การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

OPTIMAL CAPACITANCE REQUIREMENT FOR VOLTAGE COMPENSATION OF SELF-EXCITED THREE PHASE INDUCTION GENERATOR

โดย

นายณัฐศักดิ์ สายอุทธา

นายนฤดล โกศลจิตร์

นางสาวมนชนก พันธุคุปต์

นางสาวฤชุดา กัลกะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

OPTIMAL CAPACITANCE REQUIREMENT FOR VOLTAGE COMPENSATION OF SELF-EXCITED THREE PHASE INDUCTION GENERATOR

T144433

โดย

นายณัฐศักดิ์ สายอุทธา
นายนฤดล โกศลจิตร์
นางสาวมนชนก พันธุคุปต์
นางสาวฤชุดา กัลกะ

สารหมู...
เลขทะเบียน 144433
วัน.เดือน.ปี 24 พ.ย. 2559

.b. 12816875
.i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

OPTIMAL CAPACITANCE REQUIREMENT FOR VOLTAGE COMPENSATION OF SELF-EXCITED THREE PHASE INDUCTION GENERATOR

NATTASAK SAYUTHA
NARUEDON KOSONJIT
MONCHANOK PHANTUKUP
RUECHUDA KALLAKA

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

ปีการศึกษา 2558

การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

OPTIMAL CAPACITANCE REQUIRMENT FOR VOLTAGE COMPENSATION OF SELF-EXCITED THREE PHASE INDUCTION GENERATOR

โดย

นายณัฐศักดิ์ สายอุทธา
นายนฤดล โกศลจิตร์
นางสาวมนชนก พันธุคุปต์
นางสาวฤชุดา กัลกะ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์
ผศ.ดร. วรชาติ สุวรรณงาม

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

ผู้จัดทำ

1. นาย ณัฐศักดิ์ สายอุทธา
2. นาย นฤดล โกศลจิตร์
3. นางสาว มนชนก พันธุคุปต์
4. นางสาว ฤชุดา กัลกะ

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรชาติ สุวรรณงาม)

การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

นาย	ณัฐศักดิ์	สายอุทธา	
นาย	นฤดล	โกศลจิตร์	
นางสาว	มนชนก	พันธุคุปต์	
นางสาว	ฤชุดา	กัลกะ	
ดร.	ธีรพล	โพธิ์พงศ์วิวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.	วรชาติ	สุวรรณงาม	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา และหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีเนติก เมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามที่ต้องการโดยมีค่าตัวประกอบกำลัง (0.86 ล้าหลัง-1.00) ภายใต้เงื่อนไข 2 กรณี คือ ความเร็วต้นกำลังคงที่และความถี่คงที่ โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (±0.05 p.u.) ในการศึกษาเริ่มต้นจากการทดสอบและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะมอเตอร์ จากนั้นหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมโดยใช้พื้นฐานของวงจรสมมูลร่วมกับวิธีจีเนติกอัลกอริทึม ผลที่ได้นำมาทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้ สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้วิธีการเลือกตัวเก็บประจุแบบลองผิดลองถูก

OPTIMAL CAPACITANCE REQUIREMENT FOR VOLTAGE COMPENSATION OF SELF-EXCITED THREE PHASE INDUCTION GENERATOR

Mr.	Nattasak	Sayuttha	
Mr.	Naruedon	Kosonjit	
Miss	Monchanok	Phantukup	
Miss	Ruechuda	Kallaka	
Dr.	Teeraphon	Phophongviwat	Supervisor
Asst.Prof.Dr.	Warachart	Suwan-ngam	Co-Supervisor

Academic Year 2015

ABSTRACT

The aim of this project is to determine an optimal capacitance requirement for voltage compensation of self-excited three phase induction generator. 2.2 kW, three-phase squirrel case induction machine was selected to investigate in this project as generator and 3 kW DC motor was used to be prime mover. Shunt and series capacitors are needed to build-up and regulate terminal voltage output from the generator. Appropriate shunt and series capacitances can be determined by optimization techniques (Genetic algorithms, GAs). To investigate possibility of self-excited three phase induction generator applies to wind turbine, an experiment was separated to two operation modes i.e. constant speed and constant frequency. Induction machine parameters, load demand, % voltage regulation acceptance and correlation between air gap voltage and magnetizing reactance were needed to formulate objective function. Results from GAs show applicable shunt and series capacitances. Experimental results in laboratory by load test with load 0.86 to 1 lagging power factor show close agreement between calculation and experiment.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญานิพนธ์มาด้วยดีโดยตลอด และได้รับความกรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์เรียบร้อยเป็นอย่างดี ซึ่งคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งต่อความอนุเคราะห์เป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาวิจัย จนสามารถทำโครงงานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	1
1.4 วิธีการดำเนินโครงงาน	2
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงานนี้	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	5
2.3 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	6
2.4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	8
2.5 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	11
2.6 การทดสอบขณะไม่มีภาระ	15
2.7 การทดสอบตรึงโรเตอร์	17
2.8 การทดสอบหาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	20
2.9 การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความฝืดและแรงลม	21
2.10 ทฤษฎีการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	21
2.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	23
2.12 จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms)	25
บทที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน	27
3.1 บทนำ	27
3.2 การหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน	27
3.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน	30
3.3.1 การทดสอบ shunt SEIG ขนาด 2.2 kW กรณีความเร็วคงที่ ($v=1$)	31
3.3.2 การทดสอบ shunt SEIG ขนาด 2.2 kW กรณีความถี่คงที่ ($F=1$)	34
3.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	36

บทที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม 38
4.1 บทนำ 38
4.2 การหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันช่องอากาศกับรีแอคแตนซ์สนามแม่เหล็ก 38
4.3 วิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน – อนุกรม 40
4.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม 44
4.4.1 การออกแบบและทดสอบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมสำหรับ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่เท่ากับ 1500 rpm 45
4.4.2 การออกแบบและทดสอบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมสำหรับ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่เท่ากับ 50Hz 49
4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ 52
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 53
5.1 บทนำ 53
5.2 สรุปผลการวิจัย 53
5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ 54
เอกสารอ้างอิง 55
ภาคผนวก 56
ภาคผนวก ก. ข้อมูลอุปกรณ์ 57
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการ 62
ภาคผนวก ค คำอธิบายสัญลักษณ์ 67
ประวัติผู้เขียน 72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การส่งผ่านของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	8
2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	11
2.3 วงจรสมมูลด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	12
2.4 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป	13
2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส	15
2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยการประมาณ ขณะไม่มีภาระ	16
2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะตรึงโรเตอร์	17
2.8 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	20
2.9 ตัวเก็บประจุต่อขนานแต่ละเฟสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง	22
2.10 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง	23
2.11 ความสัมพันธ์ของขนาดตัวเก็บประจุกับการสร้างแรงดันไฟฟ้าขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า	24
3.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน	27
3.2 วงจรสมมูลจากรูปที่ 3.1 โดยจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของ admittance	28
3.3 วงจรการทดสอบ SEIG 2.2 kW ที่มีรูปการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน	31
3.4 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ภาระไฟฟ้าในกรณี Shunt SEIG 2.2 kW กรณี เท่ากับ ความเร็วต้นคงที่ 50 Hz $(F=1)$ จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. $C_{sh}=50\ \mu F$ ที่ค่าภาระทางไฟฟ้า 79.8%	35
4.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสความสัมพันธ์ V_g/f กับ X_m	39
4.2 ความสัมพันธ์ของ V_g/f กับ X_m ของ Short-shunt SEIG 2.2 kW	40
4.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมขณะมีภาระทางไฟฟ้า	40
4.4 วงจรสมมูลในรูปที่ 4.3 โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบ Impedance	41
4.5 ขั้นตอนการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมในกรณี $v=1$ และ $F=1$	44
4.6 วงจรการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม	46
4.7 สัญญาณของกระแสและค่าแรงดันที่ภาระไฟฟ้า 0.91 Lagging p.f. ค่าภาระทางไฟฟ้า = 57.91%	47
4.8 เฟเซอร์กระแส I_c, I_1, I_L ที่ภาระไฟฟ้า 0.91 Lagging p.f. ค่าภาระทางไฟฟ้า 57.91% Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ที่ C_{sh} =35 μF และ C_{se} =45 μF	48

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แผนการดำเนินงาน 3

2.1 การกระจายของความต้านทานเสมือนรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส 20

3.1 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบ 30

3.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำพิกัด 2.2 kW 30

3.3 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระไฟฟ้า Unity p.f. 31

3.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่างๆกรณีความเร็วคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. 32

3.5 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วคงที่ $(v=1)$ จ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า p.f. 0.97 33

3.6 ผลกาทดสอบแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วคงที่ $(v=1)$ จ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า p.f. 0.88 และ p.f. 0.97 33

3.7 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz $(F=1)$ จ่ายภาระไฟฟ้า Unity p.f. 34

3.8 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2.2kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่างๆกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. 34

3.9 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kWในกรณีความถี่คงที่ 50Hz $(F=1)$ จ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า p.f. 0.88 และ p.f. 0.97 36

3.10 ผลการทดสอบแบบค่าตัวเก็บประจุขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า p.f. 0.88 และ p.f. 0.97 36

4.1 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ 44

4.2 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรม และค่าตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในการทดสอบที่ภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 58.21%-67.2% Lagging p.f. ต่างๆ 45

4.3 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.925 Lagging p.f. 46

4.4 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.87 Lagging p.f. 47

4.5 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.91 Lagging p.f. 47

4.6 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.94 Lagging p.f. 48

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.985 Lagging p.f.	48
4.8 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆที่มีค่า Lagging p.f. เปลี่ยนแปลง โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบที่ค่าภาระทางไฟฟ้าพิกัด 57% และ 0.966 Lagging p.f.	49
4.9 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรม และค่าตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในการทดสอบ ที่ภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 58.01%-59.47% Lagging p.f. ต่างๆ	49
4.10 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.925 Lagging p.f.	50
4.11 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.87 Lagging p.f.	50
4.12 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.91 Lagging p.f.	51
4.13 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.94 Lagging p.f.	51
4.14 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.985 Lagging p.f.	51

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นทุกปี ทำให้การเตรียมพร้อมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าต้องมากขึ้นไปด้วย แต่เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าต้องใช้เชื้อเพลิงในการผลิต ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังส่งผลถึงปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิงในอนาคตด้วย ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจึงมีบทบาทมากขึ้น เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งพลังงานทดแทนส่วนใหญ่นั้นมีกำลังการผลิตขนาดเล็กถึงปานกลาง ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน ในการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้นต้องอาศัยการต่อตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 220 V เพื่อใช้งานในการหาค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งแบบวิธีลองผิดลองถูกนั้นใช้เวลานานและค่ามีความผิดเพี้ยน จึงได้มีการใช้จีเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมมากที่สุด ร่วมกับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระทางไฟฟ้าต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง
2. ศึกษาวิธีการควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในสภาวะที่ระดับความเร็วโรเตอร์ ขณะไม่มีภาระไฟฟ้าและในขณะมีภาระทางไฟฟ้าต่ออยู่ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับการผลิตไฟฟ้าโดยมีพลังงานลมเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุสำหรับการสร้างแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการรักษาแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ โดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุไปตามขนาดภาระไฟฟ้าและระดับความเร็วรอบที่มีการเปลี่ยนแปลง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

นำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 2.2 kW แบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้ตัวเก็บประจุในการสร้างแรงดัน เริ่มด้วยการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงเพื่อเป็นแนวทางในการทำการทดสอบ จากนั้นออกแบบการทดสอบโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลัง ทำการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่จะใช้ทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ได้จากการทดสอบขณะไม่มีภาระทางไฟฟ้า และการทดสอบตรึงโรเตอร์ ทำการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ตัวเก็บประจุเพื่อสร้างแรงดันที่

พิกัดทั้งในขณะที่มีภาระไฟฟ้า และไม่มีภาระไฟฟ้า ที่ความเร็วรอบคงที่ และความถี่คงที่หรือเปลี่ยนแปลง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงและหาแนวโน้มของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อที่จะหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการรักษาแรงดันในสภาวะที่ขนาดภาระทางไฟฟ้าต่างกันออกไปเป็นการควบคุมให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้ในช่วงการทำงานที่ต้องการและนำข้อมูลที่ได้ไปประเมินถึงการใช้งานจริง

1.4 วิธีการดำเนินโครงงาน

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส พฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. วางแผนการทดลอง ทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่จะใช้ศึกษา
3. ทำการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้สำหรับใช้สร้างแรงดันเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้โปรแกรม Matlab และคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าขาออก 220 V และความถี่ 50 Hz
4. ออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลองและทดสอบเพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ 220 V และความถี่ 50 Hz ขณะไร้ภาระ
5. ทำการทดลองโดยการต่อภาระทางไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ 220 V และบันทึกผลการทดลอง (ความถี่,กำลังไฟฟ้าจริง,กำลังไฟฟ้าเสมือน,ค่าตัวประกอบกำลัง,กระแสไฟฟ้า)
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและแก้ไข
7. สรุปผล และนำเสนอโครงงาน
8. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ดำเนินงาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส พฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2.วางแผนการทดลอง ทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่จะใช้ศึกษา										
3.ทำการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้สำหรับใช้สร้างแรงดันเริ่มต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้ matlab และคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าขาออก 220 V และความถี่ 50 Hz										
4.ออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลอง และทดสอบเพื่อดูค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก220 V และความถี่ 50 Hz ขณะไร้ภาระ										
5.ทำการทดลองโดยการต่อภาระทางไฟฟ้าและรักษาให้ได้ 220 V ตลอดบันทึกผลการทดลอง(ความถี่,กำลังไฟฟ้าจริง,กำลังไฟฟ้าเสมือน,ค่าตัวประกอบกำลัง,กระแสไฟฟ้า)										
6.วิเคราะห์ผลการทดลองและแก้ไข										
7. สรุปผลและนำเสนอโครงงาน										
8.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงานนี้

1. ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจถึงหลักการทำงานและพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการใช้ตัวเก็บประจุในการรักษาแรงดันให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเอง
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ หรือศึกษาต่อในเรื่องเกี่ยวกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า

บทที่ 2
ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันทั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็กไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งส่วนใหญ่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะนำมาใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งในโครงงานนี้จะนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื้อหาจะอธิบายถึงที่มาของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการทำความเข้าใจในการออกแบบวงจรที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป

2.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่อยู่กับที่ เรียกว่า สเตเตอร์ (stator) และ ส่วนที่มีการหมุน เรียกว่า โรเตอร์ (rotor)

สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ มีแกนเป็นเหล็กบางๆ (Laminated sheet steel) ทำมาจากซิลิคอน (Silicon) และมีขดลวดฝังตัวอยู่ในร่องสล็อต (slot) ของแกนเหล็ก เรียกว่า ขดลวด สเตเตอร์ (Stator winding) ซึ่งขดลวดสเตเตอร์ ส่วนใหญ่จะมีการพันขดลวดแบบกระจายสนามแม่เหล็กในรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal)

โรเตอร์เป็นส่วนที่หมุนได้ แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และโรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound rotor)

โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor)

ประกอบด้วยแกนเหล็กที่ทำด้วยเหล็กลามิเนทบางๆ ตรงกลางแผ่นเจาะรูสำหรับสอดเพลา เมื่อนำแผ่นลามิเนทเหล่านี้มาอัดซ้อนกันจะได้แกนของโรเตอร์ ที่ผิวของโรเตอร์จะมีร่องสล็อต (slot) ไปตามทางยาว และในร่องสล็อตจะมีแท่งตัวนำทองแดงหรืออะลูมิเนียมฝังอยู่โดยรอบ ซึ่งแท่งตัวนำจะฝังในแนวเฉียงกับร่องสล็อตที่สเตเตอร์ซึ่งจะช่วยให้โรเตอร์ หมุนได้ราบเรียบยิ่งขึ้น ที่ส่วนปลายของแท่งตัวนำทั้ง 2 ด้านจะต่อปลายลัดวงจรเข้าด้วยกันอย่างถาวร ดังนั้นจะไม่สามารถนำความต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรโรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกรงกระรอก ในปัจจุบันตัวนำที่ฝังอยู่ในร่องสล็อตของโรเตอร์จะใช้วิธีหล่อตัวนำที่เป็นโลหะผสม หรืออะลูมิเนียม รวมทั้งหล่อวงแหวนตัวนำที่มีครีบช่วยระบายความร้อน

โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound Rotor)

เป็นโรเตอร์ซึ่งตัวนำที่ใช้จะพันด้วยขดลวดทองแดงเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดี 3 ชุด หรือ 3 เฟส พันอยู่ในร่องสล็อต เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก โดยขดลวดแต่ละเฟสจะวางทำมุมห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าและต้องพันขดลวดให้มีจำนวนขดลวดแม่เหล็กเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ด้วย ขดลวดทั้ง 3 ชุด จะต่อกันแบบสตาร์ หรือ แบบเดลต้าและปลายเปิดที่เหลือ 3 ปลายนั้นต่อเข้ากับสลิปริง (Slip Ring) 3 วงที่ติดอยู่กับเพลาด้านหน้า ซึ่งมีแปลงถ่าน เพื่อต่ออุปกรณ์ควบคุมภายนอก

2.3 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับภายนอกแก่ขดลวดที่สเตเตอร์ จะทำให้เกิดกระแสไหลภายในขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนรอบสเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยที่ความเร็วซิงโครนัสจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและจำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ ดังสมการ

$$n_s = \frac{120 f_s}{P} \tag{2.1}$$

โดยที่ n_s = ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous speed : rpm)

f_s = ความถี่ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก (Hz)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ (Pole)

การเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนกับตัวนำในโรเตอร์ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ตามลำดับ สนามแม่เหล็กหมุนและสนามแม่เหล็กในโรเตอร์จะกระทำกันและเกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วค่าหนึ่ง เรียกว่า ความเร็วโรเตอร์ (Rotor Speed) ซึ่งความเร็วโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าภาระทางกลโดยเมื่อมีภาระทางกลน้อย ๆ หรือไม่มีภาระทางกล ความเร็วโรเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์และเมื่อมีภาระทางกลมากขึ้น ค่าความเร็วของโรเตอร์จะลดลง หากมีการขับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หมุนในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส จนความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจะเท่ากับศูนย์จะทำให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้นจึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้าในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้ไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แต่ถ้าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วใดๆ ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนและมีค่าน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสและความเร็วรอบโรเตอร์ เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip speed) เมื่อคิดค่าความเร็วสลิปเป็นค่าหนึ่งหน่วย หรือเปอร์เซ็น จะเรียกค่านี้ว่า สลิป (Slip) มีค่าดังสมการ

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{2.2}$$

$$n = (1-s)n_s \tag{2.3}$$

$$\omega_r = (1-s)\omega_s \tag{2.4}$$

$$\%slip = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \tag{2.5}$$

โดยที่ s = ค่าสลิป

n_s = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

n_r = ความเร็วของโรเตอร์ (rpm)

ω_s = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (rad/s)

ω_r = ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rad/s)

ในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่ $(n_r = 0)$ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์มีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในกรณีนี้จะมีค่าสลิปเท่ากับ 1 เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว n_r อัตราการตัดสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ $n_s - n_r$ ซึ่งในลักษณะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และความถี่ในวงจรโรเตอร์จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วสลิปสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\hat{E}_r = s\hat{E}_s \tag{2.6}$$

$$f_r = sf_s \tag{2.7}$$

โดยที่ $\hat{E}_s$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง (V)

$\hat{E}_r$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะทำงาน (V)

f_s = ความถี่ทางไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (Hz)

f_r = ความถี่ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์ (Hz)

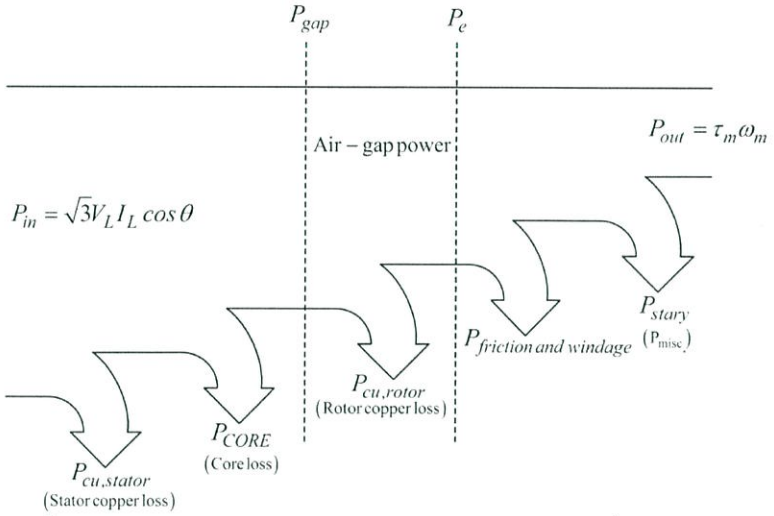
เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใด ๆ ที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์และความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์มีค่าเท่ากับสมการที่ 2.7 ขณะที่แรงบิดที่เกิดขึ้นในกรณีที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบใด ๆ เรียกว่าแรงบิดอะซิงโครนัส (Asynchronous torque)

เมื่อต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งไม่มีต้นกำลัง (Prime mover) ขณะที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส สลิปมีค่าเป็นบวก เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแสดงพฤติกรรมเป็นมอเตอร์ จะมีการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนภายในช่องอากาศ (air gap) ด้วยความเร็วซิงโครนัส แต่ในทางกลับกัน เมื่อโรเตอร์ถูกขับด้วยต้นกำลังในทิศทางเดิมทำให้โรเตอร์ หมุนด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส มีค่าสลิปเป็นลบ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

จากวงจรสมมูลสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณหาสมรรถนะและคุณลักษณะต่างๆได้ เช่น ค่ากำลังไฟฟ้า แรงบิด และประสิทธิภาพ เป็นต้น

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเราสามารถกล่าวได้อีกว่าเป็น Rotating transformer โดยมีอินพุทเป็นแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยปกติหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทที่ด้านทุติยภูมิ แต่สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ขดลวดทุติยภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือขดลวดบนโรเตอร์จะต่อแบบลัดวงจรแท่งตัวนำ ซึ่งทำให้ไม่มีกำลังไฟฟ้าออกจากโรเตอร์ แต่เป็นเอาท์พุทที่เป็นกำลังทางกล สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่โรเตอร์ กำลังที่ป้อนเข้าจะถูกถ่ายทอดผ่านช่องว่างอากาศด้วยการป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าอินพุทและกำลังทางกลเอาท์พุท แสดงในแผนภาพดังนี้



รูปที่ 2.1 การส่งผ่านของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

กำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (P_{in}) เป็นแรงดันและกระแส 3 เฟส ความสูญเสียแรกในมอเตอร์เหนี่ยวนำคือ ความสูญเสียจากขดลวดทองแดงในสเตเตอร์ (Stator copper loss) กำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะสูญเสียในรูปของ (Hysteresis loss) และกำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) ซึ่งเป็นการสูญเสียบนแกนเหล็ก (Stator core loss) กำลังไฟฟ้าที่หลงเหลือจากจุดนี้จะถูกส่งผ่านไปยังโรเตอร์ผ่านช่องว่างอากาศระหว่างสเตอเตอร์และ โรเตอร์ โดยกำลังไฟฟ้านี้เรียกว่ากำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ (P_{gap}) หลังจากที่กำลังไฟฟ้าถูกส่งผ่านไปยังโรเตอร์ จะมีกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งสูญเสียในรูป ($I^2 R\,loss$) ซึ่งเป็นความสูญเสียในแท่งตัวนำที่โรเตอร์ (Rotor copper loss) ส่วนที่เหลือจะถูกแปลงจากกำลังไฟฟ้าไปเป็นรูปกำลังทางกล (P_e) ความสูญเสียสุดท้ายคือ กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านลมขณะหมุน (Friction and Windage loss) และกำลังสูญเสียจากภาระการใช้งาน (Stray load loss) กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะเป็นกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของมอเตอร์ (P_{out})

เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลในรูป กำลังไฟฟ้าอินพุทได้จากระบบไฟฟ้าสามเฟสจ่ายให้มอเตอร์ที่ขั้วสเตเตอร์

$$P_{in} = 3V_t I_1 \cos\theta \tag{2.8}$$

ความสูญเสียจากขดลวดที่สเตเตอร์ (Stator Copper Loss) แสดงเป็น

$$P_{cu,stator} = 3I_1^2 R_1 \tag{2.9}$$

กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Stator Core loss) ประกอบด้วย hysteresis loss และ eddy current losses ในแกนเหล็กสเตเตอร์ มีค่าแปรผันตามความถี่ ดังสมการที่ 2.10

$$P_{core\ loss} = K_h f B_{max}^x + K_e f^2 B_{max}^2 t^2 \tag{2.10}$$

โดยที่ B_{max} = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Tesla,Weber/m^2)
f = ค่าความถี่ทางไฟฟ้า (Hz)
x = Steinmetz's index มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5
K_h = ค่าคงที่ของ Hysteresis loss ขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็ก
K_e = ค่าคงที่ของ Eddy current loss ขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็ก
t = ความหนาของแผ่นเหล็กเคลือบฉนวน

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$P_{gap} = 3I_1^2 \frac{R_2}{s} \tag{2.11}$$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านมายังโรเตอร์สามารถแบ่งเป็นสองส่วนคือ การสูญเสียในแท่งตัวนำโรเตอร์ (Rotor copper loss)

$$P_{(cu,rotor)} = 3I_2^2 R_2 = sP_{gap} \tag{2.12}$$

อีกส่วนคือ กำลังไฟฟ้าที่แปลงเป็นกำลังทางกล (Electromechanical Power)

$$P_e = P_{gap} - P_{cu,rotor} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \tag{2.13}$$

เขียนในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$P_e = 3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} \tag{2.14}$$

เขียนในรูป P_{gap} ได้เป็น

$$P_e = (1-s)P_{gap} \tag{2.15}$$

แรงบิดที่ได้เกิดจากการเหนี่ยวนำในโรเตอร์

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_r} = \frac{P_{gap}}{\omega_s} \tag{2.16}$$

โดย ω_r = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

ω_s = ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัส (rad/s)

ความเร็วเชิงมุมซิงโครนัสสามารถคำนวณได้จาก

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} \tag{2.17}$$

โดย P = จำนวนขั้วของมอเตอร์ (pole)

f = ค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Hz)

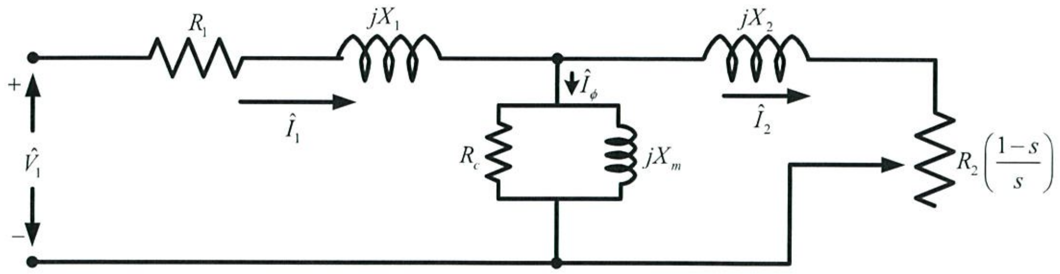
ความสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทาน แรงต้านลมขณะหมุน และความสูญเสียเนื่องจากภาระการใช้งานสามารถเรียกรวมกันได้ว่า rotational loss ในขณะที่มอเตอร์มีความเร็วสูงขึ้นจะทำให้ความสูญเสียนี้เพิ่มขึ้นด้วย แต่ขณะเดียวกันจะทำให้ความสูญเสียที่แกนเหล็กลดลง ความสูญเสียนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปที่เพลาลดลง ดังสมการ

$$P_{out} = P_e - P_{rotational} = T_{out}\omega_r \tag{2.18}$$

แรงบิดทางกลที่เพลา

$$T_o = \frac{P_{out}}{\omega_r} \tag{2.19}$$

วงจรสมมูลอีกแบบสามารถเขียนโดยแยกส่วนประกอบที่เป็นการสูญเสียในรูปความร้อนกับการสูญเสียทางกล โดย R_2 เป็นส่วนประกอบของการสูญเสียในรูปความร้อนและ $R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$ แทนส่วนกำลังทางกล



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สามารถคำนวณกำลังสูญเสียทั้งหมดในการส่งผ่านกำลังจากกำลังไฟฟ้าอินพุทไปยังกำลังทางกลที่เพลาได้จากสมการ

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \tag{2.20}$$

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ นิยมคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ ได้ดังนี้

$$\%\text{efficiency} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{2.21}$$

2.5 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

การพิจารณาคลื่นของฟลักซ์แม่เหล็กและแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive force: mmf) คือการพิจารณาวงจรสมมูลในสภาวะคงตัวของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหลายเฟสแบบสมมาตร โดยที่ถูกกระตุ้นจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ในกรณีนี้จะพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสต่อวงจรแบบสตาร์ จะทำให้กระแสที่ได้เป็นกระแสไลน์ และแรงดันเป็นแรงดันเฟส โดยพิจารณาวงจรสมมูลต่อเฟส แต่ละเฟสจะมีเฟสต่างกัน ±120 องศา

เริ่มพิจารณาจากด้านสเตเตอร์ วงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์จะเหมือนกับหม้อแปลง ซึ่งผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดจากแรงดันที่ตกลงเนื่องจากอิมพีแดนซ์ในสเตเตอร์ $Z_1 = R_1 + jX_1$ จะได้ว่า

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \tag{2.22}$$

โดยที่ $\hat{V}_1$ = แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (L-N:V)

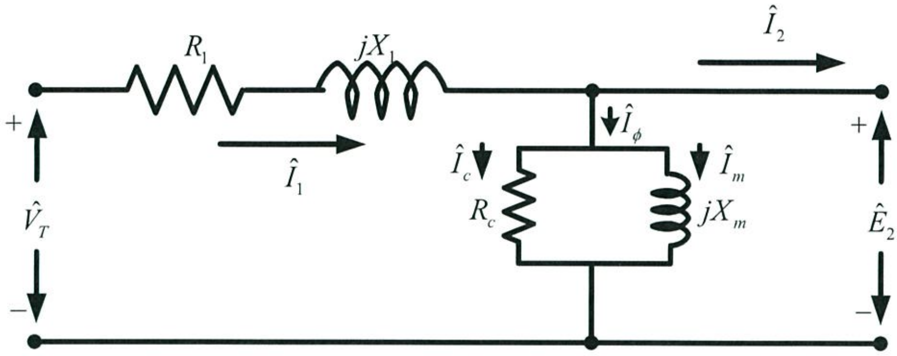
$\hat{E}_2$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สร้างจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ (L-N:V)

$\hat{I}_1$ = กระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (A)

R_1 = ความต้านทานไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (Ω)

X_1 = ค่ารีแอคแตนซ์ที่สเตเตอร์ (Ω)

ซึ่งเขียนวงจรสมมูลด้านสเตเตอร์ (Stator equivalent circuit) ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศถูกสร้างจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเนื่องจากกระแสสเตเตอร์และโรเตอร์ กระแสสเตเตอร์ ($\hat{I}_1$) สามารถแบ่งได้เป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนประกอบด้านภาระไฟฟ้า (Load component: $\hat{I}_2$) เป็นกระแสส่วนที่สร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กด้านโรเตอร์ ส่วนที่สองคือ ส่วนประกอบด้านกระตุ้นหรือกระแสกระตุ้น (Exiting component: $\hat{I}_\phi$) เพื่อสร้าง ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ และเป็นฟังก์ชันของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ($\hat{E}_2$) กระแสกระตุ้นสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกคือส่วนที่อยู่ในรูปการสูญเสียที่แกนเหล็ก ($\hat{I}_c$) จะมีเฟสตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ส่วนที่สองคือส่วนที่อยู่ในรูปของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก (Magnitizing component: ε_m) มีเฟสล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ 90 องศา จากวงจรสมมูลกระแสกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากส่วนที่ต่อขนานอยู่ซึ่งมีค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (R_c) ขนานอยู่กับค่ารีแอคแตนซ์ของส่วนที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กโดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ($\hat{E}_2$) คร่อมอยู่ เพื่อที่จะทำให้วงจรสมมูลสมบูรณ์ จึงได้ใช้หลักการของหม้อแปลงไฟฟ้าในการอ้างอิงส่วนประกอบด้านโรเตอร์มายังด้านสเตเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ของด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ในรูปของ Turn ratio

$$\hat{E}_{2s} = a\hat{E}_{rotor} \tag{2.23}$$

โดยที่ $\hat{E}_{2s}$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของโรเตอร์ (V)

$\hat{E}_{rotor}$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงบนโรเตอร์ (V)

a = อัตราส่วนระหว่างขดลวดด้านสเตเตอร์กับด้านโรเตอร์

ในส่วนของกระแสมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_{rotor} \tag{2.24}$$

โดยที่ $\hat{I}_{2s}$ = กระแสเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของโรเตอร์

$\hat{I}_{rotor}$ = กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงบนโรเตอร์

โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกันแบบลัดวงจรแท่งตัวนำบนโรเตอร์ ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์สามารถพิจารณาได้จากการนำสมการที่ 2.23 หารด้วยสมการที่ 2.24 จะได้

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = a^2\left(\frac{\hat{E}_{rotor}}{\hat{E}_{rotor}}\right) = a^2 Z_{rotor} \quad (2.25)$$

เมื่อคิดผลอัตราส่วนของสเตเตอร์ โรเตอร์แล้ว จะพิจารณาการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์โดยการแทนค่าจริงบนโรเตอร์และค่า Slip-frequency

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (2.26)$$

โดยที่ Z_{2s} = ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)

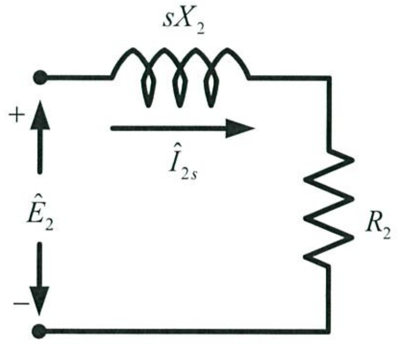
R_2 = ค่าความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)

X_2 = ค่ารีแอคแตนซ์ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)

วงจรสมมูล 1 เฟสทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิปเป็นดังนี้

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{R_2 + jsX_2} \quad (2.27)$$

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความถี่สลิป

จะได้ค่ารีแอคแตนซ์ที่มีค่าแปรผันกับค่าสลิปโดยค่า X_2 เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่มีความถี่เดียวกับความถี่สเตเตอร์

เมื่อพิจารณาตัวแปรต่างๆของโรเตอร์บนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (Stator reference frame) จะเห็นเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็ก และแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ ($\hat{E}_{2s}$) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ ($\hat{E}_2$) ถ้าไม่คิดผลของความเร็วโรเตอร์ โรเตอร์จะหยุดนิ่งเมื่อเทียบกับสเตเตอร์ ($s=0$) แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านโรเตอร์จะเท่ากับด้านสเตเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามเพราะผลของความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างสเตเตอร์ และโรเตอร์เท่ากับค่าสลิปทำให้ความเร็วสัมพัทธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นดังนี้

$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_s \tag{2.29}$$

ต่อมาพิจารณาผลของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ เกิดจากผลรวมของกระแสสเตเตอร์ $\hat{I}_1$ และกระแสด้านภาระ $\hat{I}_2$ โดยที่กระแสเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ $\hat{I}_{2s}$ จะเท่ากับกระแสด้านภาระ เมื่อสมมุติให้จำนวนขดลวดทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้น

$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \tag{2.30}$$

เมื่อนำสมการที่ 2.29 หารด้วยสมการที่ 2.30 จะได้

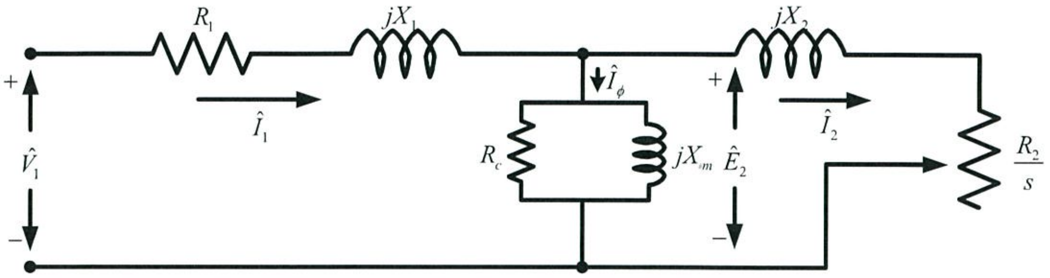
$$\frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_{2s}} = s\frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} \tag{2.31}$$

$$Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \tag{2.32}$$

จากสมการที่ 2.32 เมื่อนำค่าสลิปหารทั้งสองข้างสมการ จะได้

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \tag{2.33}$$

ซึ่งเป็นการพิจารณาตัวแปรโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์สามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ดังนี้



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

ตัวแปรบนโรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงไปด้านสเตเตอร์จะมีค่าความถี่เดียวกับค่าความถี่บนสเตเตอร์ ด้วยซึ่งเมื่อมองจากกรอบอ้างอิงสเตเตอร์จะเห็นคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กและฟลักซ์มีความเร็วเป็นความเร็วซิงโครนัส

2.6 การทดสอบขณะไม่มีภาระ

ทำการทดสอบเหมือนกับการทดสอบแบบเปิดวงจรของหม้อแปลง การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีภาระจะให้ข้อมูลที่ต้องการ คือ กระแสกระตุ้นและกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด การทดสอบจะทดสอบที่ความถี่พิกัด และจ่ายแรงดันพิกัดที่ขั้วสเตเตอร์เท่ากันทุกเฟส โดยทำการวัดค่าแรงดัน ($V_{1.nl}$) ,กระแส ($I_{1.nl}$) และกำลังไฟฟ้าขาเข้า (P_{nl})

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายเฟส ส่วนใหญ่ค่าที่วัดได้เป็นแรงดันไลน์ (L-L) ดังนั้นแรงดันที่เฟสจึงต้องนำไปคำนวณใหม่ (โดยการหารด้วย $\sqrt{3}$ ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามเฟส)

ขณะไม่มีภาระ กระแสโรเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการสร้างแรงบิดที่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทาน และแรงต้านลมจะมีค่าน้อยมากทำให้ความสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์จึงมีค่าน้อยมาก ส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมทั้งช่องว่างอากาศส่งผลให้ต้องการกระแสกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสูญเสียในลวดทองแดงที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจจะประเมินค่าได้ เนื่องจากกระแสกระตุ้นมีค่ามาก

เนื่องจากไม่สนใจค่าความสูญเสียในลวดทองแดงที่โรเตอร์และค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นค่าความสูญเสียจากการหมุน (P_{rot}) สามารถหาได้โดยการลบค่าความสูญเสียในทองแดงที่สเตเตอร์ ออกจากค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปขณะไม่มีภาระ

$$P_{rot} = P_{nl} - qI^2_{1,nl}R_1 \tag{2.34}$$

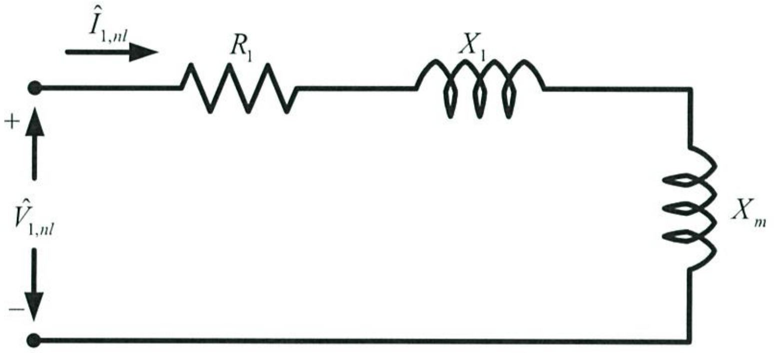
ค่าความต้านทานของสเตเตอร์ (R_1) แปรผันตามอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ เพราะฉะนั้นเมื่อใช้สมการ 2.34 ควรจะระวังการใช้ค่าอุณหภูมิให้มีค่าตรงกัน ในการหาค่าพารามิเตอร์ขณะไม่มีภาระ

ขณะไม่มีภาระ กระแสสเตเตอร์มีค่าค่อนข้างต่ำและในการคาดคะเนครั้งแรก ไม่ต้องคำนึงถึงแรงดันตกคร่อมที่ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ และค่าความต้านทานเสมือนรั่วไหล ในการคาดคะเนแรงดันที่ตกคร่อมค่าความต้านทานในแกนเหล็ก จะมีค่าเท่ากับแรงดันเฟสและค่าความต้านทานในแกนเหล็กสามารถหาค่าได้จาก

$$R_c = \frac{qV_{1,nl}^2\ R_1}{P_{core}} \tag{2.35}$$

โดยมีเงื่อนไขว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องทำงานที่ความเร็วพิกัด และแรงดันพิกัด การคำนวณโดยละเอียดจะต้องแยกค่าความสูญเสียของแกนเหล็ก และความต้านทานของแกนเหล็กที่ไม่ตรงกันในวงจรสมมูล จะไม่ทำให้คำตอบในการวิเคราะห์ต่างออกไป ดังนั้นค่าความต้านทานของแกนเหล็กจึงไม่มีความสำคัญโดยทั่วไปจึงรวมไปกับค่าความสูญเสียที่แกนเหล็กกับการสูญเสียเนื่องจากการหมุน สำหรับจุดประสงค์ที่มีการคำนวณแบบง่ายๆ สามารถทำแบบนี้ได้ อย่างไรก็ตามถ้าจำเป็นสามารถหาความสัมพันธ์ทางตรงเพื่อปรับเปลี่ยนการหาค่าที่จำเป็นต้องรวมความต้านทานของแกนเหล็กเข้าไป

เนื่องด้วย ค่าสลิปขณะไม่มีภาระ s_{nl} มีค่าน้อยมาก แต่มีผลกระทบกับความต้านทานของโรเตอร์ R_2 / s_{nl} อย่างมาก การขนานกันของอิมพีแดนซ์บนโรเตอร์ และ Magnetizing branches จะเกิดขึ้นโดยที่



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยการประมาณ ขณะไม่มีภาระ

คำนวณค่า jX_m ที่ต่อขนานกับความต้านทานเสมือนรั่วไหลที่โรเตอร์ (X_2) ซึ่งต่ออนุกรมกับความต้านทานขนาดใหญ่ ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับ รีแอคแตนซ์สนามแม่เหล็ก (jX_m) แสดงในรูปที่ 2.6 ดังนั้น ค่าความต้านทานเสมือนปรากฏ (X_{nl}) ที่สเตเตอร์ขณะไม่มีภาระ จะมีค่าเท่ากับ $X_1 + X_m$ นั่นคือ Self-reactance (X_{11}) ของสเตเตอร์แสดงในสมการได้ดังนี้

$$X_{nl} \approx X_{11} = X_1 + X_m \tag{2.36}$$

Self-reactance ของสเตเตอร์สามารถคำนวณได้จากค่าที่ได้จากการทดสอบขณะไม่มีภาระ โดยที่ค่ากำลังเสมือนขณะไม่มีภาระ (Q_{nl}) สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{nl} = \sqrt{{S_{nl}}^2 - {P_{nl}}^2} \tag{2.37}$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

และ

$$S_{nl} = qV_{1,nl}I_{1.nl} \tag{2.38}$$

S_{nl} = กำลังทั้งหมดป้อนเข้าขณะไม่มีภาระ
ซึ่ง X_{nl} สามารถคำนวณได้จาก Q_{nl} และ $I_{q,nl}$

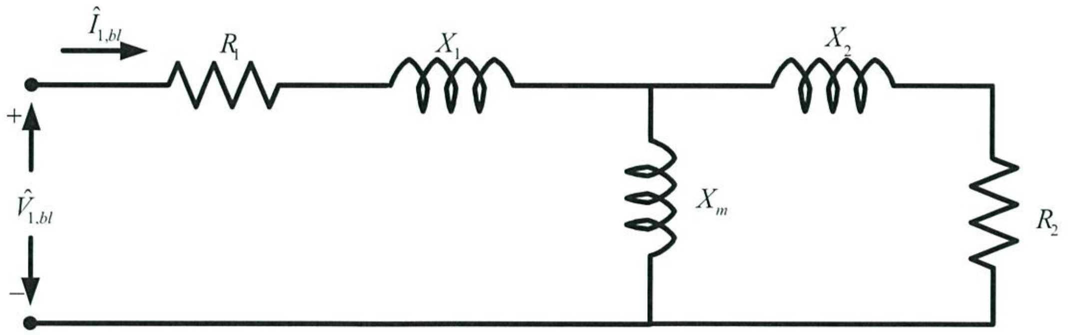
$$X_{nl} = \frac{Q_{nl}}{qI_{1,nl}^2} \tag{2.39}$$

สังเกตได้ว่า ค่าตัวประกอบกำลังที่ขณะไม่มีภาระ มีค่าน้อย ดังนั้น ค่าความต้านทานเสมือนขณะไม่มีภาระ สามารถคำนวณได้จาก

$$X_{nl} \approx \frac{V_{1,nl}}{I_{1,nl}} \tag{2.40}$$

2.7 การทดสอบตรึงโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test)

ทำการทดสอบเหมือนกับการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลง การทดสอบตรึงโรเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ข้อมูลที่ต้องการ คือ อิมพีแดนซ์รั่วไหล โรเตอร์จะถูกตรึงทำให้ไม่สามารถหมุนได้ (ค่าสลิปเท่ากับศูนย์) และจ่ายแรงดันที่สมดุลเท่ากันทุกเฟสที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยทำการวัด แรงดัน ($V_{1,bl}$) ,กระแส ($I_{1,bl}$) ,กำลังทางไฟฟ้าขาเข้าทั้งหมด (P_{bl}) และความถี่ที่ใช้ในการตรึงโรเตอร์ (F_{bl}) ในบางกรณีสามารถวัดแรงบิดขณะที่ทำการทดสอบตรึงโรเตอร์ได้ด้วย



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะตรึงโรเตอร์

วงจรสมมูลของการทดสอบตรึงโรเตอร์ เหมือนกันกับการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลง แต่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความซับซ้อนมากกว่าหม้อแปลง เพราะว่าอิมพีแดนซ์รั่วไหลอาจจะมีผลกระทบกับการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก

144433

สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเสมือนจากการทดสอบตรึงโรเตอร์ โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนจากการทดสอบตรึงโรเตอร์คำนวณได้จาก

$$Q_{bl} = \sqrt{{S_{bl}}^2 - {P_{bl}}^2} \tag{2.41}$$

เมื่อ

$$S_{bl} = qV_{1,bl}I_{1,bl} \tag{2.41}$$

โดยที่ S_{bl} = ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏจากการทดสอบตรึงโรเตอร์

ดังนั้นค่าความต้านทานเสมือนจากการทดสอบตรึงโรเตอร์ที่ทำงานที่ความถี่พิกัดสามารถคำนวณได้จาก

$$X_{bl} = \left(\frac{f_{re}}{f_{bl}}\right)\left(\frac{Q_{bl}}{qI_{1,bl}^2}\right) \tag{2.42}$$

โดยที่ f_{bl} = ความถี่ของการทดสอบตรึงโรเตอร์

ความต้านทานจากการทดสอบตรึงโรเตอร์ สามารถคำนวณได้จาก กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าที่วัดได้จากการทดสอบบล็อกโรเตอร์

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{qI_{1,bl}^2} \tag{2.43}$$

อีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สามารถหาค่าได้ คือค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าที่สเตเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการจากรูปที่ 2.7

$$\begin{aligned} Z_{bl} &= R_1 + jX_1 + \left(R_1 + jX_2\right) \; // \; jX_m \\ &= R_1 + \frac{R_2X_m^2}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} + j\left(X_1 + \frac{X_m(R_2^2 + X_2(X_m + X_2))}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2}\right) \end{aligned} \tag{2.44}$$

โดยสมมติให้ค่าความต้านทานเสมือนมีค่าที่ความถี่พิกัดค่าความต้านทานจากการทดสอบตรึงโรเตอร์มีค่าตรงกับสมการที่ 2.44

$$R_{bl} = R_1 + \frac{R_2X_m^2}{R_2^2 + \left(X_m + X_2\right)^2} \tag{2.45}$$

$$X_{bl} = X_1 + \frac{X_m(R_2^2 + X_2(X_m + X_2))}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} \tag{2.46}$$

ในการแก้สมการ เพื่อหาค่า X_2 และ R_2 ตามสมการ 2.44 และ 2.45 จะเห็นได้ว่ามีความยุ่งยากซับซ้อน ไม่มีวิธีธรรมดาที่สามารถแก้ได้ เพื่อทำให้ง่ายขึ้นทำได้โดยการประมาณค่าให้ $R_2 << X_m$ ในสมการ 2.45 และ 2.46 ได้สมการใหม่ดังนี้

$$R_{bl} = R_1 + R_2\left(\frac{X_m}{X_2 + X_m}\right)^2 \tag{2.47}$$

และ

$$X_{bl} = X_1 + X_2\left(\frac{X_m}{X_2 + X_m}\right) \tag{2.48}$$

จากสมการ 2.47 และ 2.48 สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานโรเตอร์ (R_2) และค่าความต้านทานเสมือนรั่วไหล (X_2) ได้ตามสมการต่อไปนี้

$$R_2 = \left(R_{bl} - R_1\right)\left(\frac{X_2 + X_m}{X_m}\right)^2 \tag{2.49}$$

และ

$$X_2 = \left(X_{bl} - X_1\right)\left(\frac{X_m}{X_m + X_1 - X_{bl}}\right) \tag{2.50}$$

ในกรณีแบบนี้จะได้รับค่าที่แม่นยำที่สุดด้วยการทดสอบแบบไม่มีภาระ ถ้าเป็นไปได้ค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ R_1 ใช้ในสมการ R_2 ควรจะใช้ค่าที่อุณหภูมิเดียวกันกับการทดสอบตรึงโรเตอร์ แทน X_m จากสมการที่ 2.36 ใน สมการที่ 2.50 จะได้

$$X_2 = \left(X_{bl} - X_1\right)\left(\frac{X_{nl} - X_1}{X_{nl} - X_{bl}}\right) \tag{2.51}$$

จากสมการที่ 2.51 สามารถหาค่าความต้านทานเสมือนรั่วไหลที่โรเตอร์ จากค่า X_{nl} และ X_{bl} และไม่สามารถหาค่าความต้านทานเสมือนรั่วไหลที่สเตเตอร์ได้ ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์มีผลกระทบเล็กน้อยเกี่ยวกับความต้านทานเสมือนรั่วไหลทั้งที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ ขึ้นอยู่กับระดับของมอเตอร์ มาตรฐาน IEEE112 แนะนำจากการทดลองการกระจายขึ้นอยู่กับระดับของมอเตอร์ แสดงในตารางที่ 2.1 ถ้าไม่สามารถระบุระดับของมอเตอร์ได้ โดยปกติจะให้ค่า X_1 และ X_2 เท่ากัน ค่าความต้านทานเสมือนทางแม่เหล็ก สามารถหาได้จากสมการที่ 2.52

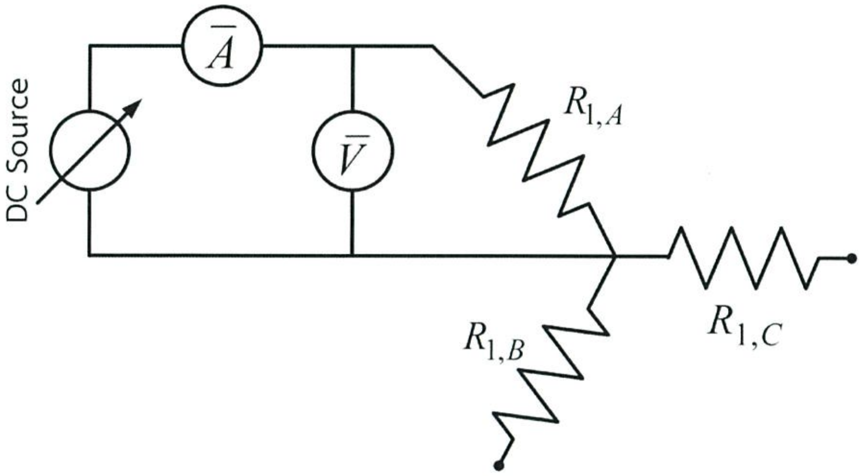
$$X_m = X_{nl} - X_1 \tag{2.52}$$

ตารางที่ 1.1 การกระจายของความต้านทานเสมือนรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

Motor class	Description	Fraction of (X_1+X_2)	
		X_1	X_2
A	Normal staring torqe,normal staring current	0.5	0.5
B	Normal staring torqe ,low starting current	0.4	0.6
C	High starting torque ,low staring current	0.3	0.7
D	High starting torque,high slip	0.5	0.5
Wound rotor	Performance varies with rotor resistance	0.5	0.5

Sorce:IEEE Standard 112.

2.8 การทดสอบหาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 2.8 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

สำหรับการทดสอบหาความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (V-I Method) ทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์ แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้า จะสามารถหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ดังสมการที่ 2.53

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \tag{2.53}$$

2.9 การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความฝืดและแรงลม (Friction and windage losses)

ทดสอบได้จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่เท่ากับพิกัดของมอเตอร์ขณะไม่มีภาระ ซึ่งทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากค่าน้อยๆ ขึ้นจนไปถึงประมาณ 125% ของค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่า Friction and windage losses (P_{fw}) หาได้จากการนำค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (P_{in}) มาลบกับค่าความสูญเสียจากขดลวดที่สเตเตอร์ (Stator Copper Loss) จากสมการที่ 2.9 แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง (เนื่องจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กแปรตามค่าแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง) โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงลมจะหาได้ที่แรงดันไฟฟ้าค่าน้อยๆ ในขณะที่มอเตอร์จะเริ่มหมุน

2.10 ทฤษฎีการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก ทำงานได้โดยไม่มีขดลวดกระตุ้น เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปที่ขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นที่สเตเตอร์เกิดเป็นสนามแม่เหล็กหมุน และสนามแม่เหล็กหมุนนี้จะตัดผ่านตัวนำของโรเตอร์ที่ต่อแบบลัดวงจรกันอยู่ ทำให้เกิดกระแสไหลในตัวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำของโรเตอร์ ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นกับตัวนำในโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศของสนามแม่เหล็กหมุน

จากสมการที่ 2.2 เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ขึ้นอยู่กับความเร็วของโรเตอร์ เมื่อความเร็วรอบของโรเตอร์ มีค่าน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัส เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานเป็นมอเตอร์ ซึ่งจะได้ค่าสลิป (s) เป็นบวก และเมื่อความเร็วโรเตอร์มีค่ามากกว่าความเร็วซิงโครนัส เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งค่าสลิป (s) จะเป็นลบ

เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นมอเตอร์ ค่าสลิปอยู่ที่ 0-1 และทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าค่าสลิปจะติดลบ

เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสภาวะเป็นมอเตอร์ จะมีความเร็วโรเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กหมุน โดยที่สลิปมีค่าเป็นบวก จะดึงกระแส 2 ส่วนจากแหล่งจ่ายไฟ ได้แก่ ส่วนแรกจะใช้ในการกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและส่วนที่สองจะใช้ในการสร้างกำลังจริง กำลังงานเอาท์พุททางกลและความสูญเสียภายใน ถ้าโหลดถูกตัดออกไป มอเตอร์ก็จะยังคงดึงกระแสส่วนที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กเท่าเดิม กระแสที่ใช้ในการสร้างกำลังจริงจะมีค่าน้อยมากเนื่องจากถูกใช้ในส่วนของสูญเสียภายในเท่านั้น

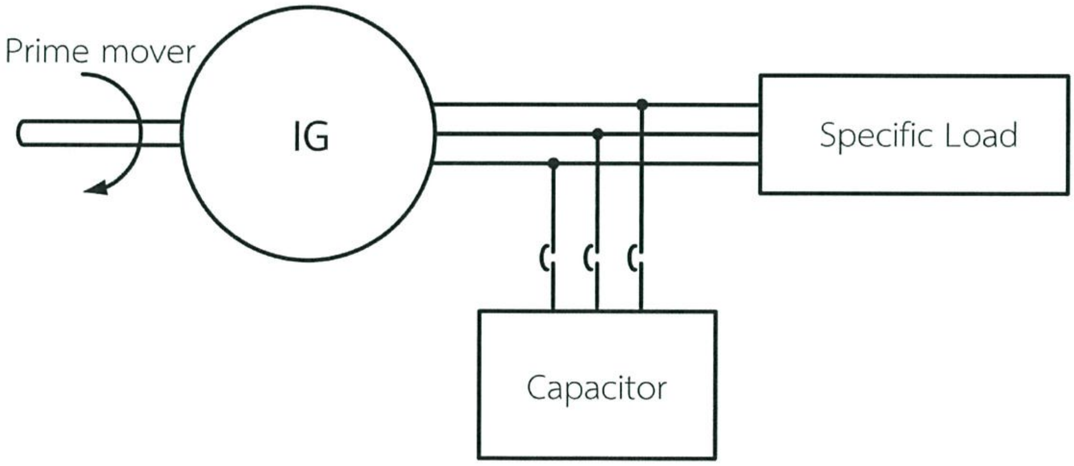
เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะต้องมีการจ่ายกำลังทางกลเข้าไปที่เพลาของโรเตอร์เพื่อเป็นตัวต้นกำลังขับจนกระทั่งความเร็วของโรเตอร์มีค่ามากกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งมีค่าสลิปติดลบและเมื่อมีการปรับระดับความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้นและจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบมากขึ้น และกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าพิกัด เมื่อเกิดสภาวะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จะได้เส้นกราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเกิดสภาวะเป็นเครื่องกำนิดไฟฟ้าแล้ว เพื่อเป็นการชดเชยค่าฟลักซ์แม่เหล็ก โดยการไหลของ

กระแสสเตเตอร์จะมีทิศทางการไหลสวนทางกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีกระแสกระตุ้นอย่างต่อเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กหมุน หรือเปรียบเสมือนว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (active power) กลับไปยังแหล่งจ่ายแต่รับกำลังไฟฟ้าเสมือน (reactive power) จากระบบแหล่งจ่ายอยู่เช่นเดิม และความถี่ของแรงดันที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งก็เป็นความถี่เดียวกันกับไฟที่ป้อนเข้าถ้าไม่มีแหล่งจ่ายกระแสกระตุ้นจากภายนอกแล้วเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่แสดงพฤติกรรมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เลยโดยที่ตัวต้นกำลังจะจ่ายกำลังทางกลเข้าที่โรเตอร์จากนั้นกำลังทางกลจะถูกแปลงเป็นกำลังไฟฟ้าผ่าน โรเตอร์ไปยังสเตเตอร์ แล้วส่งต่อไปยังระบบไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อดีคือมีความแข็งแรงทนทานต้องการการบำรุงรักษาน้อย มีระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อนมีโครงสร้างที่มีน้ำหนักต่อหน่วยผลิตต่ำ ไม่ต้องการการซิงโครไนซ์เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เมื่อเทียบราคาติดตั้งต่อหน่วยผลิตกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่นๆแล้วจะมีราคาถูกกว่า ไม่ต้องการกำลังในการหมุนคงที่

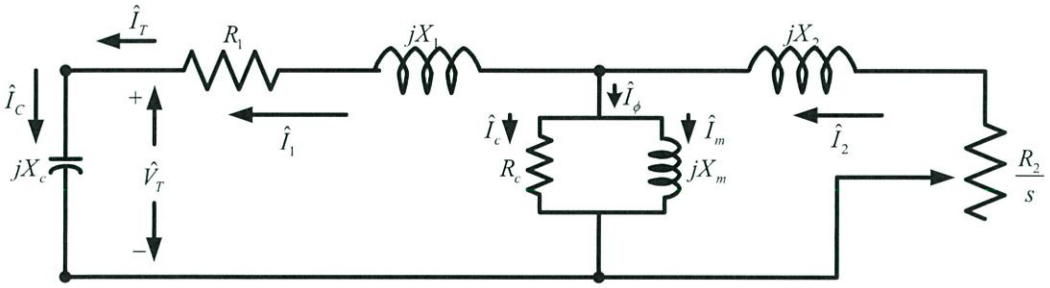
แต่ข้อจำกัดที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสก็คือไม่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนได้โดยปกติแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแสดงพฤติกรรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้กับระบบแต่ในทางตรงกันข้ามกลับมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้แสดงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในขณะเดียวกันก็แสดงพฤติกรรมเป็นภาระแบบเหนี่ยวนำด้วยเช่นกัน ดังนั้นในระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ดีแล้วควรใช้ตัวเก็บประจุต่อเข้าไปในระบบเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน



รูปที่ 2.9 ตัวเก็บประจุต่อขนานแต่ละเฟสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

2.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

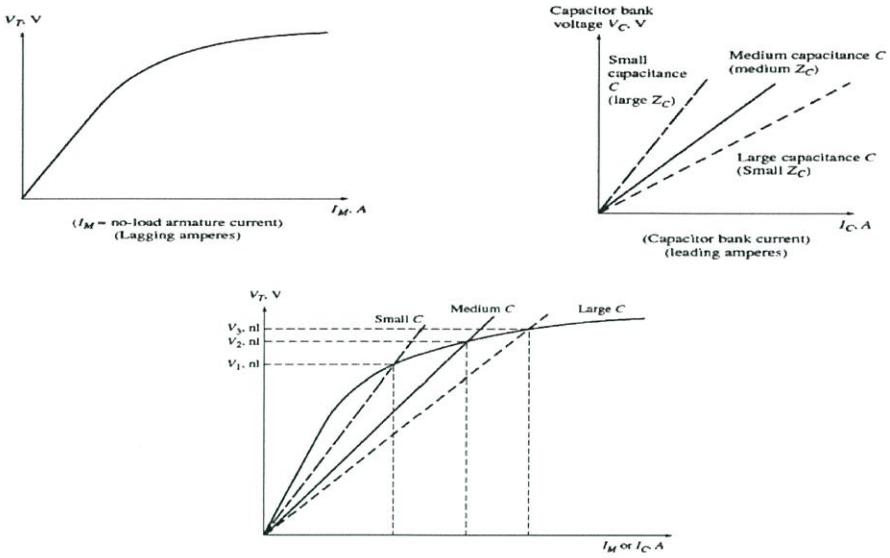
เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอกสามารถทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยการใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานไปที่ขั้วของ สเตเตอร์ในแต่ละเฟส ดังรูปที่ 2.9 ในการต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ในแต่ละเฟสนั้นเพื่อเป็นการกระตุ้น และเป็นการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนท์ที่ความถี่เดียวกัน ระหว่างค่าตัว Capacitive reactanceและ Inductive reactance ($X_c = X_m$)



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

หลักการทำงานจะคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยการอาศัยปรากฏการณ์ที่ เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และมีต้นกำลังมาขับเพลาของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หมุนด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ขณะไม่มีภาระ ฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กที่อยู่ในวงจรแม่เหล็กของโรเตอร์จะตัดผ่านขดลวดสเตเตอร์เกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำค่าต่ำ ๆ ขึ้นมาค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำค่าต่ำ ๆ ที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะตกคร่อมตัวเก็บประจุทำให้เกิดกระแสไหลที่ตัวเก็บประจุ ($\hat{I}_c$) ซึ่งกระแสนี้จะส่งผลทำให้กระแสกระตุ้นในการสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ($\hat{I}_m$) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ($\hat{V}_T$) มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยและกระแสที่มาจากตัวเก็บประจุก็เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเอง ส่งผลให้กระแสที่กระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็กเพิ่มขณะเดียวกันก็ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเพิ่มขึ้นอีก จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งซึ่งเป็นจุดสมดุลก็จะไม่มีการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอีก ซึ่งก็คือการสร้างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง จุดสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมานั้นขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุ และความเร็วของโรเตอร์ ซึ่งมีผลโดยตรงกับความเร็วซิงโครนัส และความถี่ทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของขนาดตัวเก็บประจุกับการสร้างแรงดันไฟฟ้าขณะไร้ภาระทางไฟฟ้า

ในการหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมนั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.54 ถึง 2.63 ดังนี้

$$V_T = I_m X_m \tag{2.54}$$

$$V_T = I_c X_c \tag{2.55}$$

โดยที่

$$X_m = \omega L \tag{2.56}$$

$$X_m = 2\pi fL \tag{2.57}$$

และ

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fL} \tag{2.58}$$

เพื่อทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนท์ที่ความถี่เดียวกัน ระหว่าง Capacitive reactance และ Inductive reactance ทำได้โดยพิจารณาสมการดังต่อไปนี้

$$X_m = X_c \tag{2.59}$$

$$I_m = I_c \tag{2.60}$$

$$\frac{V_T}{2\pi fL} = 2\pi fCV_T \tag{2.61}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \tag{2.62}$$

จะสามารถหาค่า L ได้จาก

$$L = \frac{X_m}{2\pi f} \tag{2.63}$$

2.12 จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms) [5]

จีเนติกอัลกอริธึม (GAs) คือ เป็นเทคนิคสำหรับใช้หาผลเฉลย (solutions) หรือคำตอบโดยประมาณของปัญหา ด้วยการเลียนแบบทฤษฎีวิวัฒนาการจากชีววิทยา และ การคัดเลือกตามธรรมชาติ (natural selection) นั่นคือ สิ่งมีชีวิตที่เหมาะสมที่สุดจึงจะอยู่รอด กระบวนการคัดเลือกได้เปลี่ยนแปลงสิ่งมีชีวิตให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ด้วยตัวปฏิบัติการทางพันธุกรรม (genetic operator) เช่น การสืบพันธุ์ (inheritance หรือ reproduction) , การกลายพันธุ์ (mutation) , การแลกเปลี่ยนยีน (recombination)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อแก้ปัญหาหาค่าเหมาะที่สุด (optimal solution) โดยการแทนคำตอบที่มีอยู่ให้อยู่ในลักษณะ โครโมโซม (chromosomes) แล้วปรับปรุงคำตอบแต่ละชุด (เรียกว่า individual) ด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการวิวัฒนาการ (evolutionary operation) การเปลี่ยนแปลงยีนแบบสุ่ม ด้วยตัวปฏิบัติการทางพันธุกรรม (evolutionary operator) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น โดยทั่วไปจะแทนคำตอบด้วยเลขฐานสอง (สายอักขระของเลข 0 และ 1) การวิวัฒนาการ (evolution) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (the fitness solution) จะเริ่มจากประชากรที่ได้จากการสุ่มทั้งหมดและจะทำเป็นรุ่น ๆ ในแต่ละรุ่นคำตอบหลายชุดจะถูกสุ่มเลือกขึ้นมาเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการกลายพันธุ์ หรือสับเปลี่ยนยีนระหว่างกัน จนได้ประชากรรุ่นใหม่ ที่มีค่าความเหมาะสม (fitness) มากขึ้น การวิวัฒนาการนี้จะทำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพบคำตอบที่มีค่าความเหมาะสมตามต้องการ

หลักการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นจะเป็นการปรับเปลี่ยนยีนของโครโมโซมนั้นไปสู่ยีนของโครโมโซมที่ดีกว่าเดิม โดยหลักการทำงานนั้นเริ่มต้นมักจะเป็นการสุ่มยีนแต่ละตัวออกมาเป็นโครโมโซมเริ่มต้นในแต่ละรุ่นและจะทำการตรวจสอบค่าคุณภาพของโครโมโซมแต่ละตัวและทำการคัดเลือกตัวที่เหมาะสมออกมาโดยใช้ค่าความเหมาะสม (fitness) และทำให้เกิดการกลายพันธ์ (mutation) และการไขว้เปลี่ยน (cross over) ของโครโมโซมในโครโมโซมที่ได้เลือกออกมาโดยจะเป็นการสุ่มหลังจากที่เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะนำพันธุกรรมที่ได้ไปวนเข้ากระบวนการเดิมต่อไปเพื่อให้ได้โครโมโซมที่มีคุณภาพที่ดีที่สุดออกมา โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นจำเป็นต้องมี

1. วิธีการแทนค่ายีนของผลลัพธ์ (genetic representation)
2. วิธีการหาความเหมาะสม (fitness function)

โดยทั่วไปแล้วการแทนค่ายีนนั้นจะใช้เป็นอาเรย์ของบิท (array of bits) แต่ก็สามารถใช้แบบอื่นๆตามรูปแบบของปัญหาที่ต้องการแก้ไขก็ได้เช่นกัน วิธีการหาความเหมาะสมนั้นจะใช้การแทนค่ายีนมาในการคำนวณเพื่อหาคุณภาพของยีนนั้นๆ และนำคุณภาพของยีนไปหาความเหมาะสมในรุ่นนั้นๆต่อไป

การกำหนดค่าเริ่มต้น

โดยส่วนใหญ่จะทำการสุ่มค่าผลลัพธ์ของคำตอบ (ยีน) โดยจำนวนของยีนเริ่มต้นนั้นจะขึ้นกับปัญหาที่ต้องการแก้ไขว่าควรจะใช้จำนวนมากขนาดไหนแต่ตามปกติจำนวนจะประมาณหนึ่งร้อยไปจนถึงหนึ่งพันยีน และอาจจะทำการสุ่มโดยมีนัยสำคัญในการสุ่มเพื่อให้ค่าเข้าใกล้กับคำตอบได้แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหานั้นๆ

การคัดเลือก

ระหว่างรุ่นของยีนแต่ละรุ่นนั้นจะมีการคัดเลือดยีนที่มีความเหมาะสมมากกว่าไปยังยีนรุ่นต่อไปโดยทำอย่างนี้เพื่อให้สามารถเข้าใกล้คำตอบของปัญหาได้มากยิ่งขึ้นโดยการคัดเลือกนั้นจะใช้การคัดเลือกโดยการใช้[ความเหมาะสม] (fitness-base) โดยการใช้ค่าของคุณภาพของยีนแต่ละตัวนำไปหาค่าความเหมาะสมได้จากกระบวนหาความเหมาะสม (fitness-function) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามแต่ละปัญหา หรืออาจจะใช้การสุ่มเพื่อให้เข้าถึงคำตอบได้แต่อาจจะใช้เวลาที่นานมากเกินไป

การผลิตรุ่นถัดไป

หลังจากการคัดเลือกยีนที่มีความเหมาะสมแล้วเราจะใช้ยีนเหล่านั้นในการสร้างยีนรุ่นถัดไปโดยจะใช้วิธีการทำให้เกิดการกลายพันธ์ (mutation) หรือการไขว้เปลี่ยน (cross over) โดยจะทำการคัดเลือกยีนออกมาเป็นคู่ๆแล้วทำวิธีดังที่ได้กล่าวมา ซึ่งตามทฤษฎีแล้วจะต้องได้ค่าเฉลี่ยของคุณภาพของยีนที่ดีขึ้นเนื่องจากได้ทำการคัดเลือกยีนที่มีคุณภาพดีจากรุ่นที่แล้วมาใช้นั่นเองจากการผลิตรุ่นถัดไปด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้ยีนที่แตกต่างจากยีนเดิมและยังมีคุณภาพเฉลี่ยที่ดีขึ้นอีกด้วย วิธีการนำยีนสองตัวนั้นมาผลิตรุ่นถัดไปนั้นเป็นวิธีการเลียนแบบทางชีววิทยาแต่จากการวิจัยพบว่าถ้าใช้หลายๆยีนมาผลิตรุ่นถัดไปพบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบคู่อีกด้วย

การจบการทำงาน

กระบวนการข้างต้นนี้จะวนซ้ำไปเรื่อยๆจนกว่าจะถึงเงื่อนไขในการจบการทำงานโดยส่วนใหญ่จะเป็นดังนี้

1. พบผลลัพธ์ที่อยู่ในเกณฑ์พอใจแล้ว
2. ถึงรุ่นสุดท้ายที่ได้กำหนดไว้แล้ว
3. ทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณหมดแล้ว
4. พบคำตอบที่มีความเหมาะสมอยู่ในระดับสูงสุดแล้ว
5. ตรวจสอบด้วยผู้ควบคุมเอง
6. การนำเงื่อนไขต่างๆด้านบนต่างๆมาประยุกต์รวมกัน

รหัสเทียม

1. เลือกค่าเริ่มต้นของประชากรแต่ละตัว
2. คำนวณค่าความเหมาะสมของประชากรแต่ละตัว
3. ทำการคำนวณซ้ำในรอบนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าจะเลิกการทำงาน

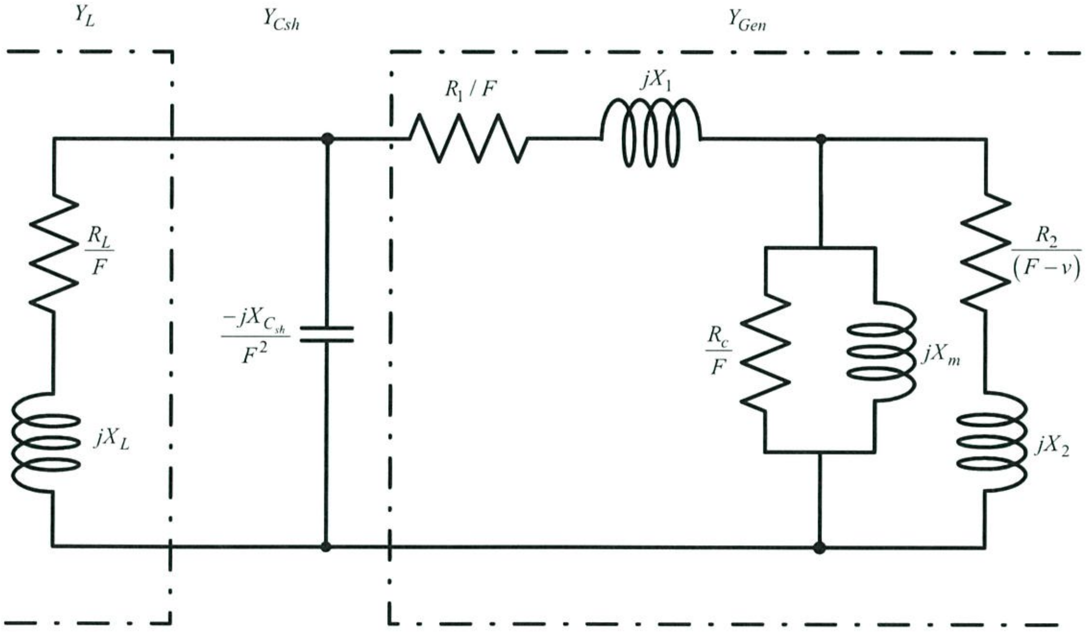
จีเนติกอัลกอริทึมเหมาะสำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมหรือคำตอบที่ใกล้เคียงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่บางครั้งอาจไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแม่นยำด้วยบางสาเหตุ อย่างไรก็แล้วแต่มีนักวิจัยหลายคนได้ใช้วิธีนี้ในการช่วยหาคำตอบที่เหมาะสมได้ค่าใกล้เคียงที่สุดแล้วจึงเป็นเหตุให้วิธีจีเนติกอัลกอริทึมได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน

บทที่ 3
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

3.1 บทนำ

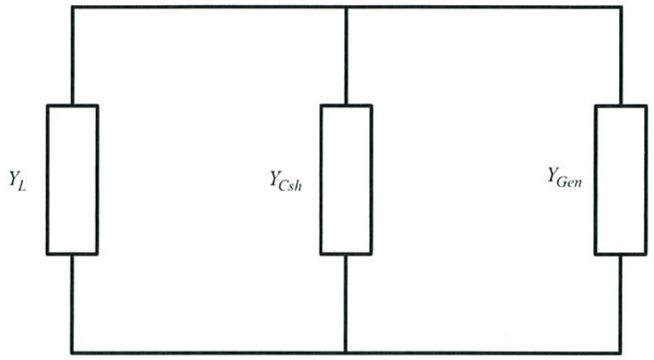
ในบทนี้นำเสนอการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานสำหรับการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าแบบ unity p.f. และแบบ Lagging p.f. ค่าต่างๆ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ และกรณีความถี่คงที่ โดยแสดงให้เห็นถึงปัญหาของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว

3.2 การหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

ใช้หลักการ Nodal admittanceในการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน (C_{sh}) ขณะต่อกับภาระไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลจากรูปที่ 3.1 โดยจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของ admittance

จากรูปที่ 3.1 สามารถแสดงสมการจัดรูปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลได้ดังสมการที่ 3.1

อิมพิแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้า (Z_L)

$$Z_L = \left(\frac{R_L}{F}\right) + jX_L \tag{3.1}$$

อิมพิแดนซ์ของตัวเก็บประจุแบบขนาน (Z_{Csh})

$$Z_{Csh} = \left(\frac{-jX_{Csh}}{F^2}\right) \tag{3.2}$$

อิมพิแดนซ์ของ SEIG (Z_{GEN})

$$Z_{GEN} = Z_1 + Z_f \tag{3.3}$$

โดยที่

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \tag{3.4}$$

อิมพิแดนซ์รวมระหว่างอิมพิแดนซ์ส่วนกระตุ้นและอิมพิแดนซ์ของโรเตอร์ (Z_f)

$$Z_f = \frac{Z_m Z_2}{Z_m + Z_2} \tag{3.5}$$

อิมพิแดนซ์ของส่วนกระตุ้น (Z_m)

$$Z_m = \frac{jX_m \cdot \left(\frac{R_c}{F}\right)}{jX_m + \left(\frac{R_c}{F}\right)} \tag{3.6}$$

อิมพิแดนซ์ของโรเตอร์ (Z_2)

$$Z_2 = \frac{R_2}{F - v} + jX_2 \tag{3.7}$$

จาก Kirchoff current law

$$\frac{V_t}{F}\left(Y_L + Y_{Csh} + Y_{GEN}\right) = 0 \tag{3.8}$$

เมื่อ SEIG มีการสร้างแรงดันเกิดขึ้นทำให้ค่า $\frac{V_t}{F} \neq 0$

จะได้ว่า

$$Y_L + Y_{Csh} + Y_{GEN} = 0 \tag{3.9}$$

โดยที่

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} \tag{3.10}$$

$$Y_{Csh} = \frac{1}{Z_{Csh}} \tag{3.11}$$

$$Y_{GEN} = \frac{1}{Z_{GEN}} \tag{3.12}$$

จากสมการ 3.1 ถึง 3.12 ตัวแปรที่ทราบค่า คือ ค่าตัวแปรที่หาค่าได้จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ($R_1, R_2, R_c, X_1, X_2, X_m$) ซึ่งมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (X_{Csh}, F, v, Z_L) ดังนั้นจึงต้องกำหนดเงื่อนไขในการหาค่าตัวเก็บประจุ โดยพิจารณาถึงความเหมาะสมทางด้านทฤษฎี และปฏิบัติ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวแปร F, v เป็นค่าตัวแปรที่ไม่สามารถกำหนดให้คงที่พร้อมกันได้ ในทางปฏิบัติจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการหมุนต้นกำลังด้วยความเร็ว 1500 rpm ($v = 1$) ค่าความถี่ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 50 Hz (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบมี 4 ขั้ว) อีกกรณี คือ กำหนดให้ความถี่ 50 Hz ($F = 1$) ค่าความเร็วต้นกำลังจะต้องมีค่ามากกว่า 1500 rpm เพื่อให้ค่าสลิปมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่า ค่าตัวแปร F, v มีความสัมพันธ์กันจะกำหนดให้คงที่ทั้งสองตัวพร้อมกันไม่ได้ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปร F หรือ v เพียงตัวเดียวเท่านั้น ตัวแปรที่เหลือต้องกำหนดเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ตัวแปร Z_L สามารถกำหนดค่าได้โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

$$I_{phase} = \frac{\frac{P_{rated}}{3} \times \frac{\%load}{100}}{V_{rated} \times p.f.} \tag{3.13}$$

เงื่อนไขในการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) และความถี่คงที่ ($F=1$) เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้า แบบ Unity p.f. และแบบ lagging p.f. โดยการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะได้จากการแก้สมการโดยใช้วิธีจีเนติกอัลกอริทึม ซึ่งมีสมการเป้าหมาย ดังนี้

$$F_{objective} = \frac{1}{2}\left|Y_L + Y_{Csh} + Y_{Gen}\right| \tag{3.14}$$

3.3 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

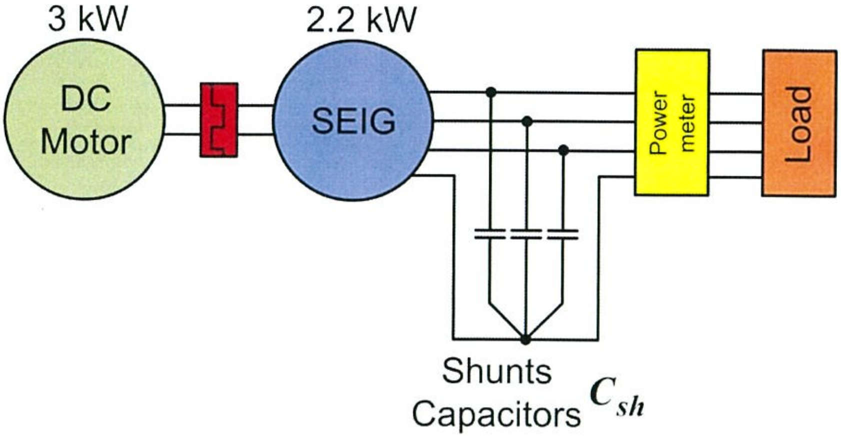
เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่ นำมาใช้ทดลองมีขนาด 2.2 kW โดยมีค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ได้จากการทดสอบตามหัวข้อ 2.5-2.6

ตารางที่ 3.1 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบ

พิกัดกำลัง (kW)	พิกัดแรงดัน (V)	พิกัดกระแส (A)	พิกัดความเร็วรอบ (rpm)	พิกัดความถี่ (Hz)
2.2	220/380	8.7/5.0	1420	50

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง พิกัด 2.2 kW

$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_c(\Omega)$
3.055	3.159	2.962	4.443	86.054	1346.23



รูปที่ 3.3 วงจรการทดสอบ SEIG 2.2 kW ที่มีรูปการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

3.3.1 การทดสอบ shunt SEIG ขนาด 2.2 kW กรณีความเร็วคงที่ ($v = 1$)

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองขนาด 2.2 kW สามารถแสดงค่าออกแบบตัวเก็บประจุแบบขนานในกรณี ($v = 1$) เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ unity p.f.และแบบ Lagging p.f.ได้ดังตารางที่ 3.3 (Unity p.f.),ตารางที่ 3.5 (0.88 Lagging p.f. และ 0.97 Lagging p.f.) และแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz ($v = 1$) จ่ายภาระไฟฟ้า Unity p.f.

Load (%)	C_{sh} (μF)	f (Hz)
10	36.9	49.56
20	37.9	49.32
40	40.2	48.83
60	43.0	48.35
80	46.3	47.89
100	50.3	47.44

จากผลการออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุขนานในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v = 1$) เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. พบว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนานจะอยู่ระหว่าง 36.9-50.3 μF โดยคำนวณตามภาระทางไฟฟ้าตั้งแต่ 10-100% ซึ่งในการทดสอบจะเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ คือ 35.1 μF 41.5 μF 46.6 μF 50.1 μF และ55.8 μF เพื่อทำการเปรียบเทียบการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่างๆกรณีความเร็วคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

C_{sh} (μF)	Load(%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	I_c (A)	f (Hz)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
35.1	2.98	65.46	218.2	0.1	2.6	49.92	$2.6\angle 87.42$	-0.82
	6.42	141.3	216.6	0.2	2.6	49.84	$2.6\angle 84.95$	-1.55
	9.70	213.3	213.5	0.3	2.5	49.72	$2.5\angle 82.47$	-2.95
	13.09	288	210.3	0.5	2.4	49.56	$2.5\angle 79.57$	-4.41
	18.57	408.6	205.4	0.7	2.3	49.5	$2.4\angle 74.45$	-6.64
	23.45	516	198.5	0.9	2.2	49.32	$2.4\angle 68.90$	-9.77
41.5	21.45	471.9	226.3	0.7	3.2	49.44	$3.2\angle 77.7$	2.86
	24.87	547.2	225.4	0.8	3.1	49.49	$3.3\angle 75.64$	2.45
	27.91	614.1	221.9	0.9	3.1	49.35	$3.2\angle 73.38$	0.86
	33.50	737.1	216.7	1.1	3	49.17	$3.2\angle 69.2$	-1.50
	39.18	861.9	212.2	1.4	2.8	49.08	$3.2\angle 64.85$	-3.55
	45.85	1008.6	204.1	1.7	2.7	48.9	$3.2\angle 59.0$	-7.23
	47.47	1044.3	200.6	1.7	2.6	48.82	$3.1\angle 56.77$	-8.82
46.6	42.85	942.6	226	1.4	3.5	49.01	$3.7\angle 68.28$	2.73
	48.63	1069.8	220.3	1.6	3.3	48.97	$3.7\angle 64.78$	0.14
	52.87	1163.1	216	1.8	3.2	48.69	$3.7\angle 60.92$	-1.82
	57.67	1268.7	211.4	2	3.1	48.65	$3.7\angle 57.72$	-3.91
	61.01	1342.2	205.4	2.2	3	48.56	$3.7\angle 54.27$	-6.64
	65.39	1438.5	190	2.5	2.7	48.3	$3.7\angle 47.78$	-13.64
50.1	56.36	1239.9	223.8	1.8	3.8	48.89	$4.1\angle 63.64$	1.73
	66.05	1453.2	215.6	2.2	3.4	48.63	$4.1\angle 57.18$	-2
	71.80	1579.5	202.1	2.6	3.2	48.28	$4.1\angle 50.73$	-8.14
	73.25	1611.6	188.9	2.8	2.9	48.03	$4.1\angle 45.65$	-14.14
55.8	70.43	1549.5	229.2	2.3	4.2	48.63	$4.8\angle 61.71$	4.18
	79.38	1746.3	219.8	2.7	4.0	48.41	$4.8\angle 55.88$	-0.09
	85.57	1882.5	208.2	3	3.6	48.18	$4.7\angle 50.36$	-5.36
	88.83	1954.2	195	3.3	3.4	47.98	$4.7\angle 45.57$	-11.36

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 3.4 เมื่อนำค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้จากการออกแบบไปทดสอบกับค่าภาระทางไฟฟ้าที่ออกแบบไว้ พบว่าไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) โดยพิจารณาได้จากค่าตัวเก็บประจุที่

ออกแบบได้ที่ค่าภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 80% คือ 46.3 μF ตารางที่ 3.3 แต่เมื่อนำค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน 46.6 μF ไปทดสอบกับภาระทางไฟฟ้า พบว่าสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าได้ดี (0.14%) ขณะค่าภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 48.63% แต่เมื่อเปลี่ยนค่าภาระทางไฟฟ้าเป็น 65.39% นั้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ -13.64% ซึ่งถ้าต้องการรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) ที่ค่าภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 80 % ต้องเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนานเป็น 55.8 μF (จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.4 ที่ตัวเก็บประจุเท่ากับ 55.8 μF ค่าภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 79.38% มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าเท่ากับ-0.09%)

ตารางที่ 3.5 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วคงที่ ($v=1$) จ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า p.f. 0.97

$p.f.$	Load (%)	C_{sh} (μF)	f (Hz)
0.88	30.35	45.7	49.09
0.97	28.51	42.4	49.1
	57.02	49.3	48.42

ตารางที่ 3.6 ผลกาทดสอบแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความเร็วคงที่ ($v=1$)

$p.f.$	Load(%)	C_{sh} (μF)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	f (Hz)	V_{reg} (%)
0.88	29.29	46.6	644.38	205.7	1.1	49.17	6.5
0.97	26.51	41.5	583.22	208	1	49.38	5.45
	49.09	50.1	1079.98	200	1.9	48.76	9.09

จากผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.88 Lagging p.f. และ 0.97 Lagging p.f. นั้นเมื่อนำไปทดสอบที่ค่าภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการนั้นจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. ซึ่งไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) จะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวในกรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ไม่ว่าจะจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ unity p.f. หรือแบบ Lagging p.f. นั้นสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดีในช่วงย่านที่ค่อนข้างแคบ ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนานไปตามค่าภาระทางไฟฟ้าอยู่เสมอเพื่อรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ (±0.05 p.u.)

3.3.2 การทดสอบ shunt SEIG ขนาด 2.2 kW กรณีความถี่คงที่ ($F=1$)

ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2.2kW กรณีความถี่คงที่เมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Unity p.f. ค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบเป็นไปดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ 50 Hz ($F=1$) จ่ายภาระไฟฟ้า Unity p.f.

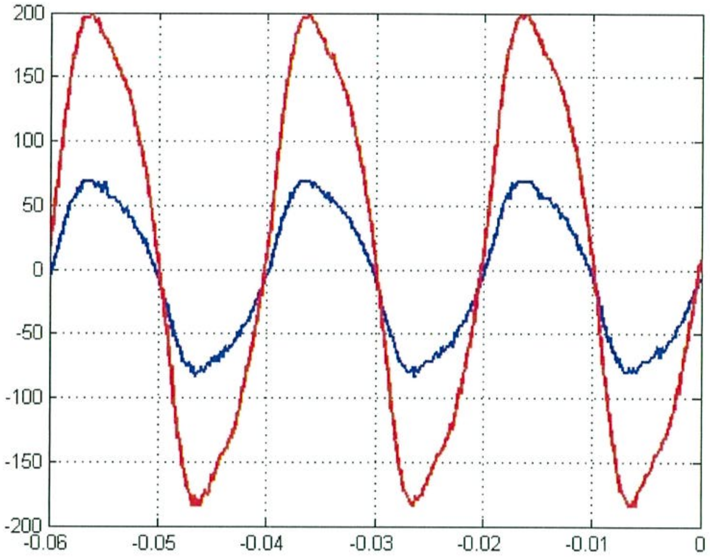
Load (%)	C_{sh} (μF)	n_r (rpm)
10	36.3	1513.16
20	36.9	1520.78
40	38.4	1535.92
60	40.4	1550.95
80	42.8	1565.94
100	45.9	1580.94

จากการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่ได้ในกรณีความถี่คงที่ จ่ายภาระไฟฟ้าเป็น Unity p.f. จะได้ว่า ค่าตัวเก็บประจุอยู่ในช่วง 36.3 – 45.9 μF ซึ่งในการทดลองจะใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 35.1 μF ,41.5 μF ,46.6 μF และ 50.1 μF สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานค่าต่างๆกรณีความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f.

C_{sh} (μF)	Load(%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	I_c (A)	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
35.1	6.71	147.6	218.5	0.2	2.6	1511	$2.6\angle 85.07$	-0.68
	13.47	296.4	214.4	0.5	2.5	1513	$2.5\angle 79.75$	-2.55
	24.79	545.4	205.5	0.9	2.4	1525	$2.5\angle 69.51$	-6.59
	34.04	748.8	193.6	1.3	2.2	1530	$2.5\angle 59.80$	-12
	37.55	826.2	171.2	1.6	1.9	1537	$2.5\angle 50.36$	-22.18
41.5	41.9182	922.2	222	1.4	3.1	1529	$3.4\angle 65.79$	0.91
	44.5909	981	219.8	1.5	3	1531	$3.4\angle 63.9$	-0.09
	47.1818	1038	217.3	1.6	3	1532	$3.4\angle 62.16$	-1.22
	49.8545	1097	215.8	1.7	2.9	1535	$3.4\angle 60.33$	-1.91
	51.9000	1142	213.3	1.8	2.9	1538	$3.4\angle 58.36$	-3.04
	59.7818	1315	201.4	2.2	2.6	1544	$3.4\angle 51.02$	-8.45
	62.6727	1379	184.4	2.5	2.4	1555	$3.5\angle 44.77$	-16.18

C_{sh} (μF)	Load(%)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	I_c (A)	n_r (rpm)	I_1 (A)	V_{reg} (%)
46.6	57.16	1257	227.4	1.8	3.5	1540	$4\angle 62.22$	3.36
	64.77	1425	216.6	2.2	3.8	1546	$4.4\angle 60.26$	-1.55
	71.82	1580	205.1	2.6	3.7	1556	$4.5\angle 55.67$	-6.77
	72.68	1599	201.3	2.7	3.7	1558	$4.6\angle 54.55$	-8.50
50.1	70.13	1544.7	229.6	2.3	3.9	1547	$4.6\angle 59.54$	4.36
	79.8	1755.6	220.8	2.7	3.6	1553	$4.5\angle 53.77$	0.36
	87.94	1934.7	210.7	3.1	3.4	1562	$4.5\angle 48.47$	-4.23



รูปที่ 3.4 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ภาระไฟฟ้าในกรณี Shunt SEIG 2.2 kW กรณีความเร็วต้นคงที่ 50 Hz ($F=1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า Unity p.f. $C_{sh}=50\mu F$ ที่ค่าภาระทางไฟฟ้าเท่ากับ 79.8%

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 3.8 เมื่อนำค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้จากการออกแบบไปทดสอบกับค่าภาระทางไฟฟ้าที่ออกแบบไว้ พบว่าไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) โดยพิจารณาได้จากค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบได้ที่ค่าภาระทางไฟฟ้า เท่ากับ 80% คือ 42.8 μF ดังตารางที่ 3.7 แต่เมื่อนำค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน 41.5 μF ไปทดสอบกับภาระทางไฟฟ้า พบว่าสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าได้ดี (0.09%) ขณะค่าภาระทางไฟฟ้า เท่ากับ 44.59% แต่เมื่อเปลี่ยนค่าภาระทางไฟฟ้าเป็น 59.78% นั้น พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ -8.45% ซึ่งถ้าต้องการรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) ที่ ค่าภาระทางไฟฟ้า เท่ากับ 80 % ต้องเพิ่มค่าตัวเก็บประจุแบบขนานให้เป็น 50.1 μF (จากผลการทดสอบในตารางที่ 3.8 ที่ตัวเก็บประจุ

เท่ากับ 50.1 μF ค่าภาระทางไฟฟ้า เท่ากับ 79.8% มีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าเท่ากับ 0.36%)

ตารางที่ 3.9 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ **50 Hz** ($F = 1$) จ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า p.f. 0.88 และ p.f. 0.97

p.f.	Load (%)	C_{sh} (μF)	n_r ( )
0.88	30.35	45.8	1528
0.97	28.51	41.0	1527
	57.02	47.2	1542

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนานของ shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีความถี่คงที่ **50 Hz** จ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า p.f. 0.88 และ p.f. 0.97

p.f.	Load (%)	C_{sh} (μF)	P_L (W)	V_L (V)	I_L (A)	n_r (rpm)	V_{reg} (%)
0.88	27.58	46.6	606.76	214.8	1.1	1521	2.36
0.97	28.03	41.5	616.8	215.4	1	1522	2.18
	49.09	46.6	1097.98	200	1.9	1536	9.09

จากผลการออกค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำเสนอในกรณีความถี่คงที่ ($F = 1$) จ่ายภาระทางไฟฟ้า 0.88 Lagging p.f. และ 0.97 Lagging p.f. นั้นเมื่อนำไปทดสอบที่ค่า ค่าภาระทางไฟฟ้า ที่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) ในกรณี p.f 0.88 ค่าภาระทางไฟฟ้า 27.58% และ p.f.0.97 ค่าภาระทางไฟฟ้า 28.03% แต่ในกรณี p.f. 0.97 ค่าภาระทางไฟฟ้า 49.09% ไม่สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) แสดงให้เห็นว่า วิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานนั้นยังมีความผิดพลาดอยู่

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เห็นได้ว่าวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่ได้นำเสนอไปข้างต้นนั้น มีความผิดพลาดค่อนข้างมาก แต่ประเด็นที่น่าสนใจคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว จะสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดีในช่วงค่อนข้างแคบ ซึ่งจะเหมาะสมกับการนำไปใช้จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

เมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าเข้าไปในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลง ทั้งนี้เพราะมีกระแสส่วนหนึ่งไหลไปยังภาระทางไฟฟ้าที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้กระแสในส่วนกระตุ้นลดต่ำลง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงด้วยเนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าตกเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงค่าของ

ตัวเก็บประจุตามขนาดของภาระทางไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่หรืออยู่ในช่วงที่ต้องการ (±0.05 p.u.) ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่ความละเอียดของตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำมาทดสอบด้วย ซึ่งถ้าค่าตัวเก็บประจุมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าก็จะลดต่ำลง ซึ่งจะทำการปรับปรุงแก้ไขปัญหานี้โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพิ่มเข้าไปเพื่อทำการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. ให้มีความเหมาะสมมากขึ้น โดยจะเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

บทที่ 4
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

4.1 บทนำ

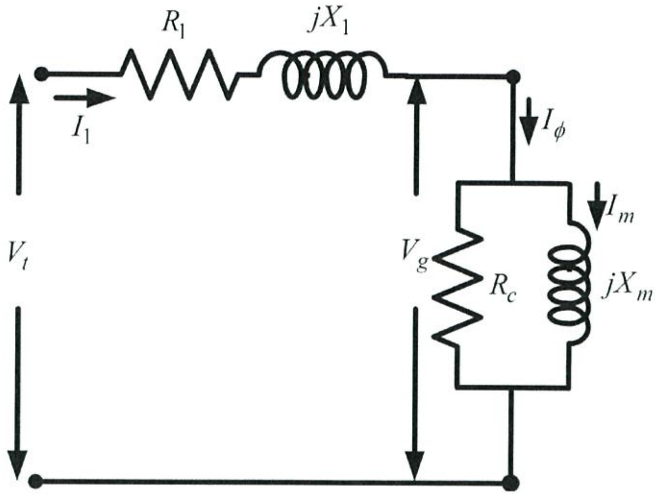
จากบทที่ 3 ได้มีการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ามีค่าไม่เหมาะสมโดยเฉพาะกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นสนามแม่เหล็กในการสร้างแรงดันไฟฟ้าเช่นเดียวกับภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. ก็ต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนเช่นเดียวกัน ทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จากตัวเก็บประจุแบบขนานในตอนแรกไม่เพียงพอสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในขณะมีภาระทางไฟฟ้า ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าไม่เหมาะสม

ดังนั้นในปริญญานิพนธ์เล่มนี้จึงเสนอการชดเชยแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองเพื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้าไป โดยในการทดสอบจะพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม (Short-shunt SEIG)

เนื่องด้วยการอิ่มตัวของแกนเหล็กทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและฟลักซ์แม่เหล็กไม่เป็นเชิงเส้น ส่งผลถึงค่ารีแอคแตนซ์สนามแม่เหล็ก (X_m) มีค่าไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงตามแรงดันช่องอากาศต่อความถี่ (V_g / f) ซึ่งกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะที่เป็นมอเตอร์จะไม่คำนึงถึงผลของการอิ่มตัวที่เกิดขึ้น แต่ถ้าสภาวะที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องคำนึงถึงผลการอิ่มตัวของแกนเหล็กด้วย โดยจากกราฟคุณลักษณะค่าแรงดันและค่ากระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการอิ่มตัวของแกนเหล็ก จะเห็นได้ว่าจุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง คือจุดตัดระหว่างกราฟทั้งสองเส้น โดยในบทนี้เราจะวิเคราะห์การหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองซึ่งพิจารณาถึงการอิ่มตัวของแกนเหล็กด้วย

4.2 การหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันช่องอากาศกับรีแอคแตนซ์สนามแม่เหล็ก [3]

การอิ่มตัวของแกนเหล็กจะทำให้ค่า X_m มีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของค่า V_g / f จึงจำเป็นต้องหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_g / f และ X_m เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อที่จะนำไปหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมต่อไป จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_g / f และ X_m สามารถทำได้โดยการทดสอบแบบไร้ภาระโดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าในค่าต่างๆ ที่ความถี่พิกัด ($F = 1$)



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสความสัมพันธ์ V_g / f กับ X_m

จากรูป สามารถคำนวณหาค่า V_g / f ได้ดังนี้

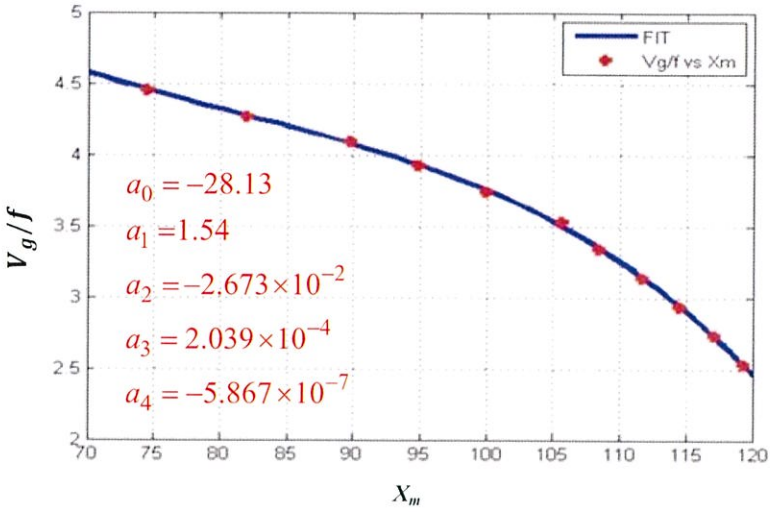
$$V_g / f = V_t - I_1(R_1 + jX_1) \tag{4.1}$$

การทดสอบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_g / f กับค่า X_m สามารถหาได้โดยทำการทดสอบแบบไร้ภาระ ตามรูปวงจรที่ 4.1 ทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส (V_t) ค่ากระแสไฟฟ้าเฟส (I_1) และค่ากำลังไฟฟ้าสามเฟส จากนั้นคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากบทที่ 2 จากการคำนวณสมการที่ 2.34 ถึง 2.53 จะได้ค่าความต้านทานของโรเตอร์ (R_2) รีแอคแตนซ์ของสเตเตอร์ (X_1) และรีแอคแตนซ์ของสนามแม่เหล็ก (X_m) โดยที่ค่า V_g / f สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

โดยได้ความสัมพันธ์ของ V_g / f กับ X_m ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 2.2 kW ได้ดังรูปที่ 4.2

จากกราฟความสัมพันธ์ของ V_g / f กับ X_m ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง เป็นความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง (Fitting curve) จะได้ความสัมพันธ์ของ V_g / f กับ X_m เป็นฟังก์ชันพหุนามอันดับที่ 4 โดยให้ค่า V_g / f ในแนวแกนตั้ง (แกน y) และค่า X_m ในแนวแกนนอน (แกน x) จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

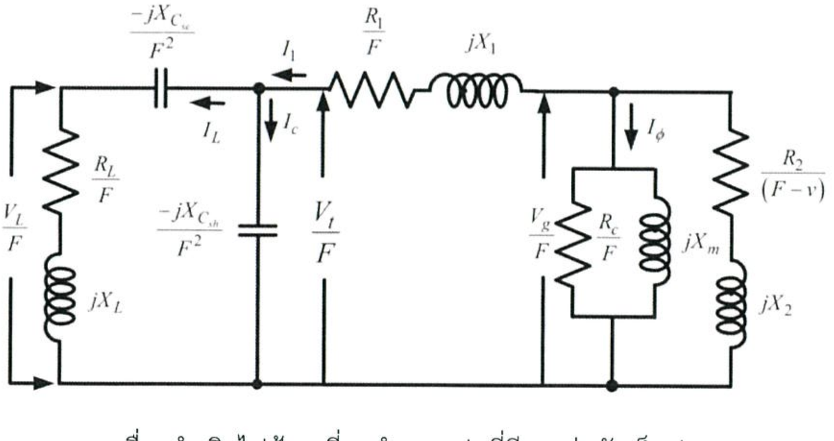
$$V_g / f = a_0 + a_1 X_m + a_2 X_m^2 + a_3 X_m^3 + a_4 X_m^4 \tag{4.2}$$



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของ V_g / f กับ X_m ของ Short-shunt SEIG 2.2 kW

4.3 วิธีการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน – อนุกรม [3]

เนื่องจาก SEIG ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเป็นแบบขนาน (C_{sh}) เพียงอย่างเดียว ดังรูปวงจรสมมูลที่ 3.1 นั้นจะมีปัญหาดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไขโดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (C_{se}) เพิ่มเข้ามาในระบบ โดยเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ซึ่งสามารถแสดงวงจะสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม กับภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. พร้อมทั้งคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวในแกนเหล็กได้ดังรูปที่ 4.2 โดยในการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน–อนุกรม ที่เหมาะสมนั้นจะใช้วิธีจีเนติกอัลกอริทึม ใน 2 กรณีคือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v = 1$) และกรณีที่ความถี่คงที่ ($F = 1$) ซึ่งจะตั้งเป้าหมายที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (±0.05 p.u.)

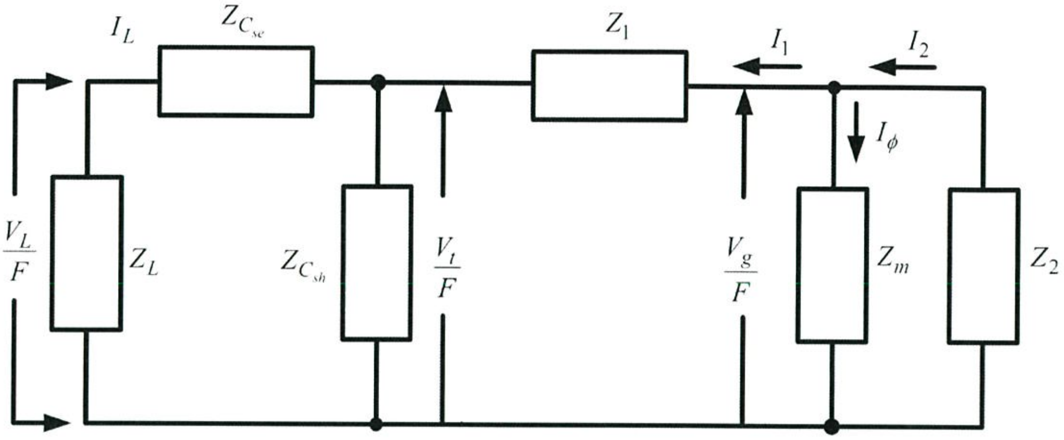


รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมขณะมีภาระทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.3 จะทำการจัดรูปวงจรให้อยู่ในรูปแบบอิมพิแดนซ์ ดังรูปที่ 4.4 เพื่อนำไปใช้หาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมร่วมกันกับวิธีจีเนติกอัลกอริธึม ซึ่งแสดงการจัดรูปวงจรได้ดังสมการที่ 4.3 ถึง 4.16

จากสมการที่ 3.4 อิมพิแดนซ์ ของสเตเตอร์ (Z_1)

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \tag{4.3}$$



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลในรูปที่ 4.3 โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบ Impedance

จากสมการที่ 3.6 อิมพิแดนซ์ ของส่วนกระตุ้น (Z_m)

$$Z_m = \frac{jX_m\left(\frac{R_c}{F}\right)}{jX_m + \left(\frac{R_c}{F}\right)} \tag{4.4}$$

จากสมการที่ 3.7 อิมพิแดนซ์ ของโรเตอร์ (Z_2)

$$Z_2 = \frac{R_2}{F - v} + jX_2 \tag{4.5}$$

จากสมการที่ 3.2 อิมพิแดนซ์ ของตัวเก็บประจุแบบขนาน (Z_{Csh})

$$Z_{Csh} = \left(\frac{-jX_{Csh}}{F^2}\right) \tag{4.6}$$

และ อิมพิแดนซ์ของตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (Z_{Cse})

$$Z_{Cse} = \left(\frac{-jX_{Cse}}{F^2}\right) \tag{4.7}$$

จากสมการที่ 3.1 อิมพิแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้า (Z_L)

$$Z_L = \left(\frac{R_L}{F}\right) + jX_L \tag{4.8}$$

และค่าความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์อื่นๆ
ค่ากระแสที่โรเตอร์ (I_2)

$$I_2 = \frac{-V_g}{FZ_2} \tag{4.9}$$

ค่ากระแสที่ส่วนกระตุ้น (I_ϕ)

$$I_\phi = \frac{-V_g}{FZ_m} \tag{4.10}$$

ค่ากระแสที่สเตเตอร์ (I_1)

$$I_1 = I_2 - I_\phi \tag{4.11}$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ (V_t)

$$\frac{V_t}{F} = \left(\frac{V_g}{F}\right) - (I_1 Z_1) \tag{4.12}$$

ค่ากระแสที่ตัวเก็บประจุแบบขนาน (I_{Csh})

$$I_{Csh} = \frac{V_t}{(FZ_{Csh})} \tag{4.13}$$

ค่ากระแสที่ภาระทางไฟฟ้ารูปแบบที่หนึ่ง (I_{L1})

$$I_{L1} = \frac{V_t}{F(Z_{Cse} + Z_L)} \tag{4.14}$$

ค่ากระแสที่ภาระทางไฟฟ้ารูปแบบที่สอง (I_{L2})

$$I_{L2} = I_1 - I_{Csh} \tag{4.15}$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ภาระทางไฟฟ้า (V_L)

$$\frac{V_L}{F} = I_{L1} Z_L \tag{4.16}$$

จากสมการที่ 4.3 ถึง 4.16 ค่า R_1, R_2, R_c, X_1 และ X_2 สามารถหาได้จากหัวข้อที่ 2.6 ถึง 2.9 ความสัมพันธ์ของค่า V_g / f กับค่า X_m สามารถหาได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2

ส่วนตัวแปร Z_L สามารถหาได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 220 V และความถี่ที่ 50 Hz บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าจริง C_{sh} และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ซึ่งค่า Z_L สามารถคำนวณได้ดังนี้

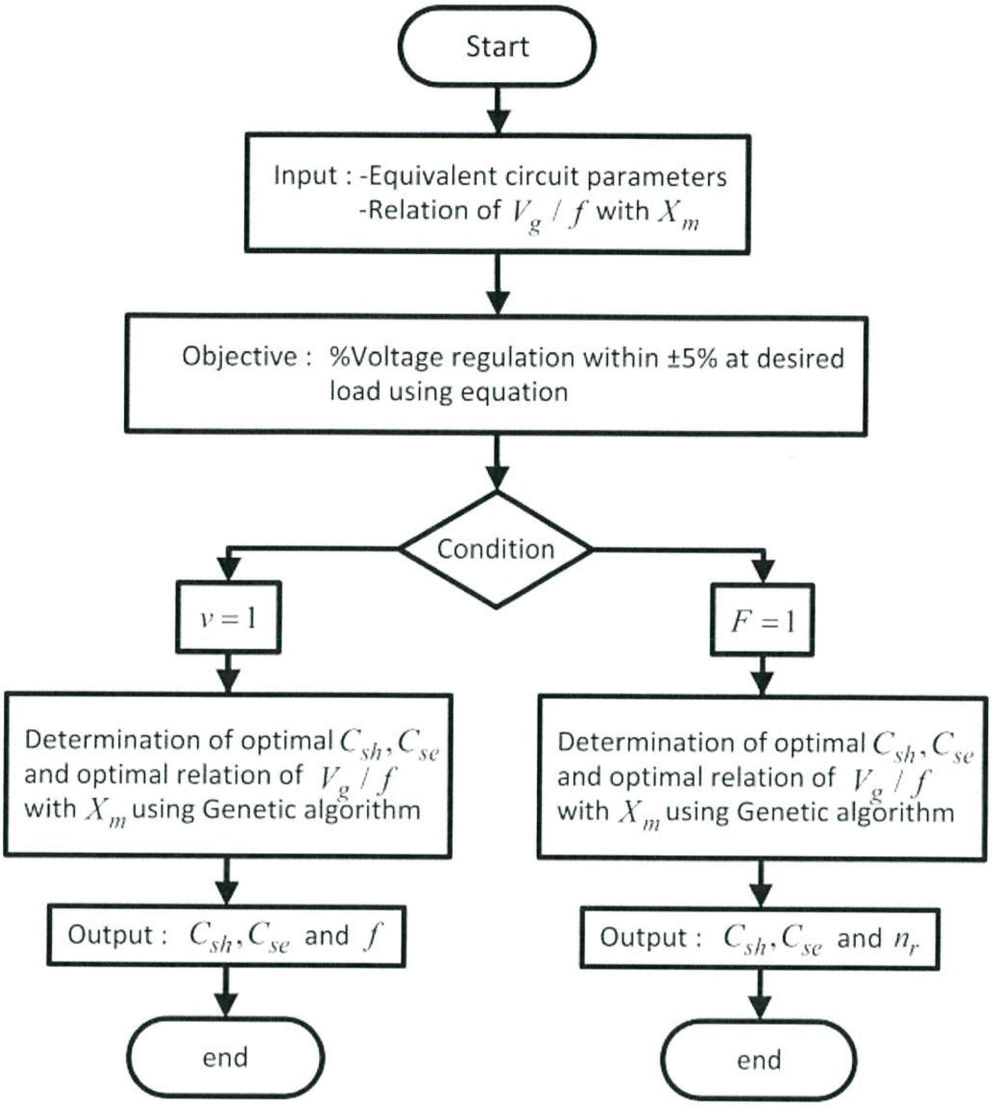
$$Z_L = \frac{220^2}{P - Qj} \tag{4.17}$$

จากนั้นจะทำการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมด้วยวิธีการจีเนติกอัลกอริทึม โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่า V_g / f กับ X_m ให้เหมาะสมกับสภาวะการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ p.f.lagging ค่าต่างๆ 2 ในกรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ $(V = 1)$ และกรณีที่ความถี่คงที่ $(F = 1)$ ซึ่งมีขั้นตอนของวิธีการนำเสนอดังรูปที่ 4.3 และมีสมการเป้าหมายสมการที่ 4.18 ถึง 4.19

$$F_{objective} = \frac{1}{2}\left|1 - \frac{V_L}{V_{rated}}\right|^2 \tag{4.18}$$

$$F_{objective} = \frac{1}{2}\left|1 - \frac{I_{L1}}{I_{L2}}\right|^2 \tag{4.19}$$

$$F_{objective} = \frac{1}{2}\left|I_2 - I_\phi - I_1\right|^2 \tag{4.20}$$



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมในกรณี $v = 1$ และ $F = 1$

4.4 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่ใช้ในการทดสอบต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมมีพิกัด 2.2 kW มีพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลจากการทดสอบในหัวข้อที่ 2.6 ถึง 2.9

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่ใช้ในการทดสอบ

$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$R_c(\Omega)$
3.055	3.159	2.962	4.443	86.054	1346.23

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแลความสัมพันธ์ของค่า V_g / f และ X_m แล้วจะสามารถหาค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรม 2 กรณี ได้แก่กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v = 1$) และ

กรณีที่ความถี่คงที่ ($F=1$) ที่ภาระทางไฟฟ้า Lagging p.f. ต่างๆ ด้วยวิธีจีเนติกอัลกอริทึมตามหัวข้อที่ 4.3 และแสดงผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม ได้ในหัวข้อที่ 4.4.1 และ 4.4.2

4.4.1 การออกแบบและทดสอบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมสำหรับ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่เท่ากับ 1500 rpm ($\nu=1$)

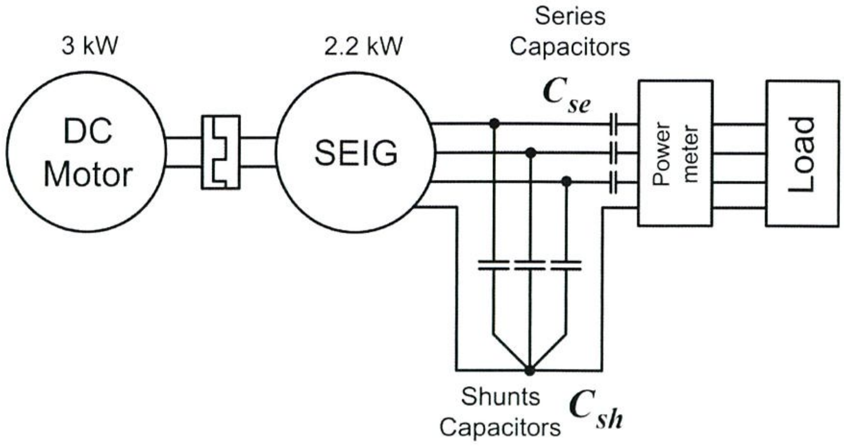
ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 2.2 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมจากการออกแบบในกรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ที่ภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 58.21-67.2% Lagging p.f. ต่างๆได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรม และค่าตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในการทดสอบที่ภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 58.21%-67.2% ที่ค่า Lagging p.f. ต่างๆ

p.f.	Design					Test	
	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	f (Hz)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.87	67.2	32.1	40.1	48.18	79.58	35	40
0.91	58.21	35.9	45.4	48.24	79.12	35	45
0.925	59	35.7	41.5	48.37	79.384	35	40
0.94	63.41	38.5	50.8	48.29	76.6	40	50
0.985	59.06	38.4	54.9	48.53	74	40	55

จากตารางที่ 4.2 ค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่ออกแบบที่ภาระทางไฟฟ้า Lagging p.f. ต่างๆ ที่ภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ จะเลือกค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีขนาดเท่าการออกแบบหรือใกล้เคียงกันในการทดลองเช่นที่ 0.94 Lagging p.f. ภาระทางไฟฟ้า 63.41% ค่าตัวเก็บประจุขนานที่ออกแบบได้เท่ากับ 38.5 μF ใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานขนาด 40 μF และค่าตัวเก็บประจุอนุกรมที่ออกแบบได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากับค่าที่ออกแบบได้หรือค่าที่ใกล้เคียงเช่นกัน จากตารางผลการออกแบบที่ขนาดภาระทางไฟฟ้าใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับค่า p.f. ของภาระทางไฟฟ้า เมื่อค่า p.f. ของภาระทางไฟฟ้ามีค่าสูง ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อค่า p.f.มีค่าต่ำ ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจะมีค่าต่ำลงด้วย เพราะเมื่อภาระทางไฟฟ้ามี p.f. สูง ทำให้ต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนต่ำลง ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมจะแปรผกผันกับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนดังสมการที่ 4.21 ในการทดลองทำการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมตามวงจรการทดลอง (ขดลวดสเตเตอร์ของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและภาระทางไฟฟ้าต่อแบบสตาร์) ในรูปที่ 4.4

$$Q_{C_{se}}=\frac{I^2}{\omega C_{se}} \tag{4.21}$$



รูปที่ 4.6 วงจรการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

ตารางที่ 4.3 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.925 Lagging p.f.

$p.f.$=0.925	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	f (Hz)	V_{reg} (%)
Design	35	36	36	218.52	1.18	-	48.89	-
Test	31.80	35	35	216.6	1.17	699.69	49.34	-1.50
Design	47	36.3	39.1	219.73	1.58	-	46.83	-
Test	41.79	35	40	213.8	1.55	919.41	49.11	-2.82
Design	59	35.7	41.5	220.38	2.01	-	48.37	-
Test	52.32	35	40	216.5	1.96	1151.01	48.93	1.60
Design	74	38.3	48.1	219.25	2.37	-	48.17	-
Test	69.38	40	50	227.5	2.41	1526.49	48.67	3.41

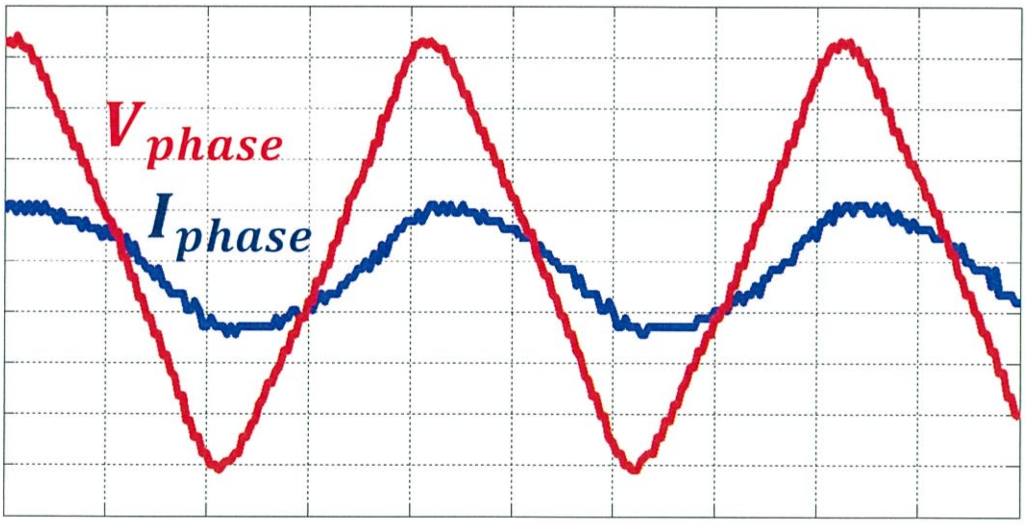
จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 ใช้ตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่ออกแบบที่ภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆได้แก่ 31.80%, 41.79%, 52.32%, 69.38% โดยทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมให้เหมาะสมกับพิกัดภาระทางไฟฟ้า พบว่า SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±0.05 p.u. ทุกขนาดภาระทางไฟฟ้าซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการวิธีนำเสนอตามหัวข้อที่ 4.3 สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆที่ 0.925 Lagging p.f. ให้อยู่ในช่วง ±0.05 p.u. และค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบในทุกค่าภาระทางไฟฟ้า

ตารางที่ 4.4 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.87 Lagging p.f.

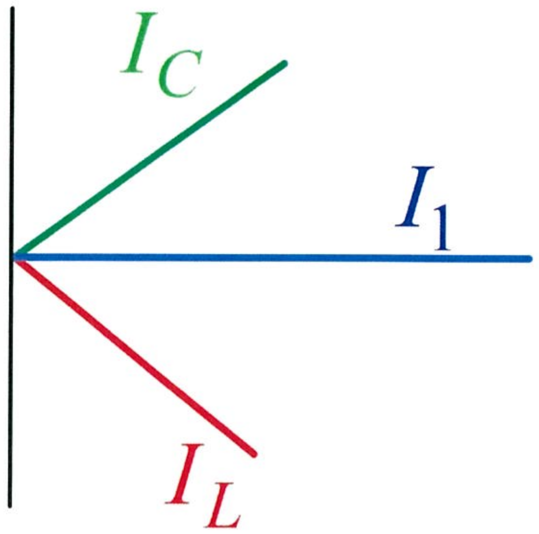
$p.f.$ = 0.87	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	f (Hz)	V_{reg} (%)
Design	67.2	32.1	40.1	219.95	2.35	-	48.18	-
Test	65.74	35	40	230.5	2.46	1446.3	48.49	4.54

ตารางที่ 4.5 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.91 Lagging p.f.

$p.f.$ = 0.91	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	f (Hz)	V_{reg} (%)
Design	58.21	35.9	45.4	219.89	2.19	-	48.24	-
Test	57.91	35	45	218	2.15	1274.1	48.99	-0.91



รูปที่ 4.7 สัญญาณของกระแสและค่าแรงดันที่ภาระไฟฟ้า 0.91 Lagging p.f. ค่าภาระทางไฟฟ้า 57.91% Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm



รูปที่ 4.8 เฟเซอร์กระแส I_c, I_1, I_L ที่ภาระไฟฟ้า 0.91 Lagging p.f. ค่าภาระทางไฟฟ้า 57.91% Short-shunt SEIG 2.2 kW ในกรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm ที่ $C_{sh} = 35\mu F$ และ $C_{se} = 45\mu F$

ตารางที่ 4.6 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.94 Lagging p.f.

$p.f.$ = 0.94	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	f (Hz)	V_{reg} (%)
Design	63.41	38.5	50.8	219.05	2.1171	-	48.29	-
Test	62.1	40	50	229.03	2.163	1366.2	48.69	4.10

ตารางที่ 4.7 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.985 Lagging p.f.

$p.f.$ = 0.985	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	f (Hz)	V_{reg} (%)
Design	59.06	38.4	54.9	220.56	1.91	-	48.53	-
Test	56.09	40	55	219.3	1.91	1234	48.95	-0.32

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4-4.7 ใช้ตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่ออกแบบไว้ตามค่าภาระทางไฟฟ้าที่ 0.87, 0.91, 0.94 และ 0.985 Lagging p.f. โดยทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมให้เหมาะสมกับภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. ต่างๆ พบว่า SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ โดยที่การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±0.05 p.u. ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการวิธีนำเสนอตามหัวข้อที่ 4.3 สามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ p.f. ต่างๆได้

ตารางที่ 4.8 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ กรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่ 1500 rpm จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆที่มีค่า Lagging p.f. เปลี่ยนแปลง โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบที่ค่าภาระทางไฟฟ้าพิกัด 57% และ 0.966 Lagging p.f.

$p.f.$ =0.966	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	$p.f.$	f (Hz)	V_{reg} (%)
Design	57.84	42.95	52.94	219.96	1.97	-	0.968	48.41	-
Test	31.93	40	50	230.5	1.1	702.6	0.886	49.35	4.7727
	46.02			228.8	1.6	1012.5	0.942	49.05	4
	57.85			223.7	2	1272.6	0.966	48.97	1.6818
	67.05			214	2.3	1475.1	0.979	48.82	-2.7272
	72.87			201.5	2.7	1603.2	0.986	48.76	-8.4090

จากตารางที่ 4.8 ใช้ตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่ออกแบบที่ภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆตั้งแต่ 31.93%-72.87% ที่มีค่า Lagging p.f. เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.886-0.986 โดยใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ออกแบบที่ค่าภาระทางไฟฟ้าพิกัด 57% และ 0.966 Lagging p.f. พบว่า SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ โดยที่ % ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±0.05 p.u. ที่ภาระทางไฟฟ้า 46.02 %-67.05 % เมื่อเปรียบเทียบกับการต่อตัวเก็บประจุขนานอย่างเดียวในบทที่ 3 จะสามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าได้ที่ภาระทางไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ พบว่าเมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมแล้ว จะสามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าได้ที่ใกล้เคียงค่าที่ออกแบบ และมีช่วงการรักษาการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าได้กว้างขึ้น

4.4.2 การออกแบบและทดสอบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมสำหรับ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่เท่ากับ 50Hz $(F=1)$

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 2.2 kW สามารถแสดงค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมจากการออกแบบในกรณีที่ความถี่คงที่เท่ากับ 50Hz ที่ภาระทางไฟฟ้าที่ค่า Lagging p.f. ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการออกแบบค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรม และค่าตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในการทดสอบ ที่ภาระทางไฟฟ้าที่พิกัด 58.01%-59.47% ที่ค่า Lagging p.f. ต่างๆ

$p.f.$	Design					Test	
	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	n_r (rpm)	X_m (Ω)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)
0.87	58.7	38.7	70.7	1565	98.69	40	70
0.91	59.47	34.4	58.8	1558.22	92.57	35	60
0.925	59	33.8	52.7	1552	89.74	35	50
0.94	58.01	33.1	50.6	1553.1	84.04	35	50
0.985	53.82	36.6	59.7	1547	76.16	35	60

จากตารางที่ 4.9 ค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่ออกแบบที่ภาระทางไฟฟ้า Lagging p.f. ต่างๆ ที่ภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ จะเลือกค่าตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีขนาดเท่าการออกแบบหรือใกล้เคียงกันในการทดลองเช่นที่ 0.94 Lagging p.f. ภาระทางไฟฟ้า 58.01 % ค่าตัวเก็บประจุขนานที่ออกแบบได้เท่ากับ 33.1 μF ใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานขนาด 35 μF และค่าตัวเก็บประจุอนุกรมที่ออกแบบได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากับค่าที่ออกแบบได้หรือค่าที่ใกล้เคียงด้วยเช่นที่ 0.94 Lagging p.f. ภาระทางไฟฟ้า 58.01 % ค่าตัวเก็บประจุอนุกรมที่ออกแบบได้เท่ากับ 50.6 μF ใช้ค่าตัวเก็บประจุแบบอนุกรมขนาด 50 μF โดยมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.10 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.925 Lagging p.f.

$p.f.$ =0.925	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	n_r (rpm)	V_{reg} (%)
Design	35	34.1	38.2	220	1.18	-	1534	-
Test	32	35	40	217.92	1.17	703.89	1527	0.94
Design	45	35	50.4	220	1.57	-	1543	-
Test	41.51	35	50	213.9	1.55	913.2	1534	2.77
Design	59	33.8	52.7	220	1.97	-	1552	-
Test	54.87	35	50	220.47	1.98	1207.2	1538	0.21
Design	70	33.9	61	220	2.36	-	1561	-
Test	62.8	35	60	214.83	2.33	1381.5	1552	2.30

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.10 ใช้ตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่ออกแบบที่ภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆได้แก่ 32%, 41.51%, 54.87%, 62.8% โดยทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมให้เหมาะสมกับพิกัดภาระทางไฟฟ้า พบว่า SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±0.05 p.u. ทุกค่าภาระทางไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการวิธีนำเสนอตามหัวข้อที่ 4.3 สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างที่ 0.925 Lagging p.f. ให้อยู่ในช่วง ±0.05 p.u. และค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบในทุกค่าภาระทางไฟฟ้าในกรณีที่ความถี่คงที่เช่นเดียวกันกับกรณีที่ความเร็วต้นกำลังคงที่

ตารางที่ 4.11 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.87 Lagging p.f.

$p.f.$ =0.87	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	n_r (rpm)	V_{reg} (%)
Design	58.7	38.7	70.7	220	2.334	-	1565	-
Test	59.1	40	70	218.17	2.267	1299.2	1546	0.83

ตารางที่ 4.12 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.91 Lagging p.f.

$p.f.$=0.91	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	n_r (rpm)	V_{reg} (%)
Design	59.47	34.4	58.8	220	2.1754	-	1558.22	-
Test	54.55	35	60	210.47	2.073	1200	1557	- 4.33

ตารางที่ 4.13 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.94 Lagging p.f.

$p.f.$=0.94	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	n_r (rpm)	V_{reg} (%)
Design	58.01	33.1	50.6	219.96	2.1176	-	1553.1	-
Test	57.72	35	50	219.6	2.06	1269	1541	-0.18

ตารางที่ 4.14 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ Short-shunt SEIG 2.2 kW กรณีที่ความถี่คงที่ 50 Hz จ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ 0.985 Lagging p.f.

$p.f.$=0.985	Load (%)	C_{sh} (μF)	C_{se} (μF)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P (W)	n_r (rpm)	V_{reg} (%)
Design	53.82	36.6	59.7	219.41	1.9132	-	1547	-
Test	53.04	35	60	211.7	1.876	1167	1533	-3.70

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.10-4.13 ใช้ตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่ออกแบบไว้ตามค่าภาระทางไฟฟ้าที่ 0.87, 0.91, 0.94 และ 0.985 Lagging p.f.โดยทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมให้เหมาะสมกับภาระทางไฟฟ้าที่ ค่า p.f. ต่างๆ พบว่า SEIG 2.2 kW สามารถจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าอยู่ในช่วง ±0.05 p.u. ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่ได้จากการวิธีนำเสนอตามหัวข้อที่ 4.3 สามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้จริง และผลการทดสอบมีความเร็วต้นกำลังใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ

4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากบทที่ 3 เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้า Lagging p.f. ทำให้ไม่สามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าได้เนื่องจากกระแสส่วนหนึ่งจากตัวเก็บประจุแบบขนานต้องแบ่งให้ภาระทางไฟฟ้า ทำให้กระแสกระตุ้นลดลง จึงต้องทำการต่อตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมเข้าไป เพราะกระแสตัวเก็บประจุแบบอนุกรมจะไปช่วยจ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้าแบบล้าหลัง ทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ต้องการ (±0.05 p.u.)

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมด้วยวิธีการจีเนติกอัลกอรีทึมในการหาค่าที่เหมาะสมมากที่สุด สามารถออกแบบค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมได้ใกล้เคียงและเหมาะสมมากที่ภาระทางไฟฟ้าพิกัดต่างๆ และที่ Lagging p.f. ต่างๆ เมื่อทดสอบต่อตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะเห็นว่าสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่ต้องการได้ (±0.05 p.u.) และยังรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ภาระทางไฟฟ้าที่ออกแบบได้ในช่วงกว้างขึ้น ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอนั้นค่อนข้างมีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

จากสถานการณ์ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงมากขึ้นทุกปีจึงต้องมีการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นด้วย การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งพลังงานทดแทนส่วนใหญ่นั้นมีกำลังการผลิตขนาดเล็กถึงปานกลาง ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน ในการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองนั้นต้องอาศัยการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเข้าที่ขั้วสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 220 V เพื่อใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานอย่างเดียวนั้นไม่เหมาะสมกับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ภาระโหลดสูงๆ ทั้งแบบ Unity p.f. และ Lagging p.f. จึงได้มีการศึกษาและทดลองการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม โดยใช้จีเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมที่มีขนาดเหมาะสมมากที่สุด ร่วมกับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. และคำถึงผลการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (V_g / f กับ X_m) โดยพิจารณาใน 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ ($v = 1$) และกรณีความถี่คงที่ ($F = 1$) โดยการต่อตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมนั้นสามารถรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในช่วง ±0.05 p.u. ขณะมีภาระทางไฟฟ้าได้ในช่วงที่กว้างขึ้นมากกว่าการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว

5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองต่อกับกับตัวเก็บแบบขนานที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในค่าที่เหมาะสมจะสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ 220 V แต่ในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้าทั้งในขนาดภาระทางไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังต่างๆนั้นการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วงที่ค่อนข้างแคบดังผลการทดสอบใบบทที่ 3 เนื่องจากเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองมีภาระทางไฟฟ้ากระแสส่วนหนึ่งไหลไปยังภาระทางไฟฟ้าทำให้กระแสส่วนกระตุ้นในการสร้างสนามแม่เหล็กลดลงเป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลงและเมื่อมีภาระทางไฟฟ้ามากขึ้นทั้งแบบ Unity p.f. และโดยเฉพาะแบบ Lagging p.f. ระดับแรงดันไฟฟ้าจะลดลงมากขึ้นตามขนาดของภาระทางไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้การต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียวนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะระดับแรงดันไฟฟ้าขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองในขณะที่มีภาระทางไฟฟ้า

ด้วยเหตุที่ระดับแรงดันลดลงในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองมีภาระทางไฟฟ้านั้นจึงได้มีการศึกษาและออกแบบการทดลองโดยค่าหาตัวเก็บประจุที่เหมาะสมต่อแบบขนาน-อนุกรมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้จีเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่มีขนาดเหมาะสมมากที่สุด ร่วมกับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. และคำนึงถึงผลการอิ่มตัวของแกนเหล็กในบทที่ 4 นั้นปรากฏว่าค่าการออกแบบจากการใช้วิธีจีเนติกอัลกอริทึมในการ

หาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมได้ผลที่ใกล้เคียงมาก และการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้กว้างขึ้นในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีภาระแบบ Lagging p.f. ในช่วงระดับแรงดัน ± 0.05 p.u. ซึ่งเป็นช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ต่อเพิ่มเข้าไปนั้นจะช่วยชดเชยแรงดันไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้ภาระทางไฟฟ้านั่นเอง

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยใช้วิธีจีเนติกอัลกอริทึมร่วมกับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดในขณะมีภาระทางไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังทางไฟฟ้าขนาดต่างๆ โดยค่าขนาดของตัวเก็บประจุขนาน-อนุกรมสามารถรักษาระดับแรงดันในย่านหนึ่งเท่านั้น เมื่อค่าของภาระทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปค่าของตัวเก็บประจุจะต้องเปลี่ยนตามด้วยเพื่อรักษาระดับแรงดันไว้ ในการวิจัยต่อควรสามารถเปลี่ยนค่าของตัวเก็บได้โดยอัตโนมัติเมื่อภาระทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความสะดวก หรือประยุกต์เครื่องกำเนิดกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวแบบกระตุ้นด้วยตัวเองร่วมกับแบตเตอรี่เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้งาน เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองนั้นไม่เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับภาระทางไฟฟ้าที่ไม่สมดุล (Unbalance load) และภาระทางไฟฟ้าแบบพลวัต (Dynamic load) ดังนั้นในการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ก่อนแล้วนำมาใช้งานทีหลังน่าจะมีความเหมาะสมกว่า

เอกสารอ้างอิง

[1] Ion Boldea, Syed A. nasar, **The induction machine handbook**, CRC Press LLC, 2002.

[2] William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly, Steven M. Durbin, **Engineering Circuit Analysis**, 8th Ed., New York, The McGraw-Hill Companies,Inc., 2012.

[3] วุฒิชัย รอดพุ่ม "**ค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง**," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] Stephen J. Chapman, **Electric machinery fundamentals,** 4th Ed., New York, The McGraw-Hill Companies,Inc., 2005.

[5] ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม. (2558, 29 มีนาคม). ใน *วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี*. สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน 2559, จาก https://th.wikipedia.org/wiki/ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

[6] กัปตันนีโม. (2556). *ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) กับการเลียนแบบกระบวนการทางธรรมชาติเพื่อค้นหาคำตอบ*. จาก https://kapitaennemo.wordpress.com/2013/07/17/genetic-algorithm/

[7] A.E.Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, Electric Machinery, 6th Ed., New York, The McGraw-Hill Companies,Inc., 2003.

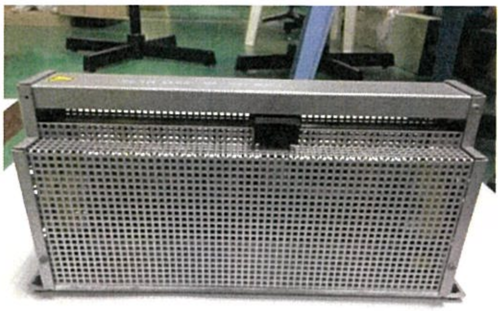
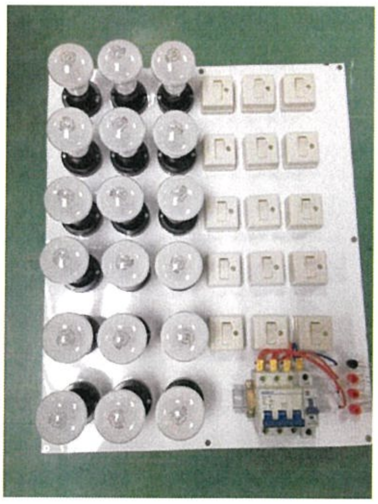
ภาคผนวก

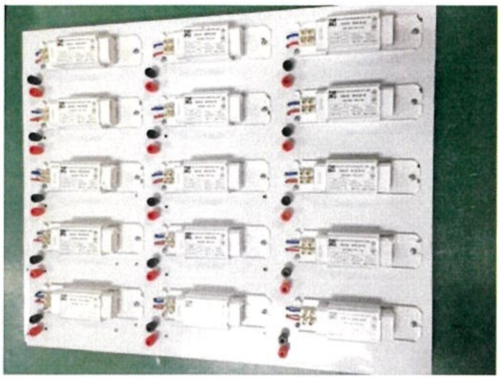
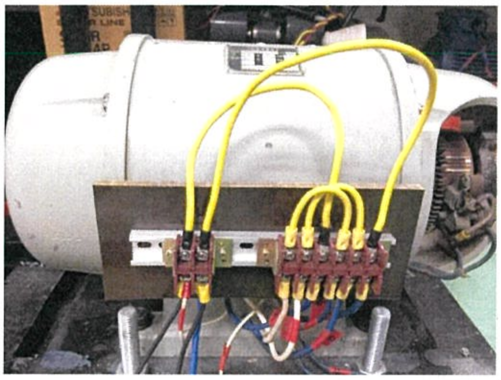
ภาคผนวก ก

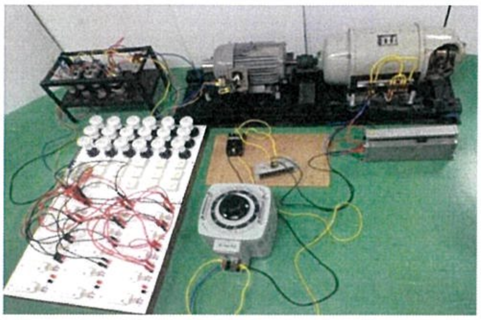
ข้อมูลอุปกรณ์

ภาคผนวก ก
ข้อมูลอุปกรณ์

รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์	รายละเอียด
	เครื่องวัดความเร็วรอบ CEM AT-6
	เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า ยี่ห้อ CHAUVIN รุ่น C.A 8200
	มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 110

	ความต้านทานปรับค่าได้ 1000 (Ω)
	ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ
	ชุดภาระทางไฟฟ้าแบบความต้านทาน

	ชุดภาระทางไฟฟ้าแบบความเหนี่ยวนำ
	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 3 kW
	มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW

	ชุดการทดลอง

ภาคผนวก ข.

บทความวิชาการ

การหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง

Optimal Capacitance Requirement for Voltage Compensation of Self-Excited Three Phase Induction Generator

ณัฐศักดิ์ สายอุทธา นฤดล โกศลจิตร์ มนชนก พันธุคุปต์ และฤชุดา กัลกะ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2739-2478

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา และหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมสำหรับชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบจีเนติก เมื่อมีการจ่ายภาระทางไฟฟ้าตามที่ต้องการโดยมีค่าตัวประกอบกำลัง (0.86 ล้าหลัง-1.00) ภายใต้เงื่อนไข 2 กรณี คือ ความเร็วต้นกำลังคงที่และความถี่คงที่ โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (±0.05 p.u.) ในการศึกษาเริ่มต้นจากการทดสอบและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสในสภาวะมอเตอร์ จากนั้นหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมโดยใช้พื้นฐานของวงจรสมมูลร่วมกับวิธีจีเนติกอัลกอริทึม ผลที่ได้นำมาทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองพิกัด 2.2 กิโลวัตต์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระไฟฟ้าไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้ สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้วิธีการเลือกตัวเก็บประจุแบบลองผิดลองถูก

คำสำคัญ: กระตุ้นด้วยตัวเอง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม, การรักษาแรงดัน, จีเนติกอัลกอริทึม

Abstract

The aim of this project is to determine an optimal capacitance requirement for voltage compensation of self-excited three phase induction generator. 2.2 kW, three-phase squirrel case induction machine was selected to investigate in this project as generator and 3 kW DC motor was used to be prime mover. Shunt and series capacitors are needed to build-up and regulate terminal voltage output from the generator. Appropriate shunt and series capacitances can be determined by optimization techniques (Genetic algorithms, GAs). To investigate possibility of self-excited three phase induction generator applies to wind turbine, an experiment was separated to two operation modes i.e. constant speed and constant frequency. Induction machine parameters, load demand, % voltage regulation acceptance and correlation between air gap voltage and magnetizing reactance were needed to formulate objective function. Results from GAs show applicable shunt and series capacitances. Experimental results in laboratory by load test with load 0.86 to 0.98 lagging power factor show close agreement between calculation and experiment.

Keyword: Self-excited, Induction Generator, Genetic algorithm, Optimal capacitance, Voltage Compensation

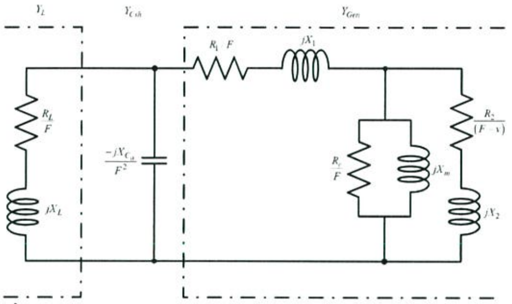
1.บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องต่อกับระบบไฟฟ้า และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพลังงานทดแทนผลิตพลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กเป็นการกระตุ้นทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้นมานั้นจะต้องมีตัวเก็บประจุขนาดที่เหมาะสมต่อขนานแต่ละขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองและต้องการฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างที่แกนเหล็กด้วย เมื่อโรเตอร์หมุนได้ความเร็วที่เพียงพอ จะมีแรงดันไฟฟ้าค่าน้อยๆผลิตออกเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก แรงดันไฟฟ้าที่ออกมานั้น จะเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุซึ่งกระแสนี้จะกระตุ้นให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนกว่าสนามแม่เหล็กจะอิ่มตัว สำหรับการจะรักษาค่าแรงดันไฟฟ้าให้ได้อยู่ในช่วง ±0.05 p.u. ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นตัวเองมีภาระทางไฟฟ้าแบบ lagging p.f. ค่าต่างๆนั้นจำเป็นต้องอาศัยการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมเข้าไปช่วยในการรักษาระดับแรงดัน และในการหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมนั้นสามารถใช้วิธีจีเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแทนที่จะใช้วิธีการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ

2.การออกแบบค่าตัวเก็บประจุชดเชยแบบขนาน

วงจรสมมูลใช้สำหรับการวิเคราะห์หาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน (C_{sh}) ที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 1 ในการพิจารณาหาค่า C_{sh} ที่เหมาะสมนั้น ใช้หลักการ Nodal admittance ร่วมกับวิธีจีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms) ซึ่งใช้สมการเป้าหมายดังนี้

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



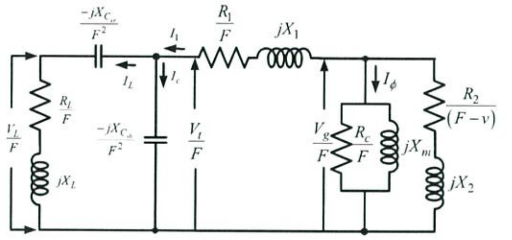
รูปที่ 1 วงจรสมมูลของ SEIG ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองที่ต่อตัวเก็บประจุแบบขนานเพียงอย่างเดียว จะสามารถรักษาค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าได้ดีในช่วงค่อนข้างแคบ ซึ่งจะเหมาะสมกับการนำไปใช้จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่มีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

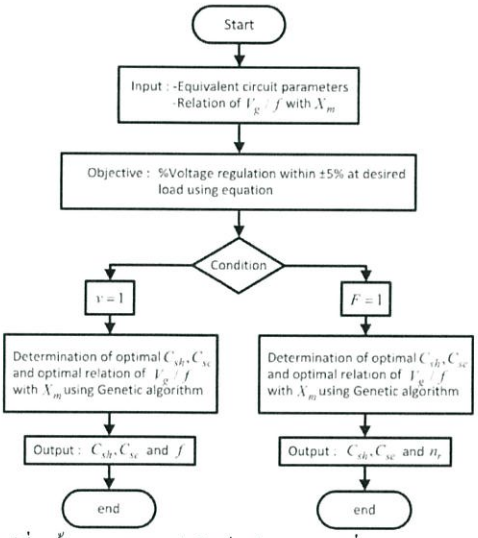
เมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าเข้าไปในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเองจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลง ทั้งนี้เพราะมีกระแสส่วนหนึ่งไหลไปยังภาระ ทำให้กระแสในส่วนกระตุ้นลดต่ำลง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงด้วย เนื่องจากผลของแรงดันไฟฟ้าตกเมื่อต่อภาระไฟฟ้าเข้าไปในระบบ การเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเก็บประจุตามขนาดของภาระทางไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่หรืออยู่ในช่วงที่ต้องการ ($\pm 5\%$) ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่ความละเอียดของตัวเก็บประจุแบบขนานที่นำมาทดสอบด้วย ซึ่งถ้าค่าตังเก็บประจุมีความละเอียดมาก ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าก็จะลดต่ำลง ซึ่งจะทำการปรับปรุงแก้ไขปัญหานี้โดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเพิ่มเข้าไปเพื่อทำการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อจ่ายภาระทางไฟฟ้าแบบ Lagging p.f. ให้มีความเหมาะสมมากขึ้น โดยจะเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตัวเองที่มีรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม

3.การออกแบบค่าตัวเก็บประจุชดเชยแบบขนาน และอนุกรม

เนื่องจาก SEIG ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเป็นแบบขนานเพียงอย่างเดียวนั้นจะมีปัญหาดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไขโดยการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม (C_{se}) เพิ่มเข้ามาในระบบซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมกับภาระทางไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 2 โดยในการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน – อนุกรม ที่เหมาะสมนั้นจะใช้วิธีจีเนติกอัลกอริธึม ใน 2 กรณีคือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ $(v=1)$ และกรณีที่ความถี่คงที่ $(F=1)$ ซึ่งจะตั้งเป้าหมายที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (±0.05 p.u.)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของ SEIG ที่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรม



รูปที่ 3 ขั้นตอนการหาค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสม

กำหนดให้

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \quad (2)$$

$$Z_m = \frac{jX_m\left(\frac{R_c}{F}\right)}{jX_m + \left(\frac{R_c}{F}\right)} \quad (3)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{F-v} + jX_2 \quad (4)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของ $Z_{C_{sh}}$ และ $Z_{C_{se}}$

$$Z_{Csh} = \left(\frac{-jX_{Cse}}{F^2}\right) \quad (5)$$

$$Z_{Cse} = \left(\frac{-jX_{Cse}}{F^2}\right) \quad (6)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของภาระไฟฟ้า

$$Z_L = \left(\frac{R_L}{F}\right) + jX_L \tag{7}$$

ค่าความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

$$I_2 = \frac{-V_g}{FZ_2} \tag{8}$$

$$I_\phi = \frac{-V_g}{FZ_m} \tag{9}$$

$$I_1 = I_2 - I_\phi \tag{10}$$

$$\frac{V_t}{F} = \left(\frac{V_g}{F}\right) - (I_1 Z_1) \tag{11}$$

$$I_{Csh} = \frac{V_t}{(FZ_{Csh})} \tag{12}$$

$$I_{L1} = \frac{V_t}{F(Z_{Cse} + Z_L)} \tag{13}$$

$$I_{L2} = I_1 - I_{Csh} \tag{14}$$

$$\frac{V_L}{F} = I_{L1} Z_L \tag{15}$$

จากสมการที่ (2) ถึง (15) ค่า R_1, R_2, R_c, X_1 และ X_2 ความสัมพันธ์ของค่า V_g / f กับค่า X_m และตัวแปร Z_L จะสามารถกำหนดได้โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าของภาระไฟฟ้า จากนั้นจะทำการหาค่าตัวเก็บประจุแบบขนาน-อนุกรมที่เหมาะสมด้วยวิธีการจีเนติกอัลกอริธึม โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่า V_g / f กับ X_m ให้เหมาะสมกับสภาวะการจ่ายภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบ Lagging p.f. ค่าต่างๆ 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ $(v = 1)$ และกรณีที่ความถี่คงที่ $(F = 1)$ ซึ่งมีขั้นตอนของวิธีการนำเสนอดังรูปที่ 3 และมีสมการเป้าหมายดังนี้

$$F_{objective} = \frac{1}{2}\left|1 - \frac{V_L}{V_{rated}}\right|^2 + \frac{1}{2}\left|1 - \frac{I_{L1}}{I_{L2}}\right|^2 + \frac{1}{2}\left|I_2 - I_\phi - I_1\right|^2 \tag{16}$$

4.ผลการทดสอบ

เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่นำมาใช้ทดสอบเป็น SEIG มีขนาด 2.2 kW โดยมีรายละเอียดดังนี้

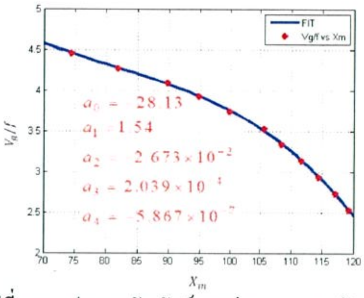
2.2 kW, 4 Pole, Star Connected, 50 Hz, 380 V, 5.0 A, 1420 rpm

และได้ทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ได้ผลเป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

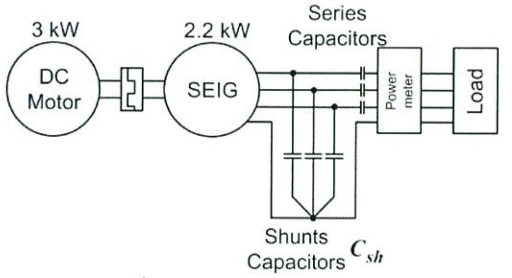
พิกัด (kW)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_1 (Ω)	X_2 (Ω)	X_m (Ω)	R_c (Ω)
2.2	3.055	3.159	2.962	4.443	86.054	1346.23

เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กจะส่งผลให้ความสัมพันธ์ของแรงดัน (V_g) และสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ค่า X_m ของสนามแม่เหล็กมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_g / f กับ X_m ซึ่งผลที่ได้ออกมาเป็นดัง รูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_g / f กับ X_m

จากการออกแบบจะทำให้ได้ค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสม จะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในค่าที่คาดไว้ คือ ±0.05 p.u. ของค่าแรงดันไฟฟ้าปกติ จากนั้นนำค่าค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสมไปทดสอบจริง โดยมีวงจรการทดสอบเป็นดังรูปที่ 5 ซึ้งในการทดสอบได้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการออกแบบ ในทั้ง 2 กรณี คือ กรณีความเร็วต้นกำลังคงที่ $(v = 1)$ และกรณีที่ความถี่คงที่ $(F = 1)$ ผลการออกแบบและผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 5 วงจรการทดสอบของ SEIG

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ SEIG ของกรณี $v = 1$

Load p.f.	0.87	0.91	0.92	0.94	0.98
Load p.u.(D)	0.672	0.58	0.55	0.63	0.59
Load p.u (T)	0.667	0.58	0.52	0.62	0.56
C_{sh} (D)	32.1	35.9	35.7	38.5	38.4
C_{sh} (T)	35	35	35	40	40
C_{se} (D)	40.14	45.4	52.7	50.8	54.9
C_{se} (T)	40	45	50	50	55
f (D)	48.18	48.2	48.4	48.3	48.5
f (T)	4.49	49	48.9	48.7	49
n_r (D)	1500	1500	1500	1500	1500
n_r (T)	1499	1500	1500	1502	1500
V_{reg} p.u.(T)	0.045	0.01	0.02	0.04	0

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

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบและผลการทดสอบ SEIG ของกรณี $F=1$

Load p.f.	**0.87**	**0.91**	**0.92**	**0.94**	**0.98**
Load p.u.(D)	0.59	0.59	0.55	0.58	0.54
Load p.u (T)	0.59	0.55	0.55	0.58	0.53
C_{sh} **(D)**	38.7	34.4	33.8	33.1	36.6
C_{sh} **(T)**	40	35	35	35	35
C_{se} **(D)**	70.7	58.8	52.7	50.6	59.7
C_{se} **(T)**	70	60	50	50	60
f (D)	1565	1558	1552	1553	1547
f (T)	1546	1557	1538	1541	1533
n_r **(D)**	50	50	50	50	50
n_r **(T)**	50.1	50.5	50.1	50	50
V_{reg} **p.u.(T)**	0.01	0.04	0	0	0.04

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

5.สรุป

ในบทความนี้ เสนอเทคนิคการหาค่าตัวเก็บประจุสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง(SEIG) โดยค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน ±0.05 p.u. ในการหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม ใช้การวิเคราะห์จากวงจรสมมูลในแต่ละเฟส และแก้สมการหาคำตอบด้วย จีเนติกอัลกอริธึม(GA) การคำนวณจีเนติกอัลกอริธึม ใช้โปรแกรม Matlab นำไปออกแบบการทดลอง จากการทดลองพบว่า การต่อตัวเก็บประจุขนาน (C_{sh}) เพียงอย่างเดียว สามารถรักษาแรงดันได้ที่ ภาระไฟฟ้าต่ำๆ เท่านั้น เมื่อภาระไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจะเกิน ±0.05 p.u. จึงไม่เหมาะสมนำมาใช้งาน แต่เมื่อมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรม (C_{se}) ด้วยแล้ว จะสามารถรักษาแรงดันได้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน ±0.05 p.u. ได้ที่ภาระโหลดต่างๆ และค่า p.f. ต่างๆได้

ในการใช้จีเนติกอัลกอริธึมร่วมกับโปรแกรม Matlab ทำให้สามารถหาขนาดของตัวเก็บประจุขนาน และตัวเก็บประจุอนุกรม ที่สามารถรักษาแรงดันได้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน ±0.05 p.u. ได้อย่างสะดวก และรวดเร็ว

7.เอกสารอ้างอิง

[1] Ion Boldea, Syed A. nasar, **The induction machine handbook**, CRC Press LLC, 2002.

[2] William H. Hayt, Jr., Jack E. Kemmerly, Steven M. Durbin, **Engineering Circuit Analysis**, 8th Ed., New York, The McGraw-Hill Companies,Inc., 2012.

[3] วุฒิชัย รอดพุ่ม **"ค่าตัวเก็บประจุชดเชยที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง,"** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] Stephen J. Chapman, **Electric machinery fundamentals,** 4th Ed., New York, The McGraw-Hill Companies,Inc., 2005.

[5] ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม. (2558, 29 มีนาคม). ใน *วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี*. สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน 2559, จาก https://th.wikipedia.org/wiki/ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

[6] กัปตันนีโม. (2556). *ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) กับการเลียนแบบกระบวนการทางธรรมชาติเพื่อค้นหาคำตอบ*. จาก https://kapitaennem0.wordpress.com/2013/07/17/genetic-algorithm/

[7] A.E.Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, Electric Machinery, 6th Ed., New York, The McGraw-Hill Companies,Inc., 2003.

ประวัติผู้เขียนบทความ

	นายณัฐศักดิ์ สายอุทธา 55010408 เกิดวันที่ 9 เมษายน 2537 โทรศัพท์ 08-6916-8933 E-mail : nattasak37@gmail.com
	นายนฤดล โกศลจิตร์ 55010630 เกิดวันที่ 25 ตุลาคม 2536 โทรศัพท์ 08-7334-9797 E-mail : fook_don@hotmail.com
	นางสาวมนชนก พันธุคุปต์ 55010978 เกิดวันที่ 13 กันยายน 2536 โทรศัพท์ 08-6629-4756 E-mail : chemist_crystal@hotmail.com
	นางสาวฤชุดา กัลกะ 55011057 เกิดวันที่ 26 กันยายน 2536 โทรศัพท์ 08-522-7755 E-mail : w.waewwow@gmail.com

ภาคผนวก ค

คำอธิบายสัญลักษณ์

ภาคผนวก ค
คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
n_s	ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous speed)	rpm
f_s	ความถี่ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก	Hz
P	จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์	Pole
s	ค่าสลิป	-
n_r	ความเร็วของโรเตอร์	rpm
ω_s	ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์	rad/s
ω_r	ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์	rad/s
$\hat{E}_s$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง	V
$\hat{E}_r$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะทำงาน	V
f_s	ความถี่ทางไฟฟ้าที่สเตเตอร์	Hz
f_r	ความถี่ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์	Hz
P_{in}	กำลังไฟฟ้าอินพุทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	W
P_{gap}	กำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ	W
P_e	กำลังไฟฟ้าที่ถูกแปลงไปเป็นรูปกำลังทางกล	W
$P_{cu,stator}$	กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดที่สเตเตอร์	W
$P_{core\ loss}$	กำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็ก	W
P_{out}	กำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของมอเตอร์	W
B_{max}	ค่าสูงสุดของความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก	T
f	ความถี่ทางไฟฟ้า	Hz
x	Steinmetz's index มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5	-
K_h	ค่าคงที่ของ Hysteresis loss ขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็ก	-
K_e	ค่าคงที่ของ Eddy current loss ขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็ก	-
$P_{cu,rotor}$	กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดที่โรเตอร์	W
τ_e	แรงบิดทางไฟฟ้า	N-m
P_{loss}	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	W
$\hat{V}_1$	แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์	V

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\hat{E}_2$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สร้างจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ	V
$\hat{I}_1$	กระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (A)	A
R_1	ความต้านทานไฟฟ้าที่สเตเตอร์ (Ω)	Ω
X_1	รีแอคแตนซ์ที่สเตเตอร์ (Ω)	Ω
$\hat{I}_2$	กระแสส่วนประกอบด้านภาระไฟฟ้า	A
$\hat{I}_\phi$	กระแสกระตุ้น	A
$\hat{E}_{2s}$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของโรเตอร์ (V)	V
$\hat{E}_{rotor}$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงบนโรเตอร์ (V)	V
a	อัตราส่วนระหว่างขดลวดด้านสเตเตอร์กับด้านโรเตอร์	-
$\hat{I}_{2s}$	กระแสเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของโรเตอร์	A
$\hat{I}_{rotor}$	กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงบนโรเตอร์	A
Z_{2s}	อิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)	Ω
R_2	ความต้านทานของโรเตอร์อ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)	Ω
X_2	รีแอคแตนซ์ของโรเตอร์ที่ความถี่สลิปอ้างอิงสู่ด้านสเตเตอร์ (Ω)	Ω
$V_{1.nl}$	แรงดันเฟสขณะไม่มีภาระ	V
$I_{1.nl}$	กระแสไลน์ขณะไม่มีภาระ	A
P_{nl}	กำลังไฟฟ้าขาเข้าขณะไม่มีภาระ	W
P_{rot}	ความสูญเสียจากการหมุน	W
s_{nl}	สลิปขณะไม่มีภาระ	-
jX_m	รีแอคแตนซ์สนามแม่เหล็ก	Ω
X_{nl}	ความต้านทานเสมือนปรากฏ	Ω
Q_{nl}	กำลังเสมือนขณะไม่มีภาระ	var
S_{nl}	กำลังทั้งหมดป้อนเข้าขณะไม่มีภาระ	VA
$V_{1,bl}$	แรงดันที่เฟสที่ใช้ในการตรึงโรเตอร์	V
$I_{1,bl}$	กระแสไลน์ที่ใช้ในการตรึงโรเตอร์	A
P_{bl}	กำลังทางไฟฟ้าขาเข้าทั้งหมดที่ใช้ในการตรึงโรเตอร์	W
F_{bl}	ความถี่ที่ใช้ในการตรึงโรเตอร์	Hz
R_{bl}	ความต้านทานจากการทดสอบตรึงโรเตอร์	Ω

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
Z_{bl}	อิมพีแดนซ์จากการตรึงโรเตอร์	Ω
X_{bl}	ค่าความต้านทานเสมือนจากการตรึงโรเตอร์	Ω
P_{fw}	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความฝืดและแรงลม	W
$\hat{V}_T$	แรงดันที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	V
$\hat{I}_m$	กระแสกระตุ้นในการสร้างสนามแม่เหล็ก	A
$\hat{I}_c$	กระแสไหลที่ตัวเก็บประจุ	A
Z_L	อิมพิแดนซ์ของภาระทางไฟฟ้า	Ω
Z_{Csh}	อิมพิแดนซ์ของตัวเก็บประจุแบบขนาน	Ω
Z_{GEN}	อิมพิแดนซ์ของ SEIG	Ω
Z_f	อิมพิแดนซ์รวมระหว่างอิมพิแดนซ์ส่วนกระตุ้นและอิมพิแดนซ์ของโรเตอร์	Ω
Z_m	อิมพิแดนซ์ของส่วนกระตุ้น	Ω
Z_2	อิมพิแดนซ์ของโรเตอร์	Ω
X_L	รีแอคแตนซ์ของภาระทางไฟฟ้า	Ω
X_{Csh}	รีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อขนาน	Ω
Y_L	แอดมิตแตนซ์ของภาระทางไฟฟ้า	S
Y_{Csh}	แอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อขนาน	S
Y_{GEN}	แอดมิตแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	S
$F_{objective}$	สมการเป้าหมาย	-
C_{sh}	ค่าตัวเก็บประจุขนาน	μF
P_L	กำลังไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้า	W
V_L	แรงดันไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้า	V
I_L	กระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้า	A
I_c	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ	A
I_1	กระแสไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์	A
V_{reg}	การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า	V
$p.f.$	ตัวประกอบกำลัง	-
Z_{Csh}	อิมพิแดนซ์ของตัวเก็บประจุแบบขนาน	Ω
Z_{Cse}	อิมพิแดนซ์ของตัวเก็บประจุแบบอนุกรม	Ω

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
I_{Csh}	กระแสที่ตัวเก็บประจุแบบขนาน	A
I_{L1}	กระแสที่ภาระทางไฟฟ้ารูปแบบที่หนึ่ง	A
I_{L2}	กระแสที่ภาระทางไฟฟ้ารูปแบบที่สอง	A
C_{se}	ตัวเก็บประจุอนุกรม	μF

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐศักดิ์ สายอุทธา รหัสนักศึกษา 55010408
เกิดวันที่ 9 เมษายน 2537 ที่จังหวัดน่าน
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายนฤดล โกศลจิตร์ รหัสนักศึกษา 55010630
เกิดวันที่ 25 ตุลาคม 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นางสาวมนชนก พันธุคุปต์ รหัสนักศึกษา 55010978
เกิดวันที่ 13 กันยายน 2536 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นางสาวฤชุดา กัลกะ รหัสนักศึกษา 55011057
เกิดวันที่ 26 กันยายน 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง