

ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

OPTIMAL CAPACITANCE REQUIREMENTS FOR VOLTAGE
COMPENSATION OF SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR

วุฒิชัย รอดกุ่ม

WUTTHICHAJ RODKUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาทางหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-020-034

ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

OPTIMAL CAPACITANCE REQUIREMENTS FOR VOLTAGE
COMPENSATION OF SELF - EXCITED INDUCTION GENERATOR

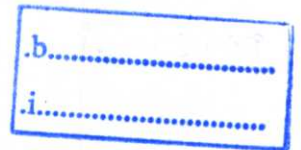
วุฒิชัย รอดพุ่ม

WUTTHICHAJ RODPHUM



T105111

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...105111
วัน,เดือน,ปี... 1 6 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL 2009-EN-M-020-034

**OPTIMAL CAPACITANCE REQUIREMENTS FOR VOLTAGE
COMPENSATION OF SELF - EXCITED INDUCTION GENERATOR**

WUTTHICHAJ RODPHUM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2009
KMITL 2009-EN-M-020-034**

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

Thesis Title Optimal Capacitance Requirements for Voltage Compensation of Self-Excited Induction Generator

นักศึกษา นายวุฒิชัย รอดพุ่ม


รหัสประจำตัว 49060211

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชัชวดี นัทรอุทัย

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-034

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
ผศ.ดร.สลิลทิพย์	สินธุสนธิชาติ	
รศ.ดร.ชัชวดี	นัทรอุทัย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 15.00-17.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้า
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

นักศึกษา

นาย วุฒิชัย รอดพุ่ม

รหัสนักศึกษา

49060211

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2552

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ชัชวดี ฉัตรอุทัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์หาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองเมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามที่ต้องการมีค่าตัวประกอบกำลังแบบล่าหลัง (0.86-0.99) ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และกรณีความถี่คงที่โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ($\pm 6\%$) ซึ่งวิธีการที่นำเสนอจะเริ่มต้นจากการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อนำมาประมวลผลหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมโดยใช้พื้นฐานของวงจรสมมูลร่วมกับวิธีจินตคณิตออลกอริทึม จากนั้นจึงนำมาทำการทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสามพิกัดคือ 0.75, 2.2 และ 4.0 กิโลวัตต์ พบว่าสามารถทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าไม่เกินกว่าที่กำหนด

Thesis Title	Optimal Capacitance Requirements for Voltage Compensation of Self-Excited Induction Generator
Student	Mr. Wutthichai Rodphum
Student ID.	49060211
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Chaiwut Chat-uthai

ABSTRACT

This thesis presents a study and analysis of the optimal shunt-series capacitances design for three-phase short-shunt self-excited induction generators with various lagging power factor (0.86-0.99) at any desired loads under constant speed of prime mover and constant frequency conditions having voltage regulation within ± 6 %. The equivalent circuit parameters of induction generator are determined in order to evaluate the optimal shunt and series capacitances based on the equivalent circuit using the genetic algorithms. Three sizes self-excited induction generators rated 0.75, 2.2 and 4.0 kW using the designed capacitors are tested. The results show that the desired voltage regulation under various lagging power factor loads can be obtained.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลงได้ ด้วยคำแนะนำ ชี้แนะ ที่มีคุณประโยชน์จากท่าน รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณท่าน รศ. พิชิต ถ้ายอง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบ ต่างๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ปุณยภัทร ภูมิภาค อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ ต่างๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ชีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่คอยให้ความช่วยเหลือและแนะนำในสิ่งที่ดี เสมอมา

ขอบคุณนางสาวพัชรี กวดพุทธาและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหา นครและ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ไม่สามารถเอ่ยถึงได้หมด ที่คอยให้กำลังใจและสร้างสรรค์สิ่งที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย นายประสพ นางทัศนีย์ และนาย พูนศักดิ์ รอดพุ่ม ครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดังที่หวังไว้

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณ ทุกท่าน

วุฒิชัย รอดพุ่ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	4
2.1.1 สเตเตอร์.....	4
2.1.2 โรเตอร์.....	4
2.1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก.....	4
2.1.2.2 โรเตอร์แบบพันขดลวด.....	5
2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	6
2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส.....	7
2.4 การสูญเสียและการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	11
2.5 วิธีการทดสอบและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล.....	14
2.5.1 การทดสอบแบบไร้ภาระ.....	14
2.5.2 การทดสอบหาค่าความสูญเสียจากความฝืดและแรงลม.....	15
2.5.3 การทดสอบแบบยึดโรเตอร์.....	16
2.5.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์.....	16
2.5.5 วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms).....	20
บทที่ 3 ทฤษฎีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 สถานะการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	23
3.3 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....	25
3.3.1 ความสัมพันธ์เบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ.....	26
3.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....	28
3.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันช่องอากาศกับค่ารีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก.....	29
3.6 ข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....	29
บทที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน.....	31
4.1 บทนำ.....	31
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
4.2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....	31
4.2.2 แท่นทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....	31
4.2.3 อินเวอร์เตอร์.....	33
4.2.4 ตัวเก็บประจุ.....	33
4.2.5 ภาระทางไฟฟ้า.....	34
4.2.6 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า.....	34
4.2.7 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ.....	35
4.3 การหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน.....	35
4.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน.....	39
4.4.1 การทดสอบ Shunt SEIG ขนาด 0.75 kW กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่.....	39
4.4.2 การทดสอบ Shunt SEIG ขนาด 0.75 kW กรณีความถี่คงที่.....	47
บทที่ 5 การหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสม สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 บทนำ.....	50
5.2 การหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันช่องอากาศกับค่ารีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก.....	51
5.2.1 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่าของแรงดันช่องอากาศ กับรีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก.....	52
5.3 วิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน - อนุกรม.....	54
5.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม.....	58
5.4.1 การทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่.....	58
5.4.2 การทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW กรณีความถี่คงที่.....	71
5.4.3 การทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่.....	76
5.4.4 การทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีความถี่คงที่.....	77
5.4.5 การทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่.....	79
5.4.6 การทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW กรณีความถี่คงที่.....	81
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	83
6.1 บทนำ.....	83
6.2 สรุปผลงานวิจัย.....	83
6.3 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย.....	85
6.4 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ.....	88
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก. จีเนติกอัลกอริธึม (เนื้อหาเพิ่มเติม).....	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังงที่ค่าต่าง ๆ	103
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดในการแบ่ง Rotor reactance และ Stator reactance17
4.1	พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ทดสอบ.....31
4.2	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 0.75 kW.....39
4.3	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.40
4.4	ผลการทดสอบ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.41
4.5	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.98 Lagging p.f.44
4.6	ผลการทดสอบ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.98 Lagging p.f.44
4.7	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 Lagging p.f.45
4.8	ผลการทดสอบ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 Lagging p.f.46
4.9	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.47
4.10	ผลการทดสอบ SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ ค่าความถี่คงที่ (50 Hz) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.48
5.1	ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูล ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 3 พิกัด.....58
5.2	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....59
5.3	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....60

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.4	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ.....62
5.5	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ.....63
5.6	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ.....64
5.7	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.97 p.f. lagging.....64
5.8	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบ.....65
5.9	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ.....67
5.10	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ.....67
5.11	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าสูงกว่าที่ออกแบบ.....68
5.12	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.94 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.94 p.f. lagging.....69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.13 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.91 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบ.....	69
5.14 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.91 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.91 p.f. lagging.....	71
5.15 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....	72
5.16 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....	73
5.17 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....	75
5.18 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....	76
5.19 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....	77
5.20 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....	79
5.21 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.22	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....78
5.23	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....79
5.24	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....79
5.25	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....80
5.26	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....81
5.27	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....81
5.28	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....82
5.29	ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ.....82
6.1	เปรียบเทียบผลการทดสอบของ Shunt SEIG กับ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging.....84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.2	เปรียบเทียบผลการทดสอบของ Shunt SEIG กับ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging.....85
6.3	เปรียบเทียบผลการทดสอบของ Shunt SEIG กับ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.91 p.f. lagging.....85
6.4	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....86
6.5	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัดที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....86
6.6	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัดที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....87
6.7	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....87
ข.1	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1530 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....104
ข.2	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1545 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....105
ข.3	ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ของ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1560 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ.....106

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สเตเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส.....4
2.2	โรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก.....5
2.3	ส่วนประกอบของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก.....5
2.4	โรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด.....6
2.5	วงจรมุมทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....8
2.6	วงจรมุมทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป.....10
2.7	วงจรมุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....11
2.8	การส่งผ่านกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....12
2.9	วงจรถดสอบแบบไร้ภาระและ Friction and windage losses test15
2.10	วงจรมุมแบบไร้ภาระ.....15
2.11	วงจรถดสอบแบบยึดโรเตอร์ (ที่ 25 % ของพิกัดความถี่).....16
2.12	วงจรมุมแบบยึดโรเตอร์.....16
2.13	วงจรถดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์.....16
2.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วและลักษณะของตัวนำในโรเตอร์ ในมอเตอร์ Design B , Design C และ Design D ตามมาตรฐานของ NEMA.....18
3.1	สภาวะการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามค่าสลิปต่างๆ.....24
3.2	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน.....25
3.3	วงจรมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....26
3.4	ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....26
3.5	ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ.....27
3.6	จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะกระตุ้นด้วยตัวเอง.....27
3.7	วงจรมุมที่ใช้วิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง.....28
4.1	แทนทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองทั้ง 3 พิกัด.....32
4.2	อินเวอร์เตอร์.....33
4.3	ตัวเก็บประจุค่าต่างๆ.....33
4.4	ภาระทางไฟฟ้า.....34
4.5	เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า.....34
4.6	เครื่องมือวัดความเร็วรอบ.....35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	วงจรมุมลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน.....35
4.8	วงจรมุมลจากรูปที่ 4.7 โดยการจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของ Admittance.....36
4.10	วงจรถดสอบ SEIG 0.75 kW ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน.....40
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง % Load และ % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ที่เหมาะสมของ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.42
4.12	ตัวอย่างรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้าในกรณี Shunt SEIG 0.75 kW ที่ภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ตัวเก็บประจุแบบขนาน 25.0 μF ที่ % Load เท่ากับ 99.22 %.....43
5.1	วงจรมุมลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่ใช้หาค่าความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m51
5.2	ความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m (SEIG 0.75 kW).....52
5.3	ความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m (SEIG 2.2 kW).....53
5.4	ความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m (SEIG 4.0 kW).....53
5.5	วงจรมุมลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม.....54
5.6	วงจรมุมลในรูปที่ 5.5 โดยการจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของ Impedance.....55
5.7	ขั้นตอนการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมในกรณี $v=1$ และ $F=1$57
5.8	วงจรถดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 และ 2.2 kW ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม.....60
5.9	ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.97 p.f. lagging % Load=88.29 % Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 70.0 \mu\text{F}$61
5.10	ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.94 p.f. lagging % Load=93.16 % Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11	ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging % Load = 94.44 % Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 42.3 \mu\text{F}$70
5.12	ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.97 p.f. lagging % Load = 92.68 % Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz $C_{sh} = 19.9 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 60.0 \mu\text{F}$74
5.13	ตัวอย่างรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.94 p.f. lagging % Load 93.57 % Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz $C_{sh} = 19.9 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 44.4 \mu\text{F}$75
5.14	วงจรการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม.....80
ก.1	การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็ต.....95
ก.2	การสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover.....96
ก.3	การสร้างโครโมโซมลูกแบบ Two-point crossover.....97
ก.4	การสร้างโครโมโซมลูกแบบ Uniform crossover.....98
ก.5	การกลายพันธุ์ (Mutation).....98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการประสบปัญหาขาดแคลนและราคาที่สูงขึ้นอย่างมากของพลังงานปรุวมภูมิจำพวก น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ทำให้ในปัจจุบันนี้ได้มีการหันมาให้ความสนใจกับแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable energy) กันมากขึ้น ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ เป็นต้น และในปัจจุบันนี้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปริมาณมาก ซึ่งโดยส่วนใหญ่พลังงานไฟฟ้าก็ได้มาจากการเปลี่ยนรูปพลังงานปรุวมภูมิ ดังนั้นในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหาข้างต้นได้

อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนนี้ส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตขนาดเล็ก ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโครงสร้างโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก จึงมีความเหมาะสมกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เนื่องจากมีราคาถูก มีความทนทานสูง ไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และใน ส่วนการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็สามารถนำไปใช้กับระบบที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid connection) หรือใช้ในระบบแยกโคดเดี่ยว (Stand alone) ทำให้สามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ทุรกันดารที่ระบบไฟฟ้าเข้าไม่ถึงได้

ในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้ในระบบแยกโคดเดี่ยวหรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-Excited Induction Generator : SEIG) มาใช้งานนั้นจำเป็นจะต้องต่อตัวเก็บประจุค่าที่เหมาะสมเข้าที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อช่วยในการสร้างแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว (Shunt Self-Excited Induction Generator) เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบ Unity p.f. และแบบ Lagging p.f. จะมีช่วงย่านการใช้งานที่ค่อนข้างแคบและที่สำคัญก็คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้า (Voltage regulation) ที่ไม่เหมาะสม ซึ่งถ้าหากสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ก็จะเป็นการพัฒนาศักยภาพในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองให้มีความเหมาะสมในการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือทำการศึกษาและวิเคราะห์หาค่าของตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม (Short-shunt Self-Excited Induction Generator) ขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. ค่าต่าง ๆ 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และ กรณีความถี่คงที่ โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ($\pm 6\%$) [1] ทั้งนี้เพื่อเป็นการพัฒนาศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจากพลังงานทดแทนให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากการศึกษาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในกรณี que ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว นั้น เมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Unity p.f. และแบบ Lagging p.f. พบว่าจะเกิดปัญหาในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม หรืออาจกล่าวได้ว่ามีช่วงย่านการใช้งานที่ค่อนข้างแคบ ซึ่งในการนำไปใช้งานจริง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จะต้องสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ค่าอื่น ๆ ได้ และจำเป็นต้องมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ก็จะทำการปรับปรุงแก้ไข โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพิ่มเข้าไปเพื่อทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองมีช่วงย่านการใช้งานที่กว้างขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาค่าของตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. โดยใช้วิธีจินตคณิตออลกอริทึมซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Optimization) ร่วมกับการใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลและคำนึงถึงการอิ่มตัวของแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (ผลของค่ารีแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็กที่ไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของแรงดันช่องอากาศ) 2 กรณี คือ ความเร็วต้นกำลังคงที่ และ ความถี่คงที่ โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการออกแบบหาค่าของตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. จำนวน 3 พิกัด คือ 0.75, 2.2 และ 4.0 กิโลวัตต์ ใน 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และ กรณีความถี่คงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองได้โดยไม่ต้องใช้วิธีการเลือกค่าตัวเก็บประจุแบบทั่วไปซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการวิจัยโดยมีการกำหนดขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ เป็นลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ทฤษฎีของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งได้แก่ โครงสร้าง หลักการทำงาน การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล และทฤษฎีจีเนติกอัลกอริทึม

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง และแสดงผลการทดสอบ

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีจีเนติกอัลกอริทึมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสำหรับการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้า และแสดงผลการทดสอบ

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

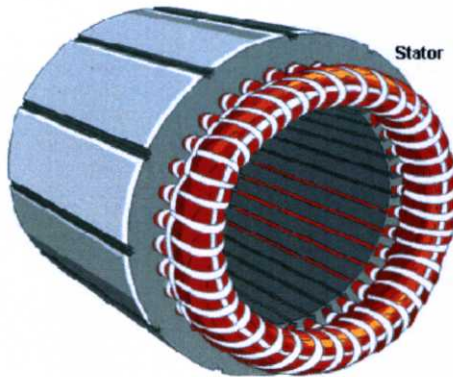
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนของโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 สเตเตอร์

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ มีแกนเป็นแผ่นเหล็กบาง ๆ (Laminated sheet steel) ประกัปกันซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิกอน (Silicon steel) และมีขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสล๊อต (Slot) ของแกนเหล็ก โดยขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจาย เพื่อให้เกิดการกระจายสนามแม่เหล็กแบบรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ซึ่งลักษณะรูปร่างของสเตเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเตเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

2.1.2 โรเตอร์

โรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นโรเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น (Non-salient-pole) หรือทรงกระบอก (Cylindrical rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

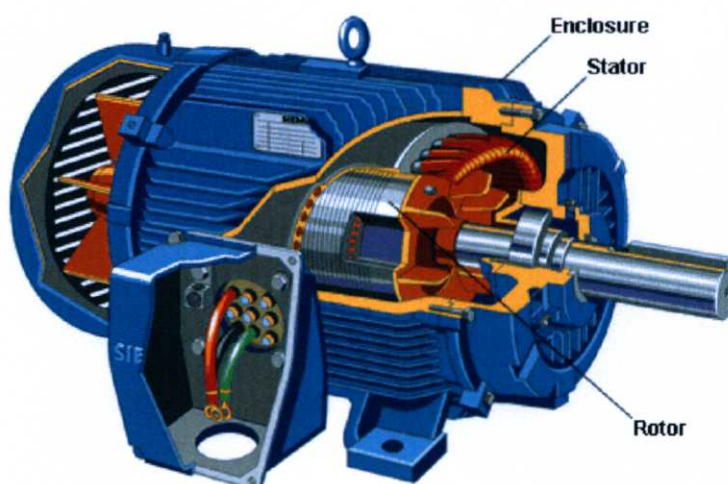
2.1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้ที่แกนของโรเตอร์ จะทำด้วยเหล็กลามิเนตหยาบผิวด้านนอกให้เป็นร่อง ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นลามิเนตเหล่านี้มาทำการอัดเข้าด้วยกันจะได้แกนโรเตอร์ เมื่อนำแกนโรเตอร์เข้าไปวางในแบบพิมพ์แล้วฉีดอลูมิเนียมชนิดเหลวเข้าไปจะได้อลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสล๊อต และมีครีบยื่นออกไปทั้งสองข้าง เพื่อใช้เป็นใบพัดสำหรับ ระบายความร้อน และเมื่ออัดเพลลาเข้าไปที่รูกลางแกนโรเตอร์ จะได้โรเตอร์กรงกระรอก

รูปร่างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกแสดงดังรูปที่ 2.2 และส่วนประกอบของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกแสดงดังรูปที่ 2.3



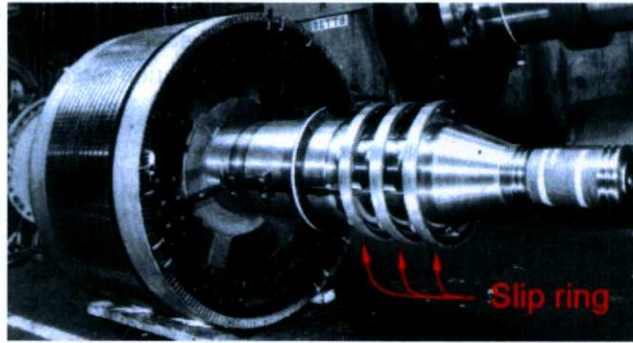
รูปที่ 2.2 โรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก

2.1.2.2 โรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound rotor)

โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสลีตเช่นเดียวกับสเตเตอร์โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (Slip ring) และมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่ โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรรภายนอก เพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์ หรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์และไม่สามารถหมุนเร็วมากได้ เนื่องจากความแข็งแรงทางกลต่ำ นอกจากนี้ยังมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือ สามารถกำหนดค่าแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อค่าความต้านทานภายนอก รูปร่างของโรเตอร์แบบพันขดลวดแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบพันขดลวด

2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

เมื่อขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ได้รับค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสจากแหล่งจ่ายภายนอกที่มีขนาดและความถี่เท่ากัน แต่มีมุมต่างกัน 120 องศา จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed: n_s) [2] ดังสมการที่ 2.1

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

โดย f เป็นค่าความถี่ไฟฟ้าของสเตเตอร์ (Hz)
 P เป็นจำนวนขั้วของมอเตอร์ (Pole)

ซึ่งจากสมการความเร็วซิงโครนัส จะเห็นได้ว่าความเร็วซิงโครนัสนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายและจำนวนขั้วของมอเตอร์ และสามารถกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนนี้ได้โดยการสลับลำดับเฟสของสัญญาณกระแสไฟฟ้าคู่ใดคู่หนึ่ง ดังนั้นจะเห็นว่าแท่งตัวนำต่างๆที่วางอยู่บนโรเตอร์จะเกิดการตัดกับสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าและกระแสเหนี่ยวนำขึ้นมาในแท่งตัวนำ ซึ่งค่ากระแสนี้ก็จะทำให้เกิดแรงทางกลกระทำกับแท่งตัวนำต่างๆในทิศทางที่ทำให้เคลื่อนที่ไปในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วโรเตอร์ (n_r) ซึ่งความเร็วโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าภาระทางกล โดยเมื่อมีภาระทางกลน้อยๆหรือไม่มีภาระทางกล ความเร็วโรเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงความเร็วซิงโครนัส โรเตอร์จะเกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำเล็กน้อย และเมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้นค่าความเร็วโรเตอร์ก็จะลดลงมีผลให้เกิดค่ากระแสเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสเหนี่ยวนำจะเป็นตัวบ่งบอกให้เห็นว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ตามความต้องการของภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ในรูปความสัมพันธ์ของค่าสลิป (s) ดังสมการที่ 2.2

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ s เป็นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำไม่มีหน่วย และ n_s, n_r มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (Revolution per minutes หรือ rpm) ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วโรเตอร์ได้จากสมการที่ 2.3

$$n_r = (1-s)n_s \quad (2.3)$$

โดยในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเริ่มหมุนค่าสลิปจะเท่ากับ 1 และขณะที่ไม่มีภาระทางกล ค่าสลิปจะมีค่าน้อยมาก (เข้าใกล้ศูนย์) ดังนั้นค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีค่าเป็นบวก อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และสามารถหาค่าความถี่ของโรเตอร์ (f_r) ได้จากสมการที่ 2.4

$$f_r = s f \quad (2.4)$$

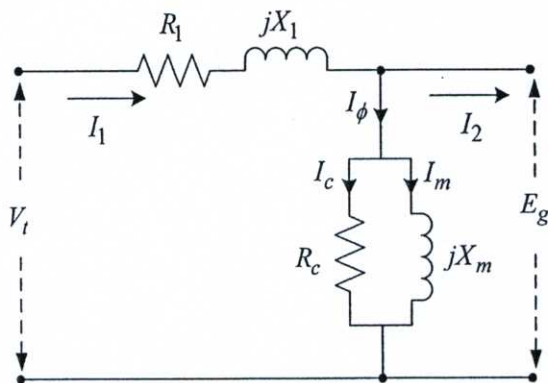
2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การพิจารณารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็ก คือการพิจารณาจากวงจรสมมูลโดยพิจารณาให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้รับการกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสในสถานะสมดุล

ในการพิจารณาวงจรสมมูลนั้น จะทำการพิจารณาแยกเป็นการพิจารณาต่อเฟสไปโดยกำหนดให้มีการต่อวงจรของมอเตอร์เป็นแบบสตาร์ และแรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏที่ขั้วของวงจรสมมูลเป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส และกระแสไฟฟ้าเป็นค่าต่อเฟส โดยที่ลักษณะของวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยเริ่มพิจารณาจากทางด้านสเตเตอร์ก่อน ซึ่งสมการอธิบายวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการ 2.5

$$V_t = E_g + I_1(R_1 + jX_1) \quad (2.5)$$

ซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลในส่วนสเตเตอร์ ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

โดยที่

V_t เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ (V)

E_g เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำช่องว่างอากาศ (V)

I_1 เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (A)

R_1 เป็นค่าความต้านทานสเตเตอร์ (Ω)

X_1 เป็นค่าลิกเกจรีแอคแตนซ์ (Leakage reactance) ที่สเตเตอร์ (Ω)

I_ϕ เป็นค่ากระแสไฟฟ้ากระตุ้น (A)

I_m เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็ก (A)

I_c เป็นค่ากระแสไฟฟ้าส่วนของแกนเหล็ก (A)

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.5 กระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (I_1) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรกคือส่วนประกอบทางด้านภาระ (I_2) ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้าน โรเตอร์ และส่วนที่สองคือ ส่วนประกอบทางด้านกระตุ้นหรือกระแสไฟฟ้ากระตุ้น (I_ϕ) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศและเป็นฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_g) กระแสไฟฟ้ากระตุ้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกอยู่ในรูปการสูญเสียที่แกนเหล็ก (I_c) ซึ่งจะมีมุมเฟสตรงกันกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะที่ส่วนที่สองอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ซึ่งจะมีมุมเฟสที่ล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ 90 องศา ในวงจรสมมูลจะแสดงการสูญเสียในแกนเหล็กในรูปของ R_c ต่อขนานอยู่กับส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กในรูปของ X_m ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะต่ออยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาโรเตอร์ที่ความเร็วรอบและฟลักซ์เดียวกัน โดยใช้หลักการเดียวกับของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยการถ่ายโอน (Transfer) ส่วนประกอบทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) มา

ด้านปฐมภูมิ (Primary) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Primary และ Secondary ในรูปของ Turn ratio ดังสมการที่ 2.6

$$E_{2s} = aE_{\text{rotor}} \quad (2.6)$$

โดยที่ E_{2s} เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรมมูลของโรเตอร์ (V)

E_{rotor} เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงที่โรเตอร์ (V)

a เป็นค่า Turn Ratio

ในส่วนของความสัมพันธ์ทางด้านกระแสไฟฟ้าก็เช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจริงที่โรเตอร์ I_{rotor} และกระแสในวงจรมมูลของโรเตอร์ I_{2s} เป็นดังสมการที่ 2.7

$$I_{2s} = \frac{I_{\text{rotor}}}{a} \quad (2.7)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.6 มาหารด้วยสมการที่ 2.7 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance ของวงจรมมูลของโรเตอร์ Z_{2s} และค่า Impedance ของวงจรมมูลจริง Z_{rotor} ได้ดังสมการที่ 2.8

$$Z_{2s} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{a^2 E_{2s}}{I_{\text{rotor}}} = a^2 Z_{\text{rotor}} \quad (2.8)$$

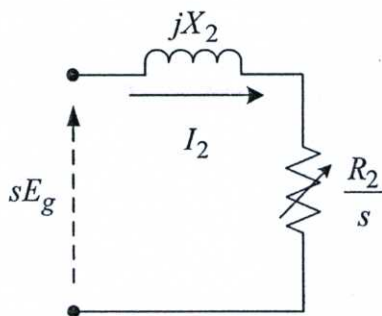
จากสมการที่ 2.6, 2.7 และ 2.8 ค่า E_{2s} , I_{2s} และ Z_{2s} เป็นค่าที่ได้จากการ Transfer ตัวแปรและพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์มาทางสเตเตอร์โดยอาศัยหลักการของหม้อแปลงโดยมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (Rotor reference frame) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + s(jX_2) \quad (2.9)$$

โดยที่ Z_{2s} เป็นค่า Impedance ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)

R_2 เป็นค่าความต้านทานโรเตอร์ที่อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)

sX_2 เป็นค่า Reactance ของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ที่ความถี่สลิป (Ω)



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป

จากสมการที่ 2.8 จะได้ค่า Reactance มีค่าแปรผันกับค่าสลิปของมอเตอร์โดยที่ X_2 เป็นค่า Reactance ที่ความถี่เดียวกับสเตเตอร์ เมื่อมองโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ (Rotor reference frame) จะได้วงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.6

เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆ ของโรเตอร์โดยมองจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ (Stator reference frame) พบว่าเมื่อมองจากด้านสเตเตอร์จะพบว่ารูปคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ E_g และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ E_{2s} ซึ่งหากว่าไม่มีผลจากความเร็วของโรเตอร์ (โรเตอร์หยุดนิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเตเตอร์) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์จะเท่ากับที่สเตเตอร์ แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วใดๆ ทำให้มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์เท่ากับ s ซึ่งส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ดังสมการที่ 2.10

$$E_{2s} = sE_g \quad (2.10)$$

ในส่วนประกอบทางด้านภาระ (I_2) ของกระแสทางด้านสเตเตอร์ใช้สำหรับสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพื่อต่อต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กทางด้านโรเตอร์เพื่อรักษาระดับฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศไว้ และเนื่องจากสมมติให้จำนวนรอบของขดลวดทางด้านโรเตอร์และสเตเตอร์มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง I_2 และ I_{2s} เป็นดังสมการที่ 2.11

$$I_{2s} = I_2 \quad (2.11)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.10 มาร่วมกับสมการที่ 2.11 จะได้สมการที่ 2.12

$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{sE_g}{I_2} \quad (2.12)$$

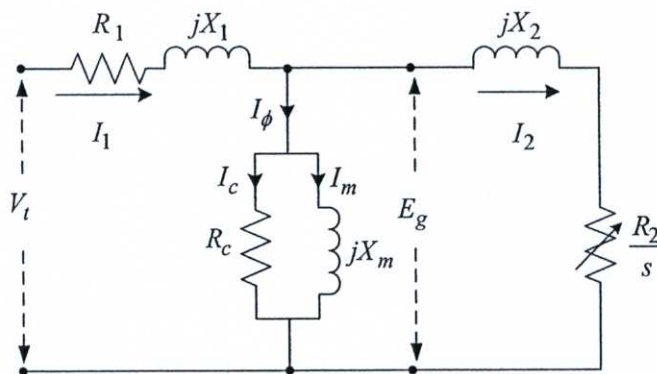
เมื่อนำผลของความถี่รอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ามาพิจารณาร่วมกับสมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.12 จะให้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.13

$$\frac{sE_g}{I_2} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (2.13)$$

เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างของสมการที่ 2.13 จะได้สมการที่ 2.14

$$\frac{E_g}{I_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2.14)$$

โดยการพิจารณาองค์ประกอบของโรเตอร์จากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์เมื่อพิจารณาทางกายภาพพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์ซึ่งมีความถี่ (sf) โดยมีทิศทางไปในทางเดียวกับโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เท่ากับ $(1-s)f$ ดังนั้นเมื่อมองจากกรอบอ้างอิงของโรเตอร์ พบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่โรเตอร์มีความถี่เท่ากับ (sf) แต่เมื่อพิจารณาจากกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์จะพบว่าสัญญาณไฟฟ้าบนโรเตอร์จะมีความถี่เท่ากับ ความถี่ซิงโครนัส นั่นเอง เมื่อพิจารณาในรูปของวงจรสมมูลจะได้ดังรูปที่ 2.7



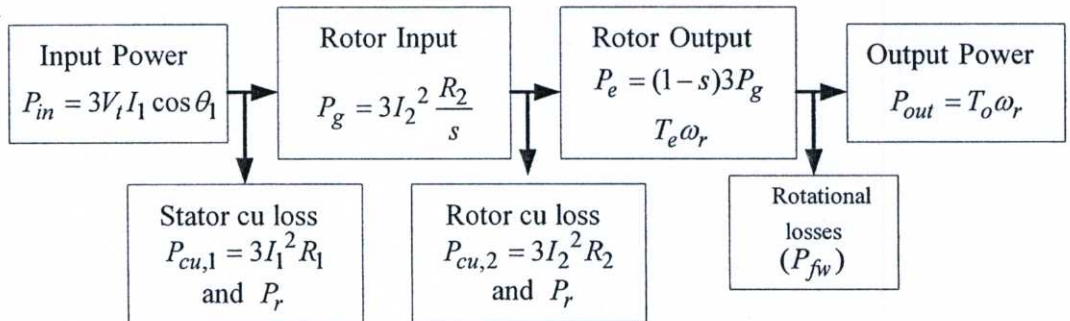
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

2.4 การสูญเสียและการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ กำลังไฟฟ้านำเข้าไม่ได้เกิดจากการป้อนไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรงแต่เป็นการถ่ายทอดผ่านทางช่องอากาศด้วยการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะ

เหนี่ยวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานชนิดอื่นๆ กระจายอยู่ตามส่วนต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้แก่กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานกลที่จับภาระ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และกำลังงานกลที่มอเตอร์เหนี่ยวนำจ่ายแก่ภาระ แสดงได้ด้วยแผนภูมิ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การส่งผ่านกำลังในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

จากแผนภูมิกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในรูปแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุต (Input power) เข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Stator copper loss) และการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ในรูปของความร้อน โดยที่กำลังส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านช่องอากาศให้กับโรเตอร์เรียกว่ากำลังงานในช่องอากาศ (Power across air gap) เมื่อถ่ายเทกำลังงานให้กับโรเตอร์ส่วนหนึ่งจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน (Rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังงานที่ส่งออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power) ซึ่งเป็นกำลังงานทางกล เมื่อเปลี่ยนเป็นกำลังงานกลแล้ว จะเกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุน (Friction and Windage loss) จากนั้นกำลังงานที่เหลือจะเป็นกำลังงานทางกลไปจับภาระ (Output power) การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) เกิดขึ้นได้ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วใกล้ความเร็วซิงโครนัสการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิวของโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กหมุนมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้การสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงรวมไว้ด้วยกันในส่วนสเตเตอร์เท่านั้น ในขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านทานลมมากขึ้น แต่จะทำให้การสูญเสียในแกนเหล็กลดลง จึงรวมการสูญเสียเหล่านี้ไว้ด้วยกันเรียกว่า Rotational loss and core loss และจะพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง

กำลังไฟฟ้าด้านเข้า (Input power)

$$P_{in} = 3 V_t I_1 \cos \theta_1 \quad (2.15)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ (Stator copper loss)

$$P_{cu,1} = 3 I_1^2 R_1 \quad (2.16)$$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (Power across air-gap)

$$P_g = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.17)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ (Rotor copper loss)

$$P_{cu,2} = 3 I_2^2 R_2 = s P_g = P_g - P_e \quad (2.18)$$

กำลังที่ออกจากโรเตอร์ (Electromagnetic power)

$$P_e = P_g - P_{cu,2} = (1-s) P_g \quad (2.19)$$

แรงบิดที่ได้จากการเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (Electromagnetic torque)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.20)$$

กำลังไฟฟ้าด้านออก (Output power)

$$P_{out} = P_e - P_r = T_o \omega_r \quad (2.21)$$

แรงบิดทางกล (Output torque)

$$T_o = \frac{P_{out}}{\omega_r} \quad (2.22)$$

โดยสามารถหาค่า ω_s และ ω_r ได้จากสมการที่ 2.23 และ 2.24

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \text{ (rad/sec)} \quad (2.23)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \text{ (rad/sec)} \quad (2.24)$$

กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ในสมการที่ (2.16) กำลังที่สูญเสียจากความต้านทานขดลวดโรเตอร์ในสมการที่ (2.18) และกำลังสูญเสียในส่วนของ rotational and Core loss เมื่อนำกำลังสูญเสียทั้งสามส่วนรวมกันจะเป็นกำลังสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Power losses)

$$P_{losses} = P_{in} - P_{out} \quad (2.25)$$

ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง ในสถานะเป็นมอเตอร์ (η) นิยมคำนวณในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ ดังสมการที่ 2.26 หรือ 2.27

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100 \quad (2.26)$$

$$\% \eta = \frac{P_{in} - P_{losses}}{P_{in}} 100 \quad (2.27)$$

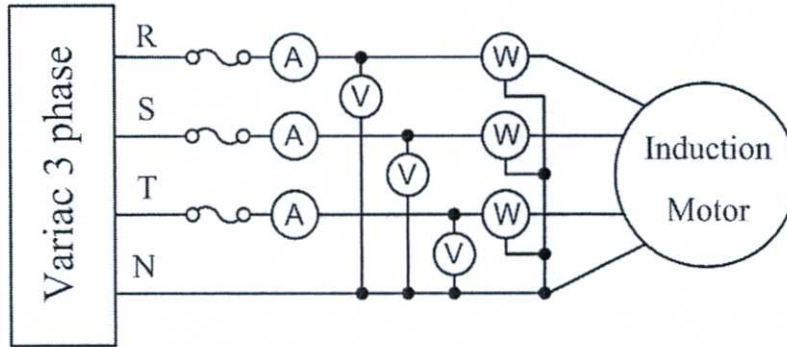
2.5 วิธีการทดสอบและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบมาตรฐาน [3] ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะต้องทำการทดสอบแบบ No load, Friction and windage losses, Block rotor, และ VI-method ซึ่งมีรายละเอียดของการทดสอบ และวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

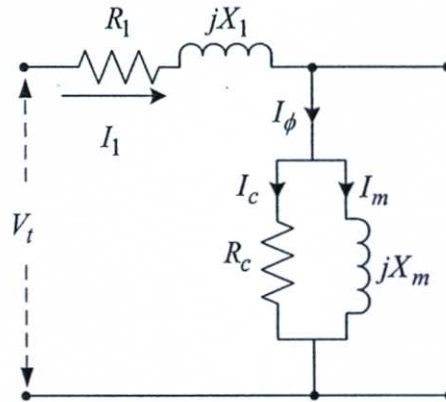
2.5.1 การทดสอบแบบไร้ภาระ (No load test)

การทดสอบนี้จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดและความถี่พิกัดให้กับตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ แสดงวงจรการทดสอบดังรูป 2.9 ซึ่งการทดสอบนี้จะส่งผลให้ความเร็วโรเตอร์ใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส ค่าสลิปเข้าใกล้ศูนย์ เปรียบเสมือนการเปิดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นกระแสทางด้านโรเตอร์จะมีค่าน้อยมากจึงสามารถละเลยการสูญเสียทางด้านโรเตอร์ได้ ดังวงจรสมมูลรูปที่ 2.10 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่จะสูญเสียใน

แกนเหล็ก (P_r) การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ ($P_{cu,1}$) และการสูญเสียเนื่องจากความฝืดกับแรงลม (Friction and windage losses) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบนี้คือ R_c กับ X_m



รูปที่ 2.9 วงจรการทดสอบแบบไร้ภาระและ Friction and windage losses test



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลแบบไร้ภาระ

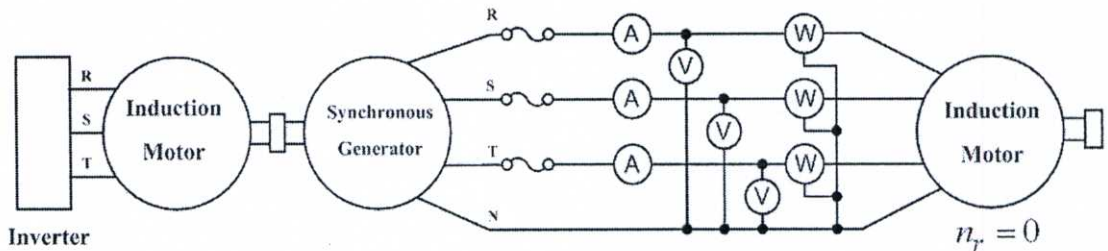
2.5.2 การทดสอบหาค่าความสูญเสียจากความฝืดและแรงลม

การทดสอบนี้จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ปกติให้กับตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระ แสดงวงจรการทดสอบดังรูป 2.9 ซึ่งในการจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าจะทำการจ่ายจากค่าน้อยๆ ขึ้นไปจนกระทั่งถึงประมาณ 125 % ของค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่า Friction and windage losses (P_{fw}) จะหาที่แรงดันไฟฟ้าน้อยๆ เนื่องจากในขณะนี้อัตราของ P_r จะมีค่าน้อยมาก โดยนำค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์มาลบกับค่า $P_{cu,1}$ ดังสมการที่ 2.28 แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง (เนื่องจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กแปรตามค่าแรงดันไฟฟ้ากำลังสอง)

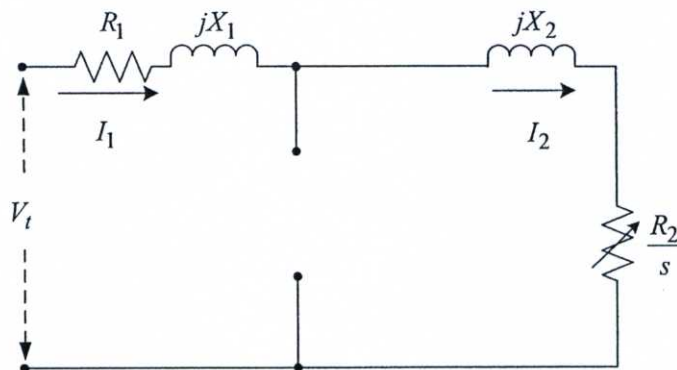
$$P_{fw} = P_{in} - P_{cu,1} \quad (2.28)$$

2.5.3 การทดสอบแบบยึดโรเตอร์ (Block rotor test)

ในการทดสอบแบบ Block rotor test ควรจะทดสอบที่ค่าแรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงซึ่งทำให้เกิดค่ากระแสได้เท่ากับประมาณพิกัด และค่าความถี่ก็ควรจะลดลงด้วย ทั้งนี้เพราะค่า Leakage reactance ของโรเตอร์จะเป็นผลมาจากค่าความถี่ของโรเตอร์ที่ต่ำกว่าความถี่ปกติเนื่องจากค่าสลิปมีค่าต่ำ ตามมาตรฐานของ IEEE Test Procedure แนะนำให้ใช้ความถี่ที่ 25 % ของความถี่ปกติค่า Leakage reactance รวมที่ความถี่ปกติจะได้มาจากการทดสอบผลในลักษณะนี้โดยการพิจารณาว่าค่า reactance จะต้องเป็นส่วนโดยตรงกับความถี่ ซึ่งที่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีความถี่ 50 Hz จะต้องทำการทดสอบที่ความถี่ 12.5 Hz แสดงวงจรการทดสอบดังรูป 2.11 โดยจะทำการจับยึดตัวโรเตอร์ไว้และทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (จากเครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส) ให้กับตัวมอเตอร์จนกระทั่งค่ากระแสที่ไหลเข้าตัวมอเตอร์มีค่าประมาณพิกัด ซึ่งการทดสอบนี้เปรียบเสมือนเป็นการลัดวงจรทางด้านโรเตอร์ ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน R_c กับ X_m จะมีค่าน้อยมากซึ่งสามารถละเลยได้ ดังวงจรสมมูลรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 วงจรการทดสอบแบบยึดโรเตอร์ (ที่ 25 % ของพิกัดความถี่)

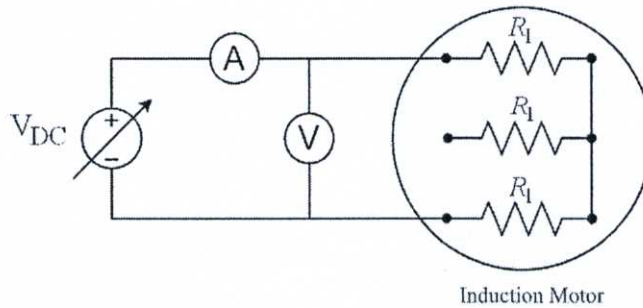


รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลแบบยึดโรเตอร์

2.5.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (VI-Method)

เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ โดยการทดสอบจะจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นระดับแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงพิกัดกระแสของมอเตอร์ จากนั้นนำค่าที่

ได้มาพล็อตกราฟแล้วเลือกช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดเพื่อหาความชันดังสมการที่ 2.29 และแสดงวงจรการทดสอบดังรูป 2.13 เมื่อขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบสตาร์



รูปที่ 2.13 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์

$$R_1 = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_{dc}}{\Delta I_{dc}} \quad (2.29)$$

2.5.5 วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบในหัวข้อที่ 2.5.1 ถึง 2.5.4 ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ต่อไปก็จะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ในการคำนวณสามารถแยก Impedance ระหว่าง X_1 กับ X_2 ได้โดยพิจารณาจากข้อกำหนดในการแบ่ง Rotor reactance และ Stator reactance ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดในการแบ่ง Rotor reactance และ Stator reactance

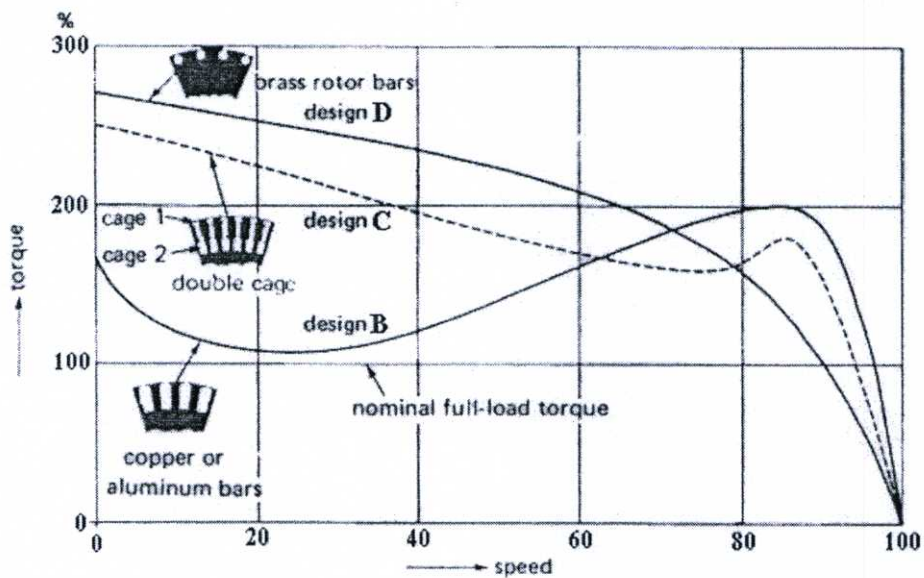
Rotor Design	X_1 and X_2 functions of X_b	
	X_1	X_2
Wound rotor	$0.5 X_b$	$0.5 X_b$
Design A	$0.5 X_b$	$0.5 X_b$
Design B	$0.4 X_b$	$0.6 X_b$
Design C	$0.3 X_b$	$0.7 X_b$
Design D	$0.5 X_b$	$0.5 X_b$

*ข้อกำหนดในการแบ่ง Rotor reactance และ Stator reactance ตาม [3] และรูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว และลักษณะของตัวนำในโรเตอร์ในมอเตอร์ตามมาตรฐานของ NEMA

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 1.0 \text{ สำหรับ Design A , Design D และ โรเตอร์แบบพันขดลวด}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.67 \text{ สำหรับ Design B}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0.43 \text{ สำหรับ Design C}$$



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วและลักษณะของตัวนำในโรเตอร์ ในมอเตอร์ Design B , Design C และ Design D ตามมาตรฐานของ NEMA

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โรเตอร์มีลักษณะเป็น Design A ดังนั้น $\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 1.0$

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าของ X_m จากสมการที่ 2.30 โดยให้สมมติของ $\frac{X_1}{X_m}$ และ X_1 ขึ้นมา

ก่อน

$$X_m = \frac{mV_o^2}{VAR_o - ml_o^2 X_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_m}} \right)^2 \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$VAR_o = \sqrt{(mV_o I_o)^2 - P_o^2} \quad (2.31)$$

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าของ $X_{1,b}$ จากสมการที่ 2.32 โดยใช้ค่าของ $\frac{X_1}{X_m}$ จากขั้นตอนที่ 1

$$X_{1,b} = \frac{VAR_b}{mI_{1,b}^2 \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m}\right)} \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m}\right) \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$VAR_b = \sqrt{(mV_{1,b} I_{1,b})^2 - P_{1,b}^2} \quad (2.33)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าของ X_1 จากสมการที่ 2.34

$$X_1 = \frac{f}{f_b} X_{1,b} \quad (2.34)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าของ X_m จากสมการที่ 2.30 โดยใช้ค่าของ X_1 จากขั้นตอนที่ 3 และใช้อัตราส่วนของ $\frac{X_1}{X_m}$ จากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาไปจนกระทั่งค่าของ X_1 และ X_m ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือจนกว่าจะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.1 %

เมื่อได้ค่าของ X_1 และ X_m ตามที่กำหนดแล้วก็สามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆได้ตามลำดับจากสมการต่อไปนี้

$$X_2 = \frac{X_1}{\left(\frac{X_1}{X_2}\right)} \quad (2.35)$$

$$P_{core} = P_o - P_{fw} - mI_o^2 R_l \quad (2.36)$$

$$G_c = \frac{P_{core}}{mV_o^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_m} \right)^2 \quad (2.37)$$

$$R_c = \frac{1}{G_c} \quad (2.38)$$

$$R_2 = \left(\frac{P_{1,b}}{mI_{1,b}^2} - R_1 \right) \left(1 + \frac{X_2}{X_m} \right)^2 - \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^2 (X^2_{1,b} G_c) \quad (2.39)$$

2.6 จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms)

จีเนติกอัลกอริทึม [4-7] คือ อัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Optimization) และปรับปรุงคำตอบโดยเลียนแบบพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ โดยมีวิธีการขยายพันธุ์ทางธรรมชาติ (Reproduction) การคัดเลือกโดยธรรมชาติ (Natural selection) ตัวจีเนติกอัลกอริทึมจะดำเนินการในลักษณะของพันธุศาสตร์

จุดเริ่มแรกของพันธุศาสตร์เริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1859 เมื่อ ชาร์ล ดาวิน (Charles Darwin) ได้เสนอทฤษฎีซึ่งทำให้เกิดข้อถกเถียงอย่างมากในชื่อหนังสือ “พื้นฐานของสิ่งมีชีวิตโดยการคัดสรรทางธรรมชาติหรือการปรับตัวเพื่อรักษาเผ่าพันธุ์” (On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life) หรือที่รู้จักกันในชื่อ “พื้นฐานของสิ่งมีชีวิต” (The origin of species) ในหนังสือนั้นได้นำเสนอการค้นคว้าของเขาโดยเปรียบเทียบระหว่างสิ่งมีชีวิตสายพันธุ์เดียวกันแต่ถิ่นที่อยู่อาศัยคนละที่ มีผลให้เกิดการปรับตัวให้เหมาะสมกับการดำรงชีวิต

และในเวลาใกล้เคียงกัน เกเกอร์ เมนเดล (Gregor Mendel) ได้ทำการค้นคว้าในเรื่องของลักษณะเฉพาะของตัวบุคคล โดยได้ทำการทดลองกับต้นถั่ว และได้ค้นพบยีน (Gene) แต่การค้นพบของไมเมนเดลนั้นไม่เป็นที่แพร่หลายและไม่มีคนสนใจมากนัก แต่การค้นพบของเมนเดลนี้ก็เป็นที่พื้นฐานสำหรับการศึกษาพันธุศาสตร์ในเวลาต่อมา ภายหลังเมนเดลเสียชีวิตไปประมาณ 30 ปี วอลเตอร์ ซัทตัน (Walter Sutton) ทำการทดลองและค้นพบว่ายีนนั้นเป็นส่วนประกอบของโครโมโซม (Chromosomes) ซึ่งโครโมโซมนั้นจะอยู่ในนิวเคลียส (Nucleus) อีกที่หนึ่ง โดยโครโมโซมนั้นจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบลักษณะของสิ่งมีชีวิต

โครโมโซมนั้นประกอบด้วยชิ้นเป็น DNA (Deoxyribonucleic Acid) โดยพันธะเคมีของ DNA นั้นจะเรียกว่านิวคลีโอไทด์ (Nucleotides) โดยประกอบขึ้นจากสาร 4 ชนิด อันได้แก่ อะดีนีน (Adenine: A), กวานีน (Guanine: G), ไซโตซีน (Cytosine: C) และ ไทมีน (Thymine: T) โดยกระบวนการจับคู่กันแบบพันธะทางเคมีพบว่าการจับคู่กันของนิวคลีโอไทด์ 3 ตัวเรียกว่า โคดอน (Codon) และการที่โคดอนหลายๆตัวจับรวมกันเป็นสายเราเรียกว่า สายของโคดอนหรือยีน

ขั้นต่อไปของกระบวนการคือการจับรวมกันเป็นสายของยีนเพื่อถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่เราเรียกว่า DNA

จินetik อัลกอริธึม นั้นถูกคิดค้น โดยจอห์น ฮอลแลนด์ (John Holland) ซึ่งสนใจในทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติในการกำเนิดประชากรของสิ่งมีชีวิตรุ่นต่อไป ซึ่งประกอบด้วยการคัดเลือกทางธรรมชาติ คือสิ่งมีชีวิตใดมีความแข็งแรงกว่าย่อมมีโอกาสในการอยู่รอดมากกว่า หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ยีนใดๆซึ่งประกอบตัวขึ้นจากโครโมโซมที่มีลักษณะดีกว่ายีนอื่นๆย่อมมีโอกาสอยู่รอดสูงกว่า และยีนที่สามารถอยู่รอดได้ก็จะสามารถถ่ายทอดลักษณะเด่นไปยังลูกหลานได้ จากที่กล่าวมานี้ จอห์น ฮอลแลนด์และคณะผู้ร่วมงานในมหาวิทยาลัยมิชิแกนได้ทดลองนำมาใช้กับการคำนวณทางคณิตศาสตร์จนเกิดเป็น จินetik อัลกอริธึม เมื่อปี ค.ศ. 1960 โดยเริ่มแรกนั้นถูกออกแบบให้เป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ (Computer Base Model for Natural Genetic) ซึ่งใช้ในทางชีววิทยา (Biological) ทุกวันนี้จินetik อัลกอริธึมกลายเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์มากกว่าที่จะเป็นแบบจำลองทางชีววิทยา ต่อมาในปี ค.ศ. 1995 กอสรี่และเยน (Ghoshry & Yen) ได้เสนอวิธีที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเรียกว่า MGA (Modified Genetic Algorithm) ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากการผสมกันระหว่าง จินetik อัลกอริธึมแบบปกติ (Simple Genetic Algorithm : SGA) และ SA (Simulated Annealing) ขั้นตอนการคำนวณที่ได้เสนอมาทั้งหมดเป็นการทำงานแบบวิเชิงพันธุศาสตร์ แต่ได้พัฒนาเป็นฟังก์ชันชุดใหม่ ซึ่งใช้หลักของ SA ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า MGA มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยเวลาที่น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม และผลที่ได้มีความถูกต้อง นอกจากนี้ ผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่า MGA มีความคลุมเครือลดลง ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 ชิโมไดระ (Shimodaira) ได้นำเสนอวิธีเชิงพันธุศาสตร์แบบใหม่ เรียกว่า DCGA (Deversity Control oriented Genetic Algorithm) ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดปัญหาการจับกลุ่มของผลลัพธ์ (Local Optimum Solution) โดยโครงสร้างประชากรรุ่นใหม่ในวิธี DCGA นั้นได้รับการคัดเลือกจากการรวมกันของประชากรในรุ่นก่อนและรุ่นต่อมาด้วยวิธีที่เรียกว่า CPSS (Crocoss-generational Probabilistic Survival Selection) ซึ่งเป็นการคำนวณโดยใช้ระยะทาง ระหว่างโครงสร้างใหม่และโครงสร้างที่ดีที่สุด พบว่าการทำงานของ DCGA ดีกว่าวิธีเชิงพันธุศาสตร์แบบธรรมดาตรงในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Global Optimum Solution) แต่ใช้เวลาในการคำนวณในขั้นตอนการคัดเลือกมากกว่า

การทำงานของของจินetik อัลกอริธึม นั้นจะมีตัวดำเนินการของจินetik อัลกอริธึม (Operators of genetic algorithms) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่ลอกเลียนมาจากธรรมชาติดังนี้

- 1.การคัดเลือก (Reproduction)
- 2.การสร้างโครโมโซม (Crossover)
- 3.การกลายพันธุ์ (Mutation)

จีเนติกอัลกอริทึมเหมาะสำหรับการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่บางครั้งอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำ (Exact optimum) แต่มีนักวิจัยหลายคนได้ใช้จีเนติกอัลกอริทึมช่วยในการหาค่าให้ได้ค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วจึงใช้วิธีการอื่นเพื่อเอาคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ

จีเนติกอัลกอริทึมแตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) อื่นๆ ดังนี้

1. เป็นกระบวนการที่อาศัยข้อมูลทางสถิติ
2. เป็นการค้นหาคำตอบที่หลายๆชุดพร้อมกัน ไม่ใช่เพียงชุดเดียว
3. เป็นการหาคำตอบจากการแทนค่าลงไปในสมการเพื่อหาคำตอบไม่ใช่การแก้สมการเพื่อหาคำตอบ
4. ไม่ต้องการเทคนิคทางคณิตศาสตร์อื่นๆเข้ามาช่วย ต้องการเพียงฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันความเหมาะสมในการหาคำตอบ

จีเนติกอัลกอริทึมมีการทำงานแบบเอากลุ่มตัวแปรมาทำเป็นรหัส โดยจะไม่รบกวนรูปแบบสมการฟังก์ชันและตัวแปรโดยตรง และยังมีการค้นหาคำตอบจากจำนวนโครโมโซมทั้งหมด โครโมโซมที่ผ่านการคัดเลือกแล้วเท่านั้นที่สามารถให้กำเนิดรุ่นต่อไปได้ โอกาสของการค้นหาคำตอบได้จะมีมากขึ้น เทคนิคการค้นหาคำตอบอื่นเช่น Gradient techniques ต้องใช้ผลการคำนวณหรือผลจากการวิเคราะห์ที่ตัดแปลงแล้วเพื่อหาจุดอ้างอิงให้ช่วยค้นหาคำตอบต่อไปได้แต่จีเนติกอัลกอริทึมค้นหาคำตอบโดยการสุ่มตัวอย่างจากข้อมูลหรือค่าผลลัพธ์ที่ได้มาโดยไม่มีการตัดแปลงซึ่งเป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบต่อไป และนอกจากนี้จีเนติกอัลกอริทึมยังใช้กระบวนการเฟ้นสุ่มทางสถิติใช้เป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบด้วยเช่นกัน (ภาคผนวก ก)

บทที่ 3

ทฤษฎีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

3.1 บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถนำไปใช้ในระบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง (Grid connection) หรือใช้ในระบบแยกโดดเดี่ยว (Stand alone) ที่ไม่ต้องการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้สามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ทุรกันดารที่ระบบไฟฟ้าเข้าไม่ถึงได้ ซึ่งการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเท่ากับระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะได้รับกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นจากระบบที่เชื่อมต่อ เพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux) ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) เข้าสู่ระบบที่เชื่อมต่ออยู่ได้ นั่นก็คือเมื่อความเร็วต้นกำลังมีค่ามากกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งก็จะถูกจำกัดด้วยค่าสลลิป ที่ต้องไม่เกินพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และการทำงานอีกรูปแบบหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออีกก็คือ การทำงานในรูปแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-Excited Induction Generator) หรืออาจเรียกสั้นๆว่า SEIG โดยการทำงานในลักษณะนี้จะต้องทำการต่อชุดตัวเก็บประจุค่าที่เหมาะสมเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอาศัยเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (Residual flux) ที่อยู่ในโรเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น

จากหลักการการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จะเห็นได้ว่าค่าของชุดตัวเก็บประจุเป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งาน โดยเนื้อหาในบทนี้ก็จะกล่าวถึงทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่จำเป็นต้องทราบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับวิธีที่นำเสนอดังต่อไปนี้

3.2 สถานะการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [2]

การทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังรูปที่ 3.1 จะขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างความถี่และความเร็วโรเตอร์หรือเรียกว่าค่าสลลิป โดยสามารถแบ่งสถานะการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เป็น 3 สถานะตามค่าสลลิปดังนี้

1. สภาวะมอเตอร์ (สลลิปเท่ากับ 0 ถึง 1)

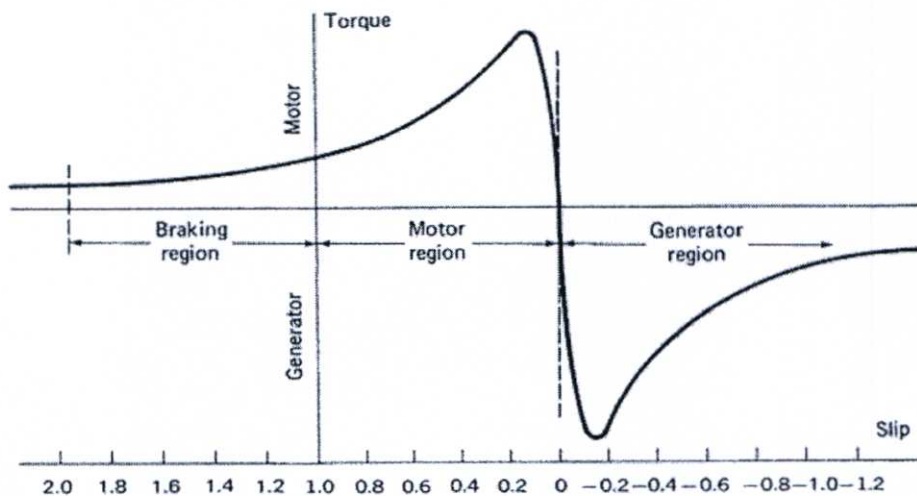
ในกรณีนี้เป็นการรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบภายนอก และแปรผันไปเป็นพลังงานทางกล เพื่อนำไปใช้ในงานต่างๆ โดยเมื่อทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น โรเตอร์จะถูกเหนี่ยวนำให้หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก โดยมีความเร็วที่ต่ำกว่าสนามแม่เหล็ก

2. สภาวะเบรก (สลลิปมากกว่า 1)

เป็นการให้พลังงานไฟฟ้าและเกิดสนามแม่เหล็กหมุน ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ ทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางตรงข้ามกับการหมุน สามารถนำไปใช้ในการหยุดมอเตอร์อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นมอเตอร์ เมื่อทำการสลับลำดับเฟสของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จะทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งทำให้มอเตอร์หยุดทันที โดยต้องรีบตัดการจ่ายไฟฟ้าเพื่อไม่ให้มอเตอร์หมุนในทิศทางใหม่

3. สภาวะเครื่องกำเนิด (สลลิปเป็นลบ)

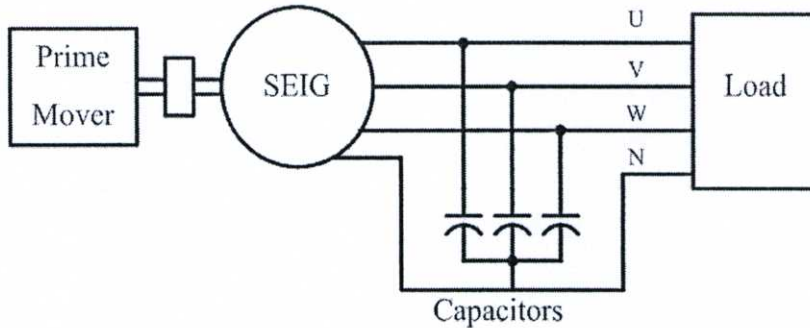
เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าพร้อมทั้งหมุนโรเตอร์ ให้มีทิศทางเดียวกับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กและมีความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัส เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกมา เสมือนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็ยังคงการรับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากแหล่งจ่ายอยู่เสมอเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.1 สภาวะการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามค่าสลลิปต่างๆ

3.3 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

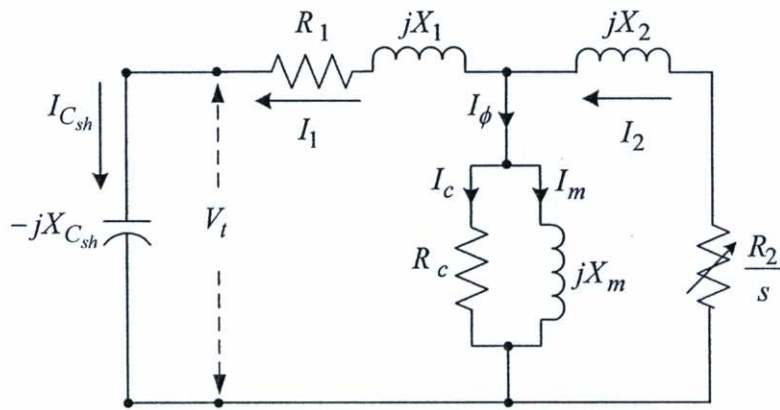
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้น จะมีลักษณะการทำงานแยกจากระบบไฟฟ้ากำลัง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องได้รับกระแสกระตุ้นจากตัวเก็บประจุ โดยจะต่อเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (โดยจะต่อเป็นแบบเดลต้าหรือสตาร์ก็ได้) เพื่อจะทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance) ที่ความถี่เดียวกันระหว่างค่าของ Capacitive reactance และ Inductive reactance ($X_c = X_m$) รูปที่ 3.2 แสดงวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (Shunt-capacitors)



รูปที่ 3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จะมีลักษณะค่อนข้างเหมือนกันกับ หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยจะอาศัยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คือ การมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ในวงจรแม่เหล็กที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งโดยปกติจะมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่แล้ว แต่ถ้าหากไม่มีสนามแม่เหล็กตกค้างหรือสนามแม่เหล็กตกค้างไม่เพียงพอ ก็จะไม่ทำให้เกิดการสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้น ทำให้ไม่สามารถเกิดกระบวนการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเองได้ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสเตเตอร์ เพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและเกิดสนามแม่เหล็กตกค้างขึ้นในแกนโรเตอร์ หรืออีกวิธีหนึ่งก็คือให้แรงดันไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุก่อนนำไปต่อให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น โดยปรากฏการณ์ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูล ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งก็คือเมื่อให้ตัวต้นกำลังหมุนตัวโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะทำให้สนามแม่เหล็กตกค้างที่อยู่ในวงจรแม่เหล็กของโรเตอร์ตัดกับขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าน้อยๆค่าหนึ่ง (จากการทดสอบประมาณ 2-3 โวลต์) ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ก็จะไปตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุส่งผลให้เกิดกระแสเนื่องจากตัวเก็บประจุ (I_c) ซึ่งกระแสในส่วนนี้ก็จะไปช่วยเพิ่มในส่วนของกระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ของส่วนกระตุ้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้ค่า

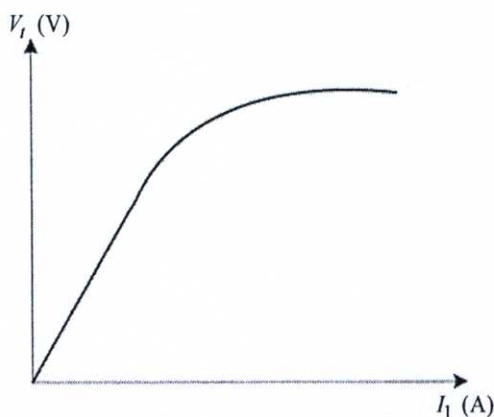
แรงดันไฟฟ้า (V_t) มีค่าสูงขึ้นด้วย และกระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจากตัวเก็บประจุก็จะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม โดยจะไปส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กสูงขึ้น และค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นอีกเป็นลักษณะเช่นนี้ต่อเนื่องกันไป ซึ่งเรียกว่าเป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้า (Build up voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองและในส่วนของความเร็วเชิงโคโรนนั้น จะมีค่าต่ำกว่าความเร็วโรเตอร์ ทำให้ค่าสลิปเป็นลบ ทำให้ค่ากระแสที่โรเตอร์ (I_2) มีทิศทางไหลออกซึ่งเป็นพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดรูปที่ 3.3 [8],[9] โดยการสร้างแรงดันไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่าตัวเก็บประจุ ความเร็วต้นกำลัง และภาระทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

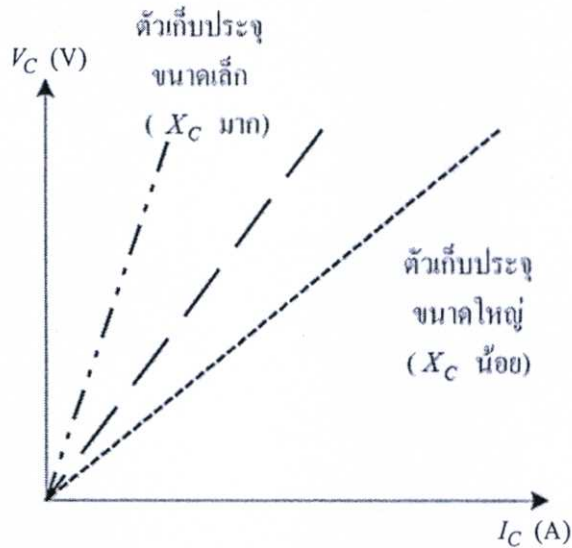
3.3.1 ความสัมพันธ์เบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากรูปจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ในช่วงแรกเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งมีระดับแรงดันและกระแสต่ำ แต่เมื่อระดับแรงดันเพิ่มมากขึ้นความสัมพันธ์จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการอิ่มตัวเกิดขึ้น

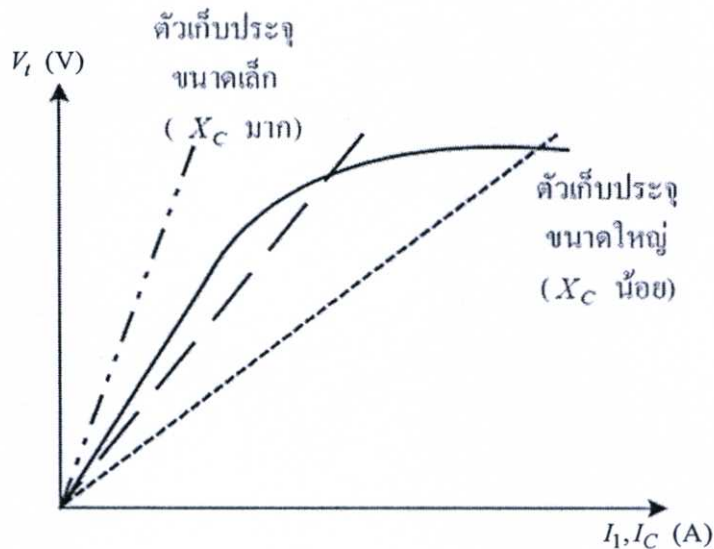


รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ส่วนรูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุซึ่งจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยความชันของกราฟจะขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุและค่าความถี่ใช้งาน



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.6 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นด้วยตัวเอง

เมื่อนำรูปกราฟที่ 3.4 และ 3.5 มาซ้อนทับกัน จะได้จุดตัดกันของกราฟเป็นจุดสมดุลของแรงดันและกระแส ดังรูปที่ 3.6 และเป็นจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นด้วยตนเอง จากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าจุดตัดกันของความสัมพันธ์จะอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้ ในช่วงที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นหรือช่วงที่เกิดการอิมิตัว โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บ

ประจุ ซึ่งถ้าตัวเก็บประจุมีค่ามาก จะทำให้จุดตัดซึ่งเป็นจุดทำงานนั้นอยู่ที่ระดับแรงดันสูง กระแสสูง แต่ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก จุดทำงานที่ได้ก็จะมีแรงดันต่ำ และถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กเกินไป กราฟของตัวเก็บประจุจะไม่ตัดกับกราฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งก็คือไม่มีจุดทำงานทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่เกิดสถานะกระตุ้นด้วยตัวเอง [10]

3.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง [11]

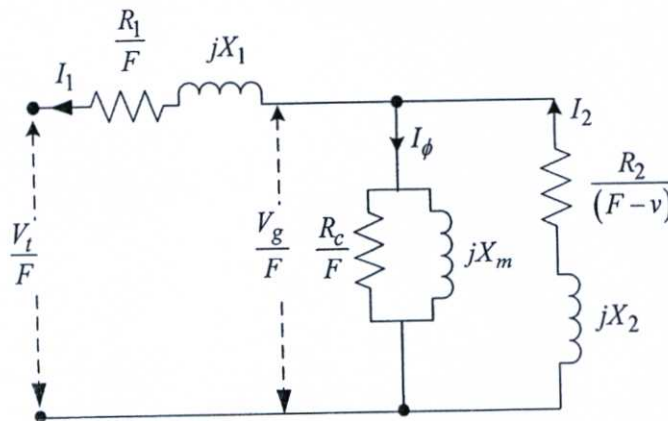
วงจรสมมูลต่อเฟสสำหรับวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ดังรูปที่ 3.7 ค่าความถี่จะมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเสมือนของวงจรสมมูล โดยกำหนดให้ F คือ ความถี่เปอร์ยูนิต ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่กระตุ้น (Self-excited frequency : f_{exc}) และความถี่พื้นฐาน (f_b) ดังสมการที่ (3.1)

$$F = \frac{f_{exc}}{f_b} = \frac{\omega_{exc}}{\omega_b} \quad (3.1)$$

ค่า Inductive reactance ของวงจรสมมูล จะสามารถหาได้จาก $X = F\omega L$ ซึ่งทุกๆ ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลจะถูกหารด้วยค่า F และจะสร้างแหล่งจ่ายแรงดันที่ขั้วเท่ากับ V_L/F ดังรูปที่ 3.7 ส่วนค่าความต้านทานโรเตอร์ต่อความถี่เปอร์ยูนิตสามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$\frac{R_2}{Fs} = \frac{R_2}{F(1 - \frac{n_r}{n_s})} = \frac{R_2}{F - v} \quad (3.3)$$

ซึ่ง v คือความเร็วต้นกำลังเปอร์ยูนิต



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลต่อเฟสที่ใช้วิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

3.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันช่องอากาศกับค่ารีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก

เนื่องจากการอิมิตัวในแกนเหล็กทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันและฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่เป็นเชิงเส้น จึงส่งผลให้ค่ารีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก (X_m) มีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของแรงดันไฟฟ้าช่องอากาศต่อความถี่ (V_g/f) โดยในกรณีวงจรสมมูลมอเตอร์จะไม่คิดผลของการอิมิตัวที่เกิดขึ้น (กำหนดให้ค่า X_m คงที่) ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในสถานะต่างๆ แต่ในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะกระตุ้นด้วยตัวเองจะมีความแตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 ว่าจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะเกิดจากจุดตัดของรูปกราฟในสถานะที่เกิดการอิมิตัว ดังนั้นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจึงจำเป็นต้องคิดผลของการอิมิตัวในแกนเหล็กด้วย โดยความสัมพันธ์ของแรงดันช่องอากาศต่อความถี่ (V_g/f) กับค่ารีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก (X_m) จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบสมการฟังก์ชันพหุนามอันดับที่สี่ [11] ได้ดังสมการที่ 3.3

$$X_m = a_0 + a_1 \left(\frac{V_g}{f} \right) + a_2 \left(\frac{V_g}{f} \right)^2 + a_3 \left(\frac{V_g}{f} \right)^3 + a_4 \left(\frac{V_g}{f} \right)^4 \quad (3.3)$$

3.6 ข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

ในสถานะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าแรงดันและค่าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันและค่าความถี่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมต่ออยู่ ทำให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น มีคุณภาพเช่นเดียวกับระบบไฟฟ้ากำลัง จึงไม่จำเป็นต้องควบคุมปริมาณเหล่านี้ แต่สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะมีความแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถเกิดสถานะกระตุ้นตัวเองโดยเราทำการติดตัวเก็บประจุเพิ่มเติมให้ แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น สามารถนำไปจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้เลย เนื่องจากจุดทำงานในสถานะกระตุ้นตัวเองจะขึ้นอยู่กับขนาดตัวเก็บประจุ ทำให้ค่าแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างขึ้นนั้นมีค่าไม่แน่นอน จะเปลี่ยนไปตามขนาดตัวเก็บประจุที่คิดให้ นอกจากนี้การที่ไม่ได้เชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้ค่าความถี่ที่ได้เป็นความถี่ที่เกิดขึ้นเอง โดยจะแปรตามขนาดตัวเก็บประจุและภาระทางไฟฟ้าที่ต่ออยู่ จึงเป็นปัญหาในการนำไปใช้งาน นอกจากนี้การจ่ายภาระของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ากำลังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะจ่ายกำลังออกในปริมาณเท่าใดก็ได้ ไม่ขึ้นกับปริมาณของภาระทางไฟฟ้า ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผลิตกำลังได้มากกว่าปริมาณของภาระ ส่วนที่เหลือก็จะถูกป้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ถ้าผลิตได้น้อยกว่าปริมาณของภาระทางไฟฟ้า ในส่วนที่ไม่ได้รับการจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เหนียวน้ำก็จะดึงกำลังจากระบบไฟฟ้าเข้ามาใช้แทน จึงไม่จำเป็นต้องจัดปริมาณของภาระทางไฟฟ้า แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้น ภาระทางไฟฟ้าจะรับกำลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำเท่านั้น ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำผลิตกำลังได้มากก็จะส่งให้ภาระทางไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งอาจทำให้ภาระทางไฟฟ้ารับกำลังมากเกินไปก่อให้เกิดความเสียหายได้ แต่ถ้าภาระทางไฟฟ้ามีปริมาณมากกว่ากำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำผลิตได้ อาจส่งผลให้ไม่เกิดสภาวะกระตุ้นตัวเอง ดังนั้นในสภาวะกระตุ้นตัวเองจึงจำเป็นต้องจัดการภาระทางไฟฟ้าให้เหมาะสมกับขนาดพิกัดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำนั้นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ของภาระทางไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ และความเร็วโรเตอร์ เพื่อให้ได้จุดทำงานที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป โดยสามารถแบ่งรายละเอียดต่างๆที่ควรคำนึงถึงในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองได้ดังนี้

- พิกัดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- พิกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- พิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- พิกัดความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- พิกัดความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- ชนิดโครงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- ระบบการระบายอากาศของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- ค่า Service factor ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- พารามิเตอร์ของภาระทางไฟฟ้า
- ตัวประกอบกำลังของภาระทางไฟฟ้า
- พิกัดแรงดันของภาระทางไฟฟ้า
- พิกัดกระแสของภาระทางไฟฟ้า
- ลักษณะการเชื่อมต่อของภาระทางไฟฟ้า เช่น การต่อโดยตรง หรือต่อผ่านคอนเวอร์เตอร์
- ชนิดของภาระทางไฟฟ้า เช่น เป็นแบบ Unity p.f. หรือแบบ Lagging p.f. มีค่าคงที่หรือไม่คงที่ เป็นแบบสถิตย์ (Static Load) หรือไดนามิก (Dynamic Load)
- ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันช่องอากาศที่มีผลต่อค่ารีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก (การอิ่มตัวของแกนเหล็ก) สำหรับใช้วิเคราะห์หาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนียวน้ำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
- ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานมีค่าคงที่หรือมีการควบคุมค่าตัวเก็บประจุขนาน (ระบบปิด)
- รูปแบบของพลังงานต้นกำลัง อาทิเช่น พลังงานลม, พลังงานน้ำ, พลังงานชีวมวลหรือพลังงานร่วม (Combinations) เป็นต้น

บทที่ 4

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

4.1 บทนำ

ในบทนี้แนะนำเสนอวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานสำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Unity p.f. และแบบ Lagging p.f. ค่าต่าง ๆ 2 กรณีคือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และกรณีความถี่คงที่ พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงปัญหาของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่นำมาใช้ทดสอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ในวิทยานิพนธ์นี้มี 3 พิกัดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ทดสอบ

พิกัดกำลัง (kW)	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)	พิกัดความเร็วรอบ (rpm)	พิกัดความถี่ (Hz)
0.75	220/380	3.3/1.9	1400	50
2.2	220/380	8.7/5.0	1420	50
4.0	380/660	8.8/5.1	1440	50

4.2.2 แทนทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จะเป็นการจำลองลักษณะการคืนพลังงานจากพลังงานทดแทน โดยจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3.70 และ 5.20 kW เป็นตัวต้นกำลังส่งพลังงานทางกลให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ทั้งสามขนาดดังรูปที่ 4.1



0.75 kW



2.2 kW



4.0 kW

รูปที่ 4.1 แทนทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองทั้ง 3 พิกัด

4.2.3 อินเวอร์เตอร์

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับตัวต้นกำลังเพื่อใช้ในการปรับค่าความเร็วต้นกำลัง แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 อินเวอร์เตอร์ (Yokogawa รุ่น VS-606v7)

4.2.4 ตัวเก็บประจุ

เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการทำงานสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้นด้วยตัวเองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ตัวเก็บประจุค่าต่างๆ

4.2.5 ภาระทางไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นภาระทางไฟฟ้าในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยมี 2 แบบคือแบบ Unity p.f. (ความต้านทาน) และแบบ Lagging p.f (ความต้านทาน-ความเหนี่ยวนำ) แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาระทางไฟฟ้า

4.2.6 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าแรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้าจริง, ค่าตัวประกอบกำลัง (p.f.) และค่าความถี่ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า (Yokogawa รุ่น PZ-4000)

4.2.7 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ

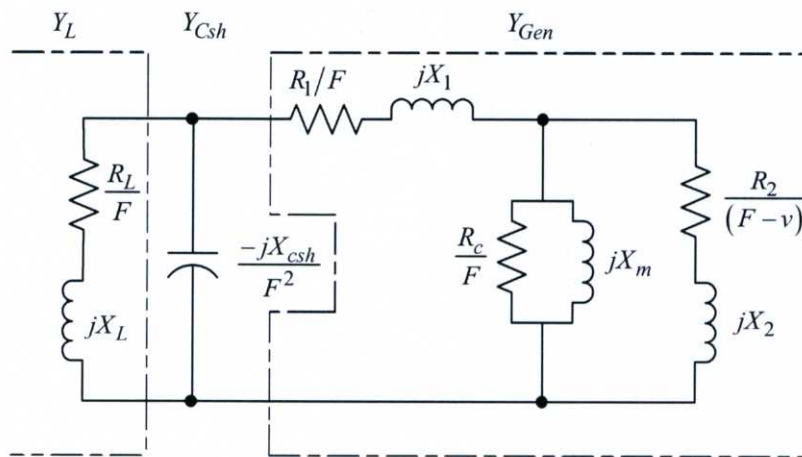
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความเร็วต้นกำลังในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยแสดงผลในหน่วยของรอบต่อนาที (rpm) แสดงดังรูปที่ 4.6



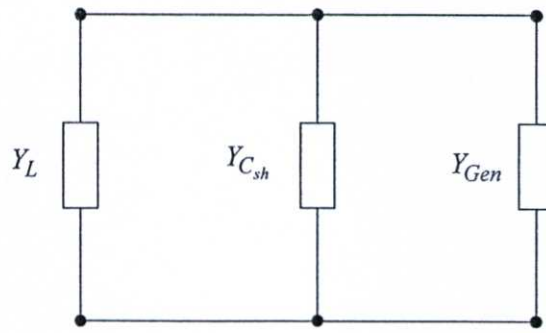
รูปที่ 4.6 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ (Tacho Meter)

4.3 การหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน

รูปวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (C_{sh}) และต่อกับภาระทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 โดยสำหรับการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะใช้หลักการ Nodal admittance [11], [12]



รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลจากรูปที่ 4.7 โดยการจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของ Admittance

จากรูปที่ 4.7 จะทำการจัดรูปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลให้อยู่ในรูปแบบของ Admittance ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงสมการการจัดรูปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลได้ดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.12)

โดยที่

Impedance ของภาระทางไฟฟ้า (Z_L)

$$Z_L = \left[\frac{R_L}{F} \right] + jX_L \quad (4.1)$$

Impedance ของตัวเก็บประจุแบบขนาน (Z_{Csh})

$$Z_{Csh} = \left[\frac{-jX_{Csh}}{F^2} \right] \quad (4.2)$$

Impedance ของ SEIG (Z_{Gen})

$$Z_{Gen} = Z_1 + Z_{m2} \quad (4.3)$$

ซึ่ง

Impedance ของสเตเตอร์ (Z_1)

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \quad (4.4)$$

Impedance ของส่วนกระตุ้นและของโรเตอร์ (Z_{m2})

$$Z_{m2} = \frac{Z_m Z_2}{Z_m + Z_2} \quad (4.5)$$

ซึ่ง

Impedance ของส่วนกระตุ้น (Z_m)

$$Z_m = \frac{jX_m \cdot \left(\frac{R_c}{F}\right)}{jX_m + \left(\frac{R_c}{F}\right)} \quad (4.6)$$

Impedance ของโรเตอร์ (Z_2)

$$Z_2 = \frac{R_2}{F - v} + jX_2 \quad (4.7)$$

และจาก Kirchoff's Law

$$\frac{V_t}{F}(Y_L + Y_{Csh} + Y_{Gen}) = 0 \quad (4.8)$$

จากสมการ (4.8) เมื่อ SEIG มีการสร้างแรงดันเกิดขึ้นค่า $\frac{V_t}{F} \neq 0$ จะได้ว่า

$$(Y_L + Y_{Csh} + Y_{Gen}) = 0 \quad (4.9)$$

โดยที่

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} \quad (4.10)$$

$$Y_{Csh} = \frac{1}{Z_{Csh}} \quad (4.11)$$

$$Y_{Gen} = \frac{1}{Z_{Gen}} \quad (4.12)$$

จากสมการ (4.1) ถึง (4.7) จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ทราบค่าก็คือ $R_1, R_c, R_2, X_m, X_1, X_2$ (ได้จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล) และตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าก็คือ X_{Csh}, F, v, Z_L ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดเงื่อนไขในการหาค่าตัวเก็บประจุโดยพิจารณาถึงความเหมาะสมทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะกำหนดให้ตัวแปร F, v เป็นค่าคงที่พร้อมกันไม่ได้ เพราะเมื่อพิจารณาผลของทางปฏิบัติ เช่น หากทำการหมุนต้นกำลังด้วยความเร็วค่าหนึ่งก็จะได้ค่าความถี่ค่าหนึ่งที่สอดคล้องกันและผลในทางทฤษฎีก็คือถ้าต้องการให้ ($v=1$) หรือ 1500 rpm ค่าความถี่ที่ได้ก็จะต้องมีค่าน้อยกว่า 50 Hz (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมี 4 ขั้ว) เพื่อให้ค่าสลลิปที่ได้มีค่าเป็นลบ (สภาวะการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) และในกรณีต้องการคงค่าความถี่ค่าหนึ่ง ก็จะต้องทำการเปลี่ยนค่าความเร็วต้นกำลังเป็นอีกค่าหนึ่ง ซึ่งในทางทฤษฎีก็คือถ้าต้องการให้ ($F=1$) หรือ 50 Hz ค่าความเร็วต้นกำลังก็จะต้องมีค่ามากกว่า 1500 rpm เพื่อให้ค่าสลลิปที่ได้มีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปร F, v ทั้งสองตัวนี้มีความสัมพันธ์กันอยู่โดยจะสามารถกำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปร F หรือ v เพียงตัวเดียวเท่านั้น และตัวแปรที่เหลือจะต้องให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ส่วนตัวแปร Z_L ก็จะสามารถกำหนดได้โดยพิจารณาจากพิกัดกำลังไฟฟ้าด้านออกของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังสมการที่ 4.13 ถึง 4.16

$$I_{phase} = \frac{P_{rated} \cdot \% \text{ Load}}{V_{rated} \cdot p.f. \cdot (300)} \quad (4.13)$$

โดยที่ $P_{rated} = 750 \text{ W}$, $V_{rated} = 220 \text{ V}$ ส่วนค่า $p.f.$ คือค่าตัวประกอบกำลังที่ภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบซึ่งสามารถหาค่า Z_L, R_L และ X_L ได้จากสมการที่ 4.14 ถึง 4.16

$$Z_L = \frac{V_{rated}}{I_{phase}} \quad (4.14)$$

$$R_L = Z_L \cdot p.f. \quad (4.15)$$

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2} \quad (4.16)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวก็จะทำการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน โดยแบ่งเป็นสองกรณี คือความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) หรือ 1500 rpm และในกรณีความถี่คงที่ ($F=1$) หรือ 50 Hz เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Unity p.f. และแบบ Lagging p.f. ค่าต่าง ๆ โดยค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน จะได้จากการแก้สมการ โดยวิธีจินตคณิตออลทริซึม ซึ่งมีสมการเป้าหมายดังสมการที่ (4.17)

$$F_{objective} = \frac{1}{2} |Y_L + Y_{Csh} + Y_{Gen}|^2 \quad (4.17)$$

4.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่นำมาใช้ทดสอบให้ทำงานในรูปแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานในบทนี้มีขนาด 0.75 kW โดยมีค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจากการได้มาซึ่งการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.5 [3] ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 0.75 kW

พิกัด (kW)	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_2 (Ω)	R_c (Ω)	X_m (Ω)
0.75	9.03	10.99	8.29	10.99	2176.68	199.50

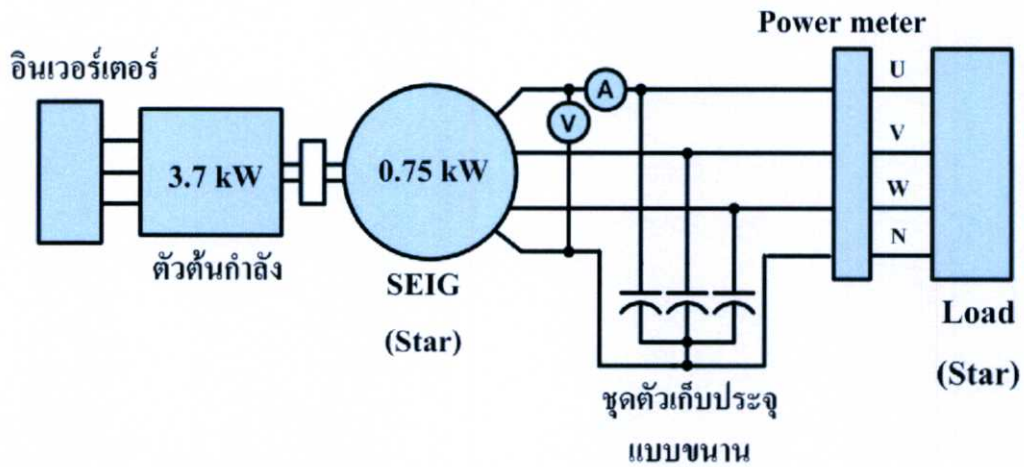
เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองแล้วก็จะทำการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานในกรณีต่างๆ ดังวิธีที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 โดยสามารถแสดงค่าของตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้กับผลการทดสอบสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขนาด 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) ใน 4.4.1 และในกรณีความถี่คงที่ ($F=1$) ใน 4.4.2

4.4.1 การทดสอบ Shunt SEIG ขนาด 0.75 kW

กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$)

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขนาด 0.75 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนานในกรณี ($v=1$) เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Unity p.f. และแบบ Lagging p.f. ค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.3 (Unity p.f.), ตารางที่ 4.5 (0.98 Lagging p.f.) และตารางที่ 4.7 (0.97 Lagging p.f.) โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณี ($v=1$) ดังนี้

- ต่อดังตามรูปที่ 4.10 โดยที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์



รูปที่ 4.10 วงจรการทดสอบ SEIG 0.75 kW ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

- ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้จากการหาค่าในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่
- ทำการจ่ายความเร็วต้นกำลัง โดยการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์จนกระทั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ทดสอบมีสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (โดยจะต้องระวังไม่ให้ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเกินพิกัดคือ 1.9 A)
- ทำการจ่ายภาระแบบ Unity p.f. หรือแบบ Lagging p.f. ค่าต่างๆ โดยขณะที่จ่ายภาระนั้น จะต้องควบคุมให้ความเร็วต้นกำลังคงที่เท่ากับ 1500 rpm ตลอดการทดสอบ จากนั้นบันทึกค่าแรงดัน (เฟส), ค่ากระแส (เฟส), ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (สามเฟส), และค่าความถี่ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.4, ตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

Load (%)	C_{sh} (μF)	f (Hz)
60	18.10	48.34
80	19.41	47.91
100	20.93	47.48

จากผลการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะอยู่ระหว่าง 18.10 μF ถึง 20.93 μF ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุคือ 17.5, 20, 21 22.5 และ 25 μF เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ
กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

$$C_{sh} = 17.5 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
10.72	80.00	236.89	0.11	1.00	49.70	1.29	7.68
20.48	152.80	228.63	0.22	1.00	49.34	1.21	3.92
29.60	220.80	222.67	0.33	1.00	49.29	1.15	1.21
36.60	273.00	208.91	0.44	1.00	48.80	1.09	-5.04
41.57	310.10	196.95	0.53	1.00	48.42	1.07	-10.48
43.74	326.30	180.89	0.60	1.00	48.37	1.06	-17.78

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
44.29	330.40	236.61	0.47	1.00	48.77	1.39	7.55
52.47	391.40	229.13	0.57	1.00	48.62	1.34	4.15
59.95	447.20	222.32	0.67	1.00	48.59	1.32	1.05
65.54	488.90	213.31	0.76	1.00	48.40	1.33	-3.04
67.44	503.10	195.43	0.86	1.00	47.74	1.34	-11.17

$$C_{sh} = 21.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
45.54	339.70	240.84	0.47	1.00	48.66	1.47	9.47
54.42	406.00	234.78	0.58	1.00	48.54	1.43	6.72
61.73	460.50	226.91	0.68	1.00	48.26	1.40	3.14
68.81	513.30	220.37	0.78	1.00	48.22	1.40	0.17
73.93	551.50	193.27	0.95	1.00	47.56	1.43	-12.15

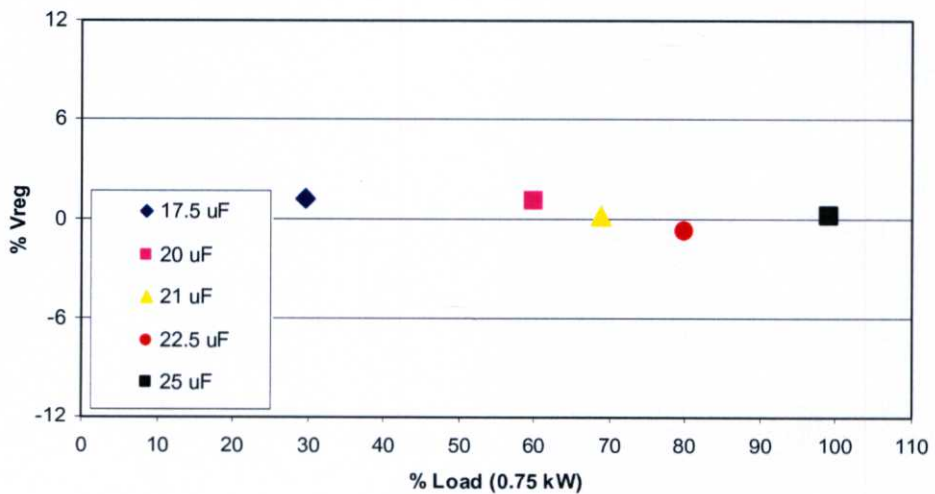
ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดสอบ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ
กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

$$C_{sh} = 22.5 \mu\text{F}$$

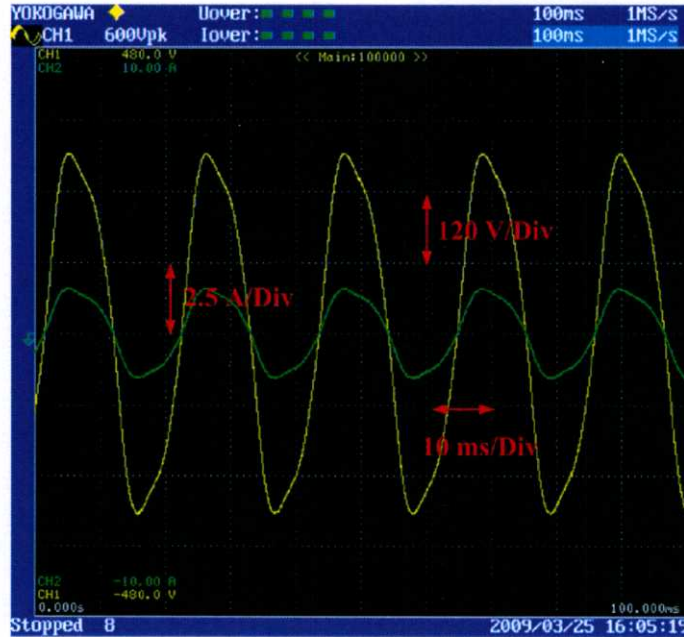
Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
65.44	488.20	235.39	0.69	1.00	48.24	1.52	7.00
72.64	541.90	228.43	0.79	1.00	48.02	1.50	3.83
79.92	596.20	218.45	0.91	1.00	47.96	1.51	-0.70
84.60	631.10	197.74	1.07	1.00	47.35	1.55	-10.12

$$C_{sh} = 25.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
90.24	673.2	232.71	0.964	1.00	47.49	1.71	5.78
94.65	706.1	228.55	1.03	1.00	47.52	1.70	3.89
96.03	716.4	222.38	1.074	1.00	47.22	1.72	1.08
99.22	740.2	220.43	1.119	1.00	47.36	1.73	0.20
101.14	754.5	204.09	1.232	1.00	46.79	1.76	-7.23



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Load และ % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า
ที่เหมาะสมของ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ
กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างรูปสัญญาณแรงดันและกระแสที่ภาระทางไฟฟ้าในกรณี Shunt SEIG 0.75 kW กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

$$C_{sh} = 25.0 \mu\text{F} \text{ ที่ } \% \text{ Load เท่ากับ } 99.22 \%$$

จากการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. นั้นเมื่อนำไปทดสอบที่ค่า % Load ที่ออกแบบนั้นพบว่าไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ($\pm 6\%$) โดยพิจารณาได้จากค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบได้ที่ % Load เท่ากับ 100 % คือ $20.93 \mu\text{F}$ (ตารางที่ 4.3) ซึ่งในการทดสอบได้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุคือ $21.00 \mu\text{F}$ โดยจากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุ ($21 \mu\text{F}$) สามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดี (1.05%) ที่ % Load เท่ากับ 68.81 % แต่เมื่อ % Load เปลี่ยนเป็น 73.93 % นั้น % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าจะอยู่ที่ -12.15 ซึ่งจากผลการทดสอบนั้นถ้าต้องการรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงย่านที่ต้องการได้ ที่ % Load เท่ากับ 100 % (หรือที่พิกัดกำลัง) นั้นจะต้องใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $25 \mu\text{F}$ (จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.4 ที่ตัวเก็บประจุเท่ากับ $25 \mu\text{F}$ % Load เท่ากับ 99.22 % มี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 0.20%) ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 ยังมีความผิดพลาดอยู่ค่อนข้างมาก แต่ประเด็นที่น่าสนใจก็คือจากผลการทดสอบในตารางที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวนั้นจะสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดีในช่วงย่านที่ค่อนข้างแคบ ซึ่งจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ถ้า

หากต้องการนำไปจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงนั้น เพื่อที่จะรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้มีความเหมาะสม ก็จำเป็นจะต้องทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนานตามค่าภาระทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.11 และสามารถแสดงตัวอย่างรูปสัญญาณของการทดสอบที่ตัวเก็บประจุแบบขนานเท่ากับ $25 \mu\text{F}$ ที่ % Load เท่ากับ 99.22 % ได้ดังรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.5 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW
ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.98 Lagging p.f.

Load (%)	C_{sh} (μF)	f (Hz)
60	20.13	48.34
80	22.11	47.91
100	24.32	47.47

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ
กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.98 Lagging p.f.

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
45.24	339.3	216.05	0.534	0.9796	48.48	1.16	-1.79

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
73.25	549.4	215.25	0.869	0.9793	48.06	1.39	-2.16

$$C_{sh} = 25.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
79.57	596.8	221.69	0.917	0.9784	47.91	1.5	0.77

จากผลการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้ในกรณีความเร็วต้นกำลังครั้งที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.98 Lagging p.f. พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะอยู่ระหว่าง $20.13 \mu\text{F}$ ถึง $24.32 \mu\text{F}$ ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุคือ 20, 23.7 และ $25 \mu\text{F}$ ส่วนผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6

จากผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในกรณีความเร็วต้นกำลังครั้งที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.98 Lagging p.f. นั้นเมื่อนำไปทดสอบที่ค่า % Load ที่ต้องการนั้นพบว่าจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีความเร็วต้นกำลังครั้งที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. ซึ่งก็คือไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ($\pm 6\%$) โดยพิจารณาได้จากค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบได้ที่ % Load เท่ากับ 60 % คือ $20.13 \mu\text{F}$ (ตารางที่ 4.5) ซึ่งในการทดสอบได้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุคือ $20.00 \mu\text{F}$ โดยจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุ ($20 \mu\text{F}$) สามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดี -1.79% ที่ % Load เท่ากับ 45.24 % ซึ่งถ้าหากต้องการรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมที่ % Load เท่ากับ 60 % ก็จะต้องเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุให้มีค่ามากกว่า $20 \mu\text{F}$

จากการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้ในกรณีความเร็วต้นกำลังครั้งที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 Lagging p.f. พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะอยู่ระหว่าง $20.60 \mu\text{F}$ ถึง $25.12 \mu\text{F}$ ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุคือ 20, 23.7 และ $25 \mu\text{F}$ ส่วนผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW
ในกรณีความเร็วต้นกำลังครั้งที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 Lagging p.f.

Load (%)	$C_{sh} (\mu\text{F})$	f (Hz)
60	20.60	48.34
80	22.75	47.90
100	25.12	47.47

จากผลการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในกรณีความเร็วต้นกำลังครั้งที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 Lagging p.f. นั้นเมื่อนำไปทดสอบที่ค่า % Load ที่หาค่าได้นั้นพบว่าจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีความเร็วต้นกำลังครั้งที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. และ 0.98 Lagging p.f. ซึ่งก็คือไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ($\pm 6\%$) โดยพิจารณาได้จากค่าตัวเก็บประจุที่หาค่าได้ที่ % Load เท่ากับ 100 % คือ $25.12 \mu\text{F}$ (ตารางที่ 4.7) ซึ่งในการทดสอบได้เลือกใช้ค่าตัวเก็บ

ประจุกคือ $25.00 \mu\text{F}$ โดยจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุ ($25 \mu\text{F}$) สามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดี (1.04 %) ที่ % Load เท่ากับ 76.013 % ดังตารางที่ 4.8 ซึ่งถ้าหากต้องการรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมที่ % Load เท่ากับ 100 % ก็จะต้องเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุให้มีค่ามากกว่า $25 \mu\text{F}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ไม่ว่าจะจ่ายภาระแบบ Unity p.f. หรือแบบ Lagging p.f. นั้นจะสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดีในช่วงย่านที่ค่อนข้างแคบทำให้ต้องมีการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนานไปตามค่าภาระทางไฟฟ้าอยู่เสมอเพื่อให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้ามีความเหมาะสม

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ Shunt SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ
กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 Lagging p.f.

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
43.333	325	213.2	0.525	0.9671	48.609	1.12	-3.09

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
68.33	512.5	219.79	0.801	0.9703	48.04	1.37	-0.09

$$C_{sh} = 25.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
76.013	570.1	222.28	0.878	0.9738	47.797	1.46	1.04

ในส่วนของการทดสอบพบว่าเมื่อทำการจ่ายภาระแบบ Lagging p.f. ที่มีค่าต่ำมาก ๆ (เช่น 0.91 Lagging p.f.) นั้น จะส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสมเป็นอย่างมาก ซึ่งในบางครั้งจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่สามารถแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเองได้ (ไม่สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้เลย) ทั้งนี้เนื่องจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับกร

สร้างแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุแบบขนาน เช่นเดียวกับในส่วนของภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ Lagging p.f. ก็ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเช่นเดียวกัน ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนจากตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหลุดจากสภาวะการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองได้ง่าย

4.4.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 0.75 kW

กรณีความถี่คงที่ ($F = 1$)

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขนาด 0.75 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนานในกรณี ($F = 1$) เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Unity p.f ได้ดังตารางที่ 4.9 (Unity p.f.) โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณี ($F = 1$) ดังนี้

ขั้นตอนและวิธีการทดสอบกรณี ($F = 1$)

- ต่อดังตามรูปที่ 4.10 โดยที่ขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์

- ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้จากการหาค่าในกรณีความถี่คงที่ ($F = 1$)

- ทำการจ่ายความเร็วต้นกำลังโดยการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์จนกระทั่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ทดสอบมีสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (โดยจะต้องระวังไม่ให้ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเกินพิกัดคือ 1.9 A)

- ทำการจ่ายภาระแบบ Unity p.f. หรือแบบ Lagging p.f. โดยขณะที่จ่ายภาระนั้นจะต้องควบคุมให้ความถี่คงที่เท่ากับ 50 Hz. ตลอดการทดสอบ จากนั้นบันทึกค่าแรงดัน (เฟส), ค่ากระแส (เฟส), ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (สามเฟส), และค่าความเร็วต้นกำลัง ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.10 (Unity p.f.)

ตารางที่ 4.9 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ Shunt SEIG 0.75 kW

ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

Load (%)	C_{sh} (μF)	n_r (rpm)
60	16.98	1551.08
80	17.94	1565.14
100	19.10	1579.30

จากการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้ในกรณีความถี่คงที่ ($F=1$) จำภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะอยู่ระหว่าง $16.98 \mu\text{F}$ ถึง $19.10 \mu\text{F}$ ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุคือ 17.5 , 20 และ $21 \mu\text{F}$ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบ SEIG 0.75 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่าง ๆ
ค่าความถี่คงที่ (50 Hz.) จำภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

$$C_{sh} = 17.5 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
31.50	235.00	232.18	0.34	1.00	1528	1.23	5.54
41.07	306.40	224.96	0.45	1.00	1534	1.17	2.25
48.79	364.00	218.47	0.56	1.00	1540	1.18	-0.70
54.81	408.90	209.63	0.65	1.00	1547	1.19	-4.71
59.49	443.80	200.22	0.74	1.00	1553	1.22	-8.99

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
67.04	500.10	239.38	0.70	1.00	1550	1.45	8.81
76.47	570.50	235.93	0.81	1.00	1558	1.46	7.24
83.71	624.50	225.60	0.92	1.00	1567	1.51	2.55
89.38	666.80	218.57	1.02	1.00	1574	1.56	-0.65
92.12	687.20	208.79	1.10	1.00	1581	1.59	-5.10
94.41	704.30	199.35	1.18	1.00	1590	1.62	-9.39

$$C_{sh} = 21.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
79.18	590.70	241.50	0.82	1.00	1558	1.54	9.77
87.55	653.10	231.74	0.94	1.00	1567	1.59	5.34
94.14	702.30	225.72	1.04	1.00	1574	1.63	2.60
99.38	741.40	219.02	1.13	1.00	1582	1.68	-0.45
102.60	765.40	210.39	1.21	1.00	1591	1.70	-4.37

จากผลการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในกรณีความถี่ถึงที่ ($F = 1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. นั้นเมื่อนำไปทดสอบที่ค่า % Load ที่ออกแบบนั้นพบว่าไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงย่านที่ต้องการได้ ($\pm 6\%$) โดยพิจารณาได้จากค่าตัวเก็บประจุที่หาค่าได้ที่ % Load เท่ากับ 100 % คือ $19.10 \mu\text{F}$ (ตารางที่ 4.9) ซึ่งในการทดสอบได้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุคือ $20.00 \mu\text{F}$ โดยจากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุ ($20 \mu\text{F}$) สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดี (-0.65%) ที่ % Load เท่ากับ 89.38 แต่เมื่อ % Load เปลี่ยนเป็น 94.41 นั้น % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าจะอยู่ที่ -9.39% ซึ่งจากผลการทดสอบนั้นถ้าต้องการรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงย่านที่ต้องการได้ ที่ % Load เท่ากับ 100 (หรือที่พิกัดกำลัง) นั้นจะต้องใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $21 \mu\text{F}$ (จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.10 ที่ตัวเก็บประจุเท่ากับ $21 \mu\text{F}$ %Load เท่ากับ 99.38 % มี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ -0.45%) ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในกรณีความถี่ถึงที่จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวในกรณีความถี่ถึงที่จ่ายภาระแบบ Unity p.f. หรือแบบ Lagging p.f. นั้นจะสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดีในช่วงย่านที่ค่อนข้างแคบทำให้ต้องมีการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนานไปตามค่าภาระทางไฟฟ้าอยู่เสมอเพื่อให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้ามีความเหมาะสมซึ่งวิธีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการปรับปรุงแก้ไขโดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพิ่มเข้าไปเพื่อทำการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยจะเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

การหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

5.1 บทนำ

จากผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวในบทที่ 4 พบว่าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะในกรณีของภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ p.f. lagging ทั้งนี้เนื่องจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่เหมาะสม เพื่อชดเชยในส่วนของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในการสร้างแรงดันไฟฟ้า เช่นเดียวกันกับในส่วนของภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ p.f. lagging ก็ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยเช่นเดียวกัน ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จึงส่งผลให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม ซึ่งก็มีหลากหลายวิธีการแก้ปัญหาเหล่านี้ [14] เช่น การเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนานให้สัมพันธ์กับภาระทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง การใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำช่วยควบคุม ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีต้นทุนที่สูงและเป็นระบบที่ซับซ้อน [15]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ โดยใช้วิธีการต่อชุดตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพิ่มเข้าไป ซึ่งแบ่งรูปแบบของการต่อได้เป็นสองแบบก็คือแบบขนาน-อนุกรม (Short-Shunt) และแบบ อนุกรม-ขนาน (Long-Shunt) โดยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อแบบขนาน-อนุกรม (Short-shunt SEIG) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม-ขนานนั้นจะต้องใช้ค่าตัวเก็บประจุที่มากกว่าแบบขนาน-อนุกรม [16], [17]

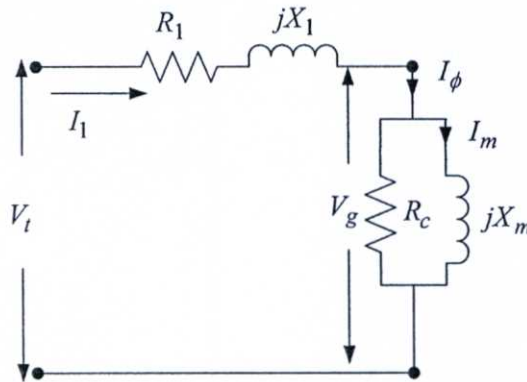
และเนื่องจากผลของการเกิดการอิมิตัวในแกนเหล็กทำให้ความสัมพันธ์ของแรงดันและฟลักซ์แม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่เป็นเชิงเส้น จึงส่งผลทำให้ค่ารีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก (X_m) มีค่าไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันช่องอากาศต่อความถี่ (V_g/f) ซึ่งในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีสถานะเป็นมอเตอร์ จะไม่คำนึงถึงผลของการอิมิตัวที่เกิดขึ้น แต่ในสถานะการทำงานเป็นกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะมีความแตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ว่า จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะเกิดจากจุดตัด

ของกราฟคุณลักษณะของค่าแรงดันและค่ากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อยู่ในสถานะที่มีการอิ่มตัวของแกนเหล็กกับกราฟคุณลักษณะของค่าแรงดันและค่ากระแสของตัวเก็บประจุ ดังนั้นในการวิเคราะห์หาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่นำเสนอในบทนี้ จึงได้พิจารณาผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็กเพิ่มเข้ามาด้วย

5.2 การหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันชองอากาศกับรีแอกแตนซ์สนามแม่เหล็ก

เนื่องจากเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กทำให้ค่า X_m มีค่าไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่า V_g/f ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_g/f กับค่า X_m เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมต่อไปโดยจากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองรูปที่ 3.7 เมื่อทำการทดสอบแบบไร้อะไรโดยปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆที่ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 50 Hz หรือ $F=1$ จะได้วงจรสมมูลใหม่เป็นดังรูปที่

5.1



รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
ที่ใช้หาค่าความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m

จากรูปที่ 5.1 สามารถนำไปคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m ได้จากสมการที่ 5.1 ถึง 5.4

$$V_g/f = V_t - I_1(R_1 + jX_1) \quad (5.1)$$

โดยความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 50 Hz

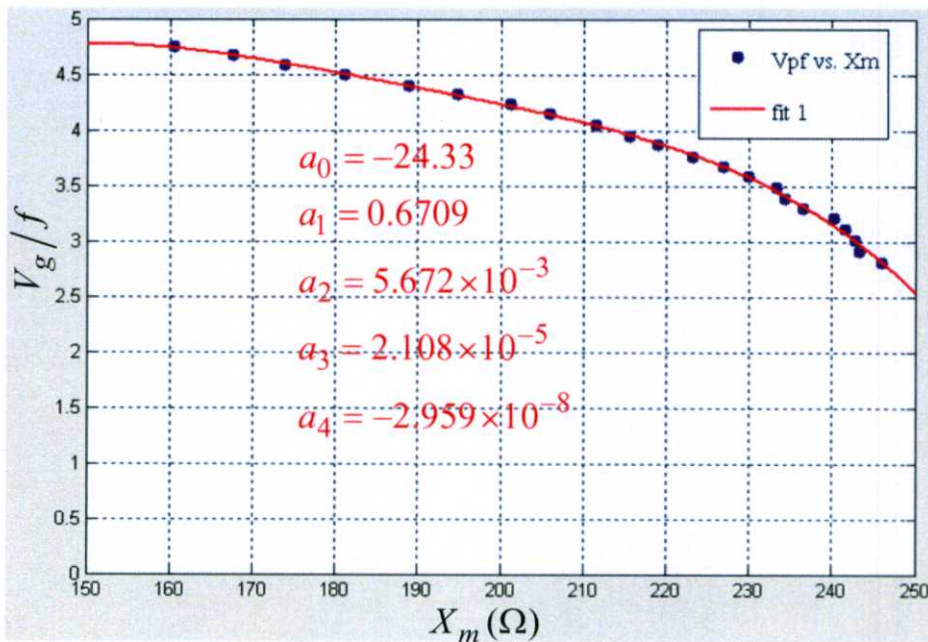
$$V_g/f = V_g/50 \quad (5.2)$$

$$I_m = I_1 - \frac{V_g}{f R_c} \quad (5.3)$$

$$X_m = \frac{V_g}{f I_m} \quad (5.4)$$

5.2.1 การทดสอบหาความสัมพันธ์ของค่า V_g/f กับค่า X_m

ในการทดสอบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของค่า V_g/f กับค่า X_m ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง สามารถหาได้โดยการทดสอบแบบไร้ภาระ โดยมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 2.9 ซึ่งในการทดสอบจะทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า (เฟส) และค่ากระแสไฟฟ้า (เฟส) จากนั้นนำผลที่ได้ไปทำการคำนวณดังสมการที่ 5.1 ถึง 5.4 โดยสามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ของค่า V_g/f กับค่า X_m ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 0.75, 2.2 และ 4.0 kW ได้ดังรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

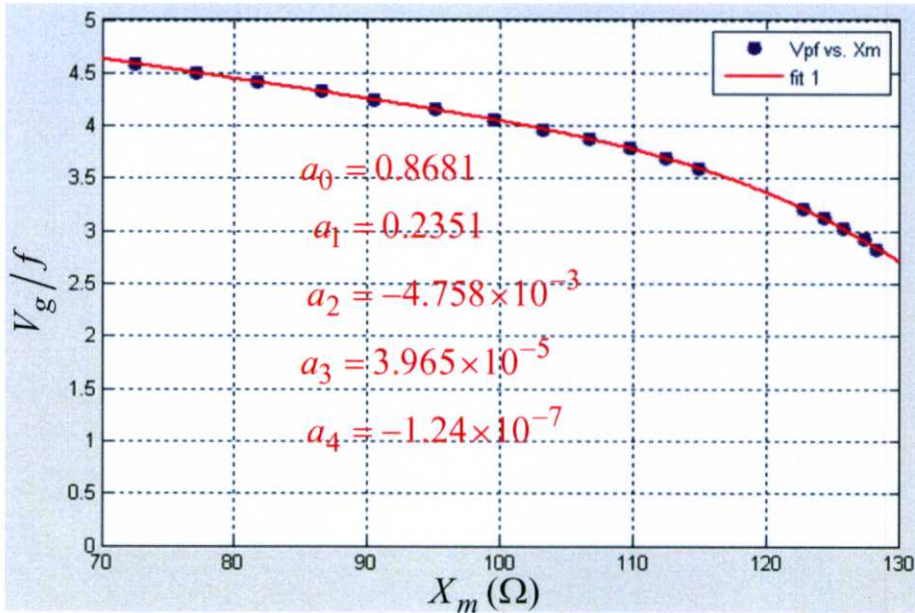


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m (SEIG 0.75 kW)

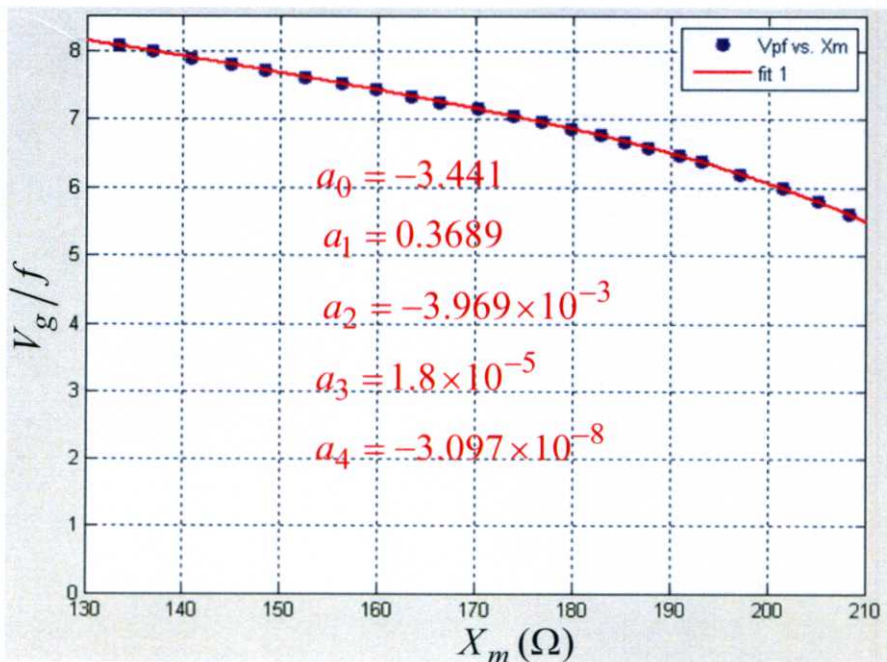
จากกราฟความสัมพันธ์ค่า V_g/f กับค่า X_m ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองทั้งสามพิกัดนั้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สามารถใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง (Fitting curve) ในการอธิบายลักษณะความสัมพันธ์ของค่า V_g/f กับค่า X_m ด้วยสมการฟังก์ชันพหุนามอันดับที่สี่ [11] โดยยกตัวอย่างสมการความสัมพันธ์ของค่า V_g/f กับค่า X_m ที่ผ่านการปรับเส้นโค้งของเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 0.75 kW ดังสมการที่ 5.5 ซึ่งจะพิจารณาให้ค่า X_m อยู่ในแกนนอน(แกน X) และค่า V_g / f อยู่ในแกนตั้ง (แกน Y) ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ร่วมกับวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่นำเสนอ

$$\frac{V_g}{f} = a_0 + a_1 X_m + a_2 X_m^2 + a_3 X_m^3 + a_4 X_m^4 \quad (5.5)$$



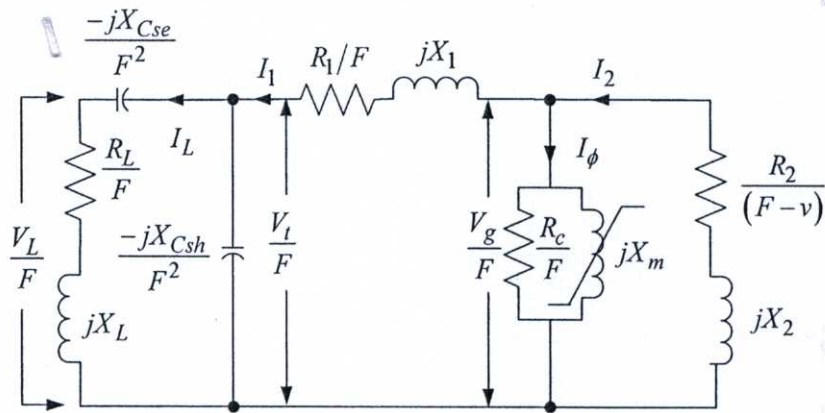
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของ V_g / f กับ X_m (SEIG 2.2 kW)



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของ V_g / f กับ X_m (SEIG 4.0 kW)

5.3 วิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน - อนุกรม

เนื่องจาก SEIG ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเป็นแบบขนาน (C_{sh}) เพียงอย่างเดียว ดังรูปวงจรสมมูลที่ 4.7 นั้นจะมีปัญหาดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไขโดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (C_{se}) เพิ่มเข้ามาในระบบ โดยเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม (Short-shunt Self-Excited Induction Generator) ซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมและต่อกับภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging พร้อมทั้งคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กได้ดังรูปที่ 5.5 [17] โดยในการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมนั้นจะใช้วิธีจินตคติอัลกอริทึม ใน 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) และ กรณีความถี่คงที่ ($F=1$) ซึ่งจะตั้งเป้าหมายที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ($\pm 6\%$)

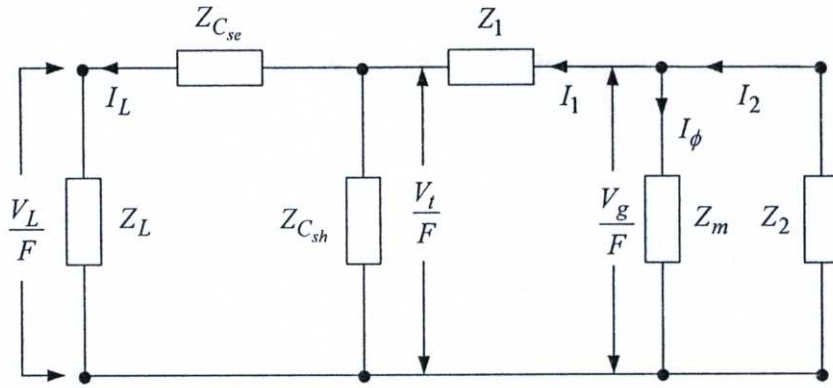


รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

จากรูปที่ 5.5 จะทำการจัดรูปวงจรให้อยู่ในรูปแบบ Impedance ดังรูปที่ 5.6 เพื่อนำไปใช้หาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมร่วมกับวิธีจินตคติอัลกอริทึม ซึ่งแสดงสมการการจัดรูปวงจรได้ดังสมการที่ (5.6) ถึง (5.17)

จากสมการที่ (4.4) Impedance ของสเตเตอร์ (Z_1)

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลในรูปที่ 5.5 โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบ Impedance

จากสมการที่ (4.5) Impedance ของส่วนกระตุ้น (Z_m)

$$Z_m = \frac{jX_m \left(\frac{R_c}{F} \right)}{jX_m + \left(\frac{R_c}{F} \right)} \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (4.7) Impedance ของโรเตอร์ (Z_2)

$$Z_2 = \frac{R_2}{F - v} + jX_2 \quad (5.8)$$

จากสมการที่ (4.2) Impedance ของตัวเก็บประจุแบบขนาน (Z_{Csh})

$$Z_{Csh} = \left[\frac{-jX_{Csh}}{F^2} \right] \quad (5.9)$$

และ Impedance ของตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (Z_{Cse})

$$Z_{Cse} = \left[\frac{-jX_{Cse}}{F^2} \right] \quad (5.10)$$

จากสมการที่ (4.1) Impedance ของภาระทางไฟฟ้า (Z_L)

$$Z_L = \left[\frac{R_L}{F} \right] + jX_L \quad (5.11)$$

และค่าความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

ค่ากระแสที่โรเตอร์ (I_2)

$$I_2 = -V_g / (FZ_2) \quad (5.12)$$

ค่ากระแสที่ส่วนกระตุ้น (I_ϕ)

$$I_\phi = V_g / (FZ_m) \quad (5.13)$$

ค่ากระแสที่สเตเตอร์ (I_1)

$$I_1 = I_2 - I_\phi \quad (5.14)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ (V_t)

$$V_t / F = (V_g / F) - (I_1 Z_1) \quad (5.15)$$

ค่ากระแสที่ตัวเก็บประจุแบบขนาน (I_{Csh})

$$I_{Csh} = V_t / (F Z_{Csh}) \quad (5.16)$$

ค่ากระแสที่ภาระทางไฟฟ้ารูปแบบที่หนึ่ง (I_{L1})

$$I_{L1} = (V_t / F)(Z_{Cse} + Z_L) \quad (5.17)$$

ค่ากระแสที่ภาระทางไฟฟ้ารูปแบบที่สอง (I_{L2})

$$I_{L2} = I_1 - I_{Csh} \quad (5.18)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ภาระทางไฟฟ้า (V_L)

$$V_L / F = I_{L2} Z_L \quad (5.19)$$

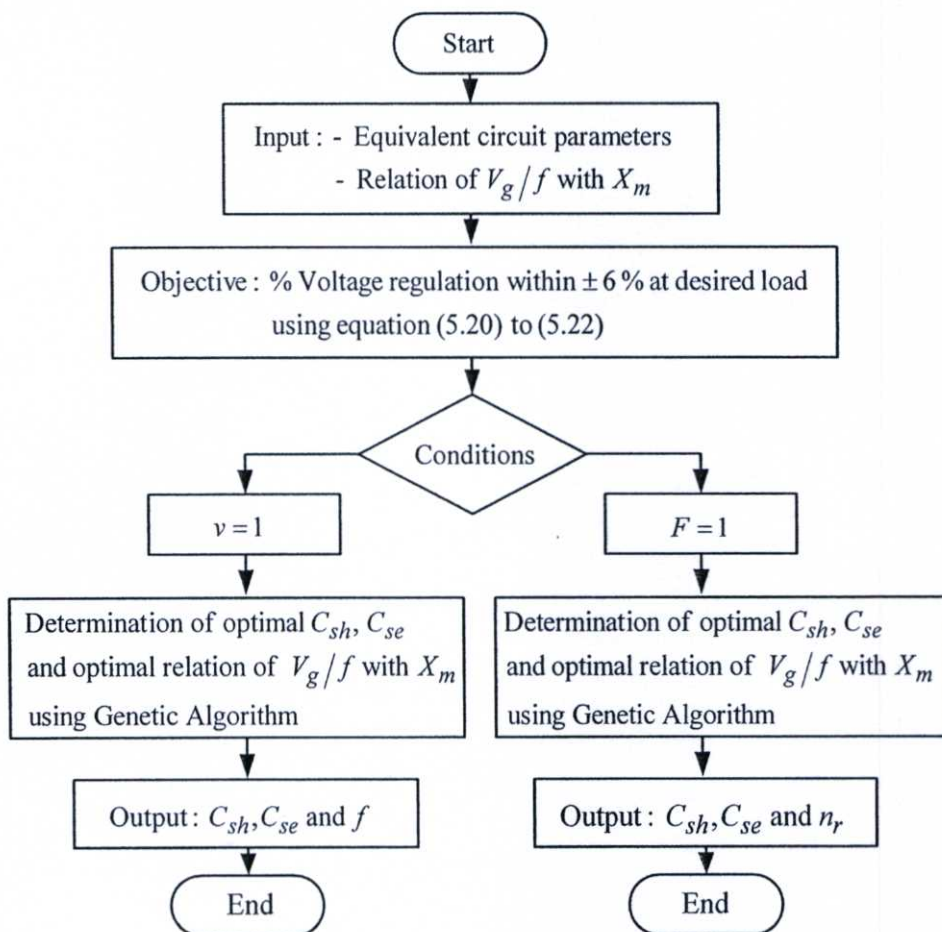
จากสมการที่ (5.6) ถึง (5.19) ค่า R_1, R_2, R_c, X_1 และ X_2 และความสัมพันธ์ของค่า V_g / f กับค่า X_m สามารถหาได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 2.5 และ 5.2.1 ส่วนตัวแปร Z_L ก็จะสามารถกำหนดได้โดยพิจารณาจากพิกัดกำลังไฟฟ้าของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจากหัวข้อที่ 4.3 สมการที่ (4.13) ถึง (4.16) จากนั้นจะทำการหาค่าตัวเก็บประจุแบบ

ขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึม โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่า V_g/f กับ X_m ให้เหมาะสมกับสภาวะการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ p.f. lagging ค่าต่างๆ 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) และ กรณีความถี่คงที่ ($F=1$) ซึ่งมีขั้นตอนของวิธีการที่นำเสนอ ดังรูปที่ 5.7 และมีสมการเป้าหมายดังสมการที่ 5.20 ถึง 5.22

$$F_{objective1} = \frac{1}{2} \left| 1 - \frac{V_L}{V_{rated}} \right|^2 \quad (5.20)$$

$$F_{objective2} = \frac{1}{2} \left| 1 - \frac{I_{L1}}{I_{L2}} \right|^2 \quad (5.21)$$

$$F_{objective3} = \frac{1}{2} |I_2 - I_\phi - I_1|^2 \quad (5.22)$$



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมในกรณี $v=1$ และ $F=1$

5.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่นำมาใช้ทดสอบให้ทำงานในรูปแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมในพทนี้มีสามพิกัดคือ 0.75, 2.2 และ 4.0 kW โดยมีค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจากการได้มาซึ่งการทดสอบตามหัวข้อที่ 2.4 ดังตารางที่ 5.1

เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลและความสัมพันธ์ของค่า V_g/f กับค่า X_m ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองแล้ว ก็จะทำการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมในกรณีต่าง ๆ ดังวิธีที่นำเสนอในหัวข้อที่ 5.3 โดยสามารถแสดงค่าของตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้ในกรณีต่างๆ กับผลการทดสอบสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพิกัด 0.75, 2.2 และ 4.0 kW ในหัวข้อที่ 5.4.1 ถึง 5.4.6

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูล
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 3 พิกัด

พิกัด (kW)	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_2 (Ω)	R_c (Ω)	X_m (Ω)
0.75	9.03	10.99	8.29	10.99	2176.68	199.50
2.2	3.50	4.04	2.54	4.04	1114.40	86.82
4.0	3.90	7.51	3.34	7.51	1727.06	152.20

5.4.1 การทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW

กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 0.75 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการออกแบบในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.2 (และแสดงผลการออกแบบที่ค่าความเร็วต้นกำลังค่าอื่น ๆ ในภาคผนวก ข)

จากผลการออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.2 พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะอยู่ระหว่าง $23.39 \mu\text{F}$ ถึง $23.57 \mu\text{F}$ ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการออกแบบมากที่สุดคือ $23.7 \mu\text{F}$ โดยที่ค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะมีค่าที่

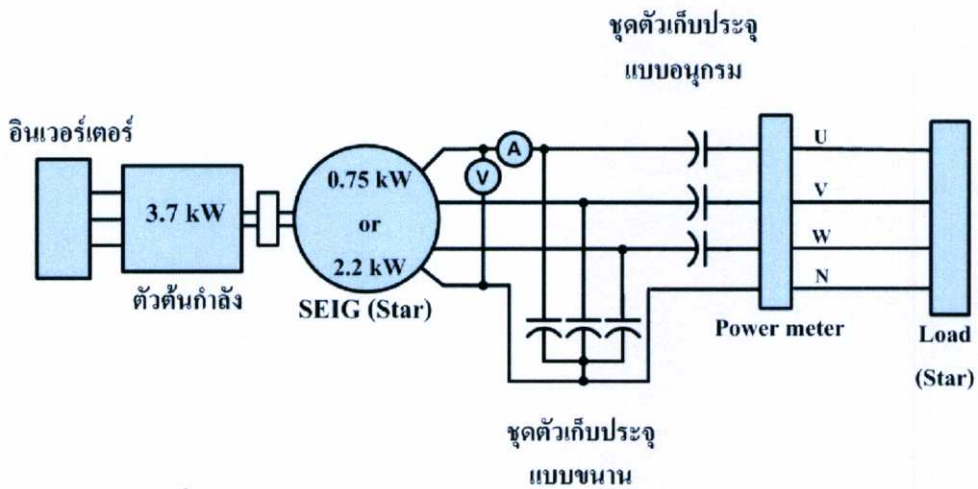
แตกต่างกันไปซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า p.f. ของภาระทางไฟฟ้า (ถ้าค่า p.f. ของภาระทางไฟฟ้ามีค่าสูง ค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมก็จะมีค่าสูงด้วย และถ้าค่า p.f. ของภาระทางไฟฟ้ามีค่าต่ำ ค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมก็จะมีค่าต่ำด้วย ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีที่ค่า p.f. ของภาระทางไฟฟ้ามีค่าสูง นั่นก็คือมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีค่าต่ำทำให้ค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะต้องมีค่าที่สูง เพราะค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมดังสมการที่ 5.23 ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมที่มีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบมากที่สุด โดยจะเลือกทำการทดสอบที่ค่า p.f. ของภาระทางไฟฟ้า 3 ค่าคือ 0.97, 0.94 และ 0.91 p.f. lagging โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.4.1 และมีวงจรถอดสอบดังรูปที่ 5.8 (ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองและภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์) ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.3 ถึง 5.14

$$Q_{c_{se}} = \frac{I^2}{\omega \cdot C_{se}} \quad (5.23)$$

ตารางที่ 5.2 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ					ค่าที่ทดสอบจริง	
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.99	23.56	110.91	47.57	184.33	-	-
0.98	23.48	81.93	47.54	186.82	-	-
0.97	23.45	68.26	47.51	189.26	23.7	70.0
0.96	23.42	58.86	47.48	191.67	-	-
0.95	23.39	54.07	47.44	194.01	-	-
0.94	23.57	49.80	47.41	196.33	23.7	50.0
0.93	23.56	46.69	47.37	198.55	-	-
0.92	23.39	44.87	47.32	200.64	-	-
0.91	23.49	42.54	47.28	202.73	23.7	42.3
0.90	23.51	39.23	47.24	204.73	-	-

- ไม่มีการทดสอบ



รูปที่ 5.8 วงจรการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 และ 2.2 kW
ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 70.0 \mu\text{F}$$

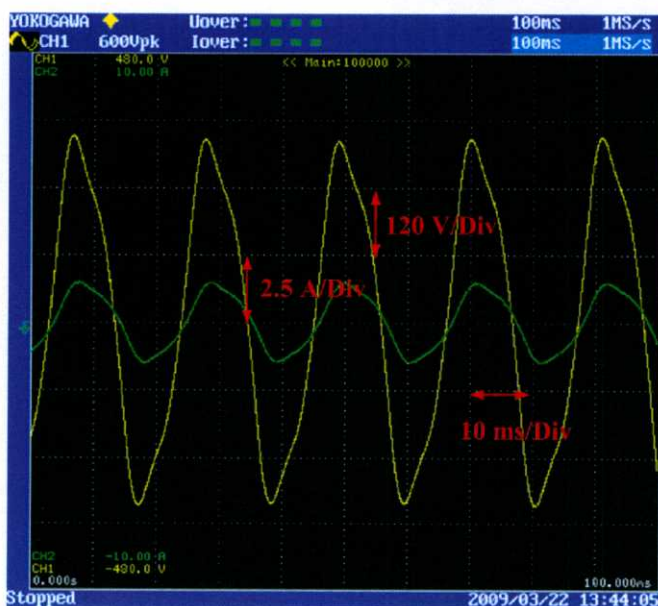
Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
76.20	571.5	235.02	0.835	0.9711	47.82	1.54	231.6	6.83
79.49	596.2	233.49	0.879	0.9678	47.85	1.55	227.4	6.13
83.11	623.3	229.63	0.930	0.9733	47.62	1.58	225.7	4.38
88.29	662.2	224.01	1.019	0.9670	47.37	1.63	219.3	1.82
91.61	687.1	225.30	1.045	0.9729	47.38	1.73	221.8	2.41
93.60	702.0	222.20	1.085	0.9704	47.27	1.74	218.1	1.00
96.08	720.6	219.12	1.134	0.9670	47.42	1.75	212.5	-0.40

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.3 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.2 (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ 0.97 p.f. lagging) พบว่า SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 % ได้ตั้งแต่ % Load เท่ากับ 79.49 % ถึง 96.08 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอในหัวข้อที่ 5.3 กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่นั้นสามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายค่าภาระทางไฟฟ้าในช่วงย่านประมาณ 85 % พิกัด ที่ 0.97 p.f. lagging ให้อยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า

ค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 47.42 Hz ถึง 47.85 Hz ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่ได้จากการออกแบบคือ 47.51 Hz และจุดที่น่าสนใจอีกอย่างก็คือเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สแตเตอร์ของ SEIG 0.75 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 1.9 A โดยสามารถแสดงตัวอย่างของข้อมูลและรูปสัญญาณของค่าแรงดันและกระแสที่ภาระทางไฟฟ้า 0.97 p.f. lagging % Load=88.29 % ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ที่ $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 70.0 \mu\text{F}$ ได้ดังรูปที่ 5.9

YOKOGAWA		Uover: ■ ■ ■ ■		100ns	1MS/s	
CH1		Iover: ■ ■ ■ ■		100ms	1MS/s	
		Element1	Element2	Element3	Σ A	Σ B
Urms [V]	J	223.90	223.24	224.90	224.01	-----
Urm [V]	J	224.67	224.03	225.94	224.88	-----
Udc [V]	J	-0.04	0.27	-0.03	0.07	-----
Uac [V]	J	223.90	223.24	224.90	224.01	-----
Irms [A]	J	1.011	1.009	1.037	1.019	-----
Irm [A]	J	1.014	1.013	1.043	1.023	-----
Idc [A]	J	0.001	0.001	0.001	0.001	-----
Iac [A]	J	1.011	1.009	1.037	1.019	-----
P [W]	J	0.2189k	0.2181k	0.2253k	0.6622k	-----
S [VA]	J	0.2263k	0.2253k	0.2332k	0.6848k	-----
Q [var]	J	0.0572k	0.0568k	0.0604k	0.1744k	-----
λ []	J	0.9675	0.9677	0.9659	0.9670	-----
ϕ [°]	JG	14.64	G 14.61	G 15.01	14.76	-----
fU [Hz]	J	47.447	47.448	47.367	-----	-----
fI [Hz]	J	47.459	47.461	47.393	-----	-----
U+pk [V]	J	333.61	327.04	331.93	-----	-----
U-pk [V]	J	-328.69	-327.92	-333.71	-----	-----
I+pk [A]	J	1.506	1.485	1.527	-----	-----
I-pk [A]	J	-1.491	-1.498	-1.525	-----	-----
CfU []	J	1.49	1.47	1.48	-----	-----
CfI []	J	1.49	1.48	1.47	-----	-----
PfU []	J	1.11	1.11	1.11	-----	-----
PfI []	J	1.11	1.11	1.10	-----	-----
Z [Ω]	J	221.56	221.15	216.87	659.52	-----
Rs [Ω]	J	214.36	214.00	209.47	637.76	-----

Stopped 2009/03/22 13:43:22



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า
ที่ 0.97 p.f. lagging % Load=88.29 % Short-shunt SEIG 0.75 kW
ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 70.0 \mu\text{F}$

และเพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมแบบขนาน-อนุกรมสำหรับการชดเชยแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 0.75 kW ขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ 0.97 p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ได้จริงก็จะทำการทดสอบโดยใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานหรืออนุกรมค่าอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการออกแบบ โดยสามารถแสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 5.6 และแสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.97 p.f. lagging แต่นำไปจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.97 p.f. lagging ได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
85.19	638.9	238.32	0.917	0.9745	47.69	1.65	235.1	8.33
93.26	699.5	236.50	1.018	0.9680	47.76	1.73	230.5	7.50
94.71	710.3	231.65	1.060	0.9651	47.43	1.72	225.9	5.27

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.4 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบอนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบพบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเกิน 6 % คือ 8.33 % และ 7.50 % ที่ % Load เท่ากับ 85.19 % และ 93.26 % ตามลำดับ และที่ % Load เท่ากับ 94.71 จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 5.27 % ซึ่งอยู่ในช่วง 6 % แต่จะเห็นได้ว่า % Load นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่พิกัดของ SEIG 0.75 kW แล้ว คือ 94.71 % แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้ายังมีค่าที่สูงอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากการที่ค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่ามากเกินกว่าที่ภาระทางไฟฟ้าต้องการ ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้ายังมีค่าที่สูงอยู่ แม้ว่า % Load จะใกล้เคียงกับค่าที่พิกัดของ SEIG 0.75 kW แล้วก็ตามโดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่เกิดขึ้นจากตัวเก็บประจุแบบอนุกรมได้ดังสมการที่

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.5 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ พบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าต่ำกว่า 6 % คือ -8.42 % และ -9.86 % ที่ % Load เท่ากับ 59.84 % และ 63.78 % ตามลำดับ และที่ % Load เท่ากับ 53.87 % จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ -1.17 ซึ่งอยู่ในช่วง 6 % แต่จะเห็นได้ว่า % Load นั้นมีค่าที่ต่ำมากคือ 53.87 % ทั้งนี้เนื่องจากการที่ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่จะไปชดเชยในส่วนของ การกระตุ้นสนามแม่เหล็กของตัว SEIG 0.75 kW ไม่เพียงพอ ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้ามีค่าที่ไม่เหมาะสม โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่า กำลังไฟฟ้าเสมือนที่เกิดขึ้นจากตัวเก็บประจุแบบขนานได้ดังสมการที่ 5.24 และประเด็นที่น่าสนใจจากผลการทดสอบนี้ก็คือเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการ ออกแบบเพียง $3.7 \mu\text{F}$ ก็จะส่งผลให้ SEIG 0.75 kW มี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 6 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธีการที่น่าเสนอนั้น ก่อนข้างมีความแม่นยำสูงสามารถนำไปใช้งานได้จริง

$$Q_{c_{sh}} = V^2 \omega C_{sh} \quad (5.24)$$

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 70.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
53.87	404.0	217.43	0.637	0.9718	48.33	1.20	213.86	-1.17
59.84	448.8	201.48	0.766	0.9689	48.22	1.24	195.45	-8.42
63.78	478.4	198.3	0.827	0.9729	47.71	1.41	192.40	-9.86

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.6 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ ออกแบบพบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ อยู่ใน ± 6 % ที่ % Load เท่ากับ 63.17 % แต่เมื่อ % Load เปลี่ยนเป็น 68.12 % และ 71.89 % พบว่า จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 6 % คือ -8.15 % และ -12.48 % ทั้งนี้เนื่องจากการที่ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม แต่ทั้งนี้ใน ส่วนของตัวเก็บประจุแบบอนุกรมนั้นก็เป็ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบซึ่งน่าจะส่งผลให้

ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้ามีค่าที่มากขึ้น แต่จากผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าก็มีค่าที่ลดน้อยลง ดังเช่นกรณีของการเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ ทั้งนี้เนื่องจากผลของค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมนั้นจะมีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าน้อยกว่าผลของค่าตัวเก็บประจุแบบขนานขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าแต่การที่จะทำการเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีค่าสูงเกินไปก็จะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอาจเกิน 6 % ได้ (ซึ่งจะนำเสนอในผลการทดสอบกรณี 0.94 p.f. lagging ตารางที่ 5.11) และจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า การเลือกใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีค่ามากเกินไปจะส่งผลให้ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นมีค่าเกินพิกัดได้ซึ่งจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองเกิดความเสียหาย

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 60.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
63.17	473.8	208.55	0.781	0.9696	48.24	1.29	202.2	-5.20
68.12	510.9	202.08	0.867	0.9721	48.00	1.35	196.4	-8.15
71.89	539.2	192.54	0.962	0.9705	47.64	1.39	187.57	-12.48

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.97 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.97 p.f. lagging

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 70.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
78.22	586.7	194.90	1.076	0.9326	47.05	1.50	183.6	-11.41
86.06	645.5	197.07	1.154	0.9463	46.97	1.57	187.6	-10.42
93.79	703.46	205.00	1.191	0.9604	46.93	1.68	197.8	-6.82

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.7 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ ออกแบบที่ 0.97 p.f. lagging จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.97 p.f. lagging พบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 6 % ซึ่งจากการผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่ นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้ในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าในช่วงย่านประมาณ 85 % พิกัด ที่ 0.97 p.f. lagging เท่านั้น (ซึ่งวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่นำเสนอสามารถออกแบบ ได้) ดังนั้นเมื่อต้องการจ่ายค่าภาระทางไฟฟ้าที่ค่า p.f. lagging อื่นๆ ก็จะต้องทำการปรับเปลี่ยน ค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมดังผลการออกแบบในตารางที่ 5.2 เพื่อความเหมาะสมของ % ค่าการ เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 %

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 ในกรณีความเร็วค้ำลึงค้งที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$$

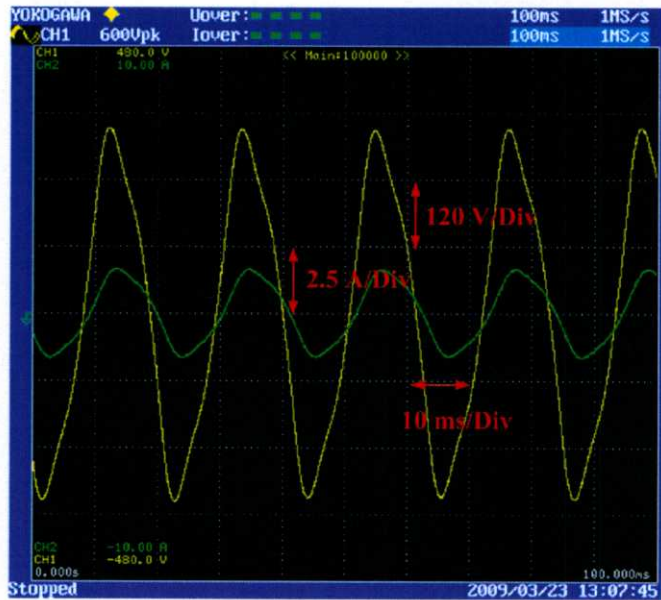
Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_1 (V)	V_{reg} (%)
84.36	632.7	229.98	0.975	0.9408	47.35	1.64	220.1	4.54
93.16	698.7	221.8	1.113	0.9435	46.88	1.75	212.5	0.82
95.51	716.3	224.85	1.126	0.9426	47.29	1.76	213.5	2.18

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.8 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ ออกแบบดังตารางที่ 5.2 (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ 0.94 p.f. lagging) พบว่า SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้า อยู่ในช่วง ± 6 % ได้ตั้งแต่ % Load เท่ากับ 84.36 % ถึง 95.51 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุ แบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอใน 5.3 กรณีความเร็วค้ำลึงค้งที่นั้นสามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายค่าภาระทางไฟฟ้าในช่วงย่านประมาณ 85 % พิกัด ที่ 0.94 p.f. lagging ให้อยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ที่ได้ จากการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 46.88 Hz ถึง 47.35 Hz ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่ได้จากการ ออกแบบคือ 47.41 Hz และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของ SEIG มีค่าไม่เกิน พิกัดคือ 1.9 A โดยสามารถแสดงตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณของค่าแรงค้ำลึงค้งและกระแสที่ภาระ

ทางไฟฟ้า 0.94 p.f. lagging % Load=93.16 % ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ที่ $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$ ได้ดังรูปที่ 5.10

YOKOGAWA		Uover: ■ ■ ■			100ms	1MS/s
CH1 600Upk		Iover: ■ ■ ■			100ms	1MS/s
		Element1	Element2	Element3	Σ A	Σ B
UrmsV	V	221.51	220.46	223.47	221.81	-----
UmnV	V	220.13	219.15	221.97	220.42	-----
UacV	V	-0.18	0.65	0.10	0.19	-----
UacIV	V	221.51	220.46	223.47	221.81	-----
IrmsIA	A	1.119	1.108	1.112	1.113	-----
IrnIA	A	1.116	1.105	1.111	1.111	-----
IacIA	A	0.001	0.001	0.001	0.001	-----
IacIA	A	1.119	1.108	1.112	1.113	-----
P	W	0.2339k	0.2306k	0.2343k	0.6987k	-----
S	VA	0.2478k	0.2442k	0.2486k	0.7406k	-----
Q	Var	0.0818k	0.0803k	0.0832k	0.2453k	-----
λ	I	0.9440	0.9443	0.9423	0.9435	-----
ϕ	$^\circ$	19.27	19.21	19.55	19.35	-----
fU	Hz	46.898	46.833	46.881	-----	-----
fI	Hz	46.907	46.850	46.893	-----	-----
U+pkV	V	334.86	336.44	338.07	-----	-----
U-pkV	V	-337.88	-331.12	-337.59	-----	-----
I+pkIA	A	1.662	1.654	1.656	-----	-----
I-pkIA	A	-1.672	-1.659	-1.656	-----	-----
CFU	I	1.53	1.53	1.51	-----	-----
CFI	I	1.49	1.50	1.49	-----	-----
FFU	I	1.12	1.12	1.12	-----	-----
FFI	I	1.11	1.11	1.11	-----	-----
Z	Ω	198.02	199.05	200.88	597.95	-----
Rs	Ω	186.92	187.96	189.30	564.18	-----

Stopped 2009/03/23 13:06:50



รูปที่ 5.10 ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า
ที่ 0.94 p.f. lagging % Load=93.16 % Short-shunt SEIG 0.75 kW
ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$

และเพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถให้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 0.75 kW เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ 0.94 P.f. lagging ค่าต่าง ๆ ได้จริงก็จะทำการทดสอบโดยใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานหรืออนุกรมค่าอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการออกแบบโดยสามารถแสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 5.9 แสดงผลการ

ทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 5.10 แสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่ามากกว่าที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 5.11 และแสดงผลการทดสอบเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.94 p.f. lagging แต่นำไปจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.94 p.f. lagging ดังตารางที่ 5.12

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.9 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบพบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าต่ำกว่า 6 % คือ -21.12 % ที่ % Load เท่ากับ 72.23 % ซึ่งจากผลการทดสอบในกรณีดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ (ตารางที่ 5.5)

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.10 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบพบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าต่ำกว่า 6 % คือ -10.44 % ที่ % Load เท่ากับ 88.83 % ซึ่งจากผลการทดสอบในกรณีดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ (ตารางที่ 5.6)

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
72.23	541.7	173.36	1.111	0.9370	46.97	1.32	167.2	-21.12

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 20.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 44.5 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
88.63	664.7	197.04	1.193	0.9425	47.08	1.64	189.07	-10.44

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.10 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบพบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้า

ต่ำกว่า 6 % คือ -10.44 % ที่ % Load เท่ากับ 88.83 % ซึ่งจากผลการทดสอบในกรณีดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าต่ำกว่าที่ออกแบบ (ตารางที่ 5.6)

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.11 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าสูงกว่าที่ออกแบบพบว่า SEIG 0.75 kW จะมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าสูงกว่า 6 % คือ 7.88 % ที่ % Load เท่ากับ 92.81 % ซึ่งจะเห็นได้ว่า % Load นั้นมีค่าสูงมากคือใกล้เคียงพิกัดแล้วแต่ % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าก็ยังมีค่าที่สูงอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากการที่ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานมีค่าที่สูงกว่าค่าที่เหมาะสมทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่จะไปชดเชยในส่วนของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กของตัว SEIG 0.75 kW นั้นมากเกินไป ส่งผลให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่เกิดขึ้นจากตัวเก็บประจุแบบขนานได้ดังสมการที่ 5.24 และประเด็นที่น่าสนใจจากผลการทดสอบนี้ก็คือเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบเพียง $1.3 \mu\text{F}$ ก็ส่งผลให้ SEIG มี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่สูงกว่า 6 %

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนานค่าสูงกว่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 25.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
92.81	696.1	237.33	1.046	0.9346	47.39	1.72	225.6	7.88

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.12 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.94 p.f. lagging จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.94 p.f. lagging พบว่า SEIG 0.75 kW จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่เกิน 6 % ซึ่งจากผลการทดสอบในกรณีดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.97 p.f. lagging จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.97 p.f. lagging (ตารางที่ 5.7)

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
 จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.94 p.f. lagging
 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.94 p.f. lagging

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
93.26	699.5	236.50	1.018	0.9682	47.76	1.73	230.5	7.50
85.19	638.9	238.32	0.917	0.9745	47.69	1.65	235.1	8.33
79.24	594.3	245.41	0.844	0.9567	48.19	1.63	236.6	11.55
77.15	578.6	239.56	0.868	0.927	48.01	1.55	226.3	8.89

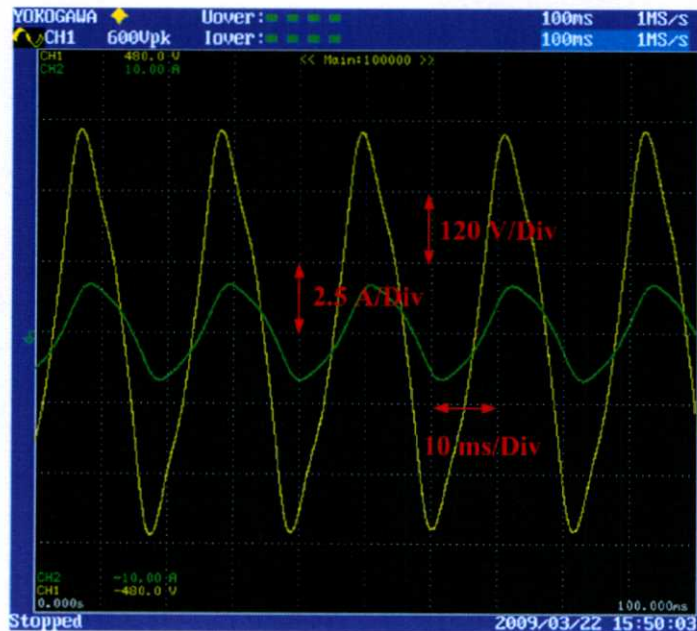
ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
 จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.91 p.f. lagging
 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 42.3 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
82.59	619.4	234.65	0.968	0.9093	47.68	1.53	215.9	6.66
94.44	708.3	224.89	1.148	0.9147	46.85	1.73	208.6	2.22
97.13	728.5	228.20	1.165	0.9134	47.15	1.78	209.9	3.72

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.13 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.2 (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ 0.91 p.f. lagging) พบว่า SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ ± 6 % ได้ตั้งแต่ % Load เท่ากับ 82.59 % ถึง 97.13 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอใน 5.3 กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่นั้นสามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายค่าภาระทางไฟฟ้าในช่วงย่านประมาณ 85 % พิกัด ที่ 0.91 p.f. lagging ให้อยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 46.85 Hz ถึง 47.68 Hz ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับ

ค่าความถี่ที่ได้จากการออกแบบคือ 47.28 Hz และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของ SEIG 0.75 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 1.9 A โดยสามารถแสดงตัวอย่างรูปสัญญาณของค่าแรงดันและกระแสที่ภาระทางไฟฟ้า 0.91 p.f. lagging % Load=94.44 % ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ที่ $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 42.3 \mu\text{F}$ ได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า
ที่ 0.91 p.f. lagging % Load = 94.44 % Short-shunt SEIG 0.75 kW
ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm $C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 42.3 \mu\text{F}$

ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.91 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.91 p.f. lagging

$$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 42.3 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
94.24	706.8	235.98	1.071	0.9318	47.35	1.80	223.2	7.26
91.61	687.1	237.21	1.008	0.9576	47.39	1.73	231.1	7.82
82.24	616.8	242.75	0.919	0.9214	47.90	1.63	228.1	10.34
78.48	588.6	250.15	0.838	0.9358	48.30	1.62	236.2	13.70

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.14 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.91 p.f. lagging กรณีความเร็วคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.91 p.f. lagging พบว่า SEIG 0.75 kW จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่เกิน 6 % ซึ่งจากผลการทดสอบในกรณีดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.97 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.97 p.f. lagging จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.97 p.f. lagging (ตารางที่ 5.7) และกรณีจ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.94 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมค่าตามที่ออกแบบที่ 0.94 p.f. lagging จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ 0.94 p.f. lagging (ตารางที่ 5.12)

5.4.2 การทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW

กรณีความถี่คงที่

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 0.75 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการออกแบบในกรณีความถี่คงที่ จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ					ค่าที่ทดสอบจริง	
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	n_r (rpm)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.99	19.82	100.07	1575.56	199.33	-	-
0.98	19.52	71.66	1576.67	201.80	-	-
0.97	19.71	59.40	1577.80	204.18	19.9	60.0
0.96	19.32	51.99	1579.02	206.47	-	-
0.95	19.48	47.11	1580.18	208.66	-	-
0.94	19.60	43.57	1581.50	210.75	19.9	44.4
0.93	19.50	40.88	1582.84	212.75	-	-
0.92	19.33	38.76	1584.27	214.65	-	-
0.91	19.24	37.04	1585.71	216.48	-	-
0.90	19.47	35.62	1587.14	218.22	-	-

- ไม่มีการทดสอบ

จากผลการออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้ในกรณีความถี่คงที่จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะอยู่ระหว่าง 19.24 μF ถึง 19.82 μF ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าที่น้อยกว่าในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีคงค่าความถี่ไว้ที่ 50 Hz ทำให้ความเร็วต้นกำลังนั้นมีค่ามากกว่า 1500 rpm ส่งผลให้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานและอนุกรมที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการออกแบบมากที่สุดคือ 19.9 μF และในส่วนของค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะมีค่าที่แตกต่างกันไปซึ่งจะขึ้นอยู่กับ p.f. ของภาระทางไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณีความถี่คงที่เหมือนในหัวข้อที่ 4.4.2 และมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.8 (ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดและภาระทางไฟฟ้าคือแบบสตาร์) ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.16 ถึง 5.17

ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz

จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging

โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh} = 19.9 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se} = 60.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
81.85	613.9	233.07	0.903	0.9728	1566	1.49	227.8	5.94
84.80	636.0	225.23	0.973	0.9675	1569	1.53	220.1	2.37
90.73	680.5	224.16	1.042	0.9707	1574	1.59	219.6	1.89
92.68	695.1	221.30	1.081	0.9682	1579	1.61	216.6	0.59

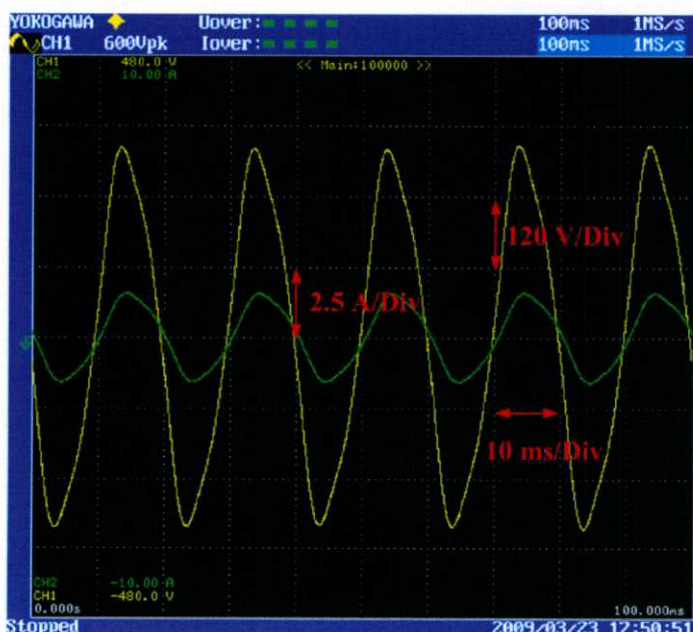
จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.16 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.15 (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ 0.97 p.f. lagging) พบว่า SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 % ได้ตั้งแต่ % Load เท่ากับ 81.85 % ถึง 92.68 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอใน 5.3 กรณีความถี่คงที่นั้นสามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายค่าภาระทางไฟฟ้าในช่วงย่านประมาณ 85 % พิกัด ที่ 0.97 p.f. lagging ให้อยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วต้นกำลังที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 1566 rpm ถึง 1579 rpm ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเร็วต้นกำลังที่ได้จากการออกแบบคือ 1577.8 rpm และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของ SEIG 0.75 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 1.9 A โดยสามารถแสดงตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณของค่าแรงดันและกระแสที่ภาระทางไฟฟ้า 0.97 p.f. lagging % Load=92.68 % ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz ที่ $C_{sh} = 19.9 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 60.0 \mu\text{F}$ ได้ดังรูปที่ 5.12

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.17 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.15 (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ 0.94 p.f. lagging) พบว่า SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 % ได้ตั้งแต่ % Load เท่ากับ 81.20 % ถึง 94.76 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอใน 5.3 กรณีความถี่คงที่นั้นสามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายค่าภาระทางไฟฟ้าในช่วงย่านประมาณ 85 % พิกัด ที่ 0.94 p.f. lagging ให้อยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วต้นกำลังที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 1567 rpm ถึง 1582 rpm ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเร็วต้น

กำลังที่ได้จากการออกแบบคือ 1581.5 rpm และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG 0.75 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของ SEIG 0.75 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 1.9 A โดยสามารถแสดงตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณของค่าแรงดันและกระแสที่ภาระทางไฟฟ้า 0.94 p.f. lagging % Load=93.57 % ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz ที่ $C_{sh} = 19.9 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 44.4 \mu\text{F}$ ได้ดังรูปที่ 5.13

YOKOGAWA		Uover: ■■■■			100ns	1MS/s
CH1 600Upk		Iover: ■■■■			100ms	1MS/s
		Element1	Element2	Element3	Σ A	Σ B
Urms [V]	I	220.96	220.80	222.14	221.30	-----
Urm [V]	I	219.99	220.12	221.71	220.61	-----
Udc [V]	I	-0.17	0.64	0.21	0.23	-----
Uac [V]	I	220.96	220.80	222.14	221.30	-----
Irms [A]	I	1.083	1.080	1.081	1.081	-----
Irm [A]	I	1.080	1.076	1.080	1.079	-----
Idc [A]	I	0.001	0.001	0.002	0.001	-----
Iac [A]	I	1.083	1.080	1.081	1.081	-----
P [W]	I	0.2318k	0.2300k	0.2326k	0.6951k	-----
S [VA]	I	0.2394k	0.2384k	0.2402k	0.7180k	-----
Q [var]	I	0.0599k	0.0597k	0.0601k	0.1797k	-----
λ []	I	0.9682	0.9681	0.9682	0.9682	-----
φ [°]	I	14.50	G 14.50	G 14.49	14.50	-----
fU [Hz]	I	49.890	49.920	49.895	-----	-----
fI [Hz]	I	49.931	49.925	49.878	-----	-----
U+pk [V]	I	327.58	325.72	328.38	-----	-----
U-pk [V]	I	-328.24	-325.27	-327.59	-----	-----
I+pk [A]	I	1.605	1.590	1.596	-----	-----
I-pk [A]	I	-1.609	-1.611	-1.613	-----	-----
CfU []	I	1.49	1.48	1.48	-----	-----
CfI []	I	1.48	1.49	1.49	-----	-----
FfU []	I	1.12	1.11	1.11	-----	-----
FfI []	I	1.11	1.11	1.11	-----	-----
Z [Ω]	I	203.96	204.50	205.42	613.88	-----
Rs [Ω]	I	197.47	197.99	198.88	594.34	-----

Stopped 2009/03/23 17:49:43



รูปที่ 5.12 ตัวอย่างข้อมูลและรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า
ที่ 0.97 p.f. lagging % Load = 92.68 % Short-shunt SEIG 0.75 kW
ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz $C_{sh} = 19.9 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 60.0 \mu\text{F}$

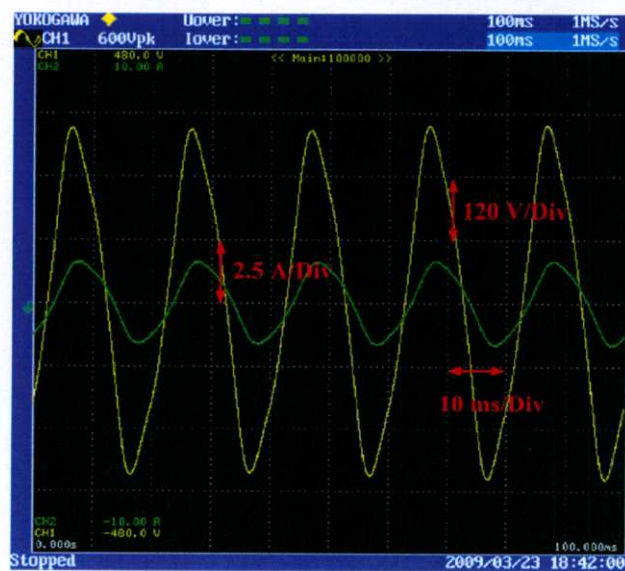
ตารางที่ 5.17 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz

จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging

โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$C_{sh} = 19.9 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 44.4 \mu\text{F}$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
81.20	609.0	227.06	0.954	0.9378	1567	1.48	215.6	3.21
93.57	701.8	223.38	1.116	0.9381	1583	1.62	212.0	1.54
94.76	710.7	231.08	1.087	0.9435	1582	1.63	219.0	5.04



รูปที่ 5.13 ตัวอย่างรูปสัญญาณแรงดันและกระแสของภาระทางไฟฟ้า

ที่ 0.94 p.f. lagging % Load 93.57 % Short-shunt SEIG 0.75 kW

ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz $C_{sh} = 19.9 \mu\text{F}$ และ $C_{se} = 44.4 \mu\text{F}$

5.4.3 การทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW

กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 2.2 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการหาค่ากรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.18

จากผลการออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.18 พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานในกรณี 0.91 p.f. Lagging เท่ากับ 40.9 μF และตัวเก็บประจุแบบอนุกรมมีค่าเท่ากับ 60.45 μF และกรณี 0.86 p.f. Lagging เท่ากับ 34.22 μF และตัวเก็บประจุแบบอนุกรมมีค่าเท่ากับ 39.0 μF ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการออกแบบมากที่สุด โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.4.1 และมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.8 (ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดและภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์) ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.19 ถึง 5.20

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.19 และ 5.20 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.18 (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัด ที่ 0.91 และ 0.86 p.f. lagging) พบว่า SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และจากผลการทดสอบที่ 0.91 p.f. lagging ค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ที่ 48.10 Hz ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความถี่ที่ได้จากการออกแบบคือ 48.20 Hz และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของ SEIG 2.2 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 5.0 A

ตารางที่ 5.18 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 2.2 kW

ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัด
ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ					ค่าที่ทดสอบจริง	
PFL	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.91	40.9	60.45	48.20	76.84	40.0	60.0
0.86	34.22	38.37	47.62	78.82	35.0	39.0

ตารางที่ 5.19 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่
1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=40.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se}=60.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
82.76	1820.82	224.41	2.973	0.9097	48.101	4.68	210.15	2.00

ตารางที่ 5.20 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่
1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=35.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se}=39.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
68.72	1511.79	222.51	2.617	0.8654	48.50	4.49	221.99	1.141

5.4.4 การทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW

กรณีความถี่คงที่

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 2.2 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการหาค่ากรณีความถี่คงที่ จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.21

จากผลการออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.21 พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานในกรณี 0.91 p.f. Lagging เท่ากับ 31.8 μF และตัวเก็บประจุแบบอนุกรมมีค่าเท่ากับ 61.25 μF และกรณี 0.86 p.f. Lagging ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานเท่ากับ 27.51 μF และค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมมีค่าเท่ากับ 39.39 μF ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการออกแบบมากที่สุด ดังตารางที่ 5.21 โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณีความถี่คงที่เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.4.2 และมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.8 (ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดและภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์) ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.22 ถึง 5.23

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.22 และ 5.22 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.21 (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 80 % พิกัด ที่ 0.91 และ 0.86 p.f. lagging) พบว่า SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และจากผลการทดสอบที่ 0.91 p.f. lagging ค่าความเร็วต้นกำลังที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ที่ 1554 rpm ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเร็วต้นกำลังที่ได้จากการออกแบบคือ 1555 rpm และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สแตเตอร์ของ SEIG 2.2 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 5.0 A

ตารางที่ 5.21 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ					ค่าที่ทดสอบจริง	
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	n_r (rpm)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.91	34.8	61.25	1555.0	91.69	35	60.0
0.86	29.51	50.19	1556.8	96.20	30.0	50.0

ตารางที่ 5.22 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=35.0 \mu F \text{ และ } C_{se}=60.0 \mu F$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
76.13	1675	225.11	2.709	0.9156	1554	4.186	216.1	2.32

ตารางที่ 5.23 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz

จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging

โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=30.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se}=50.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
83.08	1827.76	228.92	3.091	0.8610	1558	4.422	219.92	4.05

5.4.5 การทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW

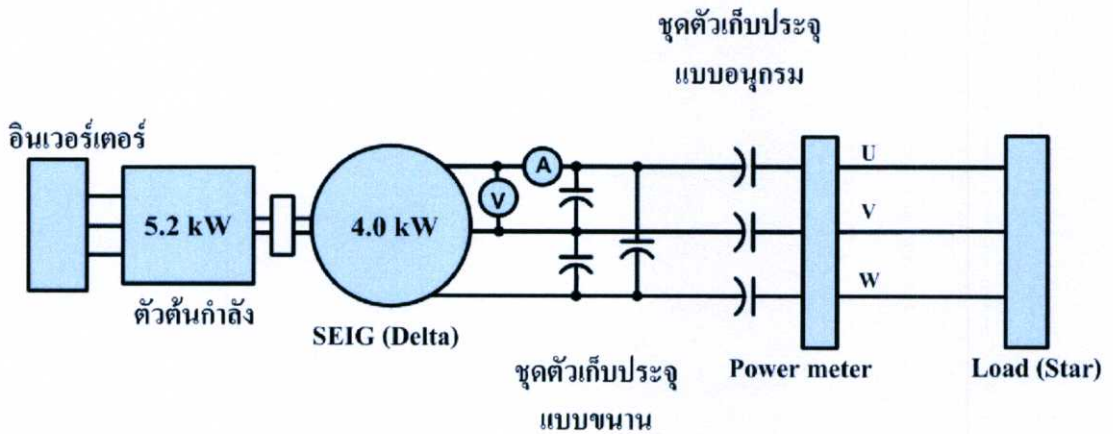
กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 4.0 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการหาค่ากรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่างๆ ได้ดังตารางที่ 5.24 (ซึ่งทั้งนี้เนื่องจากภาระทางไฟฟ้าที่จำกัดทำให้ต้องเลือกทำการออกแบบและทดสอบที่ 50 % พิกัดของ 4.0 kW) โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่เหมือนหัวข้อที่ 4.4.1 และมีวงจรถอดสอบดังรูปที่ 5.14 (ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดต่อแบบเคลด้าส่วนภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์) ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 5.25 ถึง 5.26

ตารางที่ 5.24 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 4.0 kW

ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัดที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ					ค่าที่ทดสอบจริง	
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.91	19.25	59.00	48.53	133.36	18.00	58.50
0.86	17.6	52.8	48.31	135.09	18.00	50.00



รูปที่ 5.14 วงจรการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW
ที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.25 และ 5.26 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.24 กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัด ที่ 0.91 และ 0.86 p.f. lagging) พบว่า SEIG 4.0 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุในกรณีดังกล่าวแล้ว SEIG 4.0 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สแตเตอร์ของ SEIG 4.0 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 5.1 A

ตารางที่ 5.25 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่
1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=18.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se}=58.5 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
52.3	2091	217.25	3.502	0.9162	49.065	3.54	382.76	-1.25

ตารางที่ 5.26 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่
1500 rpmจ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging
โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=18.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se}=50.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
54.45	2178	220.028	3.828	0.8620	49.10	3.965	401.5	0.01

5.4.6 การทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW

กรณีความถี่คงที่

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 4.0 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการหาค่ากรณีความถี่คงที่ จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.27

ตารางที่ 5.27 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ					ค่าที่ทดสอบจริง	
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	n_r (rpm)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.91	17.6	58.3	1537.3	138.73	17.0	58.5
0.86	19.0	52.0	1527.5	139.86	18.0	50.0

โดยมีขั้นตอนการทดสอบในกรณีความถี่คงที่เหมือนหัวข้อที่ 4.4.2 และมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 5.14 (ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดต่อแบบเดลต้าส่วนภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์) และสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.29 ถึง 5.30

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 5.28 และ 5.29 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบดังตารางที่ 5.27 กรณีความถี่คงที่ (จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัด ที่ 0.91 และ 0.86 p.f. lagging) พบว่า SEIG 4.0 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าโดยมี % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ± 6 % ได้จริง และเมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุในกรณี

ดังกล่าวแล้ว SEIG 4.0 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามค่าที่ออกแบบได้โดยที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของ SEIG 4.0 kW มีค่าไม่เกินพิกัดคือ 5.1 A

ตารางที่ 5.28 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz

จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.91 p.f. lagging

โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=17.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se}=58.5 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
50.05	2002	228.28	3.207	0.9115	1528	3.278	378.12	3.76

ตารางที่ 5.29 ผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 4.0 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz

จ่ายภาระทางไฟฟ้า ที่ 0.86 p.f. lagging

โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามค่าที่ออกแบบ

$$C_{sh}=18.0 \mu\text{F} \text{ และ } C_{se}=50.0 \mu\text{F}$$

Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
58.25	2330	229.67	3.92	0.8628	1529	4.048	410.1	4.39

และจากผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองทั้งสามพิกัดที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ ทั้ง 2 กรณีคือในกรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) และในกรณีที่ความถี่คงที่ ($F=1$) ในบทนี้ พบว่าสามารถรักษา % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ใน $\pm 6\%$ ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอใน 5.3 นั้นค่อนข้างมีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 บทนำ

จากการประสบปัญหาขาดแคลนและราคาที่สูงขึ้นอย่างมากของพลังงานปรวมภูมิ ทำให้ในปัจจุบันนี้ได้มีการหันมาให้ความสนใจกับพลังงานทดแทน (Renewable energy) กันมากขึ้น และเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากการเปลี่ยนรูปจากพลังงานปรวมภูมิ ดังนั้นในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานปรวมภูมิได้ อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนนี้ส่วนใหญ่จะมีกำลังการผลิตที่มีขนาดเล็กถึงปานกลาง ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีโครงสร้างโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกจึงมีความเหมาะสมกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส แต่ในการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้งานในแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้นจำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุค่าที่เหมาะสมเข้าที่ขดลวดทางด้านสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อช่วยในการสร้างแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Unity p.f. และแบบ Lagging p.f. จะมีช่วงย่านการใช้งานที่ค่อนข้างแคบและที่สำคัญก็คือมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการนำเสนอวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. โดยใช้วิธีจิวเนติกอัลกอริทึมซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Optimization) ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลและคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยจะพิจารณาใน 2 กรณีคือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และ กรณีความถี่คงที่ โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ($\pm 6\%$)

6.2 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว (Shunt Self-Excited Induction Generator) ในบทที่ 4 นั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะในกรณีของภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ Lagging p.f. ทั้งนี้เนื่องจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่เหมาะสม เพื่อ

ชดเชยในส่วนของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในการสร้างแรงดันไฟฟ้า เช่นเดียวกันกับในส่วน
ของภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ Lagging p.f. ก็ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยเช่นเดียวกัน ทำให้
ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อความต้องการ
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จึงส่งผลให้มีค่าการเปลี่ยนแปลง
แรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม

ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขโดยต่อตัวเก็บประจุแบบ
ขนาน-อนุกรมเพิ่มเข้ามาในระบบ ซึ่งได้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมมาจาก
วิธีการออกแบบในหัวข้อที่ 5.3 และจากผลการทดสอบนั้นจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม (Short-shunt
Self-Excited Induction Generator) ที่เหมาะสมสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. ได้
ในช่วงย่านที่กว้างขึ้น และมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่
ยอมรับได้ $\pm 6\%$ โดยสามารถแสดงเป็นตารางการเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีที่เครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว
ในการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ในกรณีความเร็ว
ต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า p.f. lagging ค่าต่างๆ ได้ดังตารางที่ 6.1 ถึง 6.3

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบของ Shunt SEIG กับ Short-shunt SEIG 0.75 kW
ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.97 p.f. lagging

$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ Without C_{se}								
Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
68.33	512.5	219.79	0.801	0.9703	48.04	1.37	219.79	-0.09
69.69	522.7	205.12	0.875	0.9713	47.82	1.34	205.12	-6.76
$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ $C_{se} = 70.0 \mu\text{F}$								
79.49	596.2	233.49	0.879	0.9678	47.85	1.55	227.4	6.13
83.11	623.3	229.63	0.930	0.9733	47.62	1.58	225.7	4.38
88.29	662.2	224.01	1.019	0.9670	47.37	1.63	219.3	1.82
91.61	687.1	225.30	1.045	0.9729	47.38	1.73	221.8	2.41
93.60	702.0	222.20	1.085	0.9704	47.27	1.74	218.1	1.00
96.08	720.6	219.12	1.134	0.9670	47.42	1.75	212.5	-0.40

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบของ Shunt SEIG กับ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.94 p.f. lagging

$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ Without C_{se}								
Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
60.747	455.6	199.35	0.808	0.9423	48.254	1.21	199.35	-9.39
$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ $C_{se} = 50.0 \mu\text{F}$								
84.36	632.7	229.98	0.975	0.9408	47.35	1.64	220.1	4.54
93.16	698.7	221.8	1.113	0.9435	46.88	1.75	212.5	0.82
95.51	716.3	224.85	1.126	0.9426	47.29	1.76	213.5	2.18

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบของ Shunt SEIG กับ Short-shunt SEIG 0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ที่ 0.91 p.f. lagging

$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ Without C_{se}								
Load (%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	PF_L	f (Hz)	I_1 (A)	V_t (V)	V_{reg} (%)
48.240	361.8	179.31	0.741	0.9082	48.027	1.79	1.1	-18.49
$C_{sh} = 23.7 \mu\text{F}$ $C_{se} = 42.3 \mu\text{F}$								
94.44	708.3	224.89	1.148	0.9147	46.85	1.73	208.6	2.22
97.13	728.5	228.20	1.165	0.9134	47.15	1.78	209.9	3.72

6.3 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

สำหรับประโยชน์ของการวิจัยเรื่องนี้คือ

1. ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ซึ่งได้แก่ รูปแบบของการต่อตัวเก็บประจุ ค่าตัวเก็บประจุ และประเภทของภาระทางไฟฟ้า

2. จัดสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่างๆ (แสดงผลการออกแบบ

ค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับ Short-shunt SEIG 2.2 และ 4.0 kW จ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และ กรณีความถี่คงที่ดังตารางที่ 6.4 ถึง 6.7) ทำให้ไม่ต้องใช้การเลือกค่าตัวเก็บประจุแบบทั่วไปซึ่งทำให้เสียเวลาและมีค่าใช้จ่ายสูง

ตารางที่ 6.4 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัดที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ				
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)
0.97	41.5	98.96	48.31	73.82
0.95	41.2	67.45	48.27	74.38
0.93	40.6	63.30	48.22	75.56
0.91	40.9	60.45	48.20	76.84
0.88	37.63	47.69	48.01	77.47
0.86	34.22	38.37	47.62	78.82

ตารางที่ 6.5 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz
จ่ายภาระทางไฟฟ้า 75 % พิกัดที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ				
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	n_r (rpm)	X_m (Ω)
0.97	36.9	89.86	1553.8	87.60
0.95	36.2	76.81	1552.7	87.10
0.93	35.4	67.22	1552.2	89.86
0.91	34.8	61.25	1555.0	91.69
0.88	33.3	64.49	1555.7	94.91
0.86	29.51	50.19	1556.8	96.20

ตารางที่ 6.6 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 4.0 kW
 ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm
 จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัดที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ				
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)
0.97	24.85	92.89	48.89	126.58
0.95	21.62	68.39	48.77	129.81
0.93	21.05	62.90	48.62	132.29
0.91	19.25	59.00	48.53	133.36
0.88	19.05	54.34	48.39	133.96
0.86	17.6	52.8	48.31	135.09

ตารางที่ 6.7 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 4.0 kW
 ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz
 จ่ายภาระทางไฟฟ้า 50 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ				
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	n_r (rpm)	X_m (Ω)
0.97	17.79	82.74	1531.9	134.12
0.95	17.95	68.01	1532.8	134.89
0.93	17.45	64.27	1533.4	135.19
0.91	17.6	58.3	1537.3	138.73
0.88	18.59	53.80	1534.1	138.38
0.86	19.0	52.0	1527.5	139.86

6.4 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

- ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมสำหรับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงย่านที่เหมาะสม โดยในการวิจัยต่อไปควรจะพิจารณาในเรื่องของประสิทธิภาพในขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าเพิ่มเติมเข้ามาด้วย

- ในส่วนของภาระทางไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเฉพาะภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบคงที่ (Static load) ซึ่งในการวิจัยต่อไปอาจจะพิจารณาในส่วนของภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบพลวัต (Dynamic load) และ ภาระทางไฟฟ้าที่มีความไม่สมดุล (Unbalance load)

- ทำการออกแบบระบบควบคุมและระบบขับเคลื่อน เพื่อให้สามารถใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น (สามารถควบคุมจุดทำงานได้ตามที่ต้องการ)

บรรณานุกรม

- [1] P. Singh, Sanjay K. Jain and J. Sharma, "Voltage Regulation Optimization of Compensated Self Excited Induction Generators with Dynamic Load," **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 19, no. 4, pp724-732., December 2004.
- [2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley and Jr. Stephen D. Umans, **Electric Machinery**. McGraw-Hill, 2003
- [3] IEEE STD 112-2004, **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**, November 4, 2004.
- [4] K. F. Man, K.S. Tang and S. Kwong, **Genetic Algorithms Concepts and Designs**. Great Britain: Spriger-Verlag Limited, 1999
- [5] John J. Grefenstette, **Genetic Algorithm for Machine Learning**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994
- [6] A. M. S. Zalzal and P.J. Fleming, **Genetic Algorithms in Engineering System**. London: Bookcraft, 1997
- [7] เชาวน์ ชมพูอินไหว, การศึกษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคอัลกอริทึม. วิทยานิพนธ์ฉบับปีการศึกษา 2544, บัณฑิตวิทยาลัย สจล.
- [8] พันรบ ชินบุตร, "เทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยการใช้ตัวเก็บประจุ", วิทยานิพนธ์ฉบับปีการศึกษา 2547.
- [9] ประสิทธิ์ภาพ ปัญญานันท์, "การศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตนเอง โดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมขนาน", วิทยานิพนธ์ฉบับปีการศึกษา 2548, บัณฑิตวิทยาลัย สจล.
- [10] วิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์, "การกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและผลกระทบจากการใช้งานที่มีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง", วิทยานิพนธ์ฉบับปีการศึกษา 2543, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] M.Godoy Simoes, Felix A.Farret, "**Renewable Energy System Design and Analysis with Induction Generators**", CRC Press LLC 2000 N.W. Corporate Blvd, 2004.
- [12] Ali M. Eltamaly. "New Formula to the Determine the Minimum Capacitances Required for Self-Excited Induction Generator" **IEEE Trans. Energy Conversion.**, 2002, pp. 106-110
- [13] T.F. Chan, "Capacitance Requirements of Self-Excited Induction Generator", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 8, No.2, June 1993 , pp.304-311.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
จinekอัถกอรืรืม (เนื้อหาเพิ่มเติม)

ก.1 ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันค่าความเหมาะสมของจีเนติกอัลกอริธึม

(Objective function & fitness function)

การหาคำตอบที่ดีที่สุดของจีเนติก อัลกอริธึมนั้นมีพื้นฐานอยู่บนผลลัพธ์จากการหาคำตอบที่ผ่านมา วิธีการของจีเนติก อัลกอริธึมจะไม่พิจารณาจากขั้นตอนของการแก้สมการ แต่จะพิจารณาโดยตัดสินว่าคำตอบที่ได้รับนั้นดีพอหรือไม่ ดีขึ้นหรือแย่ลง หรือเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function : F) เนื่องจากแต่ละปัญหาสามารถกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว เงื่อนไข หรือข้อกำหนดต่างๆของปัญหานั้นๆได้ โดยสมการที่มีเงื่อนไขของตัวแปรหรือข้อกำหนดที่กล่าวมานั้นเรียกว่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function : f) ซึ่งค่าความเหมาะสมนี้เปรียบเสมือนค่าความสามารถในการอยู่รอดของแต่ละโครโมโซม กล่าวอีกนัยหนึ่ง ฟังก์ชันความเหมาะสมคือฟังก์ชันที่แสดงถึงความใกล้เคียงของผลลัพธ์ที่ต้องการของแต่ละโครโมโซม เป็นตัวบ่งบอกว่าค่าชุดตัวแปรที่อยู่ในโครโมโซมนั้นๆส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการได้ขนาดไหน โดยทั่วไปแล้วเรามักใช้ฟังก์ชันเป้าหมายที่ถูกปรับให้เหมาะสมกับการหาคำตอบของจีเนติกอัลกอริธึม เป็นฟังก์ชันความเหมาะสม

ในปัญหาต่างๆทั่วไป ฟังก์ชันเป้าหมายอาจเป็นการหาค่าสูงสุด-ต่ำสุดหรือไม่ก็ได้ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมายนี้อาจมีค่าเป็นลบได้ในบางกรณี แต่ในแนวคิดของจีเนติก อัลกอริธึม ฟังก์ชันความเหมาะสมซึ่งเป็นตัววัดสถานะของโครโมโซม จะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงฟังก์ชันเป้าหมายให้เป็นฟังก์ชันความเหมาะสม

ก.2 ตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริธึม (Operator of genetic algorithms)

แบบจำลองทางพันธุกรรมที่นำมาใช้ในจีเนติกอัลกอริธึมถูกเรียกว่าโครโมโซม (Chromosome) ในโครโมโซมประกอบด้วยบิตจำนวน n บิต ค่าของบิตในของแต่ละโครโมโซมที่นิยมใช้มี 3 แบบคือ

1. บิต 0 หรือบิต 1 (Binary coding)
2. บิตจำนวนเต็ม (Integer coding)
3. บิตจำนวนจริง (Real number coding)

ค่าบิตในแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานค่าบิต 0 หรือบิต 1 เป็นทฤษฎีที่ยอมรับและถูกออกแบบมานานแล้ว ข้อดีของแบบบิต 0 หรือ บิต 1 คือลดขนาดช่วงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization space) ลงแต่การใช้งานในบางอย่างทำให้เกิดการสูญเสียค่าความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งถ้าค่าบิตเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ขนาดช่วง

การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization space) จะมีขนาดใหญ่กว่าและมีความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้มากกว่า

บิตในโครโมโซมของจีเนติกอัลกอริธึมนั้นคือค่าของชุดตัวแปรที่จะนำไปทดลองแทนในสมการเพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้ โดยนิยามว่าถูกเรียงกันอยู่ในแนวนอน

ความมีประสิทธิภาพของจีเนติกอัลกอริธึมขึ้นอยู่กับตัวดำเนินการทางจีเนติกอัลกอริธึมซึ่งตัวดำเนินการจีเนติกอัลกอริธึมประกอบด้วย

1. การคัดเลือก
2. การสร้างโครโมโซมลูก
3. การกลายพันธุ์
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

ก.2.1 การคัดเลือก (Reproduction or selection)

การคัดเลือกเป็นกระบวนการที่จะตัดสินว่าโครโมโซมใดจะคงอยู่ในรุ่น (Generation) เพื่อนำไปคัดเลือกต่อไป โดยจะตัดสินจากค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมโดยค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมนั้นหาได้จากการฟังก์ชันความเหมาะสม โดยโครโมโซมที่มีค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับฟังก์ชันความเหมาะสมมาก ก็จะมีค่าความเหมาะสมสูงและมีโอกาสที่จะถูกคัดเลือกสูง ในบางกรณีฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันความเหมาะสมอาจเป็นฟังก์ชันเดียวกัน โดยโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกนั้นแทนด้วย $P_{select(i)}$ หาได้จากสมการที่ (ก.1)

$$P_{select(i)} = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^k f_i} \quad (ก.1)$$

โดยที่ f_i คือค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

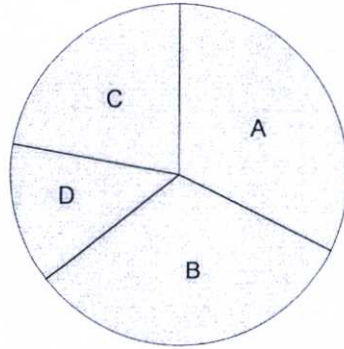
ส่วนจำนวนโครโมโซมที่ถูกคัดเลือก (num_i) เพื่อนำไปจับคู่และสร้างโครโมโซมลูกสามารถหาได้จากสมการที่ (ก.2)

$$num_i = N * P_{select(i)} \quad (ก.2)$$

โดยที่ N คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด (Population size)

กระบวนการที่ตัดสินว่าโครโมโซมใดจะยังอยู่เพื่อนำไปคัดเลือกในรุ่นต่อไปโดยตัดสินจากความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม ถ้าเป็นบิตแบบไบนารีจะใช้เทคนิควงล้อรูเล็ตต์และบิต

เป็นจำนวนจริงหรือจำนวนเต็มจะใช้ Normalized geometric การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็ตแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การคัดเลือกโครโมโซมโดยเทคนิควงล้อรูเล็ต

เทคนิคของวงล้อรูเล็ตนี้เป็นวิธีการคัดเลือกตามอัตราส่วน โดยพิจารณาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว โดยจะทำการแบ่งพื้นที่วงล้อตามสัดส่วนของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว โดยให้ผลรวมของวงล้อรูเล็ตคือผลรวมของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมทั้งหมด จากนั้นจะทำการสุ่มค่าตั้งแต่ 0 ถึง ค่าผลรวมความเหมาะสม ถ้าตัวเลขที่สุ่มไปหยุดบนพื้นที่ของโครโมโซมใด โครโมโซมตัวนั้นจะถูกเลือก ดังนั้น โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูง ย่อมมีโอกาสถูกเลือกมากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำ

ตัวอย่างการทำงานของวงล้อรูเล็ต สมมติให้โครโมโซมที่เข้าสู่กระบวนการคัดเลือกมี 4 โครโมโซม อันได้แก่ A, B, C และ D ดังรูปที่ 2.15 โดยโครโมโซมแต่ละโครโมโซมมีค่าความเหมาะสมดังนี้

$$A = 0.9926, \quad B = 0.9214, \quad C = 0.7352 \text{ และ } D = 0.3463$$

ผลรวมของค่าความเหมาะสมทั้งหมด (Sum of Fitness) = 2.9955 เมื่อนำมาจัดอัตราส่วนแล้ว ค่า A จะมีพื้นที่ในวงกลม 33% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 0 ถึง 0.9926, ค่า B จะมีพื้นที่ในวงกลม 30.75% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 0.9927 ถึง 1.914, ค่า D จะมีพื้นที่ในวงกลม 11.56% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 1.915 ถึง 2.2603 และ ค่า D จะมีพื้นที่ในวงกลม 24.54% ค่าภายในพื้นที่ตั้งแต่ 2.2603 ถึง 2.9955 จากนั้น จะทำการสุ่มค่าคงที่ขึ้นมา 1 ค่า โดยค่าคงที่นั้นมีค่าอยู่ระหว่างอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2.9955 ถ้าค่าคงที่ที่สุ่มขึ้นมามีค่าเท่ากับค่าภายในพื้นที่ของโครโมโซมใด โครโมโซมนั้นจะถูกเลือก

ในกระบวนการของการคัดเลือกนี้บางครั้งอาจมีวิธีการบางส่วนที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนโครโมโซมที่ถูกการคัดเลือก (num_i) ซึ่งในงานวิจัยของเรนดี้ (Randy L.Haupt) ได้ใช้วิธีการคัดเอา 50% ของจำนวนโครโมโซมจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมที่ดีที่สุดของทั้งหมดมาเป็นโครโมโซมพ่อแม่ ส่วนงานวิจัยของ โคจิ, ยาซุชิซะและ โทชิโอะ (Koji

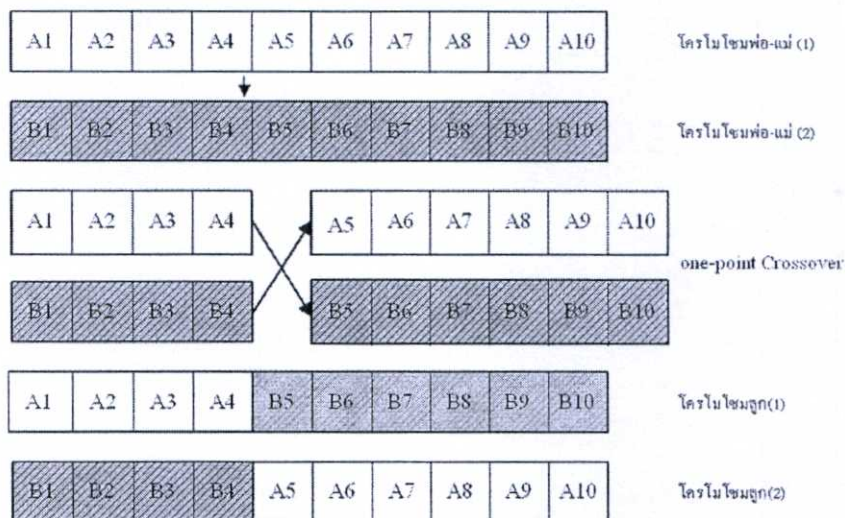
Shimojima , Yasuhisa Hasegawa & Toshio Fukuda) โดยใช้วิธีการคัดเอาโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันสูงกว่าค่าฟังก์ชันที่กำหนดไว้เท่านั้น แล้วจึงทำการสุ่มคัดเอาเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อแม่เป็นต้น

ก.2.2 การสร้างโครโมโซมลูก (Crossover)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการพื้นฐานขั้นต่อมาของจีเนติกอัลกอริทึม หลังจากกระบวนการคัดเลือกได้โครโมโซม พ่อ-แม่แล้วขั้นตอนต่อมาคือการสร้างโครโมโซมลูก หรือการ (Crossover) โดยโครโมโซมลูกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะของโครโมโซมพ่อและแม่ปะปนกันอยู่ กระบวนการขั้นต่อไปซึ่งโดยทั่วไปมี 3 วิธี อันได้แก่ one-point crossover, two-point crossover และ uniform crossover

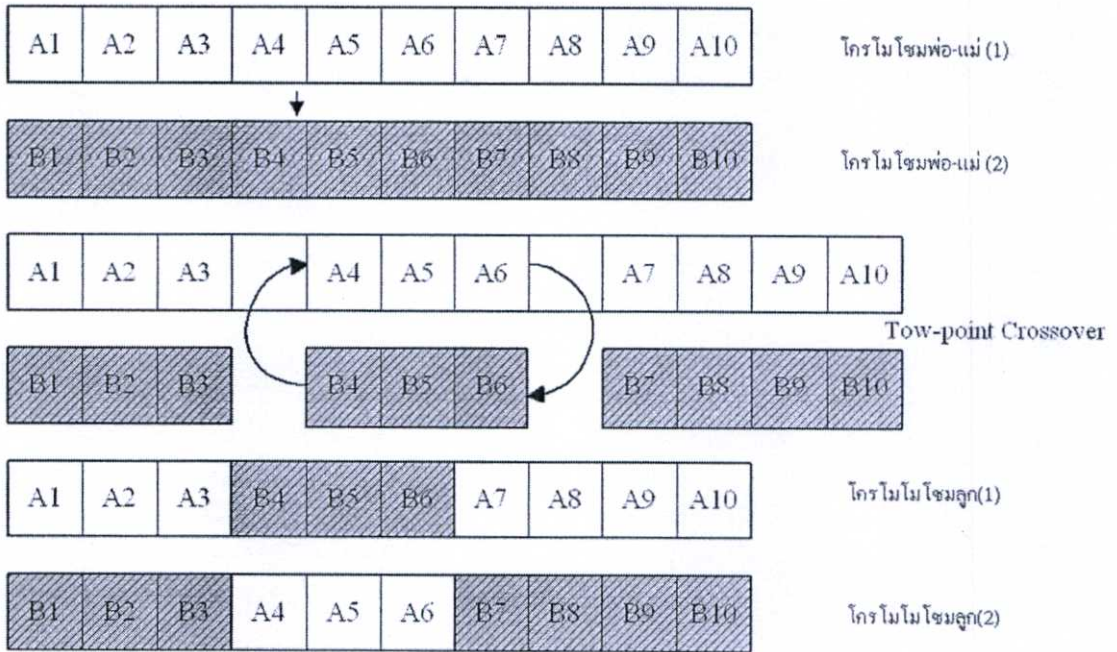
วิธีของ One-point crossover คือการสุ่มค่าตั้งแต่ 1 ถึง $n-1$ เพื่อหาตำแหน่งในการ Crossover โดยที่ n คือค่าจำนวนบิตทั้งหมดในโครโมโซมดังตัวอย่างรูปที่ 2.18

จากรูปที่ ก.2 โครโมโซม พ่อ-แม่ (1) และ โครโมโซม พ่อ-แม่ (2) นำมาสร้างโครโมโซมลูกแบบ One-point crossover โดยมีตำแหน่งสำหรับการครอสโอเวอร์ที่สุ่มได้คือ 4 ทำให้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซมที่มีการสลับกันของโครโมโซม พ่อ-แม่ ณ ตำแหน่งบิตที่ 4



รูปที่ ก.2 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ one-point crossover

วิธี Two-point crossover คือการสุ่มค่า 2 ค่า ตั้งแต่ 1 ถึง $n-1$ เพื่อตำแหน่ง 2 ตำแหน่งในการครอสโอเวอร์แล้วทำการสลับบิต โดยการเอาบิตที่อยู่ระหว่างค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้ 2 ตำแหน่งมาสลับกันระหว่างโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) เพื่อให้ได้โครโมโซมลูก 2 ดังรูปที่ ก.3

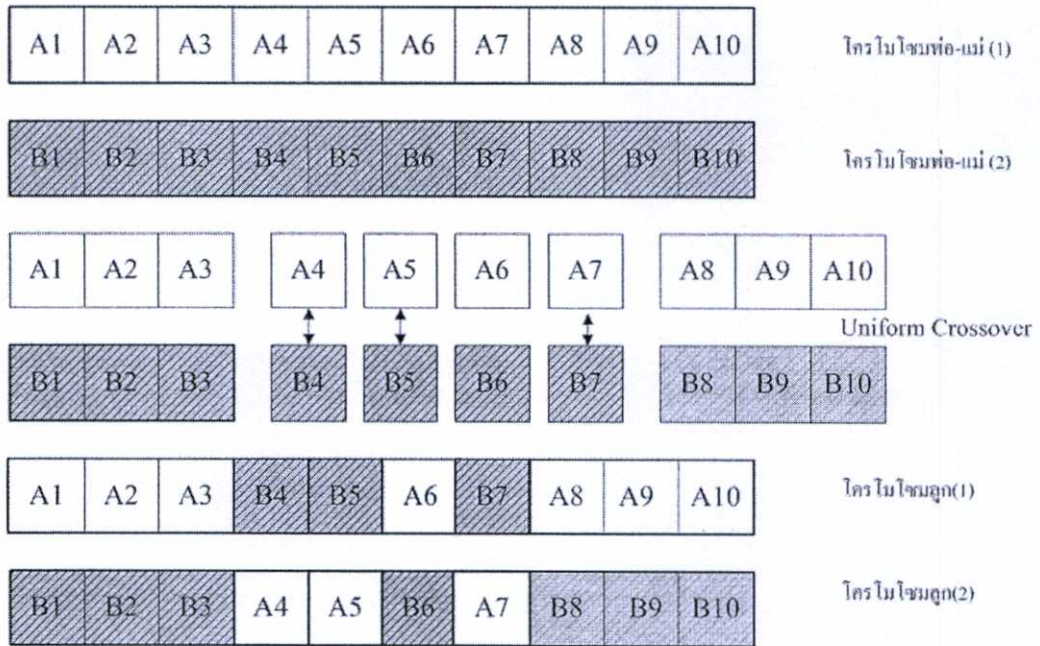


รูปที่ ก.3 การสร้าง โครโมโซมลูกแบบ Two-point crossover

จากตัวอย่างรูปที่ ก.3 เป็นการสร้างโครโมโซมลูกแบบ Two-point crossover ค่าตำแหน่งบิตที่สุ่มได้คือ 3 และ 6 โดยการสลับค่าบิตที่อยู่ระหว่าง 3 กับ 6 ของโครโมโซม พ่อ-แม่ ทั้ง 2 โครโมโซมจะได้โครโมโซมลูก 2 โครโมโซม

วิธี Uniform crossover คือกำหนดจำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนกันระหว่างโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2) แล้วสุ่มจำนวนบิตที่ได้โดยทั่วไปจำนวนบิตที่แลกเปลี่ยนกันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0% ถึง 5 % ดังตัวอย่างรูปที่ ก.4

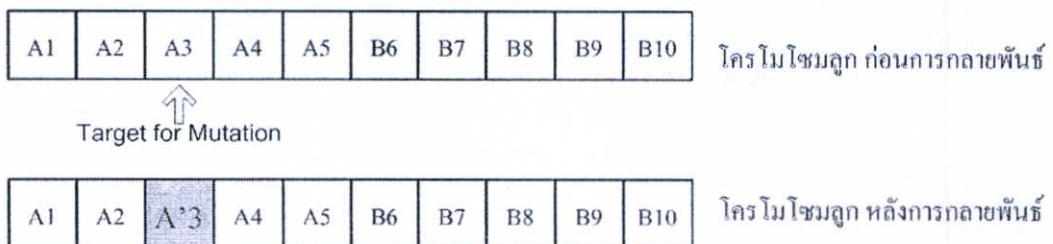
จากรูปที่ ก.4 กำหนดให้จำนวนบิตที่ต้องการแลกเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ 30% ดังนั้น 30% ของจำนวนบิตทั้งหมดคือ 10 บิต มีค่าเท่ากับ 3 บิต แล้วสุ่มตำแหน่งบิตที่ 3 ตำแหน่งโดยมีค่าที่สุ่มได้คือ 4, 5, 7 ดังนั้น โครโมโซมลูกที่ได้จะมีการแลกเปลี่ยนบิตกันระหว่างบิตที่ 4, 5, 7 ของโครโมโซม พ่อ-แม่ (1) กับโครโมโซม พ่อ-แม่ (2)



รูปที่ ก.4 การสร้างโครโมโซมลูกแบบ Uniform crossover

ก.2.3 การกลายพันธุ์ (Mutation)

ในธรรมชาติ กระบวนการกลายพันธุ์นั้นเกิดจากการที่สาร 4 สารที่ประกอบตัวขึ้นเป็น DNA นั้น เกิดการแทนที่กันผิดตำแหน่ง ทำให้เกิดโครงสร้างทางพันธุกรรมแบบใหม่ขึ้นมา ซึ่งสายพันธุ์ใหม่ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะดีขึ้นหรือแย่ลงก็ได้ และในจีเนติกอัลกอริทึม จะกำหนดค่าให้มีกระบวนการกลายพันธุ์ขึ้นมา เพื่อเพิ่มความหลากหลายของโครโมโซม แต่จะกำหนดอัตราของการกลายพันธุ์ไว้ค่า โดยวิธีก็คือ ทำการสุ่มโครโมโซมลูกแล้วสุ่มตำแหน่งบิตในโครโมโซมนั้นเพื่อเปลี่ยนค่าของบิตในโครโมโซมดังกล่าวเนื่องจากโครโมโซมลูกที่ได้จากการครอสโอเวอร์ของโครโมโซม พ่อ-แม่นั้น มีส่วนประกอบของพันธุกรรมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การกลายพันธุ์จึงสามารถป้องกันข้อบกพร่องดังกล่าวได้ วิธีการกลายพันธุ์ของโครโมโซมลูกแสดงตัวอย่างดังรูป ก.5



รูปที่ ก.5 การกลายพันธุ์ (Mutation)

จากรูปที่ ก.5 ตำแหน่งที่ถูกสุ่มให้มีการกลายพันธุ์คือตำแหน่งที่ 3 โดยมีค่าบิตเปลี่ยนจาก A3 เป็น A'3 โดยที่ค่าของบิตโครโมโซมที่ใช้เป็นแบบบิต 0 หรือ 1 ค่าของ B'3 เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 หรือ 0 เป็น 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ A3 แต่สำหรับค่าบิตที่เป็นแบบจำนวนเต็มหรือจำนวนจริง ค่าของ A'3 จะเป็นค่าที่เกิดจากการสุ่มค่าจำนวนเต็มสำหรับโครโมโซมที่มีค่าบิตเป็นจำนวนเต็ม และจำนวนจริงสำหรับโครโมโซมที่มีค่าบิตเป็นจำนวนจริง

ก.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึม

ในการใช้จีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งประกอบด้วยตัวดำเนินการต่างๆตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ตัวดำเนินการที่ถือว่าเป็นตัวดำเนินการหลักของจีเนติกอัลกอริธึมได้แก่ตัวดำเนินการ คrossover และ ตัวดำเนินการกลายพันธุ์ เนื่องจากการ crossover เป็นการสร้างโครโมโซมชิ้นใหม่ โดยจากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกแล้วส่วนการกลายพันธุ์เป็นการเพิ่มโอกาสในเปลี่ยนค่าของบิต ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดผลการทำงานของจีเนติกอัลกอริธึมได้แก่จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (Population size, $Popsiz$), ความน่าจะเป็นจากการสร้างโครโมโซมลูก (Crossover rate or crossover probability, P_c) และ ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation rate or mutation probability, P_m)

ก.2.4.1 จำนวนโครโมโซมทั้งหมด (Population size)

จำนวนโครโมโซมหรือ $Popsiz$ คือค่าจำนวนโครโมโซมทั้งหมดที่กำหนดขึ้นในกระบวนการของจีเนติกอัลกอริธึมยังมีค่า $Popsiz$ มากจะทำให้มีตัวเลือกมากขึ้นด้วยแต่ทั้งนี้การกำหนดค่า $Popsiz$ ขึ้นอยู่กับค่าที่กำหนดผู้ใช้เองหรือความซับซ้อนของงานที่จะนำมาค้นหาคำตอบ (Optimization)

ก.2.4.2 ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูก (Crossover probability)

ค่าความน่าจะเป็นของการสร้างโครโมโซมลูกหรือค่า P_c คือค่าความน่าจะเป็นที่จะทำให้เกิดการ crossover ของโครโมโซม พ่อ-แม่ โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_c มีค่าอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 0.95 ได้มีการเสนอแนะการหาจำนวนโครโมโซมที่จะถูก crossover ไว้ดังสมการที่ (ก.3)

$$N_x = P_c * Popsiz \quad (ก.3)$$

โดยที่ N_x คือจำนวนโครโมโซมที่จะถูก crossover
 $Popsiz$ คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด

หรืออีกวิธีหนึ่งของการคัดเลือกโครโมโซมที่ใช้ค่า P_c เป็นแนวทางโดยในแต่ละโครโมโซมจะสุ่มค่า r โดยที่ r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่า $r < P_c$ โครโมโซมนั้นจะถูกครอสโอเวอร์แล้วทำการจับคู่โครโมโซมแบบสุ่มเพื่อทำการครอสโอเวอร์

ก.2.4.3 ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation probability)

ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์หรือค่า P_m เป็นปัจจัยอีกค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ซึ่งทุกบิตในโครโมโซมจะถูกมีโอกาสในการกลายพันธุ์โดยทั่วไปจะกำหนดให้ P_m มีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.01 และค่า P_m มักจะกำหนดให้มีค่าน้อยๆเพื่อให้โครโมโซมที่ดีมีโอกาสถูกทำลายน้อยลง Dejong ได้เสนอแนะว่าค่า P_m ควรมีค่าแปรผกผันกับ $Popsiz$ e และ Hessner และ Manner ได้เสนอแนวทางการหาค่า P_m โดยประมาณดังสมการที่ (ก.4) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกค่า P_m

$$P_m = \frac{1}{Popsiz \times \sqrt{m}} \quad (ก.4)$$

โดยที่ m คือจำนวนบิตใน 1 โครโมโซม

นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในจำนวนบิตที่จะถูกกลายพันธุ์ดังสมการที่ (ก.5)

$$N_m = P_m \times m \times Popsiz \quad (ก.5)$$

โดยที่ N_m คือจำนวนบิตทั้งหมดที่ถูกกลายพันธุ์ m คือจำนวนบิตใน 1 โครโมโซม

เมื่อได้ค่า P_m แล้วในแต่ละโครโมโซมจะถูกสุ่มค่า r โดยที่ r มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยมีเงื่อนไขว่าถ้า $r < P_m$ โครโมโซมนั้นจะถูกเลือกให้มีบิตที่ถูกกลายพันธุ์

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์เป็นตัวดำเนินการหลักของจีเนติกอัลกอริธึมการ ครอสโอเวอร์ จึงถือเป็นกระบวนการหลักที่ทำให้จีเนติกอัลกอริธึมเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ดังนั้น ค่า P_c จึงมักถูกกำหนดให้มีค่าสูงแต่วิธีการครอสโอเวอร์ จะนำเอาโครโมโซมพ่อ-แม่ ที่อยู่ติดกันมาครอสโอเวอร์กัน หรือจะกระทำโดยการสุ่มเอาโครโมโซมพ่อ-แม่มาครอสโอเวอร์ กันก็ได้และเช่นเดียวกันกับการกลายพันธุ์ ผู้ใช้อาจสุ่มเอาโครโมโซมลูกขึ้นมาเพื่อทำการกลายพันธุ์ หรือสุ่มจากค่า r ของแต่ละโครโมโซมเพื่อเปรียบเทียบกับค่า P_m ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดผู้ใช้เอง L.Haupt ได้เสนอแนะการใช้จีเนติก

อัลกอริทึมเพื่อให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบ (Algorithms convergence) อย่างได้ผลมากขึ้น โดยได้มีข้อเสนอแนะดังนี้คือ

1. เพิ่มจำนวนการกลายพันธุ์
2. เพิ่มจำนวนโครโมโซม (Popsizе)
3. เพิ่มเต็มเงื่อนไขหรือบังคับ (Constrains) ของปัญหาที่ต้องวิเคราะห์

จากข้อเสนอแนะดังกล่าวอาจช่วยให้สามารถหาคำตอบได้ดีขึ้นหรือรวดเร็ว แต่ Randy L. Haupt ได้กล่าวถึงปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการลู่เข้าสู่คำตอบ Convergence เช่นจำนวนบิตโครโมโซม ถ้ายังจำนวนบิตมากค่าความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) ของคำตอบจะมีค่ามากกว่าการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) จะมีตัวเลือกเพื่อให้ใกล้คำตอบมากขึ้นแต่จะทำให้แต่ถ้าเกิดการลู่เข้าสู่คำตอบ Convergence จะช้า และต้องใช้หน่วยความจำในการทำงานของจินตริกอัลกอริทึมดังกล่าวมาก

ก.2.5 การทำงานของจินตริกอัลกอริทึม

ขั้นตอนการทำงานของจินตริกอัลกอริทึมมีดังนี้คือ

- 1.การสร้างจำนวนโครโมโซมและจำนวนบิต (Initialization)
- 2.การหาค่าฟังก์ชัน (Cost function)
- 3.การคัดเลือก (Reproduction or selection)
- 4.การสร้างโครโมโซมลูก (Crossover)
- 5.การกลายพันธุ์ (Mutation)

การทำงานของจินตริกอัลกอริทึมพันธุ์เริ่มต้นจากโครโมโซมจำนวน k โครโมโซมซึ่งในแต่ละโครโมโซมประกอบด้วยจำนวน n บิต โครโมโซมดังกล่าวเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังสมการที่ (ก.6)

$$\text{โครโมโซม } (k) = \{ \text{บิต1, บิต2, ..., บิต } n \} \quad (\text{ก.6})$$

โดยที่ค่า k มีค่าตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนโครโมโซมที่ต้องการ

คำนวณหาค่าของแต่ละฟังก์ชันของแต่ละโครโมโซม ซึ่งค่าฟังก์ชันที่ได้แต่ละโครโมโซมจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าของบิตในแต่ละโครโมโซมมีค่าแบบสุ่ม (Randomly) จากนั้นทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อเรียงลำดับโครโมโซมใหม่โดยการคัดเลือกโครโมโซมจะคัดเลือกค่าฟังก์ชันแต่ละโครโมโซม โดยเรียงลำดับจากโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุดไปยังค่าน้อยที่สุด แล้วทำการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุด n รุ่น (Generation) นั้นซึ่งเรียกโครโมโซมเหล่านี้ว่าโครโมโซมพ่อ-แม่ (Parent) จากโครโมโซมพ่อ-แม่ที่ได้สามารถสร้างโครโมโซมลูก (Offspring) ได้โดยการ Crosser การสร้างโครโมโซมลูกกระทำด้วยวิธีใดก็ได้

ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ หลังจากได้โครโมโซมลูกแล้ว ทำการกลายพันธุ์ หรือ Mutation กับโครโมโซมลูกดังกล่าวแล้วหาฟังก์ชันใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด ไปยังค่าที่การน้อยสุด ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ,3 , 4 และ 5 จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ

ภาคผนวก ข.

**ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
0.75 kW ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ค่าต่าง ๆ**

ตารางที่ ข.1 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 0.75 kW
 ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ $v = 1.02$ หรือ 1530 rpm
 จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ				
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)
0.99	22.59	105.97	48.59	191.23
0.98	22.40	76.10	48.52	193.29
0.97	22.71	62.98	48.53	195.83
0.96	22.08	55.23	48.51	198.56
0.95	22.58	50.28	48.40	200.06
0.94	22.67	46.54	48.42	202.81
0.93	22.83	43.77	48.32	204.32
0.92	22.30	41.58	48.27	206.24
0.91	22.67	39.80	48.23	208.18
0.90	22.11	38.26	48.21	210.50

ตารางที่ ข.2 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 0.75 kW

ในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ $v = 1.03$ หรือ 1545 rpm

จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ				
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)
0.99	22.04	104.01	49.04	193.93
0.98	22.14	74.57	49.01	196.36
0.97	22.13	61.67	48.97	199.02
0.96	22.09	54.19	48.96	201.23
0.95	22.16	49.26	48.90	203.01
0.94	21.99	45.57	48.89	205.38
0.93	22.03	42.91	48.81	206.98
0.92	22.15	40.71	48.79	209.08
0.91	22.19	38.89	48.78	211.33
0.90	22.01	37.48	48.74	213.01

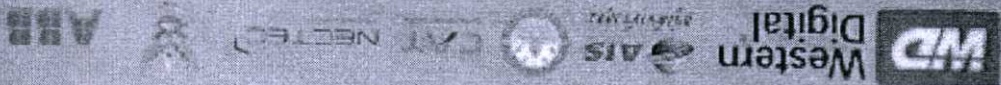
ตารางที่ ข.3 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของ Short-shunt SEIG 0.75 kW
 ในกรณีความเร็วต้นกำลังที่ $v = 1.04$ หรือ 1560 rpm
 จ่ายภาระทางไฟฟ้า 85 % พิกัด ที่ p.f. lagging ค่าต่าง ๆ

ค่าที่ได้จากการออกแบบ				
PF_L	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)
0.99	21.17	101.89	49.55	197.02
0.98	21.29	73.14	49.49	199.10
0.97	21.33	60.38	49.54	202.13
0.96	21.21	53.21	49.43	203.61
0.95	21.07	48.26	49.40	205.81
0.94	21.24	44.74	49.35	207.68
0.93	21.14	41.90	49.38	210.27
0.92	21.60	39.94	49.26	211.37
0.91	21.08	38.17	49.25	213.40
0.90	21.11	36.85	49.16	214.73

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

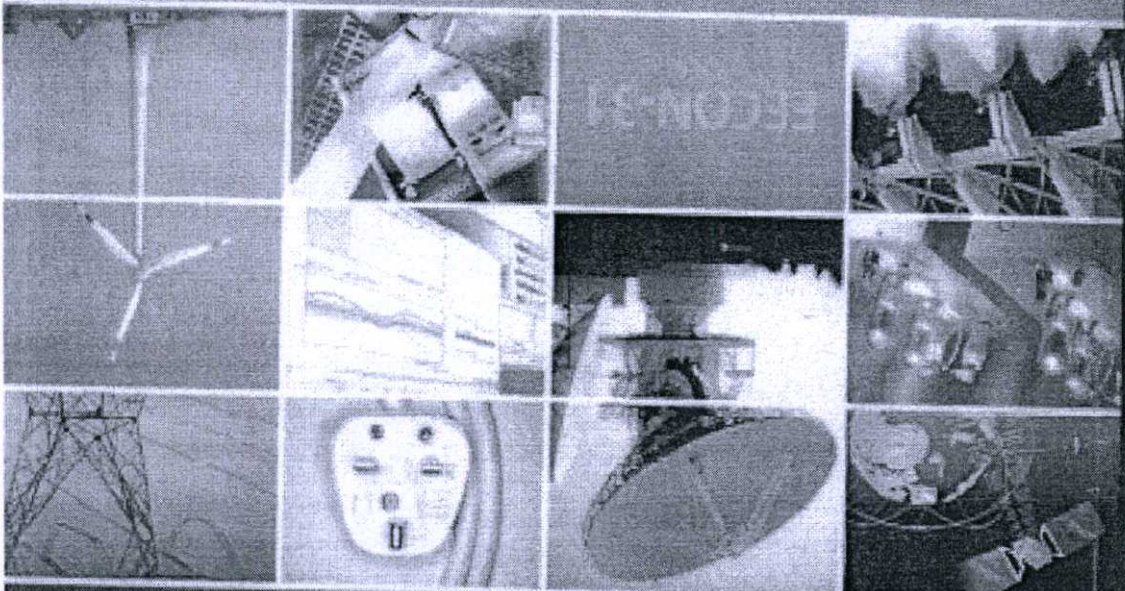
1. วุฒิชัย รอดพุ่ม, ปุณยภัทร ภูมิภาค และ ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย “ค่าตัวเก็บประจุแบบขดเชยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 31 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, หน้าที่. 343-346, จังหวัดนครนายก, ประเทศไทย, 29-31 ตุลาคม 2551



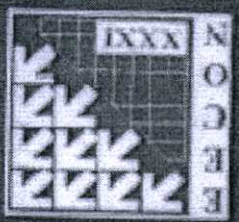
29 - 31 มีนาคม 2551

ในระหว่างงานจะมีอาหารว่างและเครื่องดื่ม

- Volume 1 • วิทยานิพนธ์ (PM)
 • วิทยานิพนธ์ (PE)
 • วิทยานิพนธ์ (CP)



การประชุมวิชาการ
 31 วิทยานิพนธ์ 31
 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)



สารบัญ

PW-82	<p>สมการตัวประกอบแก้ไขความชื้น เมื่อความชื้นสัมบูรณ์ (h0) ต่างจากค่าความชื้นสัมบูรณ์ในมาตรฐาน IEC 60052:2002 ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชั่วคราวที่ค่า h/s สูงกว่า 13 g/m³</p> <p>สุรศักดิ์ ผลธุสะ สุกกิตต์ ไซติโก</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี</p>	331
PW-83	<p>การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ของแบบต่างๆ ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว</p> <p>อภิชาติ วงษ์สมบัติ สุกกิตต์ ไซติโก บุญเหนือ พึ่งศิริ</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี</p>	335
PW-84	<p>การแก้ปัญหาขัดข้องของระบบส่งไฟฟ้ากำลังที่เกิดจากปัญหาสายส่งรับกำลังเกินโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนกำลังการผลิตร่วมกับการตัดโหลด</p> <p>กันตภณ ชัมพานนท์ กุลยศ อุดมวงศ์เสรี</p> <p>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย</p>	339
PW-85	<p>ค่าตัวเก็บประจุพิเศษที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง</p> <p>วุฒิชัย รอดพุ่ม¹ ปุณยภัทร ภูมิภาค¹ ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย¹</p> <p>¹สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</p> <p>¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร</p>	343
PW-86	<p>การตรวจสอบการลัดวงจรภายในขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเดินเครื่องโดยวิธีการวัดฟลักซ์แม่เหล็ก</p> <p>ชวนนท์ ไสสน้อย สมพร สิริสำราญนุกูล</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ</p>	347
PW-87	<p>Loss Assessment in a Medium-Voltage Distribution System</p> <p>Raksanai Nidhiritdhikrai, Kulyos Audomvongseree Bundhit Eua-arporn</p> <p>Chulalongkorn University</p>	351
PW-88	<p>ดัชนีเสถียรภาพแรงดัน PQ (PQVSI) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดัน</p> <p>พรเทพ เทียบรัตน์ วัชรินทร์ ชยก่อง กุลยศ อุดมวงศ์เสรี</p> <p>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย</p>	355
PW-89	<p>A Program for Estimating Lightning Outage Rates of Overhead Transmission Lines</p> <p>Somvang Tiphavongxay Channarong Banmongkol</p> <p>Chulalongkorn University</p>	359

ค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

Optimal Capacitances Compensation for Self-Excited Induction Generator

วุฒิชัย รอดพุ่ม¹ ปุณยภัทร ภูมิภาค² และ ชัยวุฒิ ด้ตรอุทัย¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.จลจลกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: gifi.wuthichai@yahoo.com

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 E-mail: kethanaphiwat@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองเมื่อจ่ายภาระที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ซึ่งมีเงื่อนไขคือต้องมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยเริ่มต้นจากการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อนำมาประมวลผลหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานและอนุกรมที่เหมาะสมโดยใช้พื้นฐานของวงจรสมมูลร่วมกับวิธีจินตคณิตออลกอริทึม บทความนี้ได้ทำการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่ 4 และ 2.2 กิโลวัตต์ โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบ พบว่าสามารถทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกินกว่าที่กำหนด ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้วิธีการเลือกค่าตัวเก็บประจุแบบลองผิดลองถูก

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง, ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม, จินตคณิตออลกอริทึม

Abstract

This paper proposes the design of optimal capacitances compensation for self-excited induction generators (SEIG) under lagging power factor load conditions having voltage regulation less than 0.1 per unit. The parameters of induction generator are determined in order to evaluate the optimal shunt and series capacitances based on the equivalent circuit using the genetic algorithms. In this paper, two three phase SEIG rated 4 and 2.2 kW using the designed capacitors are tested. The results show that the desired voltage regulation under various lagging power factor load conditions can be obtained. This proposed method can be applied to the design of capacitances compensation for SEIG without the trial and error capacitors selection.

Keywords: self-excited induction generator, optimal capacitances, genetic algorithms

1. บทนำ

จากการประสบปัญหาขาดแคลนและราคาที่สูงขึ้นอย่างมากของพลังงานประเภท น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ทำให้ในปัจจุบันนี้ได้มีการหันมาให้ความสนใจกับแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable) กันมากขึ้น ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ เป็นต้น ในปัจจุบันนี้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปริมาณมากซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นพลังงานที่ได้มาจากการเปลี่ยนรูปพลังงานปฐมภูมิ ดังนั้นในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหาข้างต้นได้ และพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนรูปจากพลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำสามารถนำไปใช้กับระบบที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid connection) หรือใช้ในระบบแยกโดดเดี่ยว (Stand alone) ได้ ทำให้สามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ทุรกันดารที่ระบบไฟฟ้าเข้าไม่ถึงได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบแยกโดดเดี่ยวในลักษณะการทำงานแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง (Self-Excited Induction Generator) หรือเรียกสั้นๆว่า SEIG นั้น จำเป็นจะต้องมีการต่อตัวเก็บประจุที่เหมาะสมแบบขนานเข้าที่ขั้วลวดทางด้านสเตเตอร์ของตัว SEIG ทั้งนี้เพื่อชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ให้กับ SEIG ทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริง (Real power) ได้ อย่างไรก็ตามจะพบว่าเมื่อทำการจ่ายภาระไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือภาระไฟฟ้าแบบต่าง ๆ จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulation) ที่มีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจากการที่ SEIG ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่เหมาะสมเพื่อชดเชยในส่วนของกระแสรีแอกแตนซ์แม่เหล็กและในส่วนของภาระไฟฟ้า

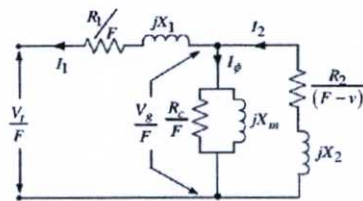
จากบทความที่ได้นำเสนอไปแล้ว [1] ได้กล่าวถึงกรหา ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับ SEIG ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเป็นแบบขนานเพียงอย่างเดียวซึ่งมีปัญหาก็คือสามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้เพียงจุดเดียวคือที่ที่โหลดเท่านั้น ซึ่งในการนำไปใช้งานจริง SEIG จะยังสามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ค่าอื่น ๆ ได้ และจำเป็นต้องมีค่า

แรงดันไฟฟ้าขั้วเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 0.1 เปรอ์ยูนิต ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุชดเชยทั้งแบบขนานและอนุกรมที่เหมาะสมสำหรับ SEIG ในการจ่ายภาวะไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ

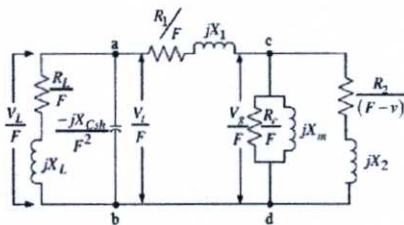
2. วงจรสมมูลของ SEIG

วงจรสมมูลสำหรับใช้วิเคราะห์ SEIG [2] แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยที่ v คือค่าความเร็วต้นกำลัง (n_r) เปรอ์ยูนิต (p.u.) และ F คือค่าความถี่ (f) เปรอ์ยูนิต (p.u.) ซึ่งค่า F นี้จะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูล รูปที่ 2 แสดงวงจรสมมูลของ SEIG ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (C_{sh}) ในการพิจารณาหาค่า C_{sh} ที่เหมาะสมนั้นได้มีการนำเสนอแล้ว [1] โดยใช้หลักการของ Loop admittances ร่วมกับวิธีจินตคณิตกอริธึม (Genetic Algorithms) [3] ซึ่งมีสมการเป้าหมายดังนี้

$$F_{objective} = \frac{1}{2} |Y_{Csh} + Y_L + Y_{ad}|^2 \tag{1}$$



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของ SEIG ต่อเฟส



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของ SEIG ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

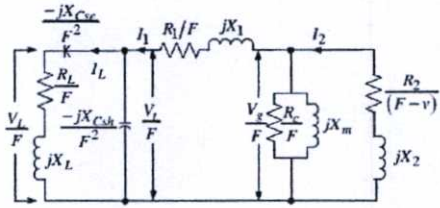
เนื่องจาก SEIG ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเป็นแบบขนานนั้นมีปัญหาดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไขโดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพิ่มเข้าไป โดยเรียกว่าตัวเก็บประจุชดเชยแบบอนุกรม (C_{se}) [4]

3. การออกแบบค่าตัวเก็บประจุชดเชยแบบขนานและอนุกรม

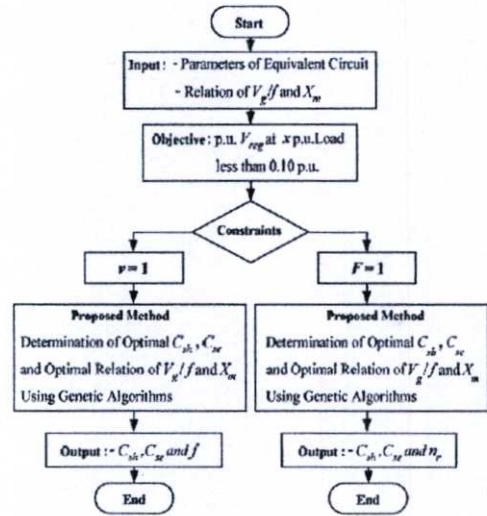
วงจรสมมูลของ SEIG ที่มีการต่อตัวเก็บประจุชดเชยแบบขนานและอนุกรม (Short-shunt) และจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่า C_{sh} และ C_{se} ที่เหมาะสมนั้นจะใช้วิธีจินตคณิตกอริธึม โดยจะพิจารณาทั้งในเงื่อนไขที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) และในเงื่อนไขที่ความถี่คงที่ ($F=1$) ซึ่งจะตั้งเป้าหมายที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าได้ไม่เกิน 0.1 เปรอ์ยูนิต กำหนดให้

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1, Z_m = \frac{jX_m \left(\frac{R_c}{F} \right)}{jX_m + \left(\frac{R_c}{F} \right)} \tag{2}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{F-v} + jX_2 \tag{3}$$



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของ SEIG ที่ต่อตัวเก็บประจุชดเชยแบบขนานและอนุกรม (Short-shunt)



รูปที่ 4 ขั้นตอนการหาค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสม

ค่าอิมพีแดนซ์ของ C_{sh} และ C_{se}

$$Z_{Csh} = \frac{-jX_{Csh}}{F^2}, Z_{Cse} = \frac{-jX_{Cse}}{F^2} \tag{4}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้า

$$Z_L = \frac{R_L}{F} + jX_L \tag{5}$$

และความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

$$I_1 = \frac{V_g}{F \left(Z_1 + \frac{Z_{Csh}(Z_{Cse} + Z_L)}{Z_{Csh} + (Z_{Cse} + Z_L)} \right)} \tag{6}$$

$$I_2 = V_g / (FZ_2) \tag{7}$$

$$I_L = V_g / F(Z_{Cse} + Z_L) \tag{8}$$

$$V_L / F = V_g / F - (I_1 Z_1) \tag{9}$$

$$V_L / F = I_L Z_L \tag{10}$$

จากสมการที่ (2) ถึง (10) ค่า R_1, R_2, R_c, X_1 และ X_2 และความสัมพันธ์ระหว่าง V_g/f กับ X_m สามารถหาได้จากกรทดสอบ จากนั้นทำการประมวลผลหาค่าตัวเก็บประจุขดเลข (C_{sh}, C_{se}) ที่เหมาะสมด้วยวิธีจูนคัลคูลอริทึม โดยมีขั้นตอนของวิธีการที่นำเสนอซึ่งรูปที่ 4 และมีสมการเป้าหมายดังสมการที่ (11)

$$F_{objective} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left| \frac{V_g(f)}{V_{rated}} - 1 \right|^2 \quad (11)$$

4. ผลการทดสอบ

เครื่องจักรไฟฟ้าที่นำมาสามเฟสแบบกรกรระรอกที่นำมาใช้ทดสอบเป็น SEIG ในบทความนี้มีขนาด 4 kW และ 2.2 kW โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4 kW, 4 Pole, Delta connected, 50 Hz, 380 V, 8.8 A, 1440 rpm

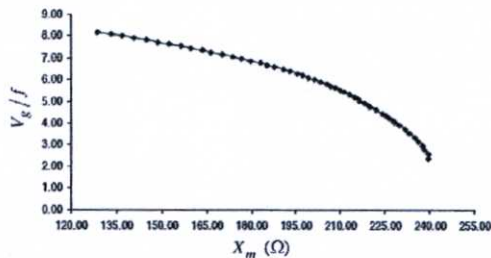
2.2 kW, 4 Pole, Star connected, 50 Hz, 380 V, 5.0 A, 1420 rpm

และได้ทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาในท้องปฏิบัติกร จากกรทดสอบดังกล่าวทำให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

พิกัด (kW)	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_2 (Ω)	R_c (Ω)	X_m (Ω)
4.0	3.90	7.51	3.34	7.51	1727.06	152.20
2.2	3.50	4.04	2.54	4.04	1114.40	86.82

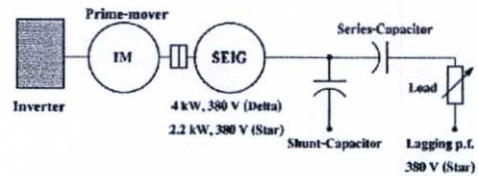
เนื่องจากมีการอิมิตัวของแกนเหล็กจะส่งผลให้ความสัมพันธ์ของค่าแรงดัน (V_g) และสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่เป็นเชิงเส้นจึงมีผลทำให้ค่า X_m ของสนามแม่เหล็กมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของ V_g/f ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_g/f และ X_m ซึ่งแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5 กรณี 4 kW เพื่อนำมาใช้ในวิธีการที่นำเสนอโดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่า V_g/f และ X_m ให้เหมาะสมกับสภาวะการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของ V_g/f และ X_m (4 kW)

จากผลการออกแบบจะได้ค่าตัวเก็บประจุขดเลขที่เหมาะสมสำหรับทำให้สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์ ในทั้งสองเงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่ $v=1$ และในเงื่อนไขที่ $F=1$ จากนั้นนำค่าตัวเก็บประจุที่ได้ไปทำการทดสอบจริง โดยมีวงจรทดสอบดังรูปที่ 6 ซึ่งในการทดสอบได้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ใกล้กับค่าที่

ออกแบบไว้มากที่สุด โดย SEIG ขนาด 4.0 kW มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเป็นเดลต้า และ SEIG ขนาด 2.2 kW มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเป็นสตาร์ ซึ่งทำการวัดค่าแรงดันกระแส กำลังไฟฟ้า ความถี่ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยใช้ Power meter รุ่น WT1030 ส่วนค่าความเร็วต้นกำลังวัดโดย Photo Tachometer ของ Yogokawa โดยค่าที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 2, 3 และ 4 จากผลการทดสอบพบว่า SEIG ที่ออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถจ่ายภาระไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ได้โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่น้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายในการออกแบบ ตัวอย่างสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าต่าง ๆ ของ SEIG พิกัด 4 kW แสดงดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 6 วงจรกรทดสอบ SEIG

ตารางที่ 2 ผลกรออกแบบและกรทดสอบ SEIG 4 kW กรณี $v=1$

$v=1$ p.u.	Load p.f. = 0.86		Load p.f. = 0.91	
Load p.u.(D)	0.420	0.50	0.42	0.50
Load p.u.(T)	0.415	0.50	0.425	0.51
C_{sh} (D)	15.5	17.6	17.56	19.25
C_{sh} (T)	16.0	18.0	17.00	18.0
C_{se} (D)	46.5	52.8	55.54	59.00
C_{se} (T)	50.0	50.0	58.50	58.50
f (D)	47.83	48.31	47.44	47.83
f (T)	49.18	49.05	49.21	49.02
n_r (D)	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
n_r (T)	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
V_{reg} p.u. (T)	0.018	0.026	0.011	0.012

D : Design, T : Test, C : μF , f : Hz, n_r : rpm

ตารางที่ 3 ผลกรออกแบบและกรทดสอบ SEIG 4 kW กรณี $F=1$

$F=1$ p.u.	Load p.f. = 0.86		Load p.f. = 0.91	
Load p.u.(D)	0.51	0.56	0.49	0.54
Load p.u.(T)	0.50	0.57	0.50	0.54
C_{sh} (D)	16.2	19.0	18.26	17.6
C_{sh} (T)	17.0	18.0	18.0	17.0
C_{se} (D)	46.7	52.0	56.3	58.3
C_{se} (T)	50.0	50.0	58.5	58.5
n_r (D)	1533	1527.5	1549	1537.3
n_r (T)	1528	1529	1528	1529
f (D)	50	50	50	50
f (T)	50	50	50	50
V_{reg} p.u. (T)	0.06	0.047	0.01	0.015

D : Design, T : Test, C : μF , f : Hz, n_r : rpm

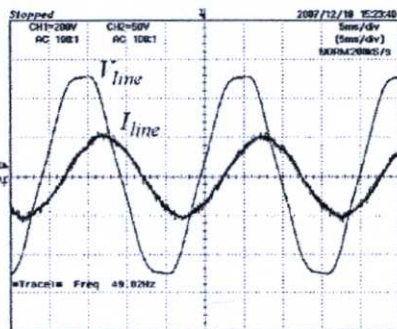
ตารางที่ 4 ผลการออกแบบและการทดสอบ SEIG 2.2 kW

	Load p.f. = 0.86		Load p.f. = 0.91	
	$v=1$	$F=1$	$v=1$	$F=1$
Load p.u.(D)	0.70	0.83	0.75	0.75
Load p.u.(T)	0.69	0.83	0.73	0.76
C_{sh} (D)	34.22	27.51	40.9	34.8
C_{sh} (T)	35.0	30.0	40.0	36.0
C_{se} (D)	38.37	49.39	60.45	61.25
C_{se} (T)	39.0	50.0	60.0	60.0
n_r (D)	1500	1540.8	1500	1555
n_r (T)	1500	1558	1500	1554
f (D)	47.62	50	48.20	50
f (T)	48.5	50	48.2	50
V_{reg} p.u. (T)	0.01	0.040	0.016	0.023

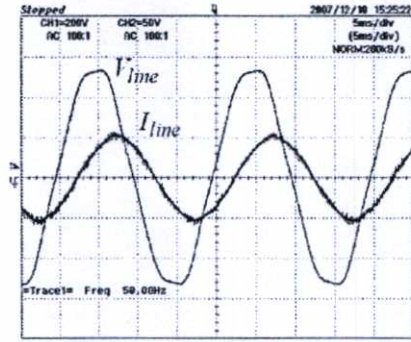
D : Design, T : Test, C : μF , f : Hz, n_r : rpm

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุและขดลวดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองเมื่อจ่ายภาระที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบล้าหลังค่าต่าง ๆ โดยต้องมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 0.1 เปร้อยูนิต จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ พบว่าในกรณี $v=1$ มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.026 เปร้อยูนิต (ตารางที่ 2) ส่วนกรณี $F=1$ มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.06 เปร้อยูนิต (ตารางที่ 3) จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ประยุกต์ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ ได้โดยไม่ต้องใช้วิธีการลองปรับเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนานหรืออนุกรมไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ความถี่ของไฟที่ต้องการ (ลองคิดลวดของ) และในงานวิจัยต่อไปจะพัฒนาการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ให้สามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดเมื่อจ่ายภาระที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบล้าหลังตลอดช่วงย่านหนึ่ง ๆ ได้ เช่น ± 0.20 p.u. ของค่าภาระไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบ



รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า (line) ของ SEIG 4 kW กรณี $v=1$ ที่ 0.51 p.u. Load p.f. = 0.91 lagging



รูปที่ 8 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า (line) ของ SEIG 4 kW กรณี $F=1$ ที่ 0.50 p.u. Load p.f. = 0.91 lagging

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปุณย์ภัทร ภูมิภาค และ ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง” งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 41-44, ตุลาคม 2550.
- [2] M.Godoy Simoes, Felix A.Farret, Renewable Energy System Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press LLC 2000 N.W. Corporate Blvd, 2004.
- [3] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, 1989.
- [4] B.Singh, L.Shridhar, and C.S. Jha, “Improvements in the Performance of Self-Excited Induction Generator through Series Compensation,” IEE Proc.Genecr.Transm.Distrid., Vol. 146, no. 6, pp. 602-608, November 1999.

ประวัติผู้เขียนบทความ



วุฒิชัย รอดท่อม จบการศึกษา วศ.บ. (พ.ศ.2549) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้า และการออกแบบที่เหมาะสม



ปุณย์ภัทร ภูมิภาค จบการศึกษา วศ.บ. และ วศ.ม. จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทำงานวิจัยทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน และการออกแบบที่เหมาะสม



ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Imperial College มหาวิทยาลัยลอนดอน ประเทศอังกฤษ ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน และการออกแบบที่เหมาะสม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวุฒิชัย รอดพุ่ม
วัน เดือน ปีเกิด	6 ธันวาคม 2526
ภูมิลำเนา	201/3 ม.1 ต.ลำใหม่ อ.เมือง จ.ยะลา 95160
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	“การหาค่าตัวเก็บประจุแบบซดเซยที่เหมาะสมสำหรับเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON) ครั้งที่ 31 (พ.ศ.2551) หน้าที่ 343-346