

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
DC VOLTAGE SOURCE FOR SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
DC VOLTAGE SOURCE FOR SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2556

DC VOLTAGE SOURCE FOR SYNCHRONOUS GENERATOR
EXCITATION



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีเห็นเหตุจำเป็นขอสงวนสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2013

ปีการศึกษา 2556

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

DC VOLTAGE SOURCE FOR SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ผู้จัดทำ

1. นาย อภิวิชญ์ ศิริศักดิ์
2. นางสาว อักษิพร เหลืองสะอาด
3. นางสาว อุบลรัตน์ เตชะอุดมถาวร



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

นาย อภิวิษญ์ ศิริศักดิ์

นางสาว อักษิพร เหลืองสะอาด

นางสาว อุบลรัตน์ เตชะอุดมถาวร

ผศ.ดร. วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า และการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังสำหรับการทำงานเป็นมอเตอร์ ซึ่งการทำงานจะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้างกล่าวจะถูกสร้างจากคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ซึ่งจะถูควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ของบริษัท STMicroelectronics ในการออกแบบและจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์จะอาศัยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการทำงานเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบวงจรควบคุมก่อนที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน ผลการจำลอง และผลการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบในท้ายที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC VOLTAGE SOURCE FOR SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION

Mr. Apiwit

Sirisak

Ms. Aksiporn

Laungsaart

Ms. Ubolrat

Techaudomtaworn

Asst.Prof. Dr. Warachart Suwan-ngam Supervisor

Year 2013

ABSTRACT

This thesis presents a DC voltage source controlled by a microcontroller for a synchronous generator excitation. The voltage source is applied to control the generator terminal voltage during grid synchronization and control the power factor during operation in motor mode. This voltage source is constructed from a full bridge DC-DC converter controlled by the STM32F4DISCOVERY microcontroller. MATLAB/Simulink program is used to simulate the operation of the converter. The algorithm used is the applied to the real system. The simulator and experimental results are compared, analyzed and then conclude.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณ พงศธร ชูสุน และคุณพฤษภาพันธ์ มานวกุล ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี ที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกในการยื่นอุปรกรณ์ในการทำการทดลอง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการทำปริญญานิพนธ์นี้

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	4
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ทฤษฎีและหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	5
2.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	5
2.2.2 ความเร็วซิงโครนัส และความถี่	6
2.2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	7
2.2.4 การทดสอบวงจรเปิดและลัดวงจร	8
2.2.4.1 คุณลักษณะวงจรเปิดและความสูญเสียในการหมุนขณะไม่มีภาระ	8
2.2.4.2 คุณลักษณะลัดวงจรและความสูญเสียจากภาระ	10
2.3 มอเตอร์ซิงโครนัส	12
2.4 ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์	13
2.5 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	16
2.5.1 วิธีการตรวจสอบลำดับเฟสก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	17
2.6 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง (Reference frame Theory)	18
2.6.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส	19
2.6.3 การแปลงกลับจากกรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	20
2.6.4 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส	20
2.6.5 สมการกำลังไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงใดๆ	20
2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง	21
2.7.1 คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	21
2.7.2 รูปแบบการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มในคอนเวอร์เตอร์	22
2.7.2.1 การสวิตช์ของแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์	22
2.7.2.2 การสวิตช์ของแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	24
2.8 บทสรุป	26
บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบวงจร	27
3.1 บทนำ	27
3.2 ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	27
3.3 การจำลองทางคอมพิวเตอร์	30
3.3.1 การจำลองระบบในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	30
3.3.1.1 การสร้างองค์ประกอบในแนวแกนตั้งฉาก	31
3.3.1.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	32
3.3.1.3 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	32
3.3.1.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	33
3.3.2 จำลองระบบในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส	34
3.3.2.1 การสร้างองค์ประกอบในแนวแกนตั้งฉาก	35
3.3.2.2 วงจรเฟสล็อกคูล (Phase Lock Loop)	35
3.3.2.3 คำนวณหาค่าองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแนวแกน q	36
3.3.2.4 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง	37
3.4 การสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	37
3.4.1 ส่วนวงจรกำลัง	37
3.4.1.1 คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1.2 อุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง	38
3.4.2 ส่วนวงจรควบคุม	39
3.4.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	40
3.4.2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์	41
3.4.2.3 วงจรขับเคลื่อน	41
3.4.2.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า	42
3.4.2.5 วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	43
3.5 บทสรุป	44
บทที่ 4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง	45
4.1 บทนำ	45
4.2 การทดลอง	45
4.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	49
4.3.1 การเพิ่มสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	49
4.3.2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า	50
4.4 การทดลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส	52
4.4.1 การสร้างองค์ประกอบในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส	52
4.4.2 การปรับค่าตัวประกอบกำลัง	53
4.5 บทสรุป	77
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุป	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก. รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	84
ภาคผนวก ข. พิกัด และการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	87
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการ	92
ประวัติผู้เขียน	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	7
2.2 คุณลักษณะวงจรถูกเปิดของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	9
2.3 คุณลักษณะลัดวงจรของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	10
2.4 คุณลักษณะวงจรถูกเปิดและลัดวงจรของเครื่องจักรกลซิงโครนัส	11
2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส	13
2.6 แผนภาพเฟเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส	13
2.7 วงจรควบคุมกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ซิงโครนัส	14
2.8 แผนภาพเฟเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก	14
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_d กับ I_f ของมอเตอร์ซิงโครนัส	15
2.10 ลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามเฟสกับระบบไฟฟ้า	17
2.11 การตรวจสอบเงื่อนไขโดยให้โหลดไฟสามดวง	18
2.12 ลักษณะการสว่าง-ดับของโหลดไฟสามดวง	18
2.13 ไดอะแกรมการต่อวงจรสวิตช์กำลังของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	22
2.14 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไปโพลาร์	24
2.15 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์	26
3.1 ไดอะแกรมการทำงานการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	27
3.2 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ขณะทำงานเป็นมอเตอร์	28
3.3 ไดอะแกรมการทำงานการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	28
3.4 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	29
3.5 ไดอะแกรมการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส	30
3.6 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	31
3.7 บล็อกไดอะแกรมจำลองการแปลงสัญญาณแรงดันจากรอบอ้างอิงสามเฟส ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	31
3.8 การจำลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้า	32
3.9 การจำลองการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	33
3.10 การจำลองคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	34
3.11 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง ของมอเตอร์ซิงโครนัส	34
3.12 บล็อกไดอะแกรมจำลองการแปลงสัญญาณแรงดันและกระแสจากรอบอ้างอิง สามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และจากรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงซิงโครนัส	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม สิทธิทั้งหมดนี้ให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 การจำลองวงจรเฟสล็คคูลูป	36
3.14 การคำนวณหากระแสอ้างอิงในแนวแกน q	36
3.15 การจำลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง	37
3.16 คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	38
3.17 อุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง	39
3.18 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	41
3.19 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ของบริษัท STMicroelectronics	41
3.20 วงจรขับเคลื่อน	42
3.21 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า	43
3.22 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	44
4.1 แผนผังการทดลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	47
4.2 แผนผังการทดลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส	49
4.3 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า	50
4.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	50
4.5 ผลการทดลองแสดงคงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า	51
4.6 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของขดลวดสนามเมื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า	51
4.7 การสร้างองค์ประกอบในแนวแกนตั้งฉากของวงจรเฟสล็คคูลูป	52
4.8 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	53
4.9 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	54
4.10 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	55
4.11 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	56
4.12 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	57
4.13 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 นำหน้า ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	58
4.14 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	59
4.15 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.2 นำหน้า ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	60
4.16 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.2 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า	61
4.17 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์	62

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์	63
4.19 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์	64
4.20 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์	65
4.21 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์	66
4.22 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์	67
4.23 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์	68
4.24 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์	69
4.25 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์	70
4.26 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์	71
4.27 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์	72
4.28 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์	73
4.29 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะต่อภาระไฟฟ้า 565 วัตต์	74
4.30 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 565 วัตต์	75
4.31 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 565 วัตต์	76
4.32 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะต่อภาระไฟฟ้า 755 วัตต์	77
4.33 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์ และกระแสขดลวดสนาม (V-curve)	79
ข1 ผลการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	3
4.1 ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าขดลวดสนาม (โวลต์) ของมอเตอร์ซิงโครนัส	78
4.2 ค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนาม (แอมแปร์) ของมอเตอร์ซิงโครนัส	78
4.3 ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ (แอมแปร์) ของมอเตอร์ซิงโครนัส	79
ข1 ผลการทดสอบวงจรเปิด และผลการทดสอบลัดวงจร	88
ข2 ผลจากการทดสอบด้วยวิธี Slip test	90
ข3 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในการทดลอง	91
ข4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในการทดลอง	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในการสอนวิชาปฏิบัติการเรื่องการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้านั้น วิธีการดั้งเดิมคืออาศัยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ให้มีขนาดเท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้าด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าขดลวดสนามโดยใช้หม้อแปลงอัตโนมัติปรับค่าได้ ซึ่งค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากและต้องอาศัยความเชี่ยวชาญของผู้ทำการควบคุม นอกจากนี้ยังส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเรียนการสอนวิชาดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น และหลังจากทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จะยังต้องให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานเป็นมอเตอร์ เพื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังจากการปรับค่ากระแสในขดลวดสนาม ซึ่งควบคุมได้ยากด้วยเหตุนี้เพื่อลดเวลาและขั้นตอนในการทำการเรียนการสอนวิชาดังกล่าว จึงได้มีการออกแบบคอนเวอร์เตอร์เพื่อใช้สำหรับควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยแนวทางการออกแบบจะเป็นการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ซึ่งถูกควบคุมด้วยการควบคุมวงรอบปิดเพื่อรักษาระดับแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้เท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า และสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ได้อีกด้วย

ด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ (Full Bridge DC-DC converter) สำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ขดลวดสนาม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation, PWM) ในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดสนาม โดยควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และสามารถขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังรวมถึงการควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังในกรณีทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสให้ได้ตามที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์ให้สามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าได้
2. สามารถควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสได้
3. สร้างคอนเวอร์เตอร์และชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับการขนานกับระบบไฟฟ้า และการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง
4. ศึกษาการควบคุมและการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

5. นำคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบมาใช้ในการปฏิบัติการเรื่องเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซิงโครนัส เพื่อลดเวลาและขั้นตอนในการทำการเรียนการสอน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้เป็นการสร้างวงจรควบคุมระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มีต้นกำลังขับเพื่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า และควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส โดยทำการจำลองการทำงานทางคอมพิวเตอร์เพื่อรองรับทฤษฎีและสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และทำการสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม

1.4 วิธีการดำเนินโครงการ

1. ค้นหาและจัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ เพื่อศึกษาข้อมูลและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการทั้งหมด
2. จัดหาและเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการทั้งหมด รวมทั้งศึกษาวิธีการใช้งานของเครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ทั้งหมด
3. สร้างแบบจำลองระบบควบคุมขึ้นในโปรแกรม MATLAB/Simulink
4. ทำการสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ และชุดควบคุมที่จะใช้ในโครงการขึ้น
5. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานต่างๆ ที่ต้องการใส่ลงสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์
6. ทำการทดสอบบันทึกผลการทดสอบ และแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
7. จัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์และเตรียมการนำเสนอ
8. สรุปลงและนำเสนอโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ 10 เดือน ตั้งแต่ เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2556 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ.2557

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	เดือน									
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาข้อมูลของ Converter	■	■								
2.จัดเตรียมและจัดหา อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับ โครงการ		■	■							
3.สร้างแบบจำลองด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink			■	■						
4.สร้างคอนเวอร์เตอร์ ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูล บริดจ์ และชุดควบคุม			■	■	■					
5.เขียนโปรแกรมควบคุม การทำงาน					■	■	■	■		
6.ทำการทดสอบ บันทึกผล และแก้ไขความผิดพลาดที่ เกิดขึ้น							■	■	■	
7.จัดทำรูปเล่มปริญญา นิพนธ์และเตรียมการ นำเสนอโครงการ								■	■	
8.สรุปผลและนำเสนอ โครงการ									■	■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์
2. โครงการวิจัยนี้ทำให้รู้หลักการควบคุม และหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัส
3. โครงการวิจัยนี้เป็นการบูรณาการของวิทยาการทางด้านต่าง ๆ นั้นคือ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, ทฤษฎีทางระบบควบคุม, และวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังเข้าด้วยกัน ซึ่งจะก่อประโยชน์ให้กับผู้ศึกษาและทำการวิจัยสาขาดังกล่าว

1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ

เนื้อหาภายในเล่มปฏิญญาพันธฉบับนี้ สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา, วัตถุประสงค์ของโครงการ, ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ, วิธีการดำเนินโครงการ, แผนการดำเนินโครงการ และประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ
2. บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะกล่าวถึงทฤษฎีทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัส
3. บทที่ 3 หลักการทำงาน และการออกแบบ จะกล่าวถึงการทำงานของระบบควบคุม และการออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
4. บทที่ 4 จะกล่าวถึงการทดสอบ และผลการทดสอบของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส และการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เชิงโรนัส
5. บทที่ 5 จะเป็นการสรุป และข้อเสนอแนะของการทำโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส โดยเนื้อหาในบทนี้จะเริ่มจากทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส พื้นฐานของมอเตอร์ซิงโครนัส และตามด้วยหลักการการทำงานและหน้าที่ทั่วไปของคอนเวอร์เตอร์ รวมทั้งสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งรายละเอียดของการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการสร้างชิ้นงานจะถูกกล่าวในบทต่อไป

2.2 ทฤษฎีและหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีชื่อเรียกกันโดยทั่วไปว่า “อัลเทอร์เนเตอร์” (Alternator) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส” (Synchronous Generator) มีหน้าที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อนำไปจ่ายให้แก่โหลด

2.2.1 โครงสร้างและหลักการการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยขดลวดที่อยู่กับที่ (Stationary Armature Winding หรือ Stator) และขดลวดไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนหมุน (Rotor) ซึ่งจะใช้สร้างสนามแม่เหล็กหมุน (Revolving Field) ที่มีความเร็วเชิงมุมขึ้นกับความเร็วรอบของโรเตอร์ เมื่อมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับขดลวดของโรเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ขึ้น และเมื่อทำการหมุนโรเตอร์ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดที่สเตเตอร์ จนเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและถ้าทำการต่อขั้วไฟฟ้าของขดลวดเข้ากับภาระไฟฟ้า ก็เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรไฟฟ้า ไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดบนโรเตอร์สามารถใช้จากแหล่งจ่ายภายนอก หรือสร้างขึ้นพร้อมๆ กับการขับหมุนโรเตอร์ก็ได้ โครงสร้างหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนี้มีดังนี้

1. สเตเตอร์ ประกอบด้วยโครงสร้างสเตเตอร์ซึ่งยึดแกนอาร์มาเจอร์ ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆจำนวนมาก นำมาอัดรวมเป็นรูปทรงกระบอก มีร่องสเตเตอร์สำหรับพันขดลวดอาร์มาเจอร์ และเนื้อเหล็กส่วนที่เป็นร่องสเตเตอร์นั้นจะเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก โลหะที่ใช้ทำแกนอาร์มาเจอร์เป็นเหล็กอ่อนผสมซิลิคอนเพื่อให้มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Loss) ต่ำ และเพื่อต้องการลดกระแสไหลวน (Eddy Current) ในแกนเหล็กหรือแกนอาร์มาเจอร์ จึงต้องทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ และมีการฉาบฉนวนกันระหว่างแผ่น

2. โรเตอร์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะเป็นขั้วแม่เหล็กซึ่งมีขดลวดสนามพันอยู่เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่ปรับค่าได้ โดยการปรับค่ากระแสที่ไหลเข้าขดลวดสนาม ขั้วแม่เหล็กโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ

2.1 แบบขั้วทรงกระบอก (Cylindrical Pole) มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีช่องว่างอากาศระหว่างตัวโรเตอร์กับตัวสเตเตอร์สม่ำเสมอ ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบสูง และมีขั้วแม่เหล็กจำนวนน้อย เรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบทรงกระบอก (Cylindrical-Rotor Synchronous Generator) ใช้กับตัวต้นกำลังที่มีความเร็วรอบสูง ได้แก่กังหันแก๊ส (Gas Turbine) หรือกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) เป็นตัวขับ ลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้คือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยและตัวเครื่องจักรกลยาว เนื่องจากมีความเร็วรอบสูงและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมาก

2.2 แบบขั้วยื่น (Salient Pole) มีลักษณะเป็นขั้วแม่เหล็กยึดติดกับตัวโรเตอร์ ช่องว่างอากาศระหว่างตัวโรเตอร์กับตัวสเตเตอร์จะไม่สม่ำเสมอคือ ช่องว่างอากาศที่หน้าขั้วแม่เหล็กจะน้อยกว่าบริเวณที่ไม่ใช่ขั้วแม่เหล็ก ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบต่ำ ซึ่งใช้ตัวต้นกำลังเป็นกังหันพลังน้ำ ลักษณะภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ จะมีรูปร่างใหญ่แต่สั้น เรียกเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วยื่น (Salient-Pole Synchronous Generator)

2.2.2 ความเร็วซิงโครนัส และความถี่

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตัวโรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) คือตัวโรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วที่เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนตัวอาร์มาเจอร์ ขั้วแม่เหล็กบนตัวโรเตอร์กับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีกระแสไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์บนสเตเตอร์จะหมุนไปพร้อมๆ กันแต่จะมีมุมต่างเฟสกันค่าหนึ่ง มากหรือน้อยตามขนาดของโหลด ความเร็วและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน 1 รอบ จะมีความถี่} &= \frac{P}{2} \text{ วัฏจักร (Cycle)} \\ \text{แต่ในหนึ่งวินาทีโรเตอร์หมุน} &= \frac{N}{60} \text{ รอบ} \end{aligned}$$

ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนในเวลาหนึ่งวินาทีจะมีความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $f = \left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{N}{60}\right)$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2-1) เรียกว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \frac{PN}{120} \quad (2-2)$$

จะได้ว่า

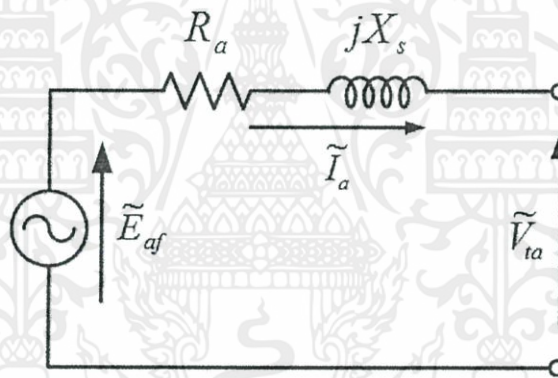
$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2-3)$$

เมื่อ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัสมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)
 f คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2-3) จะเห็นว่าถ้าความถี่ที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีความเร็วรอบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามโหลด

2.2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เมื่อ E_a คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
 R_a คือ ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์
 X_s คือ ค่าความต้านทานเสมือนซิงโครนัส (Synchronous reactance)
 V_{ta} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์

มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (2-5)

$$E_a = K\phi\omega_m \quad (2-5)$$

จะเห็นว่าค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) ขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (ω_m) และฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) เท่านั้น (เมื่อ K เป็นค่าคงที่)

2.2.4 การทดสอบวงจรเปิดและลัดวงจร

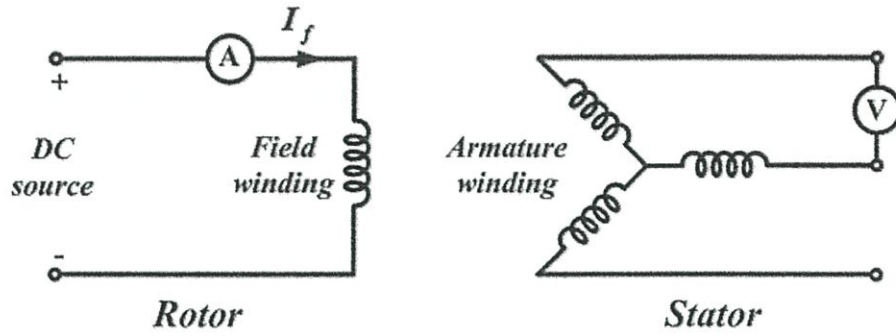
การพิจารณาคุณลักษณะการทำงานพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถกระทำได้โดยการทดสอบในสองลักษณะคือการทดสอบการเปิดวงจร (Open-circuit test) ของขดลวดอาร์มาเจอร์และการทดสอบลัดวงจรขดลวดอาร์มาเจอร์ (Short circuit test) [3]

2.2.4.1 คุณลักษณะวงจรเปิดและความสูญเสียในการหมุนขณะไม่มีภาระ

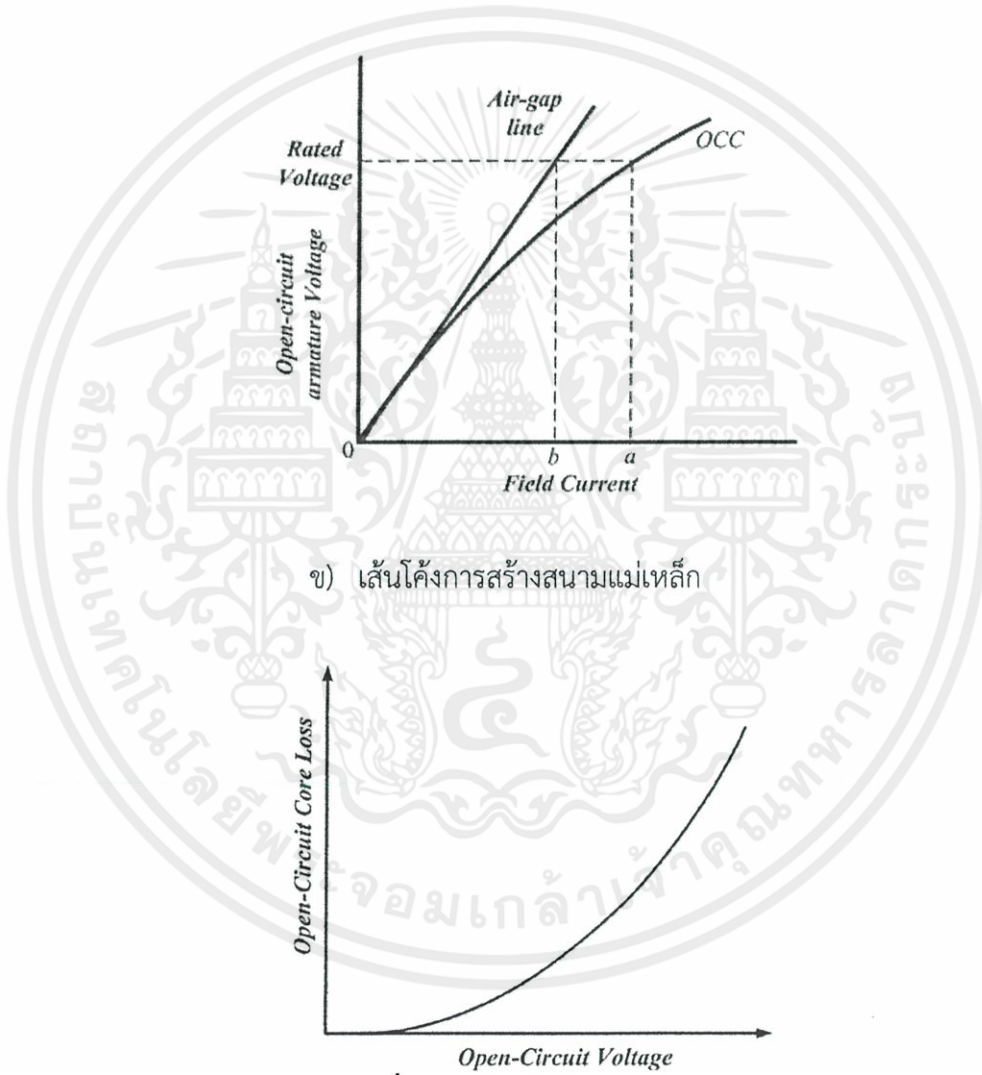
การทดสอบนี้กระทำโดยการเปิดวงจรขดลวดอาร์มาเจอร์ดังรูปที่ 2.2ก และพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่วัดได้กับการกระตุ้นสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสนาม ในขณะที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสดังรูปที่ 2.2ข การทดสอบนี้เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบมูลฐานของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศและค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามเท่านั้น (กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_f) จากรูปกราฟจะเห็นสภาพการอ้อมตัวของสนามแม่เหล็ก โดยเริ่มต้นจากการเป็นเชิงเส้นในขณะที่กระแสสนามเพิ่มขึ้นจากศูนย์ซึ่งถ้าไม่มีการอ้อมตัวแล้วกราฟจะเป็นเส้นตรงต่อไปเรียกว่าเส้นช่องอากาศ (Air-gap line) ในการทดสอบนี้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่วัดได้จะเท่ากับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น E_a

ในขณะที่ทำการทดสอบแบบเปิดวงจร กำลังทางกลที่จ่ายให้กับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะเป็นความสูญเสียในการหมุนขณะไม่มีภาระ (No-load rotational losses) ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม (Friction and windage losses) จากการหมุน และการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) จากสนามแม่เหล็ก ความสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านลม ซึ่งมีค่าคงที่สามารถวัดได้จากกำลังทางกลโดยการทดสอบในขณะที่ไม่มีการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ดังนั้นความสูญเสียในแกนเหล็กจะพิจารณาได้จากผลต่างของค่ากำลังทางกลทั้งสองค่าซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.2ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) วงจรการทดสอบแบบวงจรเปิด



ข) เส้นโค้งการสร้างสนามแม่เหล็ก

ค) เส้นโค้งความสูญเสียในแกนเหล็ก

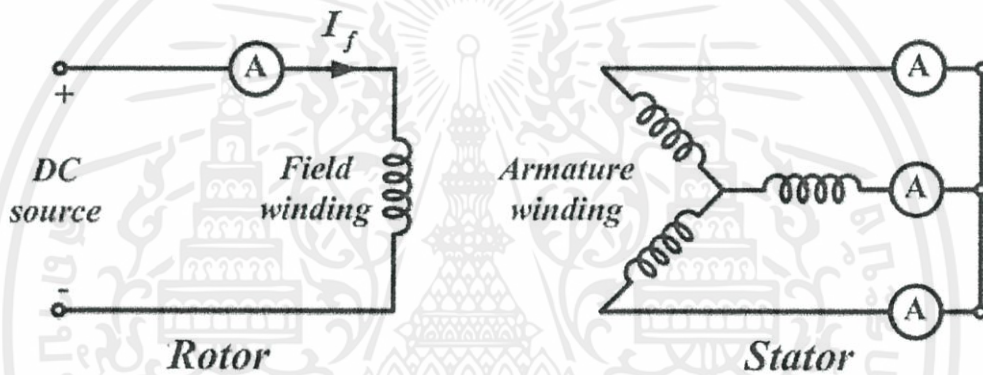
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของวงจรเปิดของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

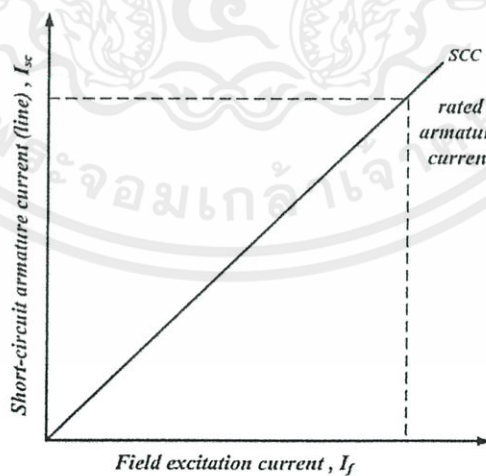
2.2.4.2 คุณลักษณะลัดวงจรและความสูญเสียจากภาวะ

การทดสอบนี้กระทำโดยการลัดวงจรที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟสในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส จากรูปที่ 2.3ก ขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่ในสภาพลัดวงจรโดยใช้แอมมิเตอร์วัดค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวด จากนั้นทำการจ่ายพลังงานกลให้เครื่องจักรหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (N_s) ทำการปรับค่ากระแสสนาม I_f ให้เพิ่มขึ้น บันทึกค่า I_f และกระแสลัดวงจร I_{sc} ที่เกิดขึ้นจนได้กระแสลัดวงจรประมาณ 1.5 – 2 เท่าของกระแสพิกัด จะได้กราฟคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะลัดวงจรดังรูปที่ 2.3ข เมื่อลัดวงจรที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์จะได้ว่า $V_a = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (2-4) จะได้

$$\tilde{E}_a = \tilde{I}_a(R_a + jX_s) \tag{2-6}$$



ก) วงจรการทดสอบแบบลัดวงจร

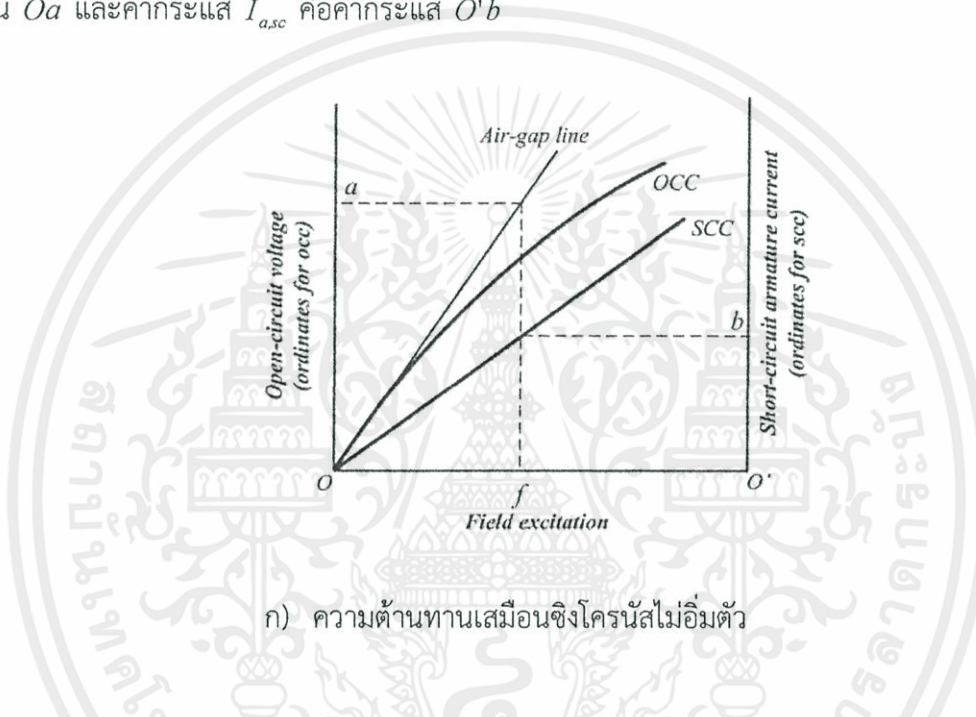


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ข) กระแสลัดวงจรกับกระแสกระตุ้น
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 2.3 คุณลักษณะลัดวงจรของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

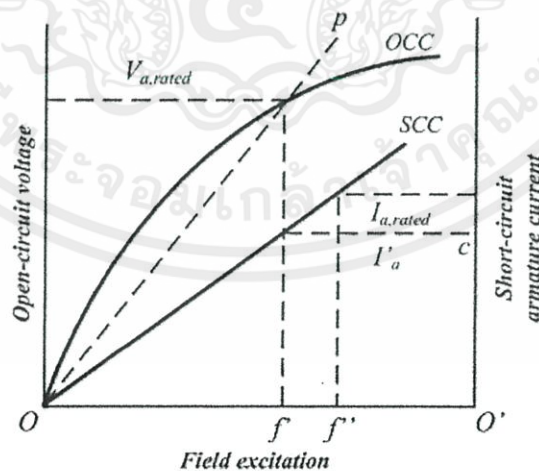
โดย I'_a คือค่ากระแส $O'c$ ที่เกิดจากกระแสสนาม $O'f$ ที่ทำให้เกิดแรงดันที่พิกัด $V_{ta, rated}$ เมื่อพิจารณาให้ R_a มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจากสมการที่ (2-6) จะได้ว่าค่าความต้านทานเสมือนซิงโครนัสไม่อิ่มตัว (Unsaturated synchronous reactance) สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์

$$X_{s,un} = \frac{E_a}{I_{a,sc}} = \frac{V_{ta}}{I_{a,sc}} \tag{2-7}$$

โดยค่า E_a หาได้จากเส้นช่องอากาศในรูปที่ 2.4ก ซึ่งให้มีค่าเท่ากับ V_t คือค่าแรงดัน Oa และค่ากระแส $I_{a,sc}$ คือค่ากระแส $O'b$



ก) ความต้านทานเสมือนซิงโครนัสไม่อิ่มตัว



ข) ความต้านทานเสมือนซิงโครนัสอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ฃ) ความต้านทานเสมือนซิงโครนัสอิ่มตัว
 รูปที่ 2.4 คุณลักษณะวงจรเปิดและลัดวงจรของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

ในทางปฏิบัติเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า เครื่องจักรจึงทำงานในขณะที่สนามแม่เหล็กอิ่มตัว วงจรสมมูลที่ได้จึงเป็นความต้านทานเสมือนซิงโครนัสอิ่มตัว (Saturated synchronous reactance) ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.4ข

$$X_s = \frac{V_{ta, rated}}{I_a'} \quad (2-8)$$

โดย I_a' คือค่ากระแส $O'c$ ที่เกิดจากกระแสสนาม $O'f'$ ที่ทำให้เกิดแรงดันที่พิกัด $V_{ta, rated}$

2.3 มอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Motor) [9] เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส และจะต้องป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นของขั้วแม่เหล็กแรงบิดจากสนามแม่เหล็กจะทำให้ตัวโรเตอร์เกาะกับสนามแม่เหล็กหมุน ดังนั้นตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจึงหมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัส การใส่ภาระทางกลต้องไม่ทำให้แรงบิดเนื่องจากภาระทางกลมากกว่าค่าสูงสุดของแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่มอเตอร์ซิงโครนัสสามารถจ่ายได้ ถ้าแรงบิดของภาระทางกลมากเกินไปจะทำให้เกิดการหลุดจากการยึดเกาะของสนามแม่เหล็กที่เรียกว่า Loss of synchronize ส่วนการที่จะเริ่มเกิดการเกาะของสนามแม่เหล็กนั้นต้องมีต้นกำลังขับ (Prime Mover) ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยให้มอเตอร์ซิงโครนัสเริ่มหมุน เนื่องจากความเฉื่อยของโรเตอร์ทำให้มอเตอร์ซิงโครนัสไม่สามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตัวเอง

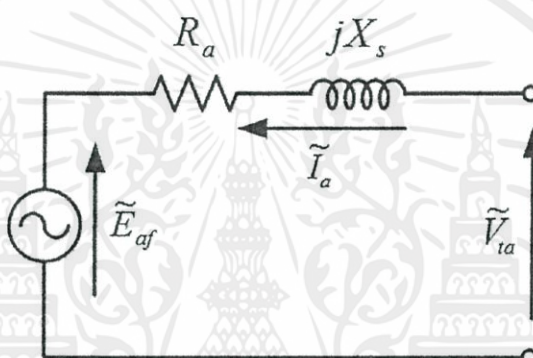
วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัสเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะต่างกันตรงที่กระแสอาร์มาเจอร์ I_a จะมีทิศทางไหลเข้าจากอาร์มาเจอร์ที่จุดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_a) และทิศทางของแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic torque : T_e) จะมีทิศไปในทิศทางเดียวกับตัวโรเตอร์ที่หมุน

และแผนภาพเฟเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นสภาวะการขับภาระทางกลโดยที่กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าล่าหลัง (มอเตอร์ซิงโครนัสสามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าหน้าหรือล่าหลัง) การเขียนแผนภาพเฟเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจะใช้เฟเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_a) เป็นเฟเซอร์อ้างอิงเหมือนกับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นเขียนเฟเซอร์ของกระแสอาร์มาเจอร์โดยอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_a) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานว่านำหน้าหรือล่าหลัง จากนั้นเขียนเฟเซอร์ของ $j\tilde{I}_a X_s$ โดยให้หัวของเฟเซอร์ต่อกับหัวของเฟเซอร์ของ V_a และเขียนเฟเซอร์ของ $\tilde{I}_a R_a$ ต่อกับเฟเซอร์ของ $j\tilde{I}_a X_s$ และเฟเซอร์ของ \tilde{E}_f จะได้จากการต่อจุดท้ายของเฟเซอร์ \tilde{V}_a กับจุดท้ายของเฟเซอร์ $\tilde{I}_a R_a$

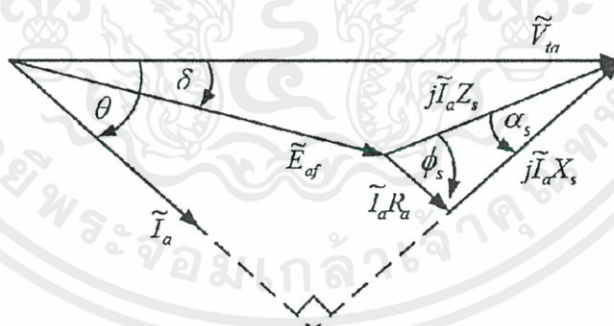
ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว \tilde{V}_{ta} กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก \tilde{E}_{af} ที่เฟส a ตาม Kirchhoff's voltage law ได้ดังนี้

$$\tilde{V}_{ta} = \tilde{E}_{af} + \tilde{I}_a(R_a + jX_s) \quad (2-9)$$

จากแผนภาพเฟเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสในรูปที่ 2.6 เฟเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก \tilde{E}_{af} จะล่าหลังเฟเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว \tilde{V}_{ta} และอาจจะเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัสเป็นดังรูปที่ 2.5 โดยไม่ได้แสดงวงจรของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น แต่ต้องไม่ลืมว่าจะควบคุมขนาดของ E_{af} ได้จากกระแสกระตุ้น I_f



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส

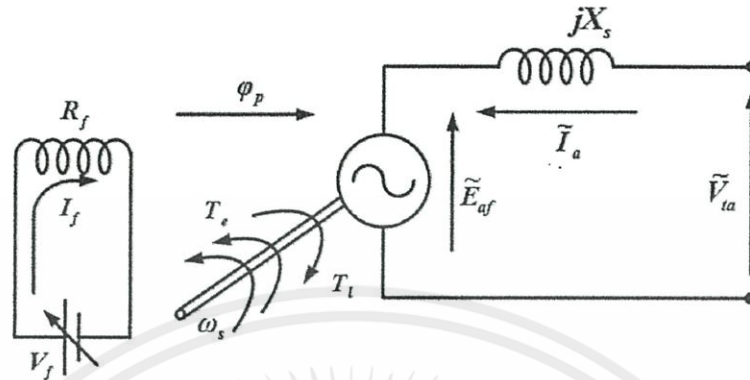


รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส

2.4 ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์

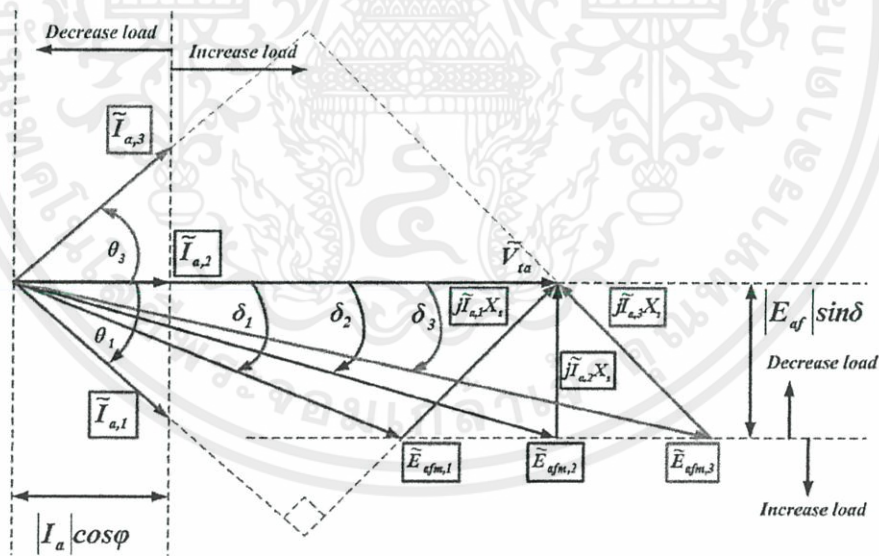
เป็นการควบคุมกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส โดยถ้าป้อนกระแสกระตุ้นสูงกว่าปกติ (Over excited) จะส่งผลให้กระแสอาร์มาเจอร์นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่รูปสัญญาณของกระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเปรียบเสมือนว่ามีตัว

เก็บประจุอยู่ภายใน จึงเรียกมอเตอร์ซิงโครนัสที่ทำงานอยู่ในย่านที่กระแสหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ซิงโครนัสนี้ว่าเป็น ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous condenser) [9]



รูปที่ 2.7 วงจรควบคุมกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ซิงโครนัส

เมื่อกำหนดให้ไม่มีความสูญเสียในขดลวดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสตั้งนั้นจะได้ว่า ค่าความต้านทานของอาร์มาเจอร์น้อยมาก ($R_a = 0$) รวมทั้งไม่มีความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และไม่มีความสูญเสียทางกล (Mechanical loss)



รูปที่ 2.8 แผนภาพเฟเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 เมื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้ากระตุ้นสนามแม่เหล็กจะทำให้ขนาดของเฟเซอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากกระแสกระตุ้นที่เฟส α (E_{af}) เปลี่ยนขนาดตามความสัมพันธ์ระหว่าง $I_f \propto \phi_p$ ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสกระตุ้น I_f จะทำให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_{af} มีค่า

เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยที่ภาระทางกลของมอเตอร์ซิงโครนัสมีค่าคงที่ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (P_{ip}) และค่ากำลังไฟฟ้าที่แปลงรูปเป็นกำลังทางกล (P_e) ยังคงมีค่าคงที่ เนื่องจากไม่มีความสูญเสียในมอเตอร์ซิงโครนัส

$$P_{ip} = 3|V_{ta}||I_a|\cos\theta \quad (2-10)$$

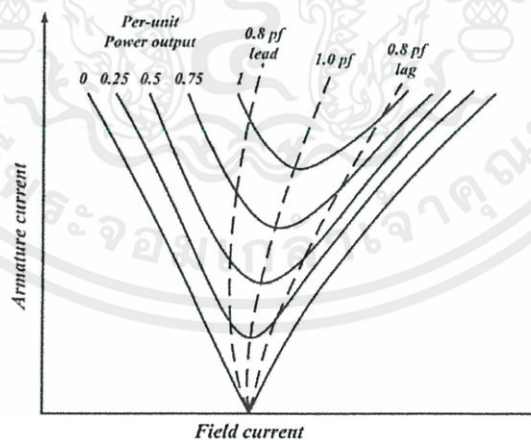
Electromagnetic power (P_e) ของมอเตอร์ซิงโครนัสที่แปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล

$$P_{ip} = 3 \times \frac{|V_{ta}||E_{af}|}{X_s} \sin\theta \quad (2-11)$$

ขณะที่มอเตอร์ซิงโครนัสขับภาระทางกลที่มีค่าคงที่ โดยที่ทั้ง X_s และ $|V_{ta}|$ มีค่าคงที่ เมื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้ากระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_f จะได้ว่าค่าของ $|I_a|\cos\theta$ และ $|E_{af}|\sin\theta$ จะมีค่าคงที่

ดังนั้นเมื่อควบคุมกระแสกระตุ้นสร้างสนามแม่เหล็ก I_f จะส่งผลให้ขนาดของเฟเซอร์ของ \tilde{E}_{af} จะต้องเคลื่อนที่อยู่ในแนว $|E_{af}|\sin\theta$ มีค่าคงที่ และในขณะเดียวกันเฟเซอร์ของ \tilde{I}_a ต้องเคลื่อนที่ในแนวที่ค่าของ $|I_a|\cos\theta$ มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้มุมระหว่างเฟเซอร์ \tilde{I}_a ของมอเตอร์ซิงโครนัสสามารถควบคุมได้ทั้งล้าหลังและนำหน้าเฟเซอร์ของ \tilde{V}_{ta}

เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_a กับ I_f ที่มีค่าภาระทางกลคงที่ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรวมถึงกราฟที่เมื่อเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ของภาระทางกลจาก 0-100%



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_a กับ I_f ของมอเตอร์ซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยจะเรียกกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_a กับ I_f ว่า V-curve ของ มอเตอร์ซิงโครนัสขณะที่จ่ายภาระทางกล ซึ่งจุดต่ำสุดของกราฟที่แต่ละเปอร์เซ็นต์ของภาระทางกลจะเป็นตำแหน่งที่กระแสอาร์มาเจอร์ (I_a) มีมุมเฟสเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V_{ta}) เป็นจุดที่ค่าตัว

ประกอบกำลังเท่ากับ 1.0 (Unity power factor) และถ้าเพิ่มกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้สูงกว่าค่าที่ป้อนที่จุดนี้ (จุดต่ำสุดของกราฟที่แต่ละเปอร์เซ็นต์ของภาระทางกล) จะทำให้กระแสป้อนเข้ามอเตอร์ซึ่งโครนัสมีค่าต่ำลง กระแสป้อนเข้ามอเตอร์ซึ่งโครนัสจะนำหน้าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า ทำให้มอเตอร์ซึ่งโครนัสทำงานเป็นซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานในการแก้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ แต่ถ้าลดกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้ต่ำกว่าค่าที่ป้อนที่จุดนี้ (จุดต่ำสุดของกราฟที่แต่ละเปอร์เซ็นต์ของภาระทางกล) จะทำให้กระแสป้อนเข้าซิงโครนัสมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น กระแสป้อนเข้าซิงโครนัสมอเตอร์จะล่าหลังแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า ทำให้มอเตอร์ซึ่งโครนัสทำงานเหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไปที่กระแสไฟฟ้าจะล่าหลังแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ชั่ว

2.5 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด จะไม่นิยมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ (มากกว่าหรือเท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของผู้ใช้ไฟ) เพียงตัวเดียวในการผลิตกำลังไฟฟ้า แต่จะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายๆ ตัวมาขนานกันเพื่อให้ทำงานร่วมกัน โดยมีเหตุผลดังนี้

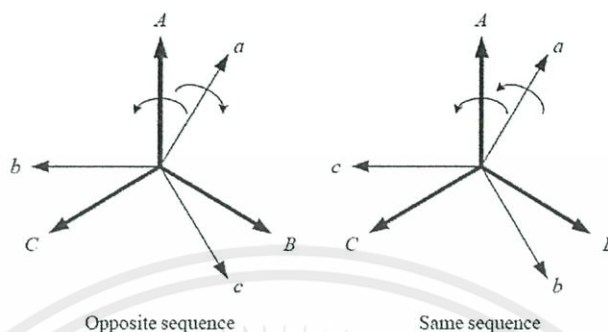
1. การที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายๆ เครื่อง จะช่วยแก้ไขปัญหาในกรณีที่เครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดความชำรุดเสียหาย ก็สามารถที่จะถอดไปซ่อมแซมและบำรุงรักษาได้ โดยยังให้เครื่องอื่นๆ ยังคงผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายโหลดต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง
2. เนื่องจากโหลดที่ใช้ในประจำวันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องและตลอดเวลา ในช่วงเวลาที่โหลดต่ำๆ เราก็สามารถใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียวจ่ายโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าช่วงเวลาที่โหลดเพิ่มขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเครื่องเดียวอาจจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่โหลดได้ไม่เพียงพอ จึงต้องมีการนำเอาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นๆ มาต่อขนานเพิ่มเข้าไปอีก
3. กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แต่ละแห่งนั้น จะเพิ่มขึ้นตามความต้องการอยู่เรื่อยๆ ไม่ได้คงที่อยู่ตลอดเวลา ในการที่จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องเดิมจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นย่อมเป็นไปได้ เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวก็จะมีขีดความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ที่พิกัดหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและต่อขนานเข้าไปกับเครื่องเดิมที่มีอยู่แล้ว

โดยในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่อไปนี้

1. แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับที่ระบบไฟฟ้าจะต้องเท่ากัน
2. ลำดับเฟสของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าต้องตรงกัน
3. ความถี่ของสัญญาณแรงดันจากขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับความถี่ของสัญญาณแรงดันของระบบไฟฟ้าจะต้องเท่ากัน

2.5.1 วิธีการตรวจสอบลำดับเฟสก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า เริ่มต้นจะต้องทำการตรวจสอบลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสและระบบไฟฟ้าให้ตรงกันก่อนดังรูปที่ 2.10



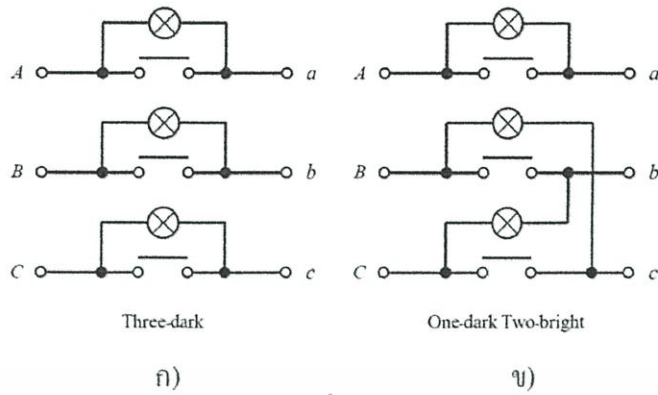
รูปที่ 2.10 ลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสสามเฟสกับระบบไฟฟ้า

โดยที่ลำดับเฟสอาจจะมีโอกาสตรงกันข้ามกันได้ วิธีการตรวจสอบลำดับเฟสสามารถกระทำได้โดยการใช้หลอดไฟสามดวงหรือที่เรียกว่า หลอดไฟซึ่งโครนัส ซึ่งมีวิธีการต่ออยู่ 2 แบบ คือ

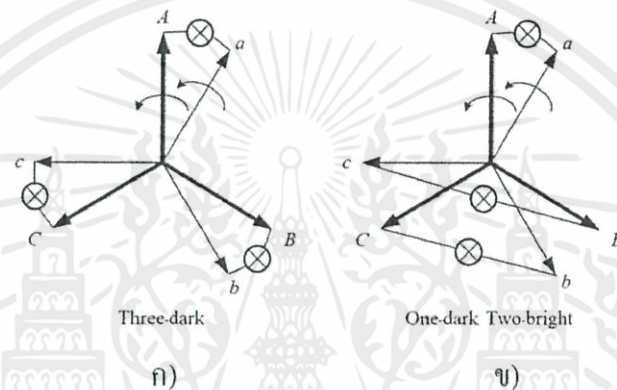
1. แบบ 3 หลอดดับ (Three dark) ถ้าต่อวงจรตามรูปที่ 2.11ก แล้วหลอดไฟจะดับสนิททั้งสามดวงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงหมายความว่าสามารถต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ ถ้าลำดับเฟสตรงกัน แรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่ความถี่ไม่เท่ากัน หลอดไฟทั้งสามดวงจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่สว่างสลับกับดับสนิทพร้อม ๆ กันทั้งสามดวงดังรูปที่ 2.12ก

2. แบบ 1 หลอดดับ 2 หลอดสว่าง (One-dark two-bright) ถ้าต่อวงจรตามรูปที่ 2.11ข แล้วหลอดไฟทั้งสามดวงจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ดับสนิท 1 ดวง และสว่าง 2 ดวงสลับกันไปดังรูปที่ 2.12ข หมายความว่าสามารถต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ แต่ถ้าหลอดไฟมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นไปตามแบบที่ต่ออยู่แสดงว่าลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสและระบบไฟฟ้าไม่ตรงกันซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการสลับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้ลำดับเฟสกลับมาตรงกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การตรวจสอบเงื่อนไขโดยใช้หลอดไฟสามดวง



รูปที่ 2.12 ลักษณะการสว่าง-ดับของหลอดไฟสามดวง

2.6 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง (Reference frame Theory)

ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟสนั้น การควบคุมตัวแปรของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในแต่ละเฟสจะเป็นเรื่องที่ยากและแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย เนื่องจากมีการคัปปลิงกันระหว่างตัวแปรระหว่างเฟสในสเตเตอร์, ระหว่างเฟสในโรเตอร์และระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ซึ่งส่งผลให้การควบคุมตัวแปรหนึ่งมีผลกระทบต่อตัวแปรอื่นๆ ด้วยเหตุนี้เพื่อความสะดวกในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามเฟสจึงจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีกรอบอ้างอิงเพื่อใช้ในการลดรูปตัวแปรและทำการแปลงตัวแปรที่มีลักษณะสัญญาณเป็นไซน์ซออยด์สามเฟสให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่มีลักษณะสัญญาณเป็นกระแสดตรง ซึ่งขั้นตอนในการแปลงตัวแปรที่มีลักษณะเป็นไซน์ซออยด์สามเฟสไปสู่ตัวแปรที่มีลักษณะสัญญาณเป็นกระแสดตรงนั้น สามารถแจกแจงย่อยได้สองขั้นตอนและขั้นตอนการแปลงกลับตัวแปรที่มีลักษณะสัญญาณเป็นกระแสดตรงไปสู่ตัวแปรที่มีลักษณะสัญญาณเป็นไซน์ซออยด์สามเฟสนั้น ก็สามารถแจกแจงย่อยได้อีกสองขั้นตอนเช่นเดียวกัน [8] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ต่อการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

การแปลงจากระบบสามเฟสเป็นสองเฟสหยุดนิ่งหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการแปลงของคลาร์ก(Clarke's transform) ในขั้นตอนนี้เป็นการแปลงตัวแปรในกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสองเฟสเทียบกับกรอบอ้างอิงสามเฟส ซึ่งผลของการแปลงแกนจะส่งผลให้เกิดการลดรูปของตัวแปรขึ้น นอกจากนี้สัญญาณที่ได้จะมีค่าแอมพลิจูดและความถี่เท่ากับแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณไฟสามเฟสก่อนการแปลง ในการแปลงนั้นจะต้องอาศัยสมการการแปลงดังแสดงในสมการที่ (2-12)

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

โดยที่ f แทนตัวแปรใดๆ

เมื่อตัวแปรในกรอบอ้างอิงสามเฟสถูกแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแล้ว ตัวแปรดังกล่าวจะเป็นตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะไซน์ซายด์และมีความถี่เดียวกันกับตัวแปรในกรอบอ้างอิงสามเฟส ตัวแปรในแนวแกน d และแนวแกน q จะอยู่ห่างจากกันเป็นมุม 90 องศา

2.6.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

ในขั้นตอนนี้เป็นการแปลงตัวแปรจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็ว $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การแปลงของปาร์ค (Park's transform) ซึ่งสมการที่ใช้ในการแปลงแสดงในสมการที่ (2-13)

$$\begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

โดยที่ θ แทนมุมระหว่างกรอบอ้างอิงหมุนกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

เมื่อถูกแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงใดๆ แล้วถ้าความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิงใดๆ มีค่าเท่ากับความเร็วเชิงมุมของตัวแปรในกรอบอ้างอิงใดๆ จะมีค่าคงที่ และถ้ามุมระหว่างกรอบอ้างอิงใดๆ และตัวแปรมีความถี่เท่ากันแล้ว ตัวแปรในกรอบอ้างอิงใดๆ จะเป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ในอนาคตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การแปลงกลับจากกรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

ในส่วนของการแปลงกลับขั้นตอนนี้จะเป็นการแปลงตัวแปรจากกรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยสมการที่ใช้ในการแปลงแสดงดังสมการที่ (2-14)

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

2.6.4 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส

ในส่วนของการแปลงกลับขั้นตอนนี้จะเป็นการแปลงตัวแปรจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส ซึ่งสมการที่ใช้ในการแปลงแสดงดังสมการที่ (2-15)

$$\begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

2.6.5 สมการกำลังไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงใดๆ

กำลังไฟฟ้าจริงขณะใดๆ ในระบบสามเฟสสามารถหาได้จากสมการที่ (2-16) และกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะใดๆ ในระบบสามเฟสสามารถหาได้จากสมการที่ (2-17)

$$P_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2-16)$$

$$Q_{abc} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{bc} i_a + v_{ca} i_b + v_{ab} i_c) \quad (2-17)$$

เมื่อทำการแปลงองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าทั้งหมดเข้าสู่กรอบอ้างอิงใดๆ จะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะใดๆ ได้จากสมการที่ (2-18) และสมการที่ (2-19)

$$P_{dq} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \quad (2-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ $Q_{dq0} = \frac{3}{2} (v_d i_d - v_q i_q)$ ค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2-19)

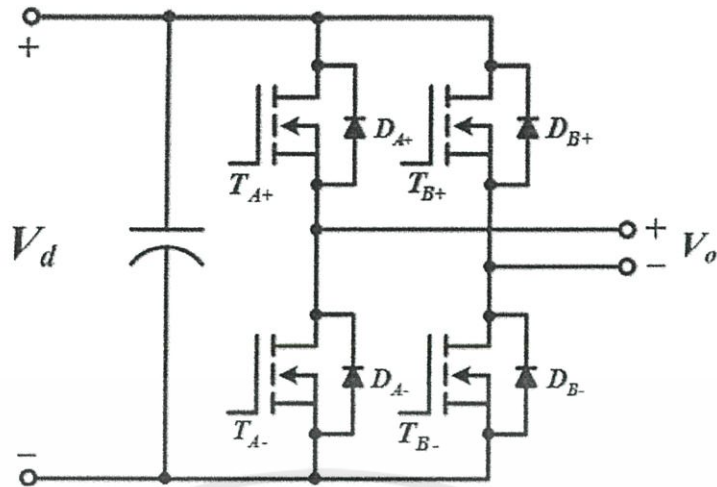
2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC converter) เป็นวงจรที่มีหน้าที่ลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าตรงค่าสูงลงมาเป็นแรงดันไฟฟ้าตรงค่าต่ำ และสามารถคงค่าแรงดันไว้ได้ คอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรภายใน ปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ในรูปแบบต่างๆ ขึ้นมามากมาย โดยสามารถแบ่งประเภทของคอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้ดังนี้

1. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Fly-back converter) เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนัก และให้สัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง แต่ใช้อุปกรณ์ในวงจรน้อยทำให้มีราคาถูกลง
2. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward converter) เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ในช่วงเดียวกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แต่กระแสที่ได้จะมีการกระเพื่อมต่ำกว่า แต่ราคาก็จะสูงกว่าเนื่องจากการต่ออุปกรณ์เพิ่มเข้าไป
3. พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull converter) เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้สูง และโหลดมีกระแสไหลต่อเนื่องตลอดเวลา กระแสที่ได้ทางด้านขาออกจึงค่อนข้างเรียบ แต่มีข้อเสียคือมักเกิดการไม่สมมาตรของฟลักซ์แม่เหล็กของแกนหม้อแปลง ซึ่งจะมีผลต่อการเสียหายของพาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ได้ง่าย ในปัจจุบันเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมกระแสช่วยลดปัญหานี้ได้ ดังนั้น 4. พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์จึงเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่น่าสนใจสำหรับสวิตซ์พาวเวอร์ซัพพลายที่ต้องการกำลังสูง
5. ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half Bridge converter) เป็นคอนเวอร์เตอร์ประเภทเดียวกับพูช-พูลคอนเวอร์เตอร์แต่ลักษณะการจัดวงจรจะทำให้พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ในวงจรมีแรงดันตกคร่อมขณะหยุดนำกระแสแค่ค่าแรงดันขาเข้าเท่านั้น ทำให้พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ที่ใช้มีราคาถูกลง และหาได้ง่ายกว่า และลดข้อจำกัดเมื่อใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้าสูง รวมทั้งยังไม่มีปัญหาการไม่สมมาตรของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเฟอไรต์ของหม้อแปลงได้ด้วย
6. ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge converter) เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่พัฒนามาจากฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ขณะทำงานจะมีแรงดันทางด้านขาออกเท่ากับแรงดันทางด้านขาเข้า แต่แรงดันที่ตกคร่อมพาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์แต่ละตัวจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันทางด้านขาเข้า และค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านพาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์แต่ละตัวนั้นมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกระแสสูงสุดในฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีกำลังด้านขาออกเท่ากัน ทำให้ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานที่กำลังสูงๆ ได้

2.7.1 คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ แสดงในรูปที่ 2.13 ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตประกอบด้วยสวิตซ์ทั้งหมด 4 ตัว โดยจะทำงานสลับกันเป็นคู่ๆ ในการนำกระแสและหยุดนำกระแส



รูปที่ 2.13 ไดอะแกรมการต่อวงจรสวิตช์กำลังของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.13 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-20)

$$V_{out} = (2D_1 - 1) \cdot V_D \quad (2-20)$$

โดยที่ V_D แทนแรงดันไฟฟ้าขาเข้า, V_{out} แทนแรงดันไฟฟ้าขาออก และ D_1 แทนวัฏจักรทำงาน (Duty Cycle) ของสวิตช์ A+

แต่ข้อเสียของวงจรชนิดนี้คือ ต้องใช้มอสเฟตถึง 4 ตัวและเนื่องจากต้องให้คู่มอสเฟตทำงานไม่พร้อมกันดังนั้นจึงต้องแยกใช้วงจรขั้วเกตของมอสเฟตแต่ละคู่ออกจากกันโดยเด็ดขาด ส่วนการใช้งานนิยมใช้กับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง

2.7.2 รูปแบบการสวิตช์ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

รูปแบบการสวิตช์ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การสวิตช์ของแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Bipolar Voltage Switching) และการสวิตช์ของแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar Voltage Switching) [4]

2.7.2.1 การสวิตช์ของแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

ในการสวิตช์ซึ่งแรงดันประเภทนี้ สวิตช์ (T_{A+}, T_{B-}) และ (T_{A-}, T_{B+}) จะทำงานเป็นคู่ๆ ทุกคู่จะสลับการทำงานในสภาวะ ON และ OFF เสมอ สัญญาณสวิตช์ซึ่งจะถูกสร้างโดยการเปรียบเทียบสัญญาณความถี่พาหะ (v_{tri}) กับสัญญาณแรงดันควบคุม ($v_{control}$) เมื่อ $v_{control} > v_{tri}$ การที่ จะพบว่า T_{A+} และ T_{B-} จะทำการ ON และในทางตรงกันข้ามคือ T_{A-} และ T_{B+} จะทำการ OFF

ดัชนีการมอดูเลตสามารถพิจารณาได้จากสัญญาณในรูปที่ 2.14 โดยสามารถกำหนดคาบเวลาในการควบคุมของสัญญาณการสวิตช์ได้จาก

$$v_{tri} = \hat{V}_{tri} \frac{t}{T_s/4} \text{ เมื่อ } 0 < t < \frac{1}{4}T_s \quad (2-21)$$

ที่ $t = t_1$ ในรูปที่ 2.14ก $v_{control} = v_{tri}$ จากสมการที่ (2-21) จะได้สมการดังนี้

$$t_1 = \frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} \frac{T_s}{4} \quad (2-22)$$

จากรูปที่ 2.14 สามารถหาช่วงเวลา t_{on} ของคู่สวิตช์ที่ 1 คือ (T_{A+}, T_{B-}) จะได้สมการดังนี้

$$t_{on} = 2t_1 + \frac{1}{2}T_s \quad (2-23)$$

ดังนั้นสามารถหาดัชนีการมอดูเลตของสวิตช์คู่ที่ 1 (T_{A+}, T_{B-}) ได้ดังนี้

$$D_1 = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} \right) \quad (2-24)$$

เมื่อพิจารณาดัชนีการมอดูเลตของสวิตช์คู่ที่ 2 (T_{A-}, T_{B+}) จะได้ว่า

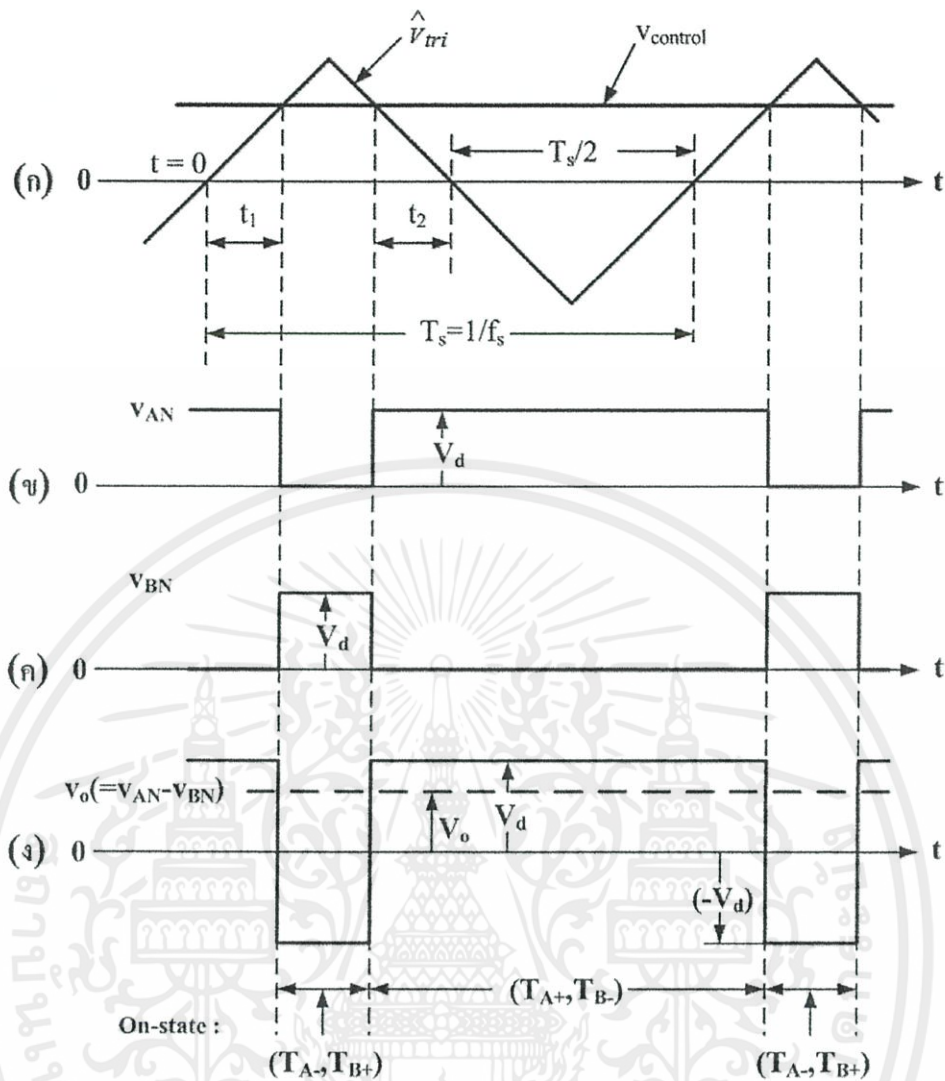
$$D_2 = 1 - D_1 \quad (2-25)$$

จากการหาดัชนีการมอดูเลตที่ผ่านมานั้น สามารถหาสัญญาณแรงดันในการสวิตช์ V_{AN} และ V_{BN} จากรูปที่ 2.14 ได้ตามสมการ (2-26)

$$V_o = V_{AN} - V_{BN} = D_1V_d - D_2V_d = (2D_1 - 1)V_d \quad (2-26)$$

และเมื่อแทนค่า D_1 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง $V_o = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} v_{control} = kv_{control}$ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการน (2-27)



รูปที่ 2.14 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไบโพลาร์

2.7.2.2 การสวิตช์ของแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

เป็นการนำสัญญาณสามเหลี่ยม (v_{tri}) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมที่เป็นบวก ($v_{control}$) และสัญญาณควบคุมที่เป็นลบ ($-v_{control}$) เพื่อใช้ในการกำหนดสัญญาณการสวิตช์ของขา A และ B ตามลำดับ โดยสถานะสวิตช์ของขา A ได้ถูกมอดูเลตโดยการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่เป็นบวกกับสัญญาณสามเหลี่ยม และในทำนองเดียวกันสถานะการสวิตช์ของขา B ได้ถูกมอดูเลตโดยการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่เป็นลบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ดังการทำงานต่อไปนี้

ถ้า $v_{control} > v_{tri}$ สวิตช์ T_{A+} นำกระแส

ถ้า $-v_{control} > v_{tri}$ สวิตช์ T_{B+} นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีค่าลิขสิทธิ์และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าแรงดันขาออกจะได้ตามรูปที่ 2.14ง และจากการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างขาทั้งสอง จะเห็นว่าดัชนีการมอดูเลต (D_1) ของสวิตช์ T_{A+} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2-28) และในทำนองเดียวกันดัชนีการมอดูเลต (D_2) ของสวิตช์ T_{B+} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2-29)

$$D_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} + 1 \right) \quad ; \text{สำหรับ } T_{A+} \quad (2-28)$$

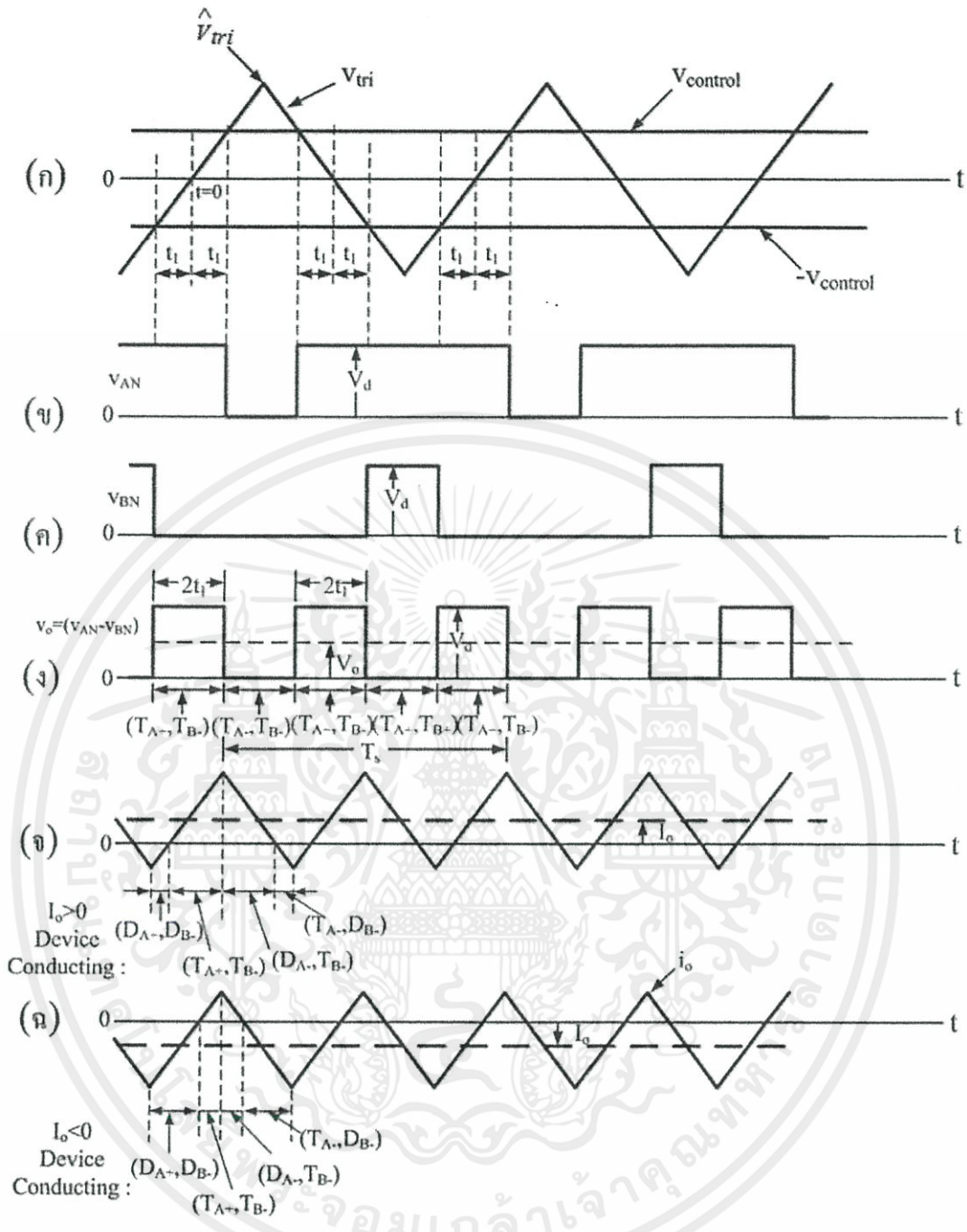
$$D_2 = 1 - D_1 \quad ; \text{สำหรับ } T_{B+} \quad (2-29)$$

เมื่อแทนค่า V_{AN} และ V_{BN} ในสมการ (2-26) จะได้ว่า

$$V_o = (2D - 1)V_d = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} v_{control} \quad (2-30)$$

ซึ่งการสวิตช์ด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์จะพบว่าแรงดันขาออก (V_o) มีค่าเป็นลักษณะเชิงเส้นกับ $v_{control}$ จากรูปที่ 2.15จ และ 2.15ฉ ได้แสดงการนำกระแสของอุปกรณ์ และได้รูปกระแสทั้งกรณี $I_o > 0$ และ $I_o < 0$ ตามลำดับโดยที่แรงดัน V_o มีค่าเป็นบวกทั้งสองกรณี และถ้าการสวิตช์ด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มทั้งสองแบบมีความถี่สวิตช์เท่ากัน ค่าแรงดันด้านขาออกของการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ จะมีการกระเพื่อมน้อยกว่าแบบไบโพลาร์ เนื่องจากสัญญาณแรงดันด้านขาออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การสร้างสัญญาณพัลส์เบิบลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์

2.8 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่จะนำมาใช้ในโครงการวิจัย ทั้งในเรื่องของทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส, ทฤษฎีการบออ้างอิง, วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ซึ่งจะนำไปใช้ในเรื่องของการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังในบทต่อไป

บทที่ 3

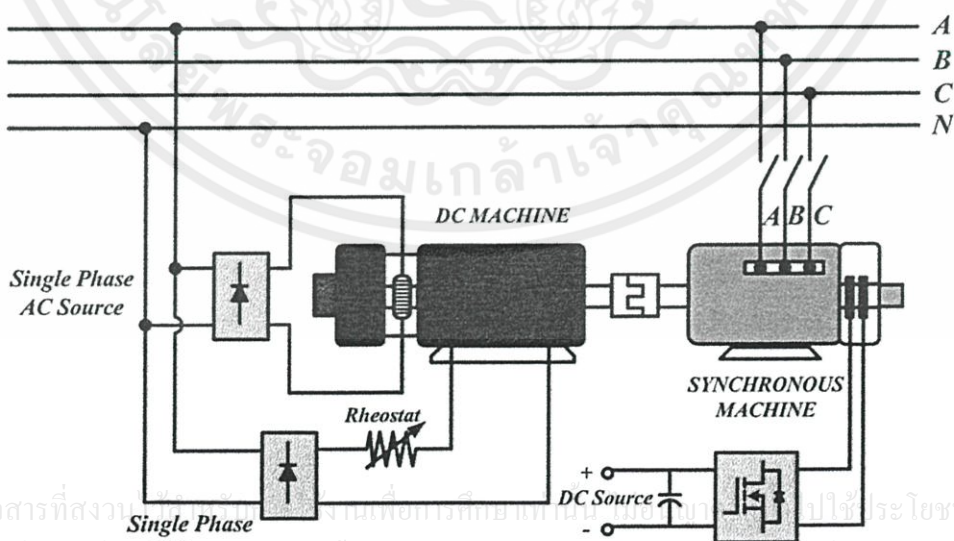
หลักการงานและการออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

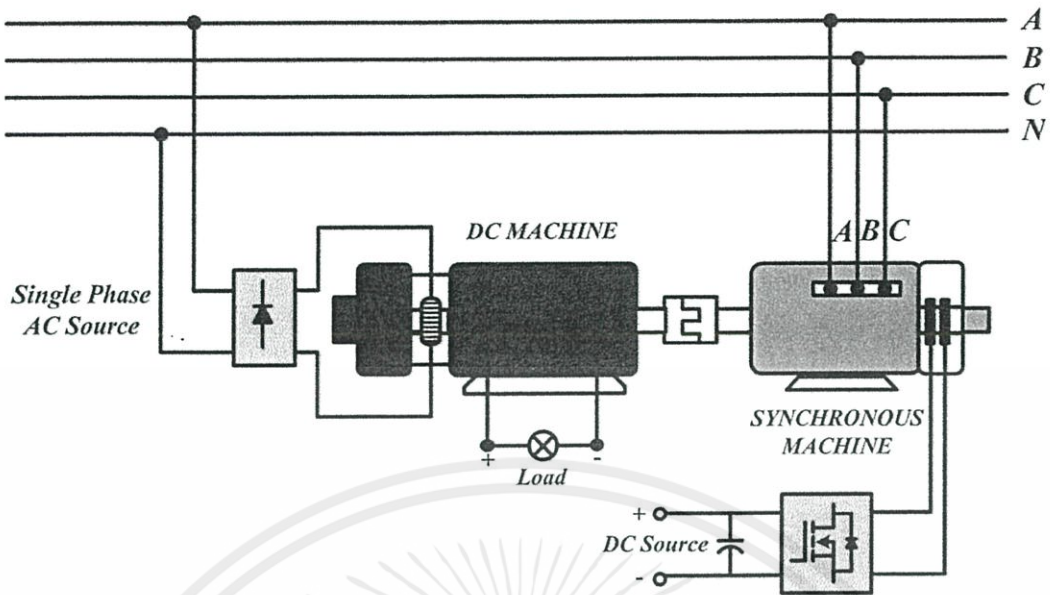
ในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงหลักการงานและการออกแบบวงจรควบคุมวงปิดสำหรับวงจรกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ในส่วนแรกจะอธิบายถึงระบบการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ส่วนที่สองจะเป็นการจำลองการทำงานด้วยระบบทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมีคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลซิงโครนัส และส่วนที่สามเป็นการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วงจรหลักๆคือ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม

3.2 ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

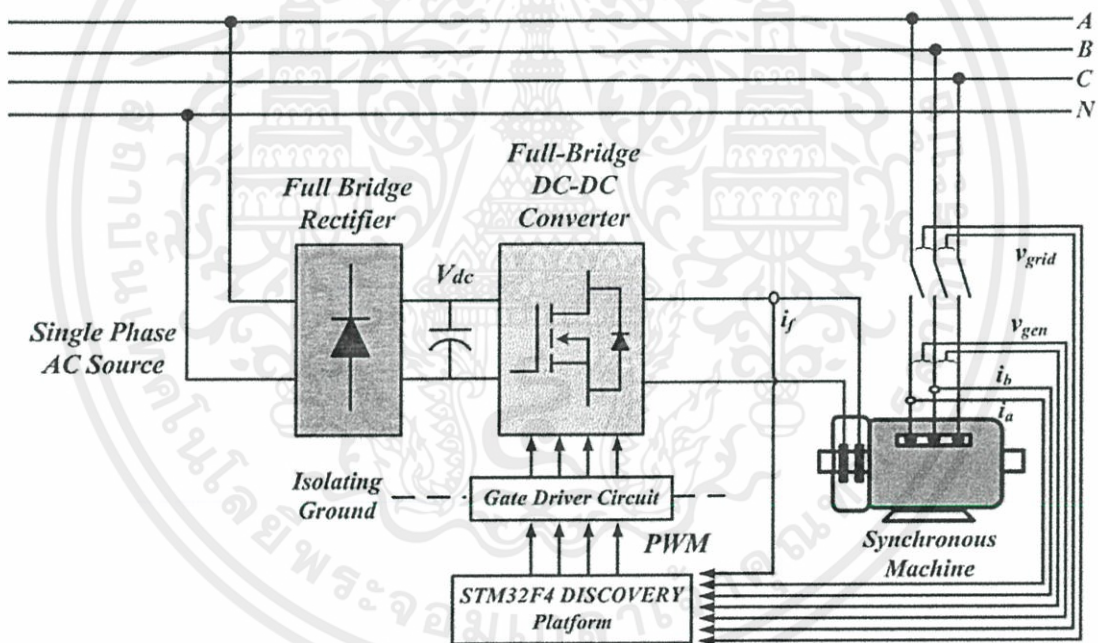
ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสในโครงการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมต่อกันกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนี้ประกอบไปด้วยขดลวด 2 ขดลวด คือ ขดลวดอาร์มาเจอร์ และขดลวดสนาม ซึ่งในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนี้จะมีการป้อนแรงดันจากคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์เข้าที่ขดลวดสนาม และจะมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนี้ เราจะควบคุมให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อทำการต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นเราจะทำการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสให้เป็นมอเตอร์ซิงโครนัสแทนดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

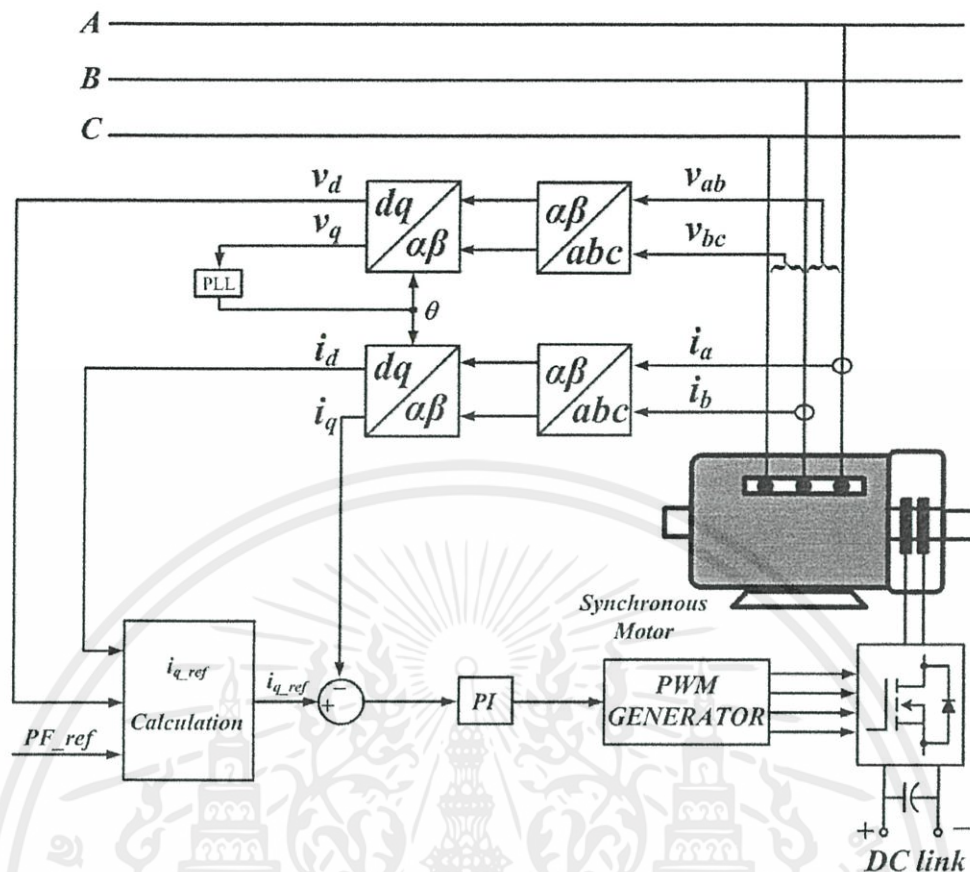


รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ขณะทำงานเป็นมอเตอร์



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมการทำงานการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

จากรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 เมื่อพิจารณาในส่วนหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส แล้วจะมีไดอะแกรมแสดงระบบการทำงานการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสดังรูปที่ 3.3 ซึ่งในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับโครงการวิจัยนี้ จะทำการควบคุมแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์โดยผ่านการสวิตช์มอสเฟตด้วยคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์โดยอาศัยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์ที่มีค่าความถี่สวิตซ์ซึ่ง 5 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส

3.3 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

การจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ทางคอมพิวเตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 การจำลอง คือ การจำลองระบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า และการจำลองระบบการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัส ซึ่งการจำลองทั้งสองระบบนี้ จะทำการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink

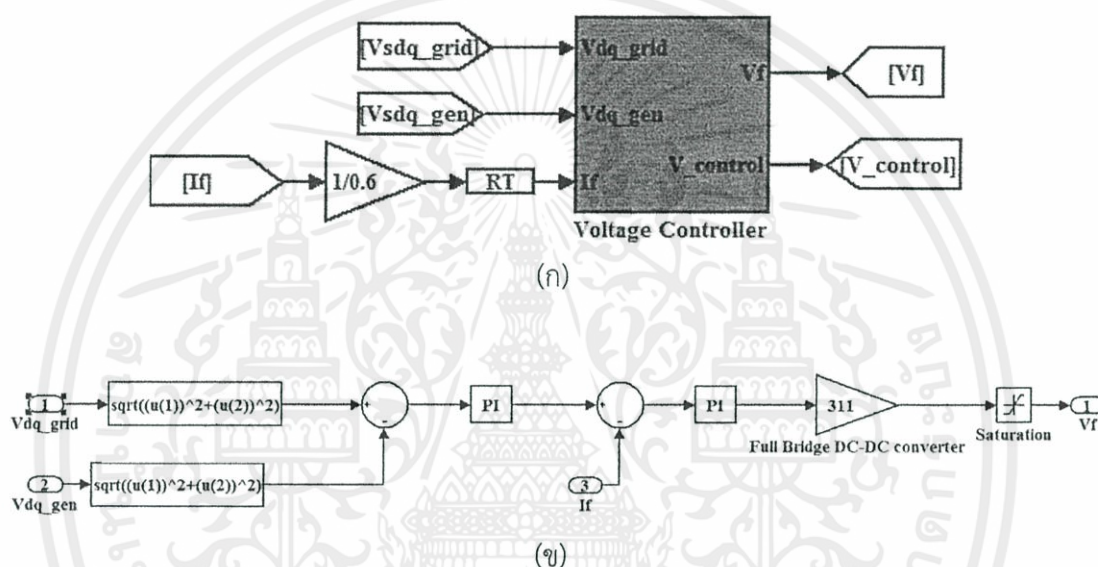
3.3.1 การจำลองระบบในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองระบบในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และทำการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งบล็อกไดอะแกรมการจำลองระบบแสดงดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จะทำการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้เท่ากับขนาดของแรงดันของระบบไฟฟ้าโดยใช้ค่าองค์ประกอบในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเป็นตัวควบคุม [7] สัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมแบบพีไอ จะถูกนำไปคูณกับค่าอัตราขยาย (Gain) ที่เปรียบเสมือนคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ซึ่งจะกล่าวได้ว่าเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณขับเคลื่อน (Amplifier) โดยค่าอัตราขยายจะกำหนดเป็น 311 โวลต์ ซึ่งคือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่บัสไฟตรงคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์นั่นเอง ไดอะแกรมการควบคุมเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การจำลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

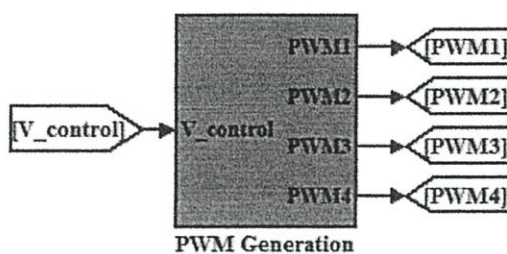
(ก) บล็อกไดอะแกรมการจำลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

(ข) ไดอะแกรมในบล็อก Voltage Controller

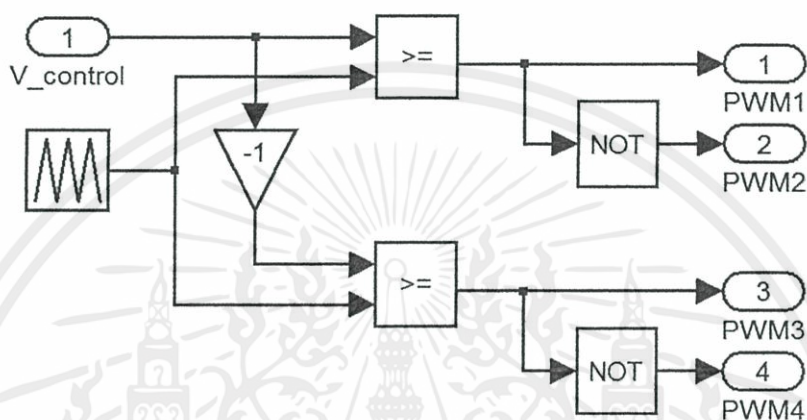
3.3.1.3 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้ในการขับเคลื่อนมีความถี่การสวิตช์ที่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยการนำสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมพีไอมาคูณกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยใช้การมอดูเลตสัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์ ไดอะแกรมการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแสดงดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

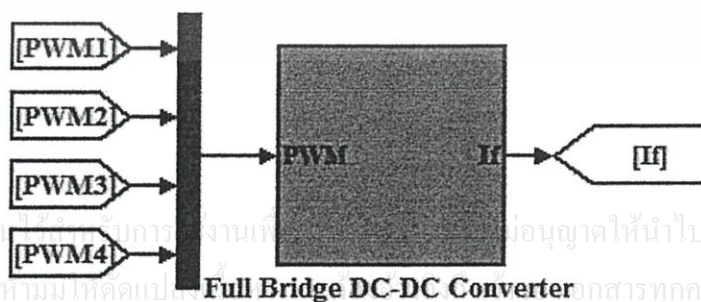


(ข)

รูปที่ 3.9 การจำลองการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (ก) บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM (ข) ไดอะแกรมภายในบล็อก PWM Generation

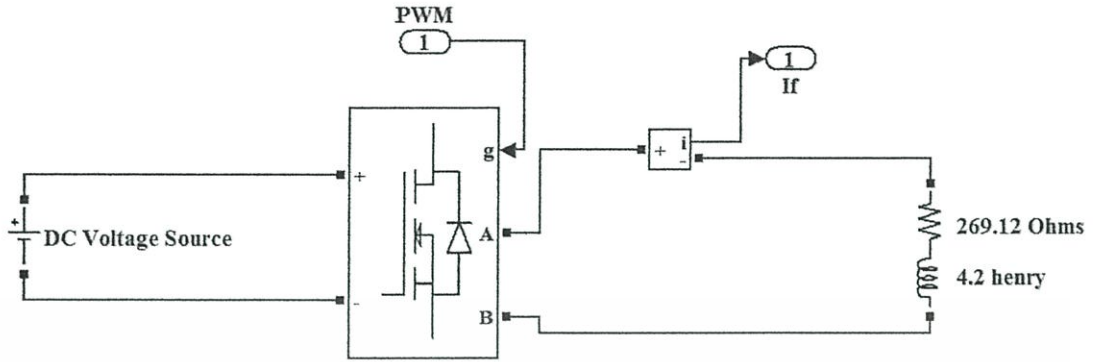
3.3.1.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

การจำลองคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์นั้น เพื่อต้องการพิจารณากระแสที่ไหลเข้าขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ในการป้อนกลับเข้าสู่ตัวควบคุมแบบพีไอในการควบคุมแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยค่าของความต้านทาน และความเหนี่ยวนำที่เป็นภาระไฟฟ้าของวงจร เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดสนามที่ได้มาจากการทดสอบ



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานที่... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



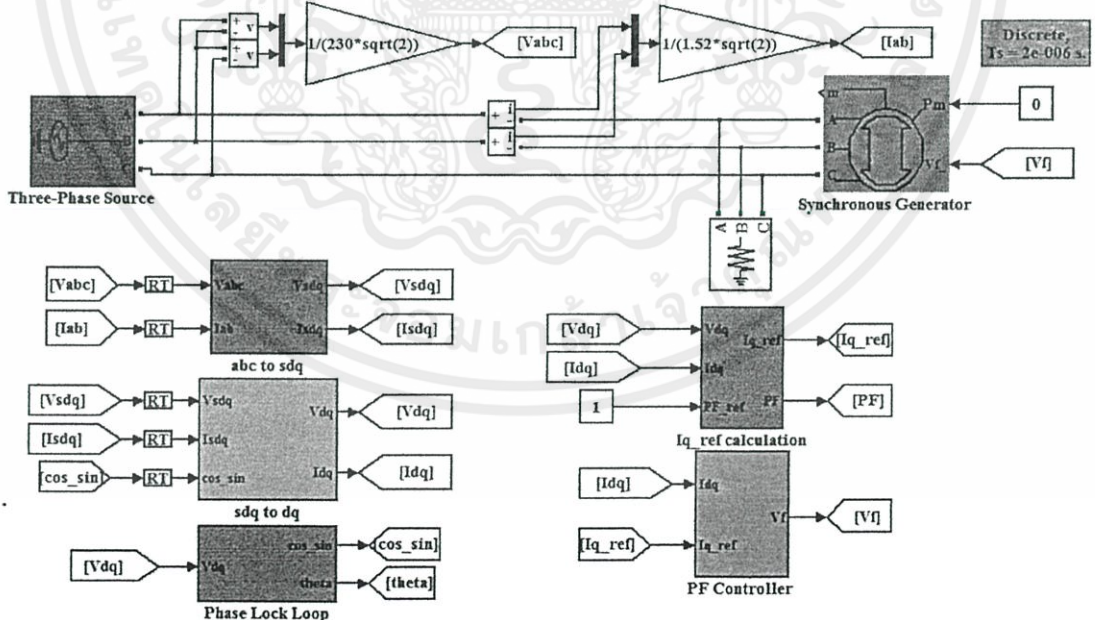
(ข)

รูปที่ 3.10 การจำลองคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

- (ก) บล็อกไดอะแกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์
- (ข) ไดอะแกรมภายในบล็อกคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

3.3.2 การจำลองระบบในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส

ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองระบบในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ที่ภาระค่าต่างๆ กัน การจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้



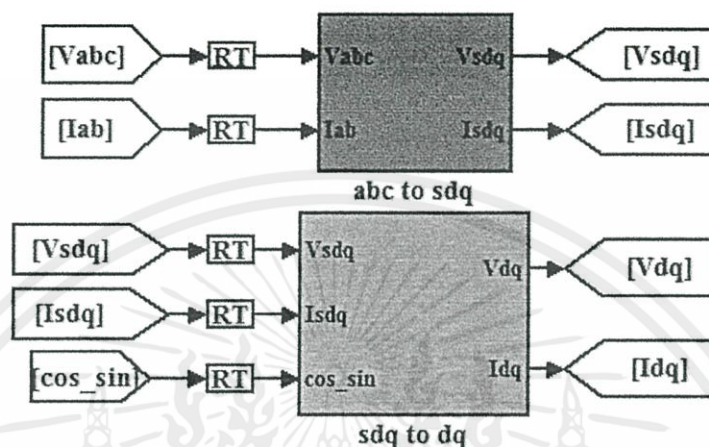
รูปที่ 3.11 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ ถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.1 การสร้างองค์ประกอบในแนวแกนตั้งฉาก

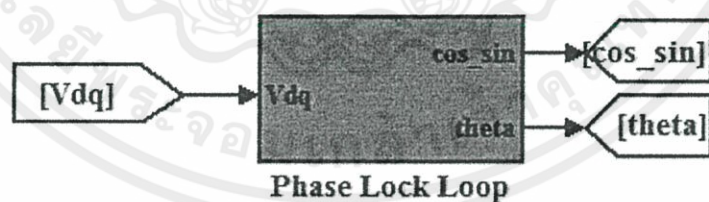
ในส่วนนี้จะคล้ายกับในส่วนของการสร้างองค์ประกอบในแนวแกนตั้งฉากของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพียงแต่จะมีการเพิ่มการสร้างองค์ประกอบในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสเพิ่มเติม โดยใช้การแปลงของพาร์กดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมจำลองการแปลงสัญญาณแรงดัน และกระแสจากกรอบอ้างอิงสามเฟส ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงซิงโครนัส

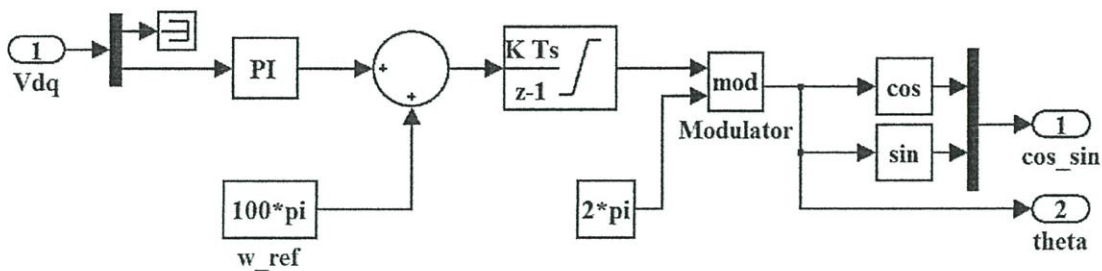
3.3.2.2 วงจรเฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop)

การสร้างสัญญาณในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส จะต้องทำการประมาณค่ามุมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วงจรเฟสล็อกคูลูป[2] ซึ่งจะได้ค่ามุมของสัญญาณแรงดันของระบบไฟฟ้า ดังไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 3.13



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



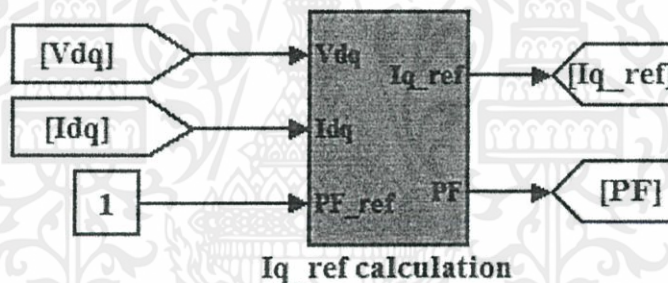
(ข)

รูปที่ 3.13 การจำลองวงจรเฟสล็อกคูลูป (ก) บล็อกไดอะแกรมวงจรเฟสล็อกคูลูป

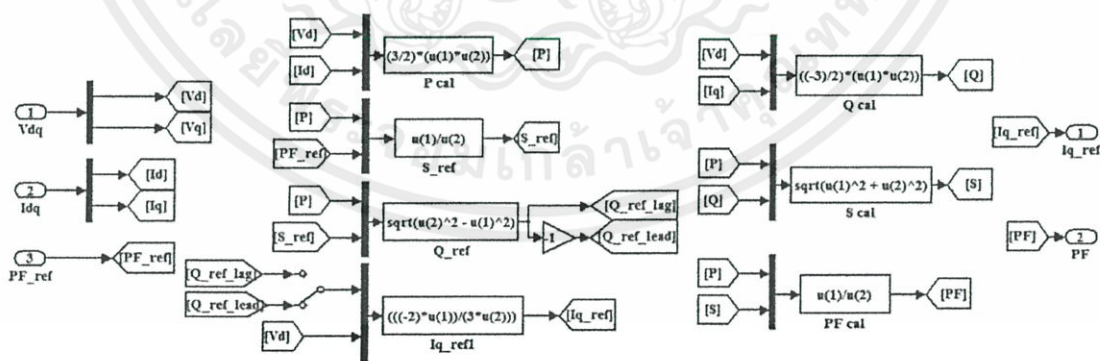
(ข) ไดอะแกรมภายในบล็อก Phase Lock Loop

3.3.2.3 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแนวแกน q

ในส่วนนี้ จะนำค่าตัวประกอบกำลังอ้างอิงที่ต้องการ มาทำการคำนวณเพื่อหาค่าองค์ประกอบของกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงในแนวแกน q เพื่อจะนำไปเข้าสู่การควบคุมวงรอบปิด[5] แสดงดังรูปที่ 3.14



(ก)



(ข)

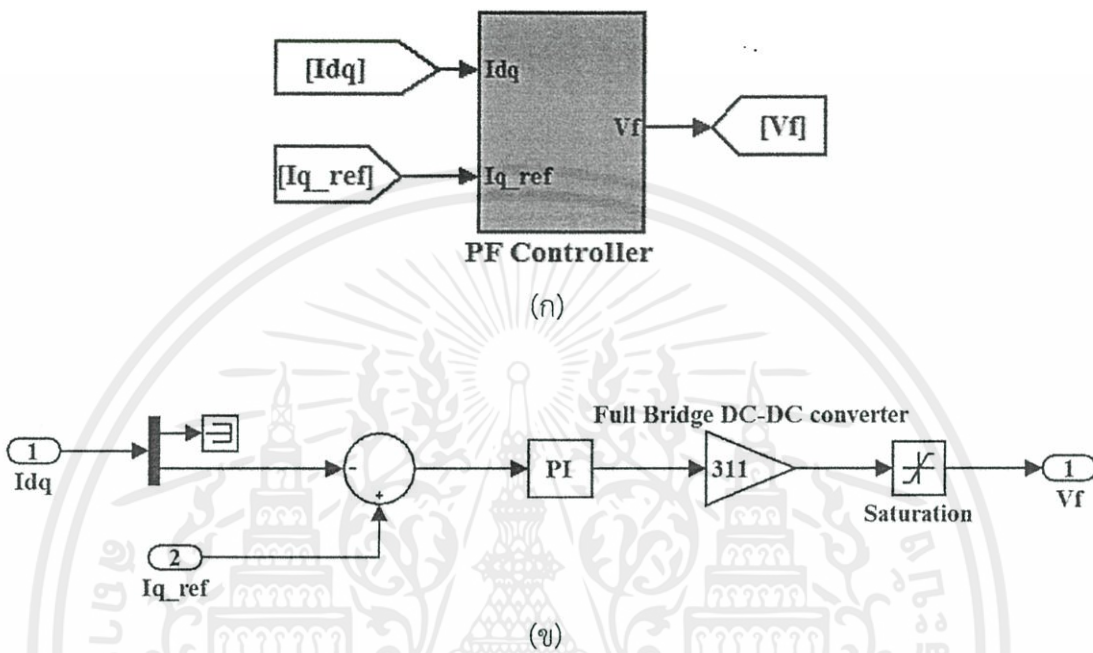
รูปที่ 3.14 การคำนวณหากระแสอ้างอิงในแนวแกน q

(ก) บล็อกไดอะแกรมการคำนวณหาค่าองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในแนวแกน q

(ข) ไดอะแกรมภายในบล็อก Iq_ref calculation

3.3.2.4 การควบคุมตัวประกอบกำลัง

การควบคุมตัวประกอบกำลังจะควบคุมผ่านองค์ประกอบของกระแสอาร์มาเจอร์ในแนวแกน q ผ่านตัวควบคุมแบบพีไอ จากนั้นจะทำการคูณด้วยค่าอัตราขยายเท่ากับ 311 จะได้เป็นแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดสนามของมอเตอร์ซิงโครนัส ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การจำลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง

(ก) บล็อกไดอะแกรมควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง

(ข) ไดอะแกรมภายในบล็อก PF Controller

3.4 การสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

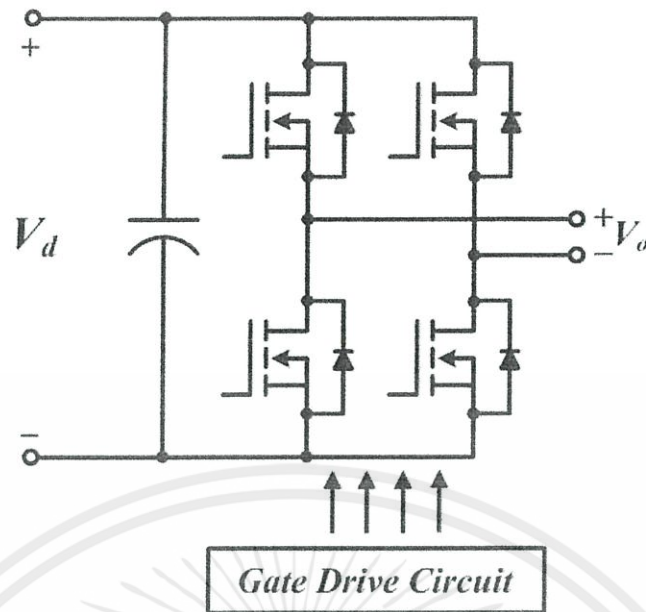
การสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์สำหรับปรับค่าแรงดันที่ขดลวดสนามของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนวงจรกำลังและส่วนวงจรควบคุม ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

3.4.1 ส่วนวงจรกำลัง

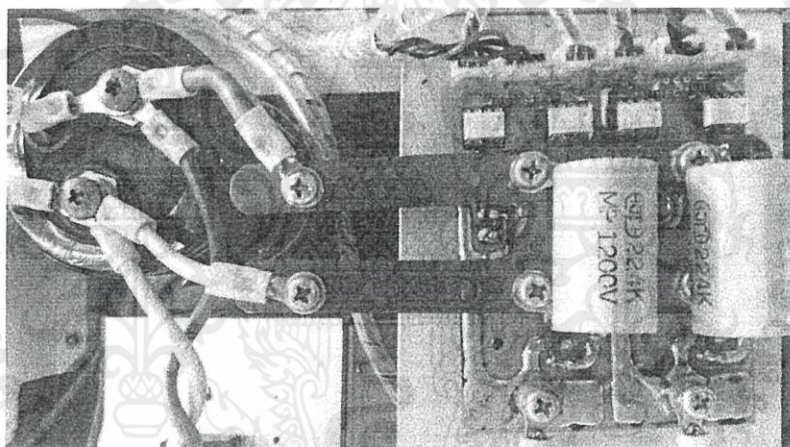
3.4.1.1 คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

วงจรของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะประกอบไปด้วยมอสเฟต เบอร์ IRFP460 พิกัดแรงดัน 500 V พิกัดกระแส 20 A จำนวน 4 ตัว ต่อวงจรในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.16 คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

(ก) ไดอะแกรมวงจรของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

(ข) รูปชิ้นงานคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

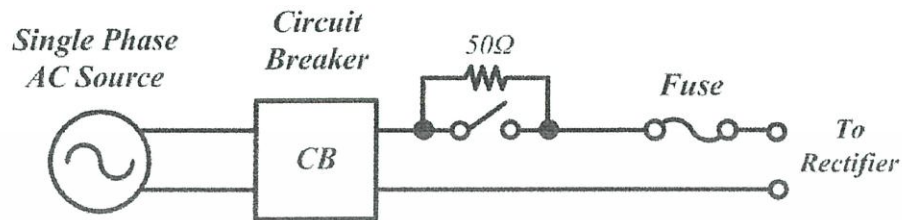
3.4.1.2 อุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง

การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเข้าไปในระบบ มีจุดประสงค์เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากความผิดพลาดของผู้วิจัย หรืออาจเกิดจากอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบ อุปกรณ์ป้องกันดังแสดงในรูปที่ 3.17 จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

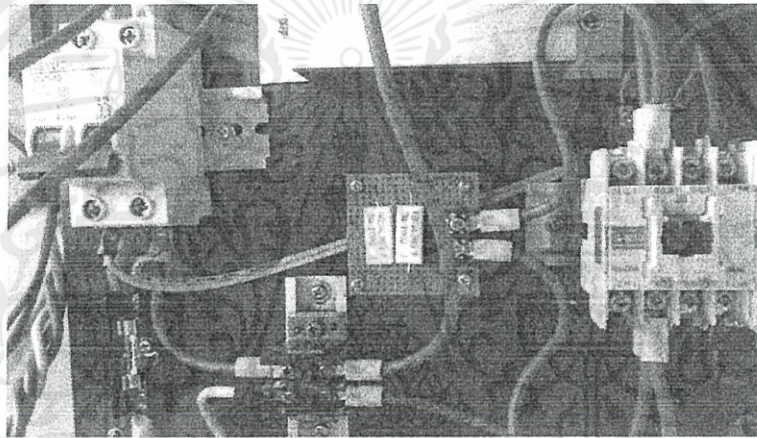
1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ 2 ขั้ว ขนาด 230/400 V, 50 Hz, 16 A , $I_c = 10\text{kA}$ ทำหน้าที่

ป้องกันโหลดเกิน และการลัดวงจร

2. ฟิวส์ขนาด 10 A 250 V ทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจร
3. ตัวต้านทาน 50 Ω ต่อคร่อมแมกเนติกคอนแทคเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสชาร์ทัวเก็บประจุในวงจร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง (ก) ไดอะแกรมวงจรป้องกัน
(ข) รูปชิ้นงานวงจรป้องกัน

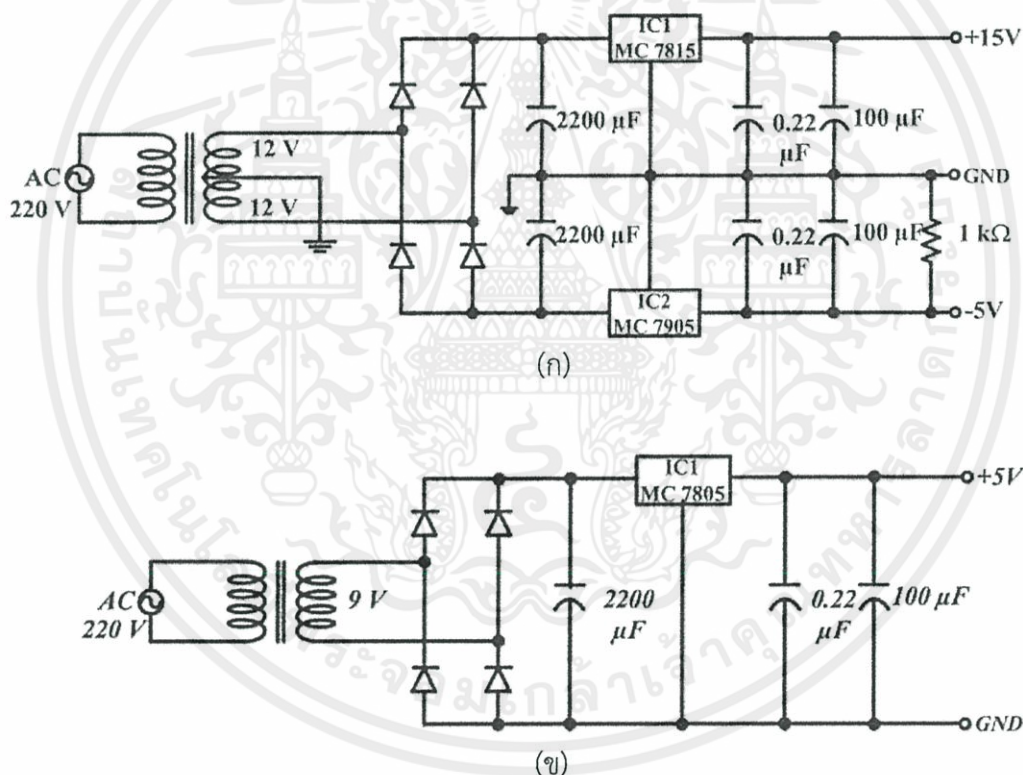
3.4.2 ส่วนวงจรควบคุม

ในส่วนของการออกแบบวงจรควบคุมมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัสโดยอาศัยหลักการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อควบคุมสวิทช์ในคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ อีกทั้งยังมีวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าวจรช็อต วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรเชื่อมต่อต่างๆ ดังนี้

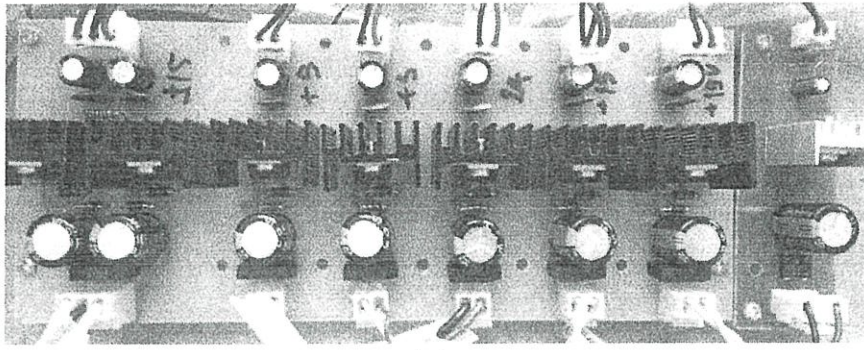
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์แบ่งออกเป็น 5 ขนาดคือ 5 V จำนวน 1 ชุด, $\pm 15V$ จำนวน 4 ชุด, แรงดันไฟ +15V -5 V จำนวน 1 ชุด, 15 V จำนวน 3 ชุด และ 24 V จำนวน 1 ชุด โดยที่แหล่งจ่ายขนาด 5 V จะถูกนำไปจ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด +15 -5 V จะถูกนำไปจ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมการปิด-เปิดของมอสเฟต แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด $\pm 15 V$ จะถูกนำไปจ่ายให้กับตัวตรวจจับแรงดันและตัวตรวจจับกระแส แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 15 V ใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับวงจรขับเคลื่อนที่ควบคุมรีเลย์ และแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 24 V ใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับรีเลย์ป้องกัน ในที่นี้จะแสดงรูปวงจรถวายของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 V -5 V และขนาด 5 V ดังแสดงในรูปที่ 3.18ก และรูปที่ 3.18ข และรูปชิ้นงานแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในรูปที่ 3.18ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

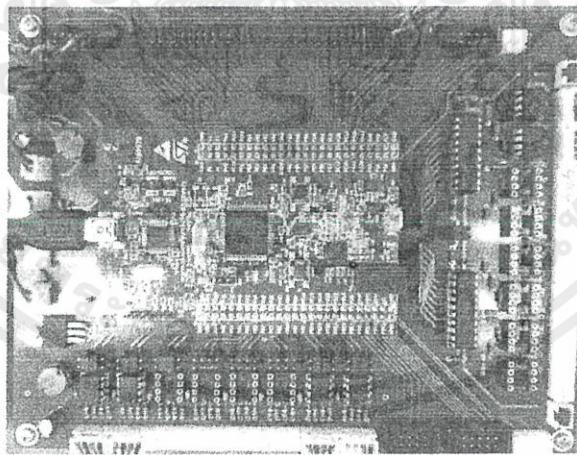
รูปที่ 3.18 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (ก) วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 V,-5 V

(ข) วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 V

(ค) รูปชิ้นงานแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.4.2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการควบคุมระบบนั้นเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ของบริษัท STMicroelectronics ดังแสดงรูปที่ 3.19 เป็นตัวควบคุมระบบ โดยใช้ภาษาซี (C language) ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อรับสัญญาณของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสัญญาณแรงดันของระบบการไฟฟ้าจากวงจรตรวจวัดแรงดันเข้ามาทำการควบคุมมุมเฟส และขนาดแรงดันให้เท่ากัน



รูปที่ 3.19 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ของบริษัท

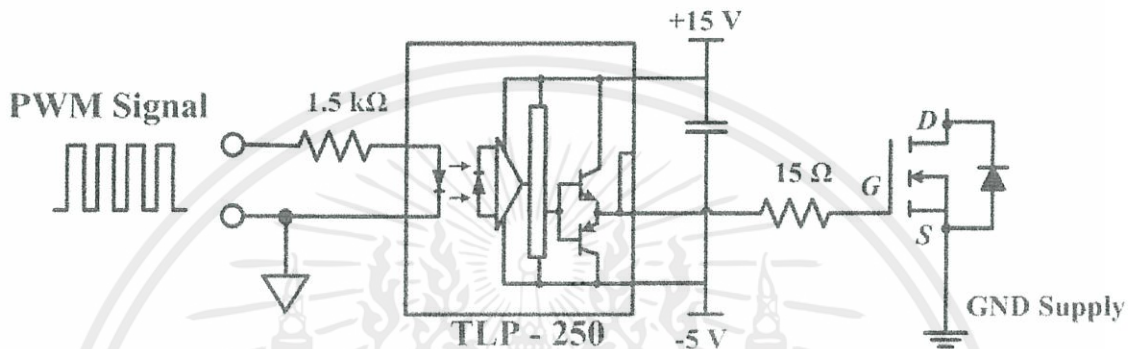
STMicroelectronics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

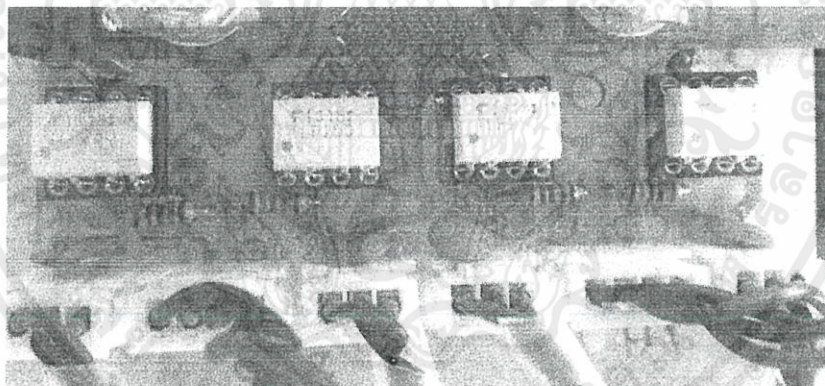
3.4.2.3 วงจรขับเคลื่อน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วงจรขับเคลื่อนสำหรับคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์มีหน้าที่ในการ
ยกระดับสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำไปใช้ในการควบคุมสวิตช์ในวงจร

คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์มีทั้งหมด 4 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยประกอบไปด้วย อุปกรณ์ที่แยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรถูกำลัง ซึ่งได้แก่ ไอซี TLP-250 โดยวงจร ควบคุมและวงจรถูกำลังจะไม่มี การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับทางด้านวงจร ควบคุมในกรณีที่ เกิดเหตุผิดปกติของระบบ วงจรควบคุมจะสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อขับให้ มอสเฟตทำงาน ไอซี TLP-250 ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง +15 V และ -5 V ดังแสดงใน รูปที่ 3.20 ซึ่งแรงดันกระแสตรง - 5 V นี้จะช่วยให้ออสเฟตสามารถหยุดการนำกระแสได้ดีขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.20 วงจรขับเกต (ก) วงจรขับเกตสำหรับคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

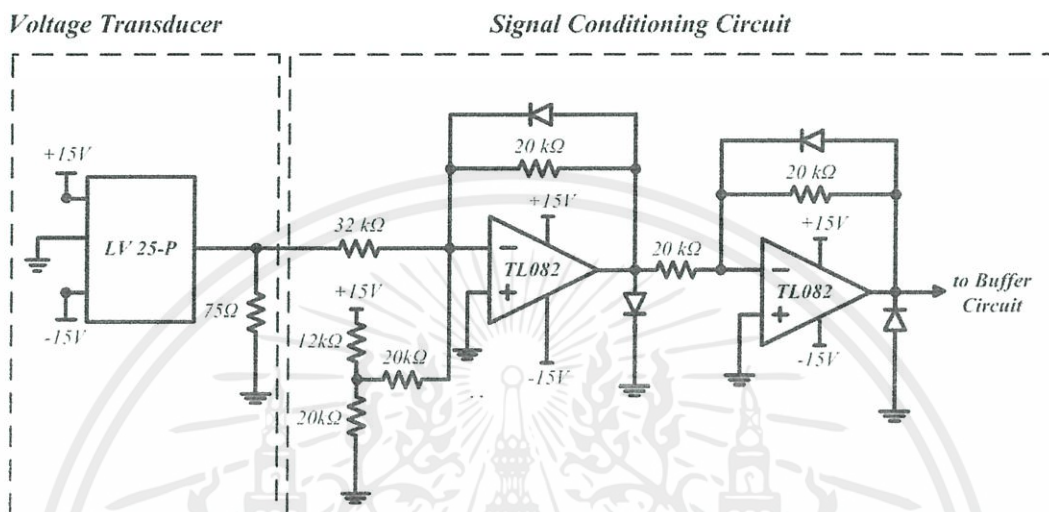
(ข) รูปชิ้นงานวงจรขับเกต

3.4.2.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

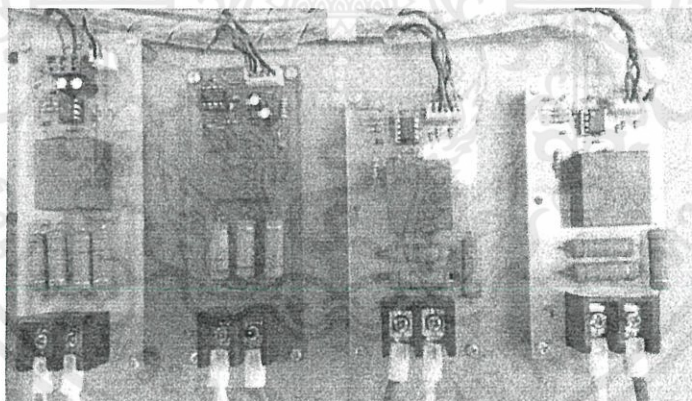
อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะลดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกล

ไฟฟ้าเชิงโครมัสและวัดแรงดันของระบบไฟฟ้าจะใช้อุปกรณ์ในการวัดคือ Voltage Transducer เบอร์ LV 25-P ของบริษัท Liaisons Electroniques-Mécaniques หรือมีชื่อย่อว่า LEM มีพิกัด แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้อยู่ที่ 500 โวลต์ สามารถวัดได้ทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ เอาต์พุตที่วัด ได้จะอยู่ในรูปของกระแสซึ่งแปรผันตรงกับอัตราส่วนของแรงดันที่วัดได้ และเมื่อนำเอาต์พุตต่อผ่าน

ความต้านทาน 150Ω กับกราวด์ เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดัน เพื่อป้อนเข้ากลับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถรับแรงดันสูงสุดได้ 3.3 โวลต์ และเป็นแรงดันไฟฟ้า ด้านบวกเท่านั้น ดังนั้นแรงดันที่ตรวจวัดต้องผ่านวงจรปรับสภาพสัญญาณ (signal conditioning circuit) แสดงในรูป 3.21 เพื่อปรับสภาพแรงดันให้เหมาะสมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก)



(ข)

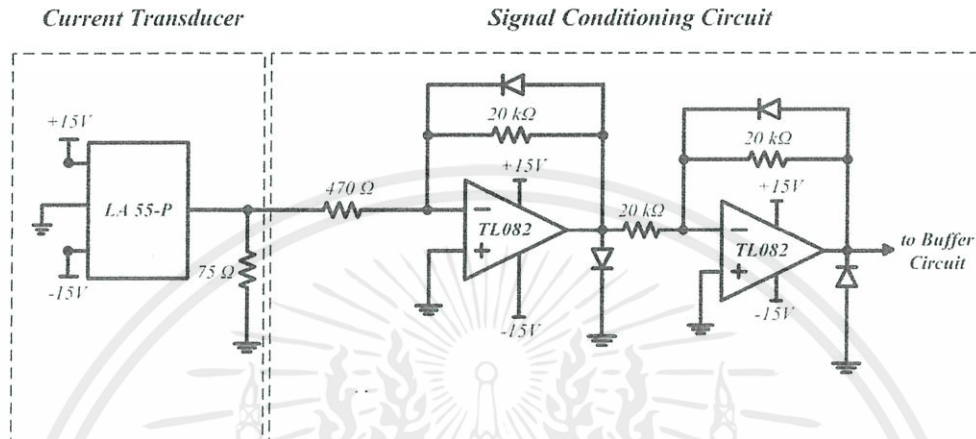
รูปที่ 3.21 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (ก) วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

(ข) รูปชิ้นงานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

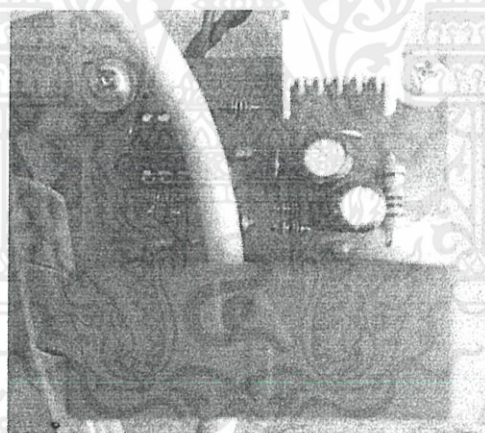
3.4.2.5 วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าจะใช้ Current transducer เบอร์ LA 55-P ของบริษัท LEM มีฟังก์ชันที่สามารถวัดกระแสอยู่ที่ 50 แอมแปร์ สามารถวัดได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ LA 55-P ทำหน้าที่แยกสัญญาณระหว่างส่วนวงจรกำลังและส่วนวงจรควบคุมออกจากกัน เอาต์พุตที่ออกมาเป็นสัญญาณกระแสตามอัตราส่วนของกระแสที่วัดได้ และเมื่อนำเอาต์พุต

ต่อผ่านความต้านทาน 100Ω กับกราวด์ เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดัน เพื่อป้อนเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถรับแรงดันสูงสุดได้ 3.3 โวลต์ และเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านบวกเท่านั้น ดังนั้นแรงดันที่ตรวจวัดต้องผ่านวงจรปรับสภาพสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 เพื่อปรับสภาพแรงดันให้เหมาะสมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.22 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้า (ก) วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

(ข) รูปชิ้นงานวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

3.5 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการใช้หลักการพื้นฐานจากบทที่ 2 นำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จำลองการทำงานในสภาวะการทำงานต่างๆ เพื่อออกแบบสร้าง คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ที่สามารถใช้งานได้จริง และได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบในการควบคุมการทำงานผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการทดสอบระบบดังจะแสดงรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 4

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

4.1 บทนำ

การทดลองจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การทดลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และการทดลองการควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัส ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการทดลอง และผลการทดลองต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ พร้อมทั้งการเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบควบคุมทั้งสองระบบ

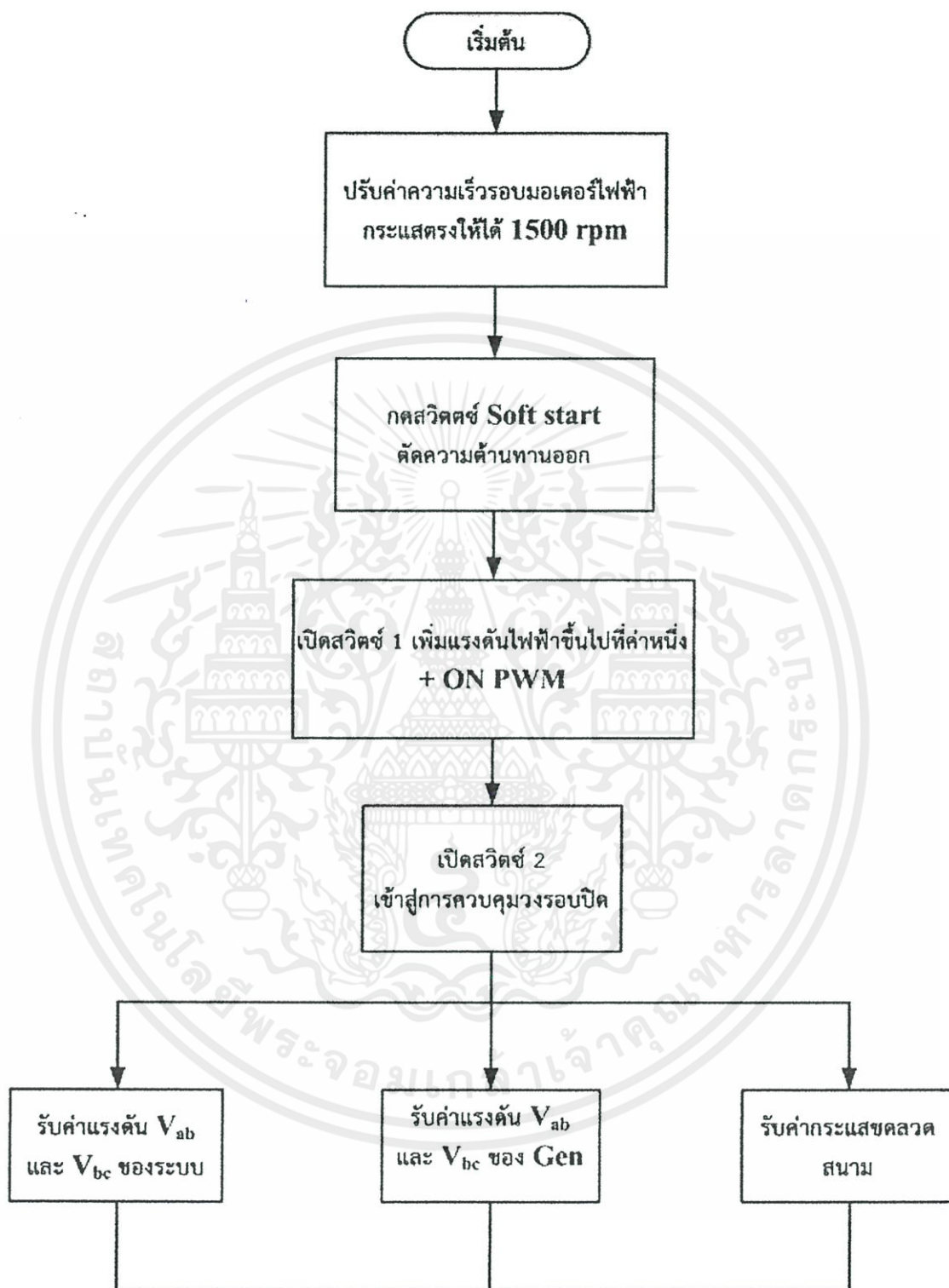
4.2 การทดลอง

ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการทดลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้า เริ่มต้นด้วยการเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ทำงานที่ความเร็วรอบ 1500 rpm จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ชุดลดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะตรวจวัดผลต่างระหว่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาทำการป้อนเข้าสู่ควบคุมแบบวงรอบปิด เพื่อคำนวณการเพิ่มหรือลดความกว้างพัลส์ของสัญญาณพีดีบีแอลเอ็มในการควบคุมให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเท่ากับขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า สุดท้ายจะทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้สัญญาณแรงดันมีมมเฟสต่างกันไม่เกิน ± 10 องศา โดยสังเกตจากขนาดของแรงดันผลต่างระหว่างเฟสเดียวกันต้องไม่เกิน $\pm 5\%$ ของขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า[1] จึงจะทำการกดสวิตช์เพื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงในแผนผังดังรูปที่ 4.1

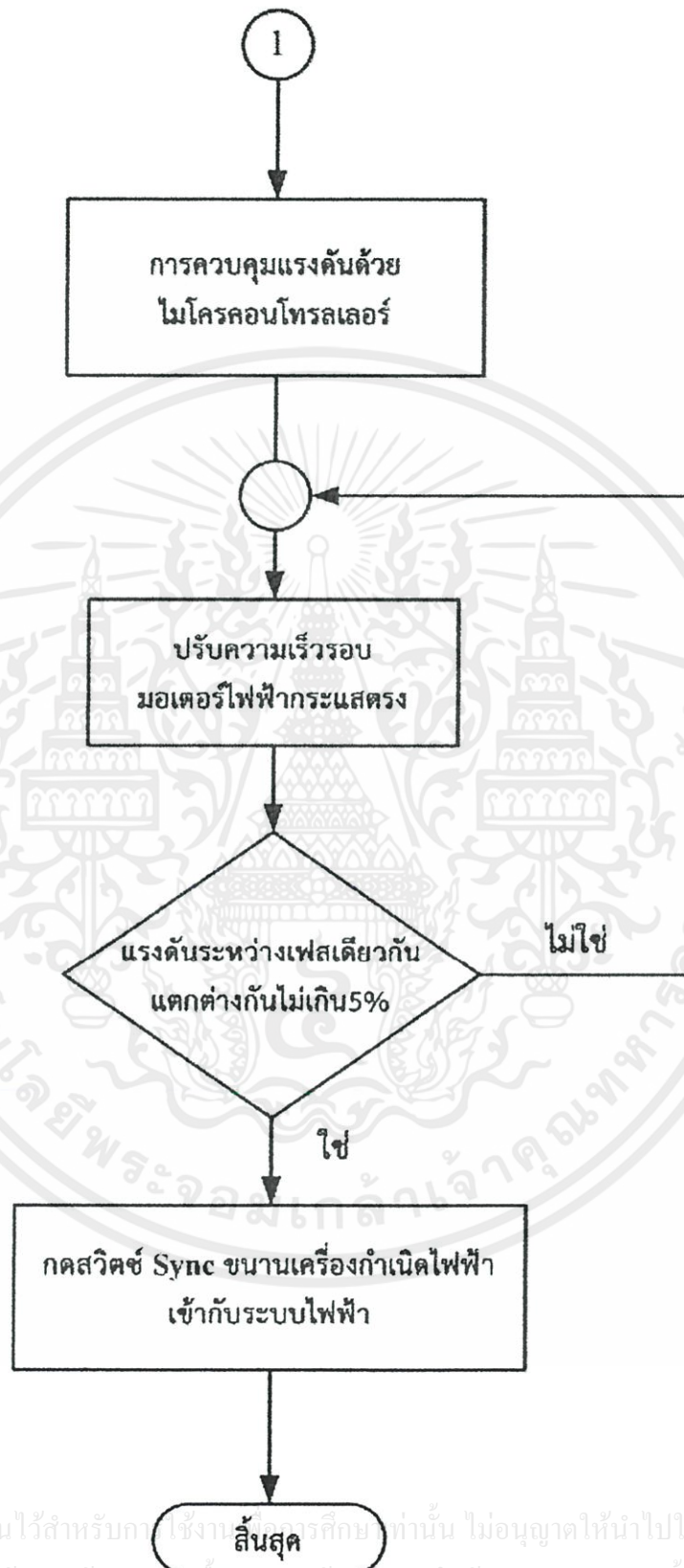
ส่วนที่สองจะเป็นการทดลองการควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อทำงานเป็นมอเตอร์ เริ่มต้นด้วยการปลดแหล่งจ่ายเข้าชุดลดอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงออก ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานเป็นมอเตอร์ และทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วจะทำการต่อภาระไฟฟ้าเข้าที่ขั้วของชุดลดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจะทำการปรับค่าตัวประกอบ

เอกสารนี้กำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะรับค่าตัวประกอบกำลังอ้างอิงจากสวิตช์

ไม่ว่ากรณีหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 การทดลองนี้จะทำการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่ภาระไฟฟ้า 185 วัตต์, 365 วัตต์, 565 วัตต์ และ 755 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงในแผนผังดังรูปที่ 4.2

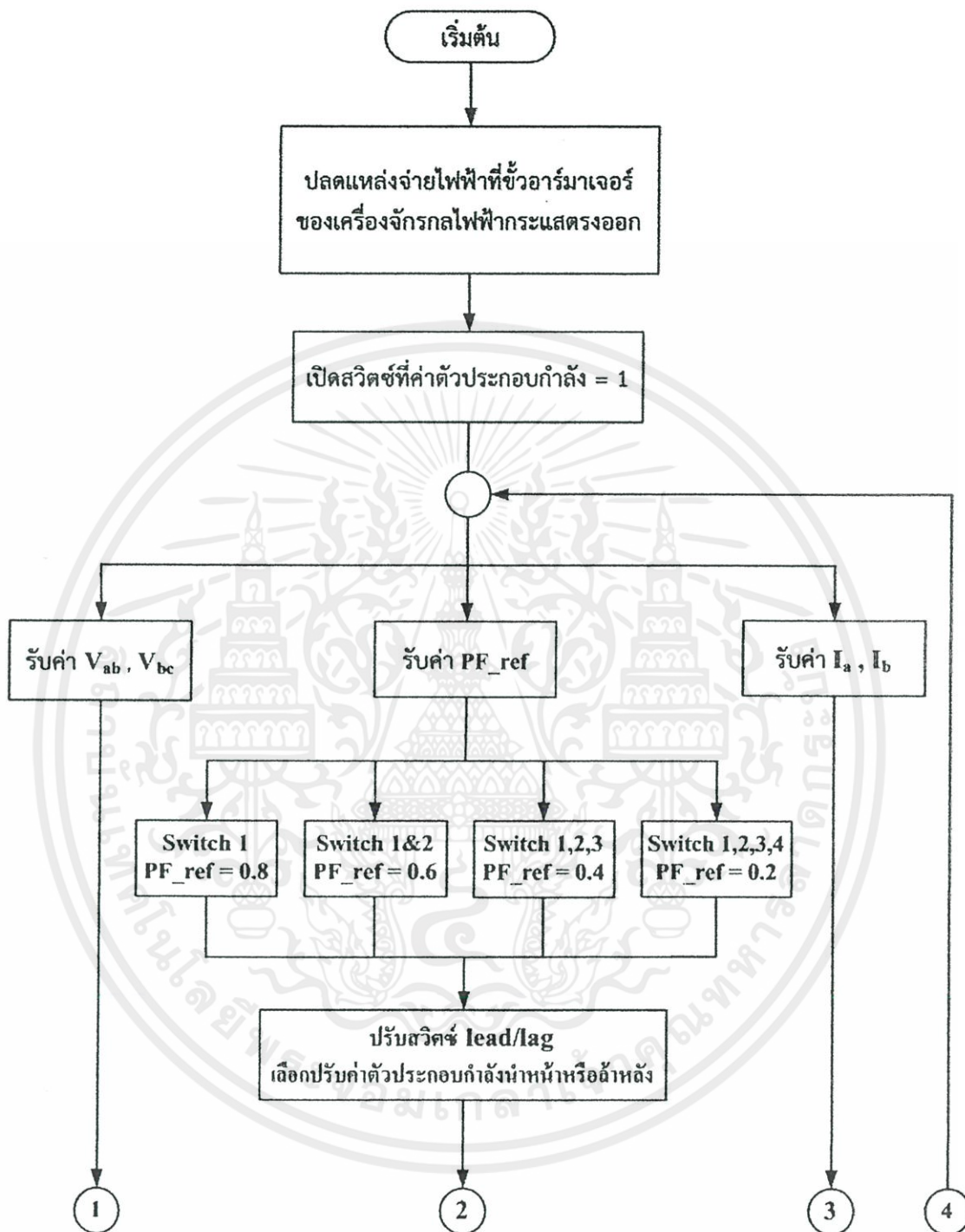


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

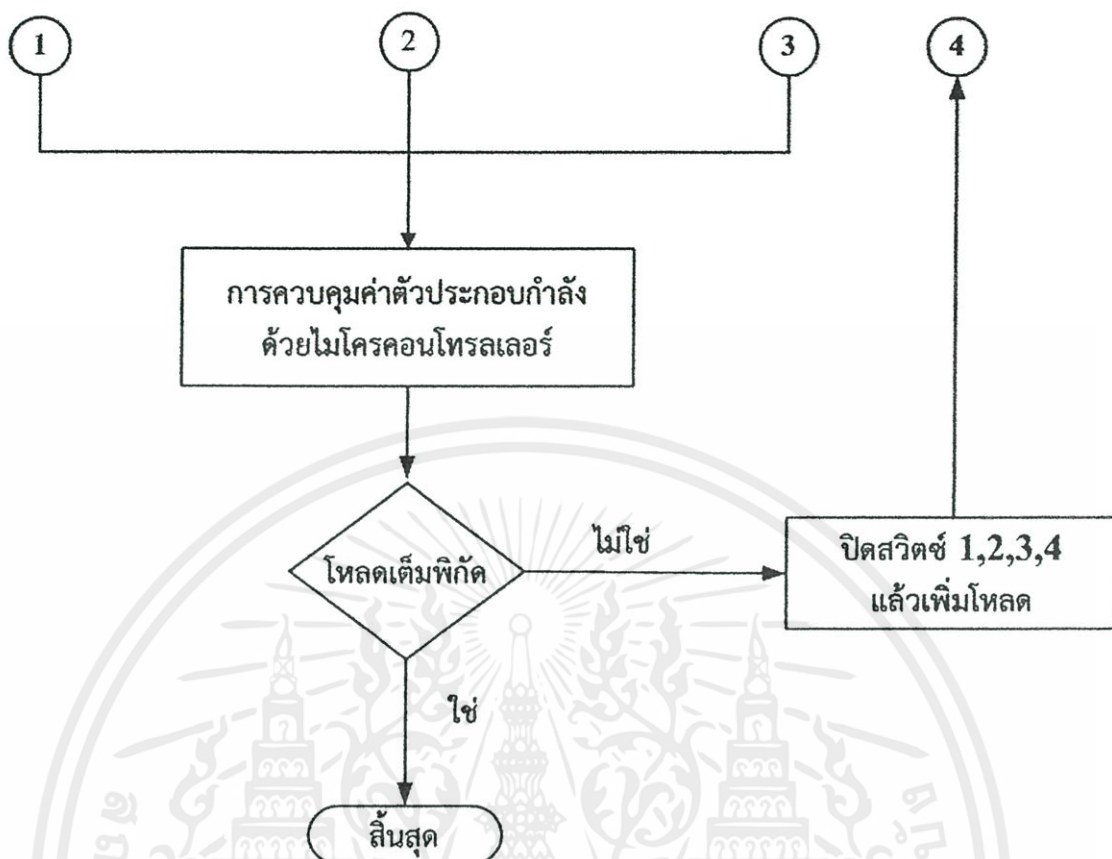


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แผนผังการทดลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



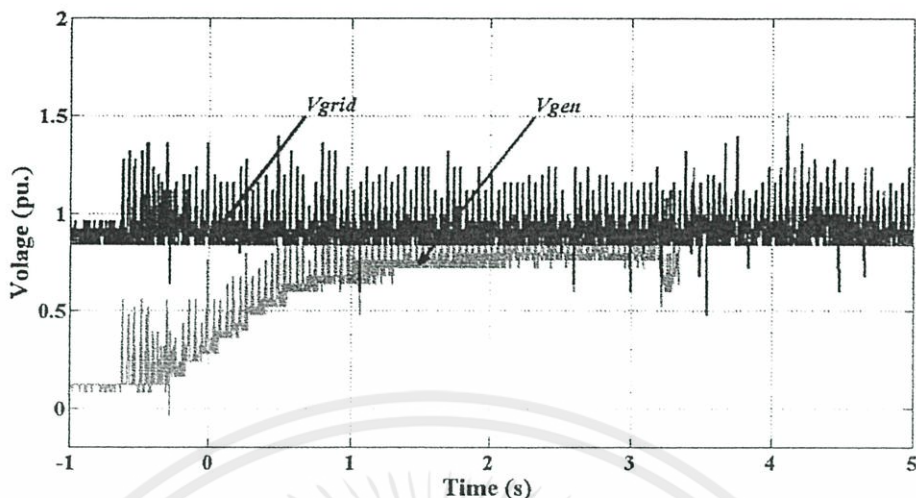
รูปที่ 4.2 แผนผังการทดลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส

4.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

4.3.1 การเพิ่มสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในส่วนนี้จะแบ่งส่วนการเพิ่มสัญญาณแรงดันเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะทำการเปิดสวิตช์หมายเลข 1 เพื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสไปที่ค่าหนึ่ง ขั้นตอนที่สองจะทำการเปิดสวิตช์หมายเลข 2 เพื่อเข้าสู่ระบบควบคุมวงรอบปิดซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.3

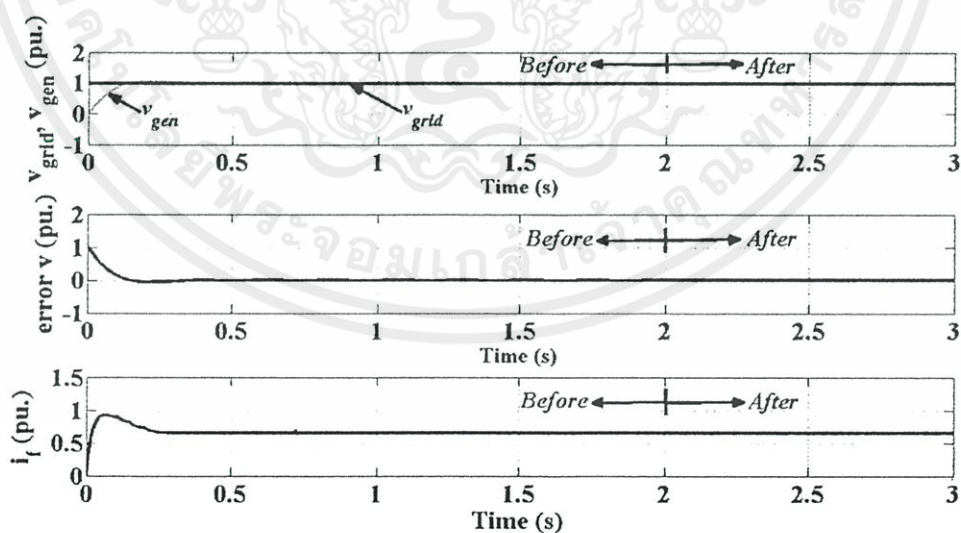
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า

4.3.2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้เท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแล้ว ต่อมาจะทำการปรับความเร็วรอบให้ความแตกต่างแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสเดียวกันมีค่าน้อยกว่า 5% ของขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า แล้วจึงทำการกดสวิตช์ทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของระบบก่อนและหลังทำการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.4



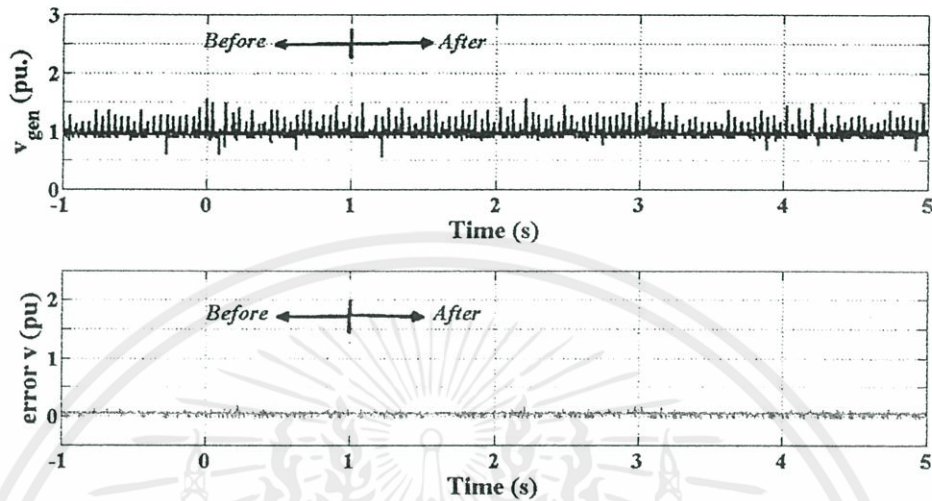
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การขงงานที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ซิงโครนัส

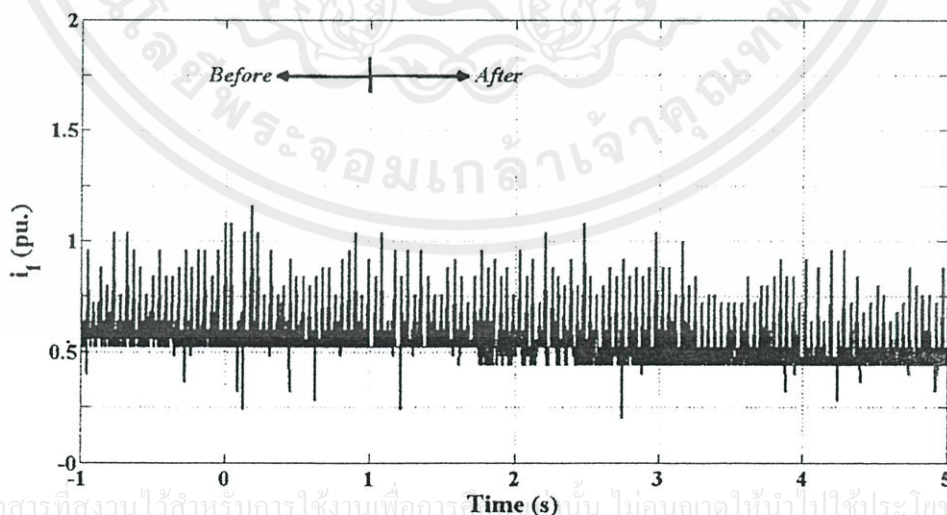
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผลการทดลองจะพบว่าก่อนทำการขนาน และหลังจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแล้วค่าความผิดพลาดของสัญญาณแรงดันมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า และค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

ในส่วนของกระแสไฟฟ้าของขดลวดสนามเมื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแล้ว ลักษณะของกระแสไฟฟ้าก่อน และหลังการขนานมีการตอบสนองดังรูปที่ 4.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

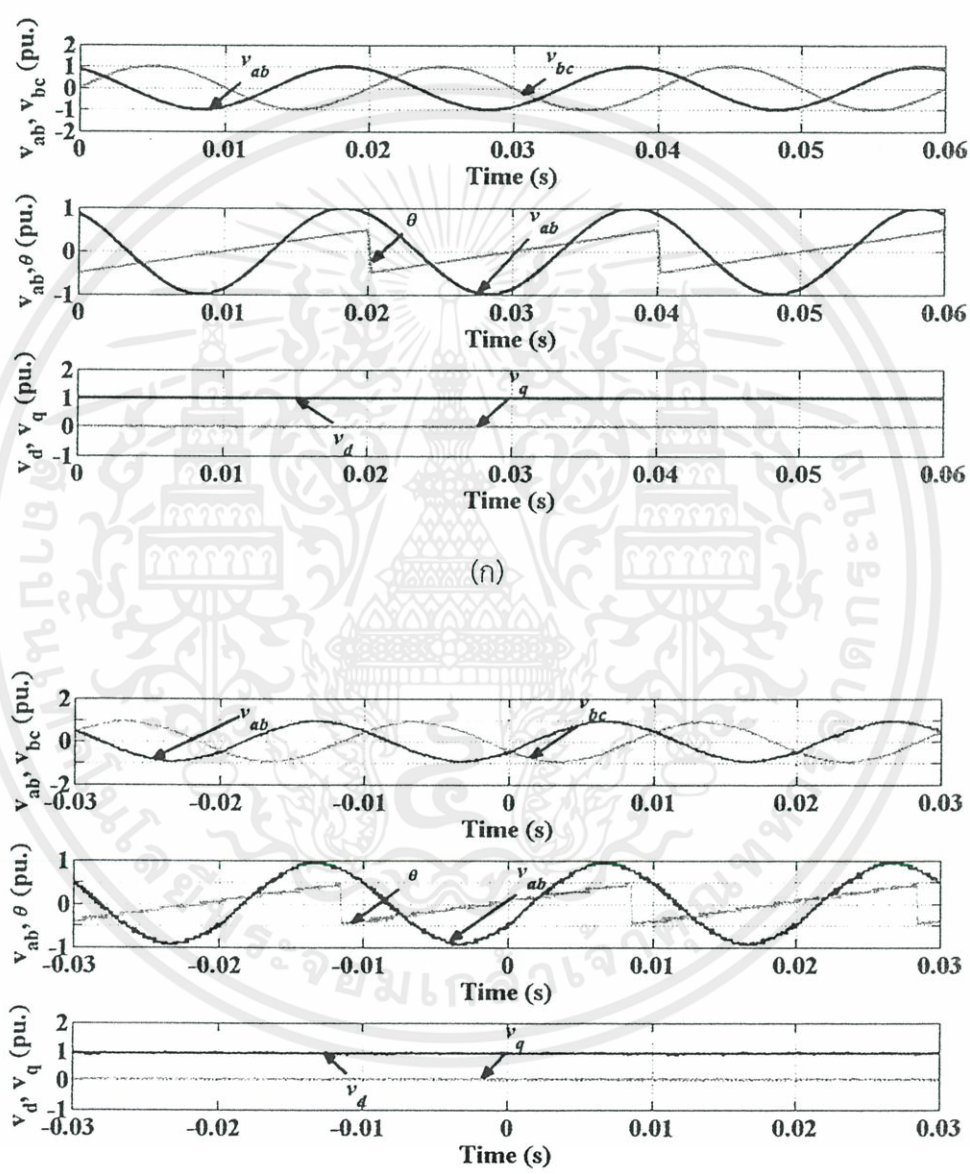
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้จัดทำขึ้นนี้ให้ด้วยใจปรารถนาและหวังดีถึงท่านขอสงวนสิทธิ์ที่มีคุณูปการไปให้

รูปที่ 4.6 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของขดลวดสนามเมื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

4.4 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส

4.4.1 การสร้างองค์ประกอบในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

การสร้างองค์ประกอบจากการประมาณค่ามุมโดยวงจรเฟสล็อกคูลูป แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะสามารถประมาณค่ามุมของแรงดัน และสร้างองค์ประกอบของแรงดันในแนวแกนตั้งฉากได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในรูปที่ 4.7ก จะเห็นว่ามัลักษณะเหมือนกัน

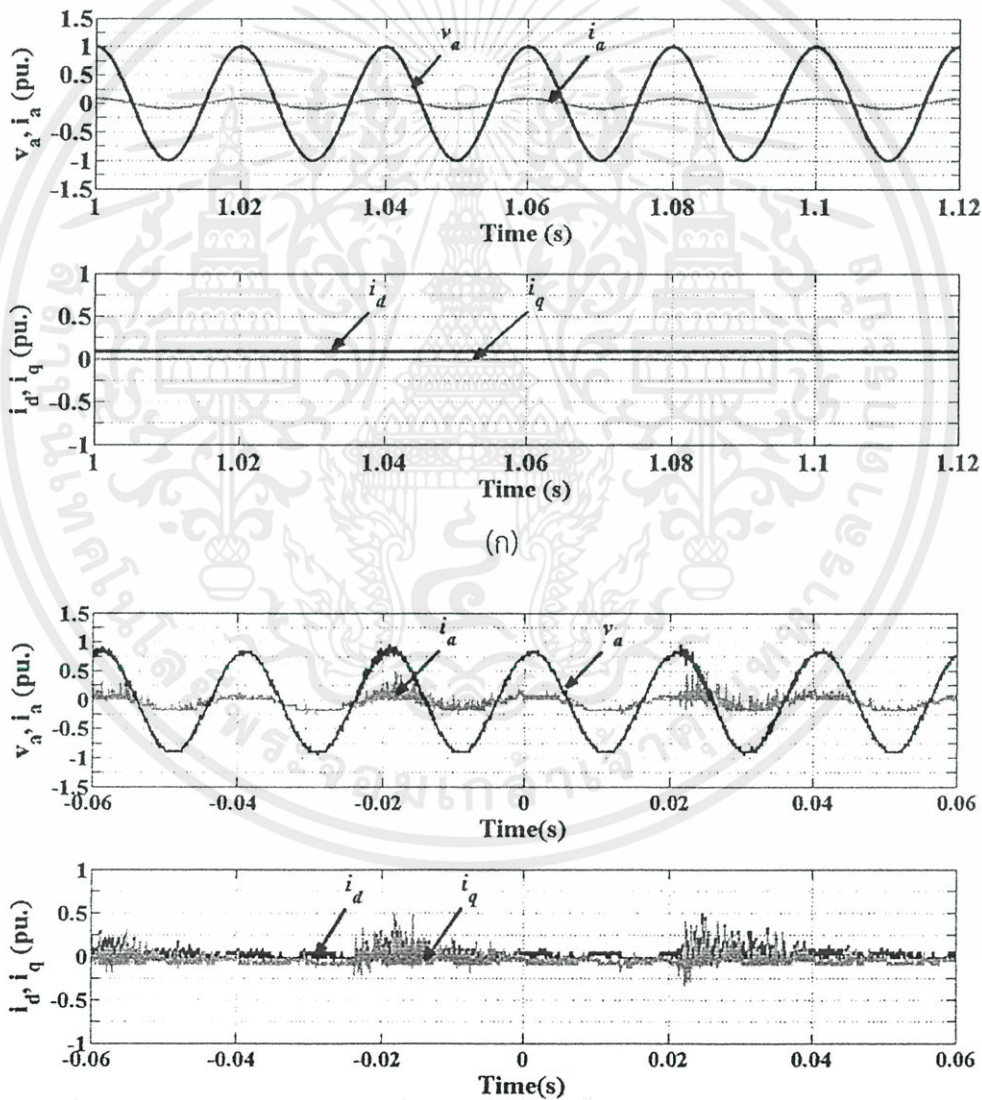


รูปที่ 4.7 การสร้างองค์ประกอบในแนวแกนตั้งฉากของวงจรเฟสล็อกคูลูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การปรับค่าตัวประกอบกำลัง

เมื่อไม่มีภาระไฟฟ้า สามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสได้ ดังนี้ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.8, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.9, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.10, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.11, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.12, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.13, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.14, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.2 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.15 และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.2 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.16 โดยที่ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ และค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามมีค่าไม่เกินพิกัดของมอเตอร์

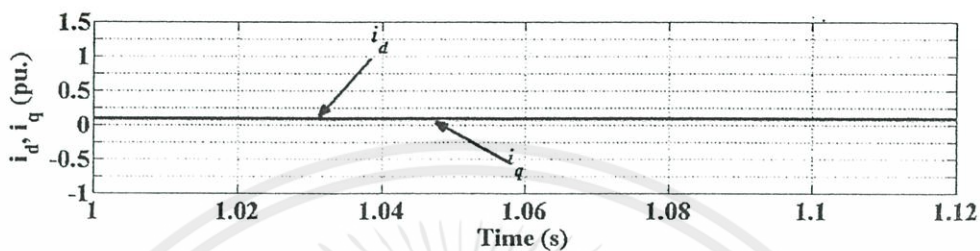
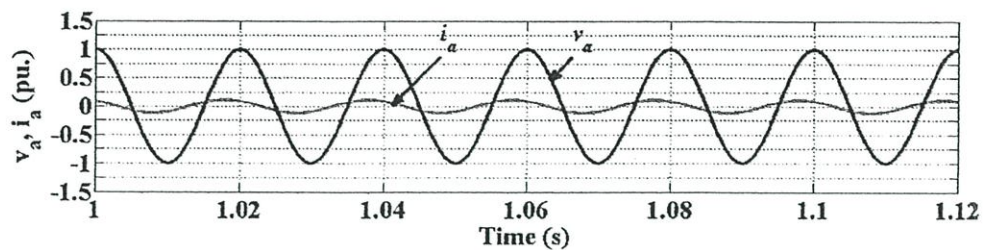


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

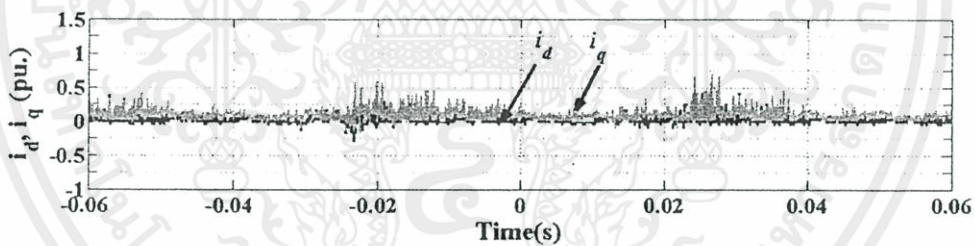
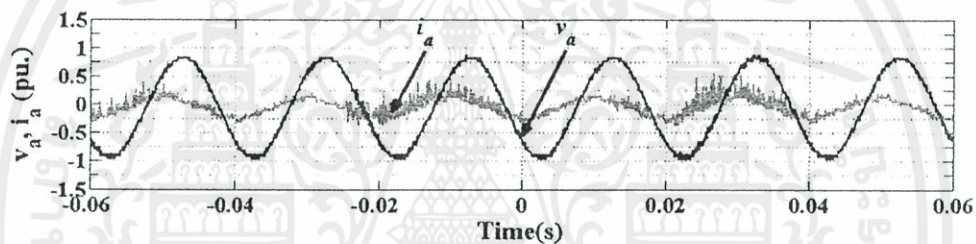
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นำนำไปใช้

รูปที่ 4.8 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง



(ก)

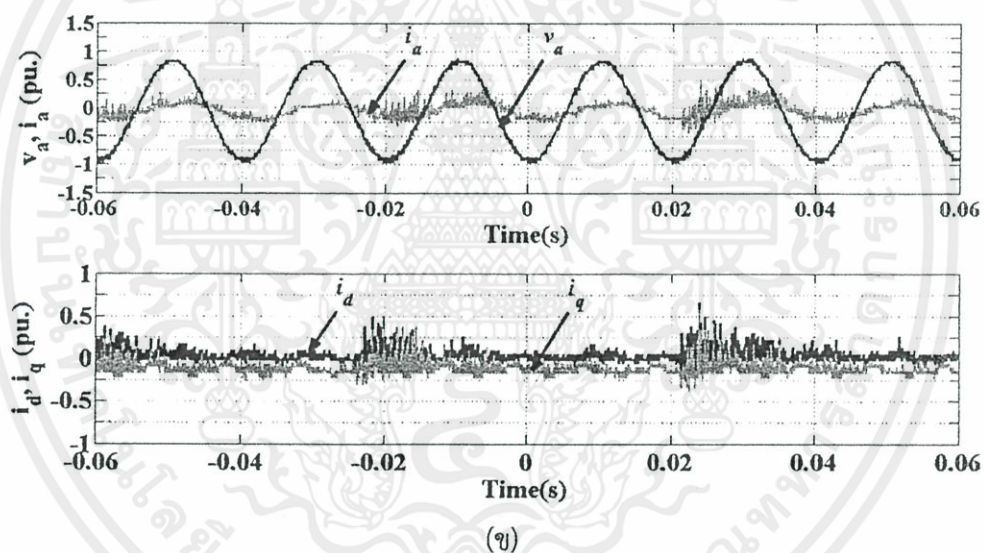
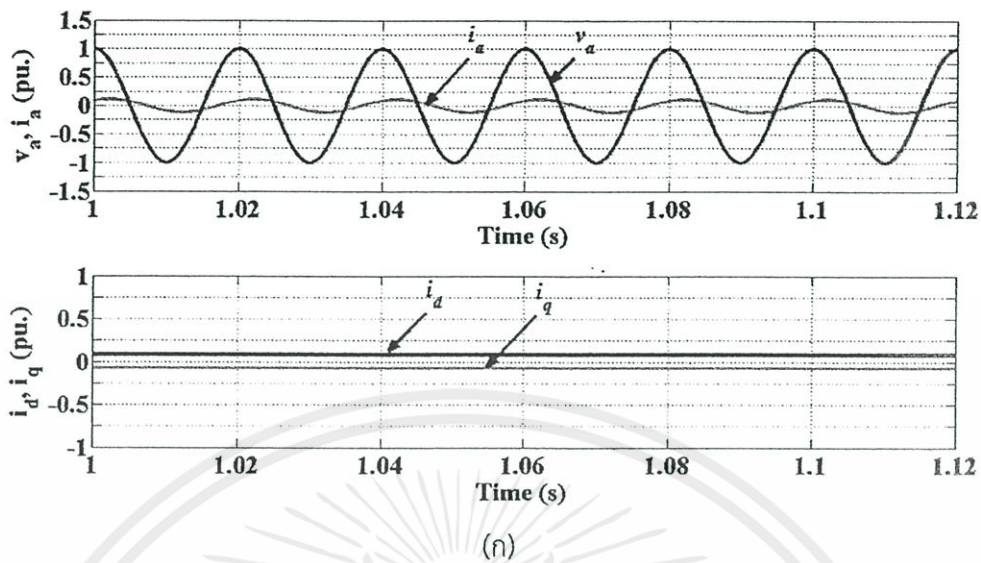


(ข)

รูปที่ 4.9 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

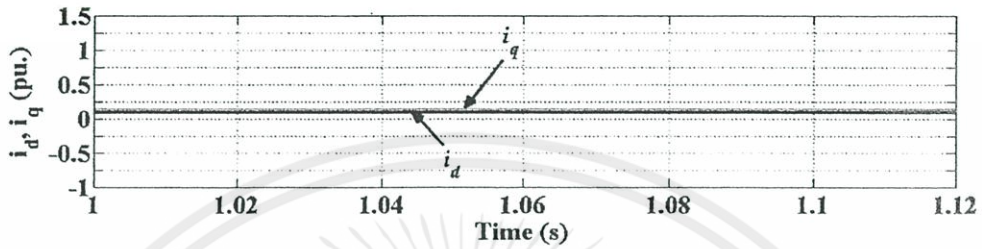
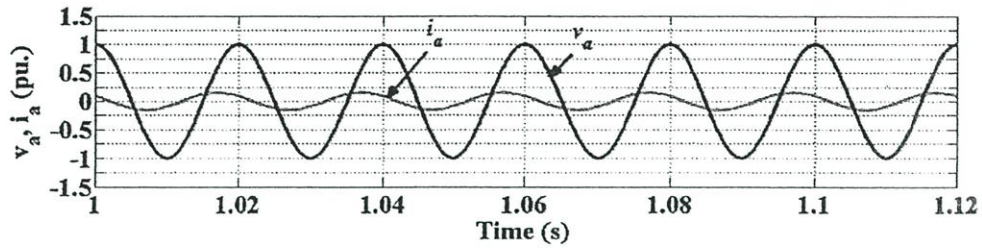
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

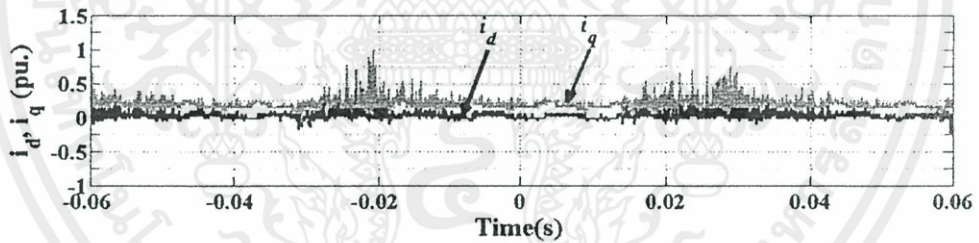
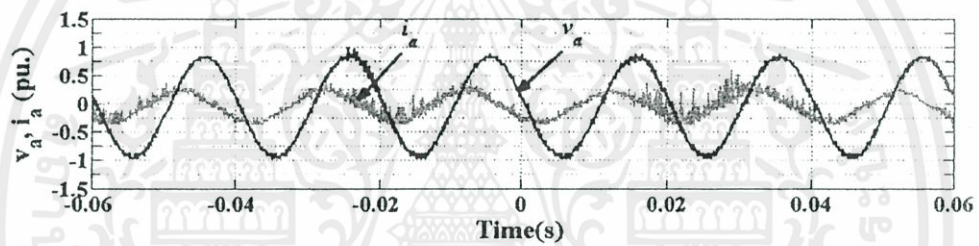


รูปที่ 4.10 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

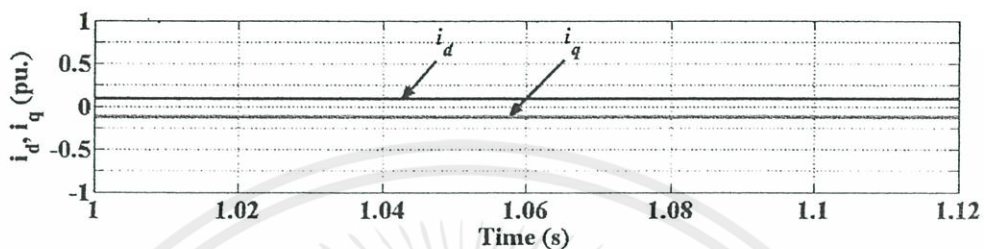
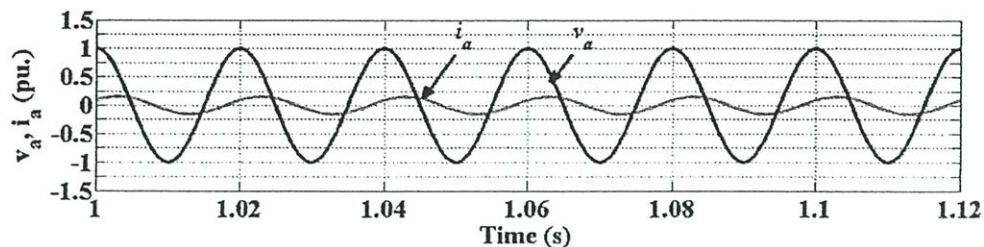


(ข)

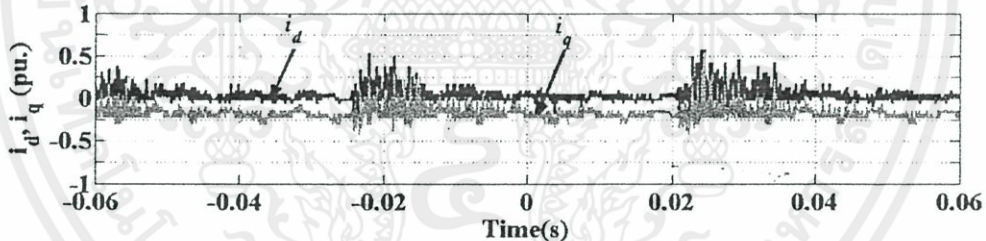
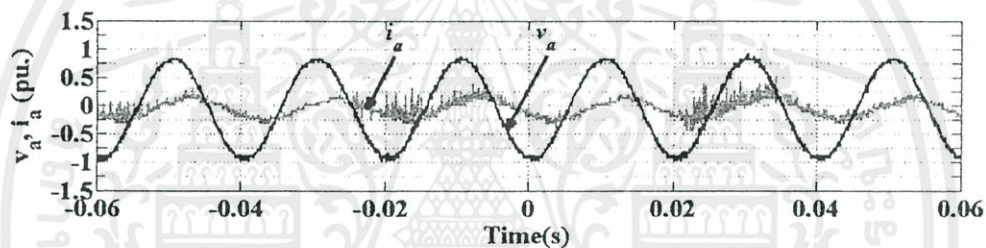
รูปที่ 4.11 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

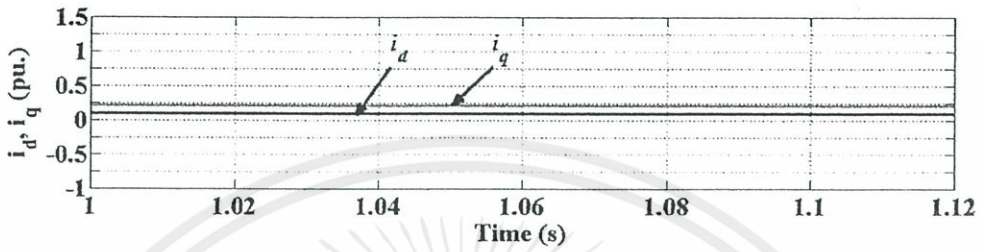
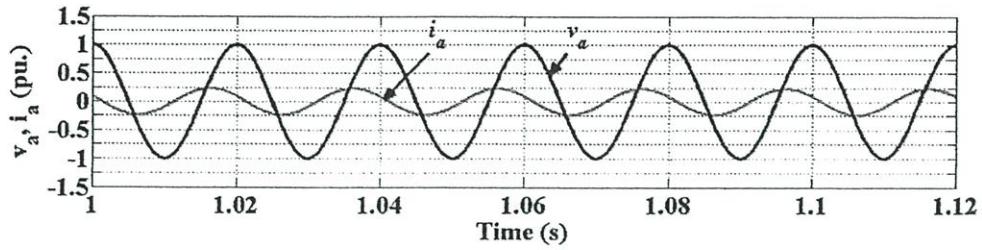


(ข)

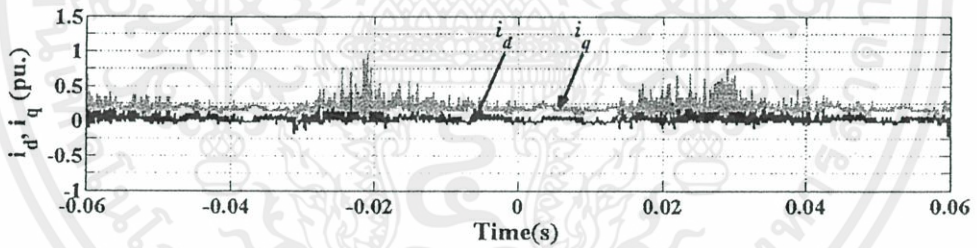
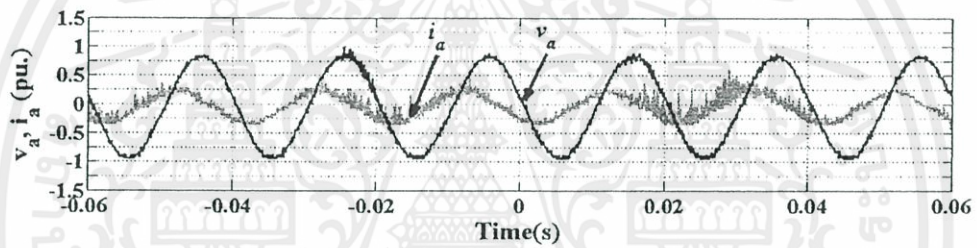
รูปที่ 4.12 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

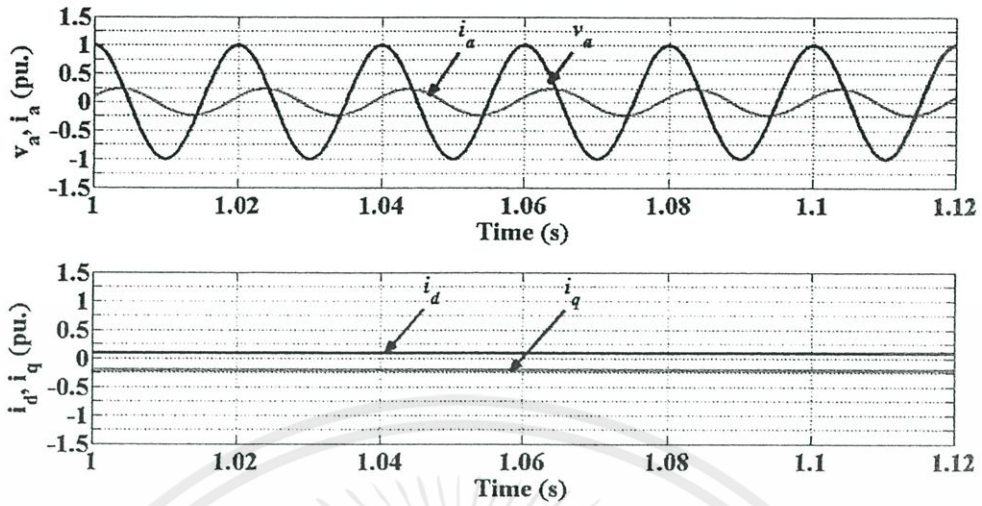


(ข)

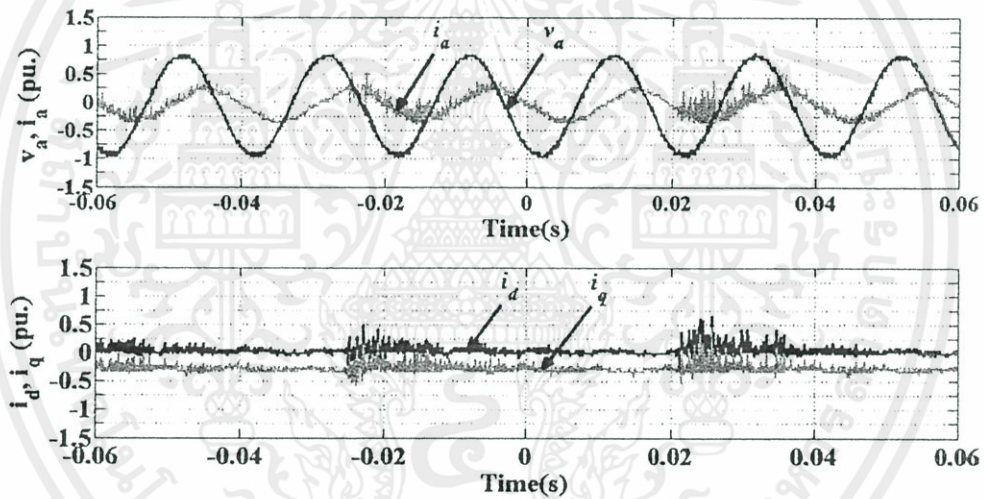
รูปที่ 4.13 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 นานๆ ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

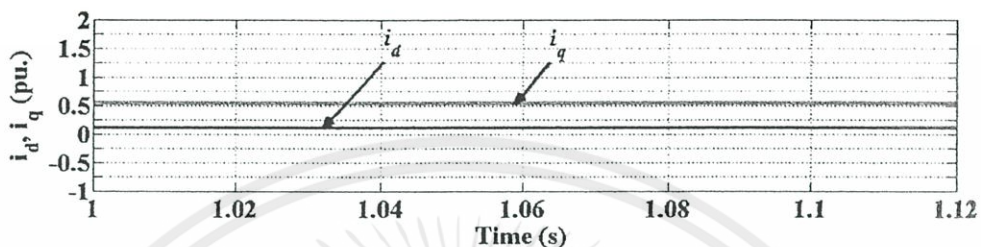
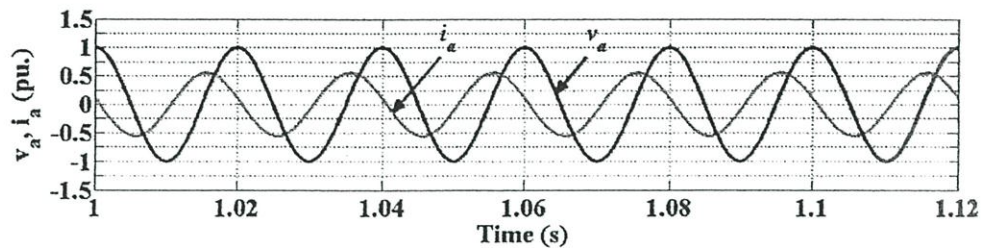


(ข)

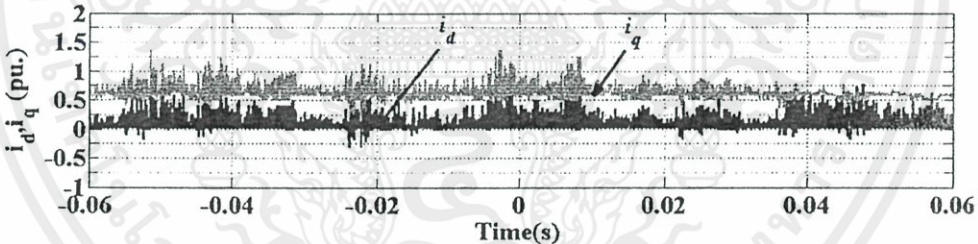
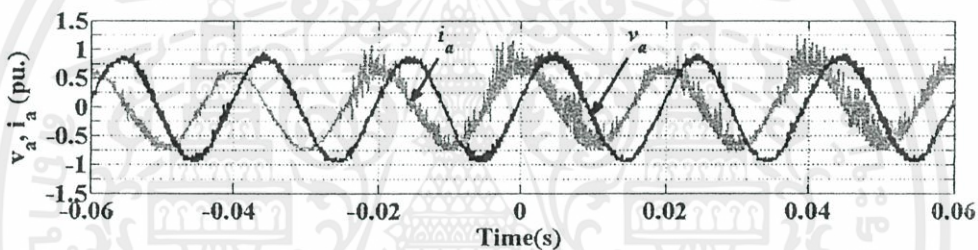
รูปที่ 4.14 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

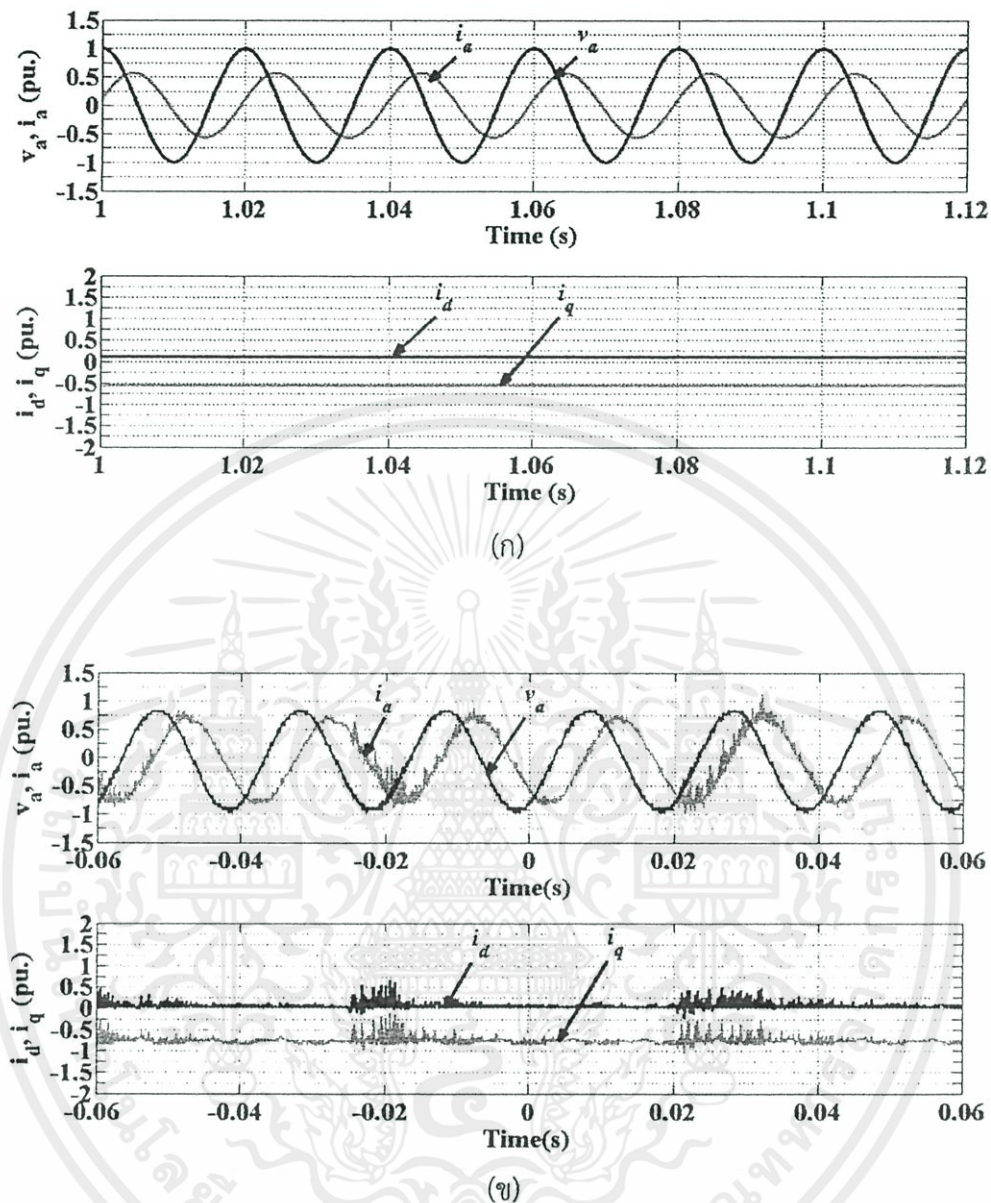


(ข)

รูปที่ 4.15 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.2 นานๆ หนึ่งวินาที ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

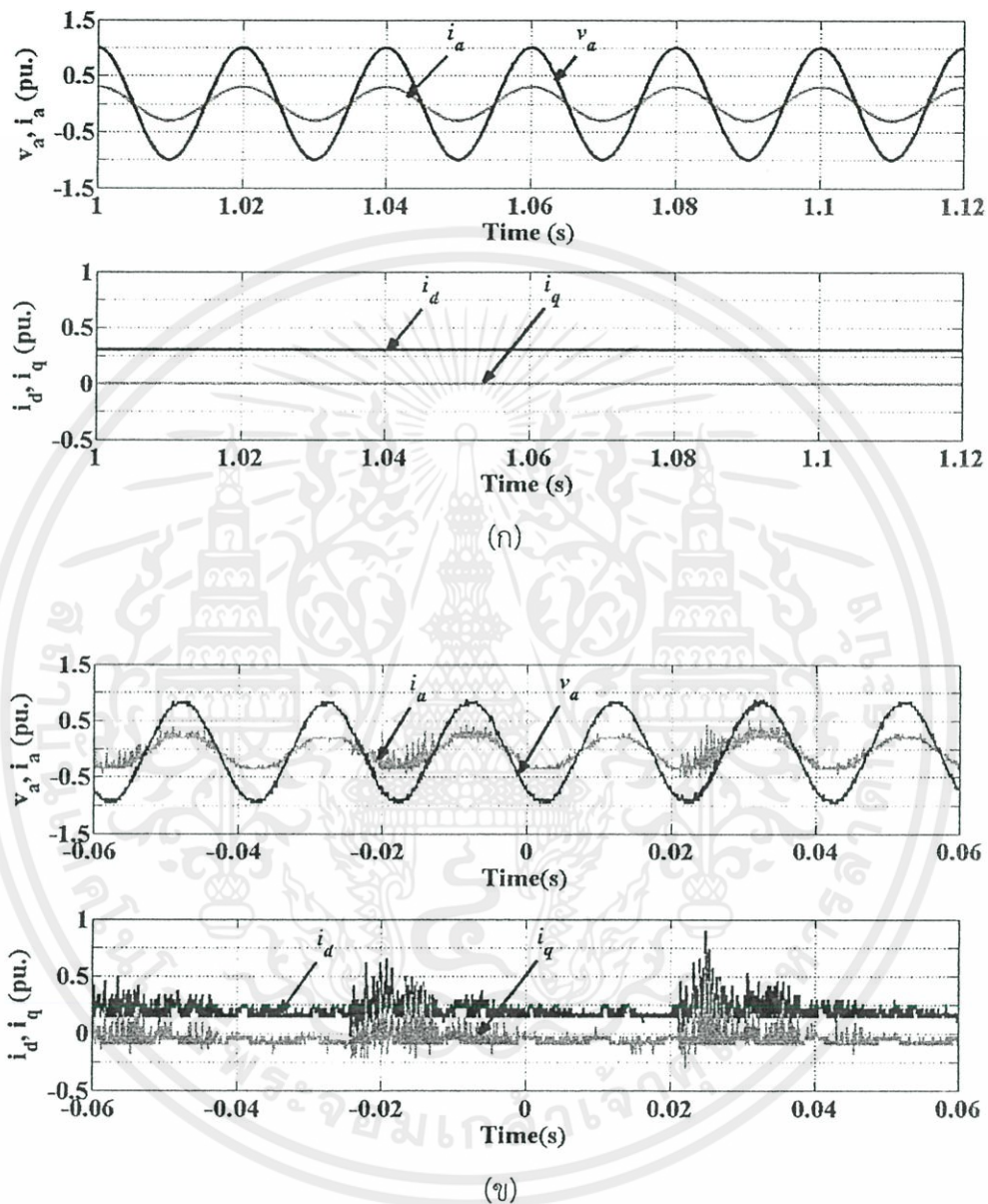


รูปที่ 4.16 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.2 ล้าหลัง ขณะไม่มีภาระไฟฟ้า

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เมื่อต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์เป็นหลอดไฟ 2 หลอด วัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 220.3 โวลต์ และวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ 0.84 แอมแปร์ พบว่าสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสได้ดังนี้ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.17, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.18, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.19, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.20, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.21, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.22 และค่าตัวประกอบ

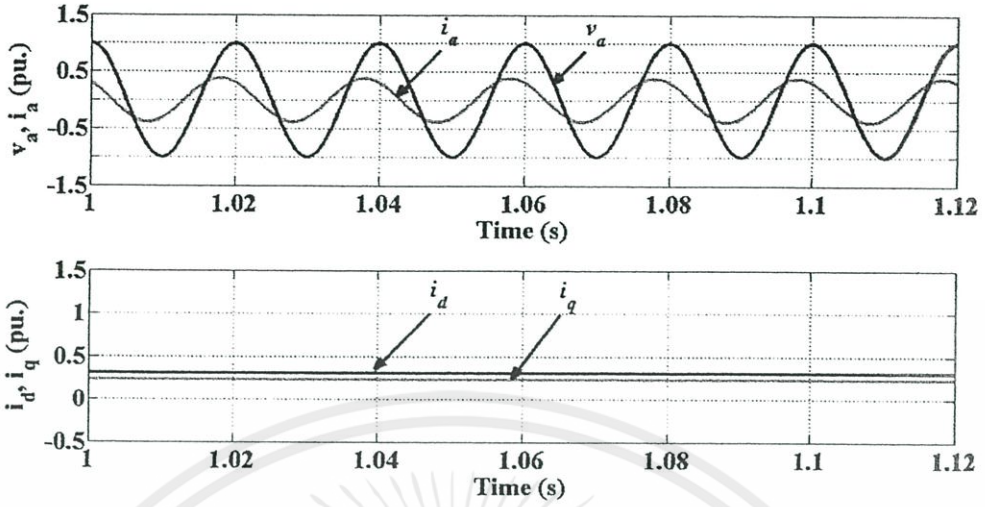
กำลังเท่ากับ 0.4 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.23 โดยที่ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ และค่ากระแสกระตุ้น
 ขดลวดสนามไม่เกินพิกัดของมอเตอร์



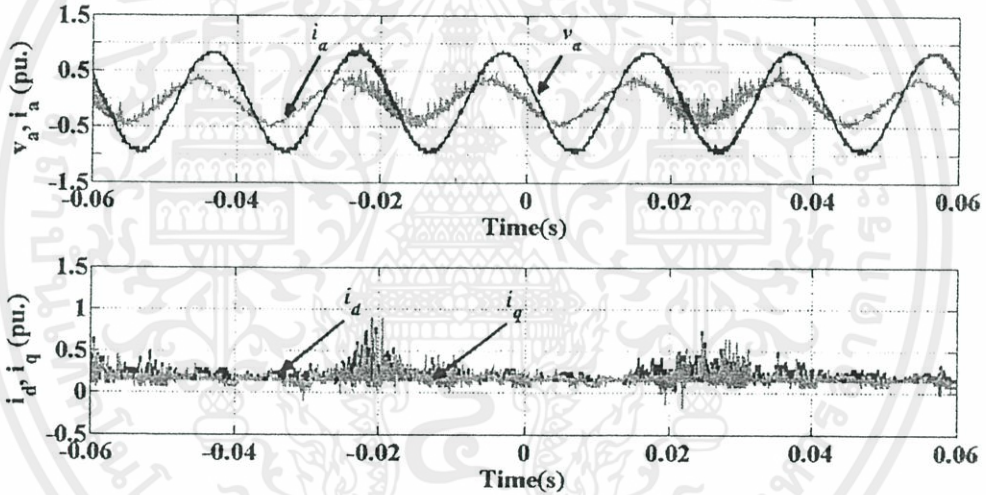
รูปที่ 4.17 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

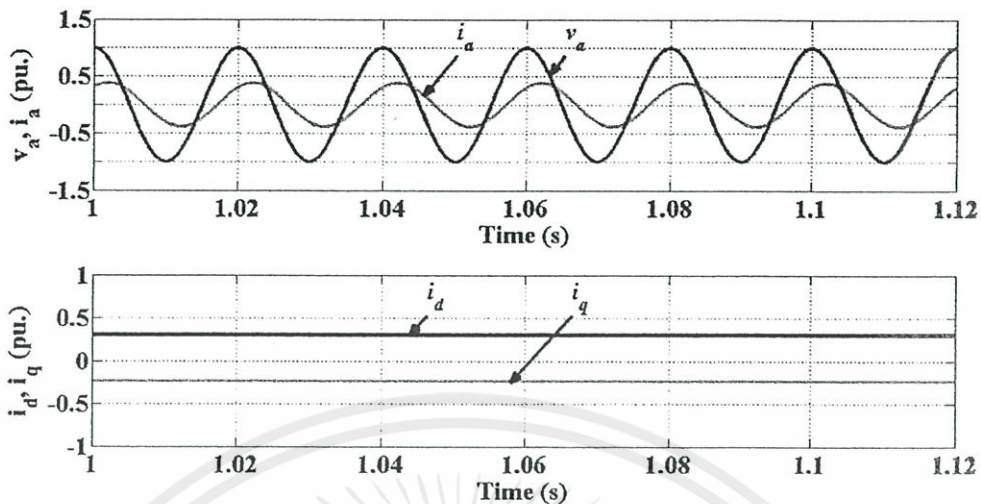


(ข)

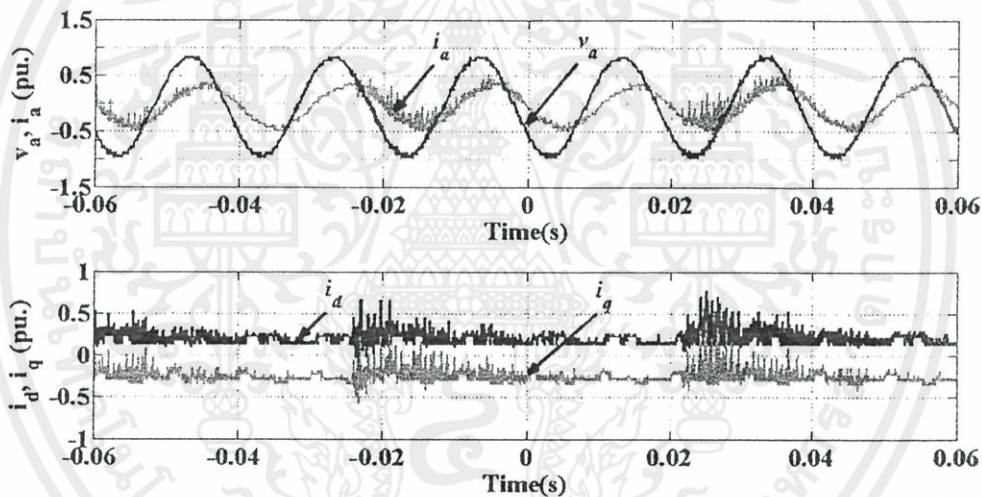
รูปที่ 4.18 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



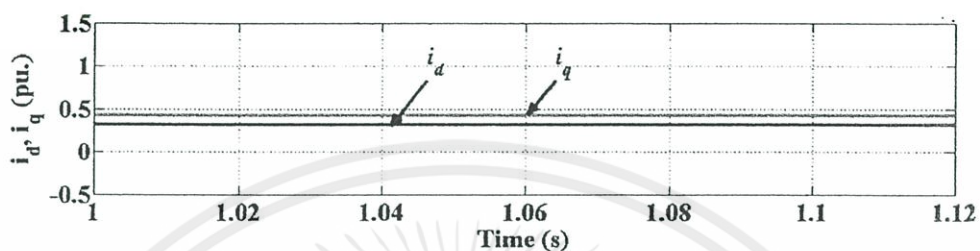
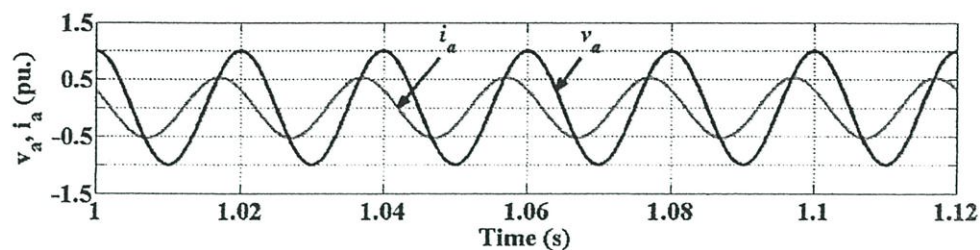
(ก)



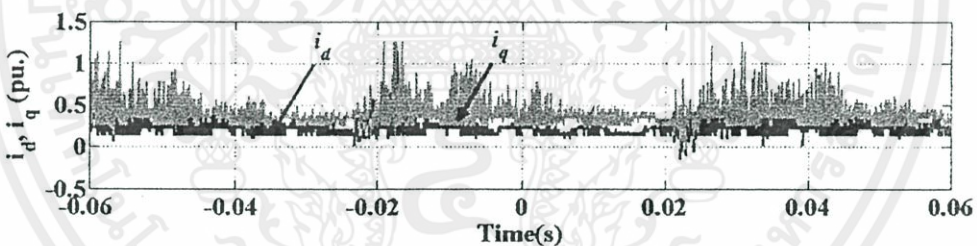
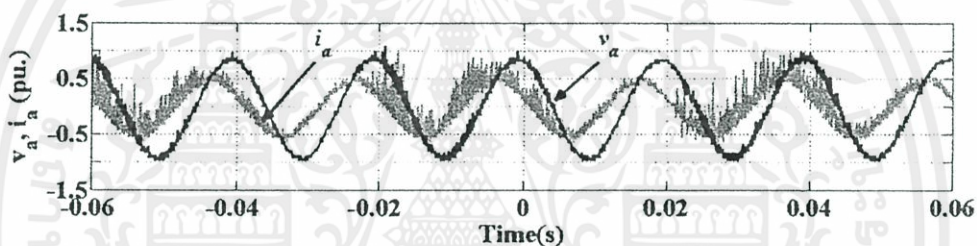
(ข)

รูปที่ 4.19 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์
 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

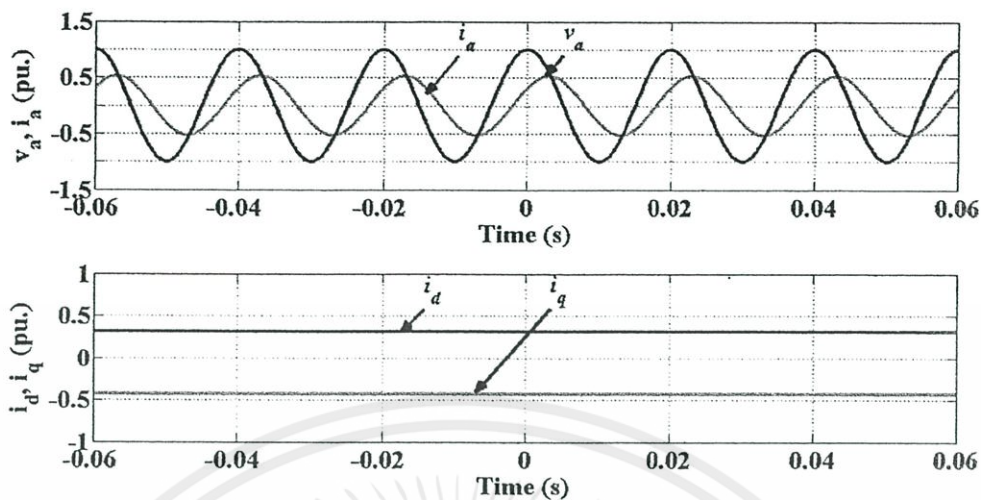


(ข)

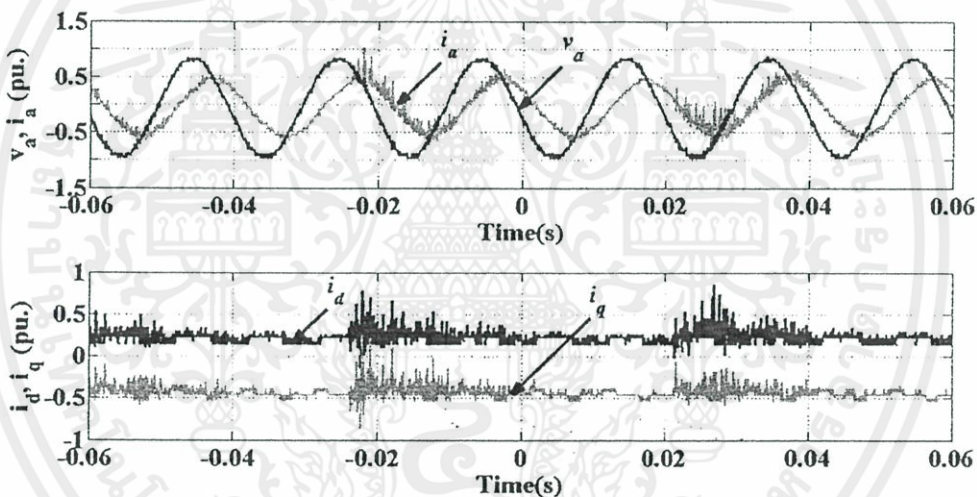
รูปที่ 4.20 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

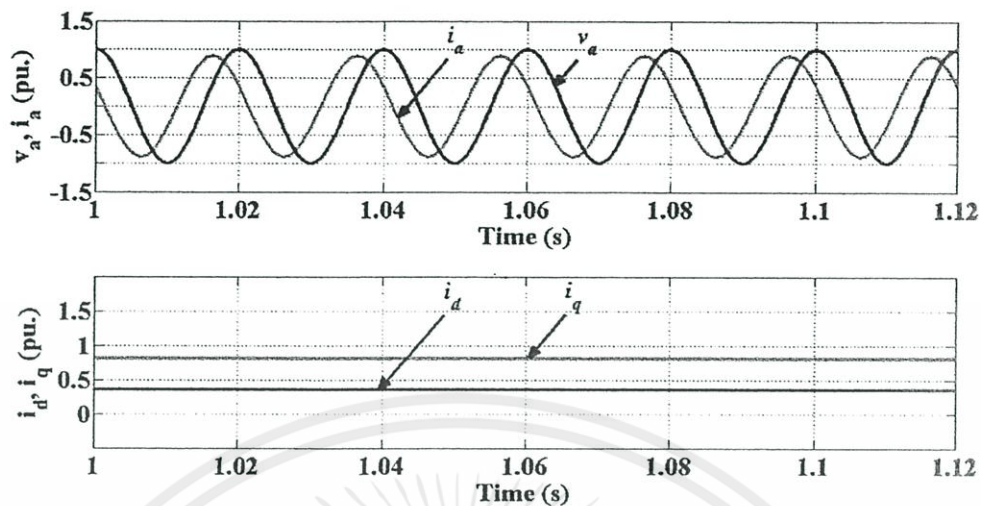


(ข)

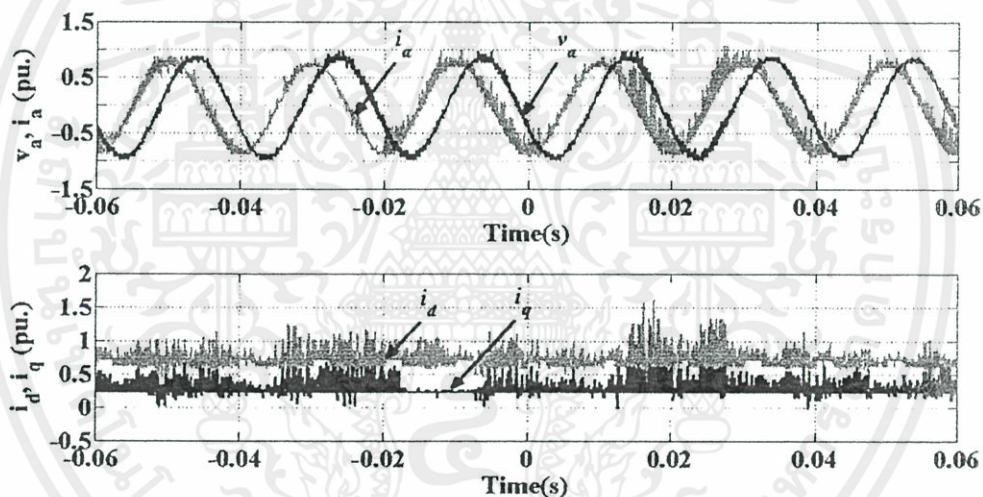
รูปที่ 4.21 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

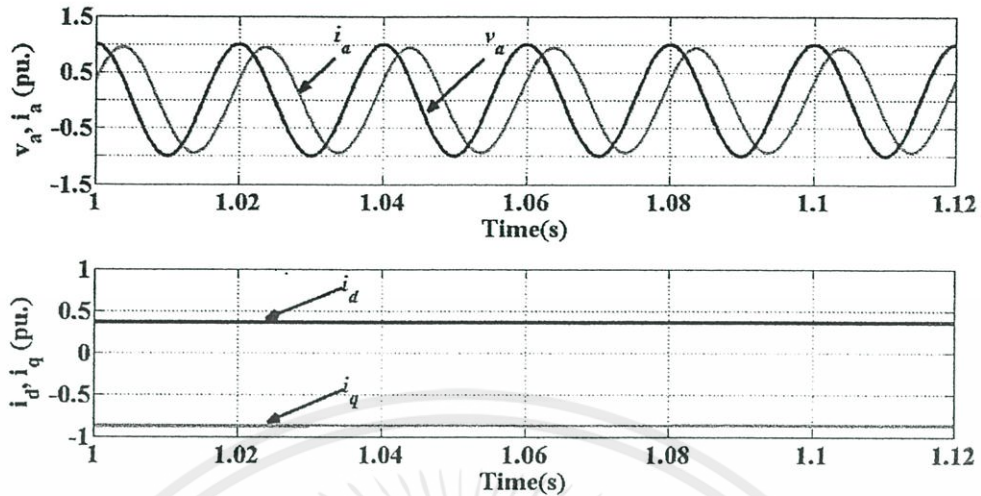


(ข)

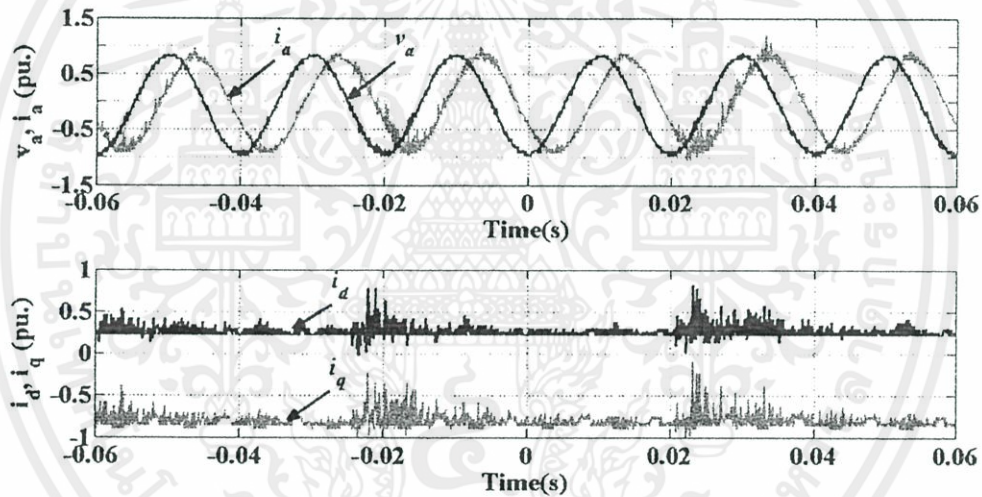
รูปที่ 4.22 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

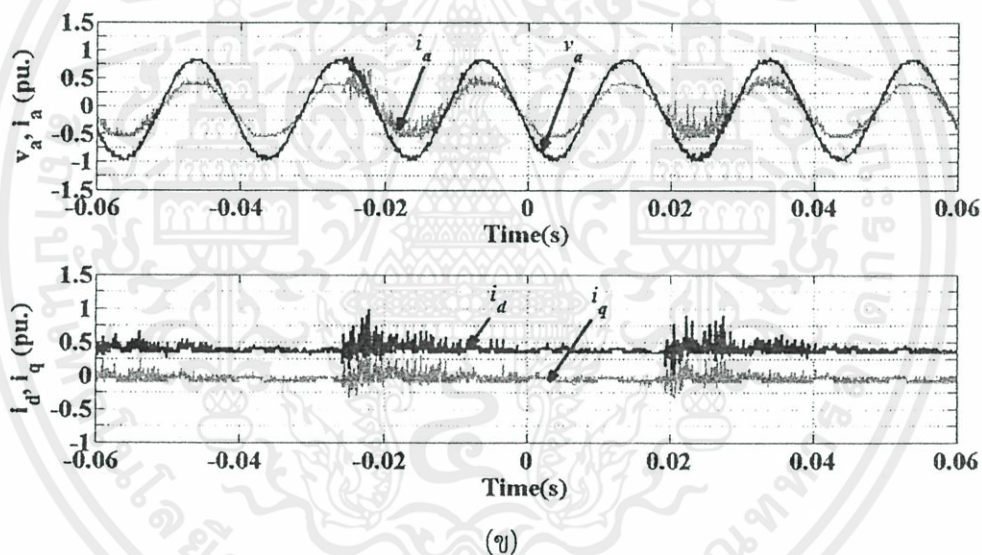
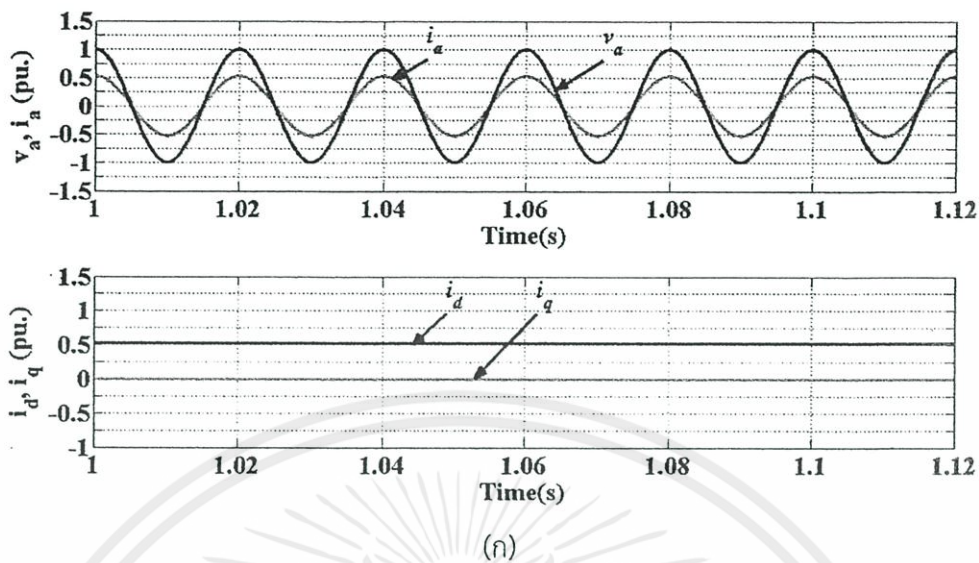


(ข)

รูปที่ 4.23 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.4 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 185 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

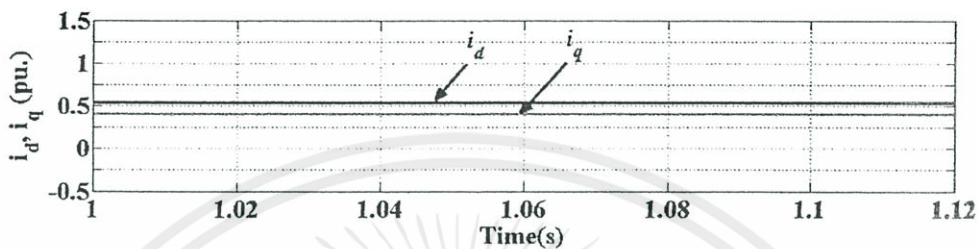
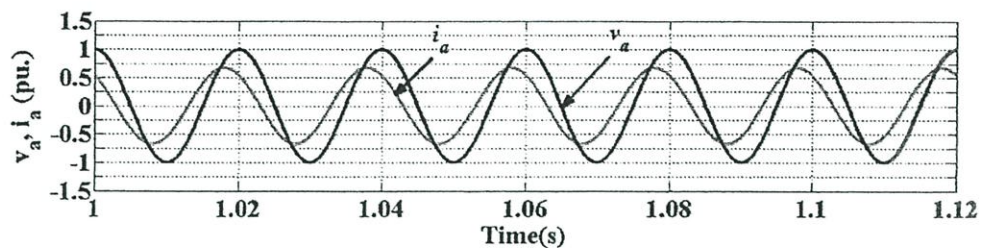
เมื่อต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์เป็นหลอดไฟ 4 หลอด วัตต์ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 220.6 โวลต์ และวัตต์ค่ากระแสไฟฟ้าได้ 1.65 แอมแปร์ พบว่าสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เชิงโรนัสได้ดังนี้ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.24, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.25, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.26, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.27 และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยที่ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ และค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามไม่เกินพิกัดของมอเตอร์



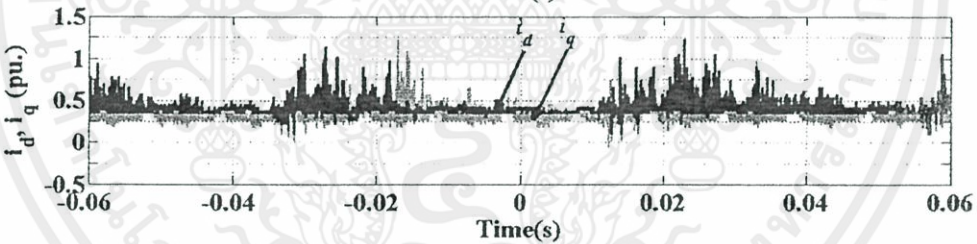
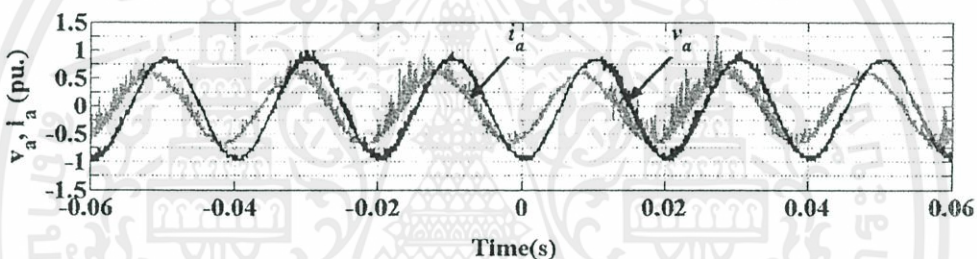
รูปที่ 4.24 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

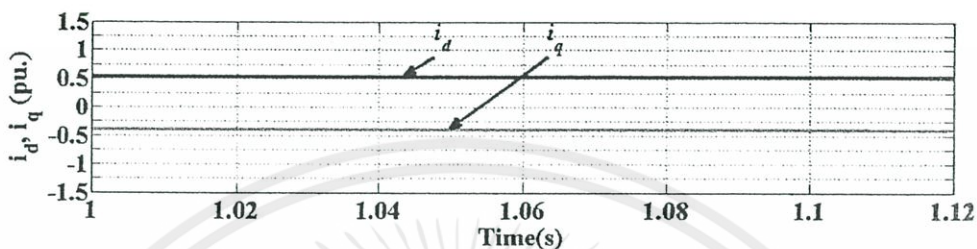
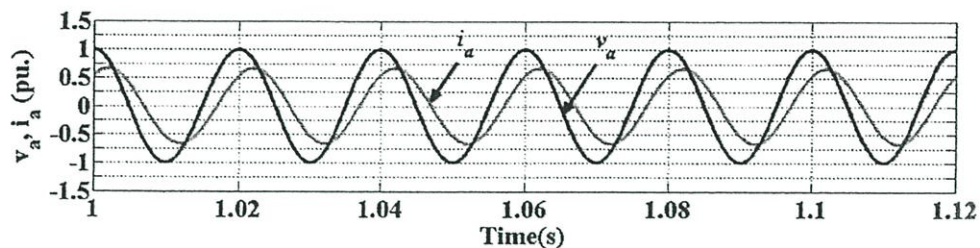


(ข)

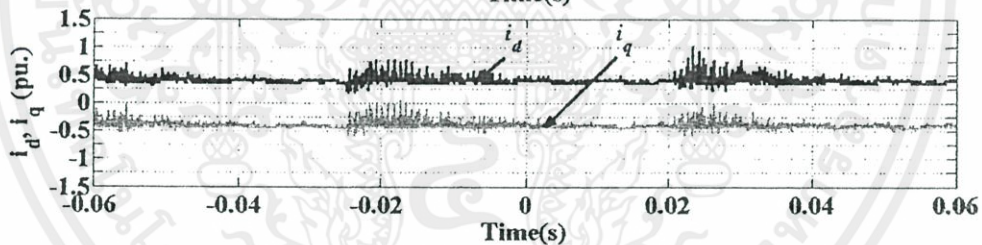
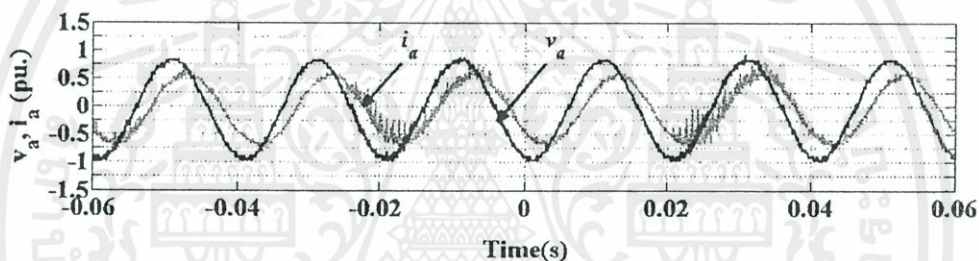
รูปที่ 4.25 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

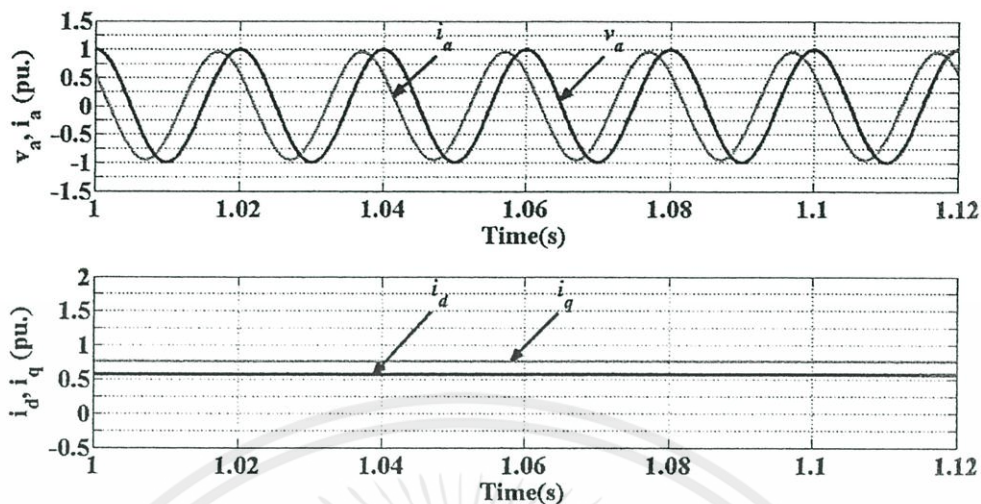


(ข)

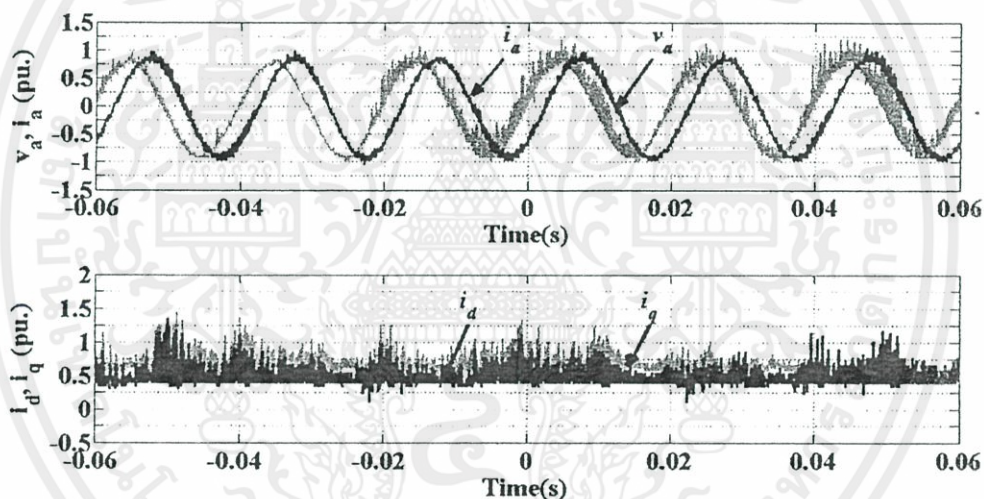
รูปที่ 4.26 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

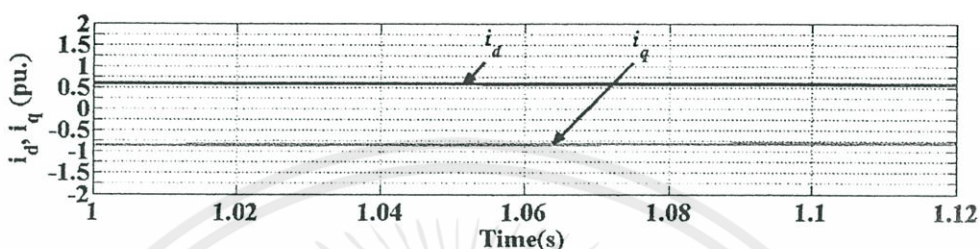
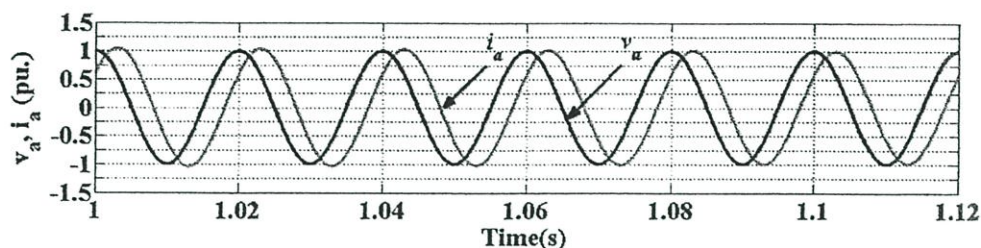


(ข)

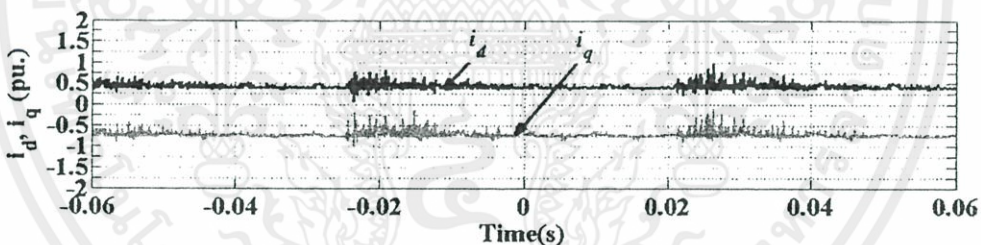
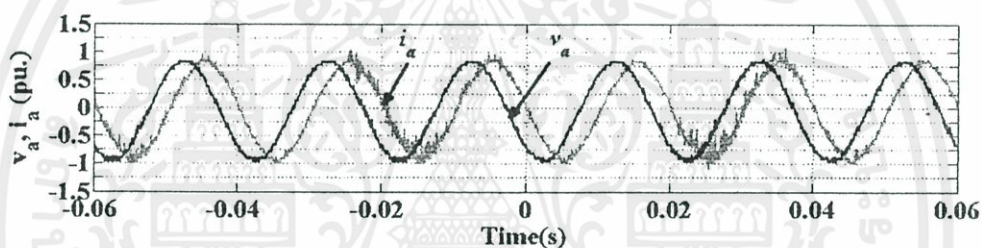
รูปที่ 4.27 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



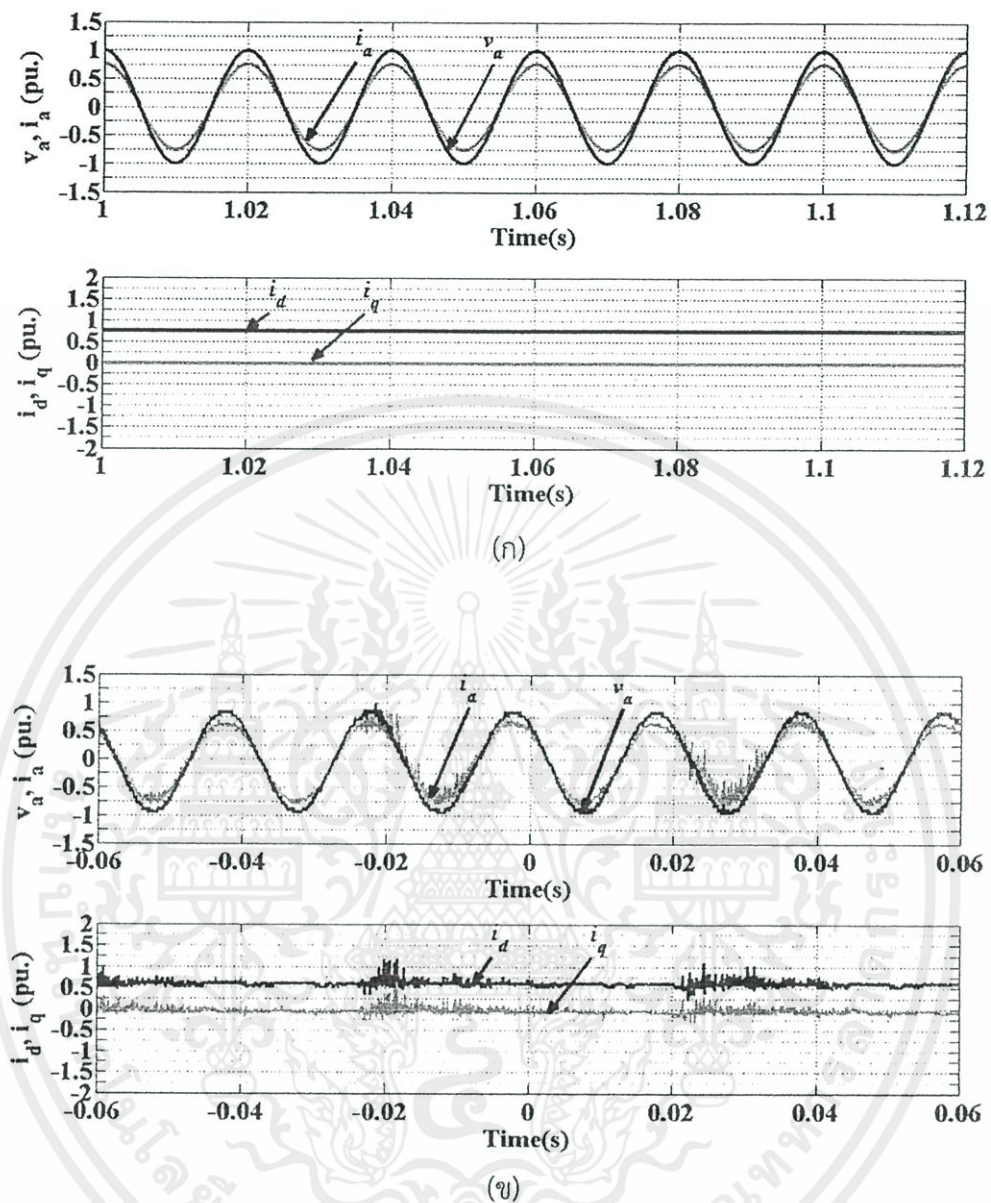
(ข)

รูปที่ 4.28 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.6 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 365 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เมื่อต่อภาระไฟฟ้า 565 วัตต์เป็นหลอดไฟ 6 หลอด วัตต์ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 220.3 โวลต์ และวัตต์ค่ากระแสไฟฟ้าได้ 2.56 แอมแปร์ พบว่าสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสได้ดังนี้ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.29, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 4.30 และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง แสดงดังรูปที่ 4.31 โดยที่ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ และค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามไม่เกินพิกัดของมอเตอร์

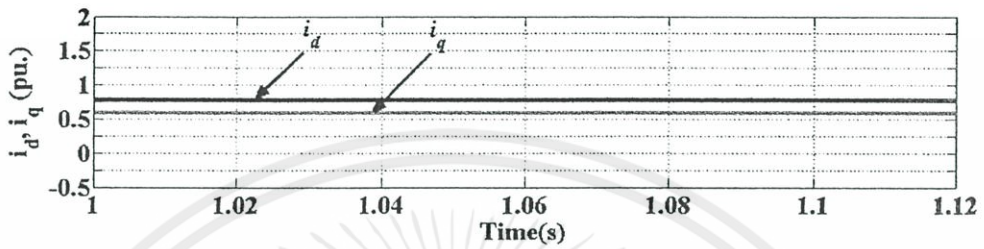
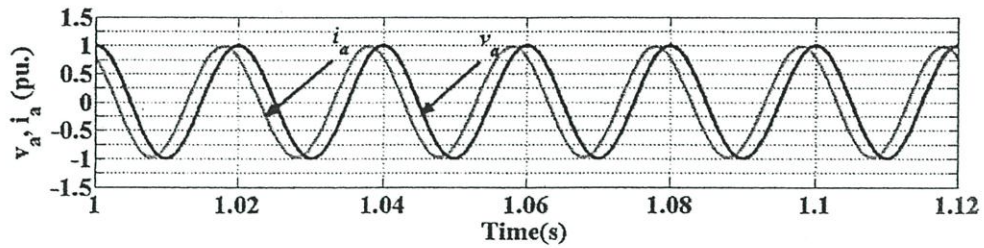
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่นับว่าออกให้เพื่อประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



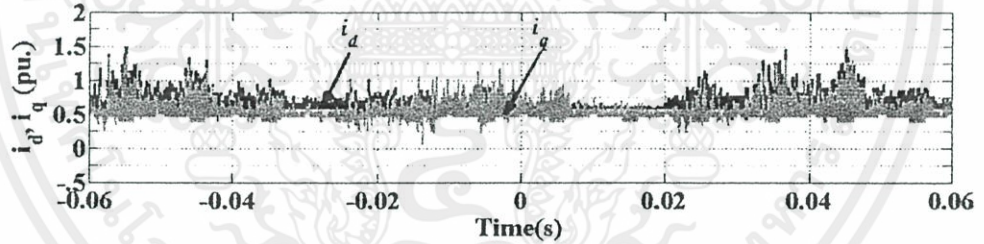
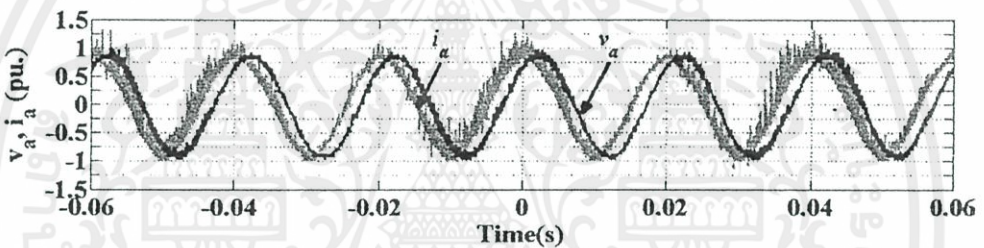
รูปที่ 4.29 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ขณะต่อภาระไฟฟ้า 565 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

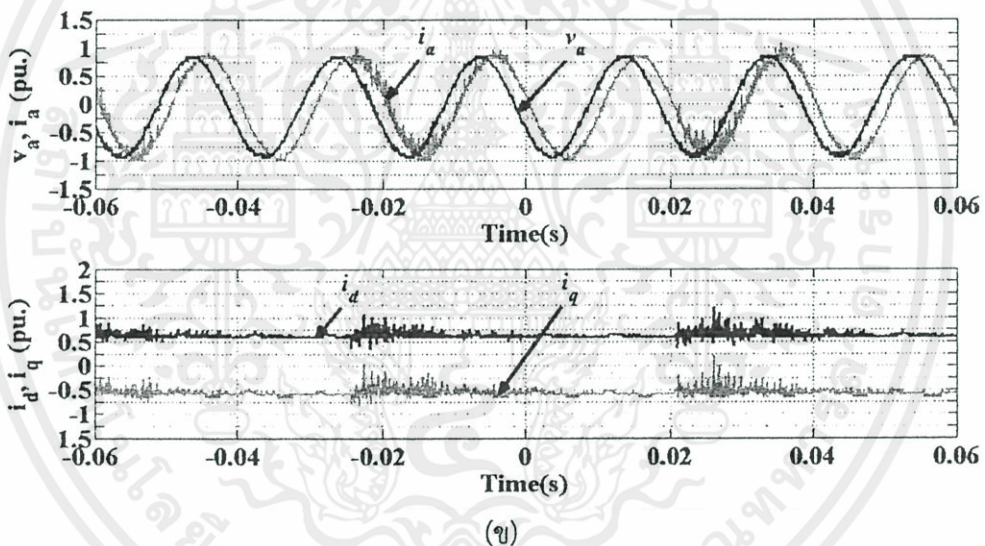
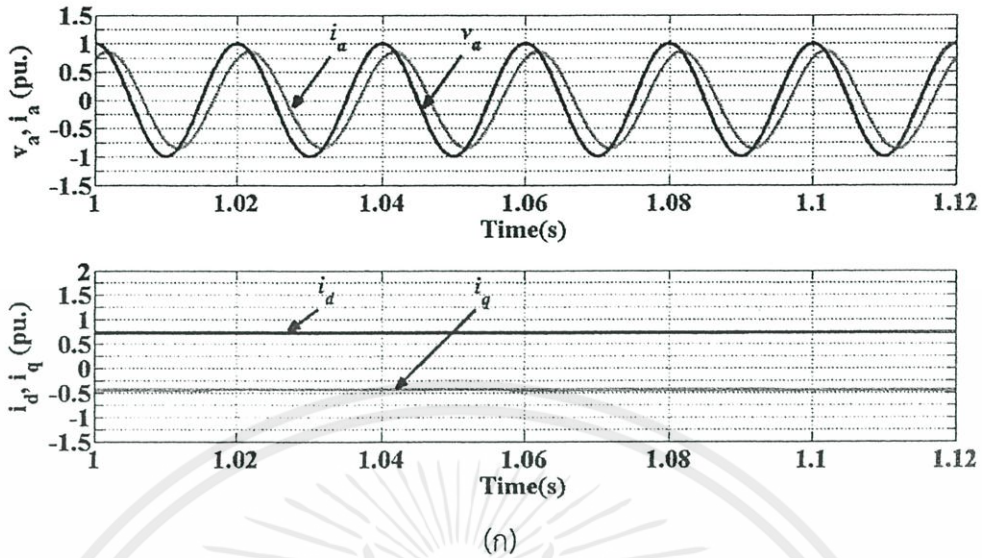


(ข)

รูปที่ 4.30 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า ขณะต่อภาระไฟฟ้า 565 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

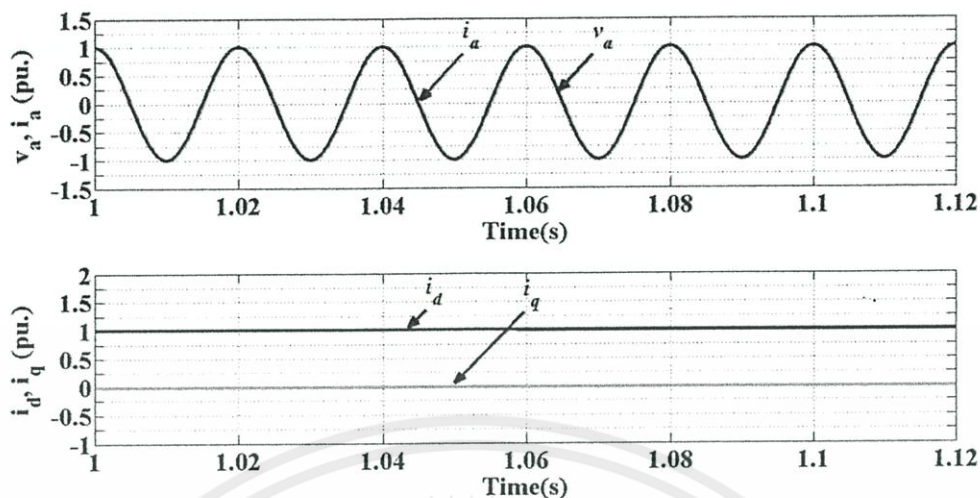
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



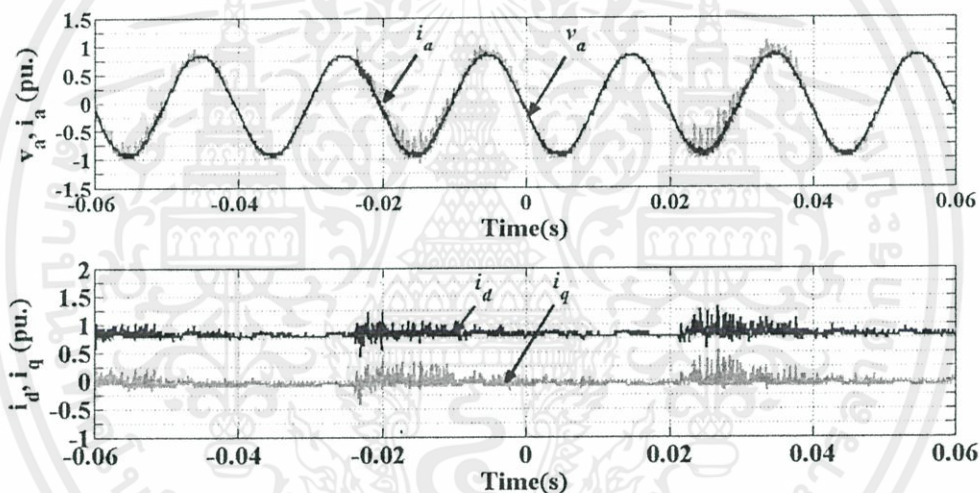
รูปที่ 4.31 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล้าหลัง ขณะต่อภาระไฟฟ้า 565 วัตต์
(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

เมื่อต่อภาระไฟฟ้า 755 วัตต์เป็นหลอดไฟ 8 หลอด วัตต์ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ 220.3 โวลต์ และวัตต์ค่ากระแสไฟฟ้าได้ 3.43 แอมแปร์ พบว่าสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสได้เพียงค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.32 โดยที่ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ และค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามไม่เกินพิกัดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.32 การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 หนึ่งต่อภาระไฟฟ้า 755 วัตต์

(ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง

4.5 บทสรุป

ในการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า พบว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำการควบคุมขนาดของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสนามมีค่าเท่ากับ 101.0 โวลต์ ค่ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสนามมีค่าเท่ากับ 0.37 แอมแปร์ ซึ่งคิดเป็นกำลังไฟฟ้า 37.37 วัตต์ และเมื่อทำการขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ในช่วงที่ผลต่างแรงดันระหว่างเฟสเดียวกันมีค่าน้อยกว่า 5% มุมเฟสต่างกันไม่เกิน 10 องศา ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่า ขนาดของ

แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนกันคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังทำการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า มีเพียงกระแสกระตุ้นขดลวดสนามเท่านั้นที่มีการตอบสนองที่แตกต่างจากผลการจำลองเล็กน้อย โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามหลังทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแล้ว

ในการทดลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส พบว่าสามารถทำการปรับค่าตัวประกอบกำลังที่ภาระไฟฟ้าค่าต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ทั้งค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า และค่าตัวประกอบกำลังล่าหลัง ซึ่งผลการทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยค่าแรงดันที่ป้อนเข้าขดลวดสนาม กระแสกระตุ้นขดลวดสนาม และกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส แสดงดังตารางที่ 4.1, ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าขดลวดสนาม (โวลต์) ของมอเตอร์ซิงโครนัส

P.F. ภาระ	Lagging				Unity	Leading			
	0.2	0.4	0.6	0.8		0.8	0.6	0.4	0.2
ไม่มีภาระ	40.1	84.7	95.3	101.3	108.1	116.4	122.8	131.8	184.3
185	-	35.2	69.7	87.2	110.0	131.0	150.0	183.9	-
365	-	-	47.2	75.7	110.3	149.0	183.8	-	-
565	-	-	-	70.1	118.5	172.1	-	-	-
755	-	-	-	-	127.7	-	-	-	-

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนาม (แอมแปร์) ของมอเตอร์ซิงโครนัส

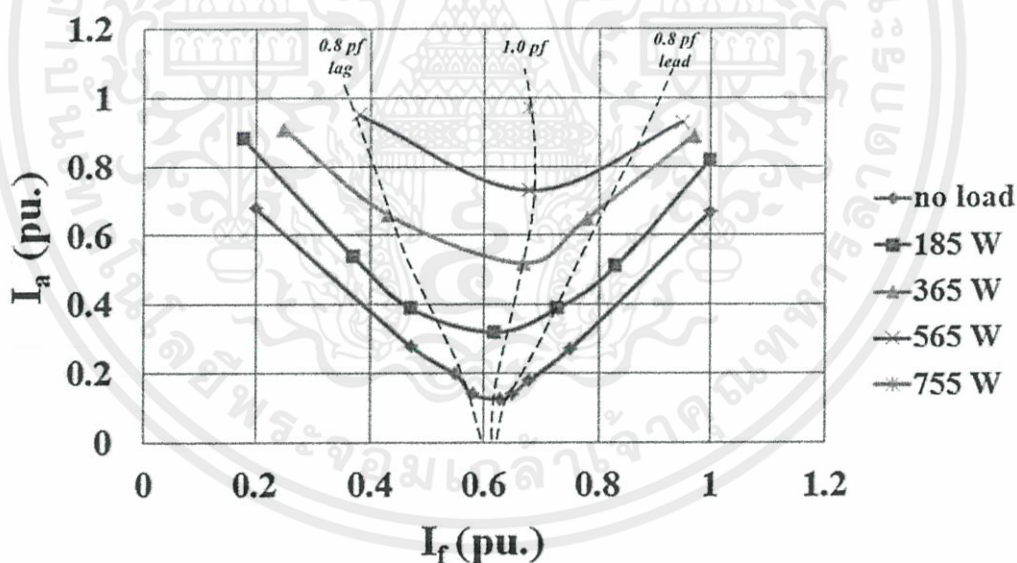
P.F. ภาระ	Lagging				Unity	Leading			
	0.2	0.4	0.6	0.8		0.8	0.6	0.4	0.2
ไม่มีภาระ	0.15	0.28	0.30	0.33	0.37	0.40	0.44	0.47	0.60
185	-	0.12	0.24	0.30	0.38	0.46	0.50	0.60	-
365	-	-	0.13	0.23	0.38	0.50	0.60	-	-
565	-	-	-	0.22	0.39	0.56	-	-	-
755	-	-	-	-	0.42	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ (แอมแปร์) ของมอเตอร์ซิงโครนัส

P.F. ภาวะ	Lagging				Unity	Leading			
	0.2	0.4	0.6	0.8		0.8	0.6	0.4	0.2
ไม่มีภาวะ	1.15	0.45	0.31	0.24	0.20	0.22	0.26	0.39	1.01
185	-	1.37	0.84	0.62	0.49	0.59	0.78	1.27	-
365	-	-	1.44	1.03	0.81	1.00	1.36	-	-
565	-	-	-	1.49	1.14	1.43	-	-	-
755	-	-	-	-	1.50	-	-	-	-

จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 จะพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ จ่ายให้กับขดลวดสนามอยู่ที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.2 นำหน้าเมื่อไม่มีภาวะไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งเท่ากับ 110.34 วัตต์ และเมื่อนำค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามในตารางที่ 4.2 และค่ากระแสอาร์มาเจอร์ในตารางที่ 4.3 มาทำการวาดกราฟความสัมพันธ์จะได้กราฟดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์ และกระแสกระตุ้นขดลวดสนาม (V-curve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยการควบคุมวงรอบปิดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ และสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่ภาระไฟฟ้าต่างๆ ได้ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- การควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถควบคุมให้มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงดันก่อนทำการขนาน และหลังทำการขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้

- การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส สามารถควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังได้เป็นอย่างดีทั้งที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า และค่าตัวประกอบกำลังล้าหลัง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แล้ว พบว่าเป็นไปตามผลการจำลอง รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสมีลักษณะตรงกันที่ตัวประกอบกำลังเท่ากัน ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ว่าระบบสามารถควบคุมการปรับตัวประกอบกำลังได้เป็นอย่างดี

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ได้ทำการนำเสนอมาแล้วในที่นี่ จะเห็นได้ว่าจะสามารถควบคุมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และสามารถควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนในวิชาห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า กระแสในขดลวดสนามหลังทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบแล้ว ยังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ ดังนั้นควรทำการปรับปรุงระบบควบคุม เพื่อให้สามารถควบคุมให้กระแสขดลวดสนามไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 2. 56 เนื่องจากระบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น จะใช้แรงดันของระบบไฟฟ้าเป็นแรงดันอ้างอิง ควรที่จะมีการกำหนดค่าขอบเขตของกระแสขดลวดสนามที่

จะกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ เพื่อป้องกันกรณีที่แรงดันของระบบไฟฟ้ามีความผิดปกติเกิดขึ้น เช่น แรงดันของระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยเกินไป เป็นต้น

3. ขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ออกแบบ และจัดทำขึ้นได้ทำการออกแบบไว้ใหญ่กว่าพิกัดกำลังที่ใช้จริง เนื่องจากจากการทดลองจะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดแค่ 110.34 วัตต์เท่านั้น ซึ่งทางปฏิบัติแล้วควรทำการสร้างคอนเวอร์เตอร์ที่มีขนาดพิกัดแค่ 150 วัตต์ก็เพียงพอแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael J. Thomson, “Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems” Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference for, 2012, pp. 203-214.
- [2] Xiao-Qiang GUO, Wei-Yang WU, He-Rong GU, “Phase locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: a review”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 4/2011.
- [3] P.C.Sen, 1997, Principles of electric machines and power electronics, second edition, John Wiley & Sons, INC.
- [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins. Power Electronics Converters, Applications, and Design. 2nd Edition, John Wiley & Sons, INC.
- [5] Murad Jafari, Bin Wu, Mitesh Popat, “Power factor control in a wind energy conversion system via synchronous generator excitation”, Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2013 26th Annual IEEE Canadian Conference on, 2013, pp. 1-4.
- [6] IEEE Standard 115-2009, IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines.
- [7] Weilin Li, Xiaobin Zhang, Huimin Li, “A Novel Digital Automatic Voltage Regulator for Synchronous Generator”, Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on, 2010, pp. 1-6.
- [8] วรชาติ แซ่ก๊ก, “เอกสารประกอบการเรียนการสอนเรื่อง สเปซเวกเตอร์และทฤษฎีกรอบอ้างอิง”, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาคการศึกษา 1/2556.
- [9] พิชิต ถ้ายอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. มีน เซอร์วิส ซัพพลาย, พฤษภาคม 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




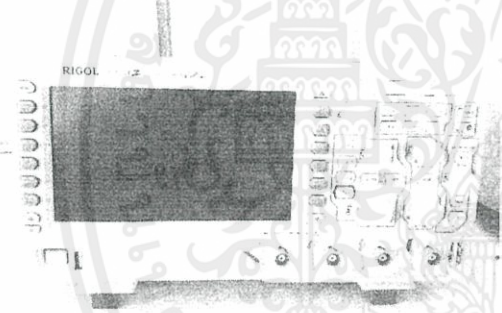
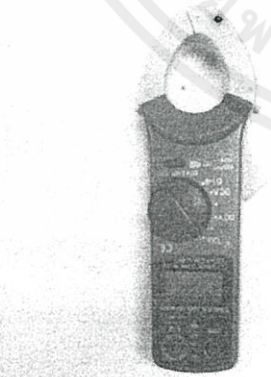
ภาคผนวก ก.

รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.


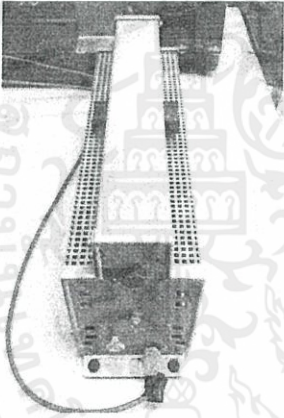
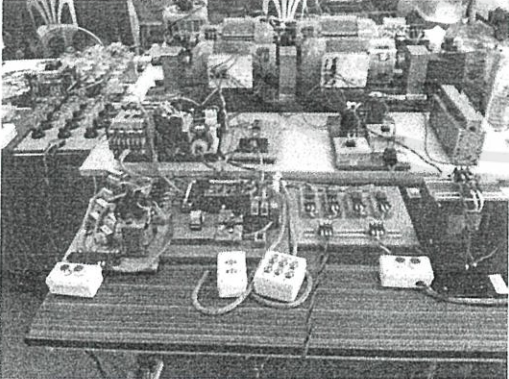
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>มัลติมิเตอร์</p>
	<p>ดิจิตอลออสซิลโคปรุ่น DS 1104 RIGOL</p>
	<p>เครื่องมือวัดกระแส (Clamp ammeter)</p>


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.(ต่อ)

รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer)</p>
	<p>ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (Rheostat)</p>
	<p>รูปถ่ายชิ้นงาน และอุปกรณ์โดยภาพรวม</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.
พิกัด และการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

พิกัด และการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ข1 การทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร

สำหรับการทดสอบเปิดวงจรเป็นการทดสอบหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดแรงดันที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 2.2ก ซึ่งค่าแรงดันที่กระแสสนามต่างๆ แสดงดังตารางที่ ข1

ในส่วนของการทดสอบลัดวงจรเป็นการทดสอบหาค่ากระแสลัดวงจรที่ค่ากระแสสนามต่างๆ โดยทำการต่อวงจรการทดสอบตามรูปที่ 2.3ก แล้วปรับค่ากระแสสนามให้เพิ่มขึ้นจนได้กระแสลัดวงจรประมาณ 1.5 – 2 เท่าของกระแสพิกัด เมื่อลัดวงจรที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์จะได้ว่า $V_a = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (2-2) จะได้

$$\tilde{E}_a = \tilde{I}_a (R_a + jX_s) \quad (1)$$

โดยผลการทดสอบ ค่ากระแสอาร์มาเจอร์กับกระแสสนามแสดงดังตารางที่ ข1

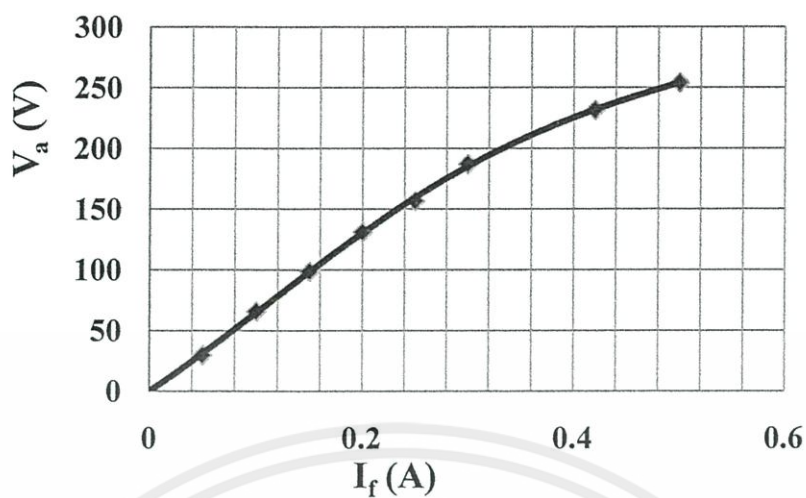
ตารางที่ ข1 ผลการทดสอบวงจรเปิด และผลการทดสอบลัดวงจร

	Open-Circuit Test						Rate Voltage	
$V (V)$	29.8	65.76	98.73	131.12	156.81	187.06	231.52	254.03
$I_f (A)$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.42	0.5
$I_a (A)$	0.29	0.56	0.81	1.07	1.33	1.61	2.26	2.68

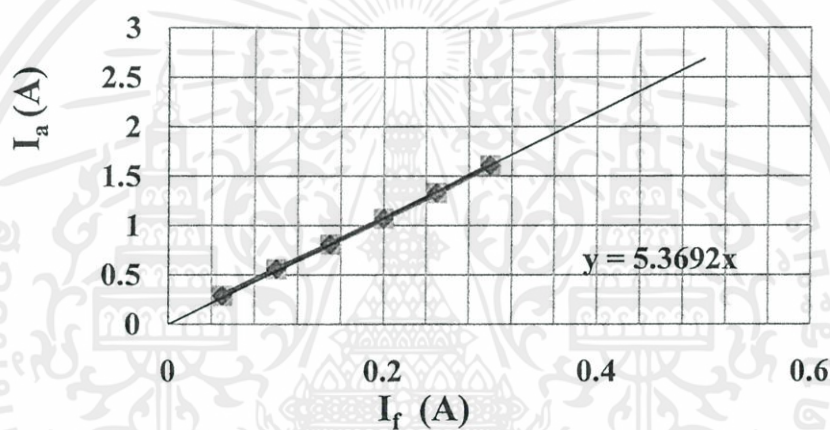
Short-Circuit Test

- หมายเหตุ
1. ค่ากระแสสนาม 0.42 A และ 0.5 A เป็นค่าที่ทำให้ได้ ค่าแรงดันที่พิกัด และ 110% ของพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
 2. ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ 2.26 A แล 2.68 A ได้จากการแทนสมการเส้นตรงจากกราฟรูปที่ ข1ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ ข1 ผลการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร (ก) กราฟผลการทดสอบเปิดวงจร
(ข) กราฟผลการทดสอบลัดวงจร

โดยจะสามารถคำนวณหาค่า X_s ได้จากสมการ

$$X_s = \frac{V_{t, \text{rated}}}{I_{a, \text{sc}}} \quad (2)$$

เมื่อ $V_{t, \text{rated}}$ คือ ค่าแรงดันที่พิกัด

และ $I_{a, \text{sc}}$ คือ ค่ากระแสอาร์มาเจอร์ที่ค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดแรงดันพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ซึ่งจากค่าในตารางที่ ข1 จะได้ว่าค่า X_s มีค่าเท่ากับ 102.44 Ω เมื่อคำนวณเป็นค่าความเหนี่ยวนำได้
เท่ากับ 326.08 mH

ข2 การทดสอบสลลิป (Slip test)

การทดสอบนี้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 115-2009 [6] โดยจะทำการทดสอบเมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าซิงโครนัสเพียงเล็กน้อยมีค่าสลลิปไม่เกิน 5% โดยที่เปิดวงจรขดลวดสนาม และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่พิคัด และที่แรงดันต่ำกว่าจุดที่แกนเหล็กเริ่มอิ่มตัวจากรูปที่ ข1ก จากนั้นทำการวัดค่ายอดของแรงดันที่ขั้ว และกระแสอาร์มาเจอร์มากที่สุด และต่ำสุด แล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานเสมือนในองค์ประกอบแนวแกน d (X_d) และความต้านทานเสมือนในแนวแกน q (X_q) จะสมการ

$$X_d = \frac{E_{\max}}{I_{\min}} \quad (3)$$

$$X_q = \frac{E_{\min}}{I_{\max}} \quad (4)$$

จากนั้นทำการคำนวณค่าความต้านทานเสมือนกระตุ้นในแนวแกน d (Direct-axis Magnetizing reactance, X_{md}) และค่าความต้านทานเสมือนกระตุ้นในแนวแกน q (Quadrature-axis Magnetizing reactance, X_{mq}) จากสมการ

$$X_{md} = X_d - X_{sl} \quad (5)$$

$$X_{mq} = X_q - X_{sl} \quad (5)$$

ซึ่งค่าจากการทดสอบแสดงดังตารางที่ ข2

ตารางที่ ข2 ผลจากการทดสอบด้วยวิธี Slip test

แรงดันทดสอบ (V_{rms})	E_{\max} (V)	E_{\min} (V)	I_{\max} (A)	I_{\min} (A)
100	148	146	1.14	0.94

ซึ่งจะได้ค่า X_{md} และ X_{mq} เท่ากับ 147.94 Ω และ 118.56 Ω ตามลำดับ และทำการคำนวณเป็นค่าความเหนี่ยวนำได้เป็น 470 mH และ 377 mH ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบที่กล่าวมา แล้วยังมีการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดสนาม และขดลวดอาร์มาเจอร์ และการทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสนาม และขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งโดยสรุปแล้วค่าพิกัด และค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ ข3 และตารางที่ ข4 ตามลำดับ

ตารางที่ ข3 พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในการทดลอง

พิกัด	กำลังไฟฟ้า (kVA)	ความถี่ (Hz)	แรงดันที่ขั้ว (V)	กระแส (A)	ความเร็ว (rpm)	แรงดัน ขดลวดสนาม (V)	กระแส สนาม (A)
ค่าพิกัด	1	50	230/400	1.52	1500	220	0.6

ตารางที่ ข4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในการทดลอง

R_s (Ω)	L_{sl} (mH)	R_f (Ω)	L_{fl} (H)	L_{md} (mH)	L_{mq} (mH)
10.768	30.26	269.12	4.136	470	377

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.
บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

DC VOLTAGE SOURCE FOR SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION

อภิวิชญ์ ศิริศักดิ์ อภิษฎา เหลืองสะอาด และอุบลรัตน์ เตชะอุดมถาวร

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

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า และการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังสำหรับการทำงานเป็นมอเตอร์ ซึ่งการทำงานจะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกสร้างจากคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ (Full Bridge DC-DC converter) ซึ่งจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ของบริษัท STMicroelectronics ในการออกแบบและจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์จะอาศัยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการทำงานเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบวงจรควบคุมก่อนที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน ผลการจำลอง และผลการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบในท้ายที่สุด

คำสำคัญ : เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส, การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว, ตัวควบคุมชนิดพีไอ, การควบคุมตัวประกอบกำลัง

Abstract

This thesis presents a DC voltage source controlled by a microcontroller for a synchronous generator excitation. The voltage source is applied to control the generator terminal voltage during grid synchronization and control the power factor during operation in motor mode. This voltage source is constructed from a full bridge DC-DC converter controlled by the STM32F4DISCOVERY microcontroller. MATLAB/Simulink program is used to simulate the operation of the converter. The algorithm used is applied to the real system. The simulator and experimental results are compared analyzed and then conclude.

Keyword : Synchronous machine, Terminal voltage control, PI controller, Power factor control.

1.บทนำ

ปัจจุบันในการสอนวิชาปฏิบัติการเรื่องการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้านั้น วิธีการดั้งเดิมคืออาศัยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ให้มีขนาดเท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า ด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าขดลวดสนามโดยใช้หม้อแปลงออตโตชนิดปรับค่าได้ ซึ่งค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากและต้องอาศัยความเชี่ยวชาญของผู้ทำการควบคุม นอกจากนี้ยังส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเรียนการสอนวิชาดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น และหลังจากทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว จะยังต้องให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานเป็นมอเตอร์ เพื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังจากการปรับค่ากระแสในขดลวดสนาม ซึ่งควบคุมได้ยาก

ด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ สำหรับป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ขดลวดสนาม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation, PWM) ในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดสนาม โดยควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และสามารถขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้อีกทั้งยังรวมถึงการควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังในกรณีที่ทำงานเป็นมอเตอร์ ซิงโครนัสให้ได้ตามที่ต้องการ

2.เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยขดลวดที่อยู่กับที่ (Stationary Armature Winding หรือ Stator) และขดลวดไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนหมุน (Rotor) ซึ่งจะใช้สร้างสนามแม่เหล็กหมุน (Revolving Field) ที่มีความเร็วเชิงมุมขึ้นกับความเร็วรอบของโรเตอร์ เมื่อมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับขดลวดของโรเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ขึ้นและเมื่อทำการหมุนโรเตอร์ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดที่สเตเตอร์ จนเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและถ้าทำการต่อขั้วไฟฟ้าของขดลวดเข้ากับภาระไฟฟ้า ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรไฟฟ้า [1]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ

3.มอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Motor) [5] เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส และจะต้องป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นของขั้วแม่เหล็ก แรงบิดจากสนามแม่เหล็กจะทำให้ตัวโรเตอร์เกาะกับสนามแม่เหล็กหมุน ดังนั้นตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจึงหมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วซิงโครนัส

ถ้าป้อนกระแสกระตุ้นสูงกว่าปกติ (Over excited) จะส่งผลให้กระแสอาร์มาเจอร์นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่รูปสัญญาณของกระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเปรียบเสมือนว่ามีตัวเก็บประจุอยู่ภายใน จึงเรียกมอเตอร์ซิงโครนัสที่ทำงานอยู่ในย่านที่กระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ซิงโครนัสนี้ว่าเป็น ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous condenser)

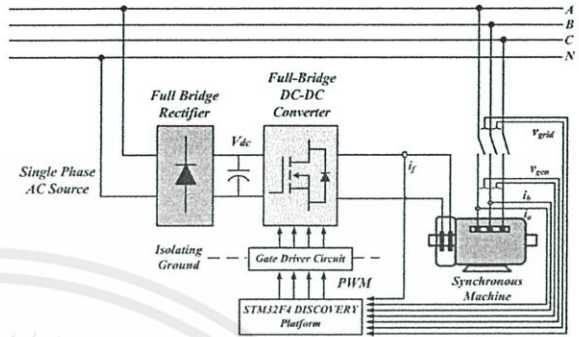
4. การควบคุมวงปิดสำหรับวงจรกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

การควบคุมวงปิดสำหรับวงจรกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสในโรงงานนี้ จะแบ่งออกเป็น

1. การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อนานเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยจะต้องมีการใช้ทฤษฎีกรอบอ้างอิง เพื่อแปลงองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าจากกรอบอ้างอิงสามเฟส มาสู่กรอบอ้างอิงหนึ่งขั้ว [4] แล้วทำการหาขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาร่วมการเปรียบเทียบกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า [3] เพื่อทำการควบคุมผ่านตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI controller) ซึ่งสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมชนิดพีไอ จะเป็นตัวกำหนดความกว้างพัลส์ของสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มในการควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟต (Mosfet) ในคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดสนามให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเท่ากับระบบไฟฟ้า แล้วจึงสามารถทำการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าได้

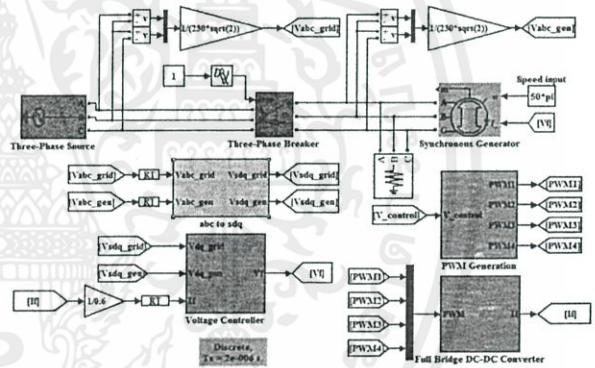
2. การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส ส่วนนี้จะต้องทำการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว และกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสมาทำการแปลงแกนเข้าสู่กรอบอ้างอิงซิงโครนัส จากนั้นทำการคำนวณค่ากระแส i_d อ้างอิงที่ทำให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังที่ต้องการ มาทำการเปรียบเทียบกับกระแส i_d ของมอเตอร์ในขณะนั้น โดยการควบคุมผ่านตัวควบคุมชนิดพีไอ [2] ซึ่งจะควบคุมการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดสนามจนได้ค่าตัวประกอบกำลังที่ต้องการ

จากระบบควบคุมทั้ง 2 ส่วน จะทำการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ซึ่งโคอะแกรมการควบคุมแสดงดังรูปที่ 1

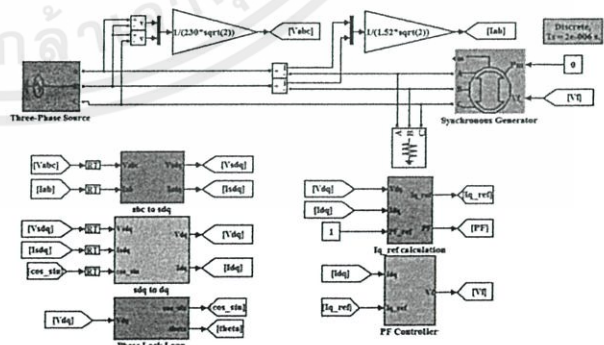


รูปที่ 1 โคอะแกรมการควบคุมวงจรถูกกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

5. การจำลองการควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 2 การจำลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



รูปที่ 3 การจำลองการควบคุมตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส

การจำลองการควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink ในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 มีจุดประสงค์เพื่อควบคุมการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสให้สามารถขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ และเพื่อควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เชิงโรนัสที่ภาระไฟฟ้าต่างกันได้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยวงจรกำลังที่มีเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัสต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า โดยมีการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า กระแสอาร์มาเจอร์ และกระแสกระตุ้นขดลวดสนาม เพื่อนำมาทำการคำนวณ และควบคุมให้ระบบทั้งสองทำงานได้จริงเมื่อนำมาทำการออกแบบวงจรขึ้นงานจริง และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

6. ผลการจำลองระบบและผลการทดลอง

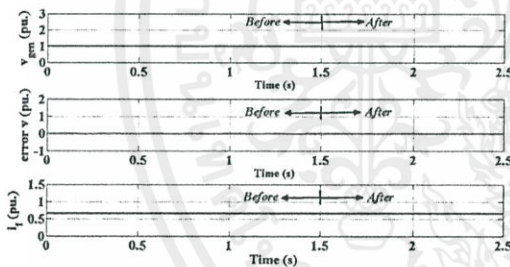
จากการทดลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส พบว่าระบบควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าได้ และสามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งผลการทดลอง เป็นไปตามผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังในรูปที่ 4

จากการทดลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโรนัส พบว่าระบบควบคุมสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ได้ตามที่ต้องการทั้งค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ค่าตัว

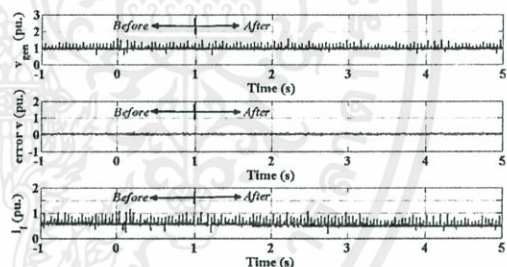
ประกอบกำลังนำหน้า และค่าตัวประกอบกำลังล่าหลัง ซึ่งเป็นไปตามผลการจำลองระบบ ซึ่งในที่นี้จะนำเสนอผลการทดลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังที่ภาระไฟฟ้า 565 วัตต์ เปรียบเทียบกับผลการจำลองระบบ ซึ่งสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังได้ที่ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 5, ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 นำหน้า แสดงดังรูปที่ 6 และค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ล่าหลัง แสดงดังรูปที่ 7

7. สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส โดยการควบคุมวงรอบปิดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ แสดงให้เห็นว่าการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสที่ได้ทำการนำเสนอมาแล้วในที่นี้ สามารถการควบคุมการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า และสามารถควบคุมการปรับค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เชิงโรนัส เพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนในวิชาห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัสได้

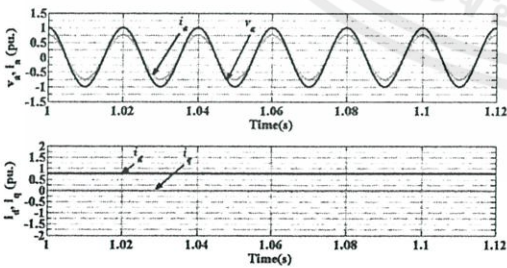


(ก) ผลการจำลอง

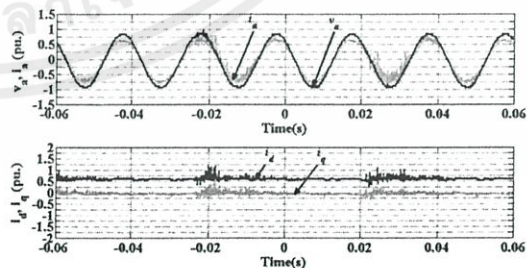


(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 4 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส



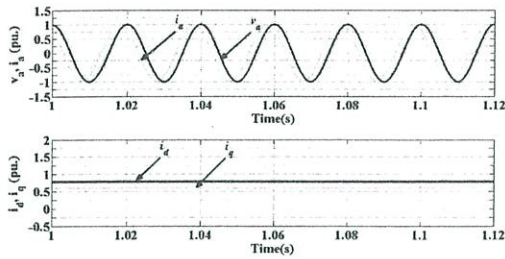
(ก) ผลการจำลอง



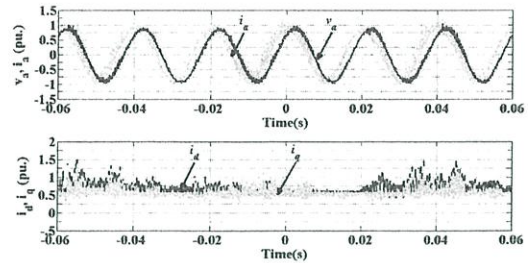
(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 5 การควบคุมตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 ที่ภาระไฟฟ้า 565 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

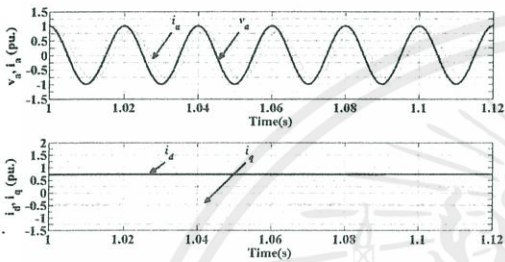


(ก) ผลการจำลอง

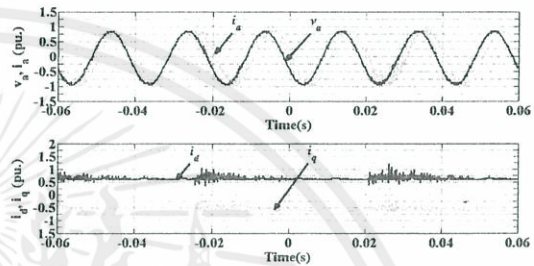


(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 6 การควบคุมตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้าที่ภาระไฟฟ้า 565 วัตต์



(ก) ผลการจำลอง



(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 7 การควบคุมตัวประกอบกำลัง 0.8 ส้าหลังที่ภาระไฟฟ้า 565 วัตต์

เอกสารอ้างอิง

[1] P.C.Sen, 1997, **Principles of electric machines and power electronics**, second edition, John Wiley & Sons, INC.

[2] Murad Jafari, Bin Wu, Mitesh Popat, "Power factor control in a wind energy conversion system via synchronous generator excitation", *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2013 26th Annual IEEE Canadian Conference on*, 2013, pp. 1-4.

[3] Weilin Li, Xiaobin Zhang, Huimin Li, "A Novel Digital Automatic Voltage Regulator for Synchronous Generator", *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-6.

[4] วรชาติ แซ่ก๊ก, "เอกสารประกอบการเรียนการสอนเรื่อง สเปซเวกเตอร์และทฤษฎีกรอบอ้างอิง", สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาคการศึกษา 1/2556.

[5] พิชิต ล้ายอง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, สนพ. มิน เซอร์วิส ซัพพลาย, พฤษภาคม 2553.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายอภิวิชญ์ สิริศักดิ์ 53011875
 เกิดวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2535
 โทรศัพท์ : 08-0930-0637
 E-mail : apiwit_sirisak@hotmail.com



นางสาวอภิญพร เหลืองสะอาด 53011903
 เกิดวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2534
 โทรศัพท์ : 08-2039-7036
 E-mail : windsermy@hotmail.com



นางสาวอุบลรัตน์ เตชะอุดมถาวร 53011953
 เกิดวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2535
 โทรศัพท์ : 08-6413-1074
 E-mail : june_sport94@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายอภิวิชญ์ ศิริศักดิ์ 53011875

เกิดวันที่ 5 มกราคม 2535

โทรศัพท์ 08-0930-0637

E-mail : apiwit_sirisak@hotmail.com



นางสาวอักษิพร เหลืองสะอาด 53011903

เกิดวันที่ 20 มิถุนายน 2534

โทรศัพท์ 08-2439-7026

E-mail : windsery@hotmail.com



นางสาวอุบลรัตน์ เตชะอุดมถาวร 53011953

เกิดวันที่ 28 มิถุนายน 2535

โทรศัพท์ 08-6413-1074

E-mail : june_sport94@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้