองที่ 5.3

จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สมดุล จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าผิดเพี้ยนไปจากปกติเป็นผลเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าไม่คงที่ เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าไม่คงที่ จะทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่คงที่ด้วย เป็นผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการสั่นสะเทือน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป

จากการทดลองเรื่องการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า พบว่าหากทำการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าตั้งแต่จุดที่ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเริ่มเกินความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจจะยังทำตัวเป็นภาระทางไฟฟ้าของระบบโครงข่าย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่ากำลังงานสูญเสียของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นจุดที่เหมาะสมในการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า คือ จุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้มากกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดลองเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าผิดปกติ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านลดลง เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ได้มีค่าลดลง สาเหตุมาจากพฤติกรรมของกระแสและมุมระหว่างกระแสกับแรงดัน และการสั้นสะท้อนที่เกิดจากแรงบิดทางไฟฟ้ามีค่าไม่คงที่

การทดลองเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามากกว่าปกติ ที่กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าคงที่ค่าๆหนึ่ง เมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่ามากขึ้น จะมีผลทำให้กระแสเพิ่มขึ้น แต่ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านลดลง หากแรงดันมีค่ามากขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง อาจจะทำให้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงพฤติกรรมเป็นภาระทางไฟฟ้า

การทดลองเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าต่ำกว่าปกติที่ กำลังไฟฟ้าขาเข้าคงที่ค่าๆหนึ่ง เมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าลดลง จะมีผลทำให้กระแสและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น หากแรงดันมีค่าลดลงจนถึงค่าหนึ่ง อาจจะทำให้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงมากจนอาจเกิดอันตรายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

การทดลองเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเร็วรอบสูง จะทำให้กระแสมีค่าสูงด้วย ถ้ากระแสมีค่าสูงเกิดค่าพิกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดความร้อนสะสมเนื่องจากกำลังสูญเสียในขดลวด หากความร้อนสูงขึ้นจนถึงพิกัดอุณหภูมิที่ฉนวนทนได้ จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับฉนวน

จากการทดลองทั้งหมดที่ทำการทดลองมา ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตของวงจรการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ดังนี้

- จุดที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า คือ จุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

- เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลที่ยอมรับได้คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่ทำให้ค่ากระแสเกิดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าปกติ ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่ทำให้ความเร็วรอบตกจนต่ำกว่าความเร็วที่จุดเหมาะสมในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ไม่ทำให้ความเร็วรอบสูงจนเป็นอันตรายต่อโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- ในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าทุกกรณี เมื่อกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงถึงค่าพิกัดกระแส ควรที่จะหยุดการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิที่เกิดทำอันตรายต่อฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิษิต ล้ายอง, **เครื่องจักรกลไฟฟ้า**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [2] จูติพงษ์ งามถิ่น และคณะ, “การวิเคราะห์คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ”, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [3] เกียรติขจร วรปรัชญา และคณะ, “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ”, **ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [4] รัชต มั่งมีชัย, “การวิเคราะห์กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อใช้งานในสภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล”, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [5] Chapman J, Stephen. **ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS**. 4th Ed. Singapore : McGraw – Hill, 2005.
- [6] IEEE Std112-2004, **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**, November 4, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
Nameplate อุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nameplate อุปกรณ์ทดลอง

ตารางที่ ก.1 Nameplate ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1 แรงม้า

INDUCTION MOTOR 3 PHASE 1 Hp 4 POLE TYPE SF-JR					
HERZE	50		FRAME	80M	
VOLT	220	380	RATING	CONT	
AMP	3.4	2.0	INS CLASS	B	
RPM	1400		AMB.TEMP	40 C	
JIS	C	4004	BEARING	6204-6203	ZZ
JP	44	JC	4	SERIAL	601

ตารางที่ ก.2 Nameplate ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

DC - Motor		
Series Reek : 73.1058		No 3B
V = 220	A = 16	KW = 3
Nr/min = 1500	EX = 220 V	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพประกอบอุปกรณ์การทดลอง

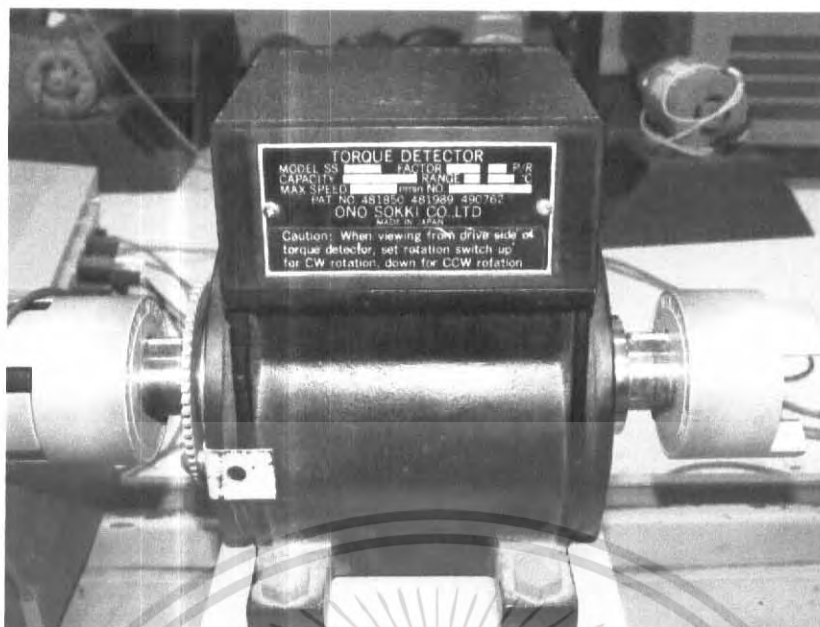


รูปที่ ข.1 Variac ที่ใช้ในชุดทดลอง 3 ชุด

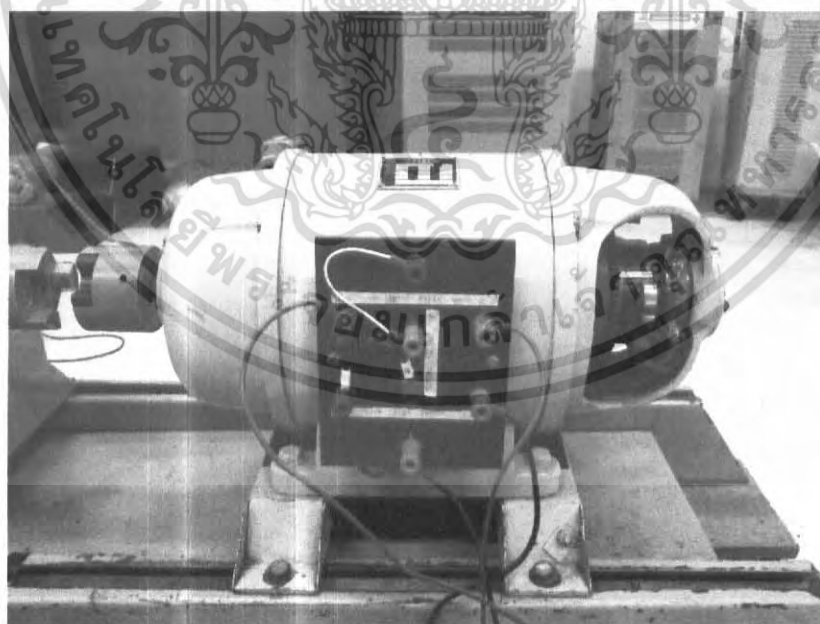


รูปที่ ข.2 Induction motor ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 Torque detector

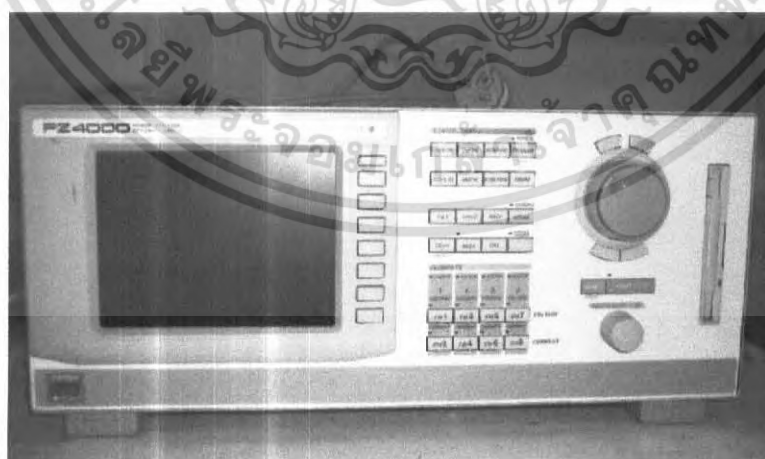


รูปที่ ข.4 DC motor ที่ใช้เป็น Prime-mover

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

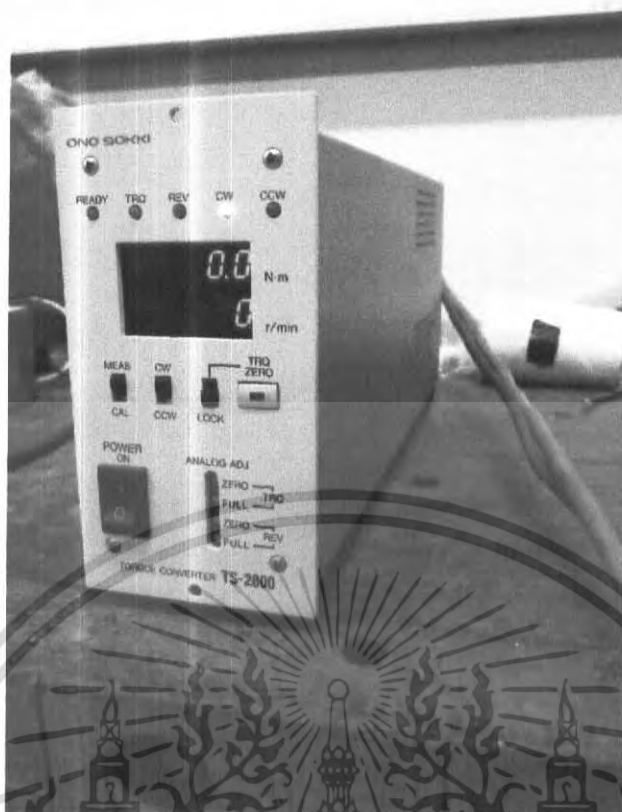


รูปที่ ๕.๕ ชุดทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเข้ากับโครงข่าย



รูปที่ ๕.๖ Power meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

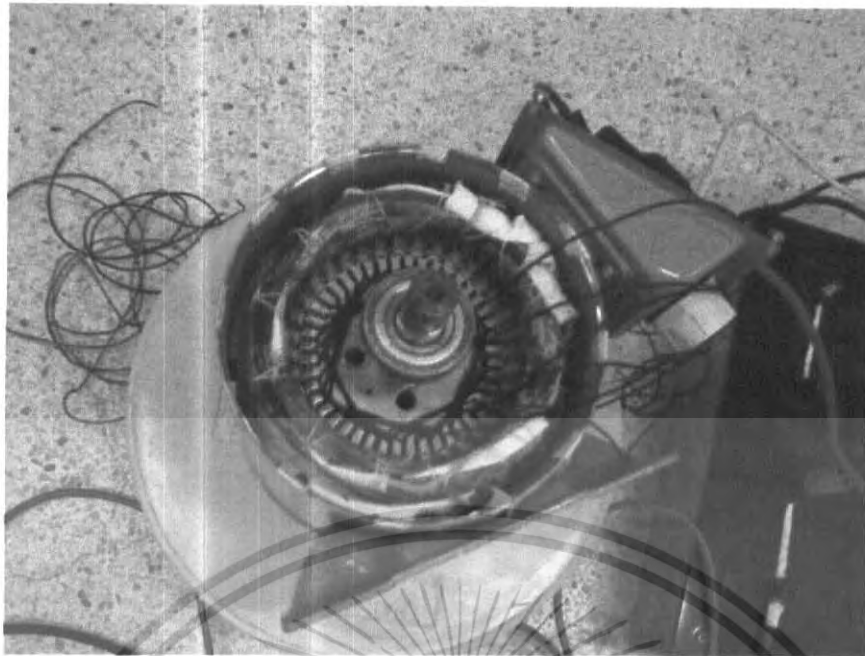


รูปที่ ข.7 Torque converter



รูปที่ ข.8 ชุดทดสอบพร้อมทั้งอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนียวหน้าที่ใช้ทดสอบสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ ข.10 ชุดทดสอบสนามแม่เหล็กหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายนิทร ณะภักดิ์
วัน เดือน ปี เกิด 4 สิงหาคม 2527
ที่อยู่ 74/128 ถ.สุขประยูร ต.หน้าเมือง อ.เมือง
จ.ฉะเชิงเทรา



ชื่อ-นามสกุล นายบัณฑิต นาคะศิริ
วัน เดือน ปี เกิด 10 กรกฎาคม 2528
ที่อยู่ 203/25 ซ.พัฒนาการ 63 ถ.พัฒนาการ
แขวงประเวศ เขตประเวศ กรุงเทพฯ



ชื่อ-นามสกุล นายวิวัฒน์ โคตรโมลี
วัน เดือน ปี เกิด 29 กรกฎาคม 2528
ที่อยู่ 735/7 ม.17 ต.หนองนาคำ อ.เมือง
จ.อุดรธานี



ชื่อ-นามสกุล นายวุฒิพันธ์ ปรีโยทัย
วัน เดือน ปี เกิด 26 ธันวาคม พ.ศ. 2527
ที่อยู่ 3 หมู่ 7 ต.เป็ริง อ.บางบ่อ
จ.สมุทรปราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้