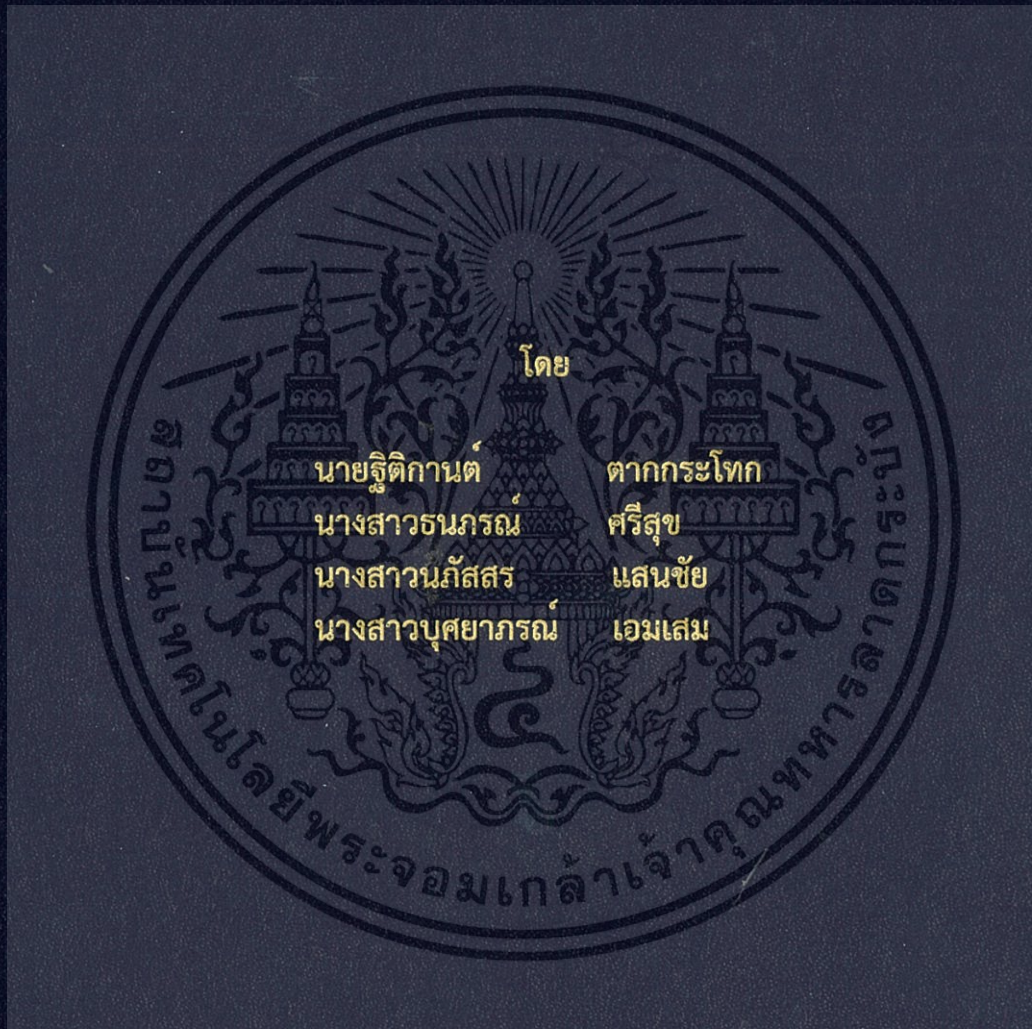


การออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้า  
โดยการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส  
DESIGN OF POWER FLOW EXPERIMENT  
BY CONTROLLING OF SYNCHRONOUS GENERATORS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้า  
โดยการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส  
DESIGN OF POWER FLOW EXPERIMENT  
BY CONTROLLING OF SYNCHRONOUS GENERATORS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF POWER FLOW EXPERIMENT  
BY CONTROLLING OF SYNCHRONOUS GENERATORS



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้า  
โดยการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

DESIGN OF POWER FLOW EXPERIMENT  
BY CONTROLLING OF SYNCHRONOUS GENERATORS



นาย รุติกานต์                      ดากกระโทก  
นางสาว ธนภรณ์                      ศรีสุข  
นางสาว นภััสสร                      แสนชัย  
นางสาว บุศยาภรณ์                      เอ็มเสม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ธีรพล โปธิ์พงศ์วิวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัส

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย รุติกานต์ ตากกระโทก
  2. นางสาว ธนภรณ์ ศรีสุข
  3. นางสาว นภัสสร แสนชัย
  4. นางสาว บุศยาภรณ์ เอ็มเสม

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร.ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.วรุตม์ สุอำพัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

นาย ฐิติกานต์ ตากกระโทก  
นางสาว ธนภรณ์ ศรีสุข  
นางสาว นภัสสร แสนชัย  
นางสาว บุศยาภรณ์ เอมเสมอ  
ดร. ชีรพล โพธิ์พงษ์ศรีวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2559

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อศึกษาการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระไฟฟ้า ให้มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด ชุดทดลองประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสองเครื่องขนาดเท่ากัน (8.1kVA) มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเป็นต้นกำลังทางกลซึ่งจะถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ในการทดลองจะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองตัวกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ (MEA) ผ่านแบบจำลองสายส่งไฟฟ้าแบบระยะสั้น และจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระไฟฟ้า ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะถูกควบคุมโดยการปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลและกระแสกระตุ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส นอกจากนี้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีการออกแบบสายส่งในระบบไฟฟ้าจำลองโดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ และบัลลาสต์ ผลการศึกษาพบว่า หากต้องการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (P) มากขึ้น จะต้องปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้สูงขึ้น และหากต้องการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) มากขึ้น จะต้องปรับกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้สูงขึ้น และการปรับกระแสกระตุ้นให้สูงขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น นอกจากนี้สามารถหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจำลองมีค่าน้อยที่สุดได้โดยใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม โดยเลือก  $\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$  เป็นตัวแปรต้น เลือก  $\delta_3, P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, V_1, V_2, V_3$  เป็นตัวแปรตาม ในการหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุด

## Design of power flow experiment by controlling of Synchronous generators

Mr. Titikan Takkratok  
Miss Thanaporn Srisuk  
Miss Napasorn Saenchai  
Miss Busayaporn lamsem  
Dr. Teeraphon Phopongviwat Advisor

### ABSTRACT

This thesis shows design experiment of controlling power flow by using synchronous generators. The objective is to study the power delivered to the load and minimize power losses in transmission lines. This experiment consists of two same size synchronous generators (8.1kVA) connect with MEA system by short model transmission line. The generators are driven by three-phase induction motors which control by inverter and generated power to load. In this experiment, Power those generated from synchronous generators are control by adjust the speed of primover and the exciting current of synchronous generators. In addition, this thesis is also designed the simulated transmission lines by using inductors and ballards. The results revealed that when both of synchronous generators are connected with grid system, they can generate more active power by increasing the prime mover's speed. When the power delivered to load, the terminal voltage of synchronous generator will decrease, so we can increase the terminal voltage by increasing the exciting current. And determine optimum variables in order to minimize power losses in transmission lines by using Genetic Algorithms.  $\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$  are selected to be variable and  $\delta_3, P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D2}, Q_{G3}, V_1, V_2, V_3$  are parameters in optimization process.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณหลายท่านจึงทำให้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ดร.ธีรพล โปธิพงษ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัย และการจัดทำปริญญาานิพนธ์ ช่วยควบคุมการดำเนินงานและช่วยแก้ไขให้ถูกต้องจนสำเร็จเรียบร้อย รวมทั้งอำนวยความสะดวกการขอใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทำโครงการเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม และ ดร.วรุฒม์ สุอำพัน และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้การปรึกษา สนับสนุนทั้งด้านอุปกรณ์ ห้องปฏิบัติการ และช่วยเหลือตลอดการทำโครงการด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้บริการยืมอุปกรณ์เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือตลอดการทำโครงการด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษา การเงิน และเป็นกำลังใจตลอดมา และผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมถึงเพื่อนๆที่ทำงานร่วมกันที่คำปรึกษา แนะนำ และให้กำลังใจแก่ผู้ทำโครงการ ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	X
คำอธิบายสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	4
2.1.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง	4
2.1.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง	5
2.2 การหาวงจรมุมลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	8
2.2.1 การทดสอบหาความต้านทานของตัวนำ	8

## สารบัญ (ต่อ)

2.2.2 การทดสอบเปิดวงจร	9
2.2.3 การทดสอบลัดวงจร	11
2.2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	13
2 3.การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	18
2.3.1.การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ	19
2.3.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่	19
2.3.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันขนานกัน	22
2.4 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า	24
2.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI	26
2.5.1 โครงสร้างแกนเหล็กและขดลวดตัวนำ	26
2.5.2 การคำนวณในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	28
2.5.5 ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด	30
2.5.6 กำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	31
2.6 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเจนติกอัลกอริทึม	32
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	37
3.1 การควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	37
3.2 การหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ	38
3.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง	40
3.4 การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า	42

## สารบัญ (ต่อ)

3.5 การจำลองระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 แหล่ง	43
3.6 การประยุกต์ใช้เทคนิคอัลกอริทึมในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง	47
4.1 ผลการทดลองควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	47
4.2 ผลการทดลองแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ	48
4.3 ผลการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง	49
4.4 ผลการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	55
4.5 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 แหล่ง	57
4.6 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องขนานกันและขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งโดยกำหนดการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามสมการฟังก์ชันเป้าหมาย	58
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุป	61
5.1.1 การทดลองควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	61
5.1.2 การทดลองหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ	61
5.1.3 การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง	61

## สารบัญ (ต่อ)

5.1.4 การทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า	62
5.1.5 การทดลองการจ่ายภาระไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 แหล่ง	62
5.1.6 การทดลองหาตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง มีค่าน้อยที่สุด	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก	66
ภาคผนวก ข	70
ภาคผนวก ค	77
ภาคผนวก ง	92
ประวัติผู้เขียน	100

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการ	2
ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	67
ข.1 พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	71
ข.2 ผลการทดลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	73
ข.2 ผลการทดลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	76
ค.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ความเร็วโรเตอร์คงที่	78
ค.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่กระแสกระตุ้นคงที่	80
ค.3 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	81
ค.4 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	82
ค.5 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขณะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	82
ค.6 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 ขณะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	84
ค.7 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสถานะไร้การะไฟฟ้า	86
ค.8 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสถานะการะไฟฟ้าชั้นที่ 1	87

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ค.9 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่ง สภาวะภาระไฟฟ้าชั้นที่ 2	88
ค.10 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่ง สภาวะภาระไฟฟ้าชั้นที่ 3	89
ค.11 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่ง สภาวะภาระไฟฟ้าชั้นที่ 4	90
ค.12 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่ง สภาวะภาระไฟฟ้าชั้นที่ 5	91

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	5
2.2 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง	6
2.3 วงจรของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง	6
2.4 หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	7
2.5 วงจรการต่อขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้ง 3 เฟส	9
2.6 วงจรการทดสอบแบบเปิดวงจร	10
2.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เข้ากับกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนาม	11
2.8 วงจรการทดสอบแบบลัดวงจร	11
2.9 ความสัมพันธ์ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดอาร์มาเจอร์กับไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนาม	12
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับแรงดันที่อาร์มาเจอร์เมื่อสภาวะเปิดวงจรเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกระแสอาร์มาเจอร์เมื่อสภาวะปิดวงจร	13
2.11 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส	13
2.12 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	15
2.13 ความสัมพันธ์ของกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	16
2.14 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส	16
2.15 ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่เมื่อขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ความถี่และกำลังไฟฟ้าของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	20
2.16 ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเสมือนกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	21
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและความถี่จากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันขนานกัน	22
2.18 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันขนาน	23
2.19 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น	25
2.20 ภาพตัดตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI	26
2.21 โครงสร้างแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	27
2.22 B-H curve ของวัสดุแกนเหล็กต่างๆ	28
2.23 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	29

2.24	แผนผังการหาค่าที่เหมาะสมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในระบบ โดยใช้เงินเติกอัลกอริทึม	36
3.1	วงจรการทดลองควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	38
3.2	วงจรการทดลองหาแผนภาพบ้าน	40
3.3	วงจรการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง	41
3.4	วงจรการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	43
3.5	วงจรการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	45
3.6	แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัสด	46
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	47
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	48
4.3	แผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	49
4.4	แผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	49
4.5	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟสำหรับกรณีที่ 1	50
4.6	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟสำหรับกรณีที่ 2	51
4.7	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟสำหรับกรณีที่ 3	52
4.8	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟสำหรับกรณีที่ 4	53
4.9	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟสำหรับกรณีที่ 5	54
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	55
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	55
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	56
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	56
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับภาระไฟฟ้า	57
4.15	คำตอบที่ได้จากเงินเติกอัลกอริทึม	59

4.16 พฤติกรรมฟังก์ชันเป้าหมายของเจเนติกอัลกอริทึม	60
ข.1 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	72
ข.2 ความสัมพันธ์ของการเปิดวงจร และการปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	73
ข.3 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	74
ข.4 ความสัมพันธ์ของการเปิดวงจร และการปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	75



## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$B$	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	เทสลา
$D_m$	เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด	เมตร
$E_a$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	โวลต์
$f$	ความถี่	เฮิรตซ์
$f_{nl}$	ความถี่ของโกเวอร์เนอร์ที่ตั้งค่าไว้	เฮิรตซ์
$f_{nl_x}$	ความถี่โกเวอร์เนอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวที่ตั้งค่าไว้	เฮิรตซ์
$f_{sys}$	ความถี่ของระบบไฟฟ้า	เฮิรตซ์
$H$	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	แอมแปร์ต่อเมตร
$I$	ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ	แอมแปร์
$I_a$	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	แอมแปร์
$I'_a$	กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์จากการทดลองลัดวงจรที่ได้จากรูปที่ 2.9	แอมแปร์
$I_{kn}$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างบัส $k$ และ $n$	แอมแปร์
$I_R$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าภาวะไฟฟ้า	แอมแปร์
$I_s$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	แอมแปร์
$K$	ค่าคงที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	-
$K_i$	ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูญเสียในช่องอากาศ	-
$k_3$	ความหนาของระบบฉนวน	-
$k_4$	ตัวคูณลดขนาดของขดลวด (0.92 สำหรับขดลวดขนาด 0.24-0.45 mm., 0.9 สำหรับขดลวดขนาด 0.50-1.80 mm.)	-
$l_g$	ความยาวช่องอากาศ	เมตร
$N$	จำนวนของสายส่งกำลังไฟฟ้า	-
$N_B$	จำนวนบัส	-
$n$	1, 2, 3... $N_{b-1}$	-

### คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$n_s$	ความเร็วเชิงโคโรนัส	รอบต่อนาที
$P$	กำลังไฟฟ้าจริง	วัตต์
$P_c$	กำลังไฟฟ้าจริง	วัตต์
$P_{Dk}$	กำลังไฟฟ้าจริงที่ภาระไฟฟ้าต้องการที่บัส $k$	วัตต์
$P_{Gk}$	กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $k$	วัตต์
$P_{Gn}^{min}, P_{Gn}^{max}$	ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $k$	วัตต์
$P_{Gx}$	กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง	วัตต์
$P_{input}$	กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสจ่าย	วัตต์
$P_{load}$	กำลังไฟฟ้าจริง	วัตต์
$P_{loss}$	ความกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่ง	วัตต์
$P_{supply}$	กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสจ่าย	วัตต์
$Pole$	จำนวนขั้วแม่เหล็ก	ขั้ว
$Q$	กำลังไฟฟ้าเสมือน	วาร์
$Q_c$	กำลังไฟฟ้าเสมือน	วาร์
$Q_{Dk}$	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ภาระไฟฟ้าต้องการที่บัส	วาร์
$Q_{Gk}$	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $k$	วาร์
$Q_{Gn}^{min}, Q_{Gn}^{max}$	ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $k$	วาร์
$Q_{Gx}$	กำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง	วาร์

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$Q_{load}$	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตได้	วาร์
$R$	ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ	โอห์ม
$R_a$	ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์	โอห์ม
$R_{kn} + jX_{kn}$	อิมพีแดนซ์ในสายส่งกำลังไฟฟ้า $k-n$	โอห์ม
$R_T$	ค่าความต้านทานของสายส่ง	โอห์ม
$S$	กำลังไฟฟ้าปรากฏ	โวลต์แอมแปร์
$Slope_p$	ความชันของกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่	วัตต์ต่อเฮิรตซ์
$Slope_{p_x}$	ความชันของกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่แต่ละเครื่อง	วัตต์ต่อเฮิรตซ์
$Slope_q$	ความชันของกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนกับแรงดันไฟฟ้า	วาร์ต่อโวลต์
$Slope_{q_x}$	ความชันของกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนกับแรงดันไฟฟ้าแต่ละเครื่อง	วาร์ต่อโวลต์
$V$	แรงดันไฟฟ้า	โวลต์
$V_k$	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส $k$	โวลต์
$V_n$	ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส $n$	โวลต์
$V_n^{min}, V_n^{max}$	ขอบเขตของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส $k$	โวลต์
$V_{nl}$	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อทำการปรับกระแสกระตุ้น	โวลต์
$V_{nl_x}$	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของแต่ละเครื่อง	โวลต์
$V_R$	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของภาระไฟฟ้า	โวลต์
$V_s$	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	โวลต์
$V_{sys}$	แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า	โวลต์
$V_t$	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์	โวลต์

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$V_{t, rated}$	แรงดันไฟฟ้าพิกัดที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	โวลต์
$X_s$	ค่าความต้านทานเสมือนซิงโครนัส	โอห์ม
$X_T$	ค่าความต้านทานเสมือนของสายส่ง	โอห์ม
$Y_{k,n}$	ขนาดของ $Y_{bus k,n}$	
$Z_T$	อิมพีแดนซ์ของสายส่ง	โอห์ม
$\beta$	มุมของความต้านทานกระแสสลับ	องศา
$\delta$	มุมระหว่างแรงดันที่ขั้วไฟฟ้ากับมุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	องศา
$\delta_k$	มุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส $k$	องศา
$\delta_n$	มุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส $n$	องศา
$\theta$	มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	องศา
$\phi$	เส้นแรงแม่เหล็ก	เวเบอร์
$\mu_0$	ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m	
$\mu_r$	อัตราส่วนความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุเทียบกับอากาศ เรียกว่า <i>relative permeability</i>	
$\theta_{kn}$	มุมของ $Y_{bus k,n}$	องศา
$\omega_m$	ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์	เรเดียนต์ต่อวินาที

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) ในวิชาระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) และการศึกษาวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical machine) สำคัญอย่างมากในการนำไปวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในแง่ของระบบผลิต ระบบสายส่ง และระบบการกระจายกำลังไฟฟ้า ในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนขึ้นเกิดมากในระบบไฟฟ้าเพื่อสนับสนุนการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภค จะเป็นการดีถ้ามีการวิเคราะห์การจัดการกำลังไฟฟ้าในระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีขึ้น ดังนั้นโครงงานนี้ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์บางส่วนและศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าจำลองผ่านชุดการทดลอง เพื่อให้สามารถเข้าใจในวิชาระบบไฟฟ้ากำลัง และวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น โครงงานนี้ต้องใช้องค์ความรู้หลายด้านเพื่อใช้ในการศึกษา เช่น การออกแบบสายส่งกำลังไฟฟ้า การออกแบบภาระไฟฟ้า (Load) การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว เป็นต้น

ด้วยเหตุผลนี้คณะผู้จัดทำจึงได้ออกแบบการทดลอง คือ การควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ การหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ 2 เครื่อง การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า การจ่ายภาระไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 แหล่ง การหาตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยที่สุด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเท่ากัน 2 ตัวขนานกัน
2. เพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว
3. เพื่อวิเคราะห์การจ่ายภาระไฟฟ้าที่แต่ละบัส ให้มีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าน้อยที่สุด

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

โครงงานนี้มีการจำลองระบบไฟฟ้าขนาดเล็กขึ้นมาเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า โดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ขนาด 6.5 kW 2 เครื่อง สายส่งกำลังไฟฟ้า และภาระ

ไฟฟ้าโดยโครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิจาาระบบไฟฟ้ากำลัง และวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้าว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ โดยศึกษาจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 1.4 วิธีการดำเนินโครงการ

1. ค้นคว้าและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ
3. ออกแบบสายส่งไฟฟ้ากำลังและภาระไฟฟ้า
4. ทดลองเพื่อการศึกษาการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส
5. ทดลองจ่ายภาระไฟฟ้าเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ ขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเท่ากัน 2 ตัวขนานกัน และระบบไฟฟ้าที่มี 3 บัส แล้วบันทึกผลการทดลอง
6. นำค่าที่ได้จากการทดลองมาศึกษาเทียบกับค่าที่ได้จากการการคำนวณทางทฤษฎี แล้วพิจารณาว่าการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่
7. ศึกษา วิเคราะห์ แก้ไขปัญหาและสรุปผลการทดลอง
8. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ และการนำเสนอผลงาน

#### 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ 8 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2559 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ.2560

#### ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการ

การดำเนินงาน	เดือน									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ										
2.จัดเตรียมอุปกรณ์และศึกษาวิธีใช้งานของอุปกรณ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
3.ทดลองหาค่าพารามิเตอร์ ต่างๆและทำการทดลอง การไหลของกำลังไฟฟ้า										
4.ออกแบบสายส่งและ จัดทำสายส่ง										
5.ทดลองเพื่อศึกษาการ ไหลของกำลังไฟฟ้า										
6.แก้ไขความผิดพลาดที่ เกิดขึ้น										
7.สรุปผลการทำโครงการ										
8.จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์										



ตารางที่กำหนดไว้



ตารางงานที่ได้กระทำจริง

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. โครงการนี้ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเรื่องการไหลของกำลังไฟฟ้า และสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้
2. โครงการนี้ทำให้สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้าและวิชาการระบบไฟฟ้ากำลังในเรื่องของการส่งจ่ายและควบคุมกำลังไฟฟ้า
3. โครงการนี้ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดไฟฟ้าที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
4. โครงการนี้ทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการใช้เทคนิคอัลกอริทึมในโปรแกรม Matlab เพื่อการหาค่าที่เหมาะสมในสมการที่ต้องการหาคำตอบ
5. สามารถนำไปประยุกต์ในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการนี้ ประกอบด้วยหลักการทั่วไปในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าต่างๆ หลักการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเป็นต้นกำลังทางกลและถูกควบคุมความเร็วรอบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้าตามการจำลองจากสมการกำลังไฟฟ้า ทฤษฎีตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI เพื่อจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้า และทฤษฎี เจเนติกอัลกอริทึม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด

#### 2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส หมายถึง เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำงานด้วยการหมุน และขณะที่หมุนด้วยความเร็วคงที่将有มีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัสซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วและความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ

##### 2.1.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง

สเตเตอร์ (Stator) เป็นที่ติดตั้งของแกนเหล็ก (Stator Core) ซึ่งแกนเหล็กจะมีลักษณะเป็นช่องเพื่อใส่ขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding Slot) ซึ่งแต่ละช่องจะต่อเข้าด้วยกันกับขดลวดสเตเตอร์ในช่องอื่นๆ แกนเหล็กของสเตเตอร์จะไม่ทำให้เป็นเหล็กแท่งแต่จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ (Stator Core Lamination) ประกอบรวมเข้าด้วยกันเพื่อลดการไหลของกระแสไหลวน (Eddy current) ในแกนเหล็ก เมื่อกระแสไหลวนในแกนเหล็กจะทำให้เกิดความร้อนและทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสลดลง

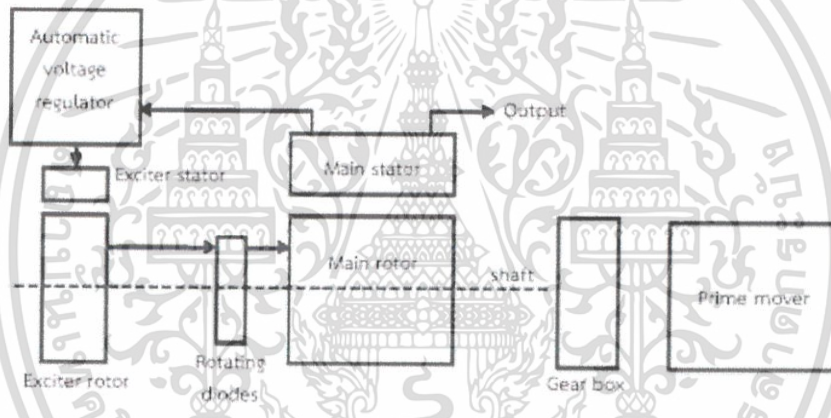
โรเตอร์ (Rotor) ทำมาจากแผ่นลามิเนต (Laminated sheet steel) หลายๆแผ่นซ้อนกัน โดยทำการกลึงและเจาะร่อง ซึ่งในแต่ละร่องการใส่แท่งตัวนำทองแดงและต่อกันที่ด้านปลายเพื่อทำเป็นขดลวด ที่ขั้วแม่เหล็กมีขดลวดพันอยู่เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก โดยค่ากระแสที่ไหลเข้าโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประเภทของขั้วแม่เหล็กมี 2 ชนิด คือ

แบบขั้วยื่น (Salient pole) เหมาะสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำจนถึงความเร็วปานกลาง โดยประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กมากกว่า 4 ขั้วขึ้นไป ช่องว่างอากาศระหว่างตัวโรเตอร์กับตัวสเตเตอร์จะไม่สม่ำเสมอ โครงสร้างทำด้วยแผ่นลามิเนตอัดเป็นแท่งยึดด้วยสลักเกลียวเพื่อลดความร้อนจากกระแสไหลวน

โรเตอร์แบบขั้วทรงกระบอก (Cylindrical Pole) เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงประมาณ 3,000 รอบต่อนาที จะมีขั้วแม่เหล็ก 2-4 ขั้ว มีช่องว่างอากาศระหว่างตัวโรเตอร์กับสเตเตอร์สม่ำเสมอ โครงสร้างเป็นรูปทรงกระบอกมีผิวเรียบ เนื่องจากหมุนด้วยความเร็วสูงและลดแรงหนีศูนย์กลางได้ ซึ่งในโครงการนี้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโรเตอร์แบบขั้วทรงกระบอกทั้งสองเครื่อง

AVR (Automatic Voltage Regulator) ใช้ในการรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงให้กลับเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state)

Rotating diodes คือวงจรเรียงกระแสที่อยู่ติดกับเพลลาทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรงไปที่โรเตอร์หลัก (main rotor)

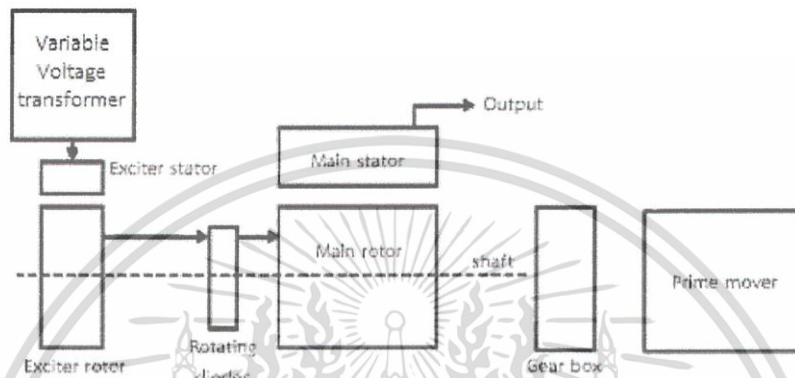


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

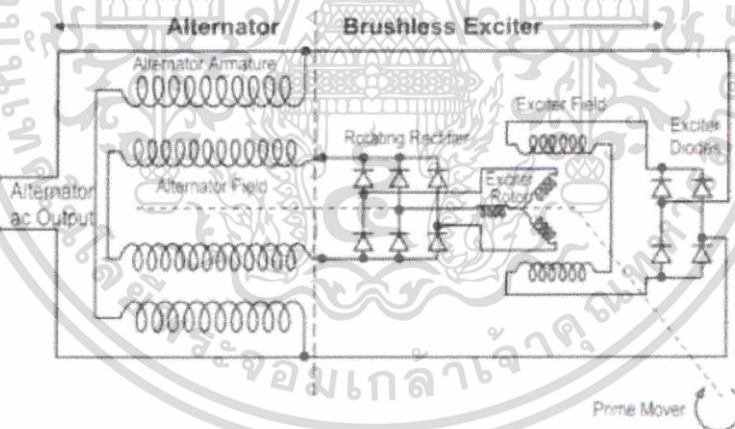
### 2.1.2 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง เมื่อต้นกำลังทางกลหมุนทำให้เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน กำลังไฟฟ้าจาก Main stator ได้จากการ Excitation ของอำนาจแม่เหล็กจำนวนเล็กน้อยที่ตกค้างจากการทำให้เป็นแม่เหล็กในครั้งก่อน (Residual flux) เคลื่อนที่ตัดขดลวดและจะกระตุ้นให้เกิดแรงดันสลับ แล้วผ่านไปยัง Rotating diodes เป็นไฟฟ้ากระแสตรง กระตุ้นเข้าสู่ Main rotor จากนั้นจะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้างกล่าวจะถูกตรวจจับสัญญาณกลับไปยัง AVR เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่

ในโครงการนี้จะนำ AVR ออกและนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้เป็นตัวจ่ายไฟให้กับขดลวดกระตุ้นที่สเตเตอร์แทน เพื่อให้สามารถควบคุมกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ โดยต่อวงจรดังรูป



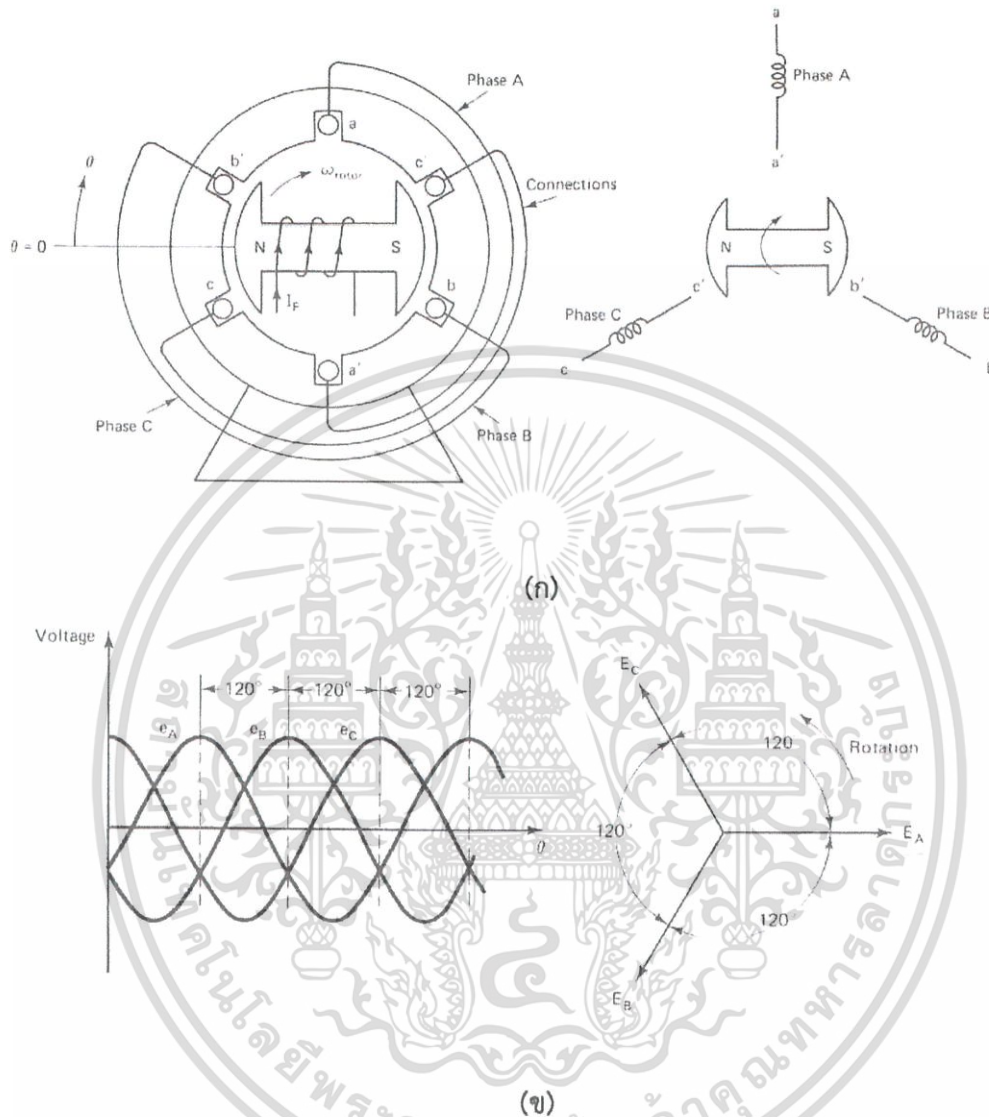
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง



รูปที่ 2.3 วงจรของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบกระตุ้นตัวเอง

สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ 3 เฟสที่วางบนสเตเตอร์ขึ้นอยู่กัลักษณะการวางขดลวดแต่ละเฟส เฟส A จะเป็นขดลวด aa' เฟส B จะเป็นขดลวด bb' และเฟส C จะเป็นขดลวด cc' วางเป็นมุมห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หลักการการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนขดลวดอาร์มาเจอร์หรือเรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) โดยกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ที่อยู่บนสเตเตอร์จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นและที่โรเตอร์ก็มีการเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้น ซึ่งขั้วแม่เหล็กทั้งสองชนิดจะหมุนไปพร้อม ๆ กัน แต่จะมีมุมเฟสต่างกัน ค่าความต่างมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของโหลด ความเร็วและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนไป 1 รอบ} = \frac{\text{Pole}}{2} \text{ รอบ}$$

$$\text{ในหนึ่งวินาทีโรเตอร์หมุน} = \frac{n_s}{60} \text{ รอบ}$$

ดังนั้นใน 1 วินาทีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนจะมีความถี่

$$f = \left( \frac{\text{Pole}}{2} \right) \left( \frac{n_s}{60} \right)$$

$$n_s = \frac{120f}{\text{Pole}} \quad (2-1)$$

เมื่อ  $n_s$  คือ ความเร็วซิงโครนัส (รอบต่อนาที)

$f$  คือ ความถี่ (เฮิร์ตซ์)

$\text{Pole}$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (ขั้ว)

จากสมการที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่าถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีความเร็วรอบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของโหลดจะทำให้ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสคงที่[1]

## 2.2 การหาจรรยาสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนั้น จำเป็นต้องหาจรรยาสมมูลในการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ทั้งในเรื่องการไหลของกำลังไฟฟ้า หาค่าความสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้า หรือเพื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ทั้งนี้ในการหาจรรยาสมมูลมีตัวแปรอยู่ 2 ค่าซึ่งต้องใช้วิธีการที่ต่างกกัน 2 วิธี

### 2.2.1 การทดสอบหาความต้านทานของตัวนำ

การทดสอบหาความต้านทานของตัวนำเป็นการหาค่าความต้านทานของตัวนำต่างๆ โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวนำ แล้ววัดกระแสไฟฟ้าเพื่อมาคำนวณจากความสัมพันธ์จากกฎของโอห์มดังสมการ 2-2

$$R = \frac{V}{I} \quad (2-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$R$	คือ ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ (โอห์ม)
	$V$	คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
	$I$	คือ ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ (แอมแปร์)

ในภาวะที่อุณหภูมิกงที่ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วของตัวนำต่อไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีค่าคงที่ คือค่าความต้านทานนี้เป็นการหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์โดยการต่ออนุกรมขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งสามเฟส ดังรูปที่ 2.4 แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปขดลวดอาร์มาเจอร์ จากนั้นวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ออกมา



รูปที่ 2.5 วงจรการต่อขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้ง 3 เฟส

เมื่อคำนวณตามสมการ 2-2 ได้ค่าความต้านทานออกมา แต่ค่าความต้านทานที่หาออกมาได้นั้นเป็นค่าความต้านทานของทั้งสามเฟส ซึ่งนำค่าที่ได้หาร 3 จะได้ค่าความต้านทานต่อเฟสเพื่อนำมาสร้างวงจรสมมูลต่อเฟสและคำนวณค่าต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อไป

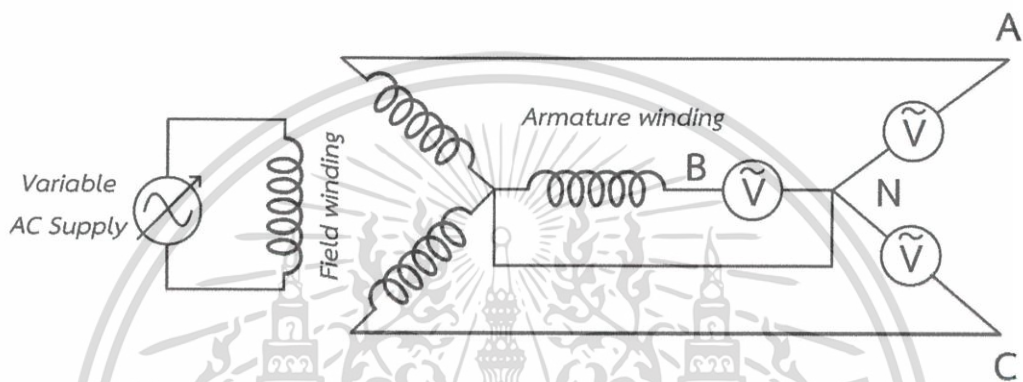
### 2.2.2 การทดสอบเปิดวงจร

การทดสอบเปิดวงจรเป็นการหาความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กหรือไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 2.5 และต้องทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นที่ขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์นั้นมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดอาร์มาเจอร์เนื่องจากการเปิดวงจร ทำให้ได้สมการที่ 2-3

$$V_t = E_a = K\phi\omega_m \quad (2-3)$$

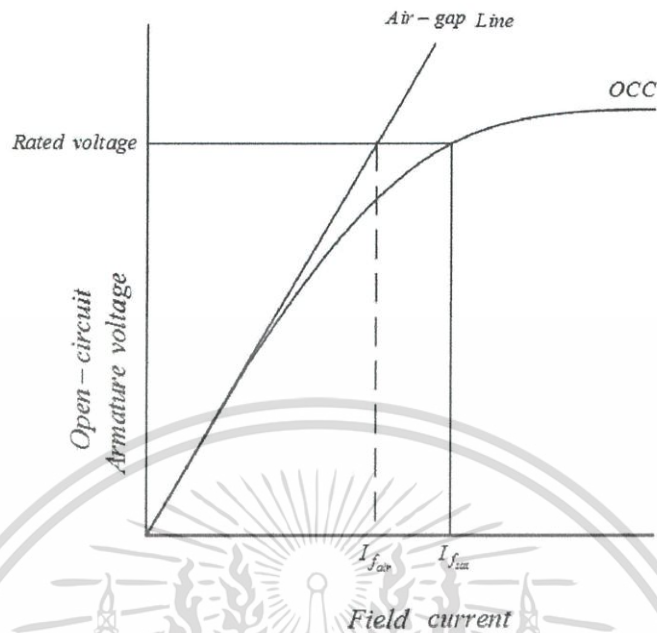
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$V_f$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ (โวลต์)
	$E_a$	คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (โวลต์)
	$K$	คือ ค่าคงที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า
	$\phi$	คือ เส้นแรงแม่เหล็ก (เวเบอร์)
	$\omega_m$	คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (เรเดียนต่อวินาที)



รูปที่ 2.6 วงจรการทดสอบแบบเปิดวงจร

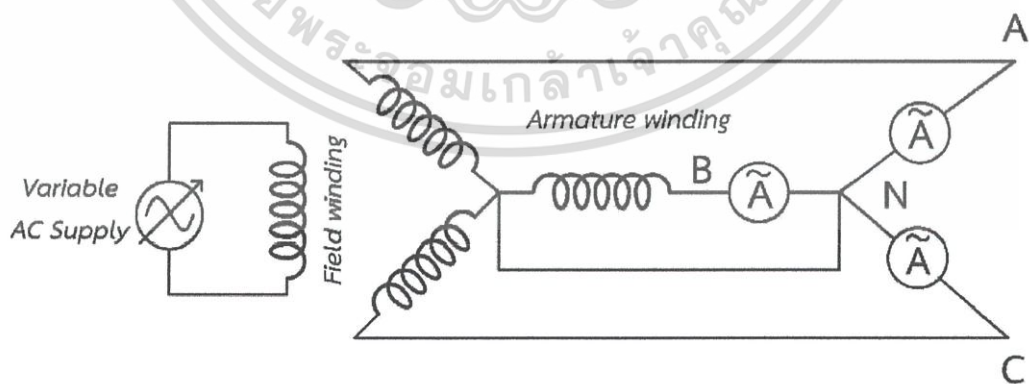
จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กและความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์แต่ในที่นี่กำหนดให้ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์คงที่ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดสนามกับ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วตามรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนามจนถึงจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก จะทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าน้อยลง ซึ่งเป็นไปตามเส้นโค้งการสร้างแม่เหล็ก (Magnetization curve) โดยในตอนแรกจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ชั้วกับกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนาม

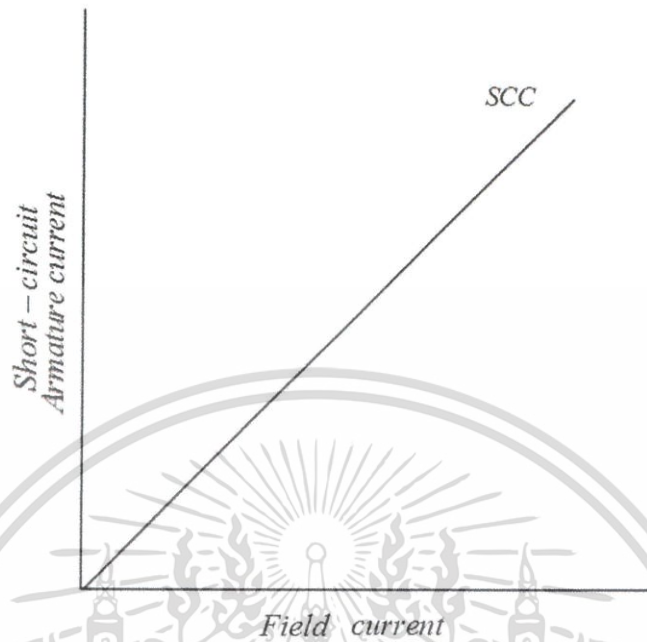
2.2.3 การทดสอบลัดวงจร

การทดสอบการลัดวงจรเป็นการหาความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็ก หรือไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างสนามแม่เหล็กในขดลวดสนามกับ ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลวนในขดลวดอาร์มาเจอร์ทั้งสามเฟสตามรูปที่ 2.7 เมื่อหมุนด้วยความเร็วเชิงครอโนสจะพิจารณาได้ความสัมพันธ์ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดอาร์มาเจอร์กับไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนามตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรการทดสอบแบบลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดอาร์มาเจอร์กับไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนาม

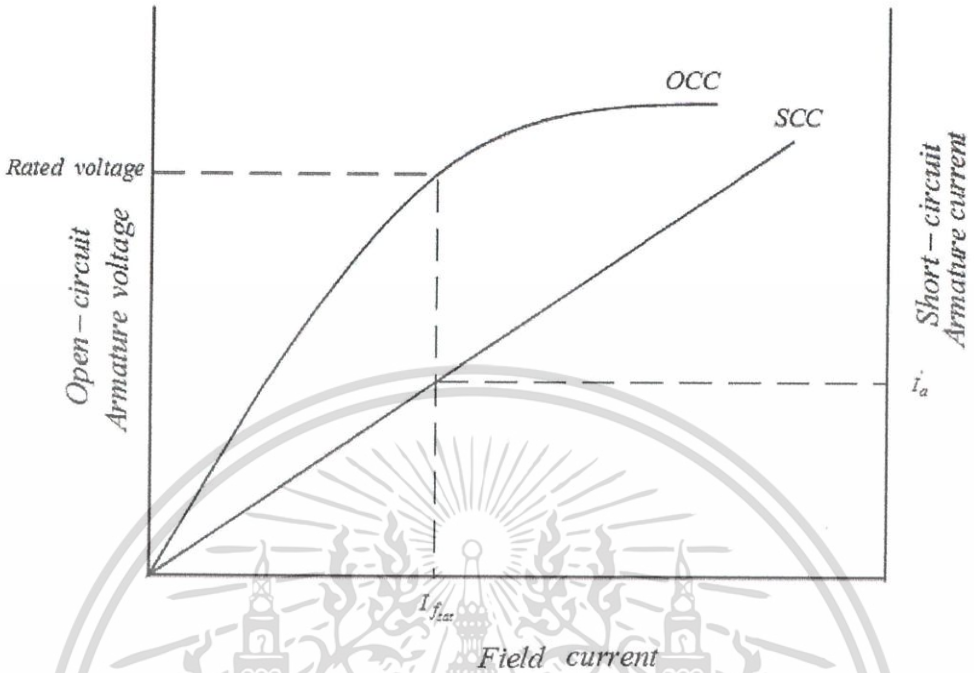
เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่พิกัดหารด้วย กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง ลัดวงจรที่มีค่าตรงกับ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนามที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าในขณะที่เปิดวงจรถึงพิกัดตามรูป ที่ 2.9 จะได้ค่าความต้านทานเสมือนซิงโครนัส ตามสมการ 2-4

$$X_s = \frac{V_{t, rated}}{I_a'}$$

(2-4)

เมื่อ	$X_s$	คือ ค่าความต้านทานเสมือนซิงโครนัส (โอห์ม)
	$V_{t, rated}$	คือ แรงดันไฟฟ้าพิกัดที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (โวลต์)
	$I_a'$	คือ กระแสไฟฟ้าอาร์มาเจอร์เมื่อสภาวะลัดวงจร (แอมแปร์)

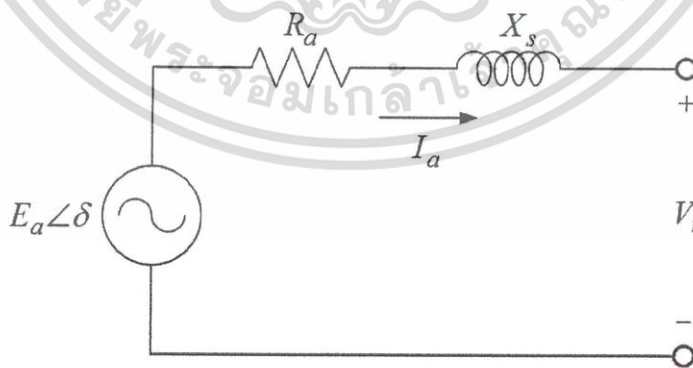
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับแรงดันที่อาร์มาเจอร์เมื่อสภาวะเปิดวงจรเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกระแสอาร์มาเจอร์เมื่อสภาวะปิดวงจร

2.2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงดังรูปที่ 10.2



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $R_a$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ (โอห์ม)  
 $\delta$  คือ มุมระหว่างแรงดันที่ขั้วไฟฟ้ากับมุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (องศา)  
 $I_a$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ (แอมแปร์)

มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-5)

$$E_a = V_t + I_a (R_a + jX_s) \quad (2-5)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้สมการที่ 2-6

$$E_a = K\phi\omega_m \quad (2-6)$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กเท่านั้น (เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่)

กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่ออยู่กับบัสอนันต์ ที่มีแรงดันไฟฟ้า โดยไม่คิดความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์และมีภาระทางไฟฟ้าคงที่ จะได้ว่า กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสรับเท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่าย

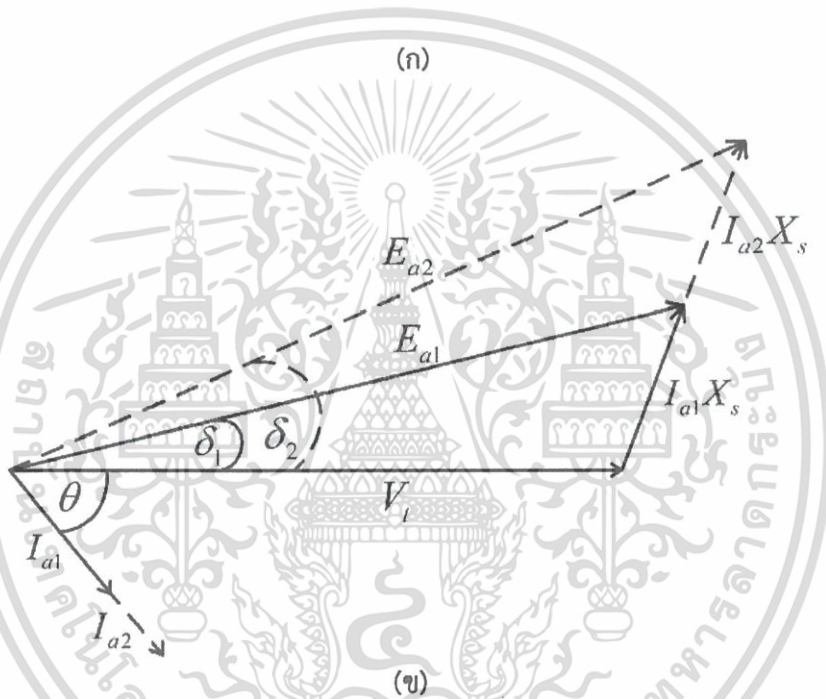
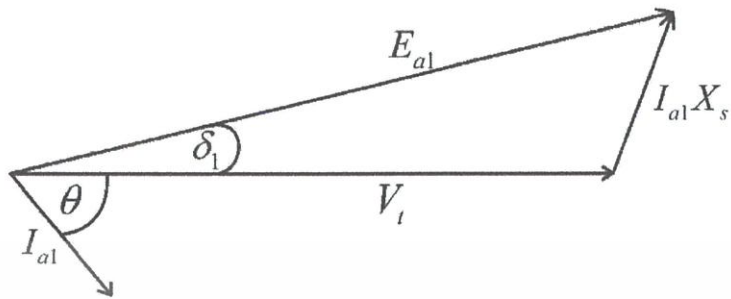
$$P_{input} = 3V_t I_a \cos \theta \quad (2-7)$$

$$P_{supply} = \frac{3V_t E_a \sin \delta}{X_s} \quad (2-8)$$

- เมื่อ  $P_{input}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสรับ (วัตต์)  
 $P_{supply}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่าย (วัตต์)  
 $\theta$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (องศา)

เมื่อจ่ายโหลดคงที่ จะได้  $I_a \cos \theta = E_a \sin \delta$  นั้นคงที่ด้วย [1]

เมื่อภาระทางไฟฟ้าคงที่ ขนาดของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กเมื่อค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีขนาดต่าง ๆ จะส่งผลกระทบต่อมุมกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสมการที่ 2-8 จะทำให้แนวของกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์เปลี่ยนไปส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเปลี่ยนไปด้วย [2]

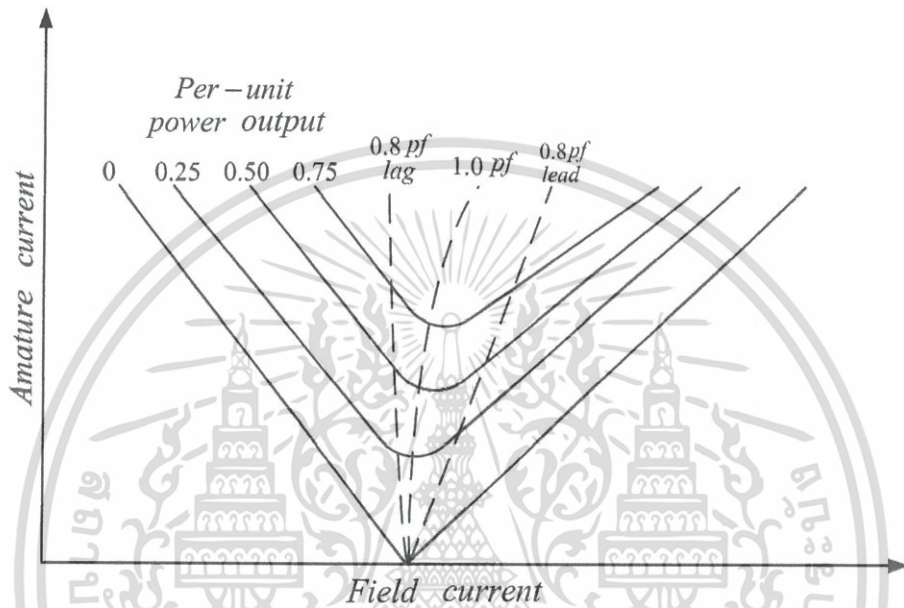


รูปที่ 2.12 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อจ่ายภาระไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

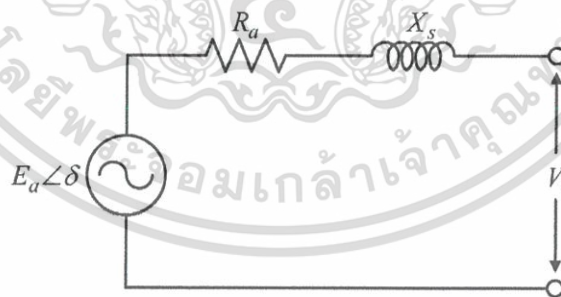
- (ก) เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ก่อนเพิ่มภาระไฟฟ้า  
 (ข) เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส หลังเพิ่มภาระไฟฟ้า

จากเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะปรับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ในขณะที่ภาระทางไฟฟ้าคงที่ เมื่อกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กมีค่ามากเกินไป (Over excited) จะทำให้แนวกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ล้าหลังแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่สภาวะนี้จะมีสภาพค่าตัวประกอบกำลังเป็นล้าหลัง เมื่อกระแสกระตุ้นมีค่าต่ำเกินไป (Under excited) แนวกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์จะนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ซิงโครนัสที่สภาวะนี้จะมีสภาพค่าตัวประกอบกำลังเป็นนำหน้า สภาวะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง ขณะที่กระแสกระตุ้นมีค่าน้อยสุด เมื่อปรับกระแสกระตุ้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นลักษณะเป็นโค้งรูปตัววี



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

สมการกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบไม่คิดค่าความต้านทาน

$$E_a \angle \delta = V_t \angle 0^\circ + jX_s I_a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_a = \frac{E_a \angle \delta - V_t \angle 0^\circ}{jX_s}$$

$$I_a^* = \frac{E_a \angle \delta - V_t \angle 0^\circ}{-jX_s}$$

$$I_a^* = \frac{E_a \angle (90^\circ - \delta) - V_t \angle 90^\circ}{X_s}$$

$$S = V_t I_a^* = P + jQ = V_t \frac{E_a \angle 90^\circ - \delta - V_t \angle 90^\circ}{X_s}$$

$$S = \frac{V_t E_a \angle (90^\circ - \delta) - V_t^2 \angle 90^\circ}{X_s}$$

$$P = \text{Re}[S] = \frac{V_t E_a \cos(90^\circ - \delta) - V_t^2 \cos(90^\circ)}{X_s}$$

$$P = \text{Re}[S] = \frac{V_t E_a \sin \delta}{X_s} \quad (2-9)$$

$$Q = \text{Im}[S] = \frac{V_t E_a \sin(90^\circ - \delta) - V_t^2 \sin(90^\circ)}{X_s}$$

$$Q = \text{Im}[S] = \frac{V_t E_a \cos(\delta) - V_t^2}{X_s} \quad (2-10)$$

เมื่อ

- $P$  คือ กำลังไฟฟ้าจริง (วัตต์)  
 $Q$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน (วาร์)  
 $S$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (โวลต์แอมแปร์)

สมการกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบคิดความต้านทานจากรูปที่ 2.10

หาก

$$E_a \angle \delta = V_t \angle 0^\circ + (jX_s + R_a) I_a \quad \text{จากสมการ (2-5)}$$

$$I_a = \frac{E_a \angle \delta - V_t \angle 0^\circ}{R_a + jX_s}$$

$$I_a^* = \frac{E_a \angle (-\delta) - V_t \angle 0^\circ}{R - jX_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_a^* = \frac{E_a \angle(-\delta) - V_t \angle 0^\circ}{Z \angle -\beta} \quad \text{โดย} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_s^2}, \beta = \tan^{-1}\left(\frac{X_s}{R_a}\right)$$

$$I_a^* = \frac{E_a \angle(\beta - \delta) - V_t \angle \beta}{Z}$$

$$S = V_t I_a^* = P + jQ = V_t \frac{E_a \angle(\beta - \delta) - V_t \angle \beta}{Z}$$

$$S = \frac{V_t E_a \angle(\beta - \delta) - V_t^2 \angle \beta}{Z}$$

$$P = \text{Re}[S] = \frac{V_t E_a \cos(\beta - \delta) - V_t^2 \cos(\beta)}{Z} \quad (2-11)$$

$$Q = \text{Im}[S] = \frac{V_t E_a \sin(\beta - \delta) - V_t^2 \sin(\beta)}{Z} \quad (2-12)$$

เมื่อ

$\beta$

คือ มุมของความต้านทานกระแสลับ (Impedance angle) (องศา)

### 2.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

ในระบบไฟฟ้าหรือในโครงข่ายไฟฟ้านั้นจะไม่นิยมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ตัวเดียวจ่ายภาระไฟฟ้าแต่จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลาย ๆ เครื่องมาขนานกันเพื่อช่วยในการจ่ายภาระไฟฟ้า โดยมีเหตุผลดังนี้

1. เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความผิดปกติหรือความจำเป็นต้องซ่อมแซม ถ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลาย ๆ ตัวจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าบางส่วนไปทดแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องการซ่อมแซมได้
2. ความต้องการในการใช้กำลังไฟฟ้ามีเพิ่มขึ้นทำให้การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่เครื่องเดียวไม่พอที่จะจ่ายภาระไฟฟ้าได้ จึงต้องมีการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยจ่ายภาระไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นได้ และบางเวลามีความต้องการใช้น้อย สามารถหยุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางตัวเพื่อประหยัดเชื้อเพลิงในการปฏิบัติงานได้และยังเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพราะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายิ่งใกล้พิกัดยิ่งมีประสิทธิภาพสูง
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ได้มากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหรือโครงข่ายไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

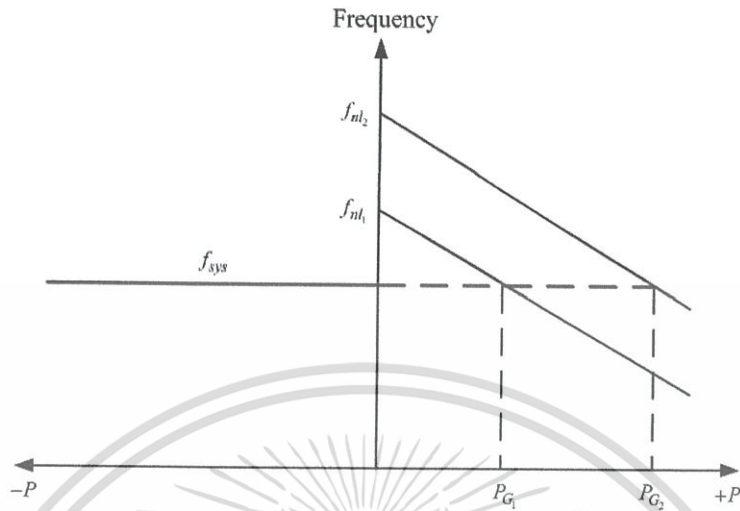
1. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากัน
2. ลำดับเฟส (Phase sequence) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และลำดับเฟสของระบบไฟฟ้าต้องมีลำดับเฟสตรงกัน
3. ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า
4. มุมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส และมุมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ (in phase)

แผนภาพบ้านคือ แผนภาพที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยใช้สมการเส้นตรงของแผนภาพวิเคราะห์ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ กำลังไฟฟ้าจริงจะมีความสัมพันธ์กับความถี่หรือความเร็วของโรเตอร์ที่ขั้วด้วยต้นกำลังทางกล กำลังไฟฟ้าเสมือนและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะมีความสัมพันธ์กับกระแสในขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

2.3.1 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ การทดลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่ไม่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อหาแผนภูมิบ้าน ในการทดลองจะความถี่ไว้ภาระไฟฟ้าสูงๆ เนื่องจากภายหลังการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงแก่ภาระไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความถี่ลดลง เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลง

2.3.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเมื่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่

เมื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่นั้นจะไม่ได้รับผลกระทบเนื่องมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่ต่อขนานเข้าไป มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระบบกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยเรียกระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่นี้ว่า บัสอนันต์ (Infinite Bus) ความหมายคือ ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่และแรงดันไฟฟ้า [3]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่เมื่อขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ความถี่และกำลังไฟฟ้าของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ ดังนี้

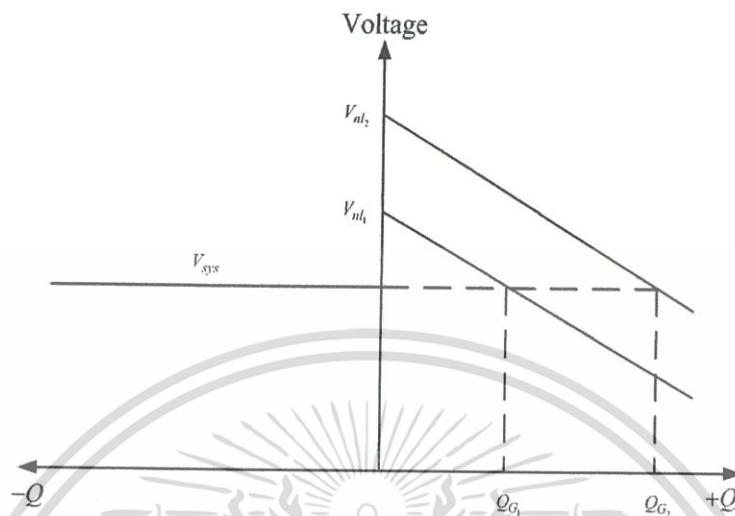
$$P = \text{Slope}_p (f_{nl} - f_{sys}) \quad (2-13)$$

เมื่อ

$\text{Slope}_p$  คือ ความชันของกราฟ (วัตต์ต่อเฮิรตซ์)

$f_{nl}$  คือ ความถี่ของโวลต์เนออร์ที่ตั้งค่าไว้ (เฮิรตซ์)

$f_{sys}$  คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า (เฮิรตซ์)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเสมือนกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

โดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังนี้

$$Q = \text{Slope}_q (V_{nl} - V_{sys}) \quad (2-14)$$

เมื่อ

$\text{Slope}_q$  คือ ความชันของกราฟ (วาร์ต่อโวลต์)

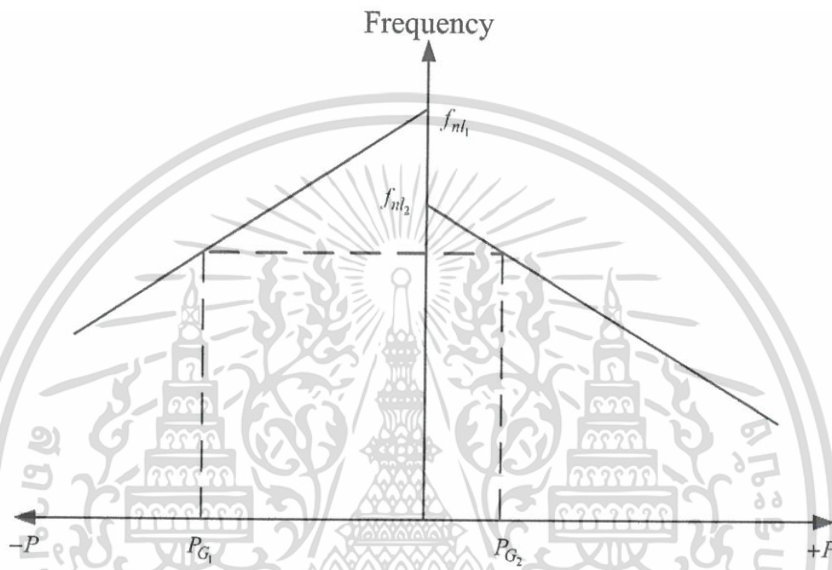
$V_{nl}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อทำการปรับกระแสกระตุ้น (โวลต์)

$V_{sys}$  คือ แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า (โวลต์)

เมื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

1. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของระบบและแรงดันไฟฟ้าของระบบ
2. การจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้กับระบบ โดยการควบคุมความเร็วของต้นกำลังทางกล
3. การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าสนาม

2.3.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันขนานกัน  
 เมื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากัน ข้อจำกัดที่สำคัญคือ  
 ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนจะต้องมีค่าเท่ากับที่ภาระไฟฟ้าต้องการ ความถี่ของ  
 ระบบไฟฟ้าไม่คงที่ โดยกรณีนี้จะสมมติให้ไม่มีการสูญเสียกำลังทางไฟฟ้า [3]



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและความถี่จากการขนานเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันขนานกัน

ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่จากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส  
 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันดังนี้

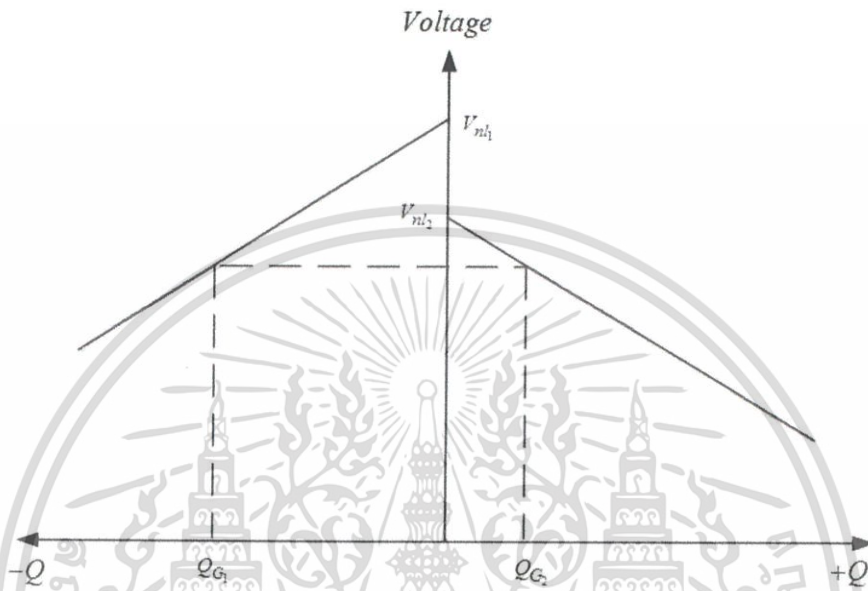
$$P_{load} = P_{G_1} + P_{G_2}$$

$$P_{load} = \text{Slope}_{p_1} (f_{n1} - f_{sys}) + \text{Slope}_{p_2} (f_{n2} - f_{sys}) \quad (2-15)$$

เมื่อ	$P_{load}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ (วัตต์)
	$P_{G_x}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง (วัตต์)
	$\text{Slope}_{p_x}$	คือ ความชันกราฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง (วัตต์ต่อเฮิรตซ์)
	$f_{n_x}$	คือ ความถี่โกลเวอร์เนอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวที่ตั้งค่าไว้ (เฮิรตซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเสมือนกับแรงดัน จากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันขนานกัน



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องที่มีขนาดเท่ากันขนาน

$$Q_{load} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{load} = Slope_1(V_{nl_1} - V_{sys}) + Slope_2(V_{nl_2} - V_{sys}) \quad (2-16)$$

จากสมการที่ 2-16 ใช้วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเสมือนด้วยวิธีเดียวกับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าจริง

เมื่อ	$Q_{load}$	คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตได้ (วาร์)
	$Q_{G_x}$	คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง (วาร์)
	$Slope_{q_x}$	คือ ความชันของกราฟ (วาร์ต่อโวลต์)
	$V_{nl_x}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของแต่ละเครื่อง (โวลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของต้นกำลังทางกลเครื่องใดเครื่องหนึ่งขึ้น

1. ความถี่ของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสตัวที่เพิ่มค่าความเร็วรอบของต้นกำลังทางกลจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอีกตัวจะจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยลง เพื่อให้ความถี่ระบบนั้นคงที่

ผลกระทบจากการเพิ่มค่ากระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่สอง

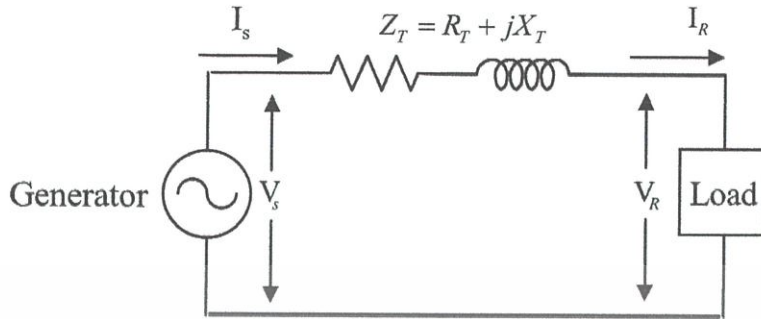
1. แรงดันไฟฟ้าของระบบเพิ่มขึ้น
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่เพิ่มค่ากระแสกระตุ้น การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนก็จะเพิ่ม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอีกเครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนลดลง

#### 2.4 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

การไหลของกำลังไฟฟ้ามีส่วนสำคัญกับระบบไฟฟ้า โครงการวิจัยนี้ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า วิเคราะห์โดยศึกษาการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยคำนึงถึงความถี่ และแรงดันไฟฟ้าที่ภาระไฟฟ้าให้คงที่ เมื่อมีภาระไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้นหรือลดลง

##### 2.4.1 วงจรสมมูลต่อเฟสของสายส่งระยะสั้น

วงจรสมมูลต่อเฟสของสายส่งระยะสั้น คือ วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยมีระยะทางจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถึงภาระไฟฟ้าไม่เกิน 80 กิโลเมตร และมีความต้านทานของสายส่งอยู่ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับภาระไฟฟ้า ไม่มีหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าแรงดันเดียว [4]



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น

เมื่อ

 $Z_T$  คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง (โอห์ม) $R_T$  คือ ค่าความต้านทานของสายส่ง (โอห์ม) $X_T$  คือ ค่าความต้านทานเสมือนของสายส่ง (โอห์ม) $I_s$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (แอมแปร์) $I_R$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าภาระไฟฟ้า (แอมแปร์) $V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (โวลต์) $V_R$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของภาระไฟฟ้า (โวลต์)

จากวงจรสมมูลต่อเฟสของสายส่งระยะสั้น เมื่อมีกระแสไหลผ่านแบบจำลองสายส่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตก โดยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของภาระไฟฟ้าไม่เท่ากัน ดังสมการที่ 2-26 [5]

$$\text{Voltage drop} = V_S - V_R$$

$$\% \text{Voltage regulation} = \frac{V_S - V_R}{V_S} \times 100 \quad (2-26)$$

เมื่อ

%Voltage regulation

เป็นเปอร์เซ็นต์การควบคุมค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า

จากวงจรสมมูลต่อเฟสของสายส่งระยะสั้น เมื่อมีกระแสไหลผ่านแบบจำลองสายส่งจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแบบจำลองสายส่ง ดังสมการที่ 2-27 [6]

$$\begin{aligned} P_{\text{loss}} &= P_{G1} + P_{G2} - P_{\text{load}} \\ P_{\text{loss}} &= I^2 R_T \end{aligned} \quad (2-27)$$

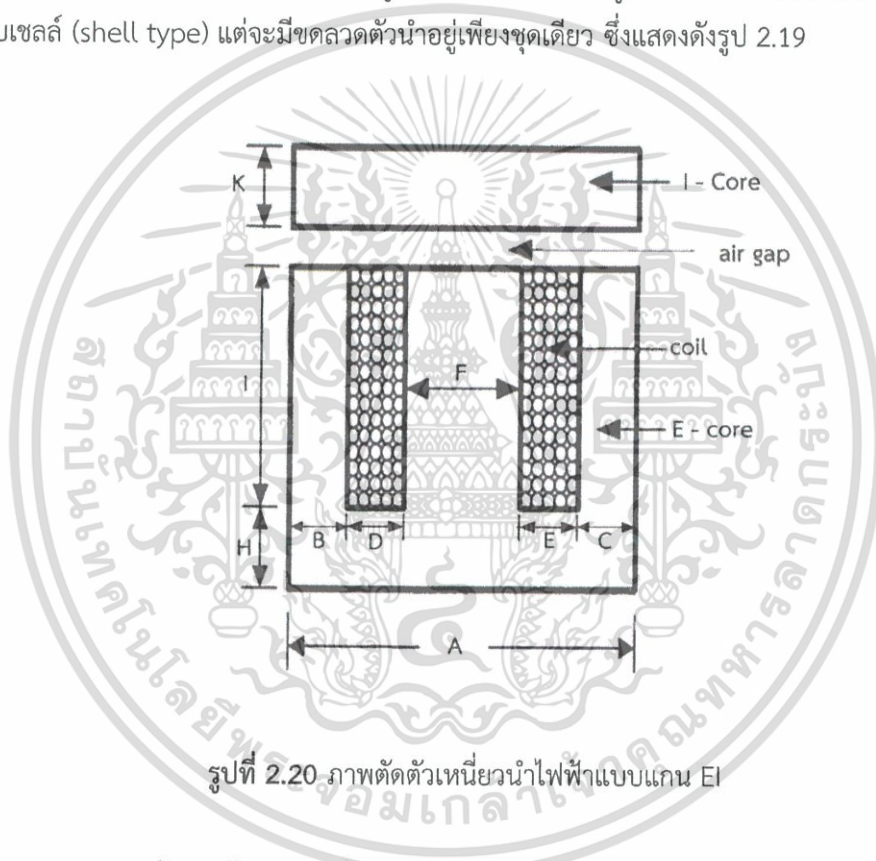
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $P_{loss}$  คือ ความกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่ง (วัตต์)

## 2.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ในโครงการนี้ ทำเพื่อจำลองสายส่งกำลังไฟฟ้าใช้ในการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังภาระไฟฟ้า

ลักษณะตัวนำไฟฟ้าแบบแกน EI จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ โครงสร้างแกน EI และขดลวดตัวนำ โดยขดลวดตัวนำจะพันอยู่ที่แกนกลางของแกนรูป E คล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กแบบเซลล์ (shell type) แต่จะมีขดลวดตัวนำอยู่เพียงชุดเดียว ซึ่งแสดงดังรูป 2.19

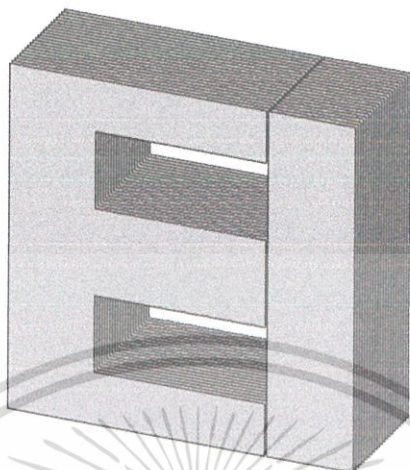


รูปที่ 2.20 ภาพตัดตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI

### 2.5.1 โครงสร้างแกนเหล็กและขดลวดตัวนำ

โครงสร้างวงจรมแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำแบบ EI เป็นการประกอบกันของแกนเหล็กรูป E และรูป I จะทำด้วยสาร ferromagnetic ซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง เพื่อลดค่าความสูญเสียทางแม่เหล็กเนื่องจากวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และเพื่อลดการรั่วของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ในส่วนที่เป็นแกนเหล็กเท่านั้น แผ่นเหล็กจะวางซ้อนกันเพื่อเป็นการลดค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (eddy current loss) ซึ่งค่าความสูญเสียทั้งสองค่าเรียกว่า ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



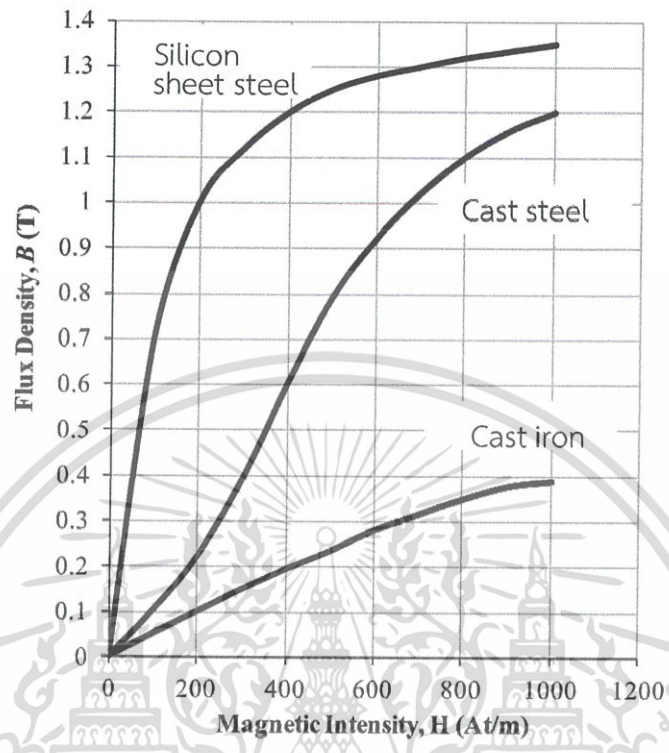
รูปที่ 2.21 โครงสร้างแกนเหล็กของ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนเหล็กนั้นสามารถหาได้จาก B-H curve ซึ่งเส้นโค้งนี้มีลักษณะเฉพาะสำหรับวัสดุแต่ละชนิด ปกติแล้วความสัมพันธ์นี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นตามธรรมชาติ แต่ถ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่สูงมากพอจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กไม่เกิดการอิ่มตัว ทำให้อาจจะพิจารณาค่า  $\mu$  ให้เป็นเชิงเส้นได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วการทำงานของวัสดุแม่เหล็กจะทำงานในช่วงอิ่มตัวเสมอ ในการคำนวณค่า  $\mu$  นั้นสามารถคำนวณได้จากค่า  $H$  หรือ  $B$  ที่ทราบค่า ณ จุดทำงานที่สนใจดังสมการที่ 2-28

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (2-28)$$

เมื่อ	$B$	คือ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Tesla)
	$\mu_0$	คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
	$\mu_r$	คือ อัตราส่วนความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุเทียบกับอากาศ เรียกว่า <i>relative permeability</i>
	$H$	คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 B-H curve ของวัสดุแกนเหล็กต่างๆ

ขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างเป็นกลุ่มลวดตัวนำพื้นที่หน้าตัดกลมทำด้วยทองแดงจำนวน 1 ชุด พันอยู่รอบวงจรมแม่เหล็ก การเลือกใช้ขนาดตัวนำขึ้นอยู่กับพิกัดกระแสที่ใช้งานของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ความหนาแน่นกระแส (current density) และอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด การออกแบบจะคำนวณขนาดของขดลวดที่ต้องการแล้วนำไปเลือกขนาดลวดตัวนำมาตรฐานจากตารางข้อมูลลวดตัวนำ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ, พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ, น้ำหนักของตัวนำและความต้านทานของตัวนำ

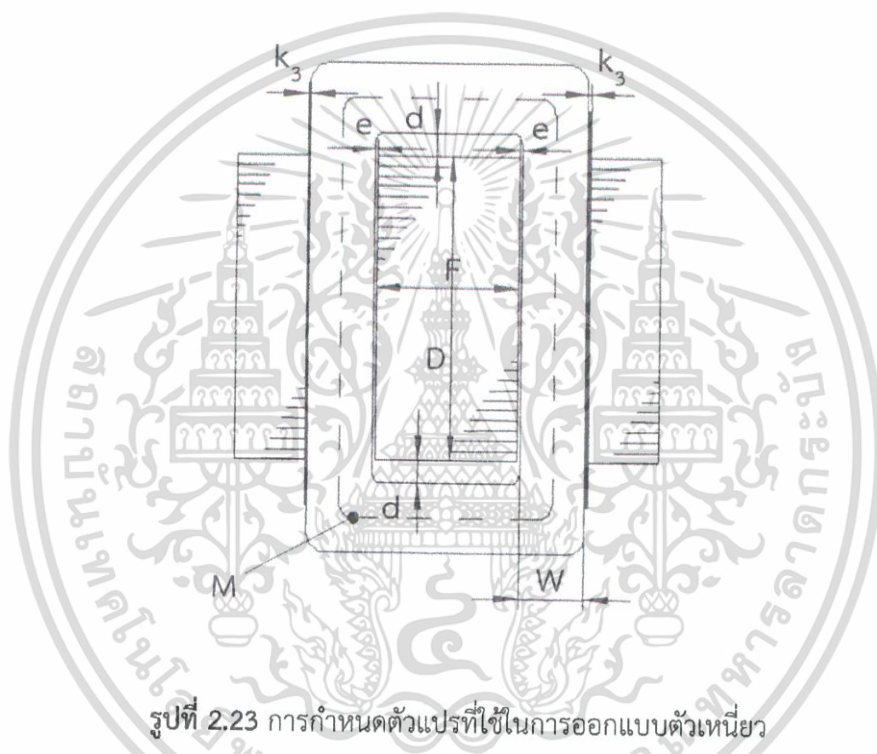
### 2.5.2 การคำนวณในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

การคำนวณความยาวรวมของขดลวดนั้นสามารถคำนวณได้จากความยาวเฉลี่ยของขดลวดคูณกับจำนวนรอบของขดลวด โดยความยาวเฉลี่ยของขดลวดนั้นสามารถกำหนดได้จากโครงสร้างของแกน EI ความยาวเฉลี่ยของขดลวดคือผลรวมของความยาวรอบแกน EI กับเส้นรอบวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะจากขอบในของขดลวดไปถึงกึ่งกลางความหนาของขดลวดคือ  $r/2$  ดังนั้นความยาวเฉลี่ยของขดลวดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M = 2(F + D + 2e + 2d) + \pi W \quad (2-29)$$

จากสมการที่ 2-29 จะได้ว่าความยาวเฉลี่ยของขดลวดแต่ละชุดนั้นขึ้นอยู่กับระยะความยาวรอบแกนเหล็กกับความยาวของตัวแปร (e) และ (d) ซึ่งตามมาตรฐานการสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้ 0.3 mm. และ 4.5 mm. ตามลำดับ



รูปที่ 2.23 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

กำหนดให้  $N$  เป็นจำนวนรอบของขดลวดจะได้ความยาวของขดลวด ( $l$ ) ดังนี้

$$l = M \times N \quad (2-30)$$

ลักษณะการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีลักษณะในการพันแบบถอดประกอบคือต้องพันในเครื่องพันแล้วจึงนำมาประกอบลงในแกน EI ซึ่งการพันลักษณะนี้จำเป็นต้องมีการคำนวณจำนวนชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้งของขดลวดด้วย ซึ่งสมการที่ 2-31 เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาจำนวนชั้น ( $Nol$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nol = \frac{E - (e - k_3)}{D_m \times k_4} \quad (2-31)$$

เมื่อ	$D_m$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด
	$E$	คือ ความกว้างของช่องว่างตัวเหนี่ยวนำแกน E
	$k_3$	คือ ความหนาของระบบฉนวน
	$k_4$	คือ ตัวคูณลดขนาดของขดลวด (0.92 สำหรับขดลวดขนาด 0.24-0.45 mm., 0.9 สำหรับขดลวดขนาด 0.50-1.80 mm.)

สมการที่ 2-31 เมื่อผลลัพธ์มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็มต้องปัดเศษทิ้งเพื่อให้ขดลวดสามารถประกอบในร่องเหล็กได้ ในส่วนการคำนวณจำนวนรอบในแนวตั้งของขดลวด ( $Nol$ ) เมื่อคำนวณหาจำนวนชั้นของขดลวดได้แล้ว จึงนำจำนวนรอบทั้งหมดเป็นตัวตั้งแล้วหารด้วยจำนวนชั้นของขดลวด ดังสมการที่ 2-32

$$Not = \frac{N}{Nol} \quad (2-32)$$

สมการที่ 2-32 เมื่อผลลัพธ์มีค่าไม่เป็นจำนวนเต็มต้องปัดเศษทิ้งและบวกเพิ่มอีกหนึ่งรอบ เมื่อได้จำนวนชั้นและจำนวนรอบในแนวตั้งแล้ว ขั้นต่อไปคำนวณหาระยะความสูง ( $H$ ) และระยะความกว้างของขดลวด ( $W$ ) ดังสมการที่ 2-33 และ 2-34

$$H = Not \times D_m + \frac{D_m}{2} \quad (2-33)$$

$$W = Nol \times D_m \times k_4 \quad (2-34)$$

### 2.5.5 ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด

การหาความยาวของขดลวดในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถคำนวณหาความต้านทานของขดลวดได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากตารางข้อมูลลวดตัวนำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อระยะความยาวหรือความต้านทานต่อน้ำหนักอย่างใดอย่างหนึ่ง ความสัมพันธ์นี้จะเป็ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่ขณะที่ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าทำงาน อุณหภูมิภายในขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานภายในขดลวดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังสมการที่ 2-35

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \quad (2-35)$$

เมื่อ  $R_1$  และ  $R_2$  เป็นค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ  $t_1$  และ  $t_2$  ตามลำดับ

สมการที่ 2-35 เป็นความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของลวดตัวนำทองแดง ซึ่งค่าของความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าทำงาน

### 2.5.6 กำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

กำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ซึ่งประกอบไปด้วย

1. กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss)
2. กำลังสูญเสียในขดลวด (copper loss)
3. กำลังสูญเสียในช่องอากาศ (air-gap loss)

กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ( $P_{core}$ ) ประกอบด้วย การสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนภายในแกนเหล็ก และการสูญเสียจากวงฮิสเทอรีซิส ซึ่งการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนเป็นผลที่เกิดจากการเหนี่ยวนำภายในแกนเหล็กที่วางอยู่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโดยมีแกนเหล็กเป็นตัวนำ ส่วนการสูญเสียที่เกิดจากวงฮิสเทอรีซิส เกิดจากการที่เมื่อแกนเหล็กได้รับแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นตามลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อลดระดับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลง เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจะไม่ลดลงตามแนวทางเดิมแต่จะเหลือตกค้างอยู่ในแกนเหล็กค่าหนึ่ง โดยปริมาณจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบไฟฟ้าและคุณลักษณะของสารที่ใช้ทำแกนเหล็ก สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กจะเลือกใช้สารที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูงและพยายามทำให้คุณสมบัติการสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุดโดยการทำให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูง

กำลังสูญเสียในขดลวดตัวนำ ( $P_{cu}$ ) เป็นค่าสูญเสียที่เกิดจากความร้อนในขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและความต้านทานของขดลวดนั้น ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับพิกัดใช้งานที่กำหนด การหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดตัวนำจะพิจารณาได้ดังนี้

$$P_{cu} = I^2 R \quad (2-36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังสูญเสียในช่องอากาศ ( $P_{gap}$ ) เมื่อความยาวช่องอากาศมีค่ามากขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านช่องอากาศจะเกิดการโค้งตัวมากขึ้นตามด้วยเช่นกัน เส้นแรงแม่เหล็กโค้งตัวบางส่วนจะเคลื่อนตัวเข้าไปในแกนเหล็กในลักษณะตั้งฉากและสร้างกระแสไหลวนเพิ่มขึ้นในแกนเหล็ก นอกจากนี้การเคลื่อนตัวเข้าไปในแกนเหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กโค้งตัวอาจเกิดจากรูปร่างของแกนเหล็กหรือลักษณะของขดลวดที่วางอยู่ใกล้ชิดกับแกนเหล็กมาก ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดความสูญเสียมากขึ้น ดังนั้นกำลังสูญเสียในช่องอากาศมักจะขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กโค้งตัวเป็นหลัก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$P_g = K_i D l_g f B^2 \quad (2-37)$$

เมื่อ  $K_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูญเสียในช่องอากาศ  
 $l_g$  คือ ความยาวช่องอากาศ  
 $f$  คือ ความถี่ไฟฟ้า

## 2.6 หลักการเบื้องต้นของการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม [7]

การหาค่าที่เหมาะสม ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (Constraint function) โดยฟังก์ชันเงื่อนไขสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ 1. ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เป็นสมการเชิงเส้น (Linear constraint) 2. ฟังก์ชันเงื่อนไขที่ไม่เป็นสมการเชิงเส้น (Nonlinear constraint) ซึ่งฟังก์ชันเงื่อนไขแต่ละประเภทสามารถแบ่งได้ 3 แบบ

1. เงื่อนไขแบบสมการ (Equality constraint)
2. เงื่อนไขแบบอสมการ (Inequality constraint)
3. เงื่อนไขขอบเขต (Size constraint)

โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$		ฟังก์ชันเป้าหมาย
$g_j(\mathbf{x}) = 0$	$; j = 1, 2, 3, \dots, m$	เงื่อนไขแบบสมการ
$h_k(\mathbf{x}) \leq 0$	$; k = 1, 2, 3, \dots, p$	เงื่อนไขแบบอสมการ
$C_i \leq x_i \leq C_{i+1}$	$; i = 1, 2, 3, \dots, n$	เงื่อนไขขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการเบื้องต้นของเจเนติกอัลกอริทึม เจเนติกอัลกอริทึมจะทำการสุ่มค่าตัวแปร (variable) แล้วนำตัวแปรแทนเข้าไปในสมการฟังก์ชันเป้าหมายเพื่อให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด โดยจะทำแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นจำนวนรอบการคำนวณ (Generation) ซึ่งจำนวนรอบการคำนวณจะประกอบด้วยจำนวนประชากร (Population) หลาย ๆ ค่า เจเนติกอัลกอริทึมจะทำการสุ่มค่าตัวแปร (variable) มา  $N$  ค่า นำตัวแปรทั้งหมดแทนเข้าไปในสมการฟังก์ชันเป้าหมาย แล้วนำตัวแปรมาเรียงลำดับจากค่าที่เหมาะสมมากที่สุดไปหาค่าที่เหมาะสมน้อยที่สุด จากที่กล่าวมาคือรอบการคำนวณที่ 1 จากนั้นเจเนติกอัลกอริทึมจะนำค่าที่เหมาะสมที่สุด  $N/2$  ค่าแรกมาแปลงให้กลายเป็นเลขฐานสองแล้วนำตัวแปรที่คัดเลือกมากระทำซึ่งกันและกัน โดยอาศัยกระบวนการทางเจเนติกซึ่งแบ่งได้ 3 กระบวนการ คือ 1.การกำเนิดใหม่ (Reproduction) 2.การครอสโอเวอร์ (Crossover) 3.การกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อให้ได้ประชากรใหม่ของรอบการคำนวณที่ 2 จากนั้นนำค่าที่ได้มาแทนเข้าไปในฟังก์ชันเป้าหมายแล้วนำตัวแปรมาเรียงลำดับเพื่อเลือกค่าใหม่ ทำแบบนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนครบรอบการคำนวณที่ต้องการ จากหลักการนี้สามารถอ้างอิงได้จากกระบวนการทางเจเนติกที่ว่าเมื่อนำค่าที่ดีมาผ่านกระบวนการทางเจเนติกจะทำให้ได้ค่าใหม่ขึ้นมาที่ดีกว่าค่าแรก ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่ทำการกำหนดขึ้นมา

การหาค่าที่เหมาะสมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในระบบโดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม

ฟังก์ชันเป้าหมาย : กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งไฟฟ้ากำลัง

$$f(x) = \sum_{k=1}^{N-1} |I_{kn}|^2 R_{kn} \quad ; \quad n \neq k \quad (2-38)$$

$$I_{kn} = \frac{V_k \angle \delta_k - V_n \angle \delta_n}{R_{kn} + jX_{kn}} \quad ; \quad n \neq k \quad (2-39)$$

เมื่อ	$V_k$	คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส $k$
	$V_n$	คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส $n$
	$N$	คือ จำนวนของสายส่งกำลังไฟฟ้า
	$\delta_k$	คือ มุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส $k$
	$\delta_n$	คือ มุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส $n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_{kn} + jX_{kn}$  คือ อิมพีแดนซ์ในสายส่งกำลังไฟฟ้า  $k-n$

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่ไม่เป็นสมการเชิงเส้น

1) เงื่อนไขแบบสมการ: สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

$$P_{Gn} - P_{Dn} - \sum_{m=1}^{N_B} |V_n| |V_m| |Y_{n,m}| \cos(\delta_n - \delta_m - \theta_{n,m}) = 0 \quad (2-40)$$

$$P_{Gk} = \text{Re} \left\{ V_k \angle \delta_k \left( \sum_{n=1}^{N-1} I_{kn} \right)^* \right\} ; n \neq k \quad (2-41)$$

$$Q_{Gn} - Q_{Dn} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_n| |V_m| |Y_{n,m}| \sin(\delta_n - \delta_m - \theta_{n,m}) = 0 \quad (2-42)$$

$$Q_{Gk} = \text{Im} \left\{ V_k \angle \delta_k \left( \sum_{n=1}^{N-1} I_{kn} \right)^* \right\} ; n \neq k \quad (2-43)$$

เมื่อ

$n$	คือ 1, 2, 3... $N_{b-1}$
$V_k$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส $k$
$V_n$	คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส $n$
$\delta_k$	คือ มุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส $k$
$\delta_n$	คือ มุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส $n$
$I_{kn}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างบัส $k$ และ $n$
$P_{Gk}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $k$
$Q_{Gk}$	คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $k$
$P_{Dk}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ภาระไฟฟ้าต้องการที่บัส $k$
$Q_{Dk}$	คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ภาระไฟฟ้าต้องการที่บัส $k$
$N_B$	คือ จำนวนบัส
$\theta_{kn}$	คือ มุมของ $Y_{bus k,n}$
$Y_{k,n}$	คือ ขนาดของ $Y_{bus k,n}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เงื่อนไขที่ขอบเขต : ค่าจำกัดของตัวแปร

$$V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max}$$

$$P_{Gn}^{\min} \leq P_{Gn} \leq P_{Gn}^{\max}$$

$$Q_{Gn}^{\min} \leq Q_{Gn} \leq Q_{Gn}^{\max}$$

เมื่อ

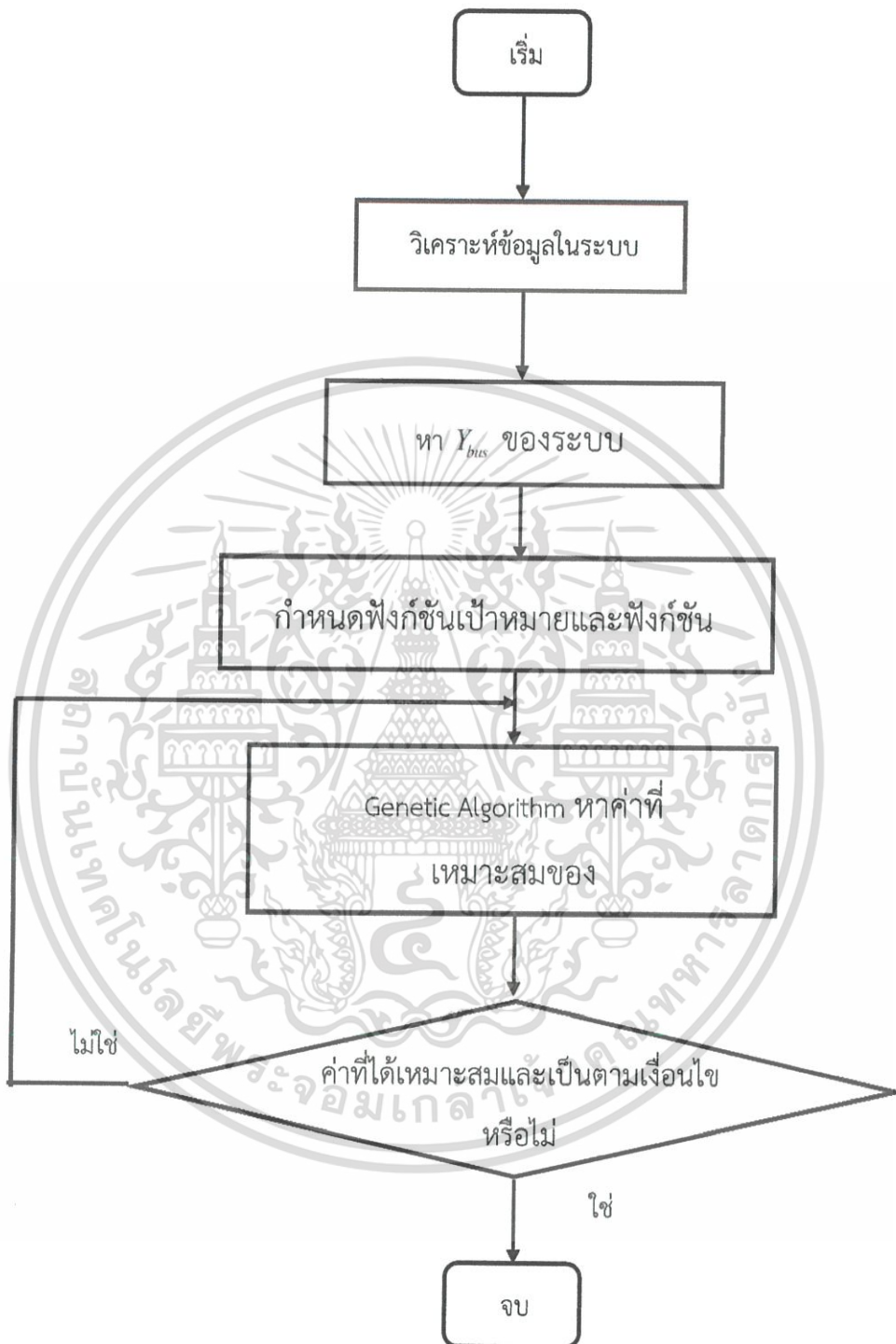
$V_n^{\min}, V_n^{\max}$  คือ ขอบเขตของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส  $k$

$P_{Gn}^{\min}, P_{Gn}^{\max}$  คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $k$

$Q_{Gn}^{\min}, Q_{Gn}^{\max}$  คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  $k$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แผนผังการหาค่าที่เหมาะสมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่งกำลังไฟฟ้าภายในระบบ โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่าง 3 บัส ซึ่งในบัสที่พิจารณาประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 บัส ขนาดกัน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นต้นกำลังทางกล และขนาดกับ ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ 1 บัส โดยแบ่งการทดลองออกเป็นดังนี้ 1. การควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2. การหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ 3. การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง 4. การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า 5. การจ่ายภาระไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 บัส 6. การหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยที่สุด

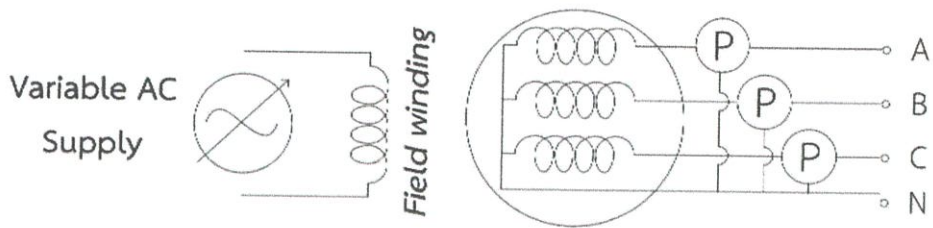
#### 3.1 การควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถควบคุมได้โดยควบคุมความเร็วของต้นกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และควบคุมกระแสกระตุ้นที่ใช้ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของความเร็วและกระแสกระตุ้นที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่

##### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	1 ชุด	5. Tachometer	1 เครื่อง
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	1 เครื่อง	6. แอมมิเตอร์กระแสสลับ	1 เครื่อง
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้ (Variable AC supply)	1 เครื่อง	7. พาวเวอร์มิเตอร์กระแสสลับ	3 เครื่อง
4. Digital multimeter	1 เครื่อง	8. กล่องพักสาย	1 กล่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรการทดลองควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

#### ขั้นตอนการทดลอง

##### การทดลองที่ 1

1. ต่อดังรูปที่ 3.1 ในการต่อพาวเวอร์มิเตอร์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสให้นำสายไฟที่ออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสมาต่อเข้าขั้วบวกของแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ จากนั้นต่อสายไฟออกจากแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ไปที่กล่องพักสาย จากนั้นปรับความเร็วรอบการหมุนให้ได้ 1450 รอบต่อนาที แล้วบันทึกผลลงในตารางผลการทดลอง จากนั้นปรับเพิ่มกระแสกระตุ้นโดยการปรับเครื่อง Variable AC supply ที่จะต่อไปยังวงจรสร้างกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดเชิงโครนัสโดยปรับครึ่งละ 0.2 A จนกระทั่งมีกระแสกระตุ้นเท่ากับ 1 A บันทึกค่าผลการทดลอง
2. ทำขั้นตอนที่ 1 ซ้ำโดยเพิ่มความเร็วรอบเป็น 1475 1500 1525 และ 1550 รอบต่อนาที บันทึกค่าผลการทดลอง

##### การทดลองที่ 2

1. ต่อดังรูปที่ 3.1 ปรับเพิ่มกระแสกระตุ้นไปที่ 0.4 A แล้วปรับความเร็วรอบเป็น 1450 รอบต่อนาที บันทึกผลลงในตารางผลการทดลอง จากนั้นปรับเพิ่มความเร็วรอบเป็น 1475 1500 1525 และ 1550 รอบต่อนาที บันทึกค่าผลการทดลอง
2. ทำขั้นตอนที่ 1 ซ้ำโดยเพิ่มกระแสกระตุ้นทีละ 0.1 A จนกระทั่งมีกระแสกระตุ้นเท่ากับ 0.8 A บันทึกค่าผลการทดลอง

### 3.2 การหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระไฟฟ้าจะทำให้ความเร็วรอบของต้นกำลังลดลงส่งผลให้ความถี่ลดลง ถ้าต้องการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสจ่ายภาระไฟฟ้าที่ความถี่ที่

ต้องการ จึงต้องให้ความถี่ที่ภาวะไร้ภาระไฟฟ้ามีความถี่สูงกว่าความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นการทดลองนี้จะนำค่าความถี่ที่วัดได้จากการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ มาเขียนแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสของแต่ละเครื่องเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไป

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	1 ชุด	5. Digital multimeter	1 เครื่อง
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	1 เครื่อง	6. Tachometer	1 เครื่อง
3. พาวเวอร์มิเตอร์กระแสสลับ	3 เครื่อง	7. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้ (Variable AC supply)	1 เครื่อง
4. ภาระไฟฟ้า	1 เครื่อง		

กำหนดให้

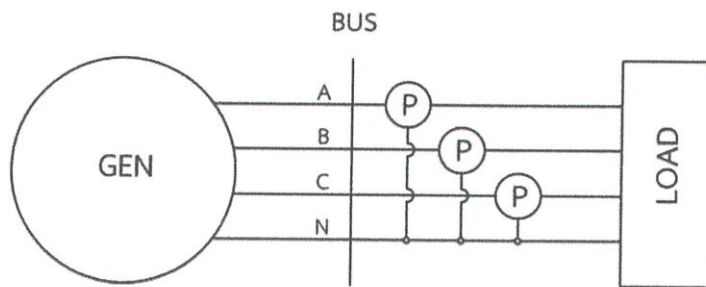
ภาระทางไฟฟ้าแสดงเป็นจำนวนชั้น

Step 1	โหลดไฟ 2 โหลด	ต่อเฟส
Step 2	โหลดไฟ 4 โหลด	ต่อเฟส
Step 3	โหลดไฟ 6 โหลด	ต่อเฟส
Step 4	โหลดไฟ 8 โหลด	ต่อเฟส
Step 5	โหลดไฟ 10 โหลด	ต่อเฟส

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อดังรูปที่ 3.2 ในการต่อพาวเวอร์มิเตอร์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้นำสายไฟที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ละเฟสมาต่อเข้าขั้วบวกของแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ จากนั้นต่อสายไฟออกจากแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ไปที่ภาระไฟฟ้า ในการต่อ เครื่อง Digital multimeter ต้องต่อแบบต่อเฟส (line to neutron) เพื่อให้ได้ค่าความถี่นี้ ปรับความเร็วรอบการหมุนให้ได้ 1530 รอบต่อนาที เพิ่มภาระไฟฟ้าเป็นขั้นและจ่ายภาระไฟฟ้า จนถึงขั้นสุดท้าย
2. บันทึกค่า ความถี่ และกำลังไฟฟ้าจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรการทดลองหาแผนภาพบ้าน

### 3.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง

ในระบบไฟฟ้าทั่วไปจะต้องมีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมากเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้แก่ระบบเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบ เพื่อเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบหากเกิดการหยุดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเมื่อต่อภาระไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งการทดลองนี้จะศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยเงื่อนไขจะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ลำดับเฟสของระบบไฟฟ้าต้องเหมือนกัน (Same phase sequence)
2. ความถี่ไฟฟ้าต้องเท่ากัน (Equal frequency)
3. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต้องเท่ากัน (Equal Voltage)
4. ไม่มีผลต่างมุมของแรงดันไฟฟ้า (In phase)

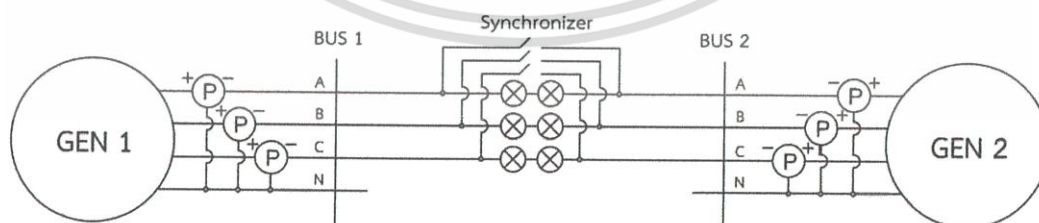
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดขั้วมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	2 ชุด	7. แอมมิเตอร์กระแสสลับ	2 เครื่อง
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	2 เครื่อง	8. กล่องพักสาย	2 เครื่อง
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับ 90 ค่าได้	2 เครื่อง	9. Digital multimeter	2 เครื่อง
4. แผงวงจรขนาน	1 ชุด	10. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับ ค่าได้	2 เครื่อง
5. พาวเวอร์มิเตอร์กระแสสลับ	6 เครื่อง		
6. Tachometer	1 เครื่อง		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อดังรูปที่ 3.3 ในการต่อพาวเวอร์มิเตอร์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้นำสายไฟที่ออกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาต่อเข้าขั้วบวกของแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ จากนั้นต่อสายไฟออกจากแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ไปที่กล่องพักสายโดยสายนิวตรอน (Neutral) ต่อจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาที่กล่องพักสาย ต่อสายไฟจากกล่องพักสายไปที่แผงวงจรขนาน ในการต่อโวลต์มิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์จะต่อแบบต่อเฟส ปรับความเร็วของต้นกำลังให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่อง โดยใช้ชุดอุปกรณ์ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ แล้วใช้Tachometerในการวัดความเร็วของเพลลาที่เชื่อมกันระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
2. ปรับขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการปรับกระแสกระตุ้นซึ่งสามารถทำได้โดยต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้ที่วงจรควบคุมกระแสกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อปรับให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้ง 2 เครื่อง ตามเงื่อนไข ( $E_a = K\phi\omega_m$ ) สามารถสังเกตค่าของแรงดันจากเครื่อง Digital multimeter ซึ่ง เครื่อง Digital multimeterต่อแบบไลน์ (line to line) โดยใช้เครื่องมือวัดต่อที่กล่องพักสาย
3. ตรวจสอบลำดับเฟสของระบบไฟฟ้าโดยการสังเกตหลอดไฟของแผงขนานที่มีการต่อแบบ Three - dark
4. ตรวจสอบผลต่างมุมของแรงดันไฟฟ้าโดยการสังเกตหลอดไฟของแผงขนานที่มีการต่อแบบ Three - dark
5. หากเงื่อนไขข้างต้นครบสามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่องผ่านแผงวงจรขนานโดยการสับสวิทช์เปิด



รูปที่ 3.3 วงจรการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า

การควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถทำได้โดยการควบคุมความเร็วของต้นกำลังทางกล และกระแสกระตุ้น ดังนั้นในการทดลองนี้จะทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระไฟฟ้าที่สถานะต่างๆ หลังจากที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแผงวงจรขนาน โดยจะควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจากการปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลและกระแสกระตุ้นเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าเสมือน โดยเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	2 ชุด	7. แอมมิเตอร์กระแสสลับ	2 เครื่อง
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	2 เครื่อง	8. กล้องฟลักสาย	3 เครื่อง
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้	2 เครื่อง	9. Digital multimeter	2 เครื่อง
4. แผงวงจรขนาน	1 ชุด	10. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้	1 เครื่อง
5. พาวเวอร์มิเตอร์กระแสสลับ	9 เครื่อง	11. ภาระไฟฟ้า	2 เครื่อง
6. Tachometer	1 เครื่อง		

#### ขั้นตอนการทดลอง

##### การทดลองที่ 1

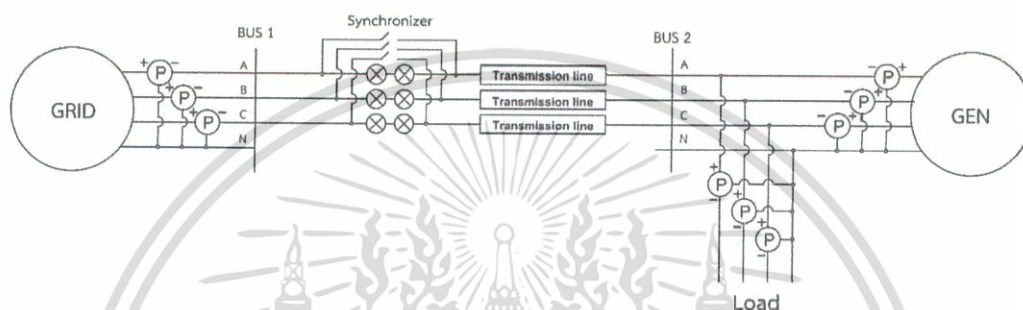
1. ต่อดังรูปที่ 3.4 และทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยต่อภาระไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งในการต่อพาวเวอร์มิเตอร์ที่ภาระไฟฟ้าให้นำสายไฟที่จะต่อมายังภาระไฟฟ้าต่อเข้าขั้วบวกของแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ จากนั้นต่อสายไฟออกจากแอมมิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์ไปที่ภาระไฟฟ้า ในการต่อโวลต์มิเตอร์ในพาวเวอร์มิเตอร์จะต่อแบบต่อเฟส
2. ปรับความถี่ไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 49.5 Hz จนถึง 51 Hz โดยเพิ่มครั้งละ 0.5 Hz แล้วบันทึกค่าผลการทดลอง
3. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2

##### การทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองที่ 2

1. ต่อดังรูปที่ 3.4 และทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่
2. ปรับกระแสกระตุ้นเริ่มต้นที่ 0.6 A จนถึง 0.9 A โดยเพิ่มครั้งละ 0.1 A แล้วบันทึกค่าในตารางการทดลอง
3. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2



รูปที่ 3.4 วงจรการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

### 3.5 การจำลองระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 แหล่ง

ในการทดลองจะมีการขนานแหล่งจ่ายกันทั้งหมด 3 บัส คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งจะจำลองการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยต่อกระแสไฟฟ้าไว้ที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ละเครื่อง แล้วเพิ่มกระแสไฟฟ้าทั้งหมด 5 ขั้ว โดยกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่จ่ายให้กับกระแสไฟฟ้ามาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 และ 2 โดยในการทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำลองไฟฟ้ากำลัง

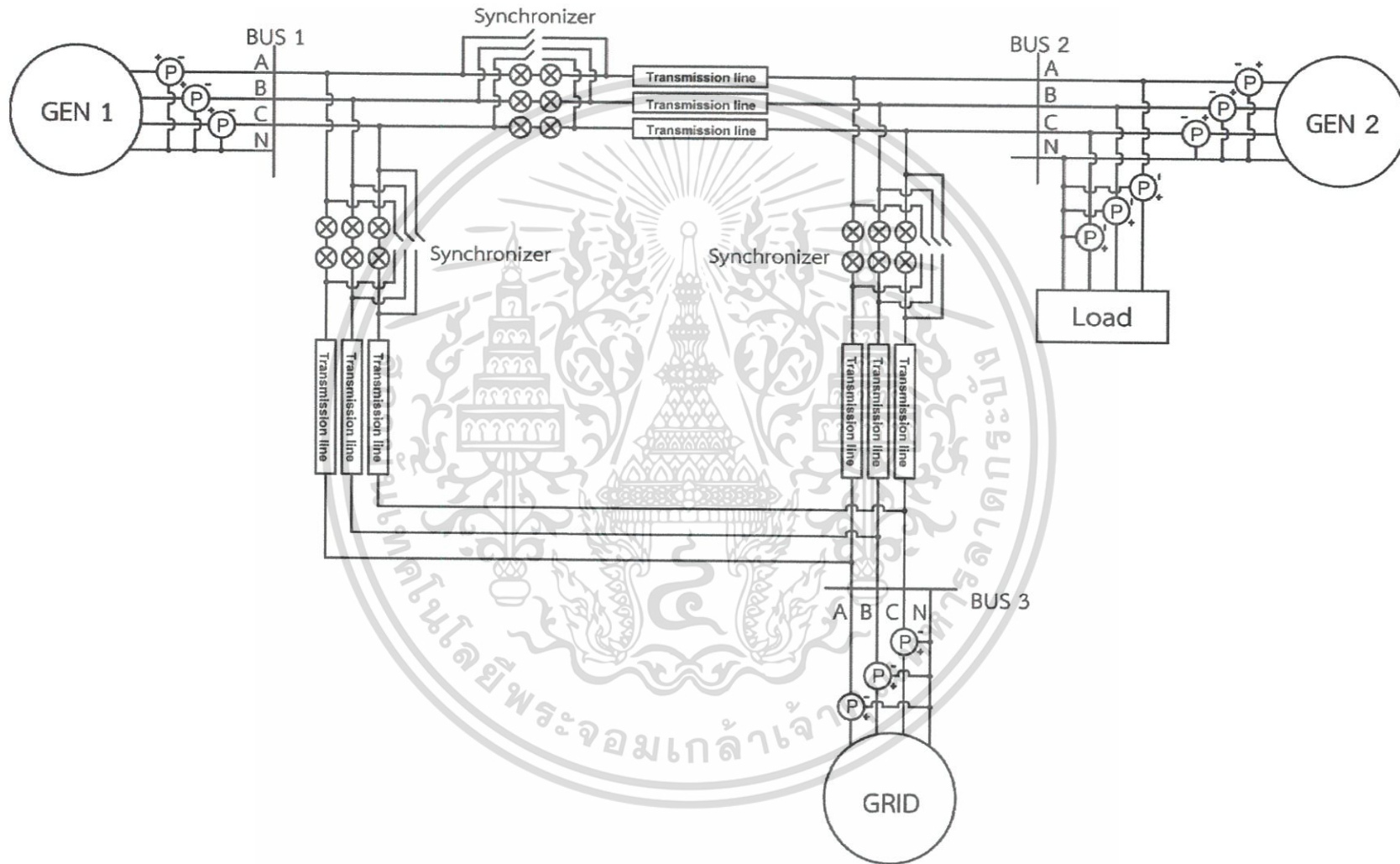
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- |                                     |           |                                      |           |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|
| 1. ชุดขั้วมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ     | 2 ชุด     | 8. กล่องพักสาย                       | 3 เครื่อง |
| 2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส      | 2 เครื่อง | 9. Digital multimeter                | 2 เครื่อง |
| 3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้ | 2 เครื่อง | 10. ตัวเหนี่ยวนำ                     | 3 ตัว     |
| 4. แผงวงจรขนาน                      | 1 ชุด     | 11. บัลลัสต์                         | 9 ตัว     |
| 5. พาวเวอร์มิเตอร์กระแสสลับ         | 9 เครื่อง | 12. ภาระไฟฟ้า                        |           |
| 6. Tachometer                       | 1 เครื่อง | 13. แหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวปรับค่าได้ | 2 เครื่อง |
| 7. แอมมิเตอร์กระแสสลับ              | 2 เครื่อง |                                      |           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 3.5 จากนั้นขนานระบบไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยเริ่มจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ก่อน แล้วจึงขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 จากวงจรดังรูปที่ 3.5 สายส่งที่ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ คือ ตัวเหนี่ยวนำโดยใช้เฟสละ 1 ตัว และสายส่งที่ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ คือการขนานบัลลาสต์ 3 ตัวต่อเฟส ส่วนสายส่งระหว่างเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 1 และ 2 จะต่อสายไฟเปล่า เพื่อให้มีค่าความต้านทานน้อย จะส่งผลให้มีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 และ 2 มากกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 กับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่
2. จ่ายภาระไฟฟ้าที่ละชั้น โดยภาระไฟฟ้าต่อที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ 1
3. บันทึกค่าผลการทดลอง
4. จากนั้นเปลี่ยนให้ต่อภาระไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 ทดลองซ้ำข้อที่ 1 - 3



รูปที่ 3.5 วงจรการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

### 3.6 การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด

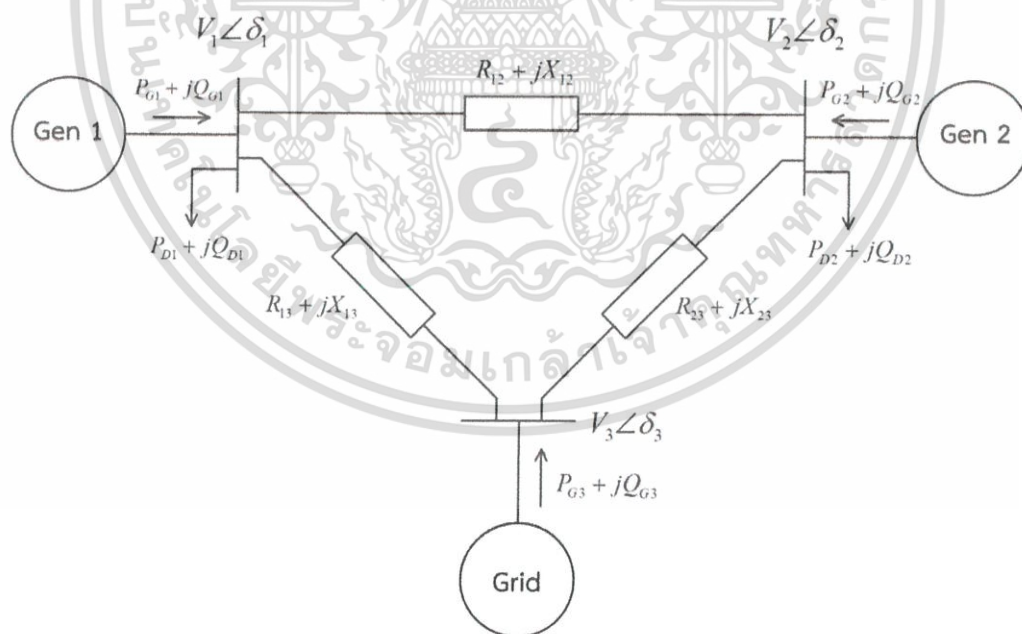
จากการทดลองที่ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าทำให้รู้ว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบ จึงได้ทดลองนี้เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยที่สุด และสามารถนำไปปรับใช้กับระบบไฟฟ้าจริงได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม MATLAB

ขั้นตอนการทดลอง

1. หาสมการฟังก์ชันเป้าหมาย
2. หาสมการฟังก์ชันเงื่อนไข
3. นำสมการไปใส่ในโปรแกรม MATLAB เจเนติกอัลกอริทึม
4. นำผลที่ได้จากโปรแกรม MATLAB มาทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบจำลองไฟฟ้ากำลังเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า
5. สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.6 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 บัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

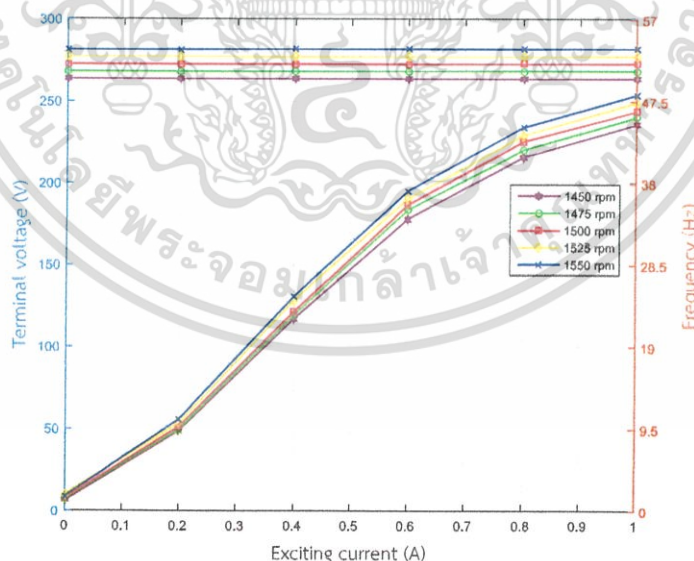
### ผลการทดลอง

โครงการบรณนี้นำเสนอผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าจำลอง โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์เป็นต้นกำลังทางกล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 2 เครื่องขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจำลองนี้ รวมถึงการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าในการจ่ายภาระไฟฟ้าให้มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุด

#### 4.1 ผลการทดลองควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การทดลองนี้ศึกษาผลของการปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลและกระแสกระตุ้นที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 3.1 โดยกำหนดให้ความเร็วของต้นกำลังทางกลคงที่ แต่ปรับกระแสกระตุ้นแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลง และกำหนดให้กระแสกระตุ้นคงที่ แต่ปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลง

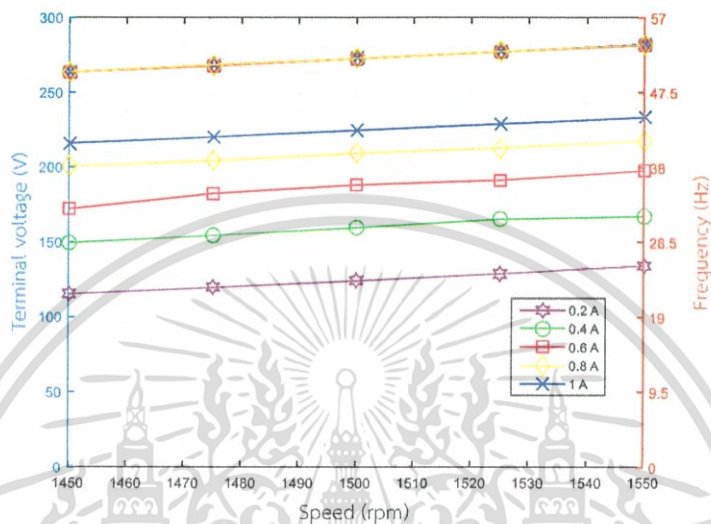
จากผลการทดลองที่ความเร็วของต้นกำลังทางกลคงที่ค่าต่างๆ ปรับกระแสกระตุ้นเพิ่มจาก 0 A ถึง 0.2 A จนกระทั่งกระแสกระตุ้นมีค่า 1 A ได้ผลตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กระแสกระตุ้นคงที่ และปรับความเร็วรอบจาก 1450 รอบต่อนาทีเป็น 1475 1500 1525 และ 1550 รอบต่อนาที ได้ผลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

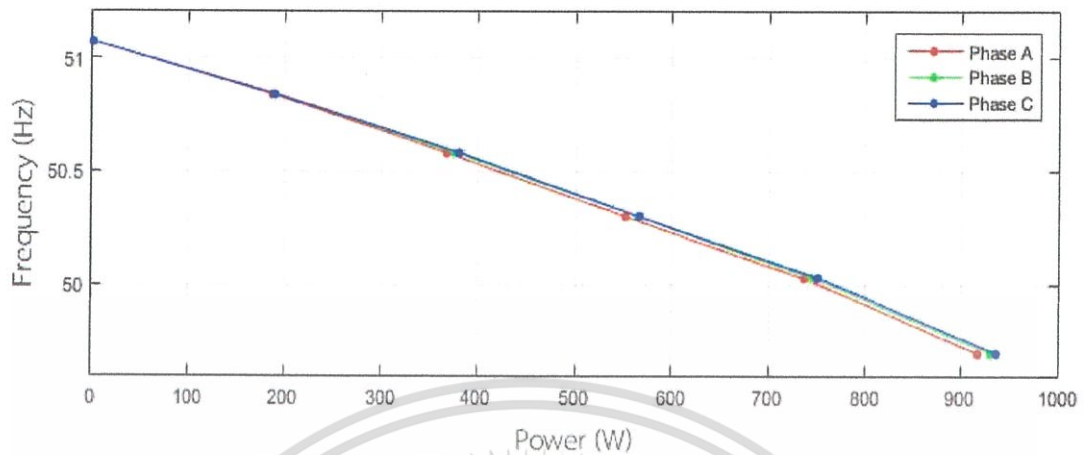
จากการทดลองจะสังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจะมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

#### 4.2 ผลการทดลองแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

##### อิสระ

การหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่อง เพื่อวิเคราะห์ความถี่ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 3.2

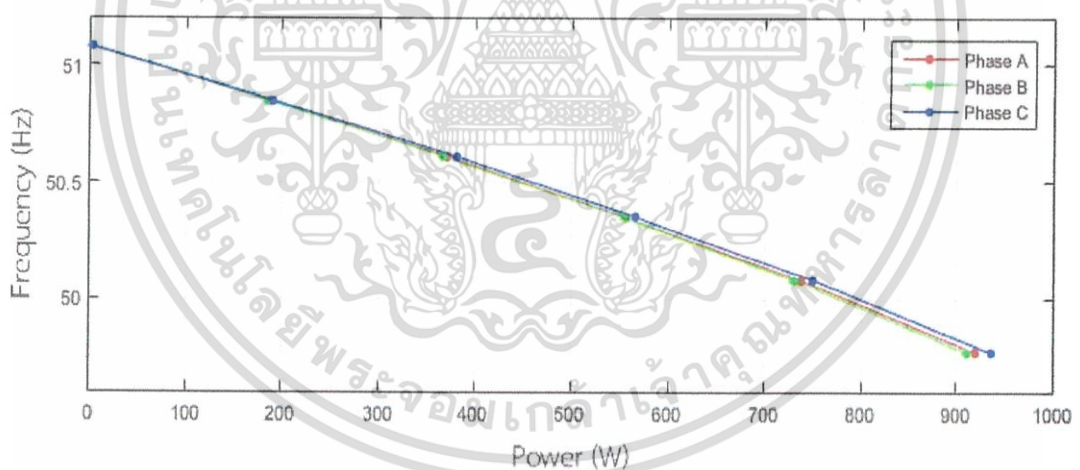
ผลการทดลองการหาแผนภาพบ้านสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1

ผลการทดลองการหาแผนภาพบ้านสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 ตาม

รูปที่ 4.4



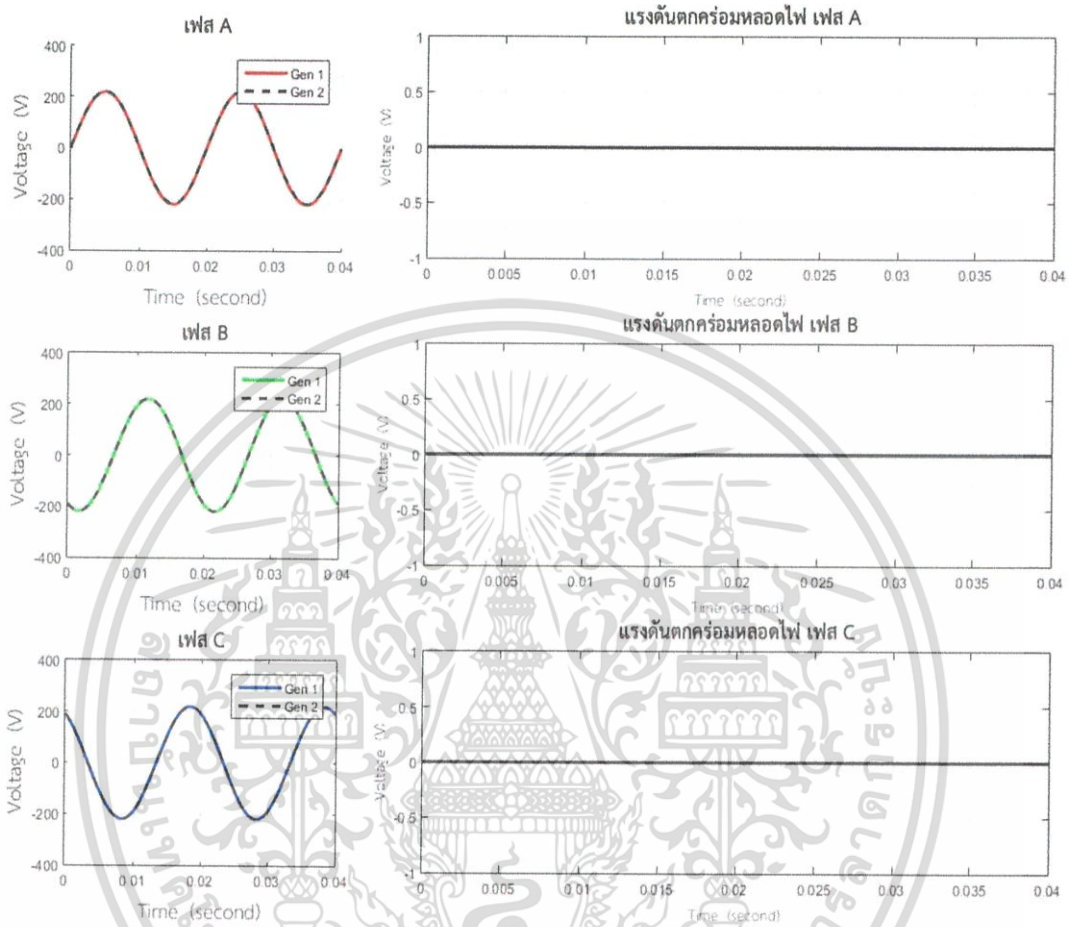
รูปที่ 4.4 แผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2

#### 4.3 ผลการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง

ในการทดลองนี้อธิบายเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผ่านสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 เทียบกับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องที่ 2 และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหลอดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

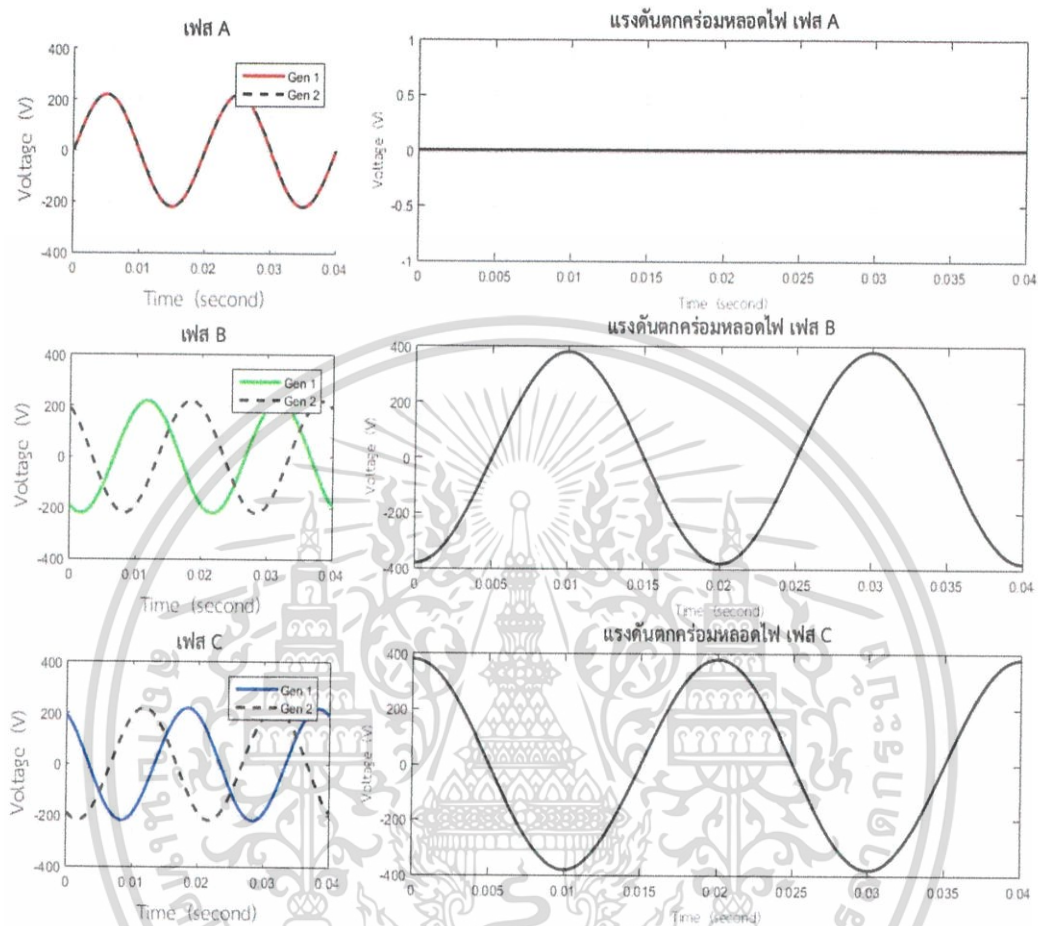
#### 4.3.1 กรณีที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่องตรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อ



รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟ สำหรับกรณีที่ 1

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 เทียบกับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องที่ 2 รูปคลื่นไซน์ทั้งสองทับเส้นกันและกัน (In phase) ส่งผลให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมหลอดไฟ ดังนั้นในแผงขานานเราจะสังเกตเห็นหลอดไฟที่ต่อแบบ Three – dark ดับทั้งหมด

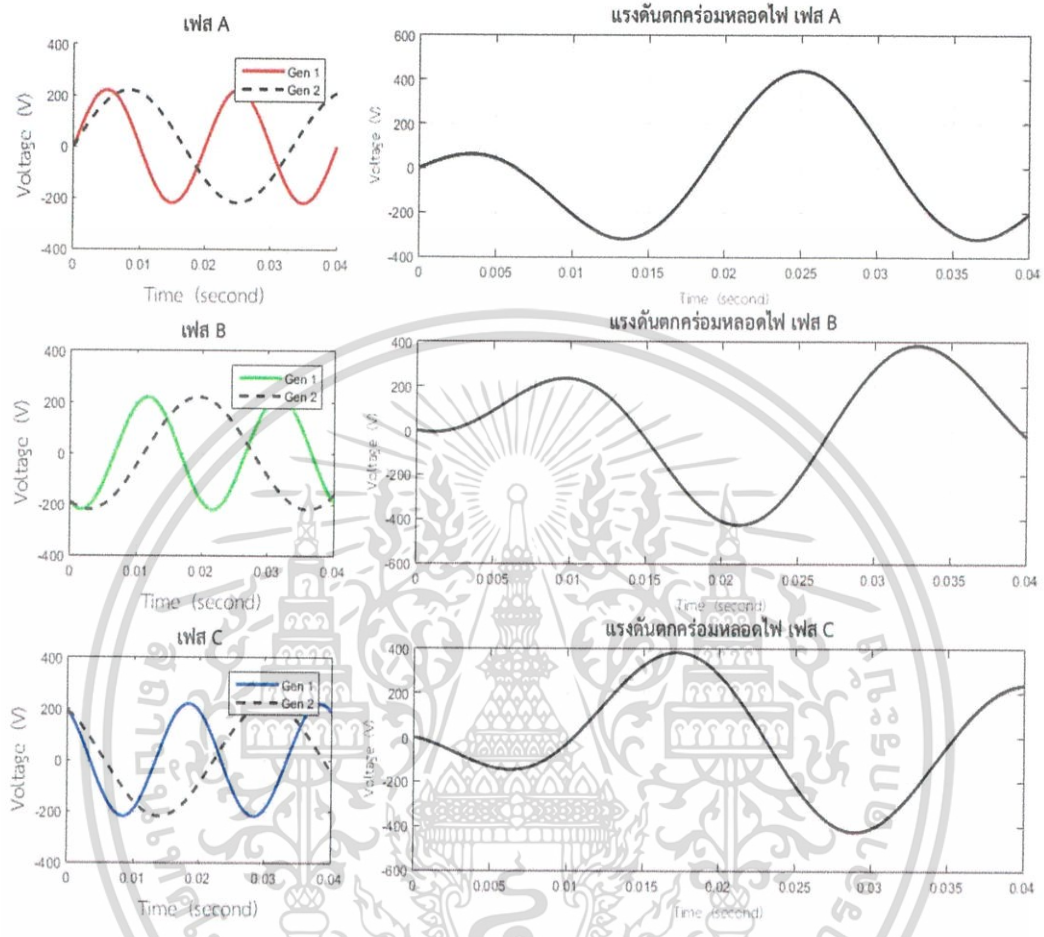
#### 4.3.2 กรณีที่ 1 ลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่องไม่เหมือนกัน



รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟสำหรับกรณีที่ 2

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ารูปคลื่นไซน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งสองมีเส้นทับกัน 1 เฟส ส่งผลให้ไม่มีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหลอดไฟ อีกสองเฟสที่เหลือมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไม่ทับเส้นกัน จึงมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหลอดไฟดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นในแผงขนานจะสังเกตเห็นหลอดไฟที่ต่อแบบ Three – dark ดับเพียง 1 หลอดและสว่าง 2 หลอด สลับกันแบบไล่ไปที่ละเฟสวนไป

### 4.3.3 กรณีที่ 3 ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่องไม่เท่ากัน

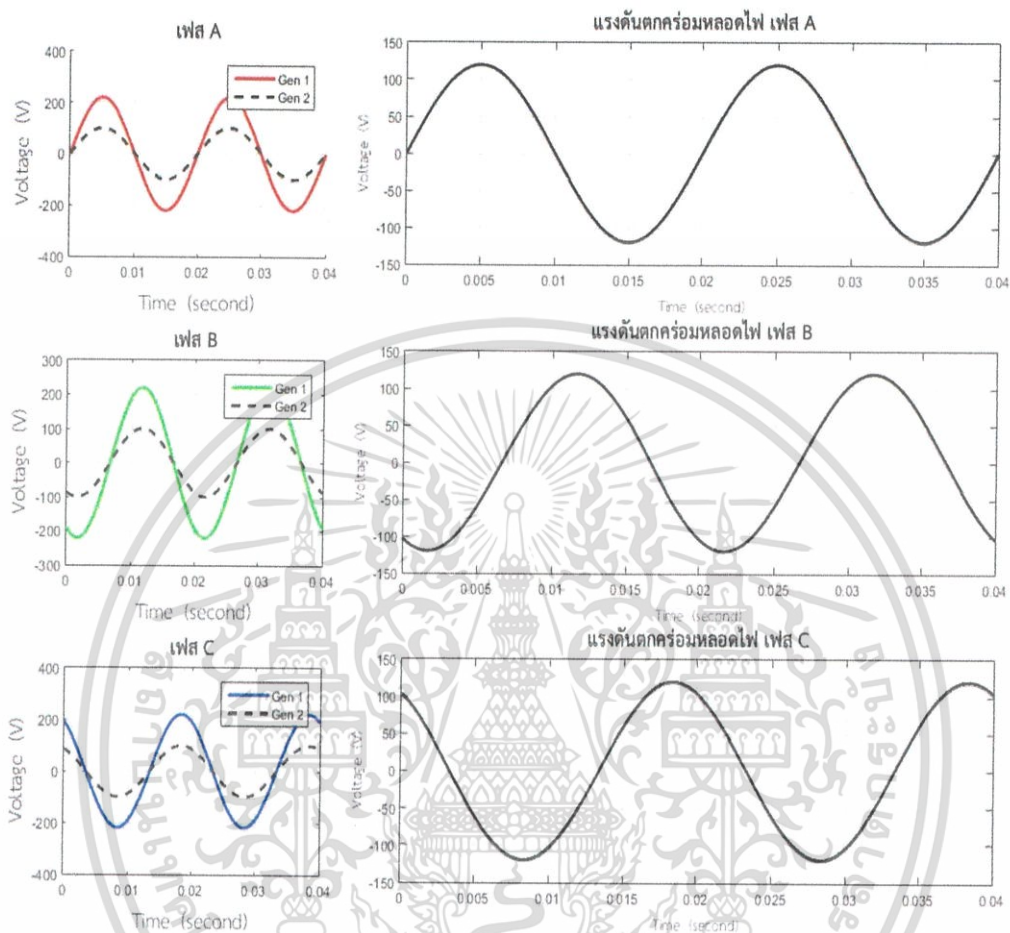


รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมโหลดไฟ สำหรับกรณีที่ 3

เนื่องด้วยความเร็วของต้นกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสไม่เท่ากัน จากกราฟจะเห็นว่าในกรณีที่มีความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันมาก สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 เทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องที่ 2 ทำให้รูปคลื่นไซน์ที่ไม่ทับกัน และในกรณีที่ผลต่างความถี่ของแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยทำให้รูปคลื่นไซน์เกือบจะทับกัน ส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลดไฟ ดังรูปที่ 4.7 ดังนั้นในแผนขนานจะสังเกตเห็นหลอดไฟที่ต่อแบบ Three – dark มีความสว่างไม่เท่ากันทั้งสามหลอดสลั่วนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

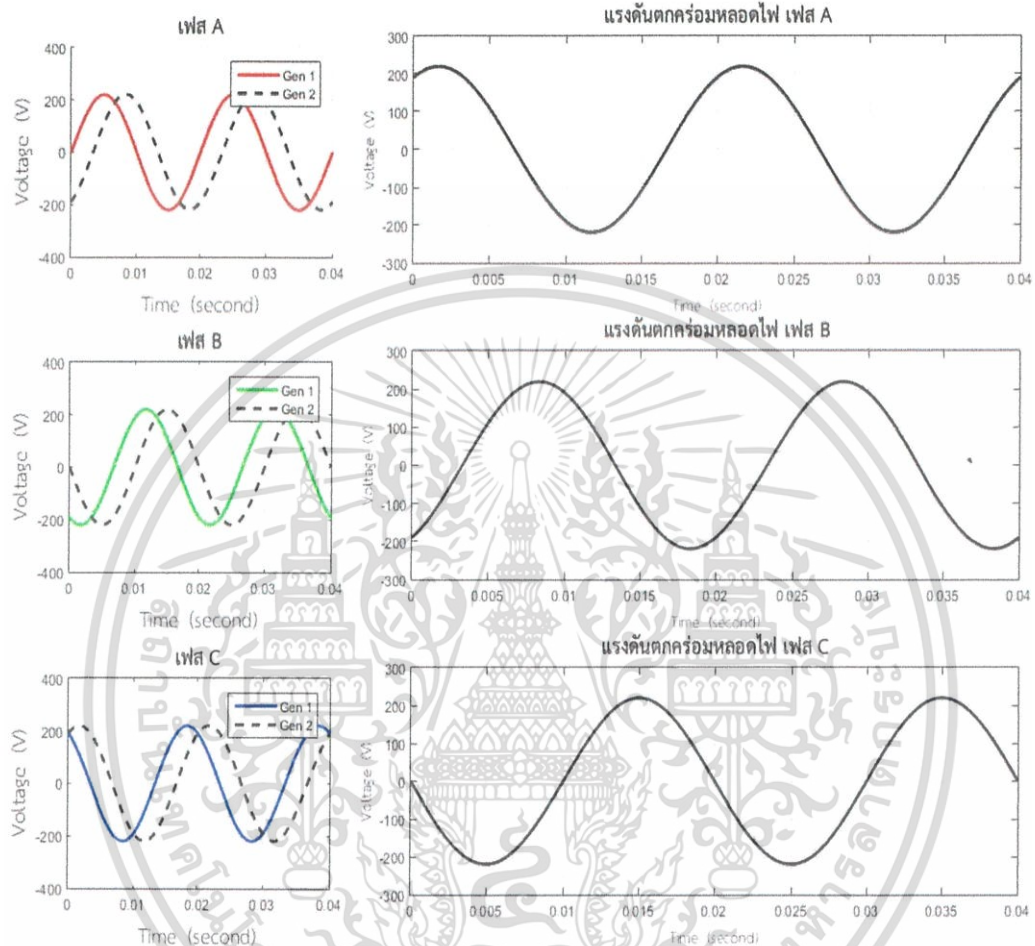
#### 4.3.4 กรณีที่ 4 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟ สำหรับกรณีที่ 4

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 เทียบกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องที่ 2 รูปคลื่นไซน์ทั้งสองไม่ทับกันและมีขนาดแอมพลิจูดของกราฟไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหลอดไฟ ดังรูปที่ 4.8 ดังนั้นในแผงขนานจะสังเกตเห็นหลอดไฟที่ต่อแบบ Three – dark สว่างเท่ากันทั้งสามหลอด

### 4.3.5 กรณีที่ 5 มุมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่องไม่เท่ากัน



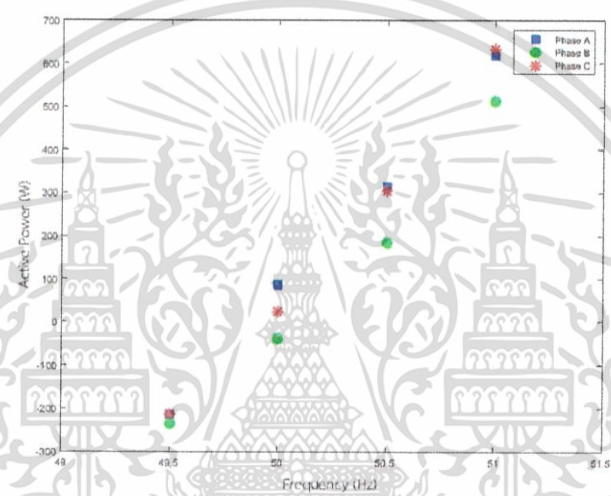
รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่อง และสัญญาณแรงดันตกคร่อมหลอดไฟ สำหรับกรณีที่ 5

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 เทียบกับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องที่ 2 รูปคลื่นไซน์ทั้งสองไม่ทับกันแต่มีขนาดแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันทั้งสองกราฟ ส่งผลให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหลอดไฟดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นในแผงขนานจะสังเกตเห็นหลอดไฟที่ต่อแบบ Three – dark สว่างเท่ากันทั้งสามหลอด

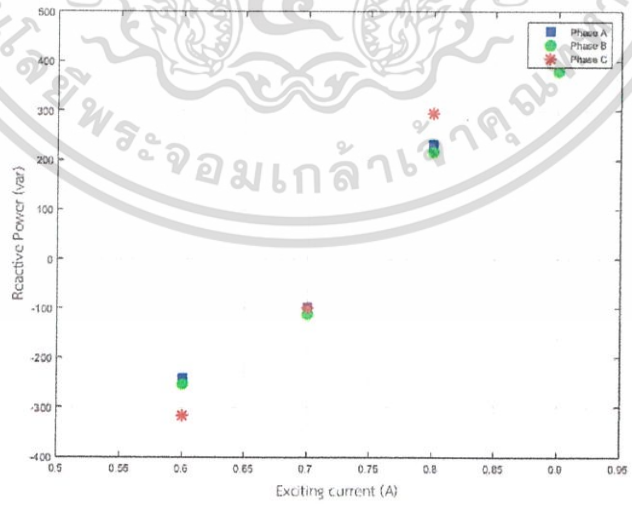
#### 4.4 ผลการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

เมื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ตามรูปที่ 3.3 ปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและปรับกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

ผลการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 เข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



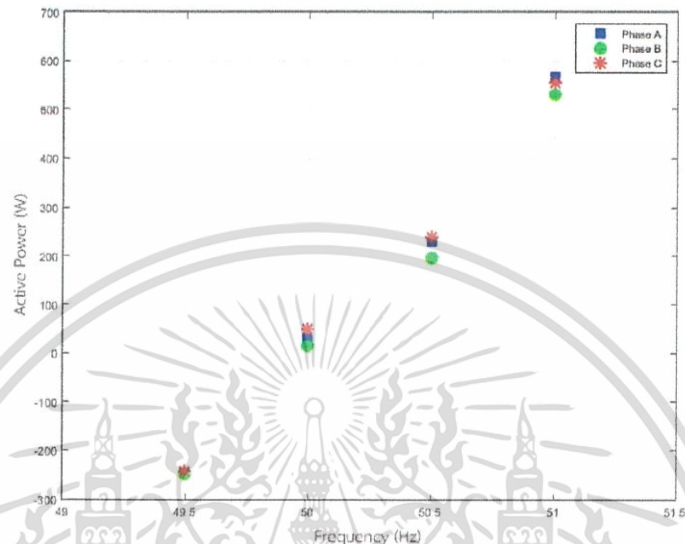
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1



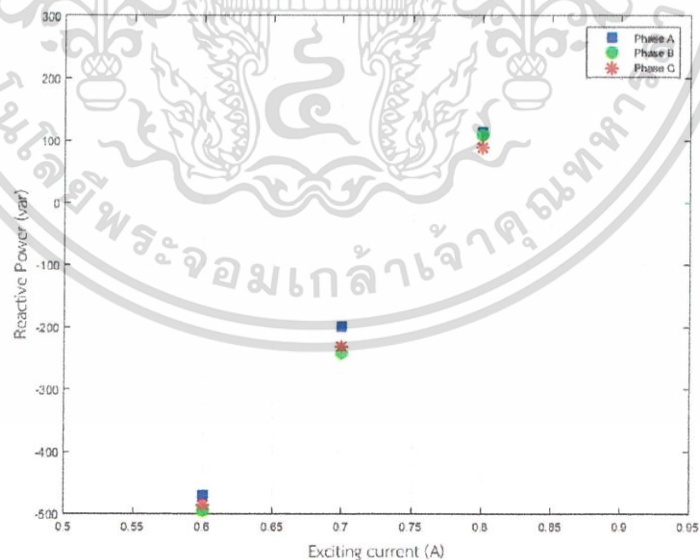
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 เข้ากับระบบไฟฟ้าขนานใหญ่เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2

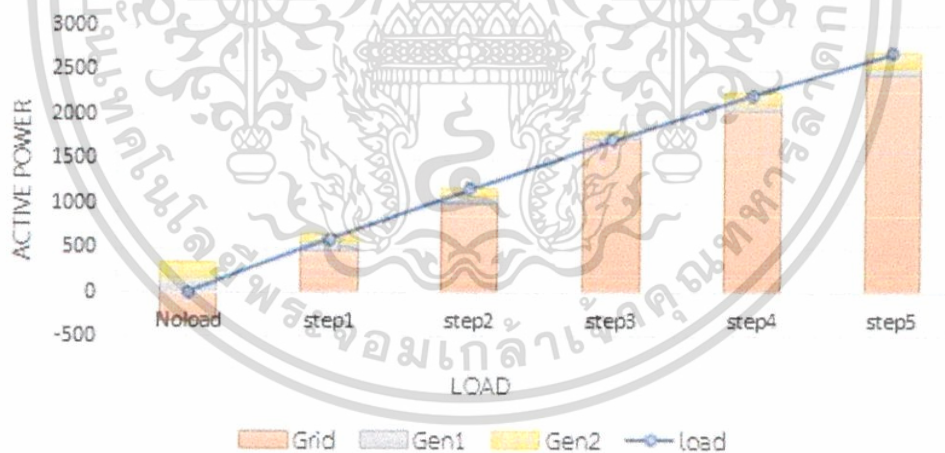
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเมื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่แล้วเพิ่มความเร็วดันกำลังทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกมาได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนออกมาได้มากขึ้น

#### 4.5 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่เมื่อมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 แหล่ง

ต่อวงจรดังรูปที่ 3.4 เพื่อวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจำลอง ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาดเท่ากัน 2 เครื่อง ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ และแบบจำลองสายส่ง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่แต่ละบัสขนานกันเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่ภาระไฟฟ้า ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ส่งผลให้ค่าผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้จากทางออกของแต่ละบัสมีค่าไม่เท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่ภาระไฟฟ้าที่วัดได้จากทางเข้าของภาระไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงกับภาระไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องขนานกันและขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่ง โดยกำหนดการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามสมการฟังก์ชันเป้าหมาย

จากการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดได้ดังรูปที่ 4.15

ฟังก์ชันเป้าหมาย

$$f(x) = |I_{12}|^2 R_{12} + |I_{23}|^2 R_{23} + |I_{13}|^2 R_{13}$$

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่ไม่เป็นสมการเส้นตรง

$$P_{Gk} - P_{Dk} - \sum_{n=1}^{N_B} |V_k| |V_n| |Y_{k,n}| \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) = 0$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} - \sum_{n=1}^{N_B} |V_k| |V_n| |Y_{k,n}| \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) = 0$$

ตัวแปรต้น

$$\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$$

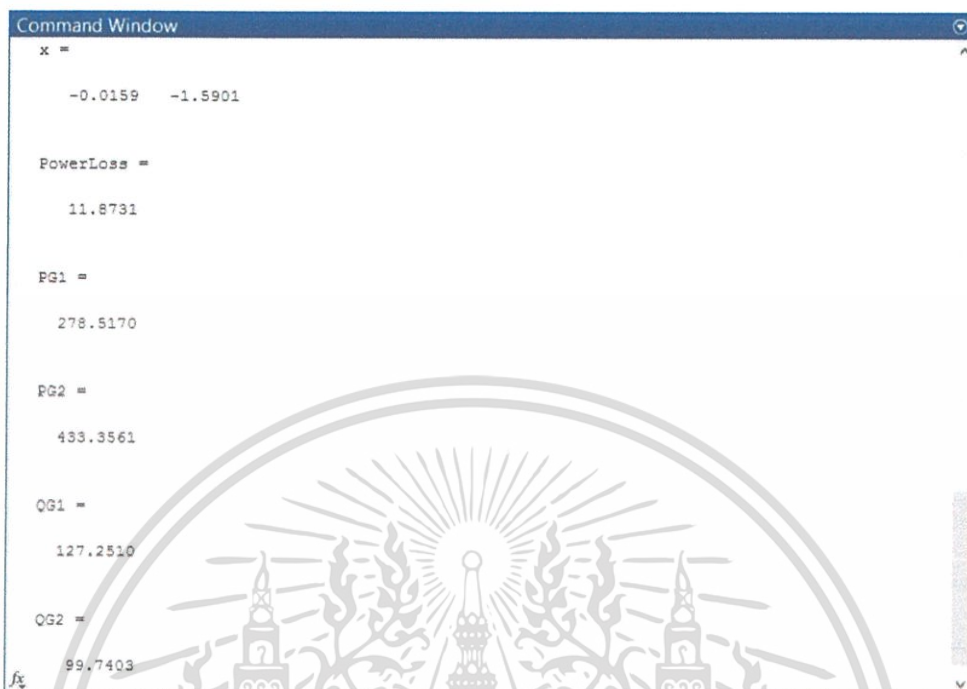
ค่าคงที่

$$R_{12}, X_{12}, R_{23}, X_{23}, Q_{G1}, Q_{G2}$$

ตัวแปรตาม

$$\delta_3, P_{D1}, P_{D2}, P_{G3}, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{G3}, V_1, V_2, V_3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

Command Window
x =
    -0.0159   -1.5901

PowerLoss =
    11.8731

PG1 =
    278.5170

PG2 =
    433.3561

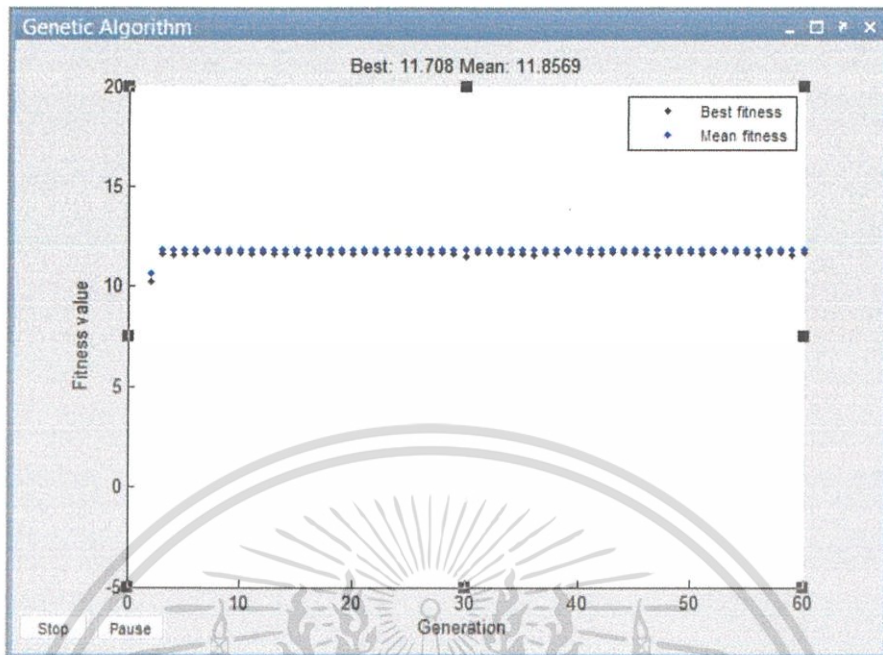
QG1 =
    127.2510

QG2 =
    99.7403

f
  
```

รูปที่ 4.15 ค่าตอบที่ได้จากเจเนติกอัลกอริทึม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 278.52 วัตต์ กำลังไฟฟ้าเสมือน 127.25 วาร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 278.51 วัตต์ กำลังไฟฟ้าเสมือน 99.74 วาร์ และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 200 วัตต์ กำลังไฟฟ้าเสมือน 100 วาร์ เข้าสู่ระบบไฟฟ้าจำลองโดยที่แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 เท่ากับ 204.5 V มุม -0.0159 องศา แรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 เท่ากับ 203.47 V มุม -1.59 องศา โดยอ้างอิงมุมของแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้า 222.3 V มุม 3 องศา จึงจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจำลองมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.87 W



รูปที่ 4.16 พฤติกรรมฟังก์ชันเป้าหมายของเจเนติกอัลกอริทึม

จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงคำตอบของการแก้สมการของฟังก์ชันเป้าหมายที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการสุ่มค่าที่ดีจากเจเนติกอัลกอริทึมซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 60 รอบ มาใส่ในฟังก์ชันเป้าหมายจะได้ค่าที่ดีที่สุด (น้อยที่สุด) เท่ากับ 11.708 วัตต์ โดยที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.8569 วัตต์

เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณโดยผ่าน Genetic Algorithm (GA) ใน MATLAB พบว่าค่าที่ได้ออกมานั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งหมายความว่าค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวของระบบไฟฟ้าจำลองที่นำมาใส่ใน Genetic Algorithm มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการบทรู้นำเสนอข้อสรุปและข้อเสนอแนะจากผลการทดลองการออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 6 การทดลอง ซึ่งประกอบด้วย 1.การควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2.การหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ 3.การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง 4.การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า 5.การจ่ายภาระไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 บัส 6.การหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยที่สุด

#### 5.1 สรุป

##### 5.1.1 การทดลองควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เมื่อกำหนดให้ความเร็วของต้นกำลังทางกลคงที่ แล้วปรับกระแสกระตุ้นเพิ่มขึ้น พบว่าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะคงที่แต่แรงดันไฟฟ้ามืดค่าเพิ่มตามกระแสกระตุ้นดังรูปที่ 4.1 หากกำหนดให้กระแสกระตุ้นมีค่าคงที่ แล้วปรับความเร็วของต้นกำลังทางกล พบว่าทั้งแรงดันไฟฟ้าและความถี่จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของต้นกำลังทางกลดังรูปที่ 4.2

##### 5.1.2 การทดลองหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระไฟฟ้ามากขึ้น จะทำให้ความเร็วรอบของต้นกำลังทางกลลดลง ส่งผลให้ความถี่มีค่าลดลง ผลการทดลองหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เนื่องจากความถี่มีค่าแปรผันตามความเร็วรอบของต้นกำลังทางกลดังรูปที่ 4.2

##### 5.1.3 การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสองเครื่อง

ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกันจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขทั้งหมด 4 เงื่อนไข คือ ลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเครื่องต้องตรงกัน, ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต้อง

เท่ากัน, แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องเท่ากันและต้องมีมุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ถึงจะสามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกันได้

5.1.4 การทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า

การปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงมากขึ้น ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 เมื่อเพิ่มกระแสกระตุ้นจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่ระบบมากขึ้นดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

5.1.5 การทดลองการจ่ายภาระไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 แหล่ง

เมื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องเข้าด้วยกันและขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า หากไม่ปรับความเร็วต้นกำลังทางกลและกระแสกระตุ้นขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นเป็นกำลังไฟฟ้าที่มาจากระบบไฟฟ้า เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงในระบบไฟฟ้าจะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าวางสายส่งกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าผลรวมกำลังไฟฟ้าจริงของแต่ละบัส มีค่าไม่เท่ากับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าภาระไฟฟ้า ซึ่งการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจะสามารถลดได้จากการทดลองถัดไป

5.1.6 การทดลองหาตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยที่สุด

ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเจเนติอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง มีค่าถูกต้องมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันเป้าหมาย ฟังก์ชันเงื่อนไข ขอบเขตของคำตอบ จำนวนรอบการคำนวณ และจำนวนประชากรในแต่ละรอบการคำนวณซึ่งวิธีเจเนติอัลกอริทึมสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีค่าน้อยลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าให้สูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองซึ่งพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง สายส่งกำลังไฟฟ้าระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ และภาระไฟฟ้าในการทดลองจะวัดค่าต่างๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และ

กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าออกที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสทั้งสอง เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า โดยใช้แผงวงจรขนานในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

1. ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าจริงขณะทดลองไม่สามารถวัดค่าในแต่ละจุดพร้อมกันได้ จะต้องวัดทีละจุด ซึ่งทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อน ซึ่งในการทดลองนี้ จะต้องใช้พาวเวอร์มิเตอร์ทั้งหมด 9 ตัว และพาวเวอร์มิเตอร์สามเฟส 1 ตัว หากเปลี่ยนมาใช้พาวเวอร์มิเตอร์สามเฟสทั้งหมด จะใช้พาวเวอร์มิเตอร์สามเฟสเพียง 4 ตัวเท่านั้น
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่ใช้ในการทดลอง มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ทำให้การเคลื่อนย้ายและการจัดเก็บเป็นไปได้ยาก หากมีการจัดทำฐานเลื่อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การจัดเก็บหลังการใช้งานก็จะเป็นไปได้สะดวกมากขึ้น
3. มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เต็มพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อิศระชัย งามหรุ, พลศาสตร์และเสถียรภาพของระบบพ้้ากำลัง, กรุงเทพฯ: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, .2554
- [2] Central Station Engineer of the Westinghouse Electric Corportion, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 4 th ed., United Station of America: Westinghouse Electric Corportion, 1964.
- [3] Stephen J. Chapman, Electric Machinery fundamentals, 5th ed., Singapore: McGraw-Hill Companies Inc., 2012.
- [4] William D. Steven,Jr., Element of power system analysis, Singapore: McGraw-Hill Companies, .1982
- [5] ทรงฤทธิ์ ศิริวัฒน์นะ, เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ 1, กรุงเทพฯ: บริษัท เอช. เอ็น. กรุ๊ป จำกัด, .2537
- [6] J. Duncan Glover and Mulukutla S. Sarma, Power system analysis and design, 3 rd ed., United State of America: Wadsworth Group, 2002.
- [7] Y. S. D. B. Jinendra Rahul, "A New Attempt to Optimize Optimal Power Flow based Transmission Losses using Genetic Algorithm," in Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, Kota, 2012.
- [8] ก่อเกียรติ กาญจนรัตน์ , การพัฒนาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่ารีลัคแทนซ์แบบ มิติ 2, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, .2548
- [9] Fitzgerald A.E.,Charles Kingley and Stephen D. Umans., Electrical Machinery., 5 th ed., New York: McGraw-Hill , Inc., 1990.
- [10] Nasar S.A., Elctromechanics and Electric Machines, 2 nd ed., New York: John Wiley & Sons Inc, 1983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


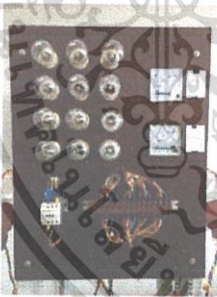



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


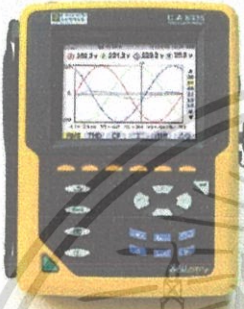



**ภาคผนวก ก**  
**อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง**

ในการทดลองจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อการวัดค่าต่างๆหรือแม้กระทั่งเป็นอุปกรณ์ในการแปลงแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้การทดลองออกแบบมาเพื่อการขนานด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติ จึงอาจต้องใช้อุปกรณ์บางตัว


ตาราง ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปอุปกรณ์	รายละเอียดของอุปกรณ์
	<p>ผลิตภัณฑ์ : ชุดการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส</p> <p>ยี่ห้อ : INFINITY POWER MADE BY DINGOL</p> <p>รุ่น : IF164426</p> <p>รายละเอียด : ตารางที่ ข.1</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ : แผงช่วยขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส</p> <p>รายละเอียด : พิกัดกระแส AC 10 A</p> <p>พิกัดแรงดัน AC 400 V</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ : มัลติมิเตอร์ดิจิตอล</p> <p>ยี่ห้อ : SANWA</p> <p>รุ่น : CD772</p> <p>รายละเอียด : พิกัดกระแส AC/DC 15 A</p> <p>พิกัดแรงดัน AC/DC 1000 V</p> <p>พิกัดช่วงความถี่ 40-70 Hz</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>ผลิตภัณฑ์ : พาวเวอร์มิเตอร์ดิจิทัล ยี่ห้อ : Metrix รุ่น : PX120, PX110 รายละเอียด : พิกัดกระแส AC 10 A พิกัดแรงดัน AC 600 V พิกัดช่วงความถี่ 40-70 Hz</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ : พาวเวอร์มิเตอร์ดิจิทัล 3 เฟส ยี่ห้อ : Chauvin Arnoux รุ่น : CA8335 รายละเอียด : พิกัดกระแส AC/DC 1,200 A พิกัดแรงดัน AC/DC 1,000 V พิกัดช่วงความถี่ 40-69 Hz</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ : มิเตอร์กระแสอนาล็อก AC ยี่ห้อ : YOKOGAWA รุ่น : 201324 รายละเอียด : พิกัดกระแส DC 20 A</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ : Digital clamp meter ยี่ห้อ : KYORITSU รุ่น : KEW SNAP 203 รายละเอียด : พิกัดกระแส 400 A DC/AC</p>
	<p>ผลิตภัณฑ์ : Commercial-Drive VSD ยี่ห้อ : ABB รุ่น : ACS550-01-08A8-4 รายละเอียด : พิกัดกระแสขาออก 8.8 A พิกัดแรงดัน 480 V AC</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>ผลิตภัณฑ์ : หม้อแปลงแบบปรับค่าได้ 1 เฟส ยี่ห้อ : Tipas Electric รุ่น : SD-16 รายละเอียด : พิกัดแรงดันขาเข้า 220 V พิกัดแรงดันขาออก 250 V พิกัดกระแสขาออก 20 A</p>
---	--



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

พิกัดและการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### พิกัดและการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ภาคผนวกนี้เป็นกล่าวถึงการหาพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง โดยการคำนวณผลจากผลการทดลอง

#### ข.1 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

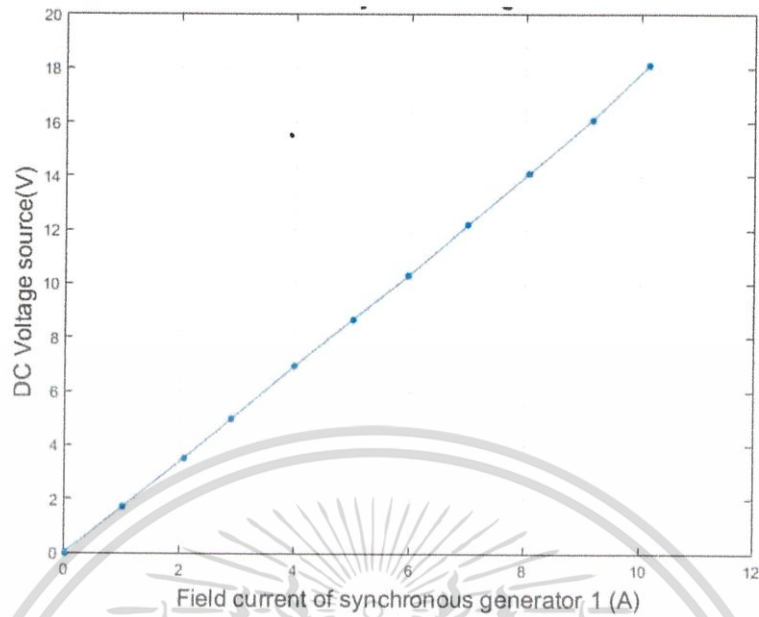
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 2 เครื่องมีพิกัดกำลังที่เท่ากัน ดังตารางที่ ข.1

#### ตารางที่ ข.1 พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ลักษณะการต่อขดลวดอาร์มาเจอร์	STAR
พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	380 โวลต์
พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	12.3 แอมแปร์
พิกัดกำลัง	8.1 กิโลวัตต์ แอมแปร์
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	0.8
ความเร็วซิงโครนัส	1500 รอบต่อนาที
ความถี่	50 เฮิรตซ์
พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนาม	55 โวลต์
พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนาม	2.5 แอมแปร์

#### ข.2 การหาพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การหาความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Resistance) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์แต่ละเฟส แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่ละช่วง นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟได้รูปที่ ข.1 ความชันที่ได้จากกราฟคือความต้านทานอาร์มาเจอร์ในแต่ละเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1

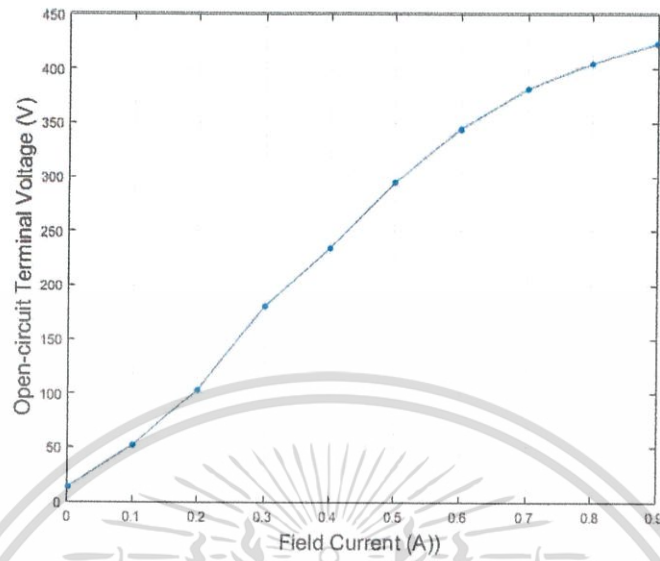


รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1

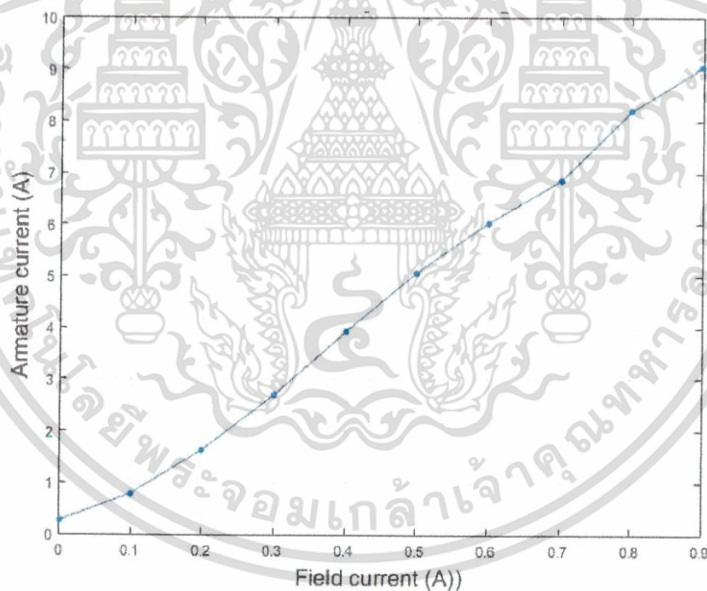
จากกราฟผลการทดลองเพื่อหาความต้านทานของตัวนำต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 จะได้

$$R_a = 1.77 \text{ โอห์ม}$$

ผลการทดสอบการเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและการทดสอบแบบลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ของการเปิดวงจร และการปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1

(ก) ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว และกระแสกระตุ้นของการทดสอบการเปิดวงจร

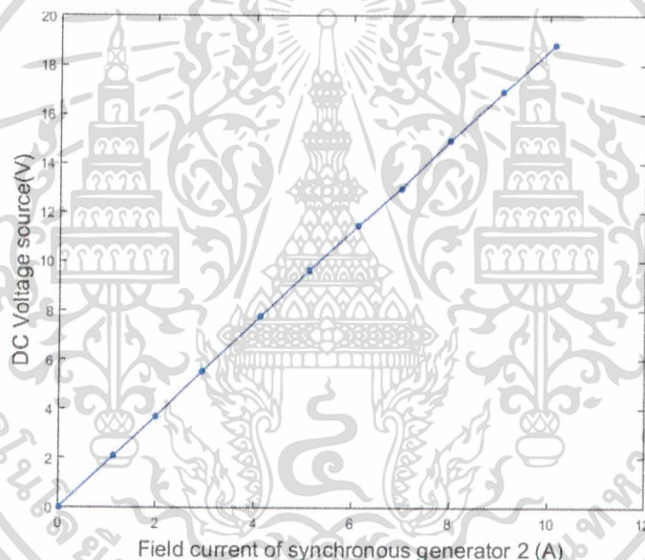
(ข) ความสัมพันธ์ของกระแสอาร์มาเจอร์ และกระแสกระตุ้นของการทดสอบการลัดวงจร

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Open Circuit test										
$I_f$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$V$	13.42	51.97	103.4	179.97	234.47	294.53	344.40	381.47	405.43	423.17
Short Circuit test										
$I_f$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$I$	0.27	0.79	1.63	2.69	3.93	5.07	6.04	6.87	8.22	9.05

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 นั้นมีวิธีการหาแบบเดียวกับ การหาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1



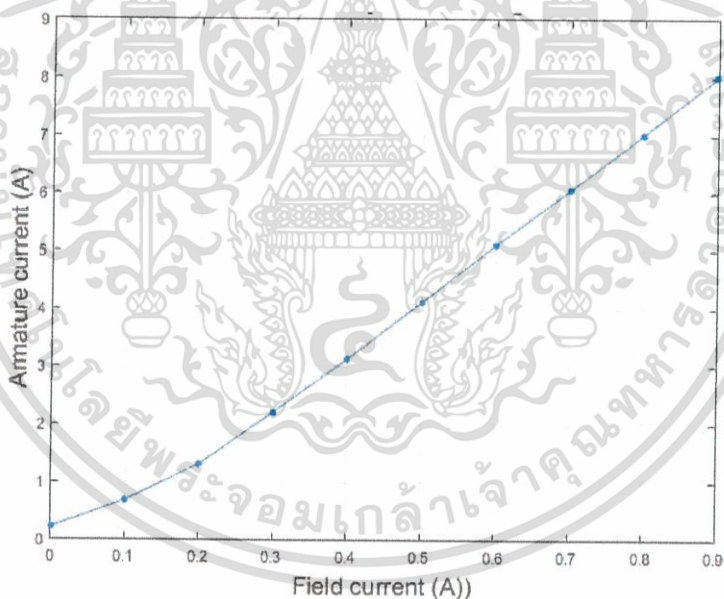
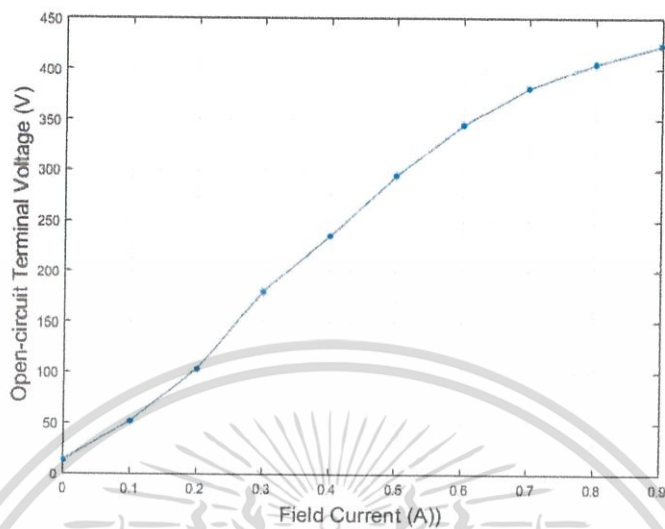
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2

จากกราฟผลการทดลองเพื่อหาความต้านทานของตัวนำต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 จะได้

$$R_a = 1.86 \text{ โอห์ม}$$

ผลการทดสอบเปิดวงจร และการทดสอบแบบลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ของการเปิดวงจร และการปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2

(ก) ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว และกระแสกระตุ้นของการทดสอบการเปิดวงจร

(ข) ความสัมพันธ์ของกระแสอาร์มาเจอร์ และกระแสกระตุ้นของการทดสอบการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2

Open Circuit test										
$I_f$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$V$	11.6	55.93	88.6	151.5	215.47	273.87	323.43	363.47	388.9	406.73
Short Circuit test										
$I_f$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$I$	0.22	0.67	1.31	2.21	3.12	4.11	5.10	6.05	7.02	8.01

โดยจะสามารถคำนวณหาค่า จากสมการที่ 2-4 สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เครื่องที่ 1 จะได้  $X_s$  มีค่าเท่ากับ 31.796 โอห์ม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2 จะได้  $X_s$  มีค่าเท่ากับ โอห์ม 36.566





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

## ตารางผลการทดลอง

การทดลองของโครงการนี้มีการเก็บค่าข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน กำลังไฟฟ้าปรากฏ ตัวประกอบกำลัง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความถี่ และความเร็วของโรเตอร์ ซึ่งมีทั้งการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องขนาดเท่ากันขนานกันผ่านแบบจำลองสายส่งและเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

โดยกำหนดให้  $n_r$  เป็นความเร็วการหมุนของโรเตอร์ (รอบต่อนาที)  
 $I_f$  เป็นกระแสไฟฟ้ากระตุ้นในการสร้างสนามไฟฟ้าที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (แอมป์)

## ค.1 ตารางผลการทดลองการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาผลของความเร็วและกระแสกระตุ้นที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ความเร็วโรเตอร์คงที่

1450 rpm	$I_f$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	$V_A$	6.4	48.8	117.2	178.4	215.9	235.6
	$V_B$	6.4	48.7	117	178.1	215.6	236.1
	$V_C$	6.5	48.7	116.9	178.3	216	236
	$f$	48.36	48.35	48.34	48.35	48.36	48.37
1475 rpm	$I_f$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	$V_A$	7.2	49.5	119.4	183.9	220.3	239.9
	$V_B$	7.2	49.5	119.3	183.7	220.2	240.3
	$V_C$	7.2	49.5	119.3	183.8	220.3	240.2
	$f$	49.18	49.15	49.17	49.2	49.21	49.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1500 rpm	$I_f$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	$V_A$	7.7	51.4	121.8	187.2	225.6	243.9
	$V_B$	7.7	51.6	120.9	186	226	243.4
	$V_C$	7.7	51.6	121.5	186.6	225	244.6
	$f$	50	50	50	50.02	50.04	50.05
1525 rpm	$I_f$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	$V_A$	10.1	53.7	128.7	190.5	229.3	249.1
	$V_B$	10	53.6	128.5	190.5	229.3	249.5
	$V_C$	10	53.7	128.4	190.5	229.4	249.5
	$f$	50.87	50.87	50.85	50.87	50.88	50.9
1550 rpm	$I_f$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
	$V_A$	8.8	55.9	130.9	195.1	234.1	253.7
	$V_B$	8.8	55.8	130.7	195	234.2	253.6
	$V_C$	8.8	55.8	130.7	195.1	234	254.4
	$f$	51.59	51.63	51.67	51.69	51.7	51.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่กระแสกระตุ้นคงที่

$I_f = 0.4$	speed	1450	1475	1500	1525	1550
	$V_A$	115.8	119.9	124.2	129.4	134.1
	$V_B$	115.5	120	124.8	129.1	134.2
	$V_C$	115.5	119.8	124.3	129.1	134.1
	$f$	48.32	49.17	50	50.82	51.65
$I_f = 0.5$	speed	1450	1475	1500	1525	1550
	$V_A$	150	154.9	160.2	165.5	167.4
	$V_B$	149.8	154.6	159.5	165.4	167.2
	$V_C$	149.9	154.5	159.6	165.6	167.3
	$f$	48.34	49.18	50	50.84	51.68
$I_f = 0.6$	speed	1450	1475	1500	1525	1550
	$V_A$	172.6	182.9	188.5	191.9	197.9
	$V_B$	172.4	182.6	189	191.8	198
	$V_C$	172.4	182.7	188.3	191.8	198.1
	$f$	48.34	49.16	50.01	50.87	51.68
$I_f = 0.7$	speed	1450	1475	1500	1525	1550
	$V_A$	200.9	204.8	209.2	213.5	218
	$V_B$	200.9	204.6	209.5	213.1	217.9
	$V_C$	200.9	204.7	210	213	218.1
	$f$	48.34	49.2	50.02	50.85	51.68
$I_f = 0.8$	speed	1450	1475	1500	1525	1550
	$V_A$	216	220.2	224.9	228.9	233.4
	$V_B$	215.9	220.2	224.2	228.9	233.3
	$V_C$	216.1	220.2	225.4	229.2	233.3
	$f$	48.35	49.19	50.02	50.87	51.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค.2 ตารางผลการทดลองการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้าอิสระ

ในการทดลองนี้ นำค่าที่ได้จากการทดลองการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้าอิสระมาสร้างแผนภูมิบ้าน แล้วนำมาใส่ตามสมการที่ 2-13 เพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่

กำหนดให้	ภาระทางไฟฟ้าแสดงเป็นจำนวนขั้น
	Step 1      หลอดไฟ 2 หลอด
	Step 2      หลอดไฟ 4 หลอด
	Step 3      หลอดไฟ 6 หลอด
	Step 4      หลอดไฟ 8 หลอด
	Step 5      หลอดไฟ 10 หลอด

## ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1

Generator1	$f$	$P_a$ (W)	$P_b$ (W)	$P_c$ (W)	$P_{total}$
no-load	51.07	0.2	0.1	0.2	0.5
step 1	50.84	186.9	190.1	189.9	566.9
step 2	50.58	368.8	376.1	381.4	1126.3
step 3	50.3	552.2	565.2	565.9	1683.3
step 4	50.03	736.5	743.9	750.5	2230.9
step 5	49.7	917.5	931.2	936.7	2785.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัสเครื่องที่ 2

Generator2	$f$	$P_a$ (W)	$P_b$ (W)	$P_c$ (W)	$P_{total}$
no-load	51.08	0.1	0	2.1	2.2
step 1	50.85	187.2	186.0	190.5	563.7
step 2	50.61	371.7	367.8	381.2	1120.7
step 3	50.35	555.3	553.4	565.7	1674.4
step 4	50.08	737.5	731.3	750.3	2219.1
step 5	49.77	921	912.1	935.9	2769.0

### ค.3 ตารางผลการทดลองการจ่ายภาระไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับระบบ ไฟฟ้าอิสระ

ในการทดลองนี้เราทำการปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แล้วนำมาใส่ตามสมการที่ 2-11 เพื่อหาความสัมพันธ์การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และตามสมการที่ 2-12 เพื่อหาความสัมพันธ์การไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขณะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

ปรับกระแสไฟฟ้าสร้างสนามไฟฟ้าที่โรเตอร์				ปรับความเร็วต้นกำลังทางกล			
$I_f = 0.6$	A	B	C	$n_r = 1485$	A	B	C
$V$	220.7	223.2	223.2	$V$	221	222.9	222.4
$I$	1.094	1.188	1.427	$I$	1.237	1.502	1.326
$P$	17.7	-79	-40.7	$P$	-215.3	-234.3	-212.7
$Q$	-240.9	-253.1	-315.8	$Q$	-168.3	-239.3	-204.3
$S$	241.6	265.1	318.4	$S$	273.3	334.9	294.7
$pf$	0.07	0.03	0.13	$pf$	0.79	0.7	0.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_f = 0.7$	A	B	C	$n_r = 1500$	A	B	C
$V$	221.1	223	222.6	$V$	224.5	226.3	227
$I$	0.5	0.627	0.503	$I$	0.973	0.841	1.26
$P$	-51.9	-84.6	-51.7	$P$	85.1	-38.3	25
$Q$	-97.6	-111.3	-99.3	$Q$	-201.1	-196.5	-284.9
$S$	110.6	139.8	111.9	$S$	218.4	190.4	286
$pf$	0.47	0.61	0.46	$pf$	0.39	0.2	0.09
$I_f = 0.8$	A	B	C	$n_r = 1515$	A	B	C
$V$	222.1	222.7	221	$V$	224.7	227.9	227.2
$I$	1.248	1.009	1.392	$I$	1.722	1.499	2.1
$P$	-152.9	-55	-86.5	$P$	314.7	185.2	304.6
$Q$	231.1	217.9	295.1	$Q$	-225.1	-287	-367.8
$S$	277.1	224.7	307.5	$S$	386.9	341.6	477.5
$pf$	0.55	0.24	0.28	$pf$	0.81	0.54	0.64
$I_f = 0.9$	A	B	C	$n_r = 1530$	A	B	C
$V$	224.4	225.5	223.5	$V$	225.3	228.6	227.6
$I$	1.985	1.725	2.15	$I$	3.15	2.94	3.53
$P$	-175.5	-80.1	-96.6	$P$	620.3	513.2	634.8
$Q$	409.4	380.7	470.4	$Q$	-345.6	-433.7	-491.8
$S$	445.5	389	480.2	$S$	710.1	671.9	803
$pf$	0.39	0.21	0.2	$pf$	0.87	0.76	0.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัสเครื่องที่ 2 ขณะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

ปรับกระแสไฟฟ้าสร้างสนามไฟฟ้าที่โรเตอร์				ปรับความเร็วต้นกำลังทางกล			
$I_f = 0.6$	A	B	C	$n_r = 1485$	A	B	C
$V$	225.4	226.7	226.1	$V$	224.4	225.8	225.7
$I$	2.09	2.18	2.15	$I$	1.221	1.35	1.205
$P$	-23.4	-24	-6.9	$P$	-245.3	-246.2	-242.1
$Q$	-470.2	-494.3	-486.9	$Q$	-121.9	-179.8	-123.8
$S$	470.7	494.9	486.9	$S$	273.9	304.9	271.9
$pf$	0.05	0.05	0.01	$pf$	0.9	0.81	0.89
$I_f = 0.7$	A	B	C	$n_r = 1500$	A	B	C
$V$	223.3	225.3	224.2	$V$	224	225.6	224.8
$I$	0.898	1.086	1.032	$I$	0.585	0.731	0.674
$P$	-17.2	-39.1	11.5	$P$	29.9	16	51.3
$Q$	-199.8	-241.6	-231.1	$Q$	-127.6	-164.1	-142.6
$S$	200.5	244.7	231.4	$S$	131	164.9	151.6
$pf$	0.09	0.16	0.05	$pf$	0.23	0.1	0.34
$I_f = 0.8$	A	B	C	$n_r = 1515$	A	B	C
$V$	224	226.2	225.4	$V$	224.4	226.7	225.5
$I$	0.535	0.585	0.406	$I$	1.259	1.229	1.388
$P$	-39.4	-73.7	-18.5	$P$	230	196	239.7
$Q$	113.2	109.8	89.6	$Q$	-163.9	-197.7	-201.3
$S$	119.9	132.3	91.5	$S$	282.5	278.6	313
$pf$	0.33	0.56	0.2	$pf$	0.81	0.7	0.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_f = 0.9$	A	B	C	$n_r = 1530$	A	B	C
$V$	224.3	226.7	225.9	$V$	225.4	227.4	226.1
$I$	1.202	1.104	1.041	$I$	2.84	2.71	2.88
$P$	-16.9	-14.5	-36	$P$	567.5	531.1	557.6
$Q$	269	246.8	235.2	$Q$	-295.1	-312.6	-335.6
$S$	269.5	250.2	235.2	$S$	639.6	616.3	650.8
$pf$	0.06	0.17	0.02	$pf$	0.89	0.86	0.86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 ตารางผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องขนาดเท่ากันขนานกันผ่านแบบจำลองสายส่ง

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสภาวะไร้ภาระไฟฟ้า

			$V$	$I$	$P$	$Q$	$S$	$pf$
สภาวะไร้ภาระไฟฟ้า	ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	A	222.9	0.500	-96.5	55.757	111.450	0.866
		B	227	0.6	-85.1	106.341	136.200	0.625
		C	224.5	0.73	-132	97.130	163.885	0.805
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	A	220.2	0.356	75	22.807	78.391	0.957
		B	222.6	0.135	16.1	25.374	30.051	0.536
		C	221.4	0.438	75.8	60.483	96.973	0.782
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	A	220.7	0.348	30.5	70.488	76.804	0.397
		B	221.6	0.505	79.5	78.760	111.908	0.710
		C	220.1	0.334	64.3	35.633	73.513	0.875
	ภาระไฟฟ้า	A	219.5	0.001	0	0.220	0.220	0.000
		B	222.8	0.051	0	11.363	11.363	0.000
		C	221.5	0.008	0	1.772	1.772	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสภาวะภาวะไฟฟ้าชั้นที่ 1

		$V$	$I$	$P$	$Q$	$S$	$pf$	
สภาวะภาวะไฟฟ้าชั้นที่ 1	ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	A	222.6	0.74	148.8	70.658	164.724	0.903
		B	224.9	0.78	163	64.837	175.422	0.929
		C	224	0.81	165.6	74.143	181.440	0.913
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	A	216.7	0.273	42.6	41.049	59.159	0.720
		B	216.8	0.524	46	103.873	113.603	0.405
		C	217.3	0.329	13.6	70.186	71.492	0.190
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	A	217.4	0.212	18.9	42.035	46.089	0.410
		B	219.7	0.176	6.6	38.100	38.667	0.171
		C	218	0.302	60	27.099	65.836	0.911
	ภาวะไฟฟ้า	A	216	1.074	198.4	120.225	231.984	0.855
		B	217	1.098	203.9	123.270	238.266	0.856
		C	217.3	1.073	199.9	120.021	233.163	0.857

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสถานะภาวะไฟฟ้าชั้นที่ 2

		$V$	$I$	$P$	$Q$	$S$	$pf$	
สถานะภาวะไฟฟ้าชั้นที่ 2	ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	A	222.1	1.55	332.6	88.819	344.255	0.966
		B	224.5	1.6	329.1	143.937	359.200	0.916
		C	223.5	1.63	342.3	124.695	364.305	0.940
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	A	213.3	0.43	41.8	81.640	91.719	0.456
		B	213.8	0.668	44.1	135.839	142.818	0.309
		C	214.1	0.491	-3.3	105.071	105.123	0.031
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	A	214.3	0.353	21.5	72.528	75.648	0.284
		B	216.4	0.155	16.6	29.146	33.542	0.495
		C	214.5	0.335	56.3	44.652	71.858	0.783
	ภาวะไฟฟ้า	A	212.6	2.1	383.3	228.927	446.460	0.859
		B	213.7	2.14	393.2	233.524	457.318	0.860
		C	213.9	2.14	393.2	234.361	457.746	0.859

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค 10 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสถานะการไฟฟ้าชั้นที่ 3

		$V$	$I$	$P$	$Q$	$S$	$pf$	
สถานะการไฟฟ้าชั้นที่ 3	ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	A	222.3	2.68	565	188.970	595.764	0.948
		B	224.7	2.72	579.7	193.633	611.184	0.948
		C	223.7	2.76	587.5	189.846	617.412	0.952
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	A	210.6	0.604	11.4	126.691	127.202	0.090
		B	210.7	0.832	20	174.158	175.302	0.114
		C	211.4	0.711	20.4	148.915	150.305	0.136
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	A	211.4	0.528	0.9	111.616	111.619	0.008
		B	213.2	0.345	-2.6	73.508	73.554	0.035
		C	212	0.449	30.5	90.169	95.188	0.320
	ภาระไฟฟ้า	A	209.7	3.12	564.5	330.758	654.264	0.863
		B	210.6	3.17	577.6	334.770	667.602	0.865
		C	210.7	3.15	575.1	331.307	663.705	0.866

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.11 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสถานะภาวะไฟฟ้าชั้นที่ 4

			$V$	$I$	$P$	$Q$	$S$	$pf$
สถานะภาวะไฟฟ้าชั้นที่ 4	ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	A	222.2	3.23	668.8	260.401	717.706	0.932
		B	224.5	3.27	684.9	264.267	734.115	0.933
		C	223.6	3.33	696.7	262.717	744.588	0.936
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	A	206.9	0.777	46	154.040	160.761	0.286
		B	207.3	1.004	50.9	201.809	208.129	0.245
		C	207.8	0.876	-15.7	181.354	182.033	0.086
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	A	208.1	0.704	31.6	143.054	146.502	0.216
		B	209.8	0.53	28.5	107.480	111.194	0.256
		C	208.6	0.659	60.8	123.291	137.467	0.442
	ภาวะไฟฟ้า	A	206.1	4.09	731.2	419.416	842.949	0.867
		B	207.2	4.13	741.4	427.329	855.736	0.866
		C	207.3	4.14	746.6	423.242	858.222	0.870

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ผลการทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1 ขนานกับเครื่องกำเนิดซิงโครนัสเครื่องที่ 2 และระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งสภาวะภาระไฟฟ้าชั้นที่ 5

		$V$	$I$	$P$	$Q$	$S$	$pf$	
สภาวะภาระไฟฟ้าชั้นที่ 5	ระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่	A	222	3.93	802.1	343.252	872.460	0.919
		B	224.4	3.96	816.8	349.986	888.624	0.919
		C	223.5	4.02	830.5	342.809	898.470	0.924
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 1	A	203.6	0.959	56.7	186.838	195.252	0.290
		B	203.8	1.16	67	226.715	236.408	0.283
		C	204.6	1.047	-36.3	211.118	214.216	0.169
	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเครื่องที่ 2	A	204.6	0.884	51	173.527	180.866	0.282
		B	206.3	0.75	48.9	146.794	154.725	0.316
		C	205.3	0.852	73.8	158.584	174.916	0.422
	ภาระไฟฟ้า	A	202.6	5.05	891.2	502.551	1023.130	0.871
		B	203.3	5.09	901.6	507.860	1034.797	0.871
		C	203.4	5.1	904.7	507.535	1037.340	0.872

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส

### Design of Power Flow Experiment by Controlling of Synchronous Generators

ฐิติกานต์ ตากระโทก ธนภรณ์ ศรีสุข นภัตสร แสนชัย และ บุศยาภรณ์ เอมเสมอ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบชุดทดลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อศึกษาการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ภาระไฟฟ้าและให้มีความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าน้อยที่สุดชุดทดลองประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสองเครื่องขนาดเท่ากัน (8.1 kVA) มีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเป็นต้นกำลังทางกลซึ่งจะถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ ในการทดลองจะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองตัวกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ (MEA) ผ่านแบบจำลองสายส่งไฟฟ้าแบบระยะสั้น ในการทดลองจะศึกษาการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า และการประมาณค่าที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจำลองมีค่าน้อยที่สุดได้โดยใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม โดยเลือก  $\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$  เป็นตัวแปรต้น และ  $\delta_3, P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, V_1, V_2, V_3$  เป็นตัวแปรตามผลการทดลองได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 11.87 W เมื่อ  $\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$  มีค่า - 0.016, - 1.59, 278.51W, 433.36W, 127.25 Var, 99.74Var.

คำสำคัญ : แผนภาพบ้าน, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส, การไหลของกำลังไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้าสูญเสีย, ฟังก์ชันเป้าหมาย

#### Abstract

This project shows power flow experiment by controlling of synchronous generators. The main objective is to minimize power losses in transmission lines. This experiment consists of two same size synchronous generators (8.1 kVA) connect with MEA system by short model transmission line. The generators are driven by three-phase induction motors which control by inverter. In the experiment, students can learn how to operate synchronous generator, operate inverter, parallel generators, control real and reactive power, power flow, and optimization. Genetic Algorithms is chosen for determine optimum variables in order to

minimize power losses in transmission lines

$\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$  are selected to be variable and  $\delta_3, P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, V_1, V_2, V_3$  are parameters in optimization process. The result shows total loss is 11.87 W where  $\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$  are - 0.016, - 1.59, 278.51W, 433.36W, 127.25Var, 99.74Var.

#### 1. บทนำ

การศึกษการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องทราบลักษณะการส่งจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยศึกษาจากแผนภาพบ้านจากการจ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ และวิธีควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ หลังจากได้ลักษณะและวิธีควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนจึงออกแบบชุดการทดลองนี้เพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่องขนาดเท่ากันขนานกันและขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ผ่านแบบจำลองสายส่งและศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจำลองมีค่าน้อยที่สุดได้โดยใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม

#### 2 การทดลอง

##### 2.1 ทฤษฎี

ในการหาความสัมพันธ์ต่างๆจากการจ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระเพื่อหาแผนภาพบ้านจากการทดลองนี้ ได้อ้างอิงจากสมการที่ (1) เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ที่เกิดขึ้น [1]

$$P_c = S_p (f_{nl} - f_{sys}) \quad (1)$$

หลังจากหาความสัมพันธ์จากการจ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระ ต้องศึกษาการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อให้เข้าใจหลักการในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าต้องมีครบทั้ง 4 เงื่อนไข ดังต่อไปนี้ ลำดับเฟสของระบบไฟฟ้าต้องเหมือนกัน ความถี่ของระบบไฟฟ้า

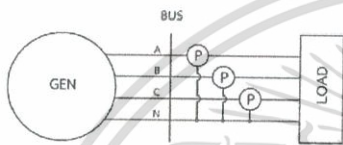
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องเท่ากัน ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต้องเท่ากันและไม่มีผลต่างมุมของแรงดันไฟฟ้า (In phase)

ในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) โดยใช้วิธีซินติคัลกอริธึมประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ฟังก์ชันเป้าหมาย(Objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข(Constraint function)

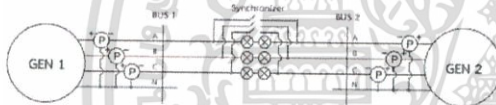
2.2 การทดลอง

ในการทดลองควบคุมการทำงานเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จะศึกษาผลของความเร็วและกระตุ้นที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ในการทดลองหาแผนภาพบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระตามวงจรรูปที่ 1 เพื่อนำมาวิเคราะห์การจ่ายภาระไฟฟ้าของแต่ละเครื่องกำเนิดซิงโครนัส



รูปที่ 1 วงจรไฟฟ้าการทดลองหาแผนภาพบ้าน

ในการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง เพื่อศึกษาเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อในการขนานและพฤติกรรมของโหลดไฟฟ้าที่ต่อแบบ three dark



รูปที่ 2 วงจรไฟฟ้าการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2 เครื่อง

ในการทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ขนานกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ตามวงจรดังรูปที่ 2 เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า โดยจะควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลและกระตุ้น



รูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

จากการศึกษาการทดลองข้างต้นจะนำมาใช้ในการทดลองจ่ายภาระไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้า 3 บัสเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้า

จากการทดลองที่ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าทำให้รู้ว่ามีกำลังสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบ จึงต้องการทดลองหาตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อยที่สุด

โดยใช้วิธีซินติคัลกอริธึม ซึ่งมีสมการที่ (2), (3) เป็นฟังก์ชันเป้าหมาย และมีสมการที่ (4) - (10) [2]

$$f(x) = \sum_{k=1}^{N-1} |I_{kn}|^2 R_{kn} \quad ; n \neq k \tag{2}$$

$$I_{kn} = \frac{V_k \angle \delta_k - V_n \angle \delta_n}{R_{kn} + jX_{kn}} \quad ; n \neq k \tag{3}$$

$$P_{Gn} - P_{Dn} - \sum_{m=1}^{N_n} |V_n| |V_m| |Y_{n,m}| \cos(\delta_n - \delta_m - \theta_{n,m}) = 0 \tag{4}$$

$$P_{Gk} = \text{Re} \left\{ V_k \angle \delta_k \left( \sum_{n=1}^{N-1} I_{kn} \right)^* \right\} \quad ; n \neq k \tag{5}$$

$$Q_{Gn} - Q_{Dn} - \sum_{j=1}^{N_n} |V_n| |V_m| |Y_{n,m}| \sin(\delta_n - \delta_m - \theta_{n,m}) = 0 \tag{6}$$

$$Q_{Gk} = \text{Im} \left\{ V_k \angle \delta_k \left( \sum_{n=1}^{N-1} I_{kn} \right)^* \right\} \quad ; n \neq k \tag{7}$$

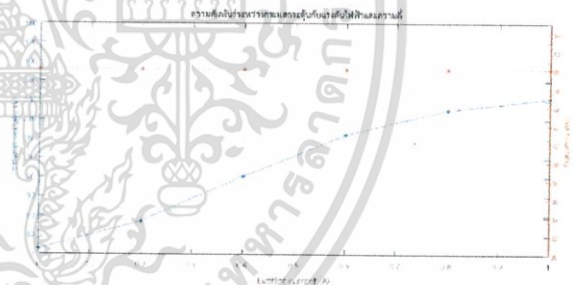
$$V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max} \tag{8}$$

$$P_{Gn}^{\min} \leq P_{Gn} \leq P_{Gn}^{\max} \tag{9}$$

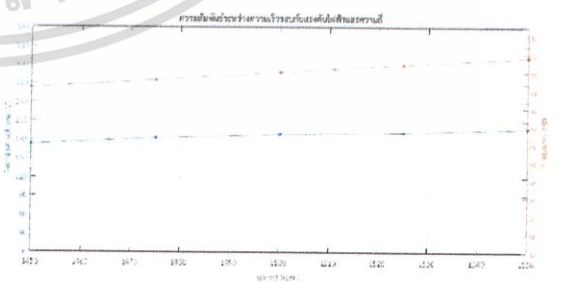
$$Q_{Gn}^{\min} \leq Q_{Gn} \leq Q_{Gn}^{\max} \tag{10}$$

2.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองปรับความเร็วรอบให้คงที่แล้วเพิ่มกระแสกระตุ้นพบว่าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะคงที่ แต่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น และถ้าปรับกระแสกระตุ้นให้คงที่แล้วปรับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะพบว่าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับความถี่และความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที

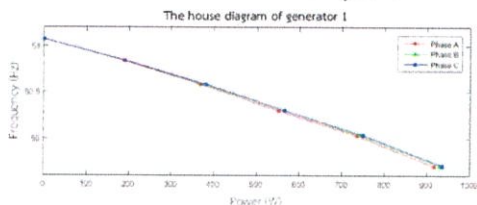


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่กระแสกระตุ้น 0.6 แอมแปร์

แผนภูมิบ้านที่ได้จากการทดลองการจ่ายภาระไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าอิสระนั้นได้ผลว่า เมื่อเครื่องกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าเชิงโรตอร์สจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าลดลงตามดังรูปที่ 6



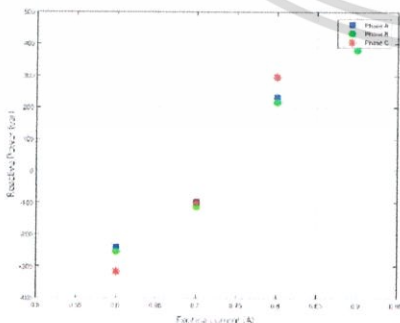
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สเครื่องที่ 1

ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2 มีแนวโน้มเหมือนกัน

และเมื่อนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ขึ้นพบว่าแรงดันที่ขั้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงและความถี่ของระบบไม่เปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกันทำให้ทราบถึงผลของตัวแปรที่มีผลในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยกำลังไฟฟ้าจริงนั้นถูกควบคุมด้วยแรงบิดของต้นกำลังทางกล และการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นถูกควบคุมโดยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ส



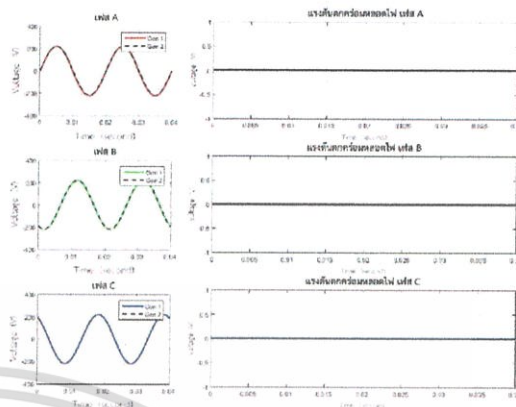
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สเครื่องที่ 1



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกระตุ้นกับกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สเครื่องที่ 1

การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ส 2 เครื่องขนานกันนั้นจะต้องมีเงื่อนไขที่ตรงกัน

4 เงื่อนไขได้แก่ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ความถี่ ลำดับเฟสและรูปคลื่นไซน์ทับกัน (In Phase)



รูปที่ 9 กราฟพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ทั้ง 2 เครื่องเมื่อมีเงื่อนไขตรงกัน 4 เงื่อนไข

จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 เทียบกับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของเครื่องที่ 2 รูปคลื่นไซน์ทั้งสองทับเส้นกันและกัน (in phase) ส่งผลให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมหลอดไฟ ดังนั้นในแผงขนานเราจะสังเกตเห็นหลอดไฟที่ต่อแบบ Three - dark ดับทั้งหมด

จากการทดลองจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดได้ดังนี้

Objective  $f(x) = |I_{12}|^2 R_{12} + |I_{23}|^2 R_{23} + |I_{13}|^2 R_{13}$

Nonlinear constraint :

$$P_{Gk} - P_{Dk} - \sum_{n=1}^{N_g} |V_k| |V_n| |Y_{k,n}| \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) = 0$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} - \sum_{n=1}^{N_g} |V_k| |V_n| |Y_{k,n}| \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) = 0$$

Variable  $\delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$

Constant  $R_{12}, X_{12}, R_{23}, X_{23}, R_{13}, X_{13}$

Parameter  $\delta_3, P_{D1}, P_{D2}, P_{D3}, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, V_1, V_2, V_3$

จากข้างต้นเป็นสมการที่นำมาใช้ในการหาคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการสุ่มค่าที่ดีจากเจเนติกอัลกอริทึมซึ่งมีจำนวนรอบการคำนวณ 60 รอบ มาใส่ในฟังก์ชันเป้าหมายจะได้ค่าที่ดีที่สุด(น้อยที่สุด) เท่ากับ 11.708 วัตต์ โดยที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.8569 วัตต์

### 3.สรุป

จากการทดลองปรับความเร็วรอบให้คงที่แล้วเพิ่มกระแสกระตุ้นพบว่าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะคงที่ แต่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น และถ้าปรับกระแสกระตุ้นให้คงที่แล้วปรับความเร็วรอบโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะพบว่าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองเพื่อหาแผนภูมิบ้านของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้าอิสระเพื่อวิเคราะห์การจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้า จะเห็นว่าเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงความเร็วของโรเตอร์ลดลง สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์โดยการเพิ่มกำลังทางกล

จากการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสองเครื่องนั้นจำเป็นต้องมีเงื่อนไขที่ตรงกัน 4 เงื่อนไขได้แก่ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ความถี่ ลำดับเฟส และรูปคลื่นไซน์ทับกัน (In Phase) จึงจะสามารถขนานกันได้

จากการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่แล้วควบคุมกระแสกระตุ้นและความเร็วต้นกำลังทางกลพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของต้นกำลังทางกลจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงมากขึ้น และเมื่อเพิ่มกระแสกระตุ้นจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่ระบบมากขึ้น

จากการทดลองการใช้เจนไดคัลอัลกอริธึมในการแก้สมการเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันนั้นๆจะมีค่าถูกต้องมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันเป้าหมาย ฟังก์ชันเงื่อนไข ขอบเขตของคำตอบ จำนวนรอบการคำนวณ และจำนวนประชากรในแต่ละรอบการคำนวณ เจนไดคัลอัลกอริธึมยังสามารถประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังได้เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีความเสถียรสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย ซึ่งหมายความว่าระบบไฟฟ้ากำลังจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

### 4.ข้อเสนอแนะ




ในการวัดผลการทดลอง เนื่องจากการบันทึกผลการทดลองมีเวลาที่แตกต่างกัน ทำให้การเก็บค่าผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนได้เนื่องจากในสายส่งมีการส่งกำลังไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลาซึ่งในการทดลองนี้ จะต้องใช้พาวเวอร์มิเตอร์จำนวนทั้งหมด 9 เครื่อง และเครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า จำนวน 1 เครื่อง ซึ่งมีผลต่อการเก็บค่าเป็นอย่างมาก

มอเตอร์ที่ใช้เป็นต้นกำลังทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการทดลองเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีพิกัดต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดอ้างอิง

[1] Stephen J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 5<sup>th</sup> Edition, Singapore, McGraw-Hill Companies, Inc., 2012

[2] William D. Stevenson, Jr., *Elements of power system analysis*, 4<sup>th</sup> Edition, Singapore, McGraw-Hill Companies, Inc., 1982

### ประวัติผู้เขียนบทความ

	นายรัฐติگانต์ ตากกระโทก 56010335 เกิดวันที่ 25 มกราคม 2538 โทรศัพท์ 084-588-6848 E-mail: kantitikan01@gmail.com งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า
	นางสาวธนภรณ์ ศรีสุข 56010535 เกิดวันที่ 13 มีนาคม 2538 โทรศัพท์ 097-008-9640 E-mail: tnp.srisuk@hotmail.com งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า
	นางสาวนภัสสร แสนชัย 56010647 เกิดวันที่ 19 กันยายน 2537 โทรศัพท์ 081-975-7990 E-mail: nps.noonn@gmail.com งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า
	นางสาวบุษยภรณ์ เอ็มเสม 56010700 เกิดวันที่ 19 เมษายน 2538 โทรศัพท์ 087-694-1568 E-mail: busayaporn.i@gmail.com งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายฐิติกานต์ ตากกระโทก  
56010335 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า  
เกิดวันที่ 25 มกราคม 2538  
โทรศัพท์ 084-588-6848  
E-mail: kantitikan01@gmail.com  
งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า



นางสาวธนภรณ์ ศรีสุข  
56010535 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า  
เกิดวันที่ 13 มีนาคม 2538  
โทรศัพท์ 097-008-9640  
E-mail: tnp.srisuk@hotmail.com  
งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า



นางสาวนภัสสร แสนชัย  
56010647 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า  
เกิดวันที่ 19 กันยายน 2537  
โทรศัพท์ 081-975-7990  
E-mail: nps.noonn@gmail.com  
งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า



นางสาวบุศยาภรณ์ เอ็มเสม  
56010700 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า  
เกิดวันที่ 19 เมษายน 2538  
โทรศัพท์ 087-694-1568  
E-mail: busayaporn.i@gmail.com  
งานวิจัยที่สนใจ เครื่องจักรกลไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้