

การจัดเตรียมการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอน
ในวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Experimental Setup of the Synchronous Generators for Supporting
the Electrical Machine Course



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาปีการศึกษา 2563 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Experimental Setup of the Synchronous Generators for Supporting
the Electrical Machine Course



THIS PROJECT SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR'S DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อี: KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2020 ที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การจัดเตรียมการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอน
ในวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Experimental Setup of the Synchronous Generators for Supporting
the Electrical Machine Course



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ผัด.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจัดเตรียมการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอน
ในวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ผู้จัดทำ



1. นายภัทรกรวรรณสินท

2. นายภาณุเดช

3. นายภาณุพงศ์

โพธิ์ดี

ตริ้มมงคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**การจัดเตรียมการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอน
ในวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า**

นายภัทรกร	วรรณสิน
นายภาณุเดช	โพธิ์ดี
นายภาณุพงศ์	ตรีมงคล
ปีการศึกษา 2563	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Plexim ซึ่งมีการทดสอบเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและนำมาใช้ในโมเดลจำลอง โดยในการจำลองดังกล่าว ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสถูกต่อเข้ากับวงจรลดทอนแรงดัน ซึ่งการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า สัญญาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและของระบบต้องเท่ากันทุกประการ ดังนั้นปริญญานิพนธ์เล่มนี้จึงใช้วิธีการทำเฟสล๊อคคลุปเพื่อการประมาณแอมพลิจูดของแรงดันระบบ และใช้การวิธีการแปลงแกนสำหรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งวงจรลดทอนแรงดันใช้สำหรับการควบคุมขนาดของแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่แกน q ของแอมพลิจูดดังกล่าวถูกใช้เพื่อควบคุมมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยวิธีการและผลของการศึกษาครั้งนี้จะสำหรับการติดตั้งการชุดทดลองเพื่อการสอนของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คำสำคัญ การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริด เฟสล๊อคคลุป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Experimental Setup of the Synchronous Generators for Supporting the Electrical Machine Course

Mr. PATTARAKORN WANNASANIT

Mr. PANUDECH PODEE

Mr. PANUPONG TRIMONGKOL

Asst.Prof.Dr. Warachart Suwan-ngam Advisor

Academic year 2020

Abstract

This thesis presents the computer simulation of grid synchronization of a synchronous generator using Plexim software. Several tests are performed to estimate the parameters of the synchronous generator. The parameters are then placed in the synchronous generator model. In the simulation, the synchronous generator field winding is connected to the dc-dc buck converter. To achieve grid synchronization, the voltage vectors of both grid and armature must be the same. Therefore, in this thesis, the three-phase phase locked loop is applied to estimate the grid voltage vector, and the axis transformation is applied to the armature voltage. The buck converter is used to control the amplitude of the armature voltage vector while the q-axis voltage is applied to control the phase angle of the synchronous generator. The algorithm and the results will then be applied to setup the laboratory for teaching in the Department of Electrical Engineering.

Keyword

Grid synchronization, Phase Locked loop, Synchronous generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณหลายท่านจึงทำให้ประสบผลสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัยและการจัดทำ ปริญญานิพนธ์ ช่วยควบคุมการดำเนินการและช่วยแก้ไขให้ถูกต้องจนสำเร็จเรียบร้อย รวมทั้งอำนวยความสะดวกการขอใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทำวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้บริการยืมอุปกรณ์ เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือตลอดการทำวิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษา การเงิน และเป็นกำลังใจตลอดมา และผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมถึงเพื่อนๆ ที่ทำงานร่วมกันและพี่ ๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้	5
บทที่ 2	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	6
บทที่ 3	30
การออกแบบโครงการ	30
3.1 บทนำ	30
3.2 การทดสอบและคำนวณค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส	30
3.3 การจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์	53
4.2 ผลการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์	65
4.3 รูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง	69
4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	76
บทที่ 5	77
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการทดลอง	77
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	78
5.3 ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก ก	81
ภาคผนวก ข.	87
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	87
ภาคผนวก ค.	91
ประวัติผู้เขียน	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

ภาพที่ 1-1	วงจรการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของภาควิศวกรรมไฟฟ้าปัจจุบัน	2
ภาพที่ 2-1	ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	7
ภาพที่ 2-2	ภาพถ่ายการพันขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	8
ภาพที่ 2-3	ลักษณะการพันขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า	8
ภาพที่ 2-4	ภาพถ่ายลักษณะโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	9
ภาพที่ 2-5	ภาพแสดงผลของกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	11
ภาพที่ 2-6	วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยพิจารณาเป็นค่าต่อเฟส	13
ภาพที่ 2-7	ภาพลำดับของการเปลี่ยนแปลงกำลังทางกลเป็นกำลังทางไฟฟ้า โดยมีกำลังสูญเสียเกิดระหว่างการแปลงกำลัง	14
ภาพที่ 2-8	แผนภาพเฟสเซอร์แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	16
ภาพที่ 2-9	วิธีการโหลดไฟ 3 เฟส เพื่อช่วยในการตรวจสอบลำดับเฟสและความแตกต่างของ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่	19
ภาพที่ 2-10	ซิงโครสโคปที่ใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของมุมเฟสของแรงดัน จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันของระบบที่จะทำการต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	20
ภาพที่ 2-11	ผลของความเร็วและความถี่ต่อกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับระบบไฟฟ้า	22
ภาพที่ 2-12	ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือน ของระบบไฟฟ้า	23
ภาพที่ 2-13	Housing Diagram แสดงความสัมพันธ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัว ที่อยู่ขนานเข้าด้วยกันในระบบไฟฟ้าใด ๆ	25
ภาพที่ 2-14	ผลกระทบของการเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ส่งผลต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวในระบบไฟฟ้าที่มีการขนาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าด้วยกัน	26
ภาพที่ 2-15	ผลกระทบของการเพิ่มการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ส่งผลต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวในระบบไฟฟ้าที่มีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าด้วยกัน	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภาพที่ 2-16 ภาพผลกระทบของการควบคุมความเร็วและกระแสกระตุ้นที่มีผล
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาพที่ 3-1	ภาพวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	32
ภาพที่ 3-2	ไดอะแกรมการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	33
ภาพที่ 3-3	ไดอะแกรมการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	34
ภาพที่ 3-4	ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn Ratio)	35
ภาพที่ 3-5	ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของวงจรเปิด	36
ภาพที่ 3-6	ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของวงจรปิด	36
ภาพที่ 3-7	กราฟคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและขณะลัดวงจร	37
ภาพที่ 3-8	ไดอะแกรมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส	45
ภาพที่ 3-9	บล็อกดีสัญญาณวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	46
ภาพที่ 3-10	การควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control)	46
ภาพที่ 3-11	แบบจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลอง	47
ภาพที่ 3-12	การแปลงสัญญาณที่วัดได้ในกรอบอ้างอิงสามเฟสไปยังกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง เทียบกับสเตเตอร์โดยใช้การจำลองผ่านคอมพิวเตอร์	48
ภาพที่ 3-13	การแปลงสัญญาณจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิง แรงดันกริดโดยใช้การจำลองผ่านคอมพิวเตอร์	49
ภาพที่ 3-14	แบบจำลองการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีเฟสล็อกคลูป เพื่อหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง เทียบระบบไฟฟ้า	50
ภาพที่ 3-15	แบบจำลองการหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วยโดยวิธีการเฟสล็อกคลูป เพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ ไปยังกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบระบบไฟฟ้า	50
ภาพที่ 3-16	การจำลองวงจรการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายที่ขดลวดสนาม โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	51
ภาพที่ 3-17	แบบจำลองการควบคุมความต่างเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิด	52
ภาพที่ 4-1	กราฟแสดงความความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ ขดลวดอาร์มาเจอร์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, or cite the document when use.

ภาพที่ 4-4 กราฟผลการทดสอบขณะลัดวงจร (Short circuit test)	59
ภาพที่ 4-5 กราฟคุณลักษณะขณะเปิดวงจรและลัดวงจร	60
ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนามและมุมต่าง ๆ	63
ภาพที่ 4-7 ผลการจำลองแสดงรูปคลื่นแรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก่อนการขนานของเฟส A B และ C ตามลำดับ	66
ภาพที่ 4-8 ผลการจำลองแสดงรูปคลื่นแรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ขณะทำการขนานเฟส A B และ C ตามลำดับ	66
ภาพที่ 4-9 ผลการจำลองแสดงรูปคลื่นแรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์หลังจากทำการขนานเรียบร้อย เฟส A B และ C ตามลำดับ	67
ภาพที่ 4-10 สัญญาณเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	68
ภาพที่ 4-11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอร์	69
ภาพที่ 4-12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอร์	70
ภาพที่ 4-13 สัญญาณกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอร์	70
ภาพที่ 4-14 สัญญาณเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด	71
ภาพที่ 4- 15 สัญญาณขนาดของเวกเตอร์แรงดันกริดที่ทำการประมาณโดยใช้เฟสล็คคลูป	72
ภาพที่ 4-16 สัญญาณขนาดของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการประมาณโดยใช้เฟสล็คคลูป	72
ภาพที่ 4-17 สัญญาณของความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าในหน่วยต่อหน่วยของเวกเตอร์แรงดันระบบไฟฟ้าทำการประมาณโดยใช้เฟสล็คคลูป	73
ภาพที่ 4-18 สัญญาณของความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าในหน่วยต่อหน่วยของเวกเตอร์แรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการประมาณโดยใช้เฟสล็คคลูป	73
ภาพที่ 4-19 สัญญาณเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (Unit_Vector_G)	74
ภาพที่ 4-20 สัญญาณเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของเวกเตอร์แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันสเตเตอร์(Unit_Vector_S)	74
ภาพที่ 4-21 สัญญาณของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด	75
ภาพที่ 4-22 สัญญาณของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	แผนการดำเนินโครงการ	4
ตารางที่ 3.1	สรุปพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	44
ตารางที่ 4.1	ผลจากการทดสอบ VI-Method ที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	53
ตารางที่ 4.2	ผลจากการทดสอบ VI-Method ที่ขดลวดสนาม	55
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบขณะเปิดวงจร (Open circuit test)	57
ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบขณะปิดวงจร (Short circuit test)	58
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบหาค่าแรงดันที่ขดลวดสนามหลังจากหมุนตำแหน่ง ของโรเตอร์ไปที่มุมต่าง ๆ	61
ตารางที่ 4.6	อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้า ที่ขดลวดสนามที่มุมต่าง ๆ	62
ตารางที่ 4.7	สรุปพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	64
ตารางที่ ข.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	88
ตารางที่ ค.1	พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	92
ตารางที่ ค.2	ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจาก Datasheet	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

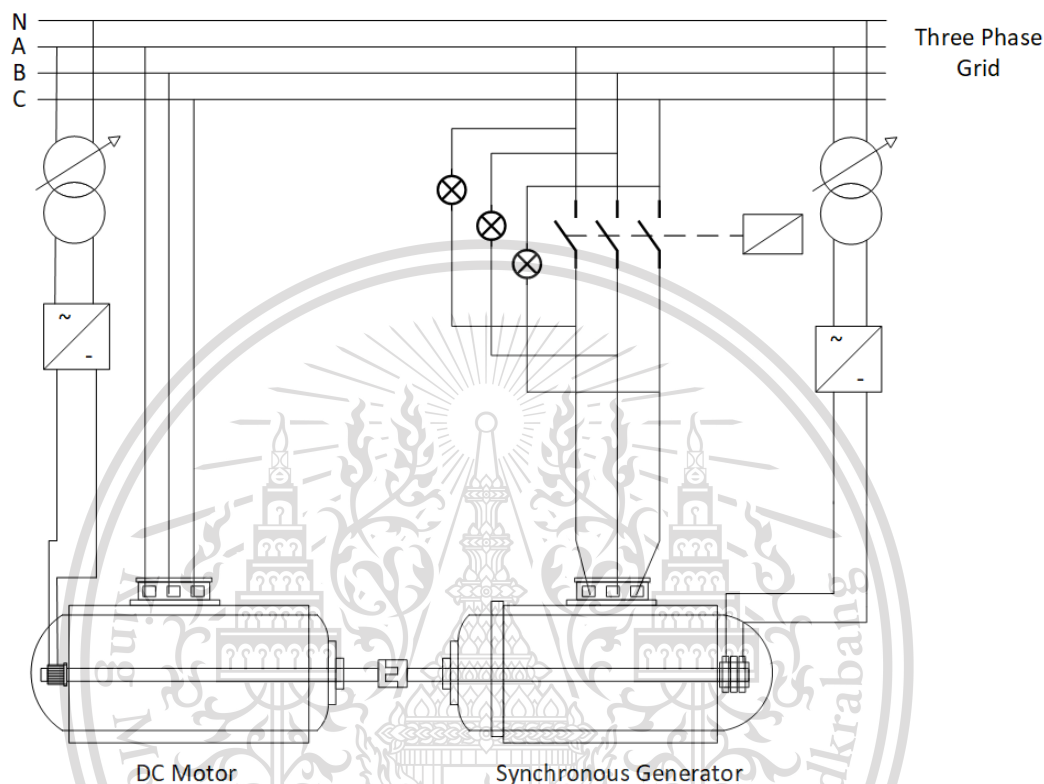
ปัจจุบันการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส จะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่การทำการทดสอบภายใต้สภาวะไร้โหลด ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสภายใต้สภาวะที่มีภาระทางไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ที่ถูกใช้เป็นตัวกำลังขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสนั้นดังแสดงในภาพที่ 1 โดยชุดเครื่องจักรกลไฟฟ้าอยู่ในสภาพที่เก่า และไม่ได้รับและไม่สามารถตอบสนองความต้องการในการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนสู่ระบบได้อย่างที่ควร นอกจากนี้การควบคุมความเร็วรอบยังเป็นไปด้วยความลำบาก ทำให้การทำการทดสอบในหัวข้ออื่น ๆ นอกเหนือจากที่ทำอยู่ในปัจจุบันถูกจำกัดด้วยสภาพของชุดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

โดยในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ปัจจุบันได้มีการเรียนการสอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส โดยใช้วิธีขนานแบบหลอดไฟ 3 ดวงดับ โดยจะมีการใช้หม้อแปลงชนิดปรับค่าได้ในการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส และมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวกำลังทางกลและทำการประกบเพลากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส และปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการปรับความเร็วของตัวกำลังทางกล ซึ่งปรับจากการปรับความดันทานของขดลวดสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จะต้องมีลำดับเฟส แรงดัน และความถี่ของทั้งสองเครื่องจะต้องตรงกัน ซึ่งการดำเนินการเป็นไปได้อย่างยากลำบาก เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีอายุการใช้งานที่มากจากการใช้งานที่ยาวนาน ดังภาพที่ 1 ที่แสดงให้เห็นด้านล่าง

ดังนั้น เพื่อให้การศึกษาเรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสและการขนานเครื่องจักรกลไฟฟ้าในการทดลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มีประสิทธิภาพและให้เท่าทันการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทางผู้จัดทำโครงการวิจัยจึงได้มีการศึกษาการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีการใช้งานอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์มาช่วยในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และได้มีการพัฒนาการเรียนรู้อย่างก้าวไกลให้มีความทันสมัยและเพื่อให้นักศึกษาได้เข้าใจถึงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทางผู้จัดทำโครงการวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดเตรียมการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยมีการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสสองชุดมาต่อขนานกับกริดและต่อขนานกันเองเพื่อทำการจ่ายโหลดและศึกษาพฤติกรรมของ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งรายละเอียดจะมีการกล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป โดยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิจัยดังกล่าวจะมีประโยชน์แก่ภาควิชาและทำให้นักศึกษาที่ได้ศึกษาการทดลองนี้ได้รับความรู้เรื่องการขนานและพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นอย่างดี



ภาพที่ 1-1 วงจรการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของภาควิศวกรรมไฟฟ้าปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อจัดเตรียมชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนในวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าผ่านการจำลองทางคอมพิวเตอร์
3. เพื่อศึกษาการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็น
4. เพื่อศึกษาการควบคุมค่ากระแสสนามสำหรับการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขนานเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ผ่านการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ได้ทำการทดสอบ และศึกษาการควบคุมความต่างมุมเฟสโดยวิธีการเฟสล็อกคัลบ และค่ากระแสสนามโดยวิธีการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ ซึ่งใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นหลัก โดยที่การจำลองทางคอมพิวเตอร์ทั้งหมดจะใช้โปรแกรม Plexim ในการจำลอง

1.4 วิธีการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาและจัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการทั้งในด้านทฤษฎีและวัสดุ อุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการทำวิจัย
2. จัดหาและศึกษาวิธีการใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย
3. ทำการทดสอบเพื่อศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส
4. ศึกษาการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ
5. ทำการจำลองการควบคุมกระแสสนามและความต่างมุมเฟสสำหรับการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส
6. ทดสอบต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า
7. แก้ไขปัญหาและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
8. สรุปผลการทดลอง
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ 9 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2563 ถึง เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2564

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ (โดยให้  คือระยะเวลาที่ใช้ดำเนินการ)

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. จัดเตรียมอุปกรณ์และศึกษาวิธีการใช้งานของอุปกรณ์										
3. ทำการทดสอบเพื่อศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์										
4. ศึกษาการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัส										
5. ทำการจำลองการควบคุมกระแสด้านและความต่างมุมเฟส										
6. ทดสอบต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า										
7. แก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น										
8. สรุปผลการทำโครงการ										
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนอ										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้

1. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส
2. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในหลักการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส
3. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในหลักการควบคุมค่ากระแสสนามสำหรับการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส
4. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในหลักการควบคุมความต่างมุมเฟสระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าที่จะทำการขนาน
5. โครงการวิจัยนี้เป็นการนำองค์ความรู้ในวิชาต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้เข้าด้วยกันให้เกิดประโยชน์ เช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การเขียนโปรแกรมควบคุม เป็นต้น
6. โครงการวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสให้กับนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าต่อไปในภายภาคหน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส และการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับกริด รวมทั้งการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวที่มีลักษณะใกล้เคียงกันเข้าด้วยกัน

2.2 ทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีความเร็วรอบในสภาวะคงตัวที่คงที่ ซึ่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศ ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจึงถูกใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลัก โดยการใช้ตัวต้นกำลังที่มาช่วยหมุนโรเตอร์เป็นกังหันที่อาศัยพลังงานจากแหล่งพลังงาน เช่น เชื้อเพลิง ใช้น้ำ แก๊ส มาช่วยในการผลิตกระแสไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจัดเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการกระตุ้นสองทาง โดยขดลวดที่โรเตอร์จะมีการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง และขดลวดที่สเตเตอร์จะมีการเชื่อมต่อกับกริด ดังนั้นฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศจะเป็นผลรวมของการกระตุ้นทั้งจากขดลวดที่โรเตอร์และขดลวดที่สเตเตอร์

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส การสร้างกระแสไฟฟ้าที่ป้อนไปยังกริดจะมีการกระตุ้นเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กโดยการป้อนกระแสกระตุ้นไปยังขดลวดสนามที่พันอยู่ที่โรเตอร์ เมื่อมีการหมุนของโรเตอร์ทำให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดอาร์มาเจอร์ที่อยู่บนสเตเตอร์ เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ตามกฎของเลนซ์ แล้วเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าป้อนไปยังกริด

ในมอเตอร์ซิงโครนัส จะมีการใช้งานในประเภทงานที่ต้องการความเร็วคงที่ ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ซิงโครนัสขนาดเล็กมีการใช้งานในนาฬิกาไฟฟ้า ตัวนับเวลา ตัวบันทึกที่สามารถนับรอบได้ แต่การใช้งานมอเตอร์ซิงโครนัสต้องมีตัวขับที่ทำให้ความเร็วรอบคงที่เสมอ ดังนั้นในอุตสาหกรรมจึงไม่นิยมใช้งานเท่ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่ต้องมีการรักษาความเร็วให้คงที่ ข้อสำคัญของมอเตอร์ซิงโครนัสคือสามารถดึงกระแสแอกทีฟได้ทั้งแบบนำหน้าหรือล่าหลัง เพราะสามารถควบคุมการกระตุ้นที่ขดลวดที่โรเตอร์ได้ ต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการกระตุ้นเพียงแค่ทางเดียว ทำให้มอเตอร์ซิงโครนัสสามารถควบคุมการดึงหรือจ่ายกำลังเสมือนได้ เมื่อทำงานที่

สภาวะไร้โหลด โดยที่เรียกการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสที่ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบนี้ว่าซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

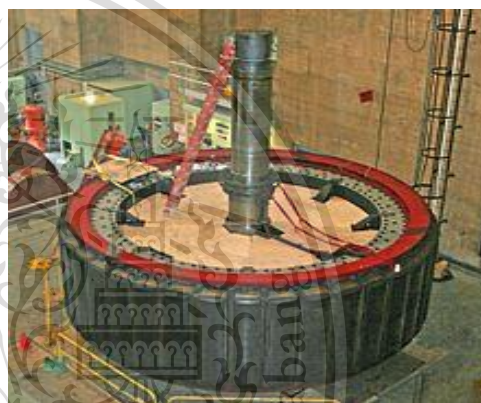
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสประกอบด้วยส่วนของสเตเตอร์ที่มีขดลวดอาร์มาเจอร์พันอยู่ และส่วนของโรเตอร์ที่มีขดลวดสนามพันอยู่ ขดลวดทั้งสองจะมีหน้าที่ที่แตกต่างกัน โดยขดลวดสนามทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปซึ่งเรียกว่า กระแสกระตุ้น (Exciting current) โดยอาศัยแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ช่วยในการป้อนกระแสไฟฟ้าไปที่ขดลวดขณะที่โรเตอร์หมุน ส่วนขดลวดอาร์มาเจอร์ทำหน้าที่แปลงพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งขดลวดอาร์มาเจอร์จะมีการพันที่มีมุมต่างกัน 120 องศา เพื่อให้กระแสที่ออกมาจากขดลวดเป็นกระแสไฟฟ้าที่มีมุมเฟสต่างกัน 120 องศาตามลักษณะการวางขดลวด



(a)



(b)

ภาพที่ 2-1 ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(a) ภาพถ่ายสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขดลวดอาร์มาเจอร์พันอยู่ที่ร่องสลิตของสเตเตอร์ [10]

(b) ภาพถ่ายโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขดลวดสนามพันอยู่ที่ร่องสลิตของโรเตอร์ [11]

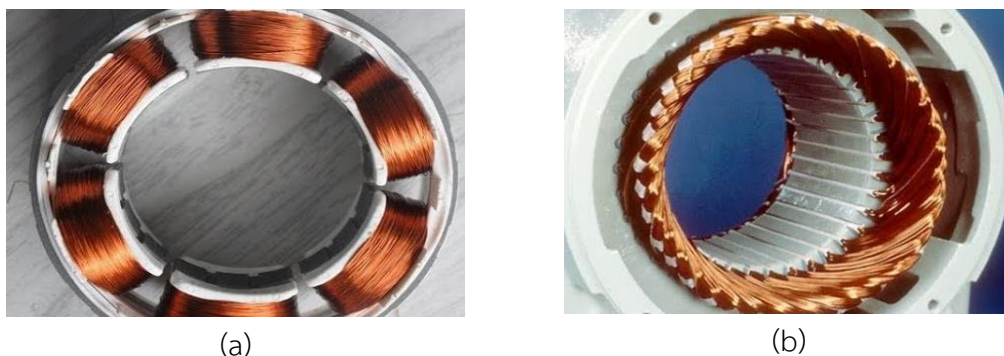
ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส ปกติแล้วจะมีการพันสองแบบได้แก่ การพันแบบกระจายตัว (Distributed winding) และการพันแบบกระจุกตัว (Concentrated winding) การพันขดลวดที่แตกต่างกันจะทำให้มีค่าตัวคูณของการพันขดลวดขึ้นมาสองค่า ได้แก่ ค่าตัวคูณการกระจาย (Distribution factor) และค่าตัวคูณพิทช์ (Pitch factor) ซึ่งจะมีผลต่อค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนขดลวดอาร์มาเจอร์

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในอุตสาหกรรมจะนิยมการพันแบบกระจายตัวมากกว่าแบบกระจุกตัว เนื่องจากการใช้งานพื้นที่ร่องสลิตของสเตเตอร์ที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

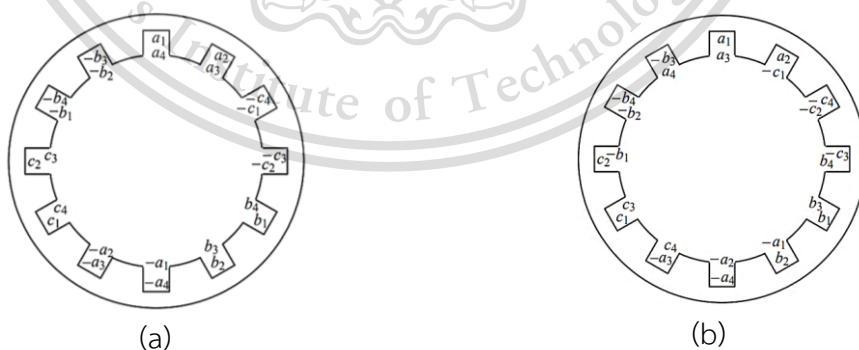
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2-2 ภาพถ่ายการพันขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า [12]

- (a) ภาพถ่ายการพันขดลวดแบบกระจุกตัว (Concentrated winding) ที่นิยมในเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก
- (b) ภาพถ่ายการพันขดลวดแบบกระจายตัว (Distributed winding) ที่นิยมในอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การพันขดลวดแบบกระจายตัวจะแบ่งการพันออกเป็นสองแบบได้แก่ การพันแบบชั้นเดียว (Single layer winding) ซึ่งใช้กับอุตสาหกรรมที่ต้องการมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังที่ไม่สูงมาก และการพันแบบสองชั้น (Double layer winding) โดยการพันแบบสองชั้นจะแบ่งลักษณะของขดลวดออกเป็นสองลักษณะตามค่าจำนวนร่องต่อหนึ่งขั้วแม่เหล็กต่อหนึ่งเฟส (Slot per pole per phase ; SPP) โดยจะสามารถแบ่งการพันออกเป็นสองลักษณะได้แก่ พันแบบร่องจำนวนเต็ม (integral slot winding) และแบบร่องเศษส่วน (Fractional slot winding)



ภาพที่ 2-3 ลักษณะการพันขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า [13]

- (a) ลักษณะการพันขดลวดแบบร่องจำนวนเต็ม (integral slot winding) ที่ใช้กับการพันแบบสองชั้น
- (b) ลักษณะการพันขดลวดแบบร่องเศษส่วน (Fractional slot winding) ที่ใช้กับการพันแบบสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีลักษณะที่ต่างกันอย่างสองรูปแบบได้แก่ โรเตอร์แบบขั้วยื่น (Salient Pole Rotor) และโรเตอร์แบบทรงกระบอก (Cylindrical Pole Rotor) โดยทั้งคู่จะมีขั้วลวดสนามพันอยู่ที่แกนของโรเตอร์ ทั้งสองแบบจะมีข้อแตกต่างกันอยู่ที่ลักษณะการใช้งานที่ต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่โรเตอร์แบบทรงกระบอกจะใช้งานในความเร็รรอบที่สูง ส่วนใหญ่จะถูกติดตั้งในแนวนอน ตัวโรเตอร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับโรเตอร์แบบขั้วยื่น ซึ่งมักใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำพวกกังหันไอน้ำ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันแก๊ส เป็นต้น

โรเตอร์แบบขั้วยื่นมักจะใช้งานในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็รรอบไม่สูง ตัวโรเตอร์จะมีความยาวที่ไม่มากแต่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับโรเตอร์แบบทรงกระบอก การติดตั้งส่วนใหญ่จะติดตั้งในแนวตั้ง มักใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำพวกพลังงานน้ำ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกังหันลม เป็นต้น

นอกจากการใช้งานที่ต่างกันตามที่กล่าวมาแล้ว ลักษณะแรงบิดที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ทั้งสองจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.3



(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(a) ภาพถ่ายโรเตอร์แบบทรงกระบอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Cylindrical Pole Rotor) [2]

(b) ภาพถ่ายโรเตอร์แบบขั้วยื่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Salient Pole Rotor) [14]

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

การจะทำความเข้าใจหลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส จำเป็นต้องกล่าวถึงความหมายของซิงโครนัสคือ การที่ความถี่ทางไฟฟ้าที่เกิดจากการผลิตจะต้องมีขนาดเท่ากับ อัตราการหมุนทางกลของโรเตอร์ กล่าวคือความถี่ทางไฟฟ้าที่ผลิตได้ต้องเร็วเท่ากับความเร็วของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น ความสัมพันธ์ของความเร็วของโรเตอร์กับความถี่ทางไฟฟ้าที่สเตเตอร์จาก สมการ (2-1)

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2-1)$$

โดยที่ f_e คือ ความถี่ทางไฟฟ้า หน่วยเป็นเฮิรตซ์ :Hz
 n_m คือ ความเร็วทางกลของสนามแม่เหล็กหมุน หน่วยเป็นรอบต่อนาที :rpm
 P คือ จำนวนของขั้วของแม่เหล็ก

จากสมการที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่า ความถี่ของไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับความเร็วของการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้นการที่จะทำให้ความถี่ไฟฟ้าที่ใช้งานคงที่ ต้องคงความเร็วรอบของโรเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กที่คงที่

นอกจากความถี่ทางไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (Generated voltage) มีค่าตาม สมการ (2-2)

$$E_A = \sqrt{2} \pi N_c \phi f \quad (2-2)$$

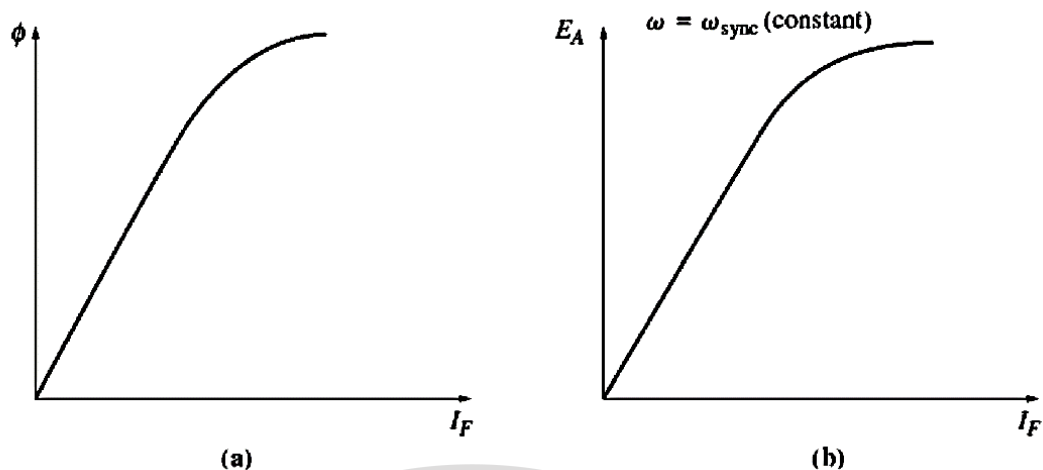
โดยที่ E_A คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใน (Internal generated voltage) หน่วยเป็นโวลต์ :V
 N_c คือ จำนวนรอบขดลวดที่พันอยู่ที่สเตเตอร์ หน่วยเป็นรอบ
 ϕ คือ ค่าของฟลักซ์แม่เหล็กรวมที่ช่องว่างอากาศ หน่วยเป็นเวเบอร์ :Wb
 f คือ ความถี่ทางไฟฟ้า หน่วยเป็นเฮิรตซ์ :Hz

ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเป็นค่าที่แปรผันตรงกับกับค่าของฟลักซ์แม่เหล็กและความเร็ว แต่ค่าของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นค่าที่แปรผันตรงกับกระแสกระตุ้นที่จ่ายไปยังขดลวดสนาม ดังนั้น ค่าของแรงดันไฟฟ้าภายในเหนี่ยวนำจะเป็นค่าที่สอดคล้องกับค่ากระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนามและความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะแสดงให้เห็นดังกราฟ Magnetization curve หรือที่เรียกว่า Open-circuit characteristic ดังภาพที่แสดงต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2-5 ภาพแสดงผลของกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [3]

- (a) ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนาม
- (b) ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายในกับกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนามโดยกำหนดความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่

จากสมการที่ 2-2 แสดงให้เห็นถึงค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจากขดลวดสนามที่ติดกับขดลวดสเตเตอร์โดยหมุนที่ความเร็วเชิงโคโรนัส แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในจะไม่ได้มีค่าที่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้ว (Terminal voltage) เสมอไป เนื่องจากภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเองมีพารามิเตอร์ที่ทำให้เปรียบเสมือนเป็นโหลดภายใน ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าน้อยกว่าแรงดันเหนี่ยวนำภายใน โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดพารามิเตอร์เหล่านี้ได้แก่

1. ความผิดเพี้ยนที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature reaction)
2. การรั่วไหลของสนามแม่เหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Leakage reactance)
3. ความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature resistance)
4. ผลของโรเตอร์ที่มีรูปทรงแบบขั้วยื่น (Salient-pole rotor)

จากปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมา ส่วนแรกที่มีผลกระทบได้แก่ ความผิดเพี้ยนจากกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature reaction) ปัจจัยดังกล่าวเกิดจากการที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเริ่มทำงานในสภาวะที่ต่อกับโหลด โดยปกติแล้วถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเริ่มดำเนินการทำงานในสภาวะที่ไม่มีการต่อกับโหลด สนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศจะมีค่าที่เท่ากับสนามแม่เหล็กที่กระตุ้นจากขดลวดสนาม ทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กสุทธิที่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ช่องว่างอากาศโดยตรง ในทางกลับกัน ถ้ามีการต่อโหลดอยู่ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเริ่มทำงาน จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ และทำให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็กที่อาจจะเสริม หรือหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่มาจากขดลวดสนาม ผลดังกล่าวทำให้สนามแม่เหล็กสุทธิที่ช่องว่างอากาศเกิดความผิดเพี้ยน เมื่อพิจารณาสมการตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้ว่า

$$V_\phi = E_A - jX_{ar}I_A \quad (2-3)$$

โดยที่ V_ϕ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage) หน่วยเป็นโวลต์ :V

E_A คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใน (Generated voltage) หน่วยเป็นโวลต์ :V

X_{ar} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่เกิดจากความผิดเพี้ยนจากกระแสที่อาร์มาเจอร์ หน่วยเป็นโอห์ม

: Ω

I_A คือ กระแสที่ต่อเฟสเกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งวัดโดยเทียบกับเฟสกับนิวทรัล หน่วยเป็นแอมป์ :A

ปัจจัยต่อมาที่มีผลกระทบได้แก่ การรั่วไหลของสนามแม่เหล็กของขดลวดอาร์มาเจอร์ และค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในมีค่าที่ไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage) ทำให้สามารถเขียนสมการความแตกต่างของแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายในกับแรงดันที่ขั้วตามสมการของเคอร์ชอฟฟ์จะได้ว่า

$$V_\phi = E_A - jX_{ar}I_A - jX_{al}I_A - R_A I_A \quad (2-4)$$

โดยที่ X_{al} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่รั่วไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ หน่วยเป็นโอห์ม

: Ω

R_A คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ หน่วยเป็นโอห์ม

: Ω

จากสมการที่ 2-4 ค่ารีแอคแตนซ์จากกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์และค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ สามารถเขียนในรูปของค่ารีแอคแตนซ์รวมได้ ดังนั้น ผลรวมของค่าดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า ค่ารีแอคแตนซ์ของสเตเตอร์ (Synchronous reactance : X_s) โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2-5) การคำนวณค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

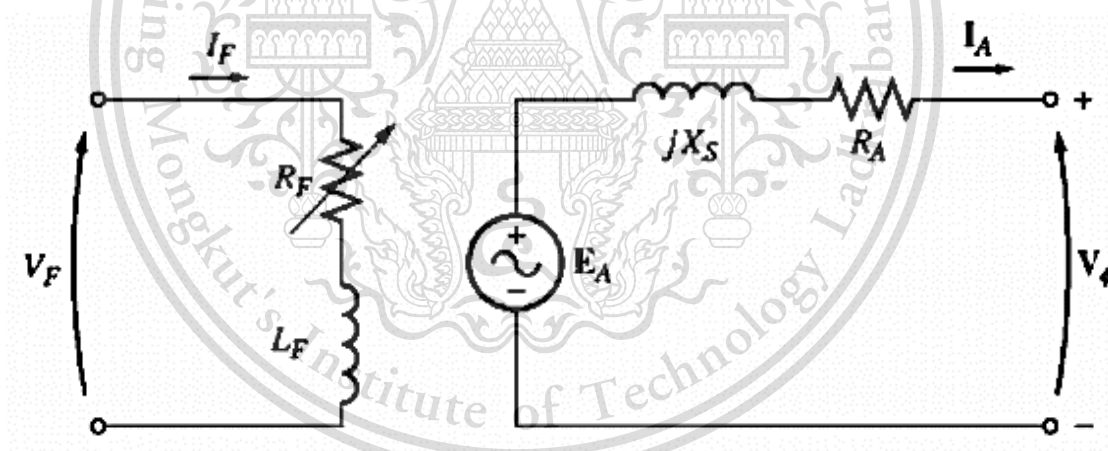
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังนั้น จะสามารถเขียนสมการของแรงดันที่ขั้วได้ว่า

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (2-6)$$

โดยที่ X_S คือ ค่ารีแอคแตนซ์รวมที่เกิดจากผลของความผิดเพี้ยนที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature reaction) และความเหนี่ยวนำในตัวเอง (Self-inductance) หน่วยเป็นโอห์ม : Ω

จากค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมา ทำให้สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้โดยที่ค่าแรงดันที่กล่าวมาเป็นค่าที่พิจารณาเป็นค่าต่อเฟสในสภาวะที่ดังภาพที่ 2-6 ซึ่งในทางปฏิบัติ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะให้แรงดันที่ขั้วเป็นค่าสามเฟส เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ที่พันเป็นขดลวดสามชุดที่มีตำแหน่งการวางเป็นมุมที่แตกต่างกัน 120 องศา และการวิเคราะห์แบบต่อเฟสจะถูกต้องตามทฤษฎีก็ต่อเมื่อโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นโหลดแบบสมดุลเท่านั้น ดังนั้น วิศวกรรมวิจัยเล่มนี้จะสมมติว่าโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นโหลดที่สมดุล และจะอธิบายพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีโรเตอร์แบบทรงกระบอกเท่านั้น



ภาพที่ 2-6 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยพิจารณาเป็นค่าต่อเฟส [3]

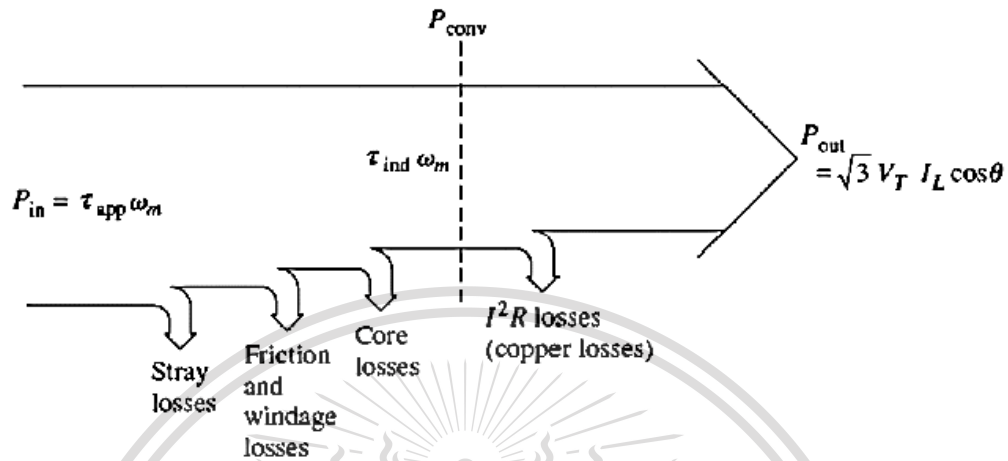
2.2.3 ลักษณะเฉพาะของแรงบิดและกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ คือมีหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานทางกลให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยที่แหล่งพลังงานทางกลที่เรียกกันว่า ต้นกำลัง (Prime mover) อาจเป็นเครื่องจักรกลดีเซล กังหันไอน้ำ กังหันลม หรืออื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติที่ให้ความเร็วในการหมุนที่เหมาะสม ซึ่งในทางปฏิบัติ การแปลงกำลังจะไม่สามารถแปลงกำลังทั้งหมด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากกำลังทางกลเป็นกำลังทางไฟฟ้าได้ ความแตกต่างระหว่างกำลังด้านเข้าและด้านออกจะมีความแตกต่างกัน โดยกำลังที่สูญเสียไปจะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของกำลังที่สูญเสียต่างๆ ซึ่งการสูญเสียดังกล่าวจะเป็นไปตามแผนภาพที่แสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 แสดงภาพลำดับของการแปลงกำลังทางกลเป็นกำลังทางไฟฟ้าโดยมีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นระหว่างการแปลงกำลัง [3]

จากภาพที่ 2-7 จะพบว่ากำลังทางกลที่ป้อนเข้ามาที่เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงตามสมการที่ 2-7 และกำลังที่แปลงจากกำลังทางกลเป็นพลังงานทางไฟฟ้าจะแสดงตามสมการที่ 2-8 ซึ่งระหว่างกำลังทางกลที่ป้อนเข้ากับกำลังที่นำไปเปลี่ยนแปลงจะเป็นค่ากำลังสูญเสียทางกลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งจากภาพที่ 2-7 มีกำลังสูญเสียทางกลที่สำคัญ ได้แก่

1. ค่ากำลังสูญเสียจากการหมุน (Rotational losses หรือ Stray losses)
2. ค่ากำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ (Friction and windage losses)
3. ค่ากำลังสูญเสียจากความร้อนที่แกนเหล็ก (Core losses)

$$P_{in} = \tau_{app} \omega_m \quad (2-7)$$

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad (2-8)$$

โดยที่ P_{in} คือ กำลังทางกลที่ป้อนไปยังเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

P_{conv} คือ กำลังทางกลสุทธิก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นกำลังทางไฟฟ้า (กำลังไฟฟ้าที่ช่องว่างอากาศ)

τ_{app} คือ แรงบิดทางกลที่ป้อนไปยังเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

τ_{ind} คือ แรงบิดเหนี่ยวนำสุทธิก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นกำลังทางไฟฟ้า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมทางกลที่ป้อนไปยังเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการที่ 2-8 แสดงกำลังทางกลสุทธิที่เปลี่ยนแปลงเป็นกำลังทางไฟฟ้า นอกจากสมการข้างต้นแล้วยังสามารถเขียนเป็นสมการที่ติดตัวแปรเป็นค่าทางไฟฟ้าได้ตามสมการที่ 2-9

$$P_{conv} = 3E_A I_A \cos \gamma \quad (2-9)$$

โดยที่ γ คือ มุมระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำภายในและกระแสเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์

จากสมการที่ 2-9 ความแตกต่างระหว่างกำลังสุทธิทางกลที่เปลี่ยนเป็นกำลังทางไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกจะเกิดเป็นค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งกำลังสูญเสียทางไฟฟ้างี้ดังกล่าวเรียกว่า กำลังสูญเสียจากขดลวด (Copper losses) ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าที่เป็นไปตามสมการที่ 2-10 และสมการที่ 2-11

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \quad (2-10)$$

$$P_{out} = 3 V_\phi I_A \cos \theta \quad (2-11)$$

โดยที่ P_{out} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านขาออก
 V_T คือ ค่าแรงดันไลน์ที่วัดที่ขั้วแบบเทียบเฟส
 V_ϕ คือ ค่าแรงดันเฟสที่วัดที่ขั้วแบบเทียบกับนิวทรัล

นอกจากสมการที่ 2-10 ที่แสดงกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออกแล้ว อีกค่ากำลังทางไฟฟ้าทางขาออกคือกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ซึ่งสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 2-12 และสมการที่ 2-13

$$Q_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \theta \quad (2-12)$$

$$Q_{out} = 3 V_\phi I_A \sin \theta \quad (2-13)$$

โดยที่ Q_{out} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนทางด้านขาออก
 V_T คือ ค่าแรงดันไลน์ที่วัดที่ขั้วแบบเทียบเฟส
 V_ϕ คือ ค่าแรงดันเฟสที่วัดที่ขั้วแบบเทียบกับนิวทรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

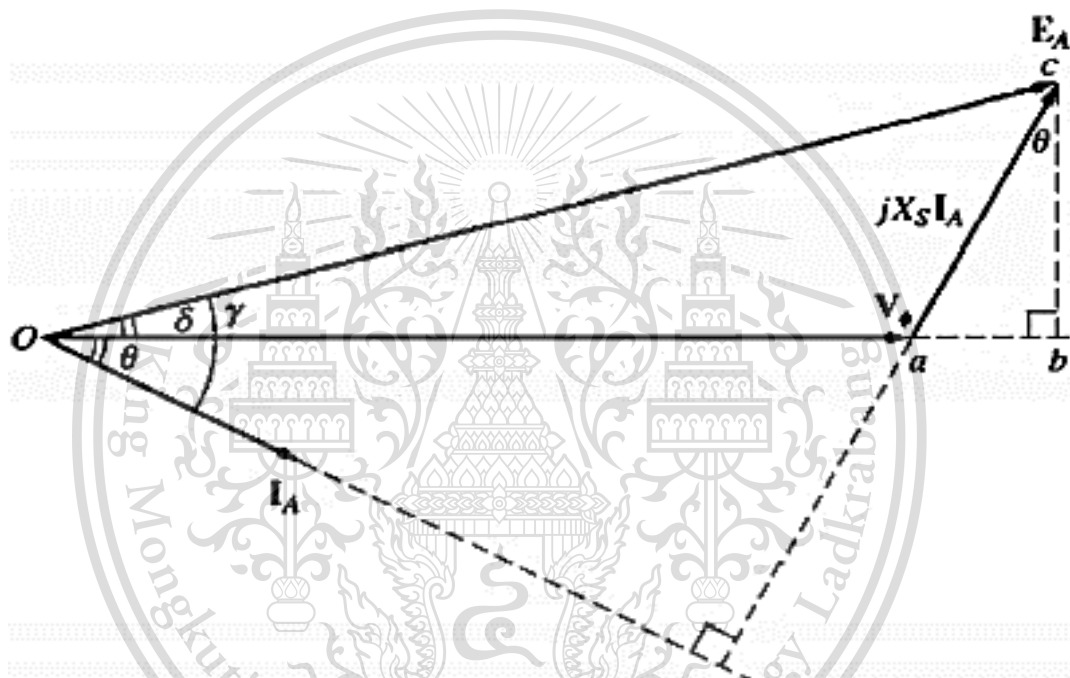
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น นอกจากสมการแสดงกำลังทางไฟฟ้าที่แสดงด้านบนแล้ว เราสามารถหาลำดับกำลังทางไฟฟ้าได้

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ให้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ารีแอคแตนซ์ที่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เกิดจากขดลวดอาร์มาเจอร์ ($X_s \gg R_s$) ซึ่งแสดงให้เห็นรายละเอียดของตามี่แผนภาพเฟสเซอร์แสดงในภาพที่ 2-8 โดยภาพดังกล่าวแสดงความแตกต่างกันของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในที่เกิดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ที่ขั้ว โดยค่าแรงดันทั้งคู่เป็นการพิจารณาแบบต่อเฟส แผนภาพเฟสเซอร์ดังกล่าวทำให้สามารถพิจารณากระแสที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (I_A) ได้โดยใช้พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสมการของกระแสดังกล่าวจะช่วยให้สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใน (E_A) กับมุมเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (δ) ซึ่งช่วยให้เราสามารถพิจารณาพฤติกรรมของแรงบิดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้โดยจะมีการกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 2-8 ไดอะแกรมเฟสเซอร์แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal voltage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยที่พิจารณาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในเงื่อนไขที่ค่ารีแอคแตนซ์ของสเตเตอร์มีค่ามากกว่าความต้านทานของสเตเตอร์อย่างมาก [3]

จากภาพที่ 2-8 แผนภาพเฟสเซอร์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งใคร่สนใจจะมีค่าที่คงที่ไว้กับความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นเงื่อนไขของบัสอนันต์ของระบบไฟฟ้า (Infinite bus) แผนภาพเฟสเซอร์ดังกล่าว ทำให้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ได้ ตามสมการที่ 2-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$I_a^* = \frac{E_A - V_\phi}{R_A - jX_s} = \frac{|E_A|}{|R_A - jX_s|} \angle \theta - \delta - \frac{|V_\phi|}{|R_A - jX_s|} \angle \theta \quad (2-14)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเนื้อหาบางส่วนไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยที่ δ คือ มุมระหว่างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในที่เกิดขึ้น กับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่ขั้ว มีชื่อเรียกว่า Torque angle หรือ Power angle มีหน่วยเป็นองศา

θ คือ มุมระหว่างค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ของพารามิเตอร์ของขดลวดอาร์มาเจอร์ มีหน่วยเป็นองศา

จากสมการที่ 2-11 และสมการที่ 2-14 สามารถสร้างสมการแสดงค่าของกำลังจริงที่เกิดขึ้น ที่มีค่าที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในกับมุมทอร์กแองเกิล (δ) ได้ตามสมการที่ 2-15

$$P = \frac{|V\phi||E_A|}{|R_A - jX_S|} \cos(\theta - \delta) - \frac{|V\phi|^2}{|R_A - jX_S|} \cos(\theta) \quad (2-15)$$

และจากสมการที่ 2-13 และสมการที่ 2-14 สามารถสร้างสมการแสดงค่ากำลังเสมือนที่เกิดขึ้น ที่มีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในกับมุมทอร์กแองเกิล (δ) ได้ตามสมการที่ 2-16

$$Q = \frac{|V\phi||E_A|}{|R_A - jX_S|} \sin(\theta - \delta) - \frac{|V\phi|^2}{|R_A - jX_S|} \sin(\theta) \quad (2-16)$$

จากสมการกำลังทางไฟฟ้าตามสมการที่ 2-15 เมื่อพิจารณาว่าค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร้น้อยมากเมื่อเทียบกับค่ารีแอคแตนซ์ที่เกิดจากขดลวดอาร์มาเจอร์ ($X_S \gg R_S$) ซึ่งสามารถพิจารณาว่าส่วนของค่ากำลังสูญเสียจากแกนเหล็ก (Core losses) มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้สามารถเขียนสมการกำลังจริงได้อีกรูปตามสมการที่ 2-17

$$P_{3\phi} = \frac{3|V\phi||E_A|}{|X_S|} \sin \delta \quad (2-17)$$

จากสมการที่ 2-17 ทำให้กำลังที่ส่งจากไปที่ขั้วกับกำลังที่สูญเสียที่แปลงเป็นกำลังไฟฟ้ามีค่าที่เท่ากัน ซึ่งเราสามารถใช้สมการดังกล่าวในการหาสมการของแรงบิดจากกำลังจริงที่เกิดขึ้นได้ ดังสมการที่ 2-18

$$T = \frac{3|V\phi||E_A|}{\omega_{syn}X_S} \sin \delta \quad (2-18)$$

โดยที่ T คือ แรงบิดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น หน่วยเป็นนิวตันเมตร : Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ω_{syn} คือ ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากขดลวดอาร์มาเจอร์ หน่วยเป็นรอบต่อวินาที
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการที่ 2-17 และสมการที่ 2-18 สามารถพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าและแรงบิดสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถสร้างได้ โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าและแรงบิดจะขึ้นอยู่กับมุมทอร์กแองเกิล (δ) ซึ่งค่าทั้งสองมีค่าสูงสุดในกรณีที่มุมดังกล่าวมีค่าที่ 90 องศา ($\delta = 90$) ทำให้สมการของกำลังไฟฟ้าสูงสุดและแรงบิดทางไฟฟ้าสูงสุดเป็นไปตามสมการที่ 2-19 และสมการที่ 2-20 ตามลำดับ

$$P \frac{3|V_\phi||E_A|}{|X_s|} \max \quad (2-19)$$

$$T \frac{3|V_\phi||E_A|}{\omega_{syn}X_s} \max \quad (2-20)$$

กำลังไฟฟ้าสูงสุดและแรงบิดสูงสุดที่แสดงให้เห็นตามสมการดังกล่าวเรียกว่า ลิมิตเสถียรภาพแบบสถิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Static stability limit) ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว กำลังและแรงบิดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างได้จะไม่มีทางที่มีค่าเข้าใกล้ค่าลิมิตนี้ได้เนื่องจากปัจจัยภายนอกต่าง ๆ

2.2.4 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วไม่สามารถทำได้โดยทันที เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำการต่อเข้าไปอาจมีความแตกต่างกับแรงดันไฟฟ้าในระบบที่มีอยู่แล้ว ดังนั้นการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าจึงมีเงื่อนไขที่สำคัญก่อนทำการขนานที่ต้องทำการพิจารณา ก่อน ได้แก่

1. ลำดับเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะต่อเข้ากับระบบกับลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้าของระบบต้องเป็นลำดับเฟสเดียวกันทุกประการ
2. มุมเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะต่อเข้ากับระบบกับมุมเฟสของแรงดันของระบบต้องเป็นเฟสเดียวกันทุกประการ
3. ความถี่ของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะต่อเข้ากับระบบกับความถี่ของแรงดันของระบบต้องเท่ากันทุกประการ
4. ขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะต่อเข้ากับระบบกับขนาดของแรงดันของระบบต้องเท่ากันทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

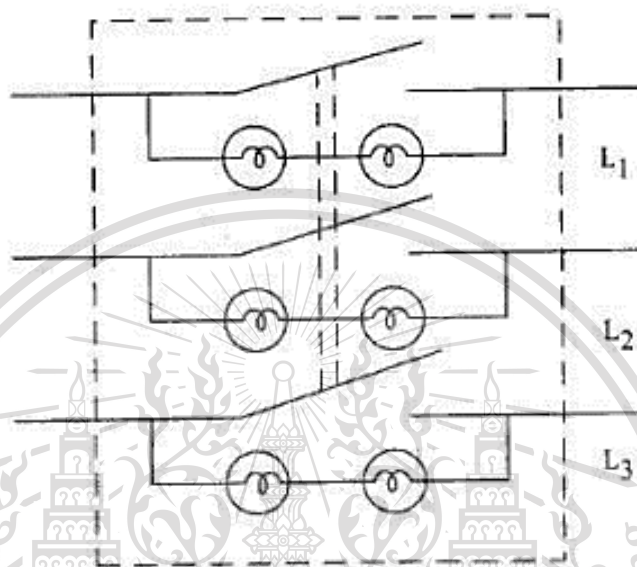
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดครบทั้ง 4 เงื่อนไขที่กล่าวข้างต้น โดยวิธีการที่จะทำการตรวจสอบเงื่อนไขดังกล่าวได้สามารถทำได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หลายวิธีการ โดยวิธีการที่นิยมกันเป็นอย่างมากได้แก่ วิธีการใช้หลอดไฟ 3 เฟส ซึ่งจะให้เห็นความต่างกันของลำดับเฟสเฟส และความแตกต่างของขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้



ภาพที่ 2-9 วิธีการหลอดไฟ 3 เฟส เพื่อช่วยในการตรวจสอบลำดับเฟสและความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากับขนาดของแรงดันกริด [15]

การใช้วิธีการหลอดไฟ 3 เฟสทำได้โดยการต่อหลอดไฟเข้ากับที่ปลายขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและปลายขั้วของระบบไฟฟ้าที่จะทำการขนานดังภาพที่ 2.9 เพื่อสังเกตลักษณะการกะพริบของหลอดไฟ โดยพิจารณาได้ดังนี้

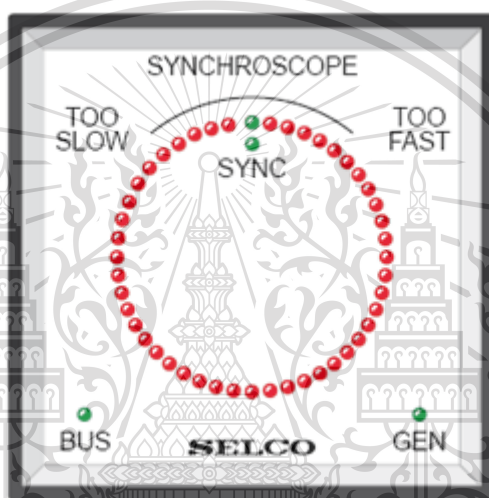
ถ้าหลอดไฟของฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหลอดไฟของฝั่งระบบไฟฟ้ามีการสว่างหรือดับที่สวนทางกัน หรือไม่พร้อมกัน แสดงให้เห็นว่า ลำดับเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าเป็นลำดับเฟสที่สวนทางกัน ดังนั้นควรมีการเปลี่ยนลำดับเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลำดับเฟสที่ตรงกันกับแรงดันกริดแล้ว หลอดไฟทั้งสองฝั่งจะสว่าง-ดับพร้อม ๆ กัน

เมื่อหลอดไฟทั้งสองฝั่งสว่างหรือดับพร้อม ๆ กันแล้วแสดงให้เห็นว่าลำดับเฟสของแรงดันทั้งสองฝั่งเป็นลำดับเฟสเดียวกันแล้ว ต่อมาคือต้องพิจารณาความถี่ของแรงดันของทั้งสองฝั่งโดยใช้มิเตอร์วัดความถี่ เพื่อให้สามารถปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าทั้งคู่ให้ตรงกัน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สิ่งสุดท้ายที่ควรพิจารณาคือมุมเฟสของแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าจากระบบต้องมีมุมเฟสที่เท่ากันทุกประการ ซึ่งการสังเกตจากหลอดไฟไม่สามารถให้ความละเอียดที่สูงพอเพื่อที่จะทำการขนานระบบไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปจึงใช้เครื่องมือที่ช่วยในการพิจารณาความแตกต่างของมุมเฟสได้แก่ ซิงโครสโคป โดยจะทำหน้าที่บอกว่ามุมเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเทียบกับมุมเฟสของแรงดันของระบบมีมุมที่นำหน้าหรือล่าช้า โดยเมื่อมุมเฟสของแรงดันทั้งสองมีมุมที่เท่ากันแล้ว หลอดไฟทั้งสองฝั่งจะดับสนิท ซึ่งเป็นสัญญาณว่าสามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบได้อย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 2-10 ซิงโครสโคปที่ใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของมุมเฟสของแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันของระบบที่จะทำการต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [16]

2.2.5 ผลของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าด้วยกัน

ในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วจะไม่นิยมต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เพียงตัวเดียวหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดพอดีกับความต้องการของโหลดเข้ากับระบบ ทั้งนี้เพื่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นหลักและเพื่อค่าต้นทุนที่แตกต่างกันของการผลิตไฟฟ้า ทำให้ในระบบมีการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายๆเครื่องต่อเข้าด้วยกันเพื่อเป็นทางเลือกและเพื่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
แม้ว่าการแก้ไขเนื้อหาเอกสารนี้จะไม่กระทบต่อความถูกต้องของเนื้อหา แต่การแก้ไขเนื้อหาเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบ และผลรวมของกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่อยู่ในระบบไฟฟ้าจะต้องเท่ากับปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าของโหลดในระบบไฟฟ้านั้น ๆ ทำให้การเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งส่งผลต่อความถี่และแรงดันกริด รวมทั้งมีผลต่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัว โดยความสัมพันธ์ของความถี่และแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน สามารถอธิบายได้ดังนี้

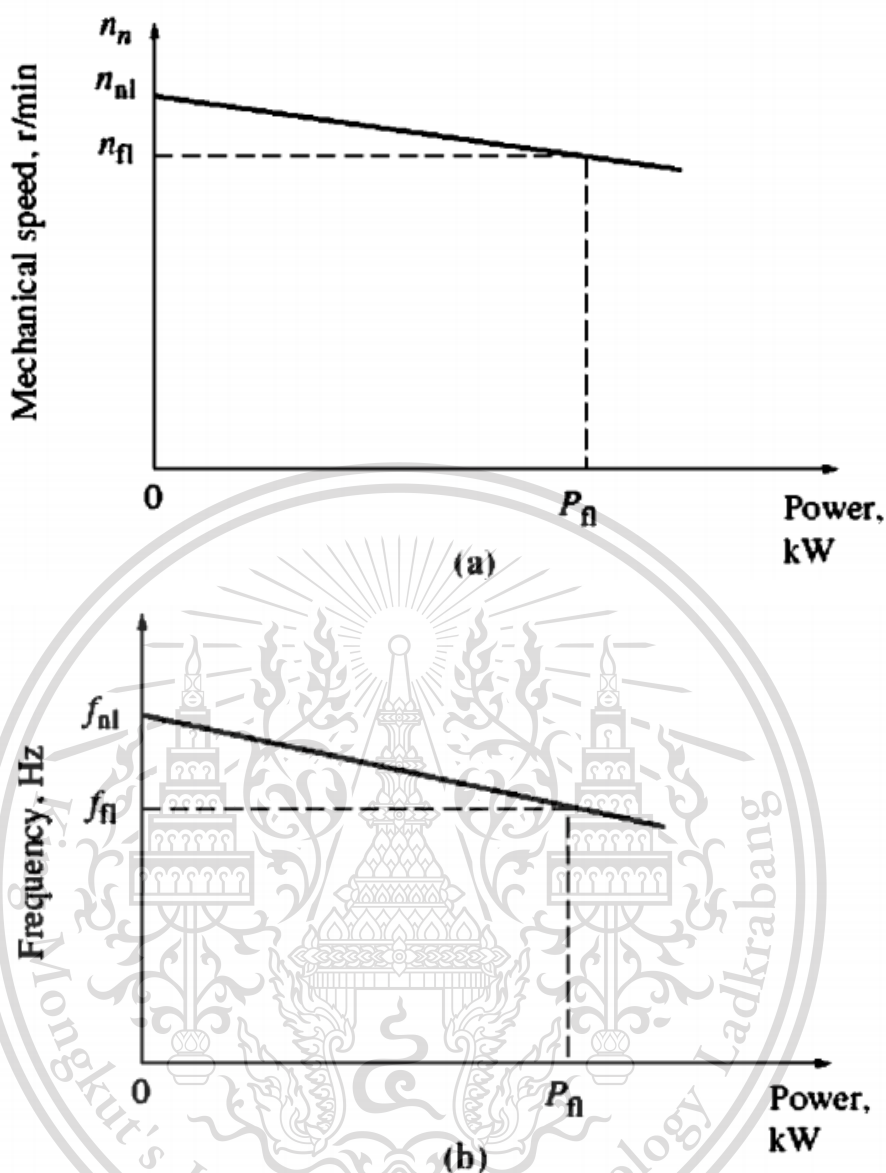
1. ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของระบบไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วการควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้าจะควบคุมโดยการควบคุมความเร็วของตัวต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์นี้เป็นไปตามสมการที่ 2-1 และในระบบไฟฟ้าตัวควบคุมทางกลนี้จะทำการปรับเปลี่ยนตามความต้องการของโหลดที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการเพิ่มหรือลดลงของโหลดทางไฟฟ้านี้เองที่ทำให้ความถี่ของไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงเนื่องจากโหลดทางไฟฟ้าถือเป็นภาระทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงบิดทางไฟฟ้าตามสมการที่ 2-18 และมีผลกับความถี่ทางไฟฟ้าโดยตรง พฤติกรรมดังกล่าวสามารถใช้ ลักษณะการลดทอนของความถี่ไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้า (Droop Characteristic) มาใช้อธิบายความสัมพันธ์ได้ โดย

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\% \quad (2-21)$$

โดยที่ n_{nl} คือ ความเร็วของต้นกำลังทางกลในสภาวะไร้โหลด
 n_{fl} คือ ความเร็วทางกลของต้นกำลังในสภาวะโหลดเต็มพิกัด

สมการที่ 2-21 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความเร็วเมื่อระบบอยู่ในสภาวะโหลดเต็มพิกัดเทียบกับสภาวะที่ไร้โหลด โดยสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้ากับความเร็วได้ดังนี้



ภาพที่ 2-11 ผลของความเร็วและความถี่ต่อกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกับระบบไฟฟ้า [3]

(a) ความเร็วของตัวต้นกำลังในสภาวะต่าง ๆ เทียบกับกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อ

กับระบบไฟฟ้า

(b) ความถี่ของแรงดันในระบบไฟฟ้าในสภาวะต่าง ๆ เทียบกับกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อ

กับระบบไฟฟ้า

จากภาพที่ 2-11 (b) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของกำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตได้

กับความถี่ทางไฟฟ้า โดยที่ความสัมพันธ์นี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้า

กับระบบไฟฟ้า โดยกราฟดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ได้ว่า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

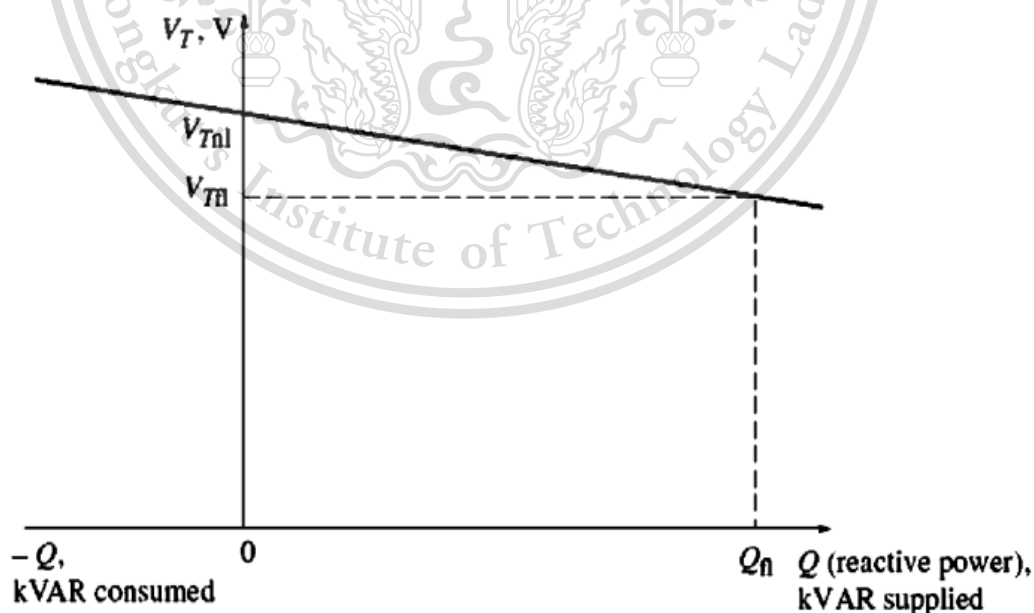
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$P = s_p(f_{nl} - f_{sys}) \quad (2-22)$$

โดยที่ P คือ กำลังทางไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้
 f_{nl} คือ ความถี่ทางไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะไร้โหลด
 f_{sys} คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า
 s_p คือ ความชันของกราฟตามภาพ 2-11 (b) มีหน่วยเป็น kW/Hz หรือ MW/Hz

2. ความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเสมือนกับแรงดันไฟฟ้าระบบไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของความถี่กับกำลังไฟฟ้าจริงดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว จะสามารถอธิบายได้ในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือ เมื่อในระบบไฟฟ้ามีโหลดที่ทำให้เกิดการล่าช้า (lagging load) อยู่ในระบบไฟฟ้าในปริมาณมาก ๆ แรงดันไฟฟ้าที่หัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลง (voltage drop) ในทางกลับกันเมื่อในระบบไฟฟ้ามีโหลดที่ทำให้เกิดการล่าช้า (leading load) แรงดันไฟฟ้าที่หัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นพฤติกรรมทั่วไปทางธรรมชาติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเสมือนกับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าได้ดังภาพ 2-12



ภาพที่ 2-12 ความสัมพันธ์ของแรงดันที่หัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้า [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนสามารถเขียนเป็นสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ได้ในลักษณะที่คล้ายกันกับสมการที่ 2-22 ที่เป็นสมการอธิบายความสัมพันธ์ของความถี่กับกำลังไฟฟ้าจริง ในกรณีที่ตัวควบคุมแรงดันสามารถปรับเปลี่ยนแรงดันให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเสมือนในลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นตรงได้

เมื่อทำการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าด้วยกันในระบบไฟฟ้าใด ๆ ความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปจากเดิม กล่าวคือกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าจะถูกสมมุติว่ามีค่าคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าเป็นระบบที่มีเสถียรภาพ จึงสามารถใช้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าของระบบเป็นค่าอ้างอิงได้

ในทางตรงกันข้าม การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องเข้าด้วยกันจะไม่มีแรงดันไฟฟ้าหรือความถี่จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดที่จะสามารถใช้อ้างอิงกันได้ ดังนั้น จึงเป็นตัวกำหนดว่าผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆจะต้องเท่ากับความต้องการของโหลดในระบบนั้นๆ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการเพื่ออธิบายได้ว่า

$$P_{total} = P_{load} = P_{G1} + P_{G2} \quad (2-23)$$

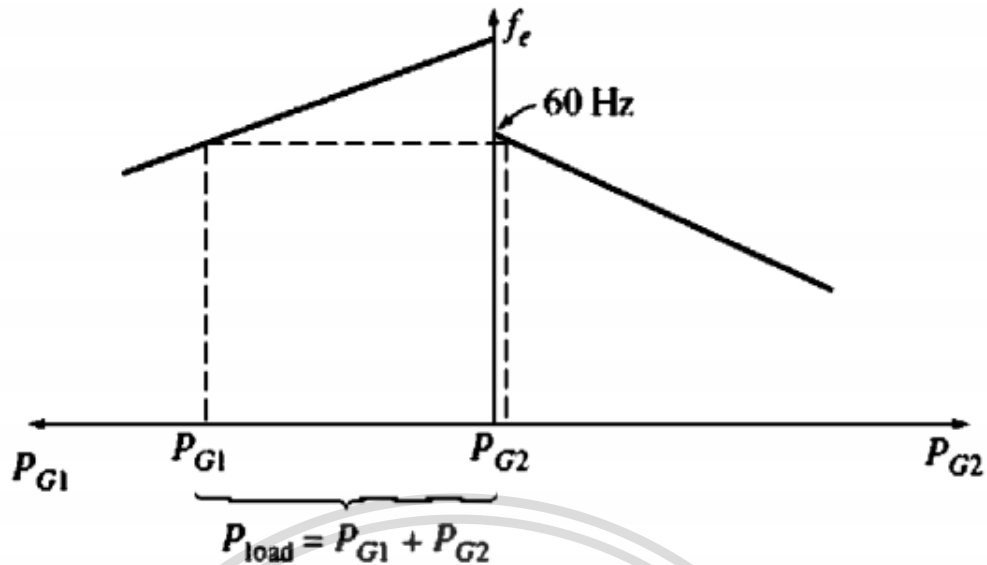
$$Q_{total} = Q_{load} = Q_{G1} + Q_{G2} \quad (2-24)$$

หรือสามารถอธิบายโดยแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงกับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใดๆที่ต่อเข้าด้วยกันอยู่ได้ ดังภาพที่แสดงต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2-13 Housing Diagram แสดงความสัมพันธ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวที่อยู่ขนานเข้าด้วยกันในระบบไฟฟ้าใด ๆ [3]

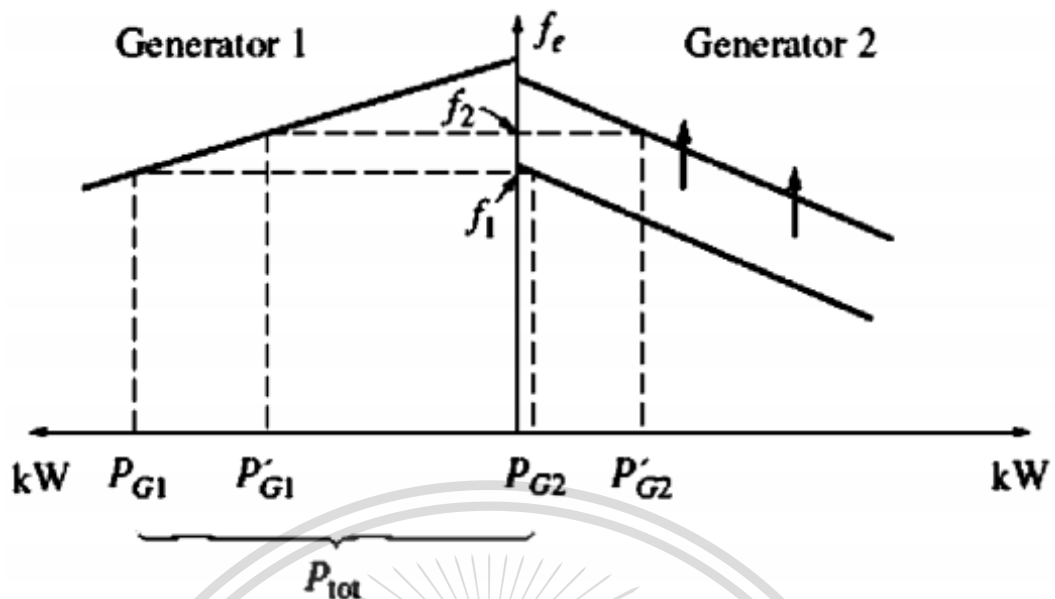
เมื่อพิจารณา Housing Diagram ตามภาพที่ 2-13 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีค่ากำลังของโหลดในระบบอยู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองตัวจะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่แตกต่างกัน เพื่อรักษาความถี่ของระบบไฟฟ้านั้น ๆ ให้มีค่าคงที่

ในทางกลับกัน ถ้าโหลดในระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง หรือการผลิตไฟฟ้าต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่สมเหตุสมผล จึงจำเป็นต้องควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงตามความต้องการของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป ย่อมเกิดผลกระทบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากกำลังรวมในระบบจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง ดังที่กล่าวในสมการที่ 2-23 ดังนั้น ระบบจะไม่สามารถคงสภาพความถี่เดิมอยู่ได้ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวที่ต่ออยู่กับระบบต้องลดกำลังการผลิตลงเพื่อที่จะรักษาความถี่ของระบบให้คงที่ดังเดิม ดังภาพที่จะแสดงต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



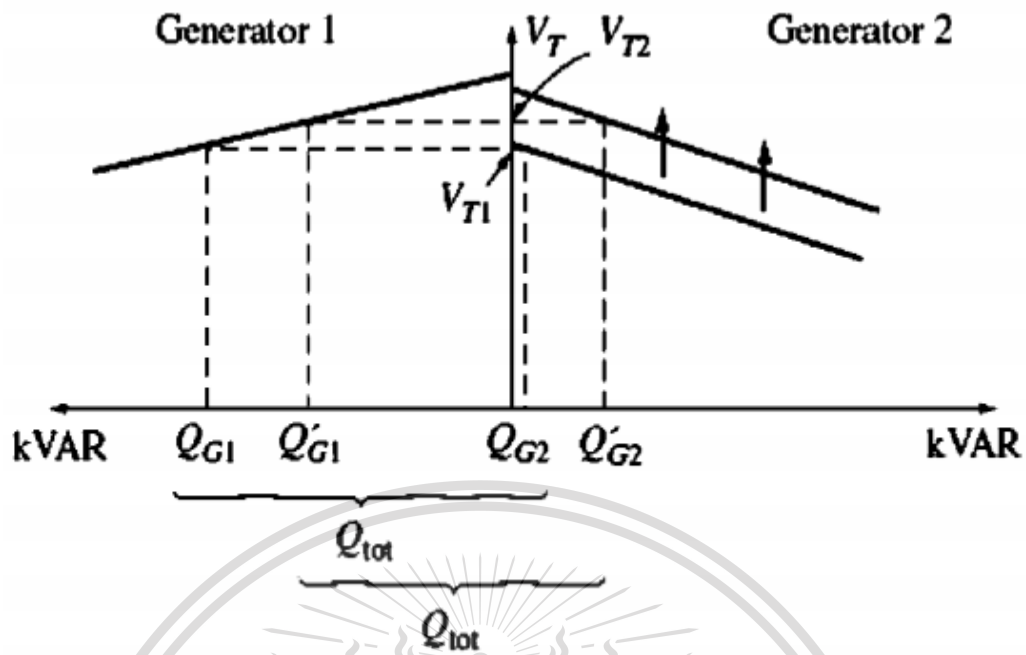
ภาพที่ 2-14 ผลกระทบของการเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ส่งผลต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวในระบบไฟฟ้าที่มีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าด้วยกัน [3]

นอกจากผลกระทบของความถี่ที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบแล้ว จะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของระบบไฟฟ้านั้น ๆ ด้วย เนื่องการเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็คือกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านขดลวดสนามด้วยกระแสที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกกระตุ้นนี้เองทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบจะเพิ่มสูงขึ้น และจากสมการที่ 2-24 ที่แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบต้องสอดคล้องกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่โหลดต้องการ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวจะลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่ระบบด้วยตัวเอง ซึ่งเป็นไปตามภาพที่แสดงให้เห็นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2-15 ผลกระทบของการเพิ่มการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ส่งผลต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวในระบบไฟฟ้าที่มีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าด้วยกัน [3]

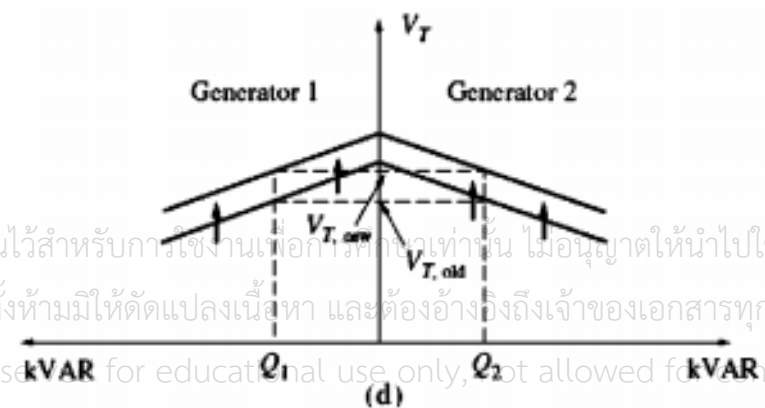
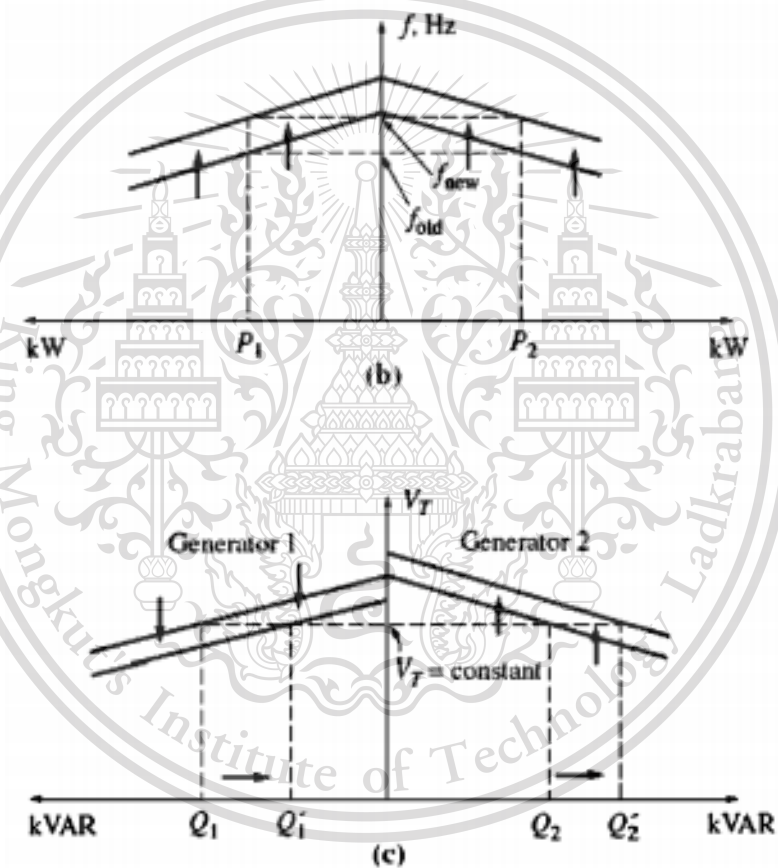
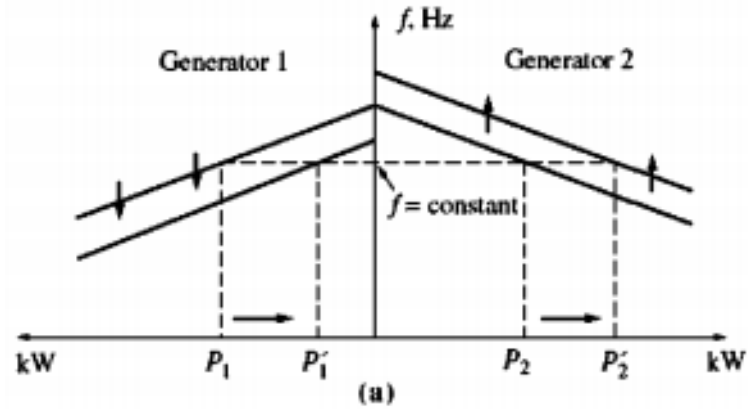
สรุปได้ว่า เมื่อมีการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งในระบบไฟฟ้าที่มีการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองตัวที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าด้วยกันต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้านั้น ๆ กล่าวก็คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้านั้นๆต้องไม่เปลี่ยนแปลงจนมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลรวมกำลังที่จ่ายเข้าไปในระบบต้องสัมพันธ์กับความต้องการของโหลดในระบบ และแรงดันไฟฟ้าในระบบนั้น ๆ ต้องไม่เปลี่ยนแปลงจนมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลรวมกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าไปในระบบนั้น ๆ ต้องสัมพันธ์กับความต้องการของโหลดในระบบ

ดังนั้น การเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้า ต้องลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวเช่นกัน เพื่อคงค่าความถี่ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ในขณะเดียวกันการเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ต้องลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัว เพื่อคงค่าแรงดันในระบบไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่แสดงให้เห็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาพที่ 2-16 ภาพผลกระทบของการควบคุมความเร็วและกระแสกระตุ้นที่มีผลต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [3]

- (a) การควบคุมความเร็วของตัวต้นกำลังเพื่อเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ต้องลดความเร็วของตัวต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวในระบบ เพื่อลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวทำให้ความถี่ของระบบไม่เปลี่ยนแปลง
- (b) การเพิ่มความเร็วของตัวต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบด้วยอัตราที่เท่ากัน ทำให้ความถี่ของระบบไฟฟ้านั้น ๆ เพิ่มขึ้นแบบมีนัยสำคัญ
- (c) การเพิ่มกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใด ๆ ต้องลดกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวในระบบ เพื่อลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกตัวทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบไม่เปลี่ยนแปลง
- (d) การเพิ่มกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบด้วยอัตราที่เท่ากัน ทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้านั้น ๆ เพิ่มขึ้นแบบมีนัยสำคัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

การออกแบบโครงงาน

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงงานและการทดลองเพื่อศึกษาหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยการทดสอบจริง 4 หัวข้อได้แก่ 1. การทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ 2. การทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสนาม 3. การทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio) และ 4. การทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing reactance) เพื่อนำไปใช้ในการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.2 การทดสอบและคำนวณค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เพื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และศึกษาหัวข้อต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์เล่มนี้ จำเป็นต้องทำการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทราบถึงพฤติกรรมของระบบ และทำการทดสอบระบบการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจริง เพื่อนำข้อมูลการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ เพื่อคาดการณ์และประเมินผลกระทบหรือความผิดปกติเบื้องต้น

โดยค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่นำมาระบุในการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หาได้จากการนำข้อมูลมาจากแหล่งอ้างอิงดังนี้

1. คู่มือที่มาพร้อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากผู้ผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Data Sheet)
2. ทดสอบในห้องปฏิบัติการ
3. คำนวณด้วยวิธีการทางเทคนิคตามเอกสารทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

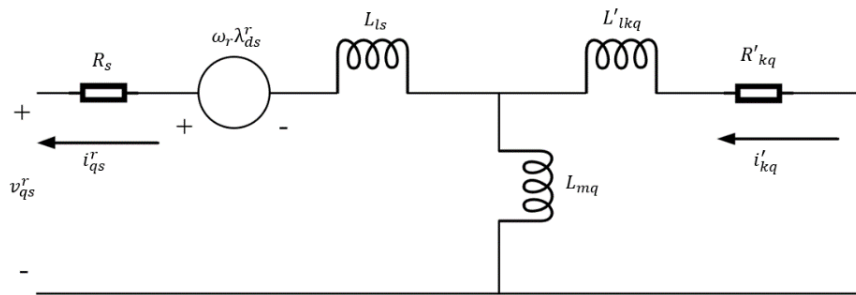
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบที่ศึกษา ด้วยการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามหัวข้อการทดสอบตามจุดประสงค์ของปฏิญานพนธ์เล่มนี้ อ้างอิงตามโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า PLECS โดยประกอบด้วย

1. ค่าความต้านทานสเตเตอร์ (Stator resistance)
2. ค่าความเหนี่ยวนำที่รั่วไหลในสเตเตอร์ (Stator leakage inductance)
3. ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing inductance)
4. ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturated magnetizing inductance)
5. ค่าฟลักซ์แม่เหล็กของการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะอิ่มตัว (Magnetizing flux at saturation transition)
6. ความหนาแน่นของการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะอิ่มตัว (Tightness of saturation transition)
7. ความต้านทานของขดลวดสนาม (Field resistance)
8. ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลในขดลวดสนาม (Field leakage inductance)
9. ค่าความต้านทานขดลวดหน่วง (Damper resistance)
10. ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลในขดลวดหน่วง (Damper leakage inductance)
11. ค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn Ratio)
12. ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Inertia)
13. สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน (Friction coefficient)
14. จำนวนของคู่ขั้ว (Number of pole pairs)
15. ความเร็วโรเตอร์เริ่มต้น (Initial rotor speed)
16. กระแสสเตเตอร์เริ่มต้น (Initial stator current)
17. กระแสฟิลด์เริ่มต้น (Initial field current)
18. ฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์เริ่มต้น (Initial stator flux)

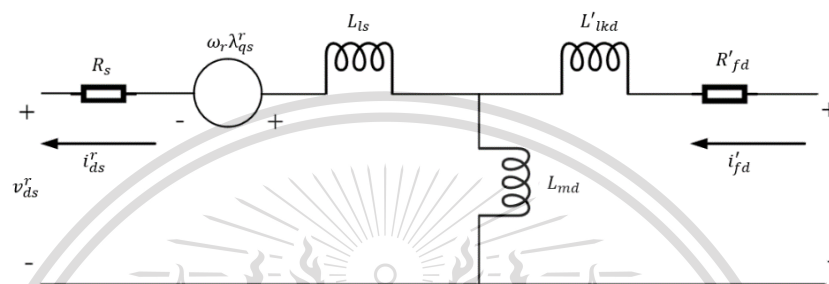
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(a)



(b)

ภาพที่ 3-1 ภาพวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(a) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์ชนิดชั่วยืนตามแกน d

(b) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์ชนิดชั่วยืนตามแกน q

3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคู่มือที่มากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากผู้ผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1. Stator leakage reactance (X_{ls})	0.08 p.u.
2. Saturated magnetizing reactance (X_{mdsat})	1.994 p.u.
3. Inertia (J)	0.0923 kgm ³
4. Pole pair	2
5. Initial rotor position (t_{m0})	$\pi/2$ N-m
6. Initial rotor speed (ω_{m0})	100 π rad/s
7. Transient time constant (τ'_d)	0.012 s
8. Sub transient time constant (τ''_d)	0.003 s
9. Open circuit field time constant (τ'_{d0})	0.2 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

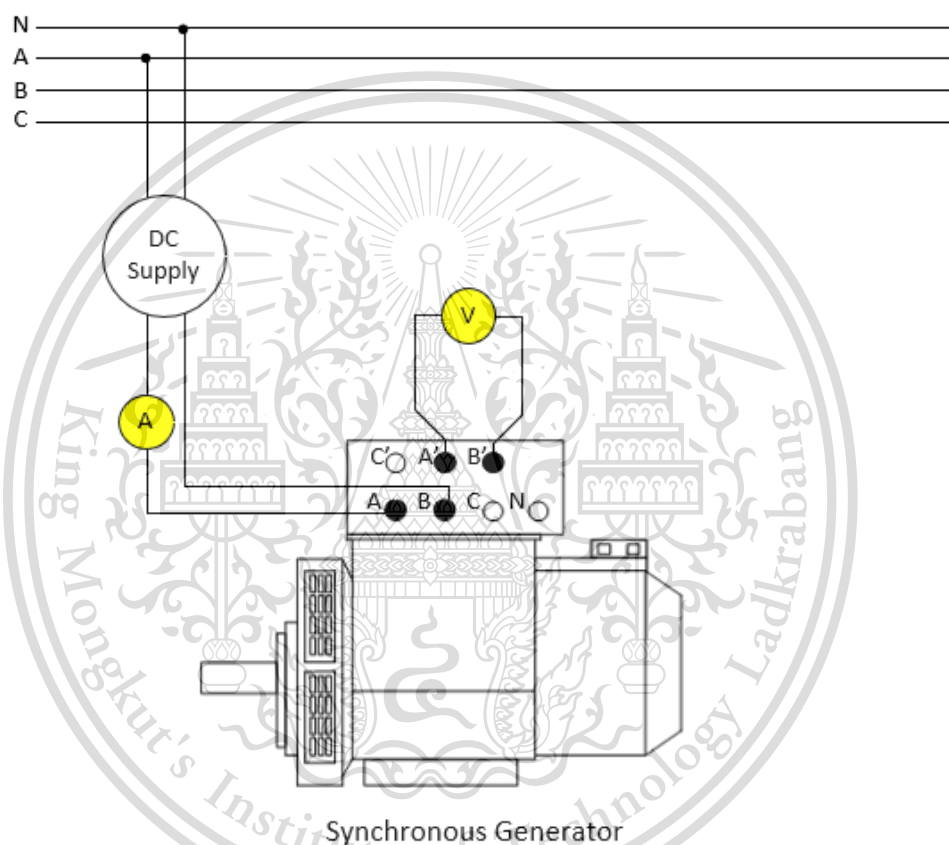
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ

1. การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์

การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์โดยวิธีการ VI-Method โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ปลายขั้วหนึ่งขั้วหนึ่งของขดลวดและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ปลายขั้วฝั่งตรงข้ามของขดลวดอาร์มาเจอร์ จากนั้นบันทึกค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบ เพื่อหาความชันจากกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้

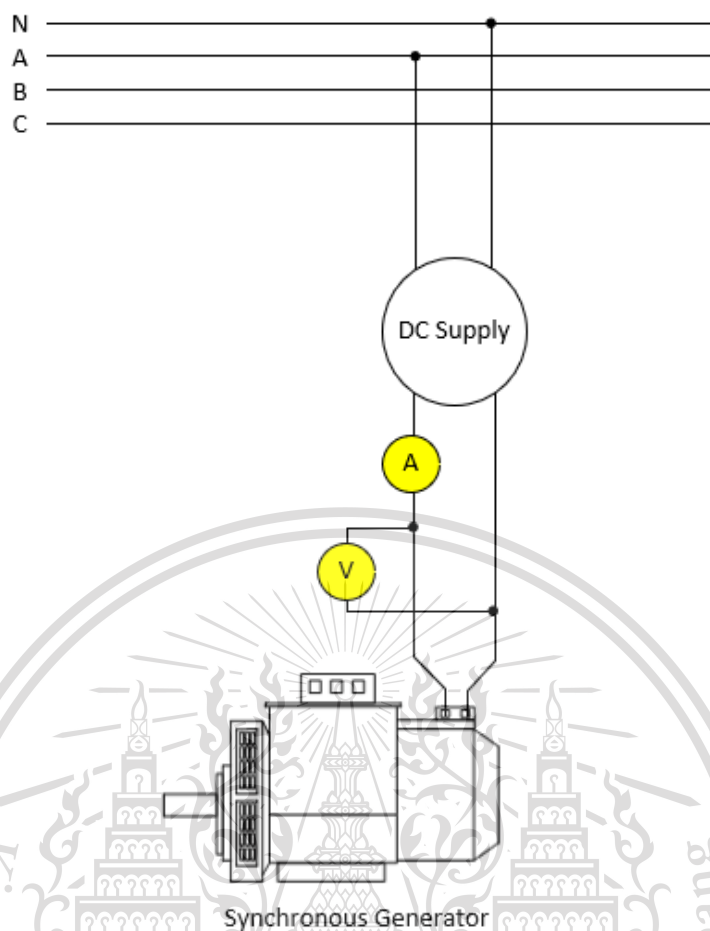


ภาพที่ 3-2 ไดอะแกรมการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2. การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสนาม

การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสนามโดยวิธีการ VI-Method โดยทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ปลายขั้วหนึ่งขั้วหนึ่งของขดลวดสนามและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ปลายขั้วฝั่งตรงข้ามลักษณะเดียวกันกับการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ เพื่อหาความ

ชันจากกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้



ภาพที่ 3-3 ไดอะแกรมการทดสอบหาค่าความต้านทานขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

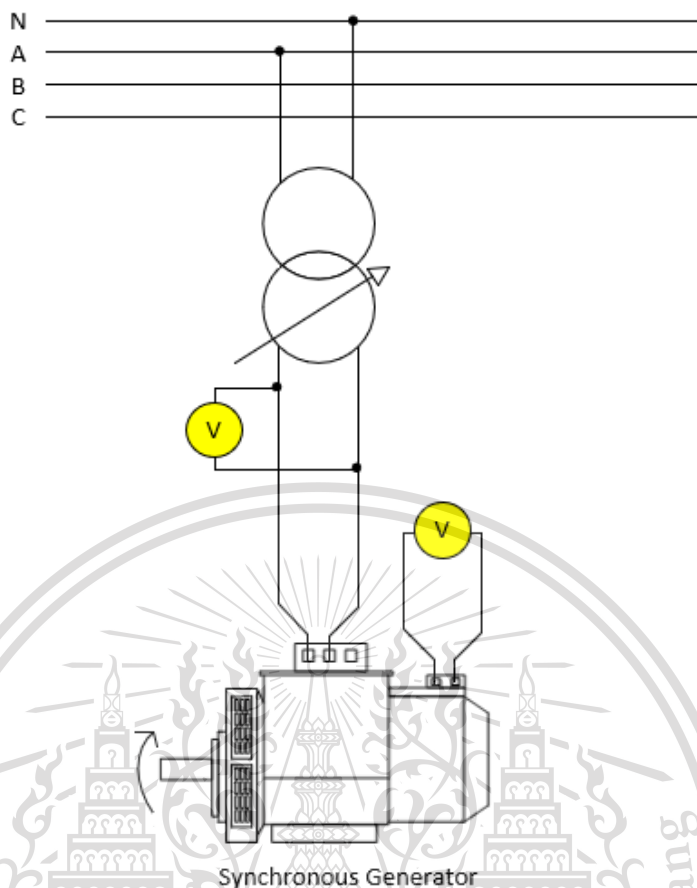
3. การทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio)

การทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio) จะสามารถหาได้จากการจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับค่าหนึ่งเข้าที่ขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์ เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดสนาม ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 30 V จ่ายเข้าไปที่ขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์ดังภาพที่ 3-4 จากนั้นจะทำการหมุนโรเตอร์ไปที่ตำแหน่งมุมต่างๆ แล้ววัดค่าแรงดันที่ขดลวดสนาม โดยเพิ่มมุมครั้งละ 30 องศา และบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งจะทำซ้ำทั้งที่ขดลวดอาร์มาเจอร์และขดลวดสนาม จากนั้นหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 3-4 ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn Ratio)

4. การทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing reactance)

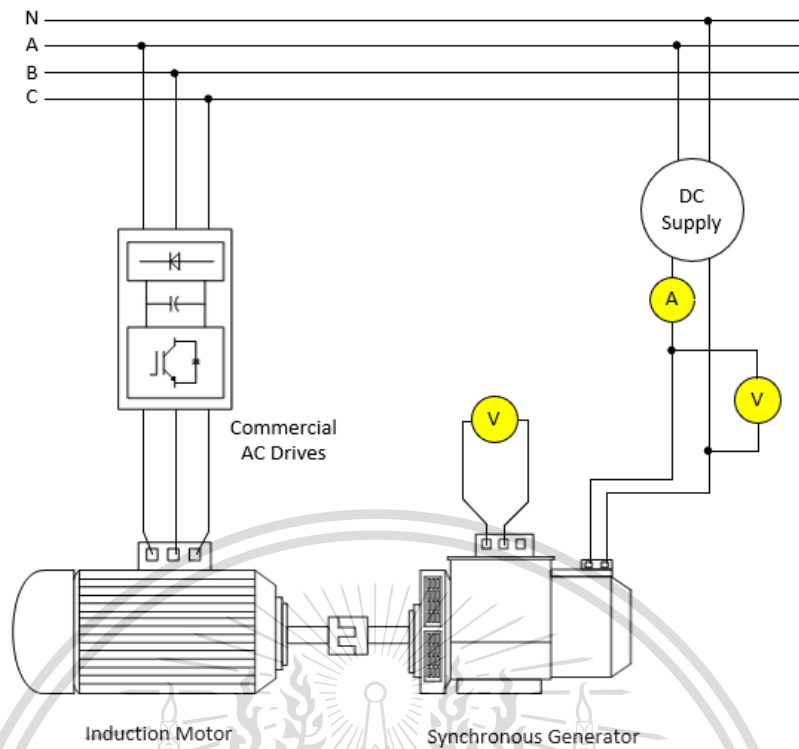
การทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing reactance)

จะสามารถหาได้จากกราฟคุณลักษณะขณะเปิดวงจรและลัดวงจร (Open-circuit and short-circuit characteristics) ซึ่งในกรณีของการทดสอบขณะเปิดวงจร (Open circuit test) ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Exciting current) ที่ขดลวดสนามและวัดแรงดันไฟฟ้าที่ปลายขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Terminal voltage) ดังภาพที่ 3-5 และในกรณีของการทดสอบขณะลัดวงจร (Short circuit test) ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ที่ขดลวดสนาม จากนั้นวัดกระแสไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ (Armature current) ที่มีการลัดวงจรปลายขั้วของขดลวดทั้งสามเฟสเข้าด้วยกันดังภาพที่ 3-6 จากนั้นทำการกราฟเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 3-7

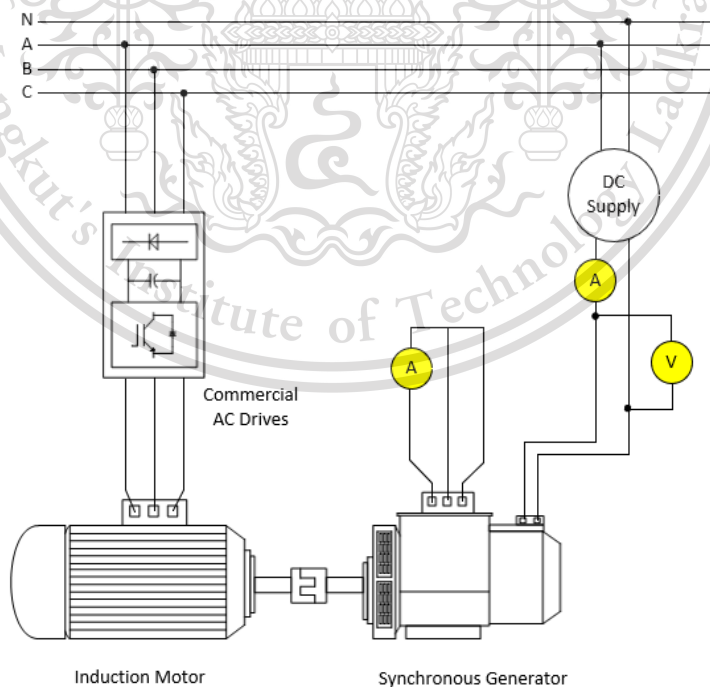
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 3-5 ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของวงจรเปิด
(Open-Circuit Characteristic)

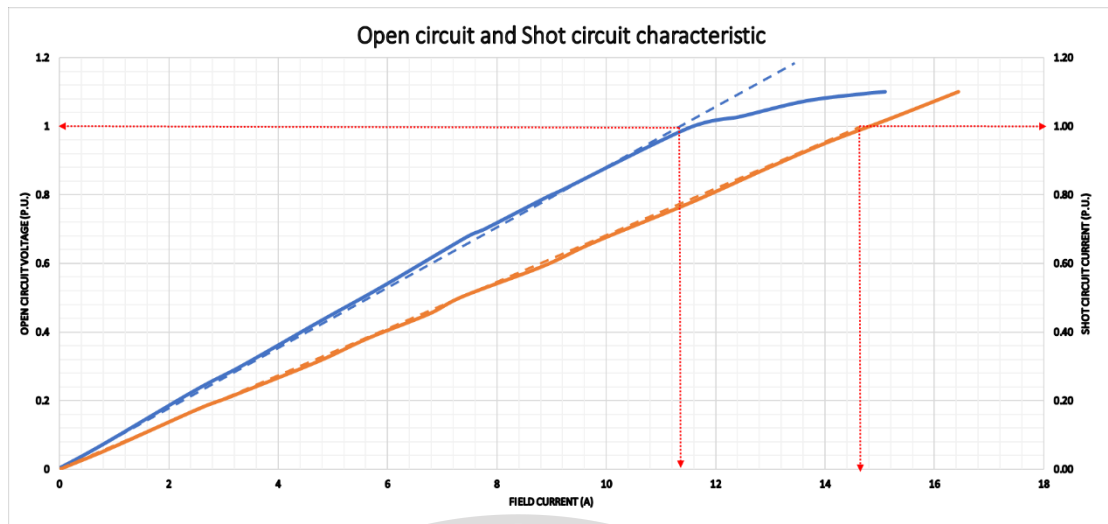


ภาพที่ 3-6 ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของวงจรปิด
(Short-Circuit Characteristic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 3-7 กราฟคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและขณะลัดวงจร
(Open-circuit and short-circuit characteristics)

จากภาพที่ 3-7 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกระตุ้นที่จ่ายที่ขีดลวดสนามเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะที่เปิดวงจร กับกระแสไฟฟ้าที่ชั่วขณะที่ลัดวงจรในหน่วยต่อหน่วย จะพบว่าจะได้ค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร 18.2 A และค่ากระแสสนามที่แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วอาร์มาเจอร์พิกัดบนเส้นช่องว่างอากาศ เท่ากับ 10.1 A

ดังนั้น สามารถหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing reactance) ในแกนอ้างอิงที่ตรงกับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (direct axis) จากสมการ

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} \quad (3-1)$$

โดยที่ X_{du} คือ รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำแบบไม่อิ่มตัวไม่อิ่มตัวในแกน d (Unsaturated synchronous reactance in d axis)

I_{FSI} คือ กระแสสนามที่ให้ค่ากระแสอาร์มาเจอร์บนเส้นขณะลัดวงจร

I_{FG} คือ กระแสสนามที่ให้ค่าแรงดันอาร์มาเจอร์บนเส้นช่องว่างอากาศ

ดังนั้น ได้ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำแบบไม่อิ่มตัวไม่อิ่มตัวในแกน d

$$X_{du}(\text{p. u.}) = \frac{14.7}{11.4} = 1.287 \text{ p. u.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีเหตุที่จำเป็นที่ และต้องอ้างอิงถึงเอกสารที่พิมพ์ขึ้นมาไว้ใช้

ไฟฟ้าซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{3\phi, base}} \quad (3-2)$$

ได้ค่าอิมพีแดนซ์พื้นฐาน

$$Z_{base} = \frac{230^2}{8,100} = 30.8775 \, \Omega$$

จากนั้นจะสามารถหาค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำแบบไม่อิ่มตัวไม่อิ่มตัวในแกน d จากสมการต่อไปนี้

$$X_{du}(\text{p. u.}) = \frac{X_{du}}{Z_{base}} \quad (3-3)$$

ได้ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำแบบไม่อิ่มตัวไม่อิ่มตัวในแกน d

$$X_{du} = 1.287 \times 30.8775 = 39.74 \, \Omega$$

จากนั้นจะสามารถหาค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำแบบไม่อิ่มตัวไม่อิ่มตัวในแกน q ในหน่วยต่อหน่วยจากสมการต่อไปนี้

$$X_{qu}(\text{p. u.}) = X_{du} \left(\frac{X_q}{X_d} \right) \quad (3-4)$$

$$X_{md} = X_{ad} + X_{ls} \quad (3-5)$$

$$X_{mq} = X_{aq} + X_{ls} \quad (3-6)$$

โดยที่	X_{qu}	แทนรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำไม่อิ่มตัวในแกน q
	X_{md}	แทนรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำอิ่มตัวในแกน d ในสภาวะเดินเครื่อง
	X_{mq}	แทนรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำอิ่มตัวในแกน q ในสภาวะเดินเครื่อง
	X_{ad}	แทนรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำอิ่มตัวในแกน d จากคู่มือของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	X_{aq}	แทนรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำอิ่มตัวในแกน q จากคู่มือของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
	X_{ls}	แทนรีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กขั้วไหลของขดลวดสเตเตอร์

ดังนั้น สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$X_{md} = 1.994 + 0.08 = 2.074 \, \text{p. u.}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{mq} = 0.992 + 0.08 = 1.072 \, \text{p. u.}$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$X_{qu}(\text{p. u.}) = 1.287 \left(\frac{1.072}{2.074} \right) = 0.665 \text{ p. u.}$$

$$X_{qu} = 0.665 \times 30.8775 = 20.53 \, \Omega$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการทางเทคนิคตามเอกสารทางวิชาการ

1. ค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดสนาม (Field winding leakage reactance)

ใช้สมการอิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสภาวะที่เดินเครื่องและค่าคงตัวเวลา (Machine equation in operational impedance and time constants) ที่ได้จากคู่มือของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาช่วยในการหาค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดสนาม โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณอ้างอิงตามตำราที่มีการกล่าวถึงในบทสุดท้ายของปริญญานิพนธ์เล่มนี้

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) \quad (3-7)$$

$$\tau'_d = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (3-8)$$

โดยที่ τ'_d แทนค่า Transient time constant
 τ'_{do} แทนค่า Open circuit field time constant
 r'_{fd} แทนค่าความต้านทานของขดลวดสนามที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ (Field resistance refer to armature winding)
 X'_{lfd} แทนค่ารีแอคแตนซ์จากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดสนามที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ (Field leakage reactance refer to armature winding)

เปรียบเทียบสองสมการเพื่อหาค่า X'_{lfd}

$$\frac{1}{\tau'_{do}} (X'_{lfd} + X_{md}) - \frac{1}{\tau'_d} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) = 0$$

$$\frac{X'_{lfd}}{\tau'_{do}} + \frac{X_{md}}{\tau'_{do}} - \frac{1}{\tau'_d} X'_{lfd} - \frac{1}{\tau'_d} \left(\frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) = 0$$

$$X'_{lfd} \left(\frac{1}{\tau'_{do}} - \frac{1}{\tau'_d} \right) + \frac{X_{md}}{\tau'_{do}} - \frac{1}{\tau'_d} \left(\frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) = 0$$

จะได้ว่า

$$X'_{lfd} = \frac{\frac{1}{\tau'_d} \left(\frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) - \frac{X_{md}}{\tau'_{do}}}{\left(\frac{1}{\tau'_{do}} - \frac{1}{\tau'_d} \right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แทนค่าพารามิเตอร์ที่มีเพื่อหาค่า X'_{lfd}

$$X'_{lfd} = \frac{\frac{1}{0.012} \left(\frac{2.074 \times 0.08}{2.074 + 0.08} \right) - \frac{2.074}{0.2}}{\left(\frac{1}{0.2} - \frac{1}{0.012} \right)} = 0.0504 \text{ p. u.}$$

2. ค่าความต้านทานของขดลวดสนามที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ (Field resistance)

จากสมการที่ 3-7 ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการอิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสถานะเดินเครื่องและค่าคงตัวเวลา (Machine equation in operational impedance and time constants)

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md})$$

ทำให้สามารถหาค่าความต้านทานของขดลวดสนามที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ได้ตามสมการด้านล่าง

$$r'_{fd} = \frac{1}{\omega_b \tau'_{do}} (X'_{lfd} + X_{md}) \quad (3-9)$$

ดังนั้น

$$r'_{fd}(\text{p. u.}) = \frac{1}{100\pi \times 0.2} (0.0504 + 2.074) = 0.0338 \text{ p. u.}$$

$$r'_{fd} = 0.0338 \times 30.8775 = 1.0437 \Omega$$

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานของขดลวดสนามที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากการทดสอบแล้ว ทำให้ทราบค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn Ratio) ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.5 โดยหาได้จาก

$$\text{Turn ratio}^2 = \frac{r'_{fd}}{r_{fd}} \quad (3-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. คาร์รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดหน่วง(Damper winding leakage reactance)

ใช้การคำนวณในทฤษฎีตามที่กล่าวมาข้างต้น โดยการวิเคราะห์ค่าคงตัวเวลาในช่วงชั่วขณะ (Sub transient time constant) เพื่อใช้ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดหน่วงได้สมการดังนี้

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) + \frac{1}{\omega_b r'_{kd}} (X'_{lkd} + X_{md}) \quad (3-11)$$

$$\tau'_d = \frac{1}{(\omega_b r'_{kd})} \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) + \frac{1}{(\omega_b r'_{kd})} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (3-12)$$

โดยที่ τ'_d แทนค่า Sub transient time constant

r'_{kd} แทนค่าแทนค่าความต้านทานของขดลวดหน่วงที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ (Damper resistance refer to armature winding)

r'_{kd} แทนคาร์รีแอกแตนซ์จากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดหน่วงที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ (Damper leakage reactance refer to armature winding)

ทำให้สามารถหาคาร์รีแอกแตนซ์จากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดหน่วงที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ได้ตามสมการที่ 3-11 ดังนี้

$$\begin{aligned} \tau'_{do} \omega_b r'_{fd} - (X'_{lfd} + X_{md}) &= \frac{1}{\omega_b r'_{kd}} (X'_{lkd} + X_{md}) \\ (\tau'_{do} \omega_b r'_{fd} - (X'_{lfd} + X_{md})) \omega_b r'_{kd} &= (X'_{lkd} + X_{md}) \\ r'_{kd} &= \frac{(X'_{lkd} + X_{md})}{(\tau'_{do} \omega_b r'_{fd} - (X'_{lfd} + X_{md})) \omega_b} \end{aligned} \quad (3-13)$$

และจากสมการที่ 3-12

$$\begin{aligned} \frac{\tau'_d \omega_b r'_{fd}}{(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}})} &= \frac{1}{(\omega_b r'_{kd})} \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \\ \frac{(\tau'_d \omega_b r'_{fd} \omega_b) r'_{kd}}{(X'_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}})} &= \left(X'_{lkd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จะได้

$$r'_{kd} = \frac{\left(X'_{lkd} + \frac{X_{md}X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}}\right) \times \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md}X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}}\right)}{(\tau'_d \omega_b r'_{fd} \omega_b)} \quad (3-14)$$

นำสมการที่ 3-13 เท้ากับสมการที่ 3-14

$$\frac{(X'_{lkd} + X_{md})}{(\tau'_{do} \omega_b r'_{fd} - (X'_{lfd} + X_{md})) \omega_b} = \frac{\left(X'_{lkd} + \frac{X_{md}X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}}\right) \times \left(X'_{lfd} + \frac{X_{md}X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}}\right)}{(\tau'_d \omega_b r'_{fd} \omega_b)}$$

แทนค่าสมการ

$$\frac{(X'_{lkd} + 2.074)}{(0.2 \times 100\pi \times 1.0437 - (0.0505 + 2.074))100\pi} = \frac{\left(X'_{lkd} + \frac{2.074 \times 0.08}{2.074 + 0.08}\right) \times (0.0505 + \frac{2.074 \times 0.08}{2.074 + 0.08})}{(0.012 \times 100\pi \times 1.0437 \times 100\pi)}$$

จะได้

$$X'_{lkd} = 0.0504 \text{ p.u.}$$

4. ค่าความต้านทานของขดลวดหน่วงที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ (Field resistance) จากสมการที่ 3-11 ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการอิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสถานะเดินเครื่องและค่าคงตัวเวลา เวลา (Machine equation in operational impedance and time constants)

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega_b r'_{fd}} (X'_{lfd} + X_{md}) + \frac{1}{\omega_b r'_{kd}} (X'_{lkd} + X_{md})$$

ทำให้สามารถหาค่าความต้านทานของขดลวดหน่วงที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ได้ตามสมการที่ 3-13

$$r'_{kd} = \frac{(X'_{lkd} + X_{md})}{(\tau'_{do} \omega_b r'_{fd} - (X'_{lfd} + X_{md})) \omega_b}$$

แทนค่าสมการ

$$r'_{kd} = \frac{(0.0504 + 2.074)}{(0.2 \times 100\pi \times 1.0437 - (0.0505 + 2.074))100\pi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$r'_{kd} = 0.0349 \text{ p.u.}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 สรุปพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

Parameters	Quantity
1. Stator resistance (R_s)	1.672 Ω
2. Stator leakage reactance (X_l)	0.08 pu
3. Saturated magnetizing reactance in d axis (X_{ad})	2.074 p.u.
Saturated magnetizing reactance in q axis (X_{aq})	1.072 p.u.
4. Unsaturated synchronous reactance in d axis (X_{du})	1.7745 p.u.
Unsaturated synchronous reactance in q axis (X_{qu})	0.917 p.u.
5. Field resistance (R_f)	0.4698 Ω
6. Field leakage reactance (X'_{lfd}) (referred)	0.0504 p.u.
7. Damper resistance in d axis (R'_{kd})	0.0349 p.u.
Damper resistance in q axis (R'_{kq})	0
8. Turn ratio (N_s/N_f)	1.5
9. inertia (J)	0.0923 kgm ³
10. Friction coefficient (F)	0
11. Pole pair	2
12. Damper leakage reactance (X'_{lkd})	0.0504 p.u.
Damper leakage reactance (X'_{lkq})	-
13. Initial rotor position (t_{m0})	$\pi/2$
14. Initial rotor speed (ω_{m0})	100 π

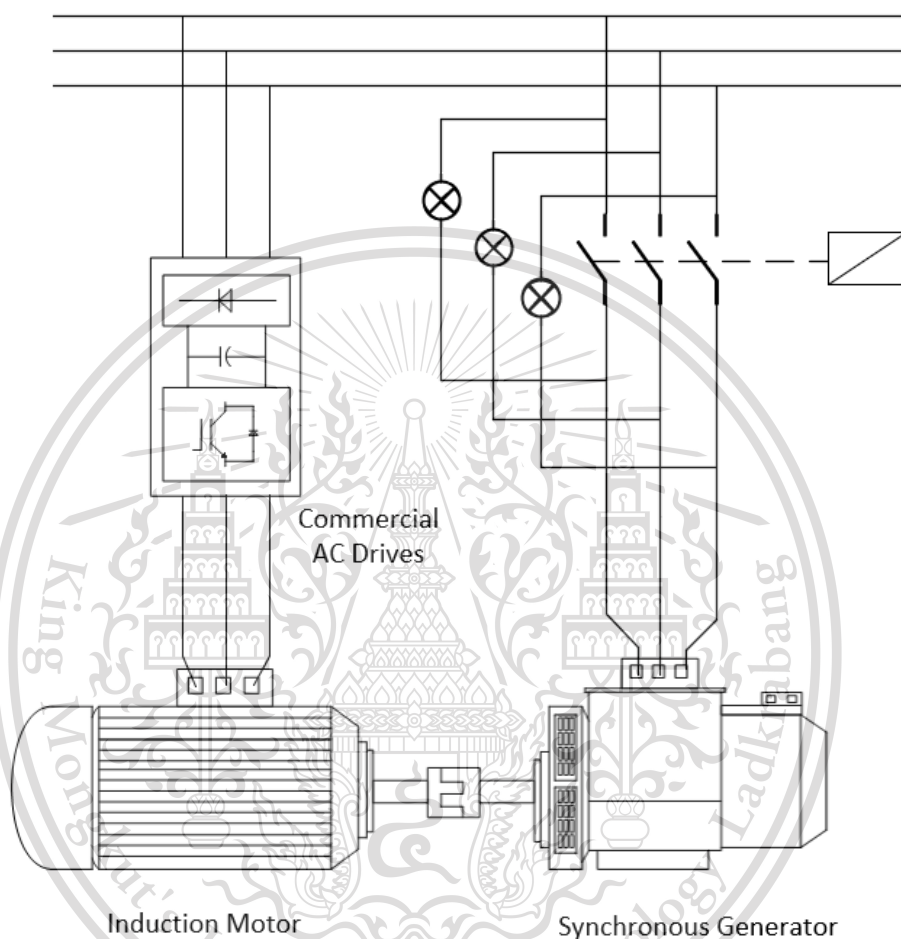
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 การจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในส่วนของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าผ่านการจำลอง ทำได้โดยเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดสอบ เข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟสดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3-8 ไดอะแกรมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

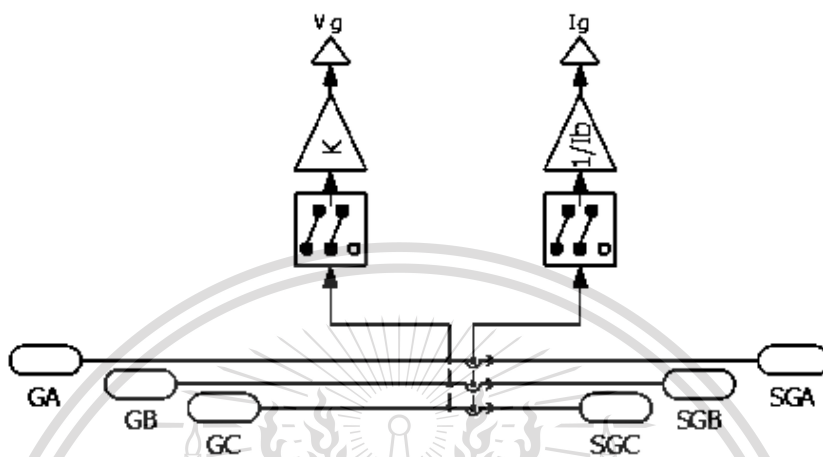
จากนั้นนำไปสร้างโมเดลสำหรับการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้สวิตช์เป็นตัวควบคุมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้างดภาพที่ 3-9 ในส่วนของการควบคุมแรงดันที่ขดลวดสนามจะใช้หลักการของทฤษฎีการบอ้างอิงโดยการแปลงแรงดันที่ระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงสามเฟสเข้าสู่ระบบกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ จากนั้นจึงแปลงเข้าสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับโรเตอร์ เพื่อทำการควบคุมโดยวงจควบคุมแบบป้อนกลับ

(feedback control) ดังภาพที่ 3-9

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

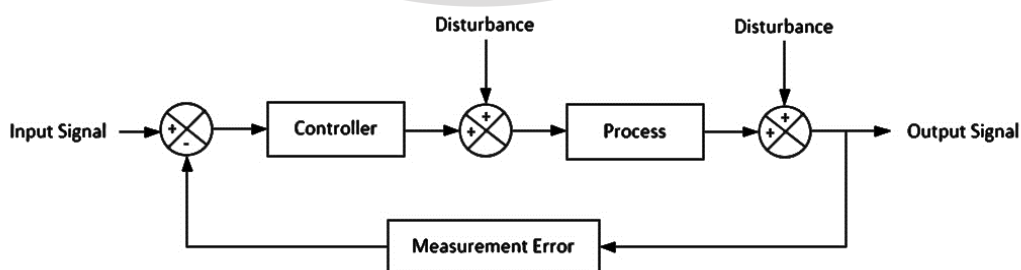
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยสัญญาณแรงดันและกระแสที่วัดได้จากปลายขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและที่ขั้วของระบบไฟฟ้านั้นจะเป็นแรงดันไลน์ 2 เฟส เปรียบเทียบกันแล้วทำการเปลี่ยนแปลงให้ค่าอยู่ในรูปของค่าต่อหน่วยดังภาพที่ 3-9 ก่อนที่จะนำเข้าสู่การควบคุมโดยการใช้ Block diagram



ภาพที่ 3-9 บล็อกวัดสัญญาณวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากนั้นใช้หลักการตัวควบคุมแบบ PI (PI controller) ในการรักษาระดับและควบคุมแรงดันที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยหลักการคือการนำค่าสัญญาณขาออกที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณขาเข้า และใช้วงจรควบคุมแบบ PI เพื่อควบคุมค่าความผิดพลาด (error) ให้มีค่าน้อยที่สุด จากนั้นสัญญาณขาออกที่ได้จะเป็นตัวอ้างอิงที่จะนำไปสร้างเป็นสัญญาณในการควบคุมสวิตช์ความถี่สูงโดยเทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulate : PWM)

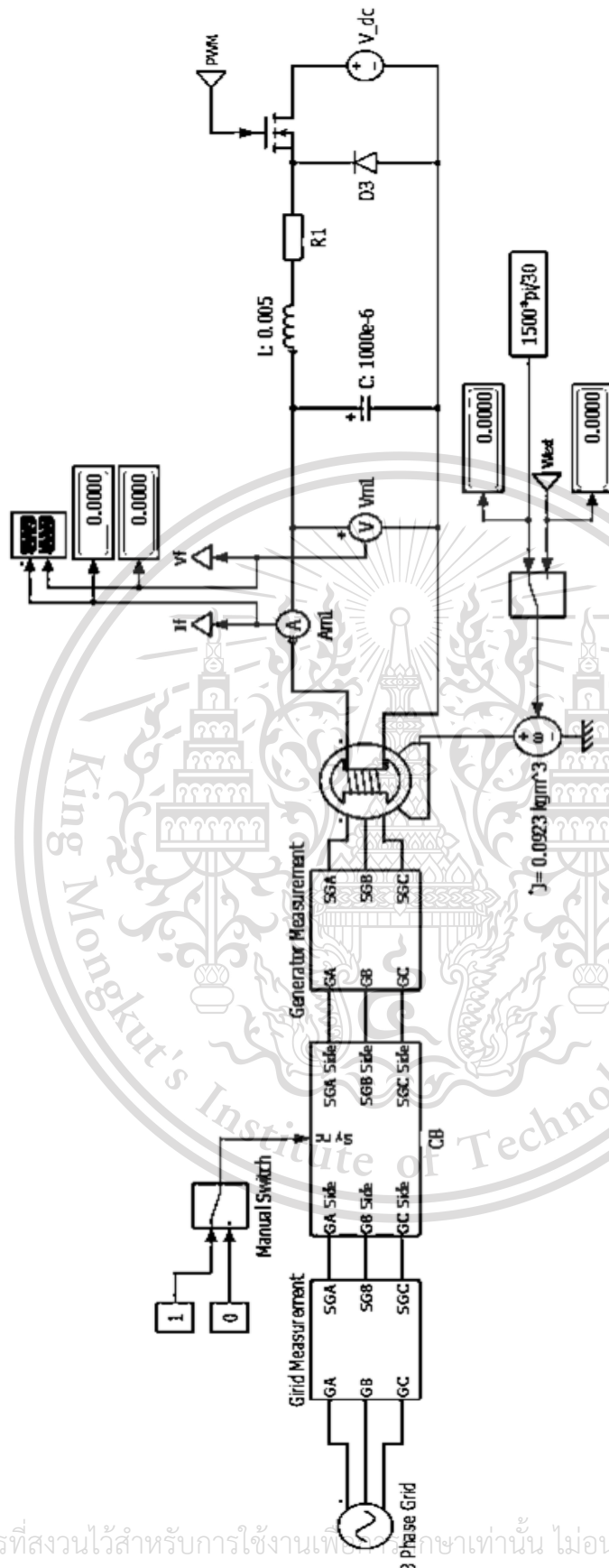


ภาพที่ 3-10 การควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 3-11 แบบจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงคอนสกับระบบไฟฟ้า 3 เฟสผ่านโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

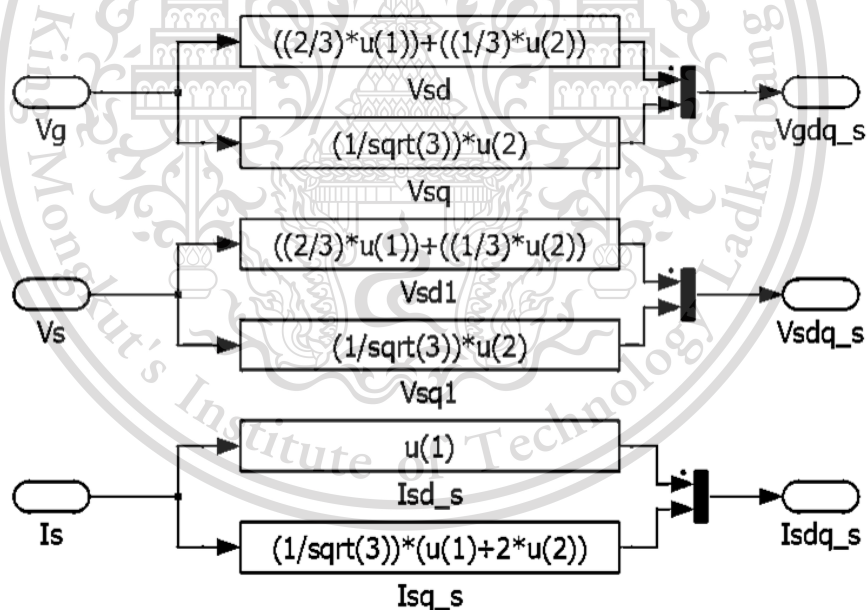
3.3.1 สัญญาณที่ใช้ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง

1. การแปลงค่าพารามิเตอร์เข้าสู่ระบบกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์

แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ได้จาก บล็อกวัดสัญญาณที่อยู่ในหน่วยต่อหน่วยแล้วจะอยู่ในกรอบอ้างอิงสามเฟส ดังนั้นต้องแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์โดยใช้สมการที่แสดงให้เห็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \\ f_{s0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

เมื่อนำมาจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ไปยังกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ เพื่อทำการควบคุมแบบ vector control ได้ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 การแปลงสัญญาณที่วัดได้ในกรอบอ้างอิงสามเฟสไปยังกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์โดยใช้การจำลองผ่านคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

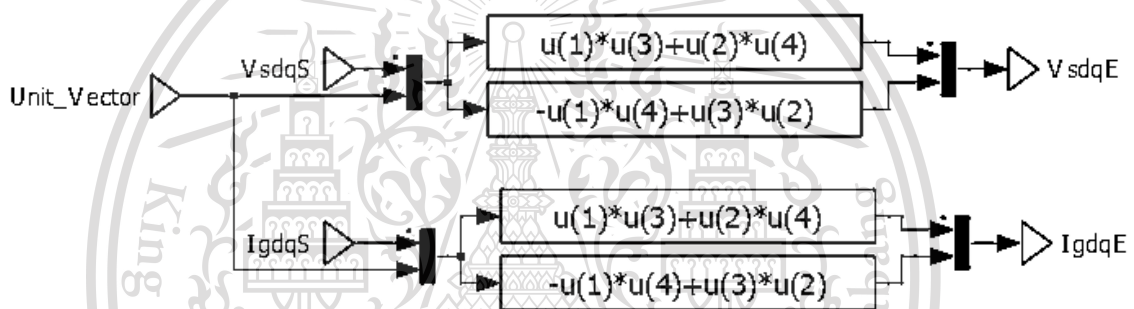
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. การแปลงค่าพารามิเตอร์จากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์เข้าสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า

จากสัญญาณในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์แปลงเป็นสัญญาณในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับโรเตอร์ ได้โดยการใช้สมการที่ 3-16 ที่แสดงให้เห็นดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

ซึ่งการแปลงสัญญาณมาเป็นสัญญาณในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า ต้องมีการประมาณค่าแวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้า ซึ่งแวกเตอร์หนึ่งหน่วยดังกล่าวสามารถประมาณได้โดยใช้วิธีการเฟสล็อกคูลูป โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 3-13 การแปลงสัญญาณจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงแรงดันกริดโดยการจำลองผ่านคอมพิวเตอรื

3. การประมาณแวกเตอร์ของแรงดันกริดโดยใช้วิธีเฟสล็อกคูลูป

การแปลงสัญญาณจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องใช้แวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริดรวมทั้งขนาดของแวกเตอร์ ความเร็วเชิงมุม เพื่อที่จะนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในการควบคุมมุมเฟสและขนาดของแรงดัน ก่อนที่จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่การควบคุมมุมเฟสและขนาดของแรงดัน จะต้องใช้ขนาดของแวกเตอร์และแกน q ของแวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{sdqE}) ไปเป็นตัวเปรียบเทียบ ตามลำดับ เพื่อทำการควบคุมแบบป้อนกลับที่วงจรถอดทอนแรงดันและปรับความเร็วของตัวต้นกำลัง

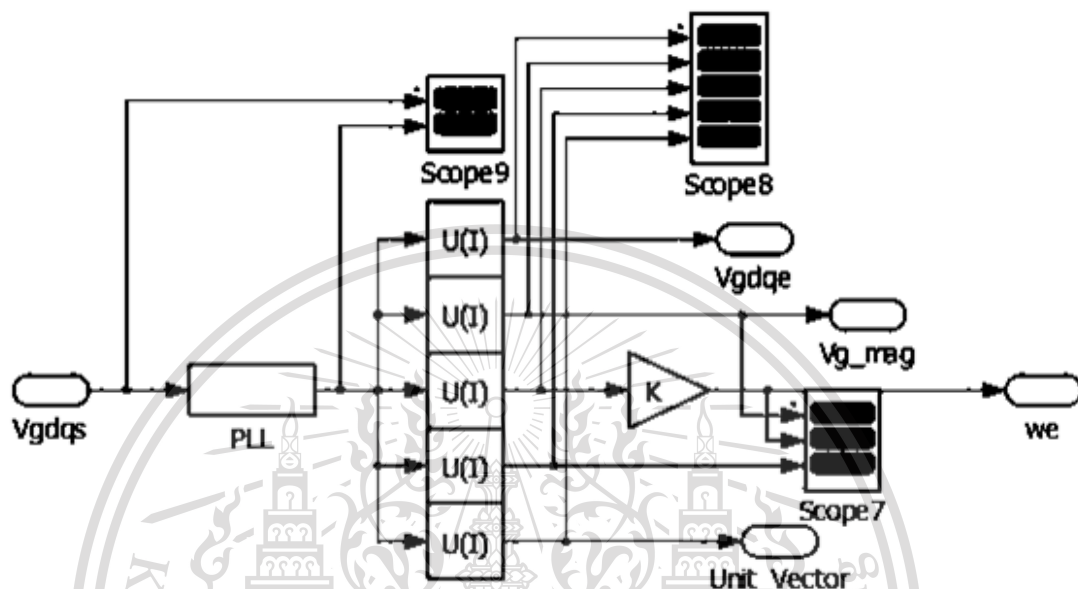
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ดังนั้นวิธีการทำเฟสล็อกคูลูปดังภาพที่ 3-14 จึงมีความจำเป็นมากในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งวิธีการเฟสล็อกคูลูปสามารถหาแวกเตอร์หนึ่งหน่วยและความเร็วเชิงมุมได้โดยการที่ป้อน

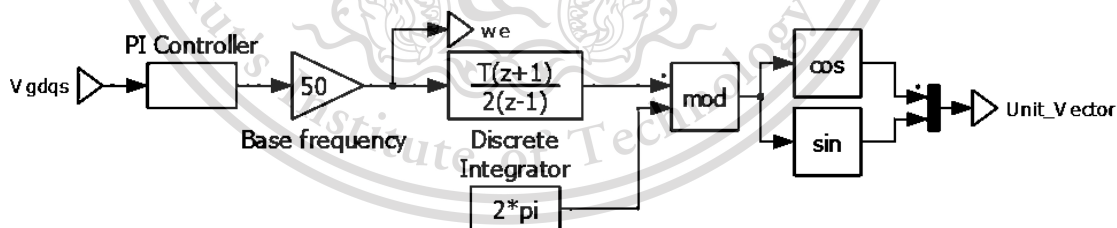
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เวกเตอร์ของสัญญาณใดๆเข้าไป จากนั้นใช้ตัวควบคุมแบบ PI ผลตอบสนองและทำการอินทิเกรตสัญญาณเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อหาผล จากนั้นทำการแปลงให้เป็นเวกเตอร์ ดังที่แสดงให้เห็นในภาพ 3-15 โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3-14 แบบจำลองการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีเฟสล็อกคูลูปเพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆของเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบระบบไฟฟ้า



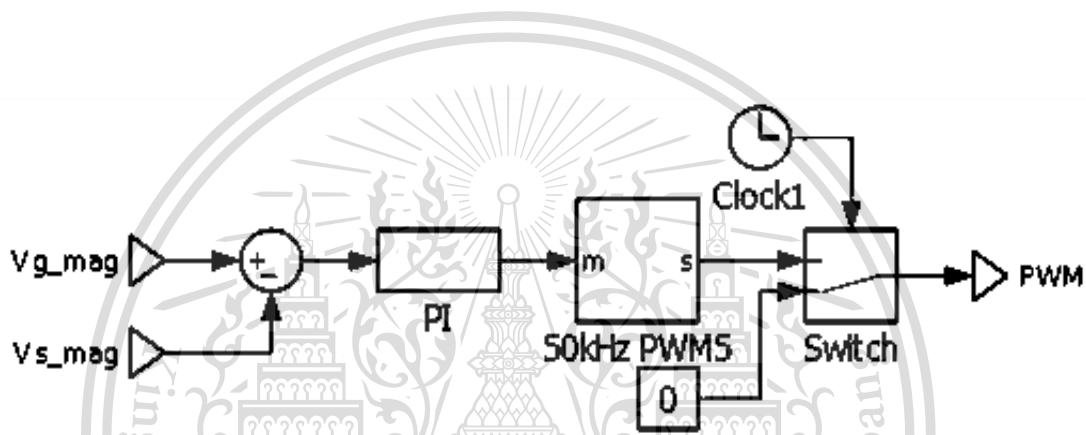
ภาพที่ 3-15 แบบจำลองการหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วยโดยวิธีการเฟสล็อกคูลูป เพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
3.3.2 การคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อกระตุ้นที่ขดลวดสนามโดยใช้การควบคุมแบบ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ป้อนกลับ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การควบคุมกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์อาศัยการจ่ายแรงดันของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมสวิทช์ความถี่สูง (MOSFET) โดยการใช้เทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulate : PWM) ซึ่งใช้การควบคุมแบบป้อนกลับเป็นตัวควบคุม โดยมีขนาดของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{g_mag}) เป็นสัญญาณอ้างอิง และใช้ขนาดของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{s_mag}) เป็นตัวเปรียบเทียบดังภาพที่ 3-16 และใช้ตัวควบคุมแบบ PI เพื่อเป็นตัวควบคุมภายในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ ก่อนที่จะนำสัญญาณขาออกไปสร้างสัญญาณ PWM ตามที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 3-16 เพื่อนำไปควบคุมสวิทช์ความถี่สูงในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ตามภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-16 การจำลองวงจรการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายที่ขดลวดสนามโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

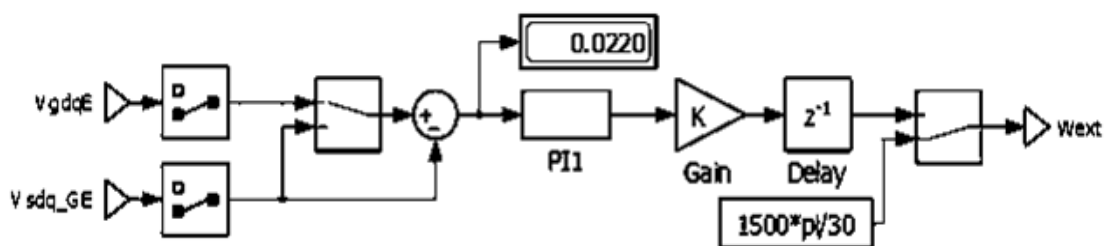
3.3.3 การควบคุมความต่างเฟสของของแรงดันโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ

การควบคุมความต่างของมุมเฟสของแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแรงดันจากระบบไฟฟ้าจะใช้องค์ประกอบแกนคิของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{gdqE}) เป็นตัวอ้างอิง และใช้องค์ประกอบแกนคิของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด ($V_{gdq_{GE}}$) เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI เพื่อเป็นตัวควบคุมภายในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับในลักษณะเดียวกันกับวงจรการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายที่ขดลวดสนาม ดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 3-17 ซึ่งค่าสัญญาณที่ถูกควบคุมนี้เองจะถูกเปลี่ยนให้เป็นความเร็วเชิงมุมทางกลเพื่อที่จะนำไปควบคุมความเร็วของตัวต้นกำลังทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 3-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 3-17 แบบจำลองการควบคุมความต่างเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดและ
แรงดันกริดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

การทดสอบและการประเมินผล

4.1 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

4.1.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์

จากการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์โดยวิธีการ VI-Method โดยการเพิ่มไฟฟ้ากระแสตรงครั้งละ 0.5 A ทำให้ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลจากการทดสอบ VI-Method ที่ขดลวดอาร์มาเจอร์

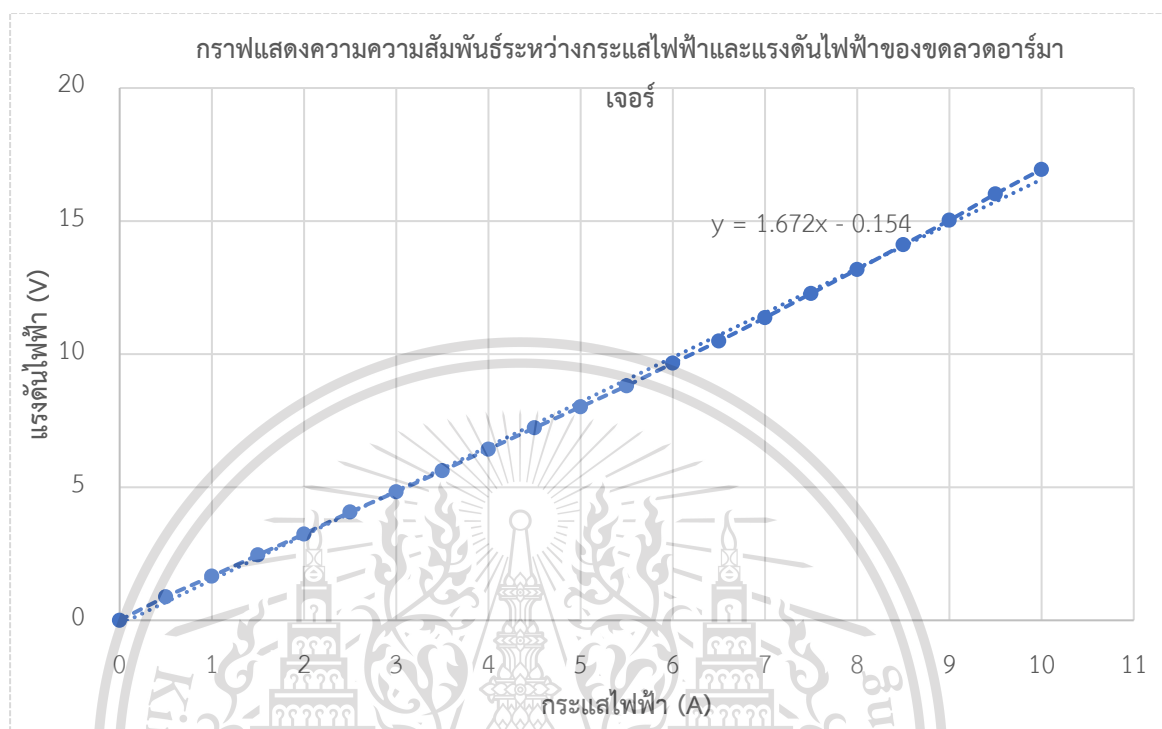
I	V
0	0
0.5	0.883
1	1.658
1.5	2.455
2	3.242
2.5	4.068
3	4.828
3.5	5.62
4	6.428
4.5	7.23
5	8.02
5.5	8.81
6	9.66
6.5	10.49
7	11.37
7.5	12.28
8	13.18
8.5	14.11
9	15.03
9.5	16.02
10	16.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.1 จะสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขดลวดอาร์มาเจอร์ได้ดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขดลวดอาร์มาเจอร์

จากภาพที่ 4-1 จะทำให้ทราบค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์จากความชันของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.672Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.2 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสนาม

จากการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์โดยวิธีการ VI-Method โดยการเพิ่มไฟฟ้ากระแสตรงครั้งละ 0.5 A ทำให้ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2

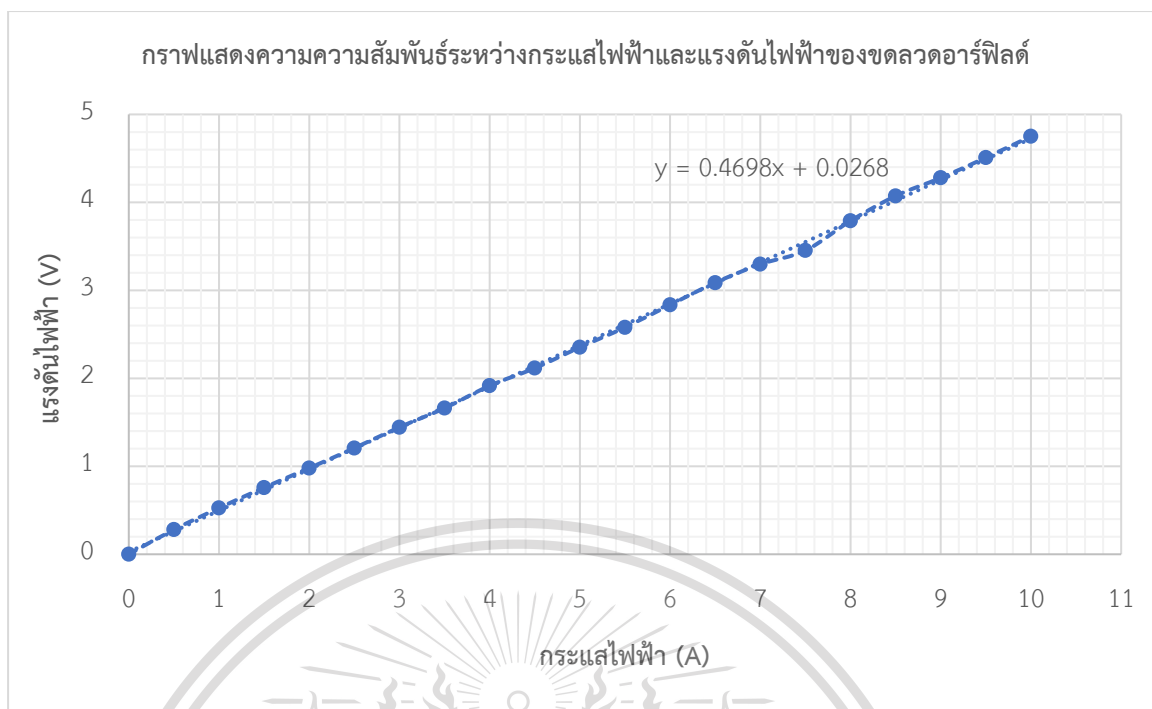
ตารางที่ 4.2 ผลจากการทดสอบ VI-Method ที่ขดลวดสนาม

I	V
0	0
0.5	0.28
1	0.526
1.5	0.758
2	0.98
2.5	1.207
3	1.444
3.5	1.661
4	1.916
4.5	2.116
5	2.353
5.5	2.579
6	2.835
6.5	3.087
7	3.297
7.5	3.453
8	3.79
8.5	4.073
9	4.279
9.5	4.509
10	4.751

จากตารางที่ 4.2 จะสามารถสร้างกราฟแสดงความความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขดลวดสนามได้ดังภาพที่ 4-1

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ
ขดลวดสนาม

จากภาพที่ 4-2 จะทำให้ทราบค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์จากความชันของ
กราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4698 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.3 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว

การทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว จะสามารถหาได้จากกราฟคุณลักษณะขณะเปิดวงจรและลัดวงจร ซึ่งได้ผลการทดสอบขณะเปิดวงจร ดังตารางที่ 4.3 และผลการทดสอบขณะปิดวงจร ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบขณะเปิดวงจร

Field current (A)	Terminal voltage AC (V)	Terminal voltage (p.u.)
0	1.31	0.003447
0.770	26.7	0.070263
2.460	86.8	0.228421
3.340	114.8	0.302105
4.770	164.1	0.431842
5.940	203.6	0.535789
7.450	257.4	0.677368
7.790	266.5	0.701316
8.950	302.7	0.796579
9.150	308.1	0.810789
11.500	377.9	0.994474
12.400	390	1.026316
12.550	392.1	1.031842
13.660	408.1	1.073947
14.740	416.2	1.095263
15.100	418.2	1.100526

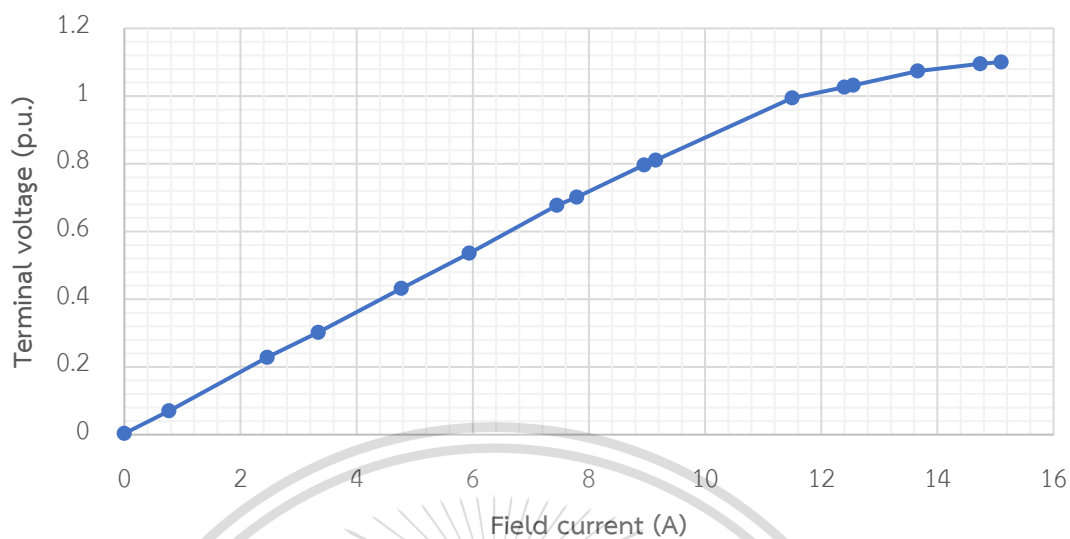
จากตารางที่ 4.3 จะสามารถสร้างกราฟผลการทดสอบขณะเปิดวงจร ดังภาพที่ 4-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กราฟผลการทดสอบขณะเปิดวงจร (Open circuit test)



ภาพที่ 4-3 กราฟผลการทดสอบขณะเปิดวงจร (Open circuit test)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบขณะปิดวงจร (Short circuit test)

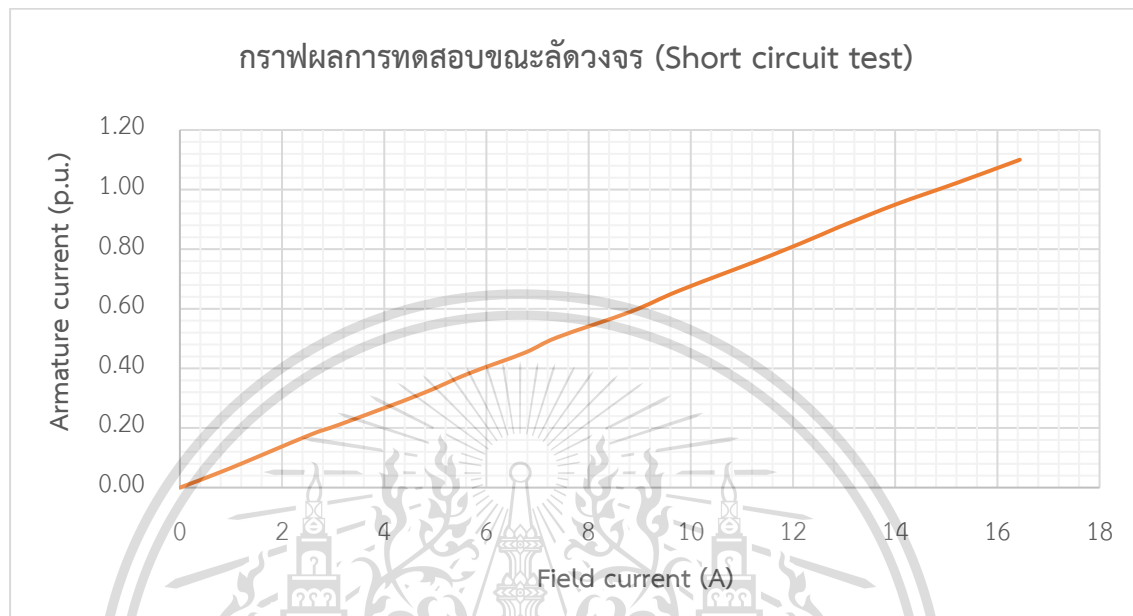
Field current (A)	Armature current AC (A)	Armature current (p.u.)
0	0.00	0.00
0.95	0.77	0.06
2.55	2.18	0.18
3.12	2.60	0.21
4.69	3.84	0.31
5.65	4.71	0.38
6.75	5.57	0.45
7.38	6.20	0.50
8.83	7.27	0.59
9.78	8.14	0.66
11.50	9.53	0.77
12.57	10.46	0.85
12.91	10.77	0.88
14.03	11.71	0.95
15.19	12.57	1.02
16.44	13.54	1.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากตารางที่ 4.4 จะสามารถสร้างกราฟผลการทดสอบขณะเปิดวงจร (Open circuit test) ดังภาพที่ 4.4



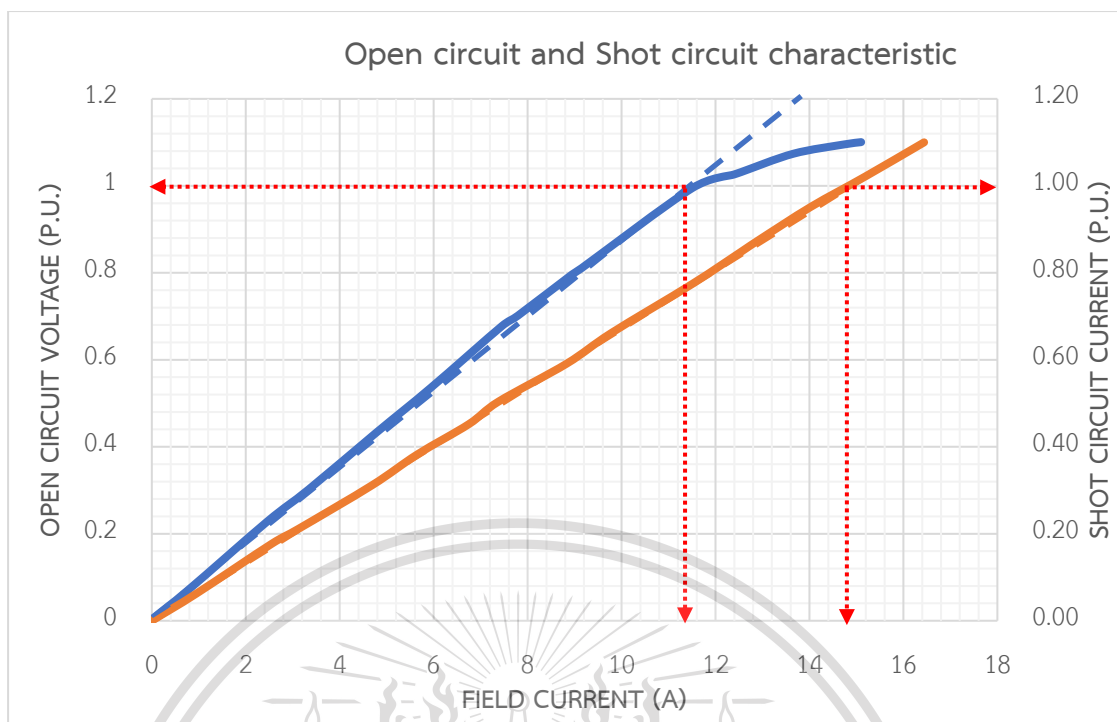
ภาพที่ 4-4 กราฟผลการทดสอบขณะลัดวงจร (Short circuit test)

จากตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4 จะสามารถสร้างกราฟคุณลักษณะขณะเปิดวงจรและลัดวงจร (Open-circuit and short-circuit characteristics) ดังภาพที่ 4-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4-5 กราฟคุณลักษณะขณะเปิดวงจรและลัดวงจร
(Open-circuit and short-circuit characteristics)

จากกราฟคุณลักษณะขณะเปิดวงจรและลัดวงจรนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำในสถานะที่ไม่อิ่มตัวในแกน d ในหน่วยต่อหน่วย

$$X_{du}(p.u.) = 1.287 \text{ p. u.}$$

จากการคำนวณด้วยวิธีการทางเทคนิคตามเอกสารทางวิชาการ ได้ค่า

- ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำในสถานะที่ไม่อิ่มตัวในแกน q ในหน่วยต่อหน่วย $X_{qu}(p.u.) = 0.665 \text{ p. u.}$
- ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดสนาม ในหน่วยต่อหน่วย (Field winding leakage reactance) $X'_{ld} = 0.0504 \text{ p. u.}$
- ค่าความต้านทานของขดลวดสนามที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ ในหน่วยต่อหน่วย (Field resistance) $R'_{fd}(p.u.) = 0.0338 \text{ p. u.}$
- ค่ารีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของขดลวดหน่วงในหน่วยต่อหน่วย

$$(Dampers winding leakage reactance) X'_{kd} = 0.0504 \text{ p. u.}$$

$$\text{ค่าความต้านทานของขดลวดหน่วงที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ ในหน่วยต่อหน่วย}$$

$$(Field resistance) \text{ ในหน่วยต่อหน่วย } R'_{kd}(p.u.) = 0.0349 \text{ p. u.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่การเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่นำมาใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.4 ผลการทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio)

จากการทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio) ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 30 V จ่ายเข้าไปที่ขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์ จากนั้นทำการหมุนโรเตอร์ไปที่ตำแหน่งมุมต่าง ๆ โดยเพิ่มมุมครั้งละ 30 องศา ซึ่งได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันที่ขดลวดสนามหลังจากหมุนตำแหน่งของโรเตอร์ไปที่มุมต่าง ๆ

Angle	V_{field}		
	A-C	A-B	B-C
0	22.8	25.4	20.8
30	10.4	24	25.2
60	25.2	13.4	24
90	23.6	25.2	15.6
120	13.4	23.5	25.3
150	25.2	17.7	23.2
180	22.5	25.4	17.7
210	20.2	21.1	25.5
240	25.5	21.3	20.6
270	21.5	25.5	19.8
300	20.5	19.8	25.5
330	25.5	20.7	18.9
360	21.4	25.4	19.8

จากนั้นหาอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนาม ซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนามที่มุมต่าง ๆ

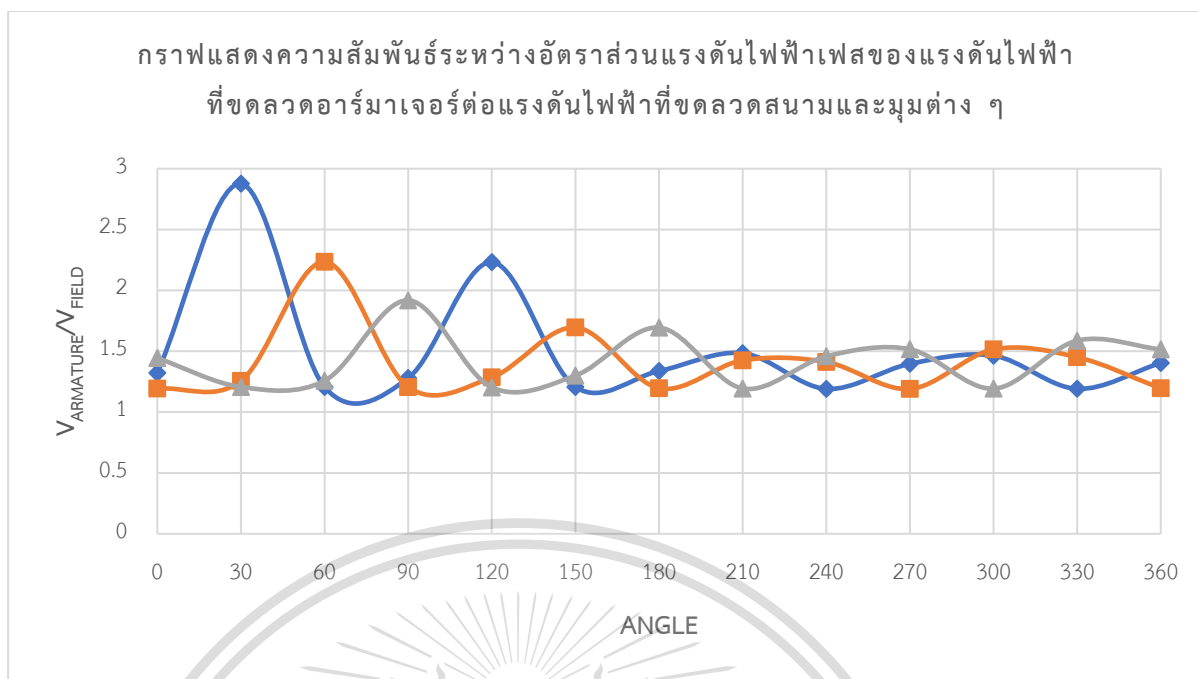
Angle	ratio Line to Line		
	AC	AB	BC
0	1.322368	1.192913	1.44375
30	2.875962	1.25625	1.206349
60	1.205952	2.235075	1.257917
90	1.279661	1.205556	1.917949
120	2.23209	1.285106	1.202767
150	1.206349	1.69548	1.300000
180	1.337333	1.196063	1.69435
210	1.484158	1.425118	1.193725
240	1.19098	1.411268	1.458738
270	1.396744	1.190196	1.516162
300	1.463415	1.515152	1.192549
330	1.191373	1.451208	1.586772
360	1.404206	1.195276	1.515152

จากนั้นจะสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนามและมุมต่าง ๆ ได้ดังภาพที่ 4-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนามและมุมต่าง ๆ

จากภาพที่ 4-6 จะสามารถหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ration) ได้จากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนาม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.7 สรุปพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

Parameters	Quantity
1. Stator resistance (R_s)	1.672 Ω
2. Stator leakage reactance (X_l)	0.08 pu
3. Saturated magnetizing reactance in d axis (X_{ad})	2.074 p.u.
Saturated magnetizing reactance in q axis (X_{aq})	1.072 p.u.
4. Unsaturated synchronous reactance in d axis (X_{du})	1.7745 p.u.
Unsaturated synchronous reactance in q axis (X_{qu})	0.917 p.u.
5. Field resistance (R_f)	0.4698 Ω
6. Field leakage reactance (X'_{lfd}) (referred)	0.0504 p.u.
7. Damper resistance in d axis (R'_{kd})	0.0349 p.u.
Damper resistance in q axis (R'_{kq})	0
8. Turn ratio (N_s/N_f)	1.5
9. inertia (J)	0.0923 kgm ³
10. Friction coefficient (F)	0
11. Pole pair	2
12. Damper leakage reactance (X'_{lkd})	0.0504 p.u.
Damper leakage reactance (X'_{lkq})	-
13. Initial rotor position (t_{m0})	$\pi / 2$
14. Initial rotor speed (ω_{m0})	100 π

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2 ผลการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

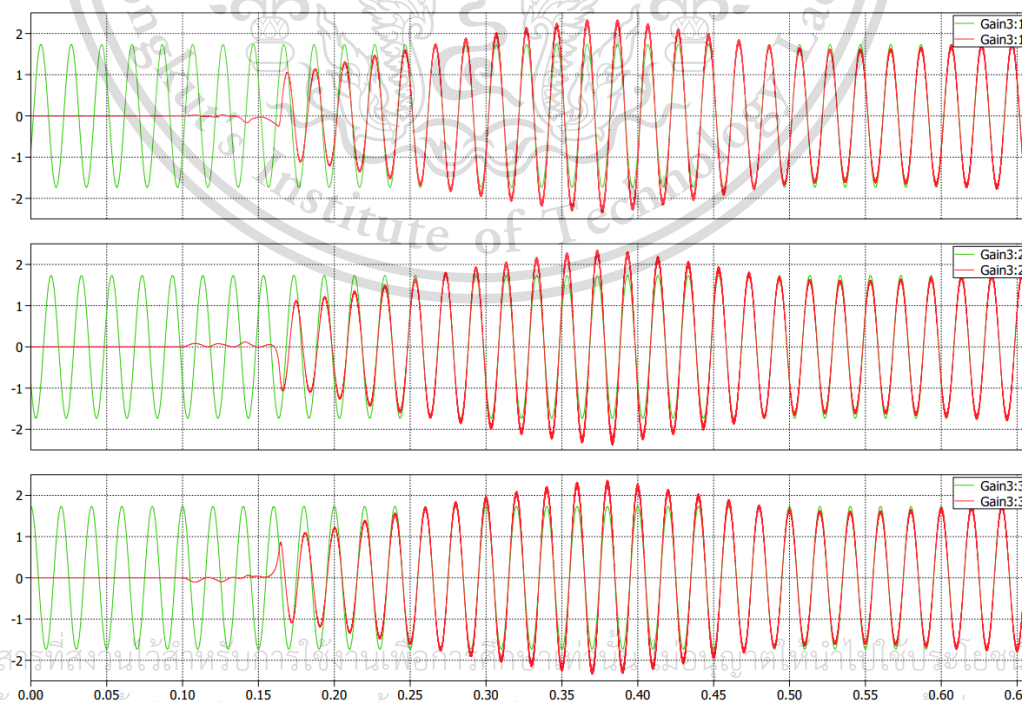
จากการจำลองการทดลองต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าได้ผลลัพธ์ดังนี้

4.2.1 ผลการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะแสดงผลจากการจำลองเป็นกราฟสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ทั้งจากฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสและระบบไฟฟ้า โดยจะทำการบันทึกผลลัพธ์เป็น 3 ช่วงย่อย ๆ คือ ขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนการขนาน ขณะทำการขนาน และหลังทำการขนานเรียบร้อยแล้ว โดยสัญญาณสีเขียวคือสัญญาณแรงดันที่ระบบไฟฟ้า ส่วนสีแดงเป็นแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส และทำการวัดค่าสัญญาณแรงดันเฟสที่ละ 1 เฟส แสดงดังภาพที่ 4-7 4-8 และ 4-9 ส่วนสัญญาณเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าในนี้จะแสดงเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสและระบบไฟฟ้า ที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า

4.2.1.1 ผลการจำลองขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนการขนาน

ค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสของระบบไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะเริ่มเดินเครื่องก่อนทำการขนาน แสดงตามภาพที่ 4-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

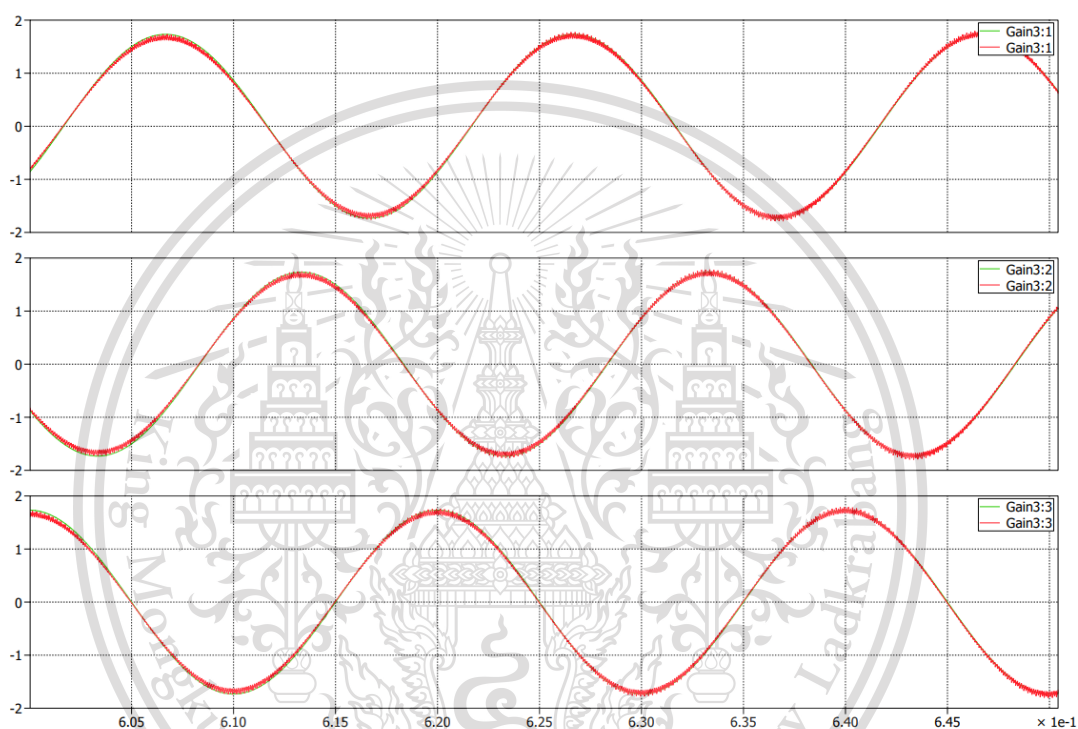
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาพที่ 4-7 ผลการจำลองแสดงรูปคลื่นแรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ก่อนการขนานของเฟส A B และ C ตามลำดับ

4.2.1.2 ผลการจำลองขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์อยู่ในสภาวะคงตัวพร้อมทำการขนาน

ค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสของระบบไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนส์อยู่ในสภาวะคงตัวพร้อมทำการขนาน แสดงตามภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ผลการจำลองแสดงรูปคลื่นแรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ขณะทำการขนาน เฟส A B และ C ตามลำดับ

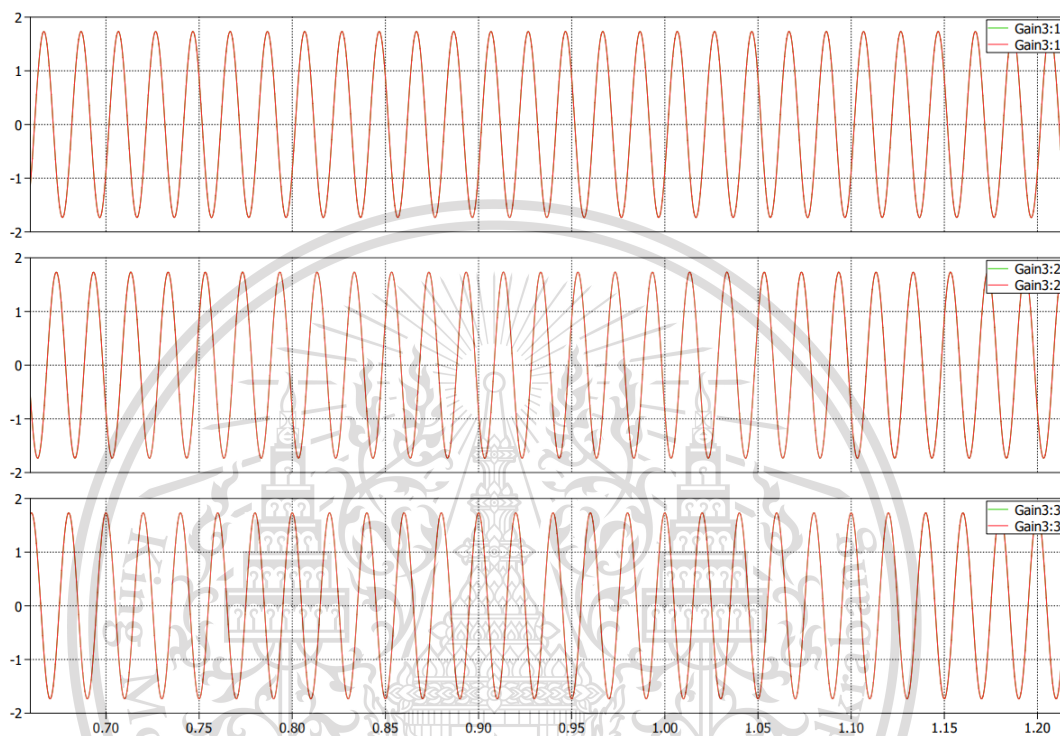
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.1.3 ผลการจำลองหลังจากทำการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า

ค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสของระบบไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว แสดงตามภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 ผลการจำลองแสดงรูปคลื่นแรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์หลังจากทำการขนานเรียบร้อยแล้ว เฟส A B และ C ตามลำดับ

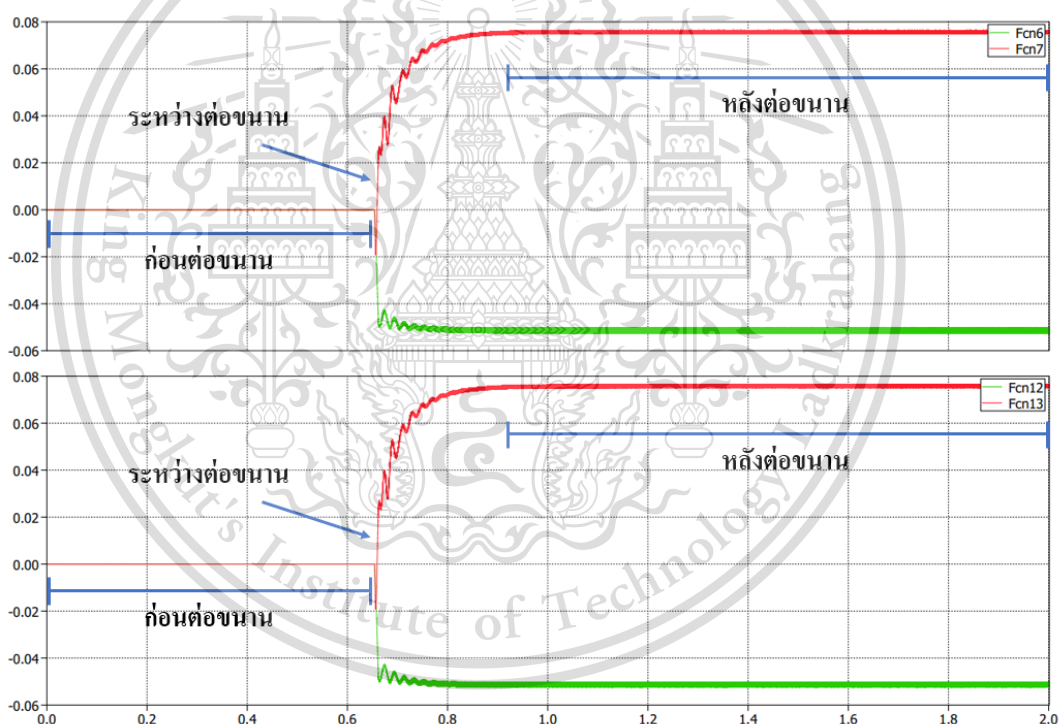
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.1.4 ผลสัญญาณเวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส

สัญญาณกระแสไฟฟ้าในที่นี้จะแสดงเวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสและระบบไฟฟ้า ที่อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า โดยจะแบ่งช่วงสัญญาณ เป็น 3 ช่วงได้แก่ ขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนการขนาน ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอยู่ใน สภาวะคงตัวพร้อมทำการขนาน และ หลังจากทำการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยสัญญาณสีแดงคือ เวกเตอร์กระแสไฟฟ้าในแกน d และสีเขียวคือเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าในแกน q ในภาพที่ 4-10 แสดง สัญญาณเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับจากบนลงล่าง



ภาพที่ 4-10 สัญญาณเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (I_{gdqE} , I_{sdqE})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

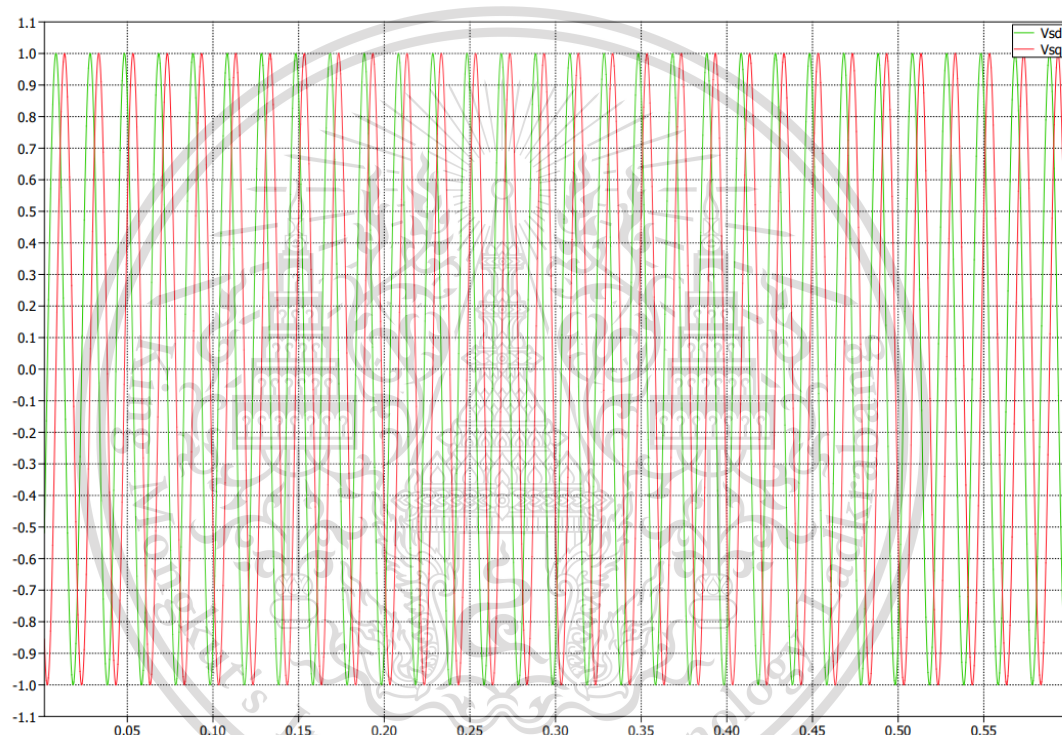
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3 รูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีการบ่อ้างอิง

ในส่วนนี้จะแสดงรูปคลื่นสัญญาณส่วนที่ใช้ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้ทฤษฎีการบ่อ้างอิง ได้แก่ การแปลงค่าพารามิเตอร์เข้าสู่ระบบการบ่อ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ และการแปลงค่าพารามิเตอร์จากการบ่อ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับกรอบอ้างอิงแรงดันกริด

4.3.1 รูปคลื่นสัญญาณการแปลงค่าพารามิเตอร์เข้าสู่ระบบการบ่อ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์

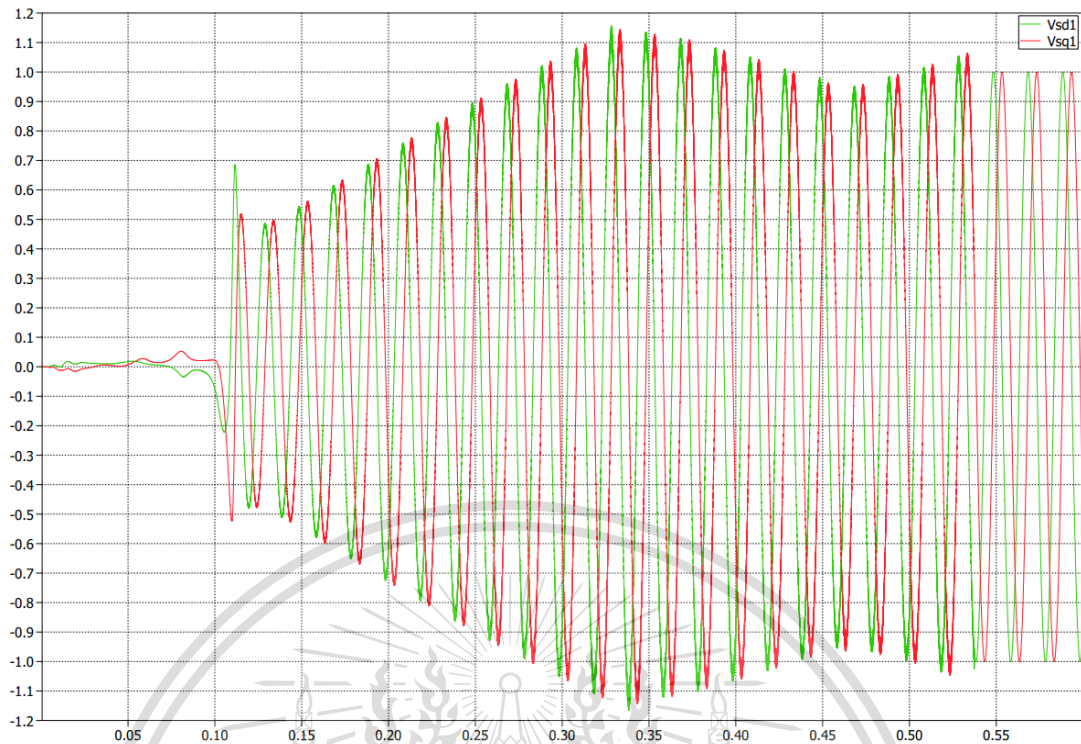


ภาพที่ 4-11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ (V_{gdqs})

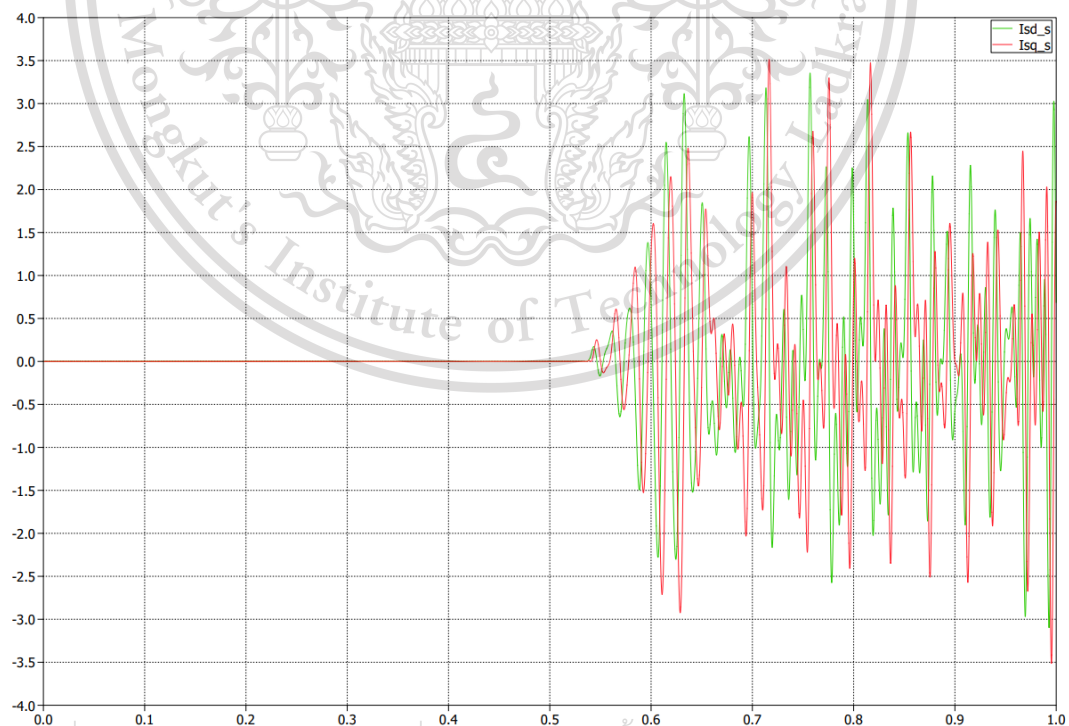
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4-12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอร์ (V_{sdqs})



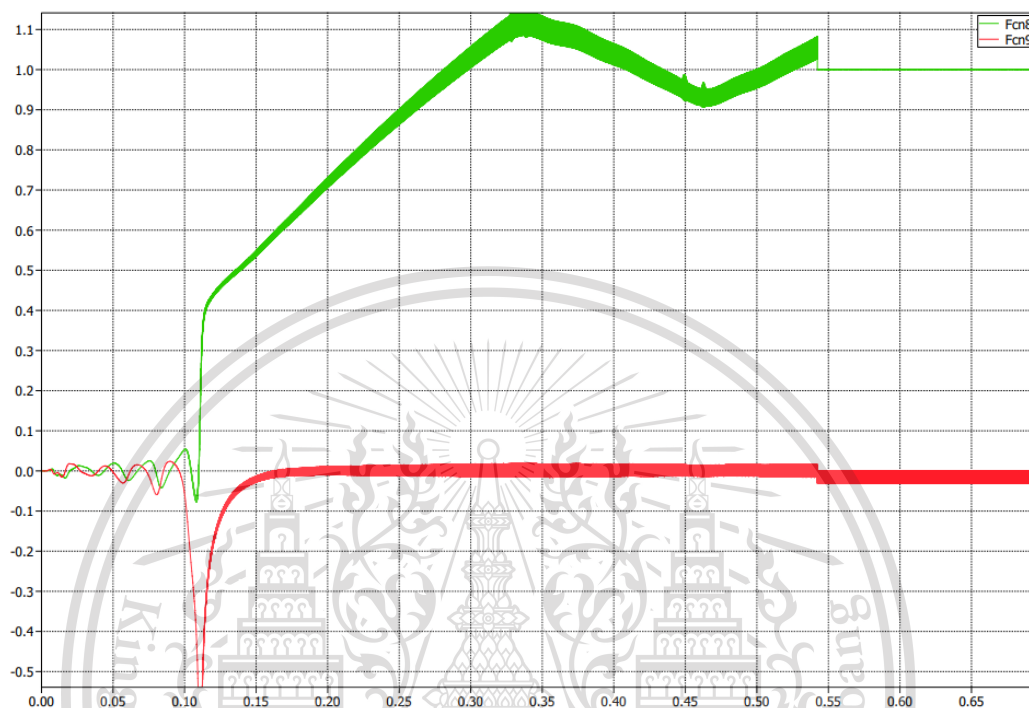
ภาพที่ 4-13 สัญญาณกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอร์ (I_{sdqs})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุที่จำเป็นจริงๆ และต้องขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ก่อนนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3.2 รูปคลื่นสัญญาณการแปลงค่าพารามิเตอร์จากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบสเตเตอร์เข้าสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบระบบไฟฟ้า



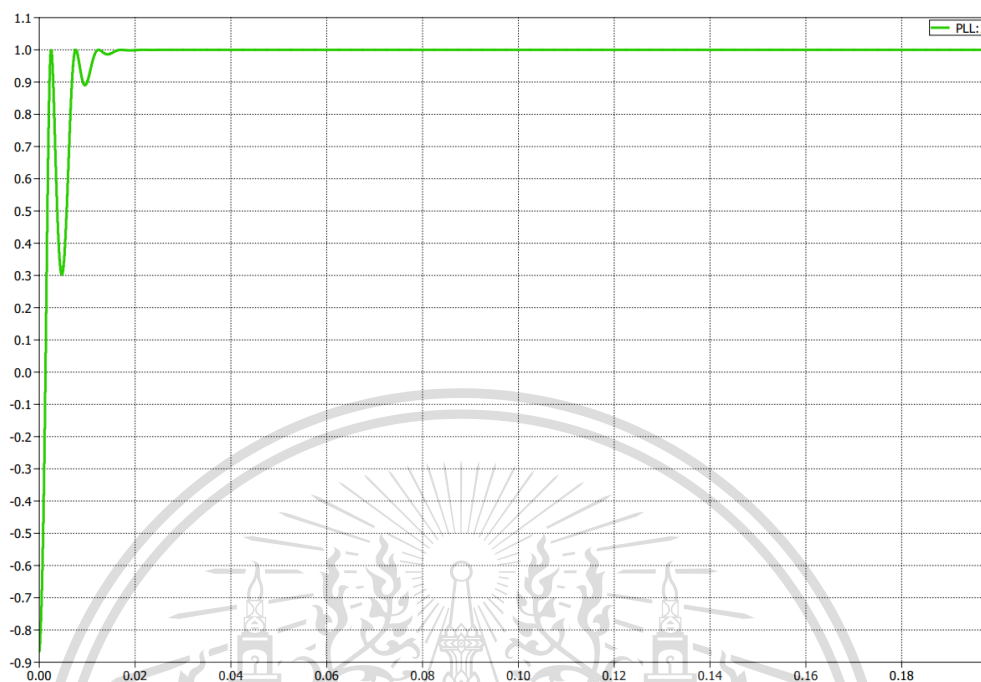
ภาพที่ 4-14 สัญญาณแวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{gdq_GE})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

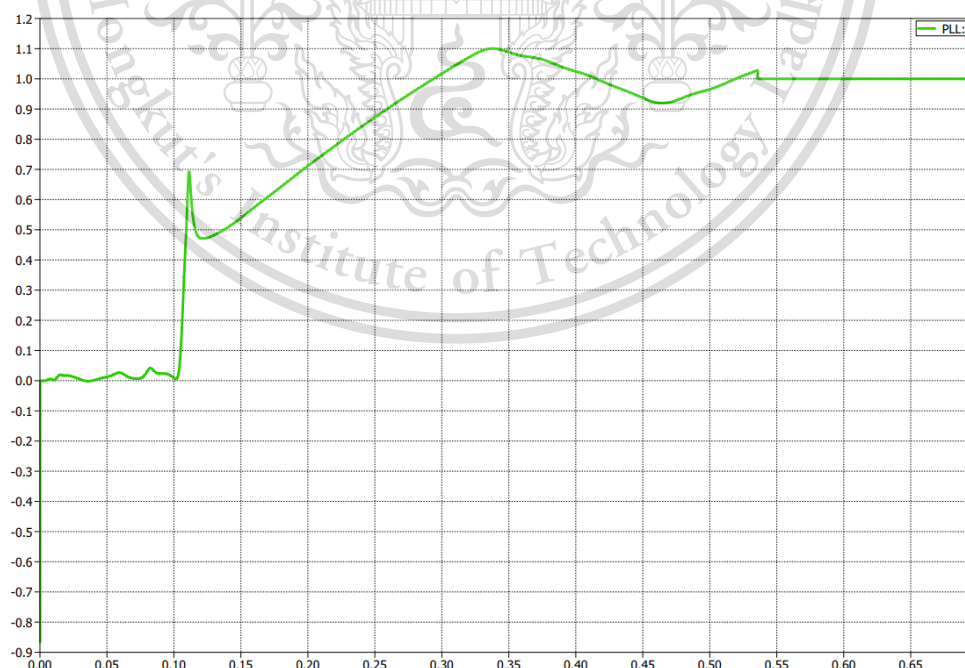
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.4 รูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมซึ่งได้จากวิธีการทำเฟสล็อกคูลูป



ภาพที่ 4- 15 สัญญาณขนาดของเวกเตอร์แรงดันกริดที่ทำการประมาณโดยใช้เฟสล็อกคูลูป

(V_{g_mag})

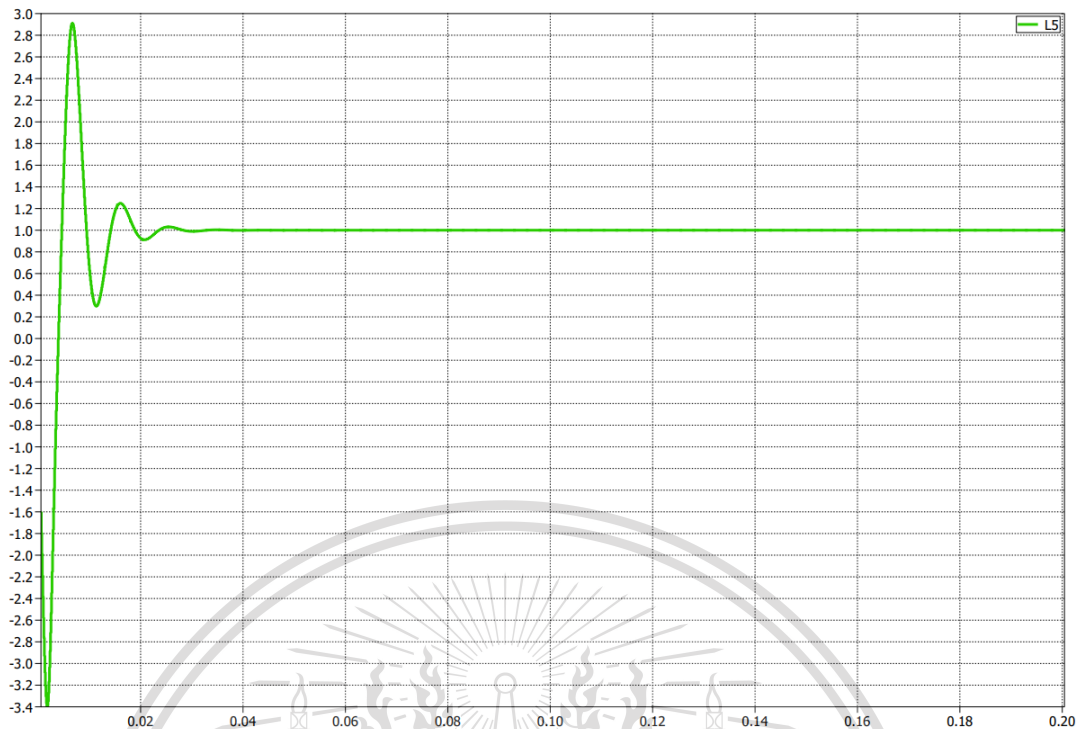


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

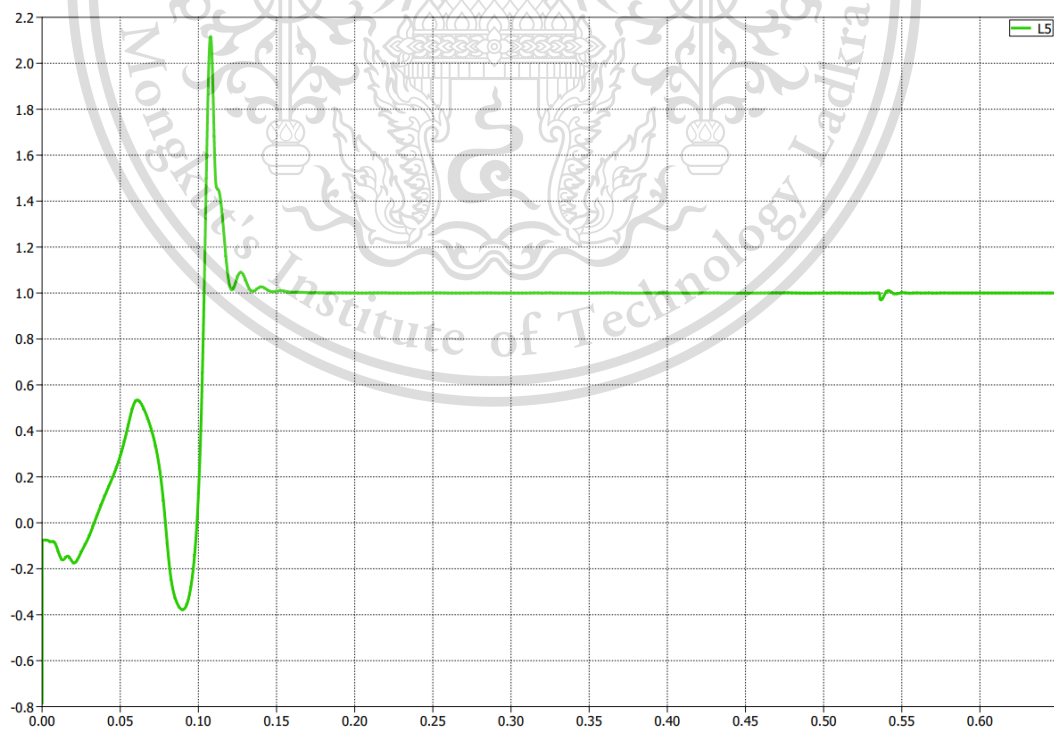
ภาพที่ 4-16 สัญญาณขนาดของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการประมาณโดย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การใช้เฟสล็อกคูลูป (V_{s_mag})

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4-17 สัญญาณของความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าในหน่วยต่อหน่วยของเวกเตอร์แรงดัน
ระบบไฟฟ้าทำการประมาณโดยใช้เฟสล็อกคูล (We_{g,pu})



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 4-18 สัญญาณของความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าในหน่วยต่อหน่วยของเวกเตอร์แรงดัน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการประมาณโดยใช้เฟสล็อกคูล (We_{s,pu})

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



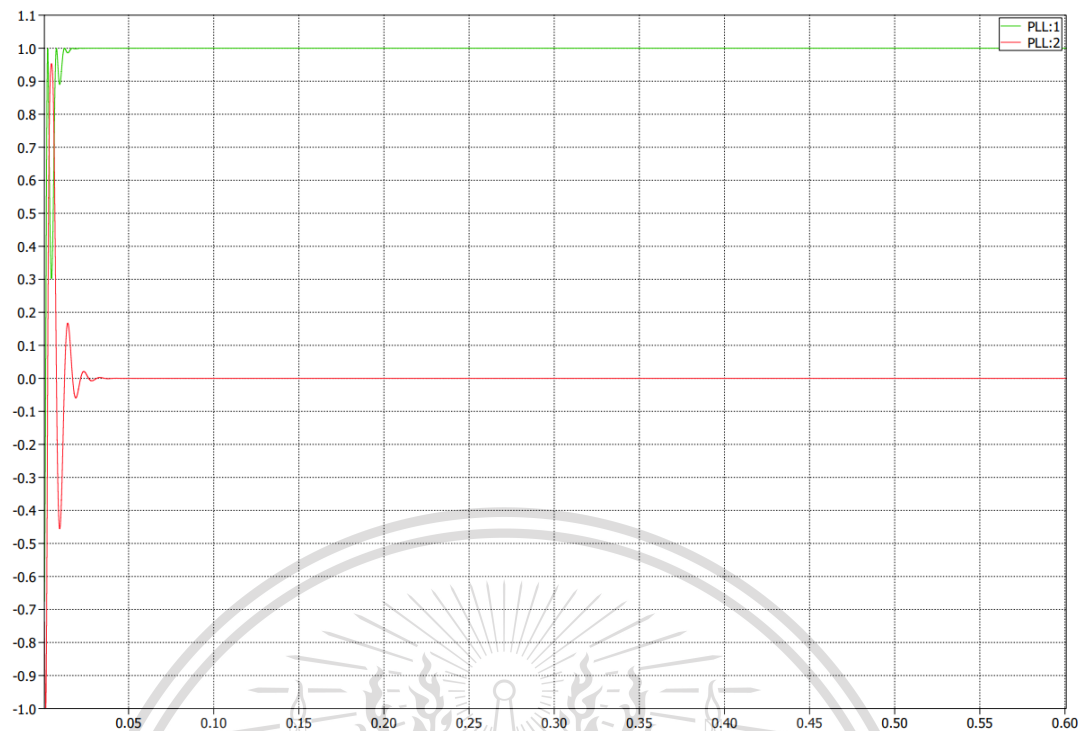
ภาพที่ 4-19 สัญญาณเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด
(Unit_Vector_G)



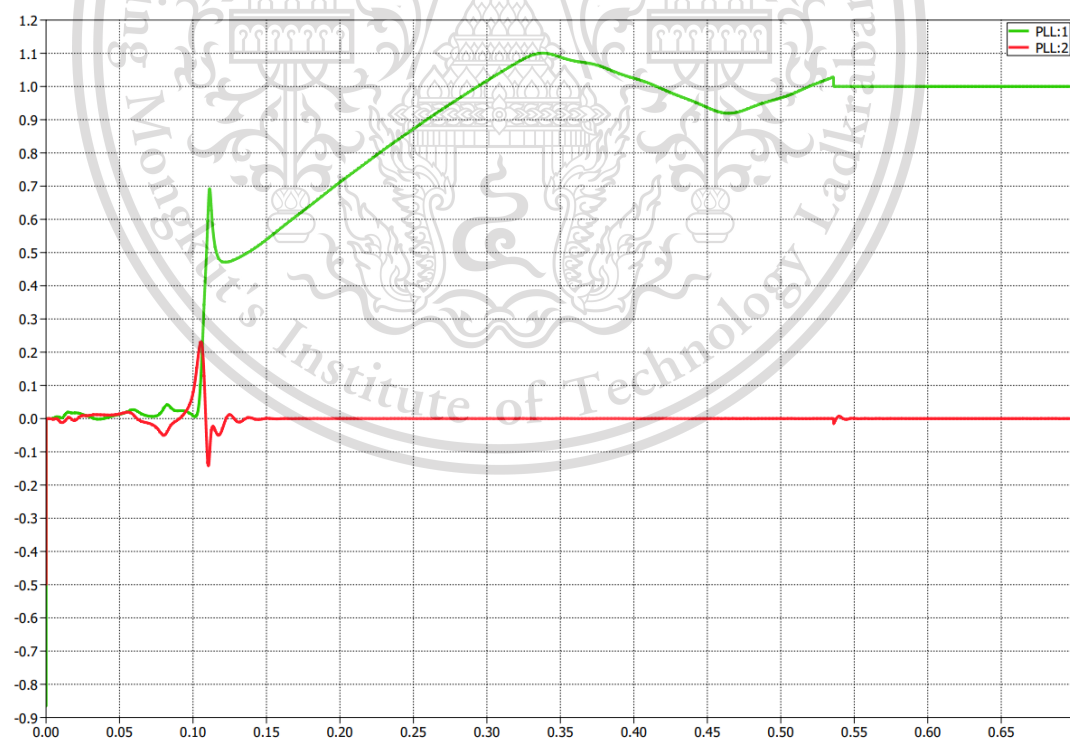
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 4-20 สัญญาณเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของเวกเตอร์แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
แรงดันสเตเตอร์(Unit_Vector_S)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4-21 สัญญาณของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{gdqE})



ภาพที่ 4-22 สัญญาณของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{sdq_GE})

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า และการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์มาใช้ในการทดสอบข้างต้นโดยวิธีการคำนวณและผลลัพธ์ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.2 จากการทดสอบหาพารามิเตอร์ในหัวข้อ 4.1 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะนำมาใช้สำหรับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แม่นยำ และใกล้เคียงการทดลองจริง ในส่วนของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าในช่วงแรกเมื่อเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและมีค่ายอดในช่วงแรก ก่อนแรงดันจะปรับลดลงมาเนื่องจากการทำงานของวงจรควบคุม PI โดยใช้หลักการ Phase lock loop ทั้งนี้ความเร็วในการปรับระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้มีค่าเท่ากับระบบไฟฟ้านั้น ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ K_p และ K_i ของวงจรควบคุม PI และจะทำการทดสอบต่อขนานได้เมื่อสัญญาณแรงดันของทั้งฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและระบบไฟฟ้า มีค่าใกล้เคียงกัน และกราฟใกล้เคียงจะทับกัน จะมีความแม่นยำและปลอดภัยต่อทั้งระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยการทดสอบได้แก่ การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสนาม การทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio) และการทดสอบ การทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing reactance) ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร รวมถึงการนำค่าจากคู่มือจากทางผู้ผลิต นำมาสร้างเป็นโมเดลจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อทำการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ช่วงได้แก่ ขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสก่อนทำการขนาน ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอยู่ในสภาวะคงตัวพร้อมทำการขนาน และขณะทำการขนานเรียบร้อยแล้ว เพื่อศึกษาผลลัพธ์คือสัญญาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ทุกการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถนำไปจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้จริง ทำให้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบระบบจริงมากที่สุด
2. การจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า สามารถควบคุมระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าเข้าใกล้ทางฝั่งระบบไฟฟ้าได้มาก และยังสามารถทำการขนานด้วยความเร็วที่น่าพึงพอใจเนื่องจากผลของการใช้วงจรควบคุมแบบ PI ในการประมวลผลค่าแรงดันที่ต่างกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและระบบไฟฟ้า โดยเมื่อใช้หลักการของการแปลงเข้าสู่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ และโรเตอร์ตามลำดับ ไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของต้นกำลังทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เมื่อทำงานร่วมกับการควบคุมแรงดันที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ด้วยสัญญาณ PWM ที่ประมวลผลความกว้างสัญญาณจากวงจรควบคุม PI ที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะทำให้สามารถควบคุมแบบเวกเตอร์ได้อย่างแม่นยำ ทำให้การขนานมีความแม่นยำและปลอดภัย จนได้ผลลัพธ์เป็นค่าสัญญาณแรงดันที่มีค่าใกล้เคียงกันมากจนกราฟสัญญาณแนบกันสนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของชุดทดลองได้ จึงจำเป็นต้องใช้ผลการทดสอบทั้งหมดในบทที่ 4 เป็นผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์
2. การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงแรกมีความผิดพลาดเนื่องจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ต้องนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปถอดอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในออก ส่งผลต่อการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. ข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้จ่ายแรงดันกระแสตรง ในหัวข้อการทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิมิตัว ทำให้ค่าที่ใกล้กับช่วงแรงดันพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้เล็กน้อย

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อมูลและวิธีการที่ได้จากปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นข้อมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่มีอยู่แล้ว และผ่านการคำนวณ วิเคราะห์อย่างถี่ถ้วนแล้ว สามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทดลองของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ เพื่อประสิทธิภาพของการสอน และประโยชน์สูงสุดของอุปกรณ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, S. Pekarek, (2013). "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [2] Stephen D. Umans. (2014). "Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery". McGraw-Hill Education, New York
- [3] S. Chapman. (2005). "Electric Machinery Fundamentals". McGraw-Hill, New York
- [4] Martina Kutija, Damir Sumina, Igoe Colovic. (2015). Magnetization of speed sensorless squirrel-cage induction generator for wind power application using a phase-locked loop. Electric Power Systems Research 122, 119-129
- [5] K A. Code, B.T. Kuhn, S.D. Sudhoff, H.J.Henger. (1998). AN IMPROVE METHODE FOR INCORPORATING MAGNETIC SATURATION IN THE Q-D SYNCHRONOUS MACHINE MODEL. IEEE Trans. Energy Convers. 13(3), 270-275.
- [6] E.Levi. (1999). Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Salient Pole Synchronous Machines. IEEE Trans. Energy Convers. 14(1), 44-50.
- [7] Huimin Wang, Xinglai Ge, Yan Yue, and Yong-Chao Liu. (2019). Dual Phase-Locked Loop-Based Speed Estimation Scheme for Sensorless Vector Control of Linear Induction Motor Drives. IEEE Trans. On Industrial Electronic. 278(46), 1-13
- [8] Mihai Comanescu, and Longya Xu. An Improved Flux Observer Based on PLL Frequency Estimator for Sensorless Vector Control of Induction Motors. IEEE Trans. Energy Convers. 53(1), 50-56
- [9] Golestan, S., & Guerrero, J. M. (2015). Conventional Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop Is An Adaptive Complex Filter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(3), 1679-1682.
- [10] Stator core and winding Hydro generator จาก <https://www.hydroreview.com/technology-and-equipment>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด [11] Rotor (electric) จาก [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotor_\(electric\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotor_(electric)) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [12] ขดลวดมอเตอร์ จาก <http://www.csmt-shop.com/>
- [13] *Electrical machines handout* (p.23), วิจิตร กิณเรศ (2019)
- [14] Rotor voltage drop test จาก <https://www.electrotechnik.net/2010/08/rotor-voltage-drop-test.html>
- [15] Dark lamp method จาก <https://mediatoget.blogspot.com/2011/04/dark-lamp-method-of-synchronizing.html>
- [16] China synchroscope meters จาก <https://kema-meter.en.made-in-china.com/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การจัดเตรียมการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอน ในวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า

Experimental Setup of the Synchronous Generators for Supporting the Electrical Machine Course

ภัทรกร วรณสนธิ ภาณุเดช โพธิ์ดี และภานุพงศ์ ตริ่มมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชอยลดงกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: prasopchok_ho@hotmail.com

บทคัดย่อ

บริบทงานที่นำเสนอคือการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม PLEXIM ซึ่งมีการทดสอบเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและนำมาใช้ในโมเดลจำลอง โดยในการจำลองดังกล่าว ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสถูกต่อเข้ากับวงจรลดทอนแรงดัน ซึ่งการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า สัญญาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและของระบบต้องทำกันทุกประการ ดังนั้นบริบทงานที่นำเสนอจึงใช้วิธีการทำเฟสล็อกคัลเพื่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแรงดันระบบ และใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงสำหรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งวงจรลดทอนแรงดันใช้สำหรับการควบคุมขนาดของแรงดันของแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่แกนคิกของวงจรดังกล่าวถูกใช้เพื่อควบคุมมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยวิธีการและผลของการศึกษานี้จะใช้สำหรับการติดตั้งการทดลองเพื่อการสอนของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คำสำคัญ: วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แม่เหล็กเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฟสล็อกคัล การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Abstract

This thesis presents the computer simulation of grid synchronization of a synchronous generator using PLEXIM software. Several tests are performed to estimate the parameters of the synchronous generator. The parameters are then placed in the synchronous generator model. In the simulation, the synchronous generator field winding is connected to the dc-dc buck converter. To achieve grid synchronization, the voltage vectors of both grid and armature must be the same. Therefore, in this thesis, the three-phase phase locked loop is applied to estimate the grid voltage vector, and the axis transformation is applied to the armature voltage. The buck converter is used to control the amplitude of the armature voltage vector while the q-axis voltage is applied to control the phase angle of the synchronous generator. The algorithm and the results will then be applied to setup the laboratory for teaching in the Department of Electrical Engineering.

Keywords: Rotor linkage flux approximation, Phase lock loop, generator synchronization

1. บทนำ

ปัจจุบันการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส จะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่การทำการทดสอบภายใต้สภาวะไร้โหลด ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสภายใต้สภาวะที่มีภาระทางไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ที่ถูกใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยชุดเครื่องจักรกลไฟฟ้าอยู่ในสภาพที่เก่า และไม่ไม่สามารถตอบสนองความต้องการในการจ่ายกำลังไฟฟ้าคืนสู่ระบบได้อย่างที่ควร นอกจากนี้การควบคุมความเร็วรอบยังเป็นไปด้วยความลำบากทำให้การทำการทดสอบในหัวข้ออื่น ๆ นอกเหนือจากที่ทำอยู่ในปัจจุบันถูกจำกัดด้วยสภาพของชุดเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ดังนั้น เพื่อให้การเรียนรู้เรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสและการขนานเครื่องจักรกลไฟฟ้าในการทดลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มีประสิทธิภาพและให้เท่าทันการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทางผู้จัดทำโครงการวิจัยจึงได้มีการศึกษาการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีการใช้งานอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์มาช่วยในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และได้มีการพัฒนาการเรียนรู้ดังกล่าวให้มีความทันสมัยและเพื่อให้นักศึกษาได้เข้าใจถึงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามายิ่งขึ้น

2. การออกแบบโครงงาน

การออกแบบโครงงานและการทดลองเพื่อศึกษาหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยการทดสอบจริงเพื่อนำไปใช้ในการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เพื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและศึกษาหัวข้อต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ของบริบทงานที่นำเสนอ จำเป็นต้องทำการจำลองผ่านโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสาร

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คอมพิวเตอร์ก่อนเพื่อที่จะทราบถึงพฤติกรรมของระบบและทำการทดสอบระบบ การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจริง เพื่อนำข้อมูลการจำลอง ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ เพื่อคาดการณ์และประเมินผลกระทบหรือความคิดปฏิกิริยาดังนั้น

2.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส

โดยค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสที่นำมาระบุ ในการจำลองผ่าน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หาได้จากการนำข้อมูลมาจาก แหล่งอ้างอิงดังนี้

1. คู่มือที่มากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากผู้ผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Data Sheet)

1. Stator leakage reactance (X_{ls})	0.08 p.u.
2. Saturated magnetizing reactance (X_{mdsat})	1.994 p.u.
3. Inertia (J)	0.0923 kgm ³
4. Pole pair	2
5. Initial rotor position (t_{m0})	$\pi/2$ N-m
6. Initial rotor speed (ω_{m0})	100π rad/s
7. Transient time constant (τ'_d)	0.012 s
8. Sub transient time constant (τ''_d)	0.003 s
9. Open circuit field time constant (τ'_{d0})	0.2 s

2. ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1. การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์
2. การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสนาม
3. การทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio)
4. การทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing reactance)

3. คำนวณด้วยวิธีการทางเทคนิคตามเอกสารทางวิชาการ

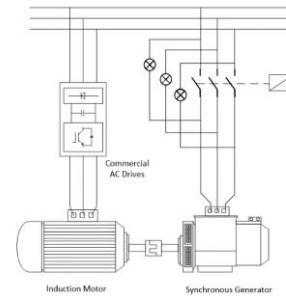
1. ค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของ ขดลวดสนาม (Field winding leakage reactance)
2. ค่าความต้านทานของขดลวดสนามที่อ้างอิงไปยังขดลวด อาร์มาเจอร์ (Field resistance)
3. ค่ารีแอคแตนซ์เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของ ขดลวดหน่วง(Damper winding leakage reactance)
4. ค่าความต้านทานของขดลวดหน่วงที่อ้างอิงไปยังขดลวดอาร์ มาเจอร์ (Field resistance)

2.2 การจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าผ่านโปรแกรม

คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารไปใช้เพื่อการค้า การเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ในส่วนของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าผ่านการ จำลอง ทำได้โดยเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ทำการกำหนด ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดสอบ เข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสกับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

2.3 สัญญาที่ใช้ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง

1. การแปลงค่าพารามิเตอร์ใด ๆ เข้าสู่ระบบกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับ สเตเตอร์ โดยใช้สมการที่แสดงให้เห็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \\ f_{s0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2. การแปลงค่าพารามิเตอร์ใด ๆ จากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับ สเตเตอร์ เข้าสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า

โดยใช้สมการ

$$\begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

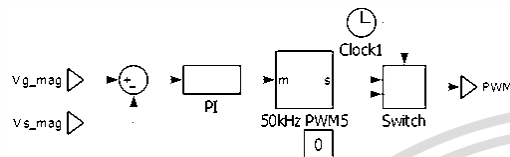
3. การหาเวกเตอร์ของแรงดันในกรอบอ้างอิงของระบบไฟฟ้าโดยใช้วิธี เฟสล็อกคลูป

การแปลงสัญญาณจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับสเตเตอร์ไปยัง กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเทียบกับระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องใช้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ เวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริดรวมทั้งขนาดของเวกเตอร์ ความเร็วเชิงมุม เพื่อที่จะนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในการควบคุมมุมเฟสและ ขนาดของแรงดัน ก่อนที่จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่การควบคุมมุม เฟสและขนาดของแรงดัน จะต้องใช้ขนาดของเวกเตอร์และแกนคว (Quadrature axis) ของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{sdqe}) ไปเป็นตัวเปรียบเทียบตามลำดับเพื่อทำการควบคุมแบบป้อนกลับที่ วงจรลดทอนแรงดันและปรับความเร็วของตัวต้นกำลัง

4. การคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อกระตุ้นที่ขดลวดสนามโดยใช้การ ควบคุมแบบป้อนกลับ

การควบคุมกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสอาศัย การจ่ายแรงดันของจอร์บักคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมสวิตช์ความถี่สูง (MOSFET) โดยการ ใช้เทคนิคการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse

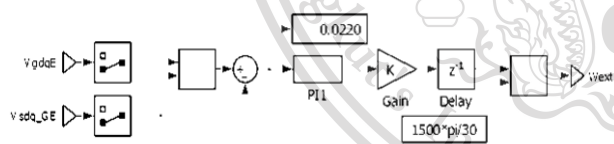
Width Modulate : PWM) ซึ่งใช้การควบคุมแบบป้อนกลับเป็นตัวควบคุม โดยมีขนาดของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{g_mag}) เป็นสัญญาณอ้างอิง และใช้ขนาดของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{s_mag}) เป็นตัวเปรียบเที่ยบดังภาพที่ 8 และใช้ตัวควบคุมแบบ PI เพื่อเป็นตัวควบคุมภายในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ ก่อนที่จะนำสัญญาณขาออกไปสร้างสัญญาณ PWM ตามที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 8 เพื่อนำไปควบคุมสวิทช์ความถี่สูงในวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 8 การจำลองวงจรการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายที่ขดลวดสนามโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

5. การควบคุมความต่างเฟสของของแรงดันโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ

การควบคุมความต่างของมุมเฟสของแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแรงดันจากระบบไฟฟ้าจะใช้ค่าประกอบแกนคิวของเวกเตอร์แรงดันกริดในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{gdqe}) เป็นตัวอ้างอิง และใช้ค่าประกอบแกนไอของประกอบแกนคิวของเวกเตอร์แรงดันสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแรงดันกริด (V_{sdqe}) เป็นตัวเปรียบเที่ยบ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI เพื่อเป็นตัวควบคุมภายในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับในลักษณะเดียวกันกับวงจรการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายที่ขดลวดสนาม ดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การจำลองวงจรการควบคุมความต่างเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดและแรงดันกริดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

3. การทดสอบและการประเมินผล

3.1 ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

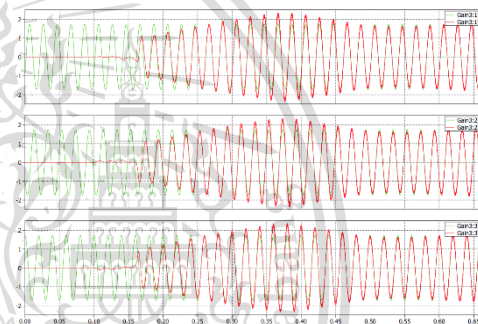
ตารางที่ 1 สรุปพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

Parameters	Quantity
1. Stator resistance (R_s)	1.672 Ω
2. Stator leakage reactance (X_l)	0.08 pu
3. Saturated magnetizing reactance in d axis (X_{ad})	2.074 p.u.
Saturated magnetizing reactance in q axis (X_{aq})	1.072 p.u.
4. Unsaturated synchronous reactance in d axis (X_{du})	1.7745 p.u.
Unsaturated synchronous reactance in q axis (X_{qu})	0.917 p.u.

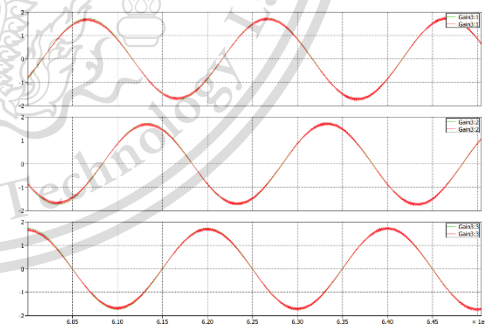
5. Field resistance (R_f)	0.4698 Ω
6. Field leakage reactance (X'_{lf}) (referred)	0.0504 p.u.
7. Damper resistance in d axis (R'_{kd})	0.0349 p.u.
Damper resistance in q axis (R'_{kq})	0
8. Turn ratio (N_s/N_f)	1.5
9. inertia (J)	0.0923 kgm^3
10. Friction coefficient (F)	0
11. Pole pair	2
12. Damper leakage reactance (X'_{lk})	0.0504 p.u.
Damper leakage reactance (X'_{lkq})	-
13. Initial rotor position (t_{m0})	$\pi/2$
14. Initial rotor speed (ω_{m0})	100 π

3.2 ผลการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

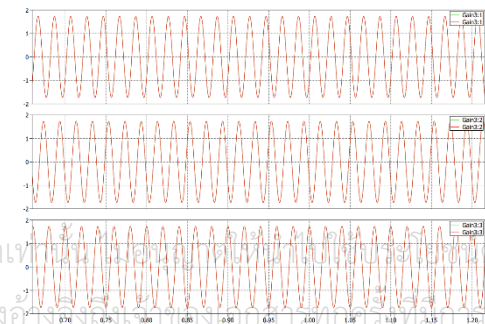
3.2.1 ผลการจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า



ภาพที่ 10 ผลการจำลองขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนการขนานของเฟส A B และ C ตามลำดับ



ภาพที่ 11 ผลการจำลองขณะทำการขนาน เฟส A B และ C ตามลำดับ



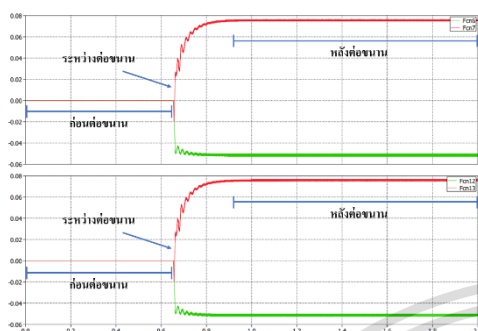
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารนี้ทุกครั้ง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาพที่ 12 ผลการจำลองหลังจากทำการขนานเรียบร้อยแล้ว
เฟส A B และ C ตามลำดับ

3.2.2 ผลสัญญาณเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



ภาพที่ 13 สัญญาณเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และเวกเตอร์กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (I_{gdqE} , I_{sdqE})

4. สรุปผลการทดลอง

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ทุกการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถนำไปจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้จริง ทำให้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบระบบจริงมากที่สุด

การจำลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าสามารถควบคุมระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าเข้าใกล้ทางฝั่งระบบไฟฟ้าได้มาก และยังสามารถทำการขนานด้วยความเร็วที่น่าพึงพอใจเนื่องจากผลของการใช้วงจรควบคุมแบบ PI ในการประมวลผลค่าแรงดันที่ต่างกันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและระบบไฟฟ้า โดยเมื่อใช้หลักการของการแปลงเข้าสู่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ ไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของต้นกำลังทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เมื่อทำงานร่วมกับการควบคุมแรงดันที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์ด้วยสัญญาณ PWM ที่ประมวลผลความกว้างสัญญาณจากวงจรควบคุม PI ทำให้การขนานมีความแม่นยำและปลอดภัย จนได้ผลลัพธ์เป็นค่าสัญญาณแรงดันที่มีค่าใกล้เคียงกันมากจนกราฟสัญญาณแนบกันสนิท

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, S. Pekarek, (2013). "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [2] Stephen D. Umans, (2014). "Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery". McGraw-Hill Education, New York

[3] S. Chapman. (2005). "Electric Machinery Fundamentals". McGraw-Hill, New York

[4] Martina Kutija, Damir Sumina, Igtore Colovic. (2015). Magnetization of speed sensorless squirrel-cage induction generator for wind power application using a phase-locked loop. Electric Power Systems Research 122, 119-129

[5] K.A. Code, B.T. Kuhn, S.D. Sudhoff, H.J. Henger. (1998). An Improved Method for Incorporating Magnetic Saturation in The Q-D Synchronous Machine Model. IEEE Trans. Energy Convers. 13(3), 270-275.

[6] E. Levi. (1999). Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Salient Pole Synchronous Machines. IEEE Trans. Energy Convers. 14(1), 44-50.

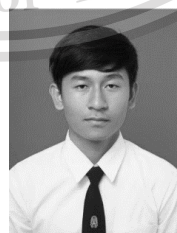
[7] Huimin Wang, Xinglai Ge, Yan Yue, and Yong-Chao Liu. (2019). Dual Phase-Locked Loop-Based Speed Estimation Scheme for Sensorless Vector Control of Linear Induction Motor Drives. IEEE Trans. On Industrial Electronic. 278(46), 1-13

[8] Mihai Comanescu, and Longya Xu. An Improved Flux Observer Based on PLL Frequency Estimator for Sensorless Vector Control of Induction Motors. IEEE Trans. Energy Convers. 53(1), 50-56

[9] Golestan, S., & Guerrero, J. M. (2015). Conventional Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop Is an Adaptive Complex Filter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(3), 1679-1682.



นายภัทรกร วรณสนธิ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางบ่อวิทยา และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ Variable speed PMSM drive with DC link voltage controller for light weight electric vehicle



นายภานุเดช โพธิ์ดี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ drive system of electric Locomotive



นายภานุพงศ์ ตรีมงคล สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดโนทัยพาทย์ และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ Electro-Mechanical EV Powertrain with reduced volt-ampere rating



ภาคผนวก ข.

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในการทดลองต่าง ๆ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

ตารางที่ ข.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

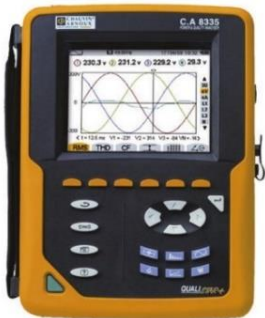
ภาพอุปกรณ์	รายละเอียดของอุปกรณ์
	ผลิตภัณฑ์: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส ยี่ห้อ: Infinity Power รายละเอียด: ตารางที่ ค.1
	ผลิตภัณฑ์: AC Drives ยี่ห้อ: ABB รุ่น: ACH550
	ผลิตภัณฑ์: มัลติมิเตอร์ดิจิทัล ยี่ห้อ: FLUKE รุ่น: 115 รายละเอียด: พิกัดแรงดัน AC/DC 600 V พิกัดกระแส AC/DC 10 A พิกัดช่วงความถี่ 50 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

	ผลิตภัณฑ์: พาวเวอร์มิเตอร์ดิจิทัล 3 เฟส ยี่ห้อ: Chauvin Arnoux รุ่น: CA8335 รายละเอียด: พิกัดแรงดัน AC/DC 1,000 V พิกัดกระแส AC/DC 1,200 A พิกัดช่วงความถี่ 40-69 Hz
	ผลิตภัณฑ์: Differential Probe ยี่ห้อ: Sapphire Instrument รุ่น: SI-9110 รายละเอียด: พิกัดแรงดัน AC/DC 1,000 V
	ผลิตภัณฑ์: หม้อแปลงปรับค่าได้ 1 เฟส ยี่ห้อ: Tipas Electric รุ่น: SD-16 รายละเอียด: พิกัดแรงดันขาเข้า 220 v พิกัดแรงดันขาออก 250 v พิกัดกระแสขาออก 20 A
	ผลิตภัณฑ์: แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ยี่ห้อ: MCP รุ่น: M10-TP3005H รายละเอียด: พิกัดแรงดันขาเข้า 220-240 v พิกัดแรงดันขาออก 0-30 v พิกัดกระแสขาออก 0-5 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

	ผลิตภัณฑ์: ดิจิตอลออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ: RIGOL รุ่น: DS1104Z รายละเอียด: พิกัดช่วงความถี่ 100 MHz
	ผลิตภัณฑ์: ดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบแคลมป์ ยี่ห้อ: KYORITSU รุ่น: KT200 รายละเอียด: พิกัดแรงดัน AC/DC 600 V พิกัดกระแส AC/DC 400 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและข้อมูลจาก Datasheet โดยค่าในตารางเหล่านี้นำไปใช้ร่วมกับผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจากหัวข้อ 3.2 ทั้ง 4 รายการได้แก่ การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ การทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสนาม การทดสอบหาค่าอัตราส่วนรอบของขดลวด (Turn ratio) และการทดสอบหาค่าความต้านทานแม่เหล็กไม่อิ่มตัว (Unsaturated magnetizing reactance)

ค.1 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในการทดลองนี้ทั้ง 2 เครื่องมีค่าเท่ากัน โดยมีค่าพิกัดต่าง ๆ ตาม

ตารางที่ ค.1 พิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ลักษณะการต่อขดลวดอาร์มาเจอร์	Series Star
พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	380 โวลต์
พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	12.3 แอมป์
พิกัดกำลัง	8.1 กิโลวัตต์แอมป์
พิกัดกำลังไฟฟ้าจริง	6.48 กิโลวัตต์
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	0.8
ความเร็ว	1500 รอบต่อนาที
ความถี่	50 เฮิร์ตซ์
พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสนาม	55 โวลต์
พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนาม	2.5 แอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และได้ทำการแนบข้อมูล Datasheet เพิ่มเติมดังต่อไปนี้

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจาก Datasheet

ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์	1.62 โอห์มต่อเฟสที่ 22 องศาเซลเซียส
ความต้านทานขดลวดโรเตอร์	0.44 โอห์มต่อเฟสที่ 22 องศาเซลเซียส
พิกัดกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	12.3 แอมป์
WR^2 Inertia	0.0923 กิโลกรัมเมตรกำลังสอง
X_d Direct axis synchronous	1.994
X'_d Direct axis transient	0.204
X''_d Direct axis subtransient	0.127
X_q Quadrature axis reactance	0.127
X'_q Quadrature axis transient	0.992
X''_q Quadrature axis subtransient	0.229
X_L Leakage reactance	0.080
X_2 Negative sequence	0.191
X_0 Zero sequence	0.086
T'_d Transient time constant	0.012 s
T''_d Sub-transient time constant	0.003 s
T'_{do} O.C. field time constant	0.2 s
T_a Armature time constant	0.004 s
Short Circuit Ratio	$1/X_d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

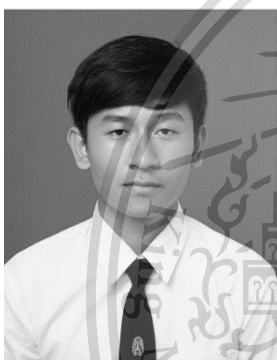
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้เขียน



นายภัทรกร วรรณสนธิ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน
บางบ่อวิทยาคม และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ Variable speed
PMSM drive with DC link voltage controller for light weight
electric vehicle



นายภาณุเดช โพธิ์ดี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน
ราชสีมาวินิจฉัย และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ drive system of
electric Locomotive



นายภาณุพงศ์ ตรึงมงคล สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัด
โนนทัยพายัพ และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ Electro-Mechanical
EV Powertrain with reduced volt-ampere rating

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.