

ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร
A Symmetrical Two-Phase Induction Machine Drive



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

A Symmetrical Two-Phase Induction Machine Drive



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

A Symmetrical Two-Phase Induction Machine Drive



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMNT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสาร KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ะโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2014

ปีการศึกษา 2557

ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

A Symmetrical Two-Phase Induction Machine Drive



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **ศต.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ดร.ธีรพล โพธิ์พงศวิวัฒน์

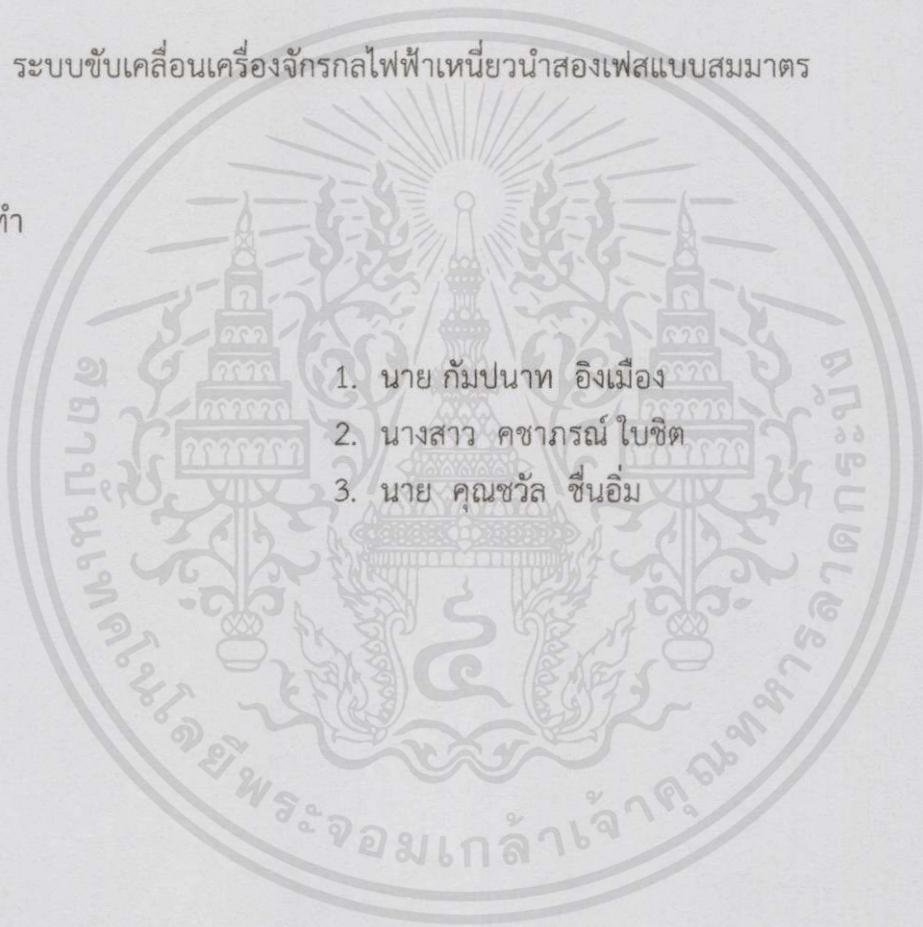
ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

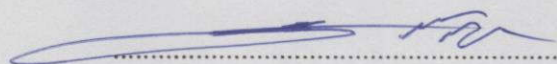
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

ผู้จัดทำ



1. นาย กัมปนาท อิงเมือง
2. นางสาว ศชาภรณ์ ไบชิต
3. นาย คุณชวัล ชื่นอ้อม

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่และสงวนลิขสิทธิ์แล้วลงเคลส อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

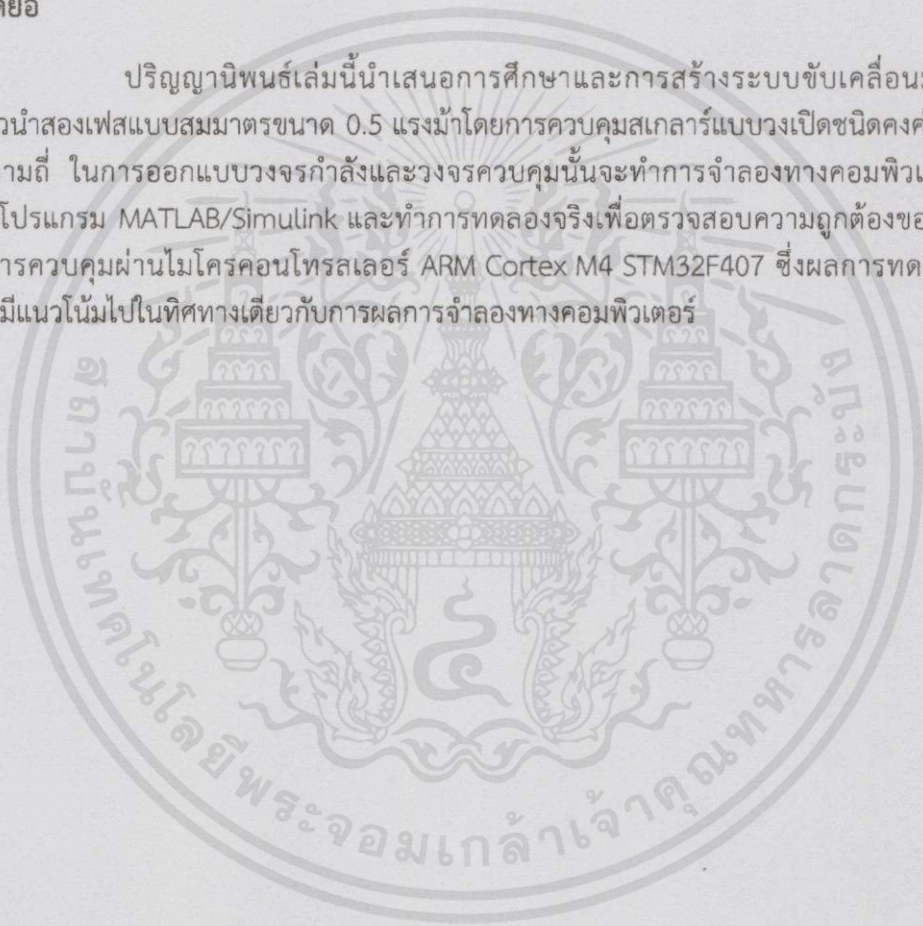
(ดร.ธีรพล โป้พงษ์วิวัฒน์)

ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

นาย กัมปนาท อิงเมือง
นางสาว ศชาภรณ์ ไบชิต
นาย คุณชวัล ชื่นอ้อม
ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการศึกษาและการสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรขนาด 0.5 แรงม้าโดยการควบคุมสเกลาร์แบบวงเปิดชนิดคงค่าแรงดันต่อความถี่ ในการออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมนั้นจะทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎี โดยการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M4 STM32F407 ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Symmetrical Two-Phase Induction Machine Drive

Mr. Kampanaht Ingmuang

Miss. Khachaporn Baichit

Mr. Koonchawan Chuen-im

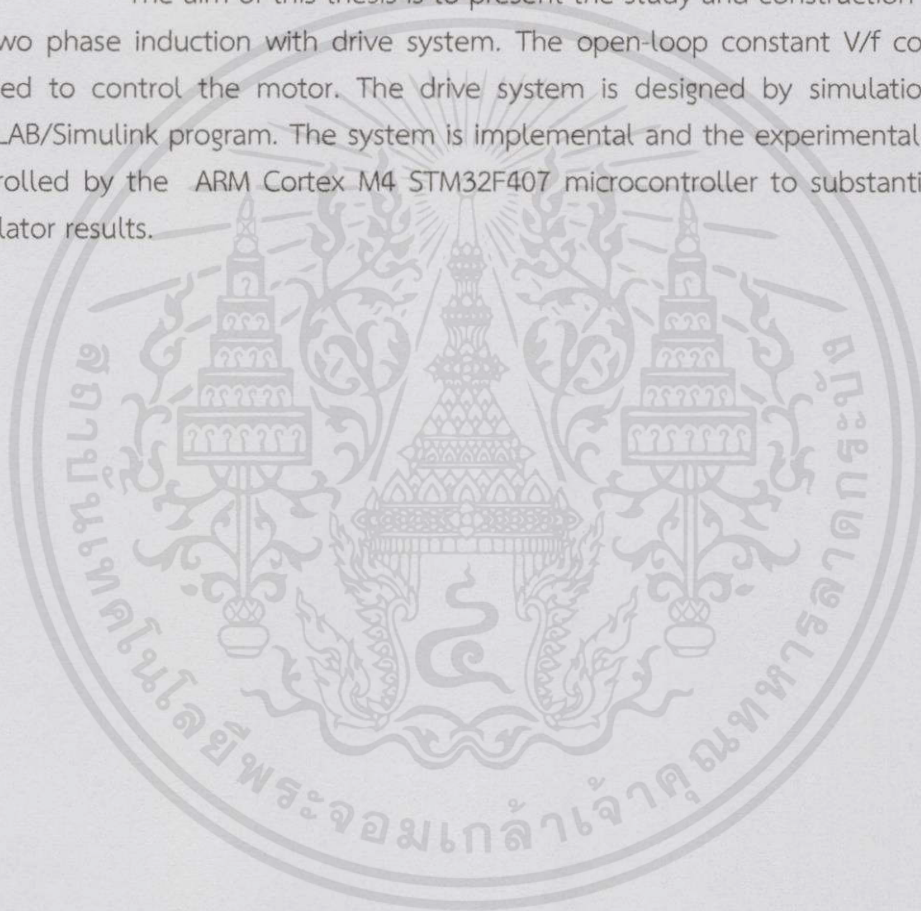
Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam Supervisor

Dr. Teeraphon Phophongviwat Co-Supervisor

Year 2014

ABSTRACT

The aim of this thesis is to present the study and construction of a 0.5 hp two phase induction with drive system. The open-loop constant V/f control is applied to control the motor. The drive system is designed by simulation using MATLAB/Simulink program. The system is implemental and the experimental system controlled by the ARM Cortex M4 STM32F407 microcontroller to substantiate the simulator results.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากผู้มีพระคุณหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม และ ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำข้อเสนอแนะในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ในทุกขั้นตอน โดยคำแนะนำที่ได้สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน ควบคุมการทำงานให้เป็นไปตามขั้นตอนอย่างเหมาะสม อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกปฏิบัติการและอุปกรณ์ต่างๆ ให้ได้ใช้เพื่อเป็นประโยชน์ในการดำเนินงานได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณพงศธร ชูสุน และ คุณพุกษาพันธ์ุ มานวกุล ที่มีส่วนในการให้ข้อเสนอแนะและคำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดในการทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเพชรดา กฤษประจันต์ ที่มีส่วนในการให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำในการแก้ปัญหาคำปรึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน ทำให้สามารถดำเนินโครงการได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงสี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้บริการการยืมอุปกรณ์เครื่องมือ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่อำนวยความสะดวกในการเบิกเงิน

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่าน บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและการเงินมาตลอด รวมถึงเพื่อนๆ ที่ร่วมกันทำงานและให้คำปรึกษา กัน ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการชิ้นนี้ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	4
2.2.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส	6
2.2.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส	7
2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส	8
2.3.1 สมการแรงดันและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด	11
2.3.2 สมการแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร	15
2.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟส	15
2.4.1 อินเวอร์เตอร์สองเฟส	16
2.4.2 การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม	18
2.5 การควบคุมแบบสเกลาร์	25
2.5.1 การคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่	25
บทที่ 3 การออกแบบและการประกอบสร้าง	28
3.1 บทนำ	28
3.2 หลักการทำงานของวงจรขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร	28
3.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์	29
3.3.1 ส่วนควบคุมแรงดันต่อความถี่	30
3.3.2 ส่วนสร้างสัญญาณมอดูเลต	31
3.3.3 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	31
3.4 การออกแบบวงจรที่ใช้จริงในการทดสอบ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่ออาจารย์ผู้ดูแลเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสให้นำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 วงจรกำลัง	32
3.4.1.1 อุปกรณ์ตัดต่อวงจรและอุปกรณ์ป้องกัน	34
3.4.1.2 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด	36
3.4.1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟส	37
3.4.2 วงจรทดสอบ	39
3.4.2.1 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า	39
3.4.2.2 วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	40
3.4.3 วงจรควบคุม	41
3.4.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์	41
3.4.3.2 วงจรขั้วเกต	42
3.4.3.3 วงจรบัฟเฟอร์	43
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	44
4.1 บทนำ	44
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	44
4.3 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ	44
4.3.1 การทดสอบการเริ่มทำงานของมอเตอร์	48
4.3.2 การทดสอบการเพิ่มภาระแบบขั้นบันได	60
4.3.2.1 เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากสภาวะไร้อะไรไฟฟ้า เป็นภาระขนาด 150 w	60
4.3.2.2 เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากภาระขนาด 150 w สู่ 300 w	64
4.4 ประสิทธิภาพของระบบ	68
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	69
5.1 วิจารณ์ผลการทดลอง	69
5.2 สรุปผล	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก การคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่	73
ภาคผนวก ข การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส	75
ภาคผนวก ค อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวงจรการทดสอบจริง	79
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการ	82
ประวัติผู้เขียน	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงภาคตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ	4
2.2 การกระจายตัวของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก	5
2.3 ไดอะแกรมภาคตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียงเฟสเดียว	6
2.4 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียงเฟสเดียว	7
2.5 ไดอะแกรมภาคตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีขดลวดสเตเตอร์ 2 เฟส	8
2.6 ภาพตัดขวางเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส	9
2.7 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสี่กึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส ที่ใช้ในการทดลอง	16
2.8 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสองกึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส	17
2.9 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสามกึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส	18
2.10 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสี่กึ่งสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส	18
2.11 การเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ และสัญญาณควบคุมสามเหลี่ยม	20
2.12 (ก) การเปรียบเทียบสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยม (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกจากการสวิตช์แบบไบโพลาร์	22
2.13 (ก) การเปรียบเทียบสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยม	24
2.13 (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิกจากการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์	25
2.14 กราฟเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว ที่ความถี่ต่อแรงดันคงที่	26
2.15 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส	27
3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สองเฟสแบบสมมาตร	28
3.2 (ก) วงจรกำลัง	29
3.2 (ข) บล็อกของการควบคุมแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ (ค) บล็อกการสร้างสัญญาณมอดูเลต (ง) บล็อกการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	30
3.3 บล็อกสมการควบคุมแรงดันต่อความถี่	30
3.4 บล็อกไดอะแกรมสร้างสัญญาณมอดูเลต	31
3.5 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	31
3.6 (ก) ไดอะแกรมวงจรกำลัง	32
3.6 (ข) วงจรกำลัง (ค) มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสต่อคัปปลิ่งกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3.6 (ง) ภาระทางไฟฟ้า

34

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 (ก) ไดอะแกรมวงจร soft start (ข) อุปกรณ์ป้องกัน อุปกรณ์ตัดต่อวงจร และวงจรถูก soft start	35
3.8 แสดงลำดับการทำงานของวงจรตัดต่อและวงจรป้องกัน	36
3.9 (ก) ไดอะแกรมวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์ (ข) วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์	37
3.10 (ก) ไดอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟส (ข) วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟส	38
3.11 (ก) ไดอะแกรมวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า	39
3.11 (ข) วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า	40
3.12 (ก) ไดอะแกรมวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	40
3.12 (ข) วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	41
3.13 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4	41
3.14 (ก) ไดอะแกรมวงจรขับเกต (ข) วงจรขับเกต	42
3.15 (ก) ไดอะแกรมวงจรบัฟเฟอร์ (ข) วงจรบัฟเฟอร์	43
4.1 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงคำสั่ง การเพิ่มความถี่ต่ำสุดไปยังความถี่ 50 Hz	45
4.2 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ที่วัดได้โดยไม่ผ่านวงจรกรอง	46
4.3 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ที่วัดได้โดยผ่านวงจรกรอง	47
4.4 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะเริ่มเดินที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 50 Hz	48
4.5 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 50 Hz	49
4.6 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน และกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 50 Hz	50
4.7 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะเริ่มเดินที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 40 Hz	51
4.8 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 40 Hz	52
4.9 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน และกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 40 Hz	53
4.10 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะเริ่มเดินที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 30 Hz	54
4.11 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 30 Hz	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน และกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 30 Hz	56
4.13 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะเริ่มเดินที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 20 Hz	57
4.14 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 20 Hz	58
4.15 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน และกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 20 Hz	59
4.16 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 50 Hz	60
4.17 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 40 Hz	61
4.18 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 30 Hz	62
4.19 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 20 Hz	63
4.20 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 50 Hz	64
4.21 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 40 Hz	65
4.22 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 30 Hz	66
4.23 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแส ทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 20 Hz	67

ข.1 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันกระแสตรง

77

ข.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เงื่อนไขการสวิตชิงแบบยูนิโพลาร์ แรงดันเฟสและแรงดันไฟด้านออกของอินเวอร์เตอร์	23
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ	68
ข.1 No-load test	76
ข.2 Block rotor test	76
ข.3 DC test	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน ซึ่งปัจจุบันได้แบ่งออกเป็นสอง ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และ สามเฟส ซึ่งได้มีการทำวิจัยเกี่ยวกับการขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองประเภทนี้อยู่มากมาย แต่ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนั้น จะพบว่าอาศัยหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสองเฟสชนิดสถานะไม่สมมาตร (Asymmetrical) เพื่อความสะดวกในการใช้แหล่งจ่ายไฟเพียงเฟสเดียว แต่อย่างไรก็ตามปัญหาในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียว ก็คือ แรงบิดกระเพื่อม ดังนั้นจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับการศึกษาค้นคว้าการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

อย่างไรก็ตาม การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรต้องอาศัยแหล่งจ่าย สองเฟสที่มีมุมต่างกัน 90° ทางไฟฟ้าทางออกที่เหมาะสมคือการใช้อินเวอร์เตอร์สองเฟส โดยใช้แหล่งจ่ายหนึ่งเฟสแปลงเป็นแรงดันกระแสตรงโดยแยกเป็นสองเฟสแล้วผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งแรงดันและความถี่ได้ ด้วยเหตุนี้โครงการนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรโดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบสเกลาร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร
2. เพื่อสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร
3. เพื่อศึกษาและออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สองเฟสโดยการควบคุมแบบสเกลาร์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

ศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบสเกลาร์ โดยใช้อินเวอร์เตอร์สองเฟสเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสองเฟส โดยการจำลองการทำงานทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการทดสอบจริงโดยการควบคุมผ่าน Microcontroller ARM Cortex M4 STM32F407

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. สืบค้นข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และผลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการงาน
2. วางแผน ออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรควบคุม และจัดท้าวสตูอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวงจรอินเวอร์เตอร์
3. จัดทำฮาร์ดแวร์ และจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
4. เขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ใช้ในวงจรควบคุม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
5. ทดสอบการทำงานของวงจรจริง และเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับการทดลอง
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง และแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
7. สรุปผลการดำเนินงานโครงการงาน และนำเสนอโครงการงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	2557					2558				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.สืบค้นข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2.วางแผน และออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรควบคุม และจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ทำวงจร										
3.ทำฮาร์ดแวร์ และจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink										
4.นำเสนอโครงงานครั้งที่ 1										
5.เขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์										
6.ทดสอบการทำงาน และเปรียบเทียบผลที่ได้จริง กับผลจำลองทางคอมพิวเตอร์										
7.วิเคราะห์ผลการทดลอง และแก้ไขข้อผิดพลาด										
8.สรุปผลการดำเนินงาน										
9.นำเสนอโครงงานครั้งที่ 2										

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1. ได้ทราบถึงหลักการการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสแบบสมมาตร
2. ได้รู้ถึงการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเฟสแบบสเกลาร์
3. เป็นการประยุกต์เอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมวงจรไฟฟ้าให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

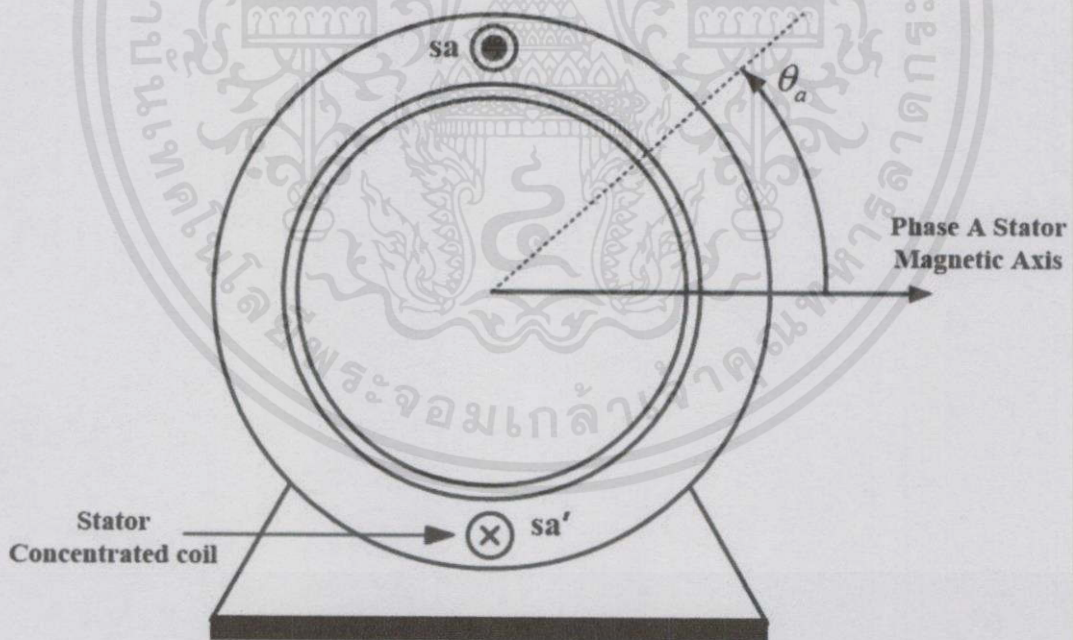
2.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส และการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส โดยการใช้แหล่งจ่ายสองเฟสจากอินเวอร์เตอร์สองเฟสที่ควบคุมด้วยสัญญาณพีดีบีแอลเอ็ม ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทนี้จะเริ่มจากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส การควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส การทำงานของอินเวอร์เตอร์และหลักการควบคุมแบบสัญญาณพีดีบีแอลเอ็ม

2.2 สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

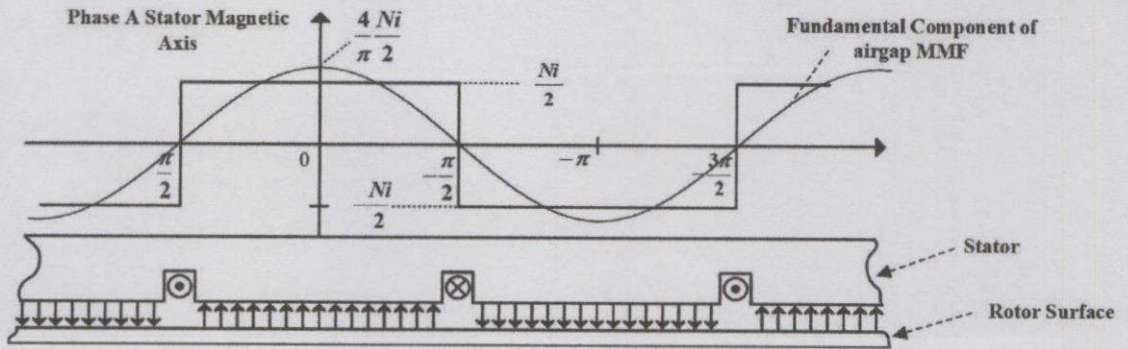
เมื่อทำการป้อนกระแสสลับเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขดลวดเพียง 1 เฟส ซึ่งขดลวดพันแบบอัดแน่น (Concentrated coil) ดังรูปที่

2.1



รูปที่ 2.1 แสดงภาคตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก [5]

จากทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 2.1 ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางซ้ไปทางขวา โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กมีการกระจายตัวดังรูป เนื่องจากขดลวดพันแบบอัดแน่น ส่งผลให้การกระจายตัวของแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.2 โดยมีขนาดค่าแอมพลิจูดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเท่ากับ $\frac{Ni}{2}$ เมื่อวิเคราะห์แรงเคลื่อนแม่เหล็กดังกล่าวโดยอาศัยอนุกรมฟูเรียร์พบว่า ค่าองค์ประกอบมูลฐานมีการกระจายตัวตามตำแหน่งของสเตเตอร์ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ดังสมการ

$$\mathfrak{F}_{sa}(\theta_a) = \frac{4 Ni_s}{\pi 2} \cos \theta_a \quad (2.1)$$

โดยที่ค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบมูลฐานของแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ $\frac{4 Ni_s}{\pi 2}$

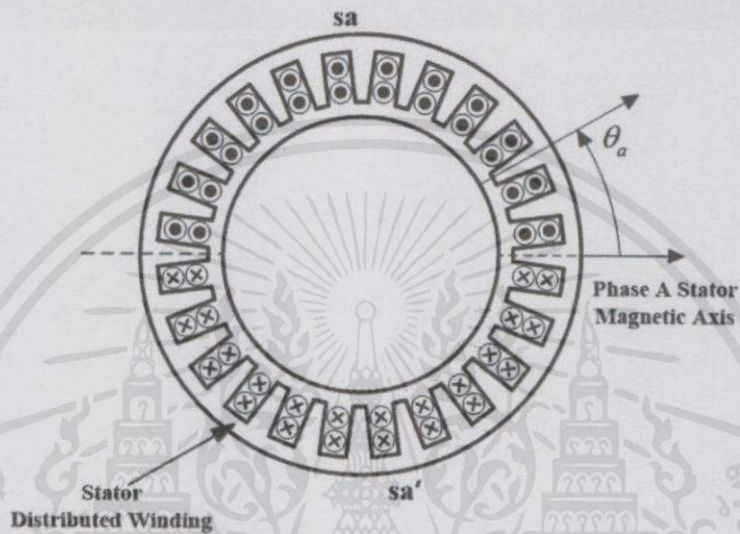
ในกรณีที่เป็นการพันขดลวดแบบกระจายจะทำให้มีค่า winding factor (K_w) และมีจำนวนรอบของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากับ N_{ph} จะสามารถหาค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มุม θ_a ได้จาก

$$\mathfrak{F}_{sa}(\theta_a) = \frac{4 N_{ph} K_w}{\pi 2} i_{sa} \cos \theta_a \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส

ในการศึกษาแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นควรเริ่มจากวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 เฟส โดยพิจารณาจากภาคตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียง 1 เฟส ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมภาคตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียงเฟสเดียว [5]

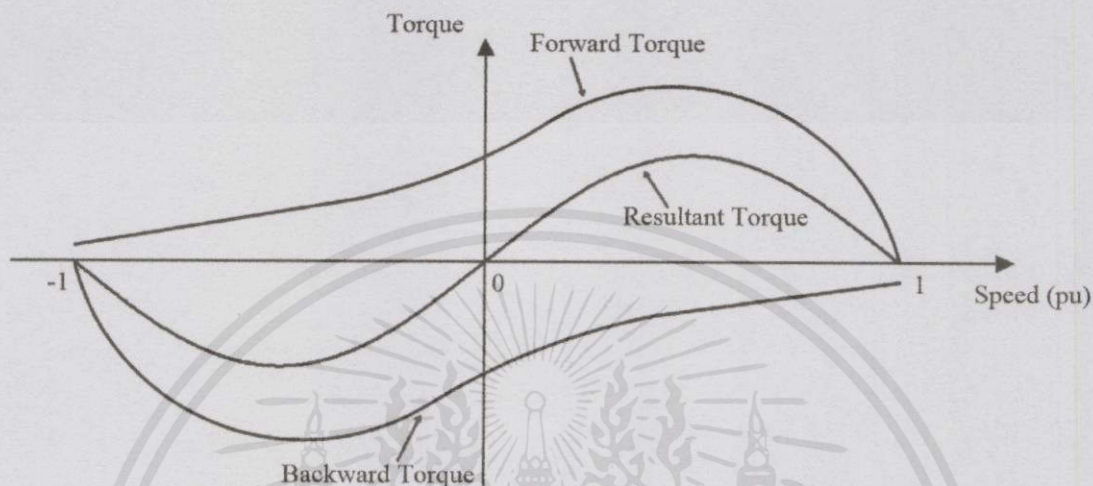
แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส สามารถจำแนกได้ 2 ชุด ได้แก่ Positive traveling wave และ Negative traveling wave ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

$$\mathfrak{F}_{sa}^+(\theta_a, t) = \frac{N_s}{4} I_{sm} (e^{j(\omega_s t - \theta_a)} + e^{-j(\omega_s t - \theta_a)}) \quad (2.3)$$

$$\mathfrak{F}_{sa}^-(\theta_a, t) = \frac{N_s}{4} I_{sm} (e^{j(\omega_s t + \theta_a)} + e^{-j(\omega_s t + \theta_a)}) \quad (2.4)$$

ในกรณีนี้จะพบว่าเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้ง 2 มีขนาดเท่ากันแต่เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกันส่งผลให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์มีการกระจายตัวเพียงแค่ว่าเปลี่ยนแปลงขนาดในทิศทางของแกนแม่เหล็กของเฟส a เท่านั้น กำหนดให้จำนวนร่องสลิตของสเตเตอร์มีจำนวนมาก และขดลวดมีการพันแบบกระจาย ส่งผลให้การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์เป็นแบบไซน์ฮอยด์ ผลของแรงเคลื่อนแม่เหล็กบวกส่งผลให้เกิดแรงบิดในทิศทางหนึ่ง ในขณะที่ผลของแรงเคลื่อน

แม่เหล็กกลับก็ส่งผลให้เกิดแรงบิดในทิศทางตรงกันข้าม ส่งผลให้แรงบิดลัพธ์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0 มีค่าเท่ากับ 0 ดังรูปที่ 2.4 จึงเป็นสาเหตุให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีขดลวดเพียง 1 ขดนั้นไม่สามารถออกตัวเองได้เนื่องจากแรงบิดขณะสตาร์ทเป็น 0



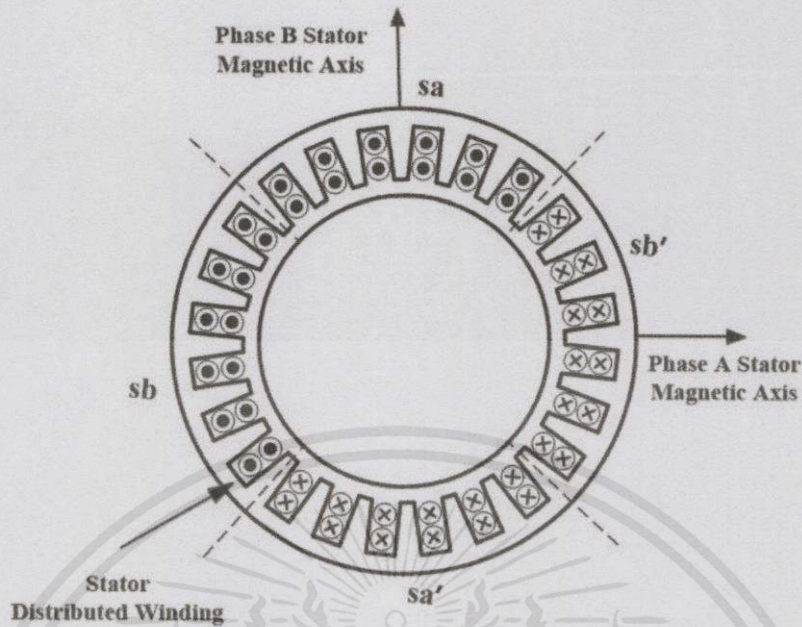
รูปที่ 2.4 กราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขดลวดสเตเตอร์เพียงเฟสเดียว

2.2.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขดลวดอาร์มาเจอร์ 2 เฟสอยู่ที่สเตเตอร์ ซึ่งวางห่างกันทำมุม 90 องศาทางไฟฟ้า และมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสซึ่งทำมุมกัน 90 องศา ดังรูปที่ 2.5 ซึ่ง Negative traveling wave ที่เกิดในเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นมีค่าเป็น 0 เหลือเพียง Positive traveling wave ดังสมการที่ 2.5

$$\begin{aligned}\vec{I}_s(\theta_s, t) &= \frac{N_s}{4} (I_{sm} e^{j(\omega_e t - \theta_{sm})} + I_{sm} e^{-j(\omega_e t - \theta_s)}) \\ &= \frac{N_s}{4} I_{sm} \cos(\omega_e t - \theta_s)\end{aligned}\quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมภาคตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขดลวดสเตเตอร์สองเฟส

จากสมการที่ 2.5 จะพบว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักจะมีทิศทางเพียงทิศทางเดียวซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงบิดในทิศทางเดียวเท่านั้น ส่งผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 2 เฟสที่ถูกป้อนด้วยแหล่งจ่ายที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศาสามารถออกตัวเองได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้น มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นมี 2 ประเภท คือ 1 เฟส และ 3 เฟส

2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

แม้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกนำมาใช้การเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือ มอเตอร์ แต่ก็สามารถทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสถูกใช้ในงานที่ต้องการกำลังสูงๆ เช่น การขับเคลื่อนปั๊ม โรงงานถลุงเหล็ก การชักลาก และการขับเคลื่อนความเร็ว ส่วนในงานขนาดเล็กเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งโครงการนี้จะมุ่งไปที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทตามรูปแบบของโรเตอร์คือ ชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) และโรเตอร์ขดลวด (Wound rotor) [1] โดยโครงการนี้จะมุ่งประเด็นไปที่โรเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก

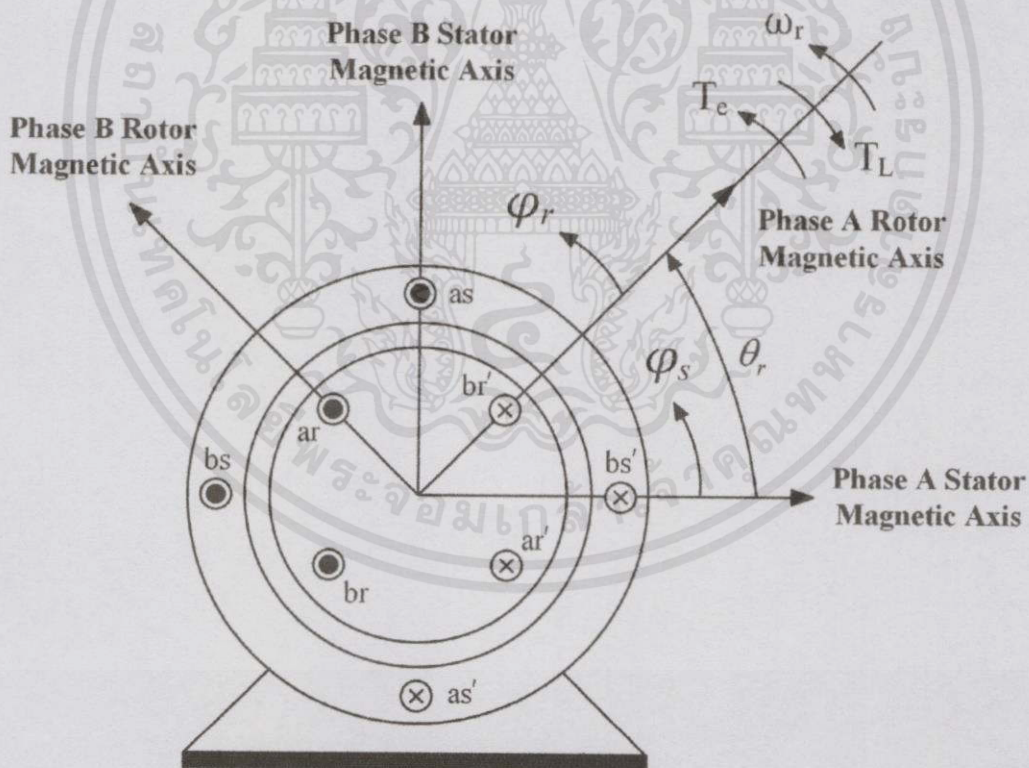
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จากรูปที่ 2.6 สมมติให้โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสมีการพันขดลวดเท่ากันทั้งสองเฟสและวางห่างกันทำมุม 90 องศา ซึ่งมีค่าความต้านทานขดลวดเท่ากัน ดังนั้น

ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์จึงสมมาตร ด้วยเหตุนี้จึงเรียกเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดว่าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสมมาตร

เนื่องจากระยะห่างของช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์สม่ำเสมอ คือมีช่องว่างอากาศสม่ำเสมอ ขดลวดที่โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกลัดวงจร ($v_{ar} = v_{br} = 0$) ซึ่งโดยส่วนใหญ่การใช้งานจะป้อนแหล่งจ่ายผ่านขดลวดทางสเตเตอร์ทางเดียว หรือเรียกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนทางเดียว แต่บางงานที่เป็นงานเฉพาะก็สามารถป้อนแหล่งจ่ายผ่านขดลวดทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ หรือเรียกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

มุมขจัดของสเตเตอร์แทนด้วย ϕ_s เทียบกับแกนสนามแม่เหล็กสเตเตอร์เฟส A มุมขจัดของโรเตอร์แทนด้วย ϕ_r เทียบกับแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์เฟส A ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์คือ ω_r และ θ_r เป็นมุมขจัดระหว่างแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์เฟส A กับแกนสนามแม่เหล็กสเตเตอร์เฟส A



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดทางไฟฟ้า T_e และแรงบิดทางกล T_L จากรูปที่ 2.6 กำหนดให้ T_e เป็นทิศ
ทางบวกตามทิศทางของ θ_r ที่เพิ่มขึ้น แต่แรงบิดทางกล T_L นั้นมีทิศทางตรงข้าม

สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศระหว่างขดลวด as กับ bs เป็นดังนี้

$$\mathfrak{F}_{sa} = \frac{N_s}{2} i_{sa} \cos \varphi_s \quad (2.6)$$

$$\mathfrak{F}_{sb} = \frac{N_s}{2} i_{sb} \cos(\varphi_s - \frac{\pi}{2}) \quad (2.7)$$

โดยที่ N_s เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์ ในช่วงสมดุลภาวะคงตัว กระแสในสเตเตอร์จะเป็น
ดังนี้

$$i_{sa} = \sqrt{2} I_{sm} \cos(\omega_e t) \quad (2.8)$$

$$i_{sb} = \sqrt{2} I_{sm} \cos(\omega_e t - \frac{\pi}{2}) \quad (2.9)$$

เพราะฉะนั้นจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กพัทธ์ระหว่างขดลวดสเตเตอร์คือ

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}_s &= \mathfrak{F}_{sa} + \mathfrak{F}_{sb} \\ &= \frac{N_s}{2} (i_{sa} \cos \varphi_s + i_{sb} \cos(\varphi_s - \frac{\pi}{2})) \end{aligned} \quad (2.10)$$

แทนสมการที่ (2.8) และ (2.9) ลงในสมการที่ (2.10) จะได้

$$\mathfrak{F}_s = \frac{N_s}{2} \sqrt{2} I_{sm} \cos[\omega_e t - \varphi_s] \quad (2.11)$$

สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศระหว่างขดลวด ar กับ br เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบสื่อนี้หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้ (2.12) ใช้

$$\mathfrak{S}_{rb} = \frac{N_r}{2} i_{rb} \cos(\phi_r - \frac{\pi}{2}) \quad (2.13)$$

โดยที่ N_r เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่โรเตอร์ ในช่วงสมดุลภาวะคงตัว กระแสโรเตอร์จะเป็นดังนี้

$$i_{ra} = \sqrt{2} I_{rm} \cos((\omega_e - \omega_r)t) \quad (2.14)$$

$$i_{rb} = \sqrt{2} I_{rm} \cos((\omega_e - \omega_r)t - \frac{\pi}{2}) \quad (2.15)$$

แรงเคลื่อนแม่เหล็กในช่องอากาศระหว่างขดลวดโรเตอร์ทั้งสอง ซึ่งสมมติว่าเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กพัลส์ระหว่างขดลวดโรเตอร์คือ

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_r &= \mathfrak{S}_{ra} + \mathfrak{S}_{rb} \\ &= \frac{N_r}{2} (i_{ra} \cos \phi_r + i_{rb} \cos(\phi_r - \frac{\pi}{2})) \end{aligned} \quad (2.16)$$

แทนสมการที่ (2.14) และ (2.15) ลงในสมการที่ (2.16) จะได้

$$\mathfrak{S}_r = \frac{N_r}{2} \sqrt{2} I_{rm} \cos[\omega_e t - \phi_r] \quad (2.17)$$

2.3.1 สมการแรงดันและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

สมการแรงดันสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$v_{sa} = r_s i_{sa} + \frac{d\lambda_{sa}}{dt} \quad (2.18)$$

$$v_{sb} = r_s i_{sb} + \frac{d\lambda_{sb}}{dt} \quad (2.19)$$

$$v_{ra} = r_r i_{ra} + \frac{d\lambda_{ra}}{dt} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ $v_{rb} = r_r i_{rb} + \frac{d\lambda_{rb}}{dt}$ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ (2.21) ใช้

ซึ่ง r_s เป็นค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ และ r_r เป็นค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ เพื่อความง่ายในการพิสูจน์ จึงเขียนในรูปของเมทริกซ์จะได้

$$\mathbf{V}_{sab} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{sab} + p \boldsymbol{\lambda}_{sab} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{V}_{rab} = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{rab} + p \boldsymbol{\lambda}_{rab} \quad (2.23)$$

เมื่อ p ย่อมาจาก d/dt ในกรณีวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้า จะสมมติให้ระบบเป็นเชิงเส้น ดังนั้นแล้วฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับลวดสามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นของค่าความเหนี่ยวนำและกระแส ดังนี้

$$\lambda_{sa} = L_{sasa} i_{sa} + L_{sasb} i_{sb} + L_{sarar} i_{ra} + L_{sarb} i_{rb} \quad (2.24)$$

$$\lambda_{sb} = L_{sbsa} i_{sa} + L_{sbsb} i_{sb} + L_{sbrar} i_{ra} + L_{sbrb} i_{rb} \quad (2.25)$$

$$\lambda_{ra} = L_{rasa} i_{sa} + L_{rasb} i_{sb} + L_{rara} i_{ra} + L_{rarb} i_{rb} \quad (2.26)$$

$$\lambda_{rb} = L_{rbsa} i_{sa} + L_{rbrb} i_{sb} + L_{rbra} i_{ra} + L_{rbrb} i_{rb} \quad (2.27)$$

ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำร่วมเป็นดังสมการที่ (2.24)–(2.27) เขียนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sab} \\ \lambda_{rab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sab} \\ \mathbf{i}_{rab} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

ค่าความเหนี่ยวนำตัวเองของแต่ละขดลวดจะมีค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่สูญเสียตอนข้ามช่องว่างอากาศ และความเหนี่ยวนำแมกนีไทซ์เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านช่องว่างอากาศ และสเตเตอร์กับโรเตอร์ สำหรับในระบบสมมาตร ค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง L_{asas} และ L_{bsbs} มีค่าเท่ากัน เขียนแทนด้วย L_{ss} ซึ่ง

$$L_{ss} = L_{sl} + L_{sm} \quad (2.29)$$

จาก สมการที่ (2.29) L_{sl} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหล และ L_{sm} คือ ความเหนี่ยวนำแมกนีไทซ์ ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นจะออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าน้อยมากโดยประมาณ

10 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง ในทำนองเดียวกันค่าความเหนี่ยวนำตัวเองที่โรเตอร์ก็จะ

ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{rr} = L_{rl} + L_{rm} \quad (2.30)$$

ค่าความเหนี่ยวนำแมกนีไทซ์ L_{sm} และ L_{rm} สามารถเขียนได้ดังนี้

$$L_{sm} = N_s^2 \frac{\pi\mu_0 rl}{4g} \quad (2.31)$$

$$L_{rm} = N_r^2 \frac{\pi\mu_0 rl}{4g} \quad (2.32)$$

ค่าความเหนี่ยวนำร่วม L_{sr} จะเปลี่ยนตามตำแหน่งของโรเตอร์ที่เปลี่ยนไป (θ_r) จะได้

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

ทำการย้ายตัวแปรฝั่งโรเตอร์มาอยู่ทางสเตเตอร์ จะได้สมการในรูปเมทริกซ์

$$\mathbf{i}'_{rab} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{i}_{rab} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{v}'_{rah} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{v}_{rah} \quad (2.35)$$

$$\lambda'_{rab} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{rab} \quad (2.36)$$

จะได้สมการแรงดันในรูปเมทริกซ์ใหม่

$$\mathbf{v}_{sab} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{sab} + p\lambda_{sab} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{v}'_{rab} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{rab} + p\lambda'_{rab} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่า r_r' หาได้จาก

$$\mathbf{r}_r' = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \mathbf{r}_r \quad (2.39)$$

แทนสมการที่ (2.34) และ (2.36) ลงใน (2.28) จะได้

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sab} \\ \lambda'_{rab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \frac{N_s}{N_r} \mathbf{L}_{sr} \\ \frac{N_s}{N_r} (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sab} \\ \mathbf{i}'_{rab} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

โดยที่

$$\mathbf{L}'_{rr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L'_{rr} & 0 \\ 0 & L'_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.31) และ (2.32) จะได้

$$L'_{rr} = L'_{lr} + \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{rm} = L'_{lr} + L_{sm} \quad (2.42)$$

และ

$$\mathbf{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{L}_{sr} = L_{sm} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

เพราะฉะนั้น จากสมการที่ (2.40) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการ (2.44) ซ้ำ

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sab} \\ \lambda'_{rab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sab} \\ \mathbf{i}'_{rab} \end{bmatrix}$$

2.3.2 สมการแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

แรงบิดจากสนามแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสมมาตรจำนวน P ขั้ว หาได้จาก

$$T_e = -\frac{P}{2} L_{sm} [(i_{sa} i'_{ra} + i_{sb} i'_{rb}) \sin \theta_r + (i_{sa} i'_{rb} - i_{sb} i'_{ra}) \cos \theta_r] \quad (2.45)$$

แรงบิดมีความสัมพันธ์กับความเร็วโรเตอร์โดย

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \quad (2.46)$$

โดยที่ ω_m คือความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์ สำหรับเครื่องจักรกลที่มีจำนวนขั้ว P ดังนั้น

$$\omega_m = \left(\frac{P}{2}\right) \omega_r$$

$$T_e = J \frac{2}{P} \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \frac{2}{P} \omega_r + T_L \quad (2.47)$$

J คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่โรเตอร์ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

T_L คือ แรงบิดภาระ ($\text{N} \cdot \text{m}$)

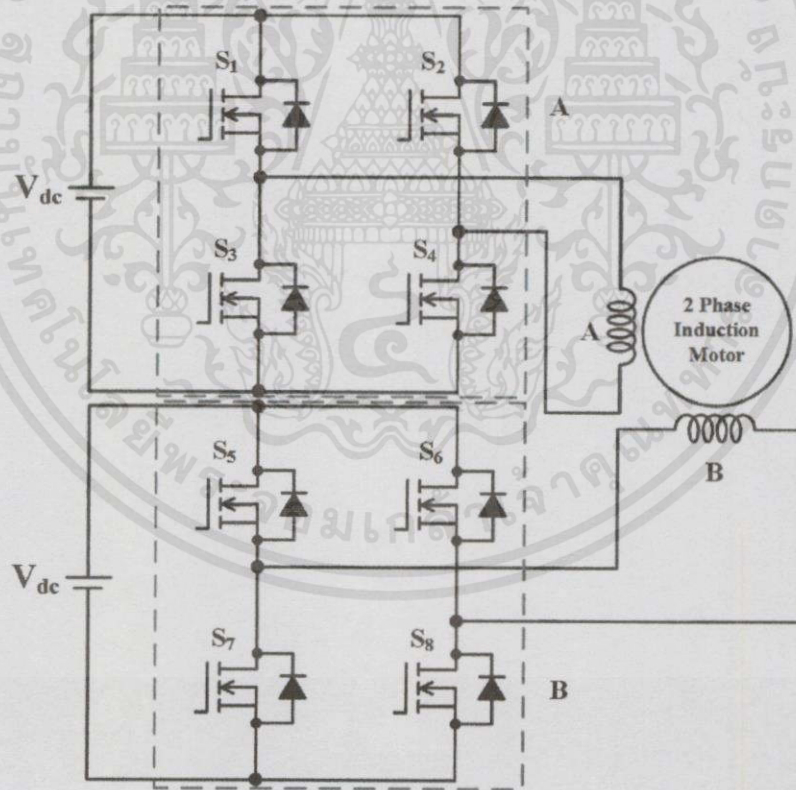
2.4 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟส

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟสส่วนที่สำคัญที่ใช้ในการทำงานคือ อินเวอร์เตอร์สองเฟสโดยที่มีหลักการทำงานคือ การเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับทำงานในการควบคุมความเร็วและความถี่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในโครงการนี้เราได้นำเอาอินเวอร์เตอร์สองเฟสมาใช้เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับเป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรโดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิได้ออกให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 อินเวอร์เตอร์สองเฟส

อินเวอร์เตอร์ หรือคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้ถูกนำมาประยุกต์ในงานชนิดต่างๆอย่างมากมายในปัจจุบัน เช่น งานในการควบคุมความเร็วและความถี่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น ซึ่งสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้เป็นอินเวอร์เตอร์สองเฟสเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสดังในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็น ฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวจำนวนสองชุด 8 สวิตช์แยกในการควบคุมมอเตอร์ในแต่ละเฟสโดยอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้นั้นมีเงื่อนไขการทำงานเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว คือสวิตช์ S_1, S_2 และ S_3, S_4 จะต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลาเพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรกันในบัส ดังนั้นในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตช์จะต้องมีการใส่เดดไทม์ (Dead Time) เข้าไปเพื่อป้องกันการลัดวงจรดังกล่าวด้วยเช่นกัน อีกทั้งในวงจรได้ใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 2 ชุดแยกกันในแต่ละเฟสเพื่อป้องกันการเกิดกระแสไหลวนเมื่อกระแสสองเฟสไม่สมดุล



รูปที่ 2.7 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสี่กึ่งสำหรับขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

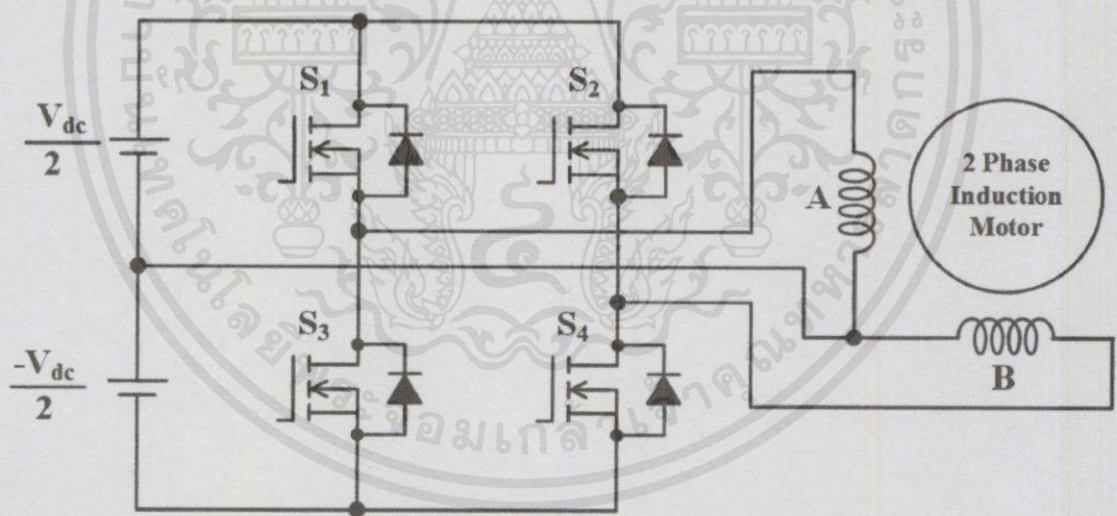
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ใช้ในการทดลองนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอินเวอร์เตอร์สองเฟสที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสนั้นประกอบด้วยกัน 3 ประเภท[4] คือ อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสองกึ่ง อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสามกึ่ง และอินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสี่กึ่ง ซึ่งแต่ละชนิดมีลักษณะการทำงานดังนี้

2.4.1.1 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสองกึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบไปด้วยสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัวร่วมกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรโดยที่เฟสแรกของมอเตอร์ต่อเข้ากับสวิตช์ 1 กึ่ง และเฟสที่ 2 ต่อเข้ากับสวิตช์อีก 1 กึ่งที่เหลือ

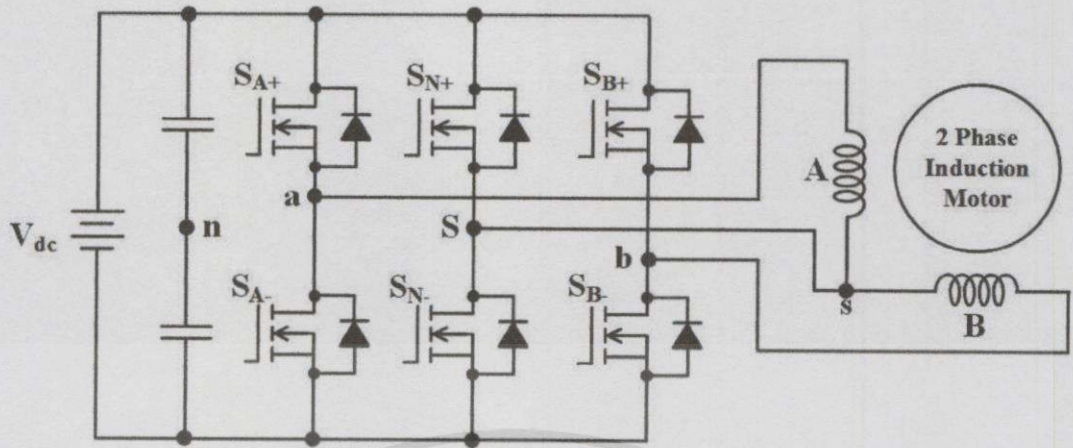
2.4.1.2 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสามกึ่งดังในรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยสวิตช์ควบคุมการทำงานทั้งหมด 6 สวิตช์ต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส ทำงานโดยใช้สองกึ่งของอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมแรงดันเฟส A และเฟส B ส่วนอีกหนึ่งกึ่งของอินเวอร์เตอร์ใช้ในการควบคุมแรงดันขดเซย

2.4.1.3 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสี่กึ่งดังในรูปที่ 2.10 ต่อเชื่อมเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสซึ่งประกอบไปด้วยฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวจำนวนสองชุด 8 สวิตช์ แยกในการควบคุมมอเตอร์ในแต่ละเฟส

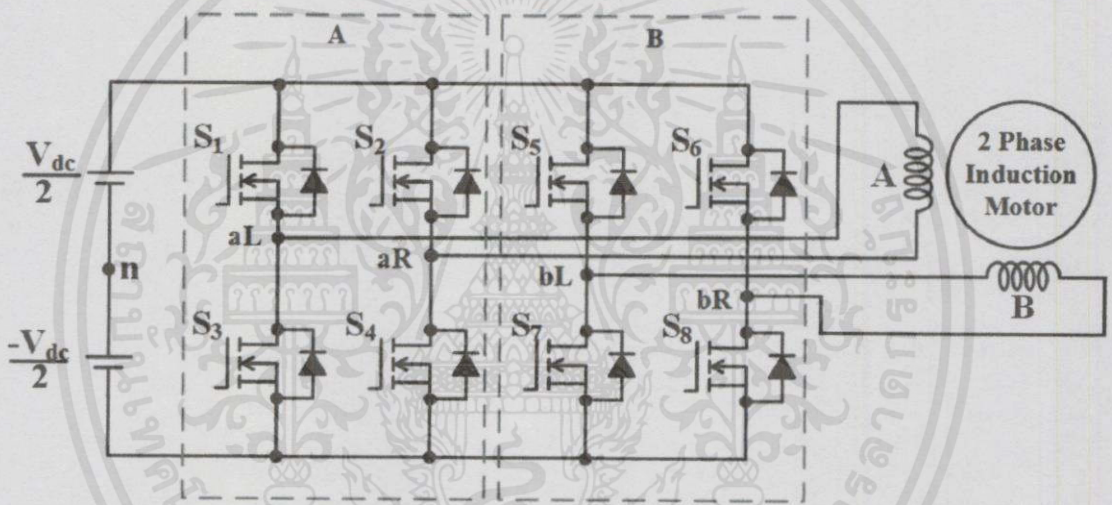


รูปที่ 2.8 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสองกึ่งสำหรับขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสามกิ่งสำหรับขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส [4]



รูปที่ 2.10 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสี่กิ่งสำหรับขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส [4]

2.4.2 การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในส่วนของการสร้างแรงดันไฟขาออกของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณขาออกที่ต้องการนั้นเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับขนาด และความถี่ การปรับขนาดของสัญญาณทำได้โดยการปรับอัตราส่วนดิวตี้ไซเคิลหรือความกว้างของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ ($V_{control}$) [3] และสามารถปรับความถี่ของสัญญาณด้วยการปรับสัญญาณควบคุมรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่ความถี่ของสัญญาณควบคุมสามเหลี่ยมนี้จะเท่ากับความถี่ของการสวิตช์ (f_s) ความถี่ของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ถูกกำหนดโดยความถี่ของสัญญาณควบคุมให้เป็นความถี่ของสัญญาณอ้างอิงหรือความถี่หลักมูล (f_1) อัตราส่วนการมอดูเลตด้านแอมป์ริจูด (m_a) ได้แสดงดังสมการที่ (2.48)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.48)$$

โดยที่ m_a คือ อัตราส่วนการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
 $\hat{V}_{control}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์
 \hat{V}_{tri} คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปสามเหลี่ยม

อัตราส่วนการมอดูเลตด้านความถี่ (m_f) ได้แสดงดังสมการที่ (2.49)

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.49)$$

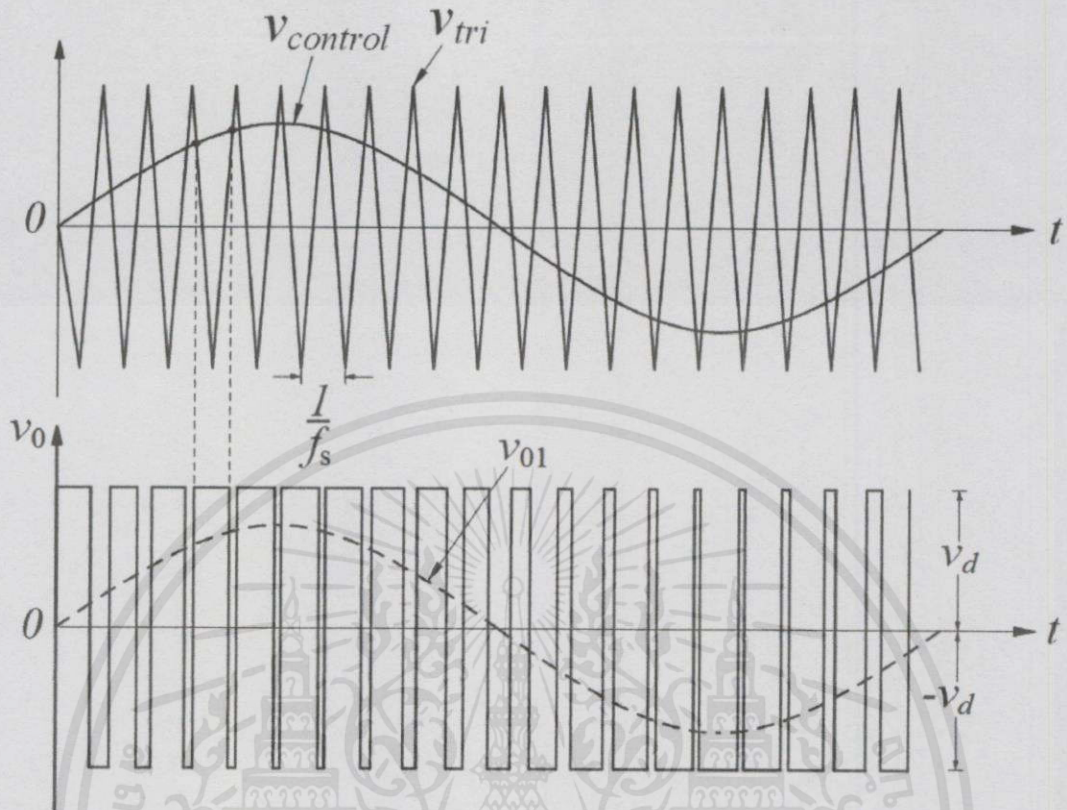
โดยที่ m_f คือ อัตราส่วนการมอดูเลตด้านความถี่
 f_s คือ ความถี่การสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์
 f_1 คือ ความถี่หลักมูลด้านออกของอินเวอร์เตอร์

การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มอัตราส่วนการมอดูเลตด้านแอมพลิจูดแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1. $m_a \leq 1$ สัญญาณด้านออกจะมีค่าเป็นเชิงเส้น ขนาดแรงดันไฟฟ้าของ
ความถี่หลักมูลจะแปรผันเป็นเชิงกับค่า m_a

2. $m_a > 1$ สัญญาณในช่วงนี้จะอยู่ในช่วงโอเวอร์มอดูเลต $\hat{V}_{control} > \hat{V}_{tri}$
ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีฮาร์โมนิกที่สูงกว่าแรงดันขาออกในช่วงการทำงานที่เป็น
เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ และสัญญาณควบคุมสามเหลี่ยม [3]

2.4.2.1 การสวิตช์แบบไบโพลาร์ที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม

รูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่เป็นการสวิตช์แบบไบโพลาร์ที่ดับเบิ้ลยูเอ็มจะทำให้สวิตช์แบบฟลูบริดจ์ทำงานเป็นคู่ที่มีสถานะการทำงานตรงข้ามกันระหว่าง S_1, S_3 และ S_2, S_4 โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์เป็นสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างแรงดันสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ ($V_{control}$) กับแรงดันสัญญาณควบคุมรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) โดยที่การทำงานของ S_1, S_4 และ S_2, S_3 จะมีการทำงานที่พร้อมกันในทุกช่วงเวลา และแรงดันในกิ่ง A แสดงได้ดังสมการที่ (2.50)

$$V_{AO} = \frac{1}{2} V_d \quad (2.50)$$

เอกสารนี้ สวิตช์ S_1, S_4 จะทำงานเมื่อ $V_{control} > V_{tri}$ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ และแรงดันในกิ่ง B จะพิจารณาได้จากสมการที่ (2.51)

$$V_{AO} = -\frac{1}{2}V_d \quad (2.51)$$

สวิตช์ S_2, S_3 จะทำงานเมื่อ $V_{\text{control}} < V_{\text{tri}}$

และเมื่อสังเกตที่วงจรถูกปรับจูนอินเวอร์เตอร์พบว่าแรงดันด้านออกที่กึ่ง B จะมีค่าเท่ากับค่าลบของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่กึ่ง A ดังสมการที่ (2.52) และสมการที่ (2.53)

$$v_{Bo}(t) = -v_{Ao}(t) \quad (2.52)$$

และ

$$v_o(t) = v_{Ao}(t) - v_{Bo}(t) = 2v_{Ao}(t) \quad (2.53)$$

แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.12(ก) ซึ่งเป็นผลมาจากการสวิตช์ซึ่งแบบไบโพลาร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในช่วงแรงดันระหว่าง $-V_d$ และ $+V_d$ และมีค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าด้านออกดังสมการที่ (2.54) เมื่อการมอดูเลตเป็นเชิงเส้น และสมการที่ (2.55) เมื่ออยู่ในช่วงมอดูเลชันเกิน ส่วนฮาร์มอนิกแถบข้างจะเกิดขึ้นรอบๆ $m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$ ดังแสดงรูปที่ 2.12(ข)

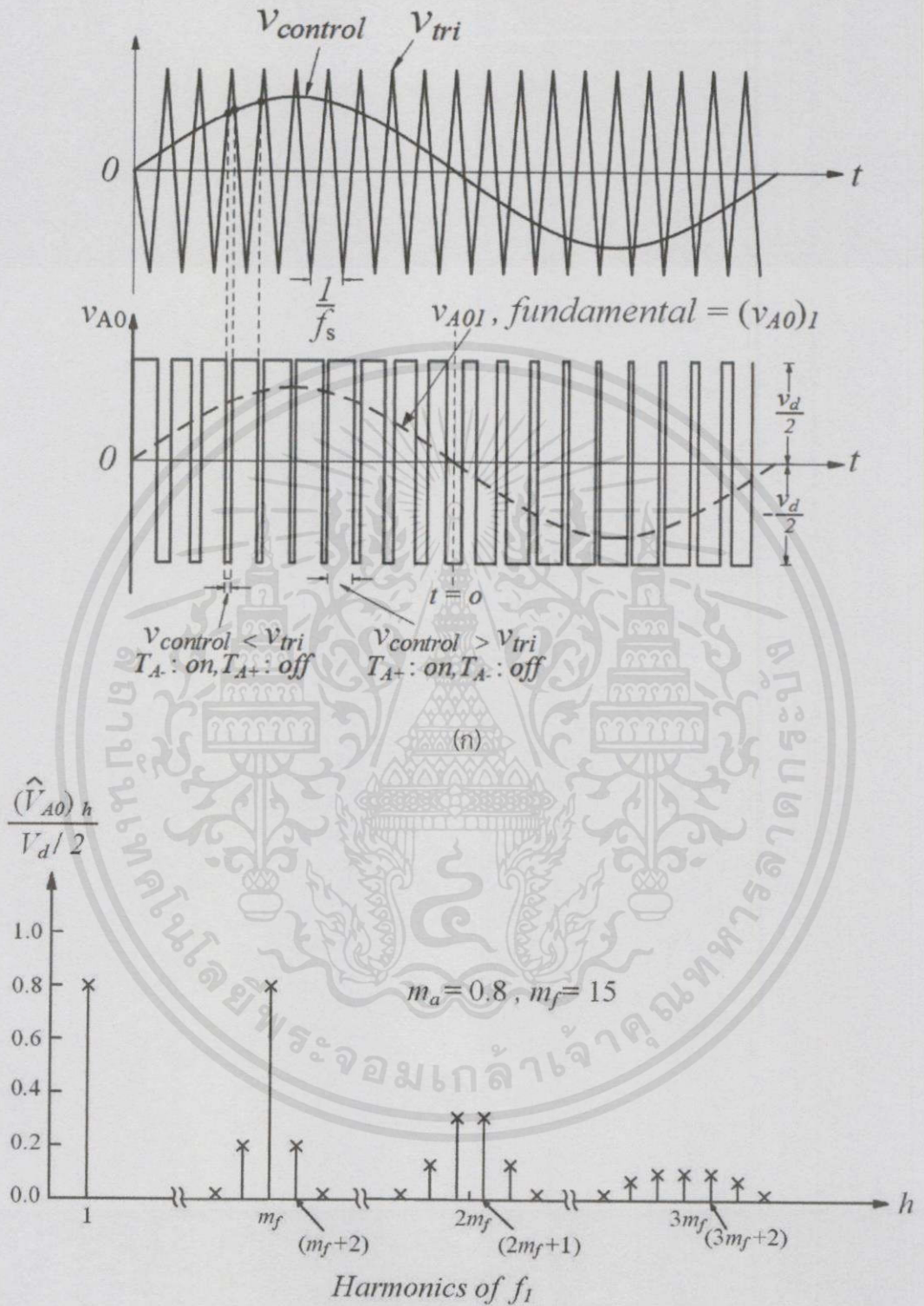
เมื่อ $m_a \leq 1$

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d \quad (2.54)$$

เมื่อ $m_a > 1$

$$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi}V_d \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.12 (ก) การเปรียบเทียบสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยม (ข) สเปกตรัมฮาร์มอนิก
 ไม่ว่าจะคิดค่าที่สั้น ออกทั้งหมดมาให้เห็นแบบนี้น้อยก็แต่เพียงอย่างเดียวของเอกสารนี้ทุกสิ่งทุกอย่างจะใช้
 จากการสวิตช์แบบไบโพลาร์ [3]

2.4.2.2 การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์เป็นการสวิตช์ให้มีการทำงานกันเป็นคู่โดยมีการแยกสัญญาณควบคุมออกจากกันในกึ่ง A และกึ่ง B โดยเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณกันระหว่างแรงดันสัญญาณควบคุมรูปสามเหลี่ยม (V_{tri}) กับแรงดันสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ $V_{control}$ และ $-V_{control}$ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13(ก) โดยมีเงื่อนไขการสวิตช์และสมการแรงดันดังสมการที่ (2.56) – (2.63)

เมื่อ $V_{control} > V_{tri}$: สวิตช์ S_1 จะนำกระแส

$$v_{AN} = V_d \quad (2.56)$$

เมื่อ $V_{control} < V_{tri}$: สวิตช์ S_3 จะนำกระแส

$$v_{AN} = 0 \quad (2.57)$$

เมื่อ $-V_{control} > V_{tri}$: สวิตช์ S_2 จะนำกระแส

$$v_{BN} = V_d \quad (2.58)$$

เมื่อ $-V_{control} < V_{tri}$: สวิตช์ S_4 จะนำกระแส

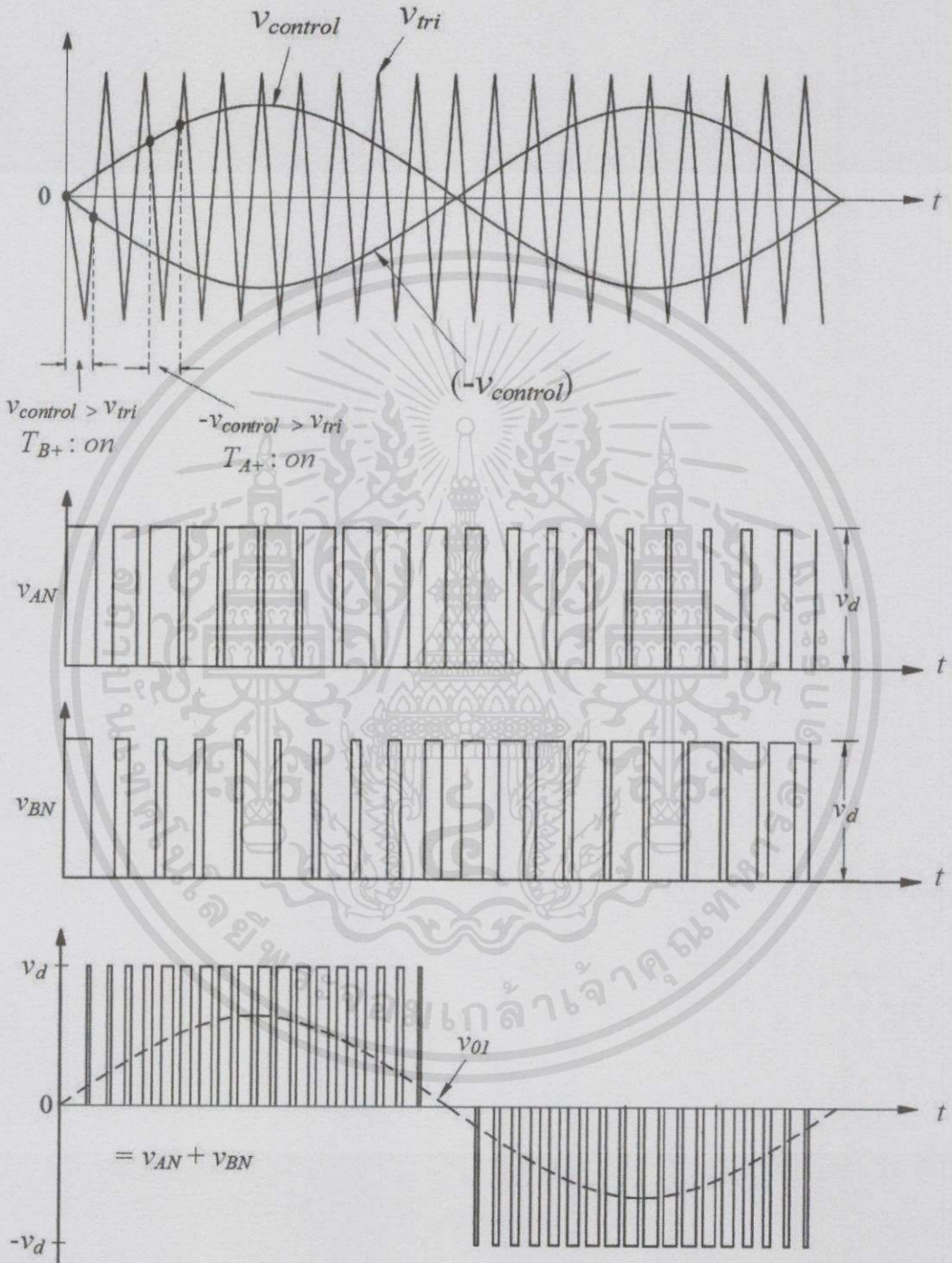
$$v_{BN} = 0 \quad (2.63)$$

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ แรงดันเฟสและแรงดันไฟด้านออกของอินเวอร์เตอร์

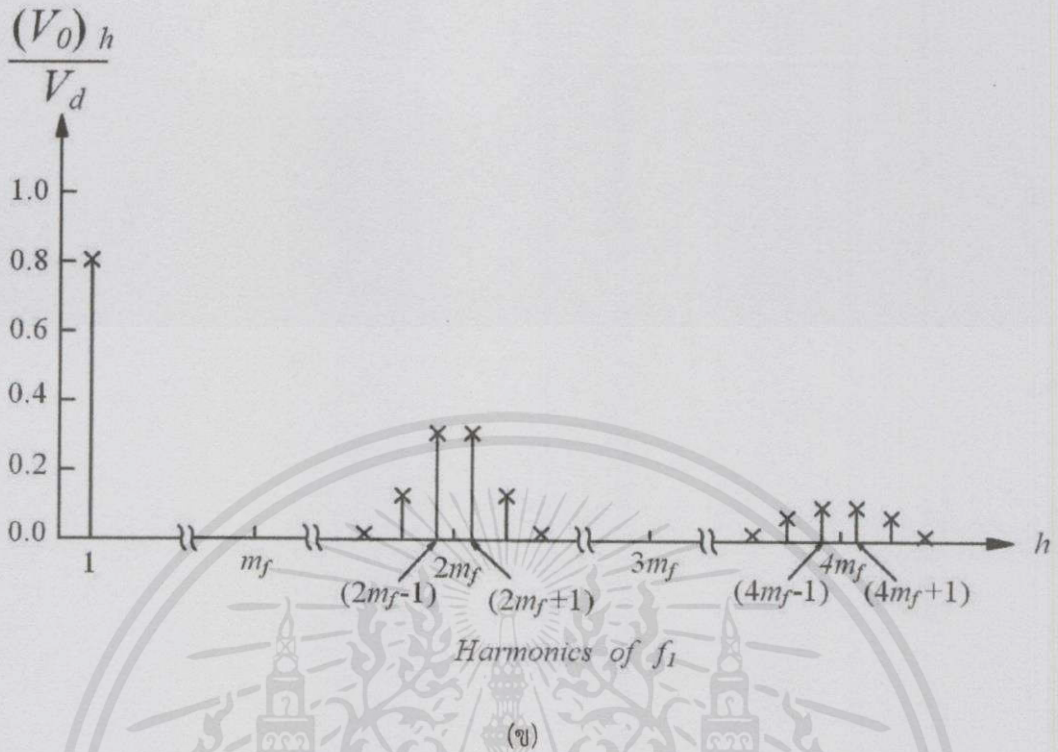
เงื่อนไข	สวิตช์นำกระแส		V_{AN}	V_{BN}	V_0
1	S_1	S_4	V_d	0	V_d
2	S_3	S_2	0	V_d	$-V_d$
3	S_1	S_2	V_d	V_d	0
4	S_3	S_4	0	0	0

จากเงื่อนไขการสวิตช์ในตารางที่ 2.1 นั้นแรงดันขาออกมีการเปลี่ยนแรงดันอยู่ระหว่าง 0 ถึง V_d และ 0 ถึง $-V_d$ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เรียกการสวิตช์ในรูปนี้ว่าการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ซึ่งแตกต่างจากการสวิตช์แบบไบโพลาร์ที่มีช่วงของแรงดันการสวิตช์อยู่ระหว่าง V_d ถึง $-V_d$ ซึ่งไม่จำกัดเพียงด้านใดด้านหนึ่งเหมือนกับการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ที่มากกว่าการสวิตช์แบบไบโพลาร์

คือมีความถี่สวิต ซึ่งมากเป็น 2 เท่า ส่งผลให้ฮาร์มอนิกของแรงดันด้านออกมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข)



(ก)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 (ก) การเปรียบเทียบสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยม (ข) สเปกตรัมฮาร์โมนิกจากการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ [3]

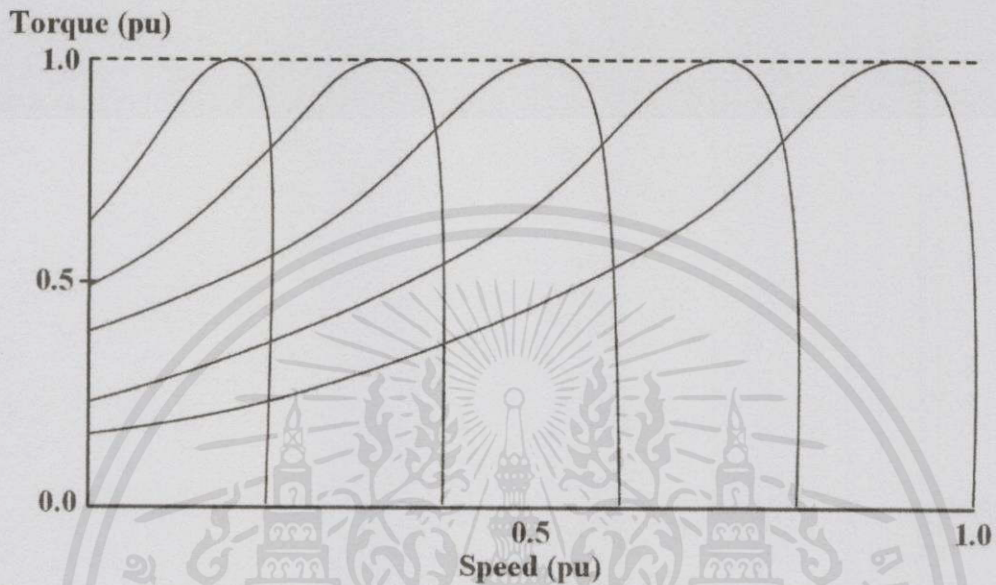
2.5 การควบคุมแบบสเกลาร์

การควบคุมแบบสเกลาร์เป็นการควบคุมเพียงขนาดเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การควบคุมเส้นแรงแม่เหล็กเพื่อปรับแรงดันของเครื่องจักรกลไฟฟ้า การควบคุมความถี่เพื่อปรับแรงบิด อย่างไรก็ตามตามเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงบิด ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการควบคุมแบบสเกลาร์ กับการควบคุมแบบเวกเตอร์นั้น การควบคุมแบบสเกลาร์มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำกว่า แต่การควบคุมและอุปกรณ์ทำได้ง่ายกว่า การควบคุมแบบสเกลาร์ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม สำหรับโครงการนี้จะใช้การคำนวณแรงดันต่อความถี่

2.5.1 การคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่

การคงค่าแรงดันต่อความถี่ ออกแบบมาเพื่อความสะดวกในการปรับความเร็วของมอเตอร์ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมขนาดของแรงดันและความถี่ให้ถูกต้องตามคำสั่งความเร็ว ซึ่งไม่มี การป้อนกลับความเร็ว การคงค่าแรงดันต่อความถี่ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เพราะทำการควบคุมได้ง่าย ถ้าทำการลดความถี่ลงแต่ยังคงที่ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายไว้ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศอิ่มตัว ส่งผลให้กระแสที่สเตเตอร์สูงขึ้นและ

รูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะผิดเพี้ยนไปมาก [2] เพราะฉะนั้นย่านความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่พิกัด ต้องมีการลดค่าแรงดันที่สเตเตอร์อย่างเป็นสัดส่วนเพื่อรักษาเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศให้คงที่ จะได้กราฟแรงบิดกับความเร็ว ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็ว ที่ความถี่ต่อแรงดันคงที่ [2]

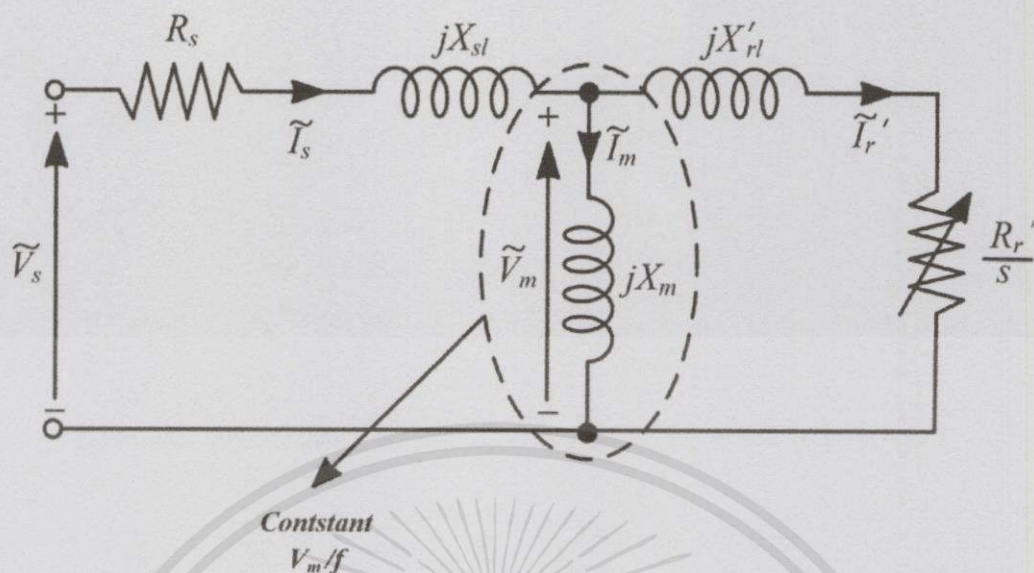
จากสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสมการแรงบิดทางไฟฟ้า

$$\frac{E}{f} = 4.44 N \phi_{\max} \quad (2.64)$$

$$T = K \phi I \quad (2.65)$$

จากสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเห็นว่า ถ้าทำการเพิ่มความถี่เพียงอย่างเดียว จะส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าลดลง ส่งผลให้แรงบิดมีค่าลดลง แต่ถ้าทำการลดความถี่เพียงอย่างเดียว จะส่งผลให้ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นจนเกิดการอิ่มตัว ดังนั้นแล้วเพื่อป้องกันการอิ่มตัวของฟลักซ์จึงต้องทำการคงค่าแรงดันต่อความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าค่าแรงดันต่อความถี่นั้น ไม่ใช่การคงค่าแรงดันที่ป้อนเข้าที่สเตเตอร์ต่อความถี่ แต่คือการคงค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำแมกนีไตซ์ต่อความถี่ กระแสแมกนีไตซ์ซึ่งมีค่าคงที่ส่งผลให้ ฟลักซ์ที่สร้างสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

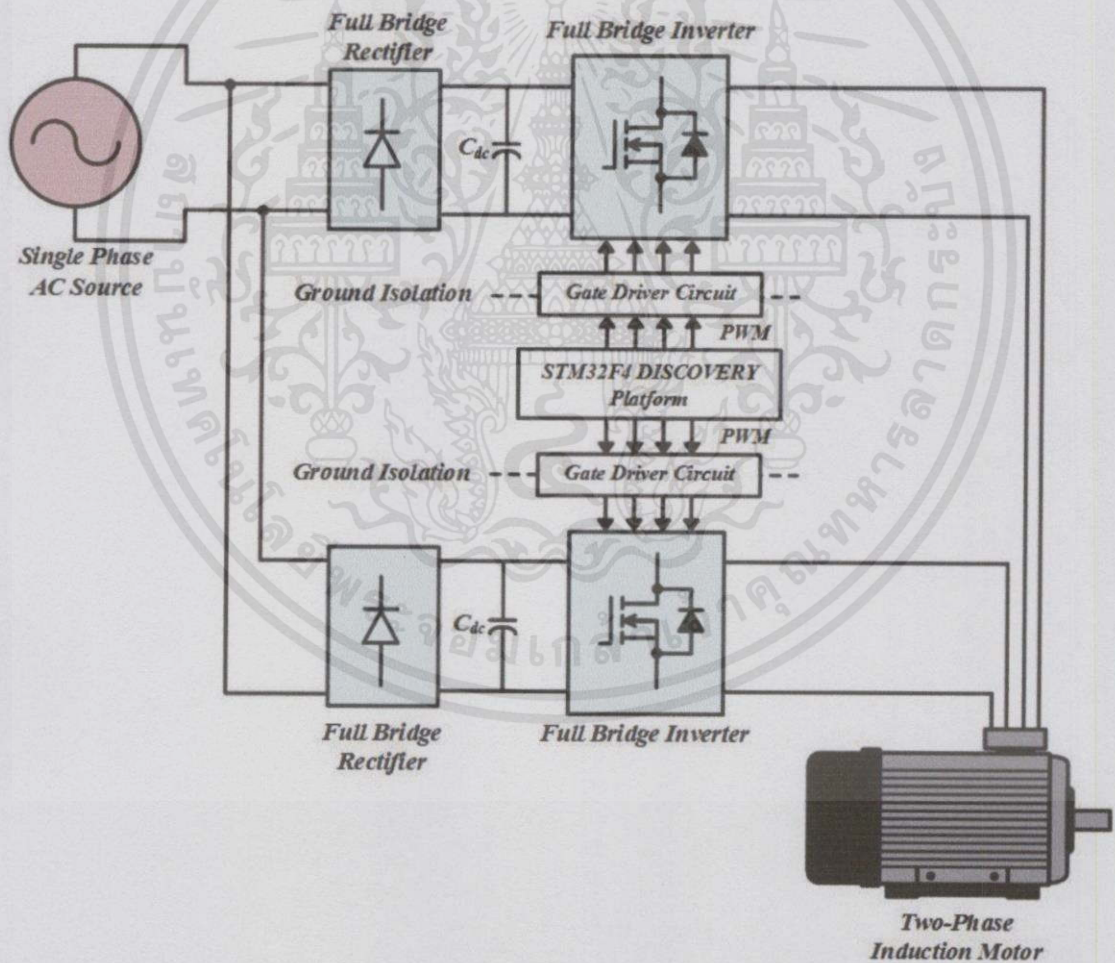
บทที่ 3

การออกแบบและการประกอบสร้าง

3.1 บทนำ

ในบทนี้แสดงวิธีการจำลองผลการทำงานทางคอมพิวเตอร์และวงจรการทำงานจริง ซึ่งระบบการทำงานถูกออกแบบและจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยการจำลองระบบนี้ อาศัยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ผลที่ได้จากการจำลองระบบมีความใกล้เคียงกับผลการทำงานเมื่อนำไปใช้จริงมากที่สุด และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างวงจรขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร โดยอาศัยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสองเฟส

3.2 หลักการทำงานของวงจรขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร



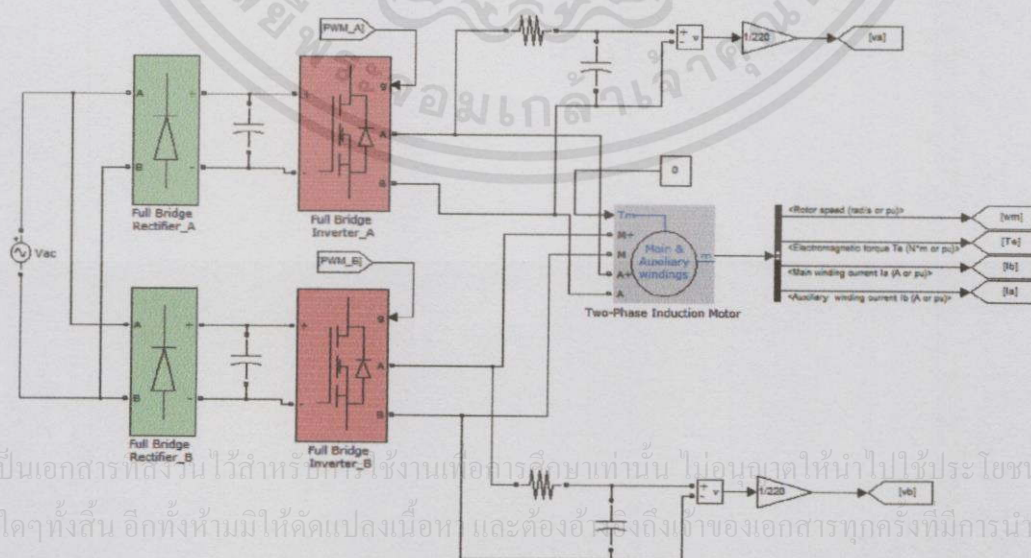
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบ
สมมาตร

จากไดอะแกรมการทำงาน ในรูปที่ 3.1 สามารถแบ่งวงจรการทำงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม ในส่วนของวงจรกำลัง เริ่มต้นโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ทั้งสองวงจร เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่น โดยมีการต่อตัวเก็บประจุขนาด 2200 μF เพื่อให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีความเรียบยิ่งขึ้น และจากนั้นก็เข้าสู่วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เปรียบเสมือนวงจรขยายแรงดัน โดยแรงดันขาออกที่ได้จะมีลักษณะเป็นพัลส์ชนิดพีดีบีแอลยูเอ็ม สำหรับขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

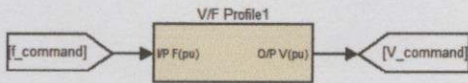
ในส่วนของวงจรควบคุมจะทำหน้าที่ในการควบคุมระบบเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน โดยการสร้างสัญญาณพีดีบีแอลยูเอ็มจากไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F407VG ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งโครงงานนี้ จะทำการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสเกลาร์ โดยการควบคุมแรงดันที่สเตเตอร์ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความถี่อ้างอิง เพื่อให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ และป้องกันไม่ให้ฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว

3.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

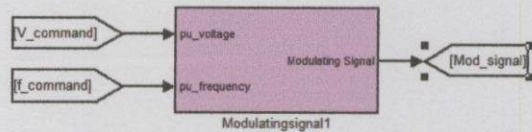
แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส เพื่อศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำ No-load test, Block rotor test และ DC test ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ข โดยมีแบบจำลองการควบคุมมอเตอร์ดังแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วยดังนี้



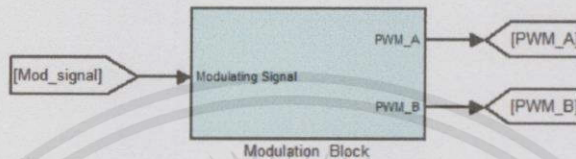
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)



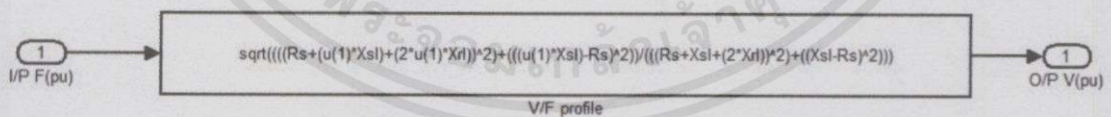
(ง)

รูปที่ 3.2 (ก) วงจรกำลัง (ข) บล็อกของการควบคุมแรงดันต่อความถี่ให้คงที่ (ค) บล็อกการสร้างสัญญาณมอดูเลต (ง) บล็อกการสร้างสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม

จากแบบจำลองในรูปที่ 3.2 สามารถจำแนกบล็อกการจำลองออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

3.3.1 ส่วนควบคุมแรงดันต่อความถี่

เนื่องจากวิธีการที่ใช้ควบคุมมอเตอร์สองเฟสนี้อาศัยหลักการควบคุมแบบสเกลาร์ โดยการควบคุมให้อัตราส่วนแรงดันแมกเนตซึ่งอินตักแทนซ์ของขดลวดต่อความถี่มีค่าคงที่ ซึ่งการควบคุมนั้นเมื่อทำการปรับค่าความถี่ไปก็จะทำให้แรงดันที่ใช้ในการควบคุมบล็อกต่อไป ดังรูปที่ 3.3

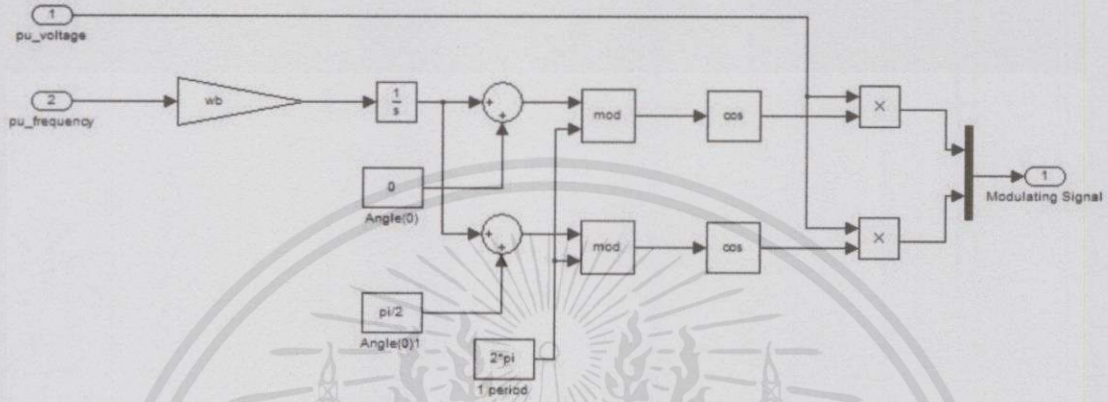


รูปที่ 3.3 บล็อกสมการควบคุมแรงดันต่อความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ส่วนสร้างสัญญาณมอดูเลต

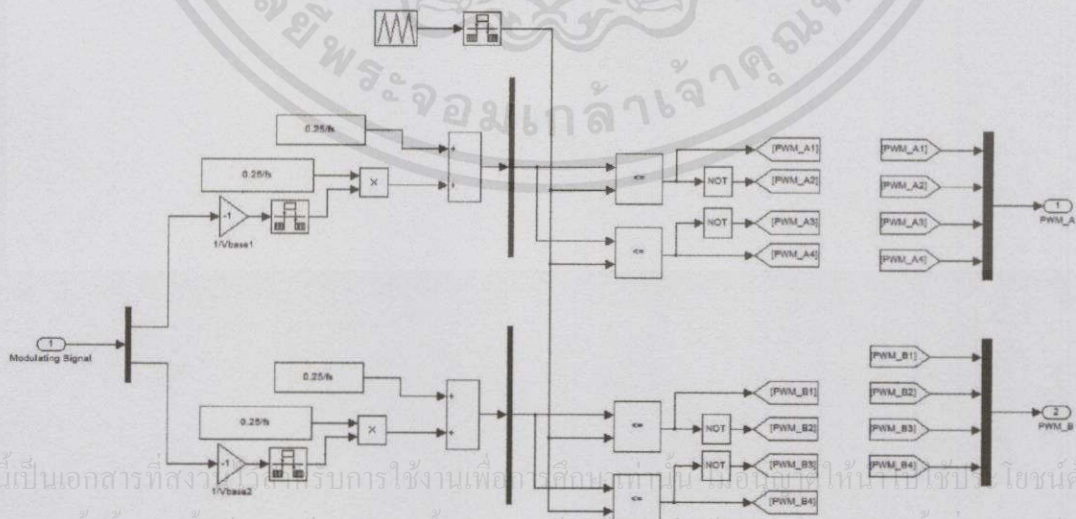
การสร้างสัญญาณมอดูเลต ก็คือการสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสต้องการแหล่งจ่ายที่เป็นสองเฟสมุมเฟสห่างกัน 90 องศา โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ชอยด์สองเฟส ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมสร้างสัญญาณมอดูเลต

3.3.3 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

เมื่อได้สัญญาณมอดูเลตจากรูปที่ 3.4 ซึ่งได้สัญญาณรูปคลื่นไซน์สองเฟสที่มีมุมต่างกัน 90 องศา จากนั้นจึงนำมาเข้าบล็อกการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่มีความถี่การสวิตซ์ 5 kHz โดยสัญญาณที่ได้จะนำไปขับขงมอเตอร์ 4 ตัว แต่ละเฟสจะใช้มอเตอร์ 4 ตัว



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

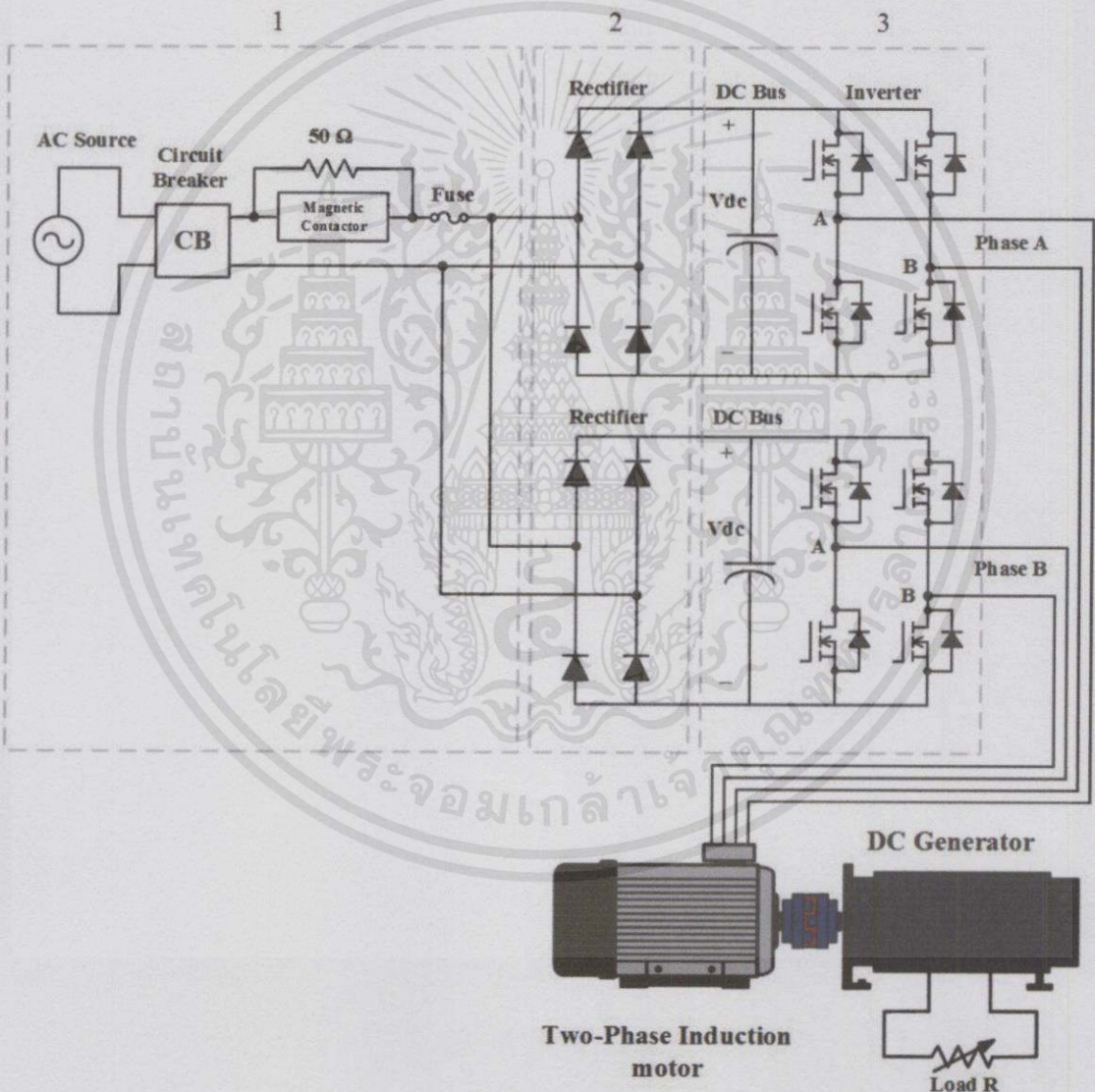
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์แล้วจะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของลิขสิทธิ์

3.4 การออกแบบวงจรที่ใช้จริงในการทดสอบ

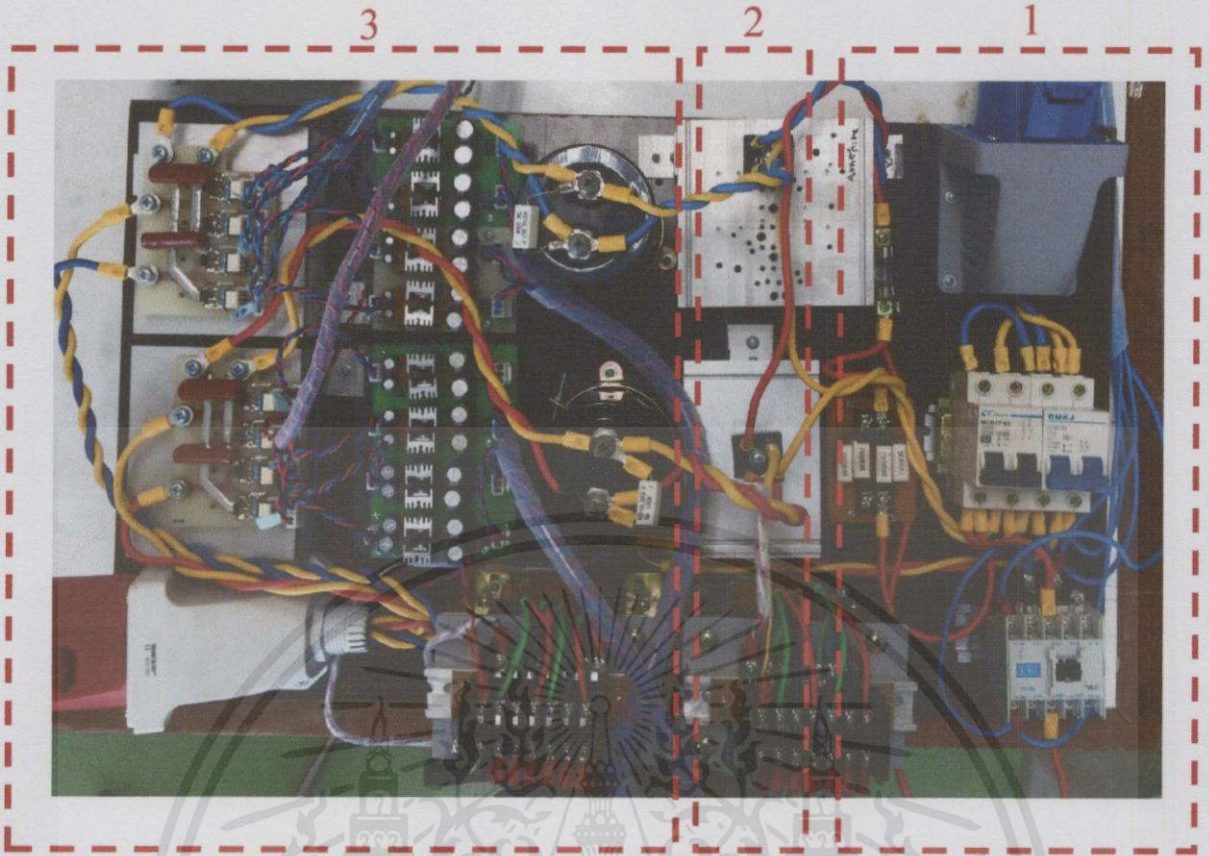
วงจรที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกันประกอบด้วย วงจรกำลัง วงจรทดสอบ และวงจรควบคุม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละวงจรเป็นไปดังต่อไปนี้

3.4.1 วงจรกำลัง

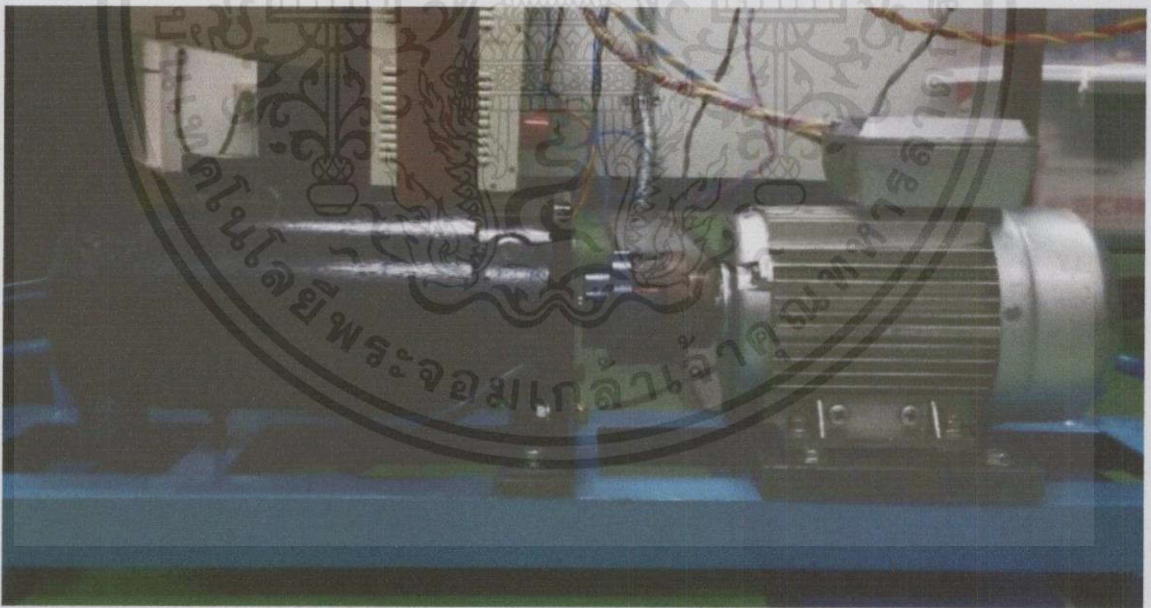
วงจรกำลังเป็นส่วนที่ทำหน้าที่หลัก คือ เป็นตัวแปลงผันแรงดันกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับให้มีขนาดแรงดัน $230 \text{ V}_{\text{rms}}$ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งแบ่งได้สามส่วนดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (ก) ศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

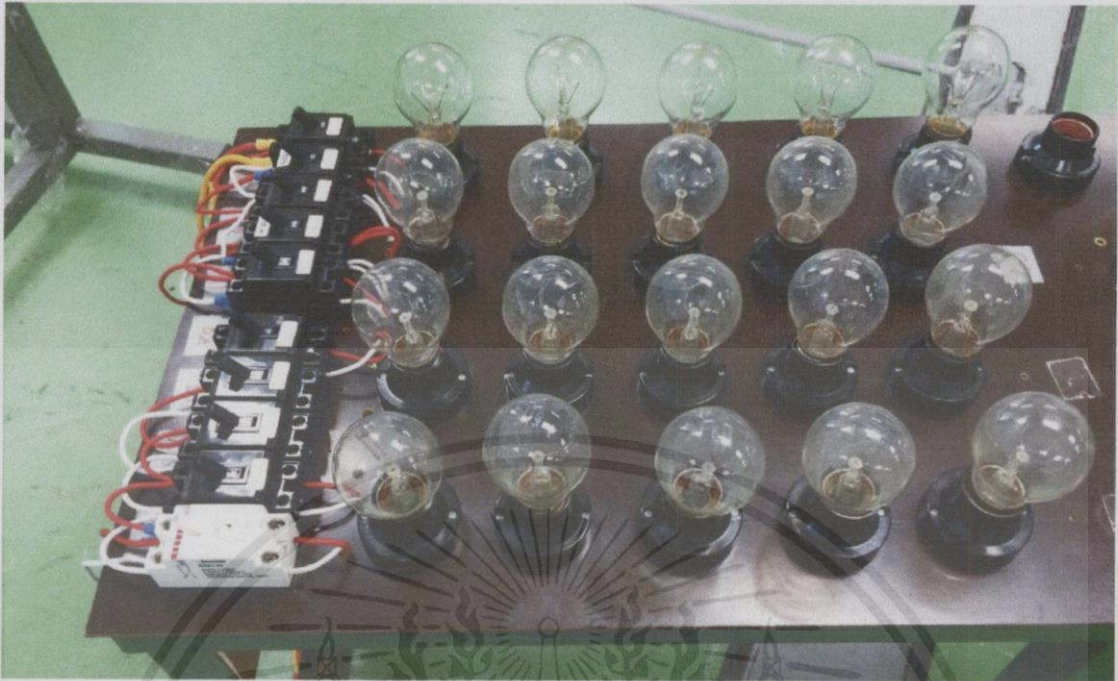


(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



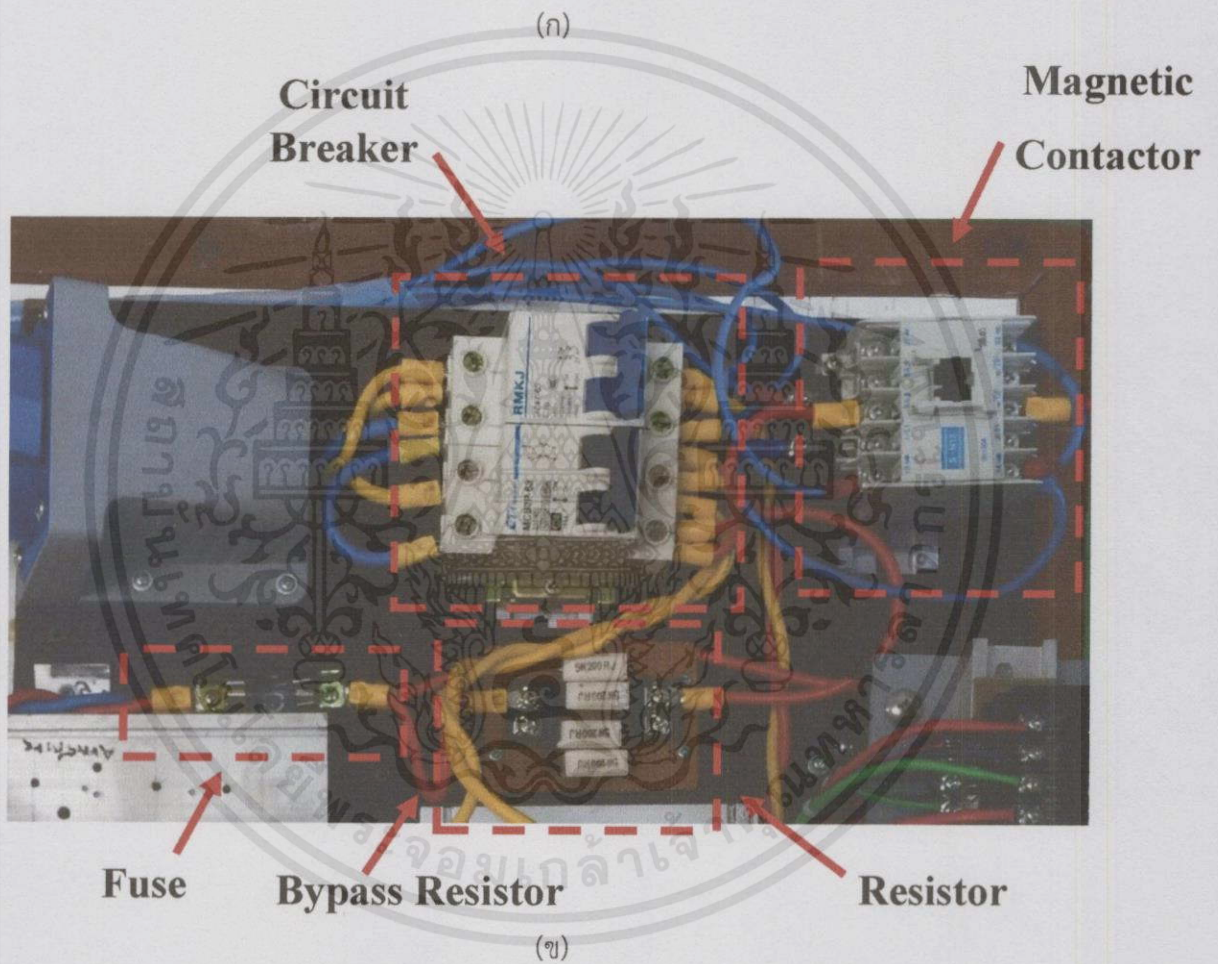
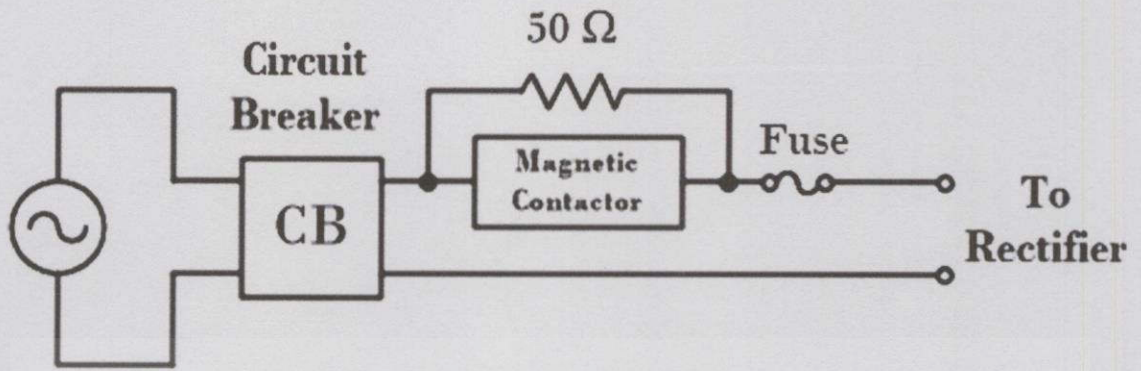
(ง)

รูปที่ 3.6 (ก) ไดอะแกรมวงจรกำลัง (ข) วงจรกำลัง (ค) มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสต่อคัปปลิงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง และ (ง) ภาระทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

3.4.1.1 อุปกรณ์ตัดต่อวงจรและอุปกรณ์ป้องกัน

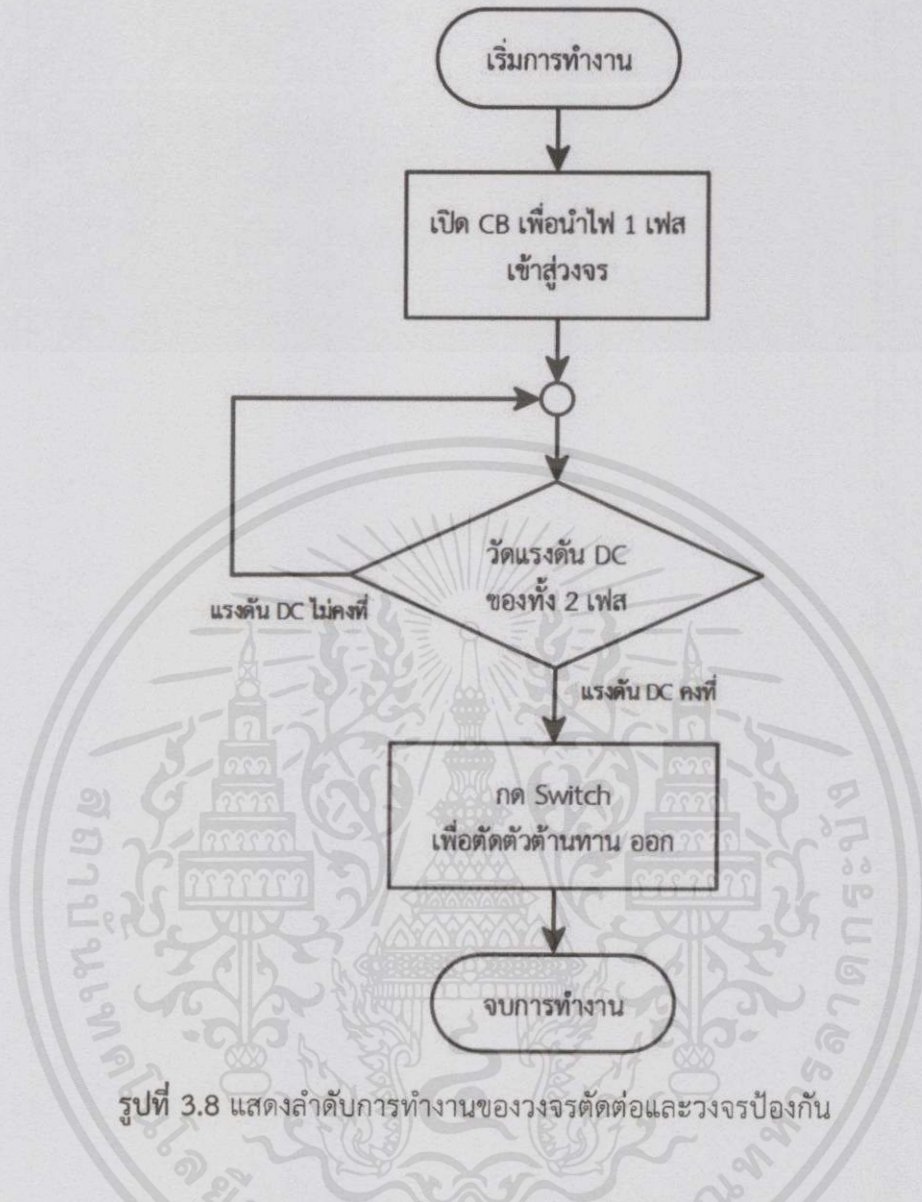
อุปกรณ์ตัดต่อวงจรและอุปกรณ์ป้องกันนั้นถูกต่อเข้าไปในวงจร ดังรูปที่ 3.7 มีไว้เพื่อทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไป ซึ่งประกอบไปด้วย เซอร์กิตเบรกเกอร์ แม็กเนติกคอนแทคเตอร์ ตัวต้านทานขนาด 50 Ω และฟิวส์ขนาด 15 A 250 V ซึ่งวิธีการเริ่มทำงานของวงจรกำลัง จะใช้เป็นการ soft start คือ ต่อตัวต้านทานขนาด 50 Ω (Bypass Resistor) อนุกรมเข้ากับวงจรก่อนในช่วงแรกเพื่อจำกัดกระแสในตอนเริ่มต้น จนกระทั่งแรงดันทางด้านกระแสตรงเริ่มคงที่ จึงทำการตัดความต้านทานออกด้วยแม็กเนติกคอนแทคเตอร์ซึ่งควบคุมด้วยสวิตช์ภายนอก สำหรับการทำงานของวงจรตัดต่อและวงจรป้องกันนี้สามารถอธิบายการทำงานได้ดังในรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 (ก) ไดอะแกรมวงจร soft start และ (ข) อุปกรณ์ป้องกัน อุปกรณ์ตัดต่อวงจรและวงจร soft start

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

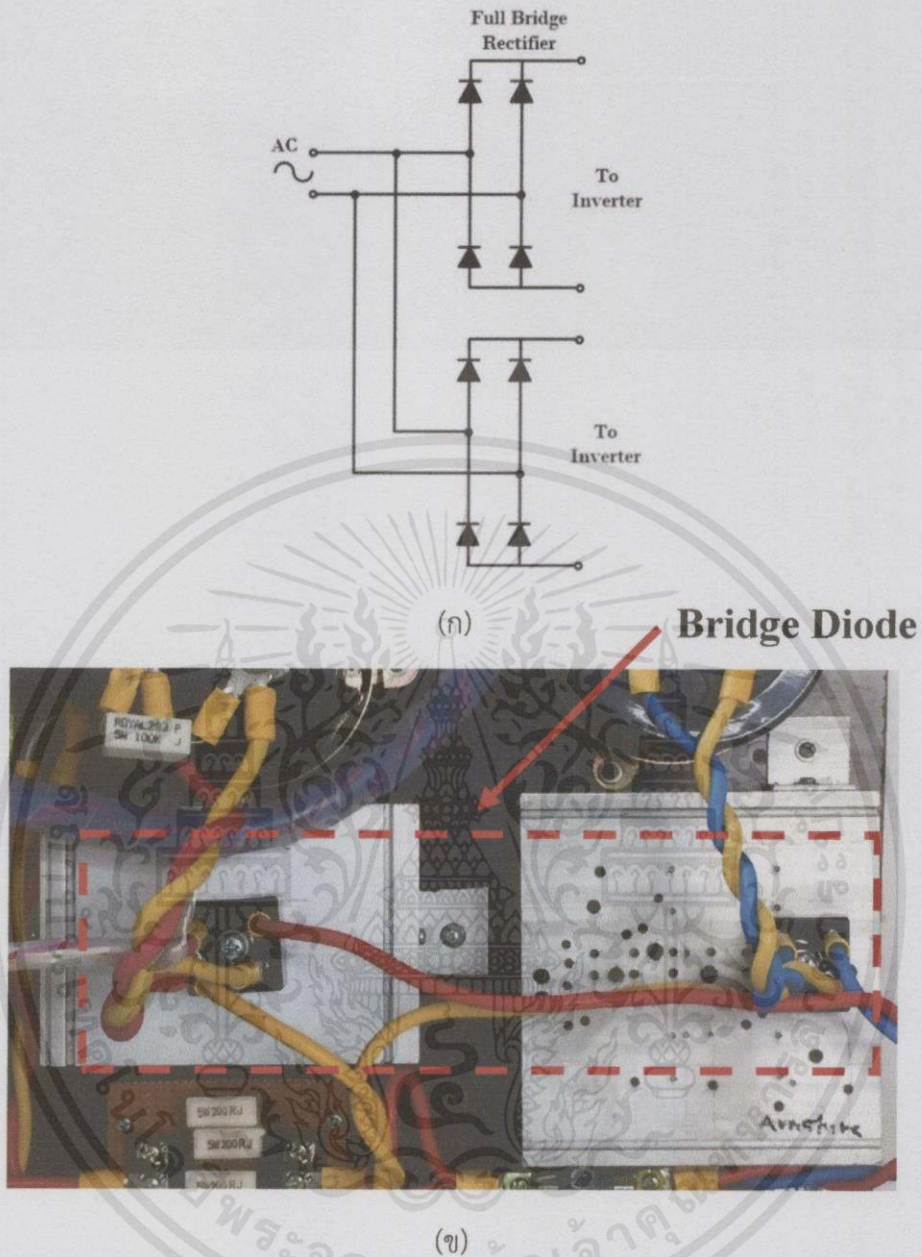


รูปที่ 3.8 แสดงลำดับการทำงานของวงจรตัดต่อและวงจรป้องกัน

3.4.1.2 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด

วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอด ใช้บริดจ์ไดโอดเบอร์ GBPC3508 มีพิกัด แรงดันที่ $560 V_{rms}$ กระแส $35 A$ รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ $230 V_{rms}$ เพื่อแปลงเป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง มีวงจรดังแสดงดังรูปที่ 3.9

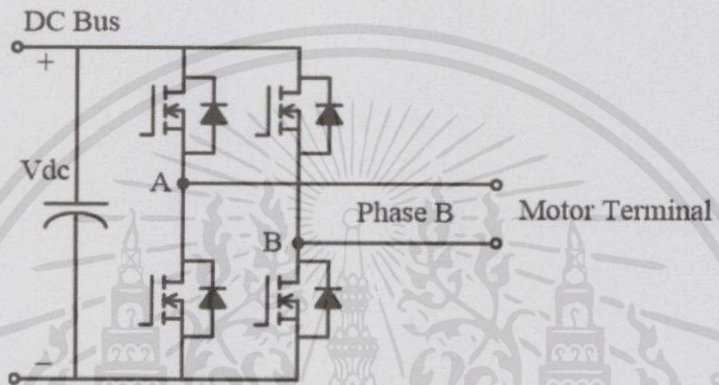
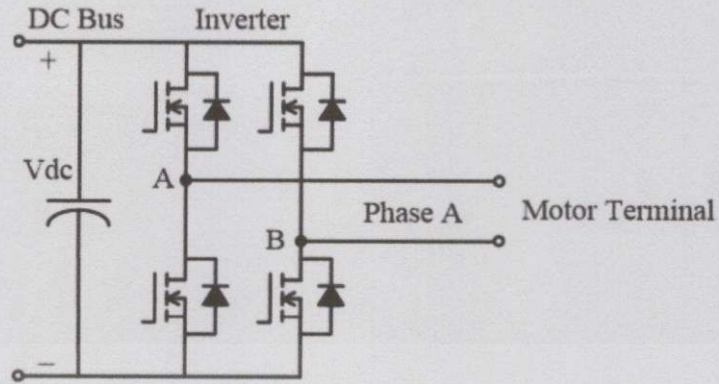
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 (ก) ไดอะแกรมวงจรเรียงกระแสหนึ่งแบบฟูลบริดจ์ และ (ข) วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์

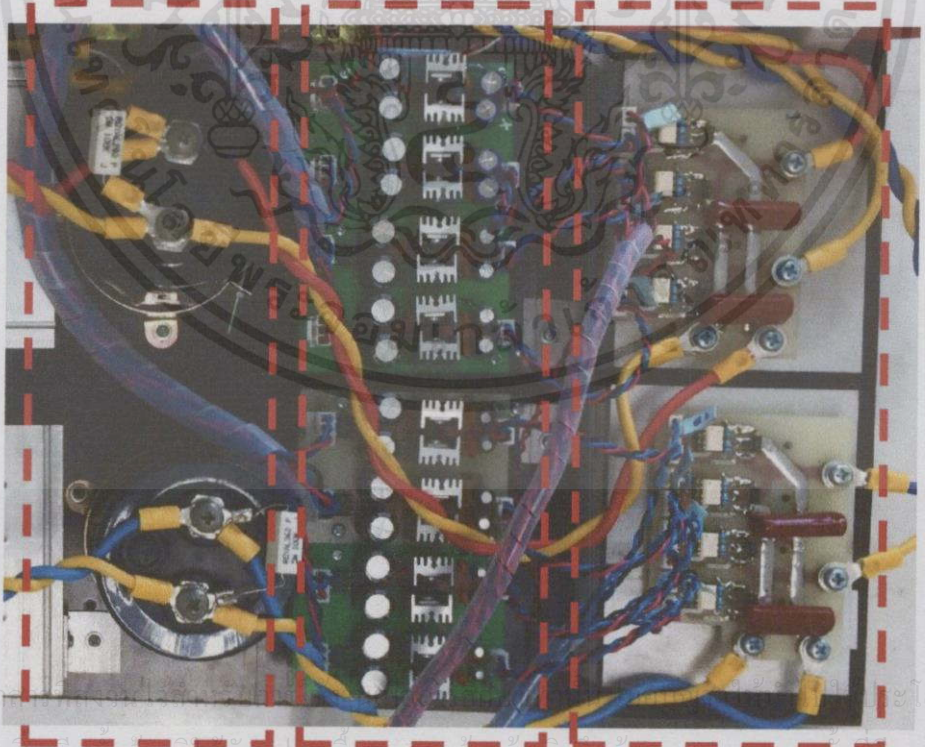
3.4.1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟส

อินเวอร์เตอร์สองเฟส จะเหมือนกับอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสองชุดดังรูปที่ 3.10 เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกกรองด้วยตัวเก็บประจุขนาด $2200 \mu\text{F}$ แล้วจึงผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันกระแสสลับ ซึ่งแต่ละเฟสประกอบด้วยมอสเฟต 4 ตัว มอสเฟตที่ใช้คือเบอร์ IRFP 450 พิกัด 500 V 14 A โดยมอสเฟตจะทำงานด้วยสัญญาณพีดีบีเอ็มจากวงจรขับเคลื่อน



(ก)

DC Bus Supply Inverter



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อที่ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 (ก) ไดอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟส และ (ข) วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟส

3.4.2 วงจรทดสอบ

3.4.2.1 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

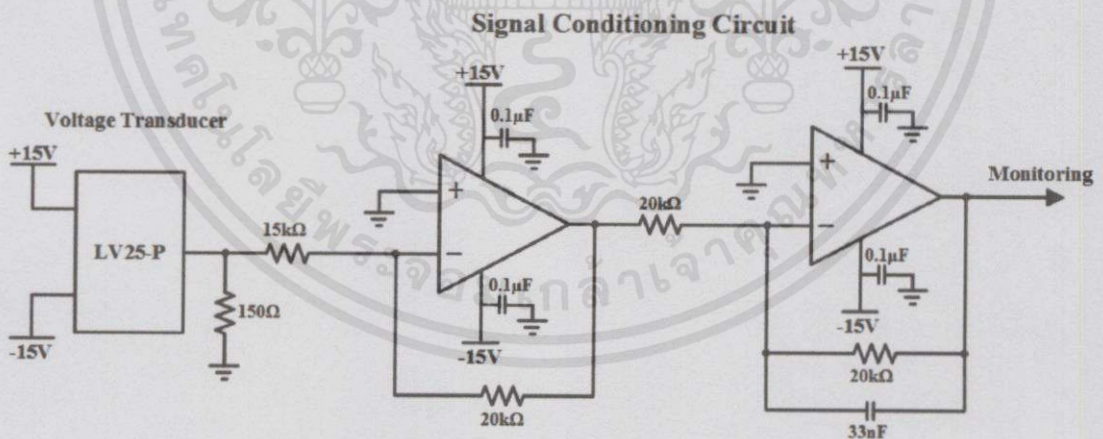
สำหรับวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์เพื่อการทดสอบดูค่าสัญญาณแรงดันโดยอาศัยอุปกรณ์ Voltage Transducer เบอร์ MV 25-P ของบริษัท Liaisons Electroniques - Mécaniques (LEM) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.11 สำหรับการวัดค่าและนำค่าแรงดันที่ได้มาผ่านวงจรปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning Circuit) เพื่อปรับสภาพของสัญญาณที่ได้ให้เหมาะสมแก่การส่งเกตค่าโดยสามารถหาค่าคงตัวเวลาดังสมการที่ 3.1

$$\tau = RC \quad (3.1)$$

โดยที่ค่า R มีค่าเท่ากับ $20 \text{ k}\Omega$ และค่า C มีค่าเท่ากับ 33 nF จึงได้ค่าคงตัวเวลา (τ) จากสมการที่ 3.1 เท่ากับ 660×10^{-6} และความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) หาได้จากสมการที่ 3.2

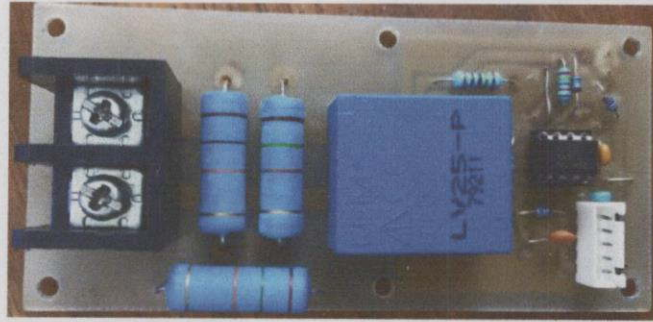
$$\text{Cutoff Frequency} = \frac{1}{\tau} \quad (3.2)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าคงตัวเวลา (τ) เท่ากับ 660×10^{-6} จะได้ค่าความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) มีค่าเท่ากับ $1.5 \times 10^3 \text{ Hz}$



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

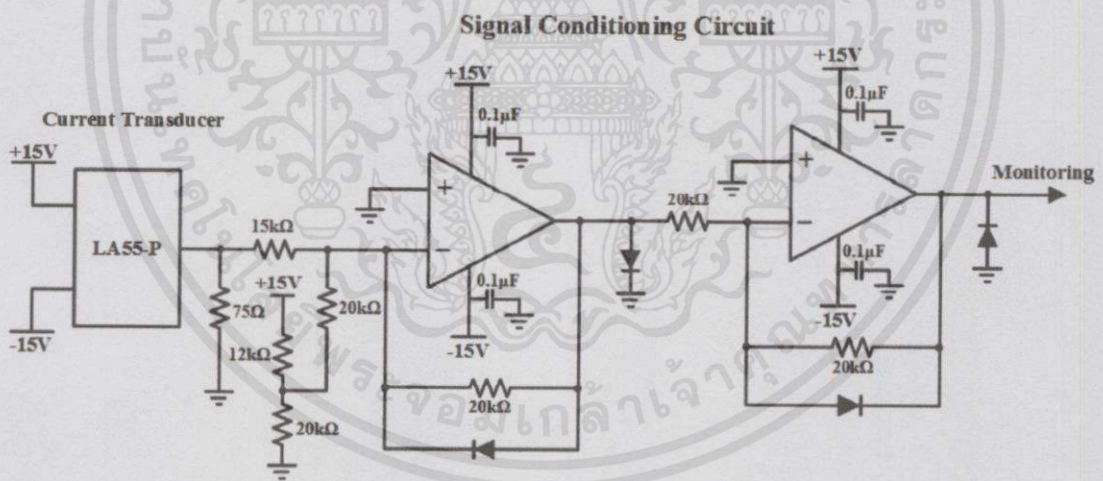


(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) ไดอะแกรมวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และ (ข) วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

3.4.2.2 วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

สำหรับวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเราใช้มอเตอร์โดยอาศัยอุปกรณ์ Current Transducer เบอร์ LA 55-P ของบริษัท Liaisons Electroniques - Mécaniques (LEM) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 ผ่านวงจรวงจรปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning Circuit) เพื่อปรับสภาพของสัญญาณที่ได้ให้เหมาะสมแก่การสังเกตค่า



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



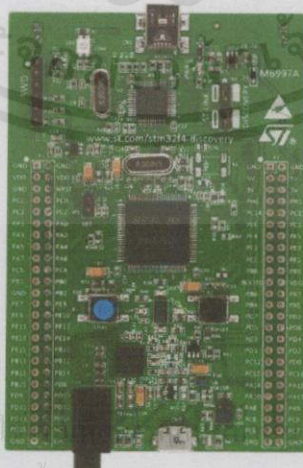
(ข)

รูปที่ 3.12 (ก) โต๊ะแกรมวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า และ (ข) วงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

3.4.3 วงจรควบคุม

3.4.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของวงจร เป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างและควบคุมสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มที่นำไปใช้ในการสั่งงานสวิตช์มอสเฟตให้มีการเปิด-ปิด ตามต้องการโดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4 ของบริษัท STMicroelectronics ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานและขาที่ใช้ครบ และเพียงพอต่อการใช้งาน



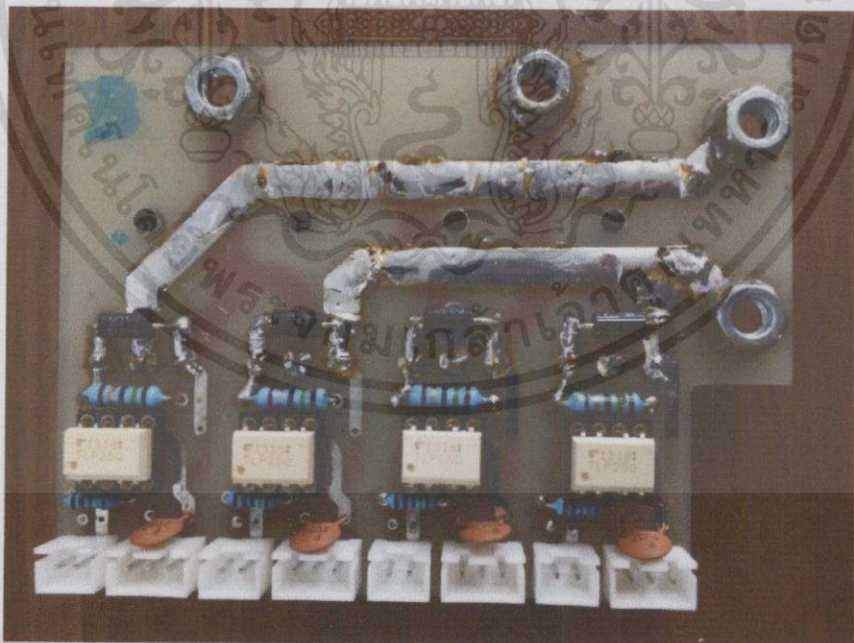
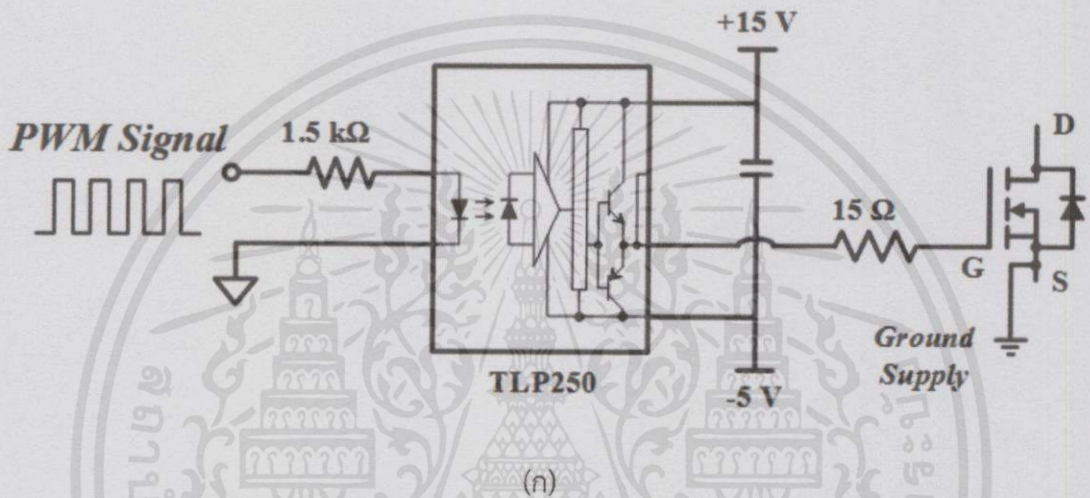
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ... ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F407

3.4.3.2 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนสำหรับมอเตอร์ในอินเวอร์เตอร์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สำหรับแยกโศดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรถบคุมและวงจรถักล้งโดยรับสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านตัวต้านทาน $1.5\text{ k}\Omega$ เพื่อจำกัดกระแสก่อนเข้าสู่ไอซีเบอร์ TLP 250 เพื่อใช้ในการขับสวิตช์มอสเฟตให้ทำงาน โดยที่ TLP 250 นี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าระแสตรง $+15\text{ V}$ และ -5 V ในการขับขาเกตของมอสเฟตดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งแรงดันไฟ -5 V จะช่วยให้มอสเฟตหยุดการนำกระแสได้ดีขึ้น

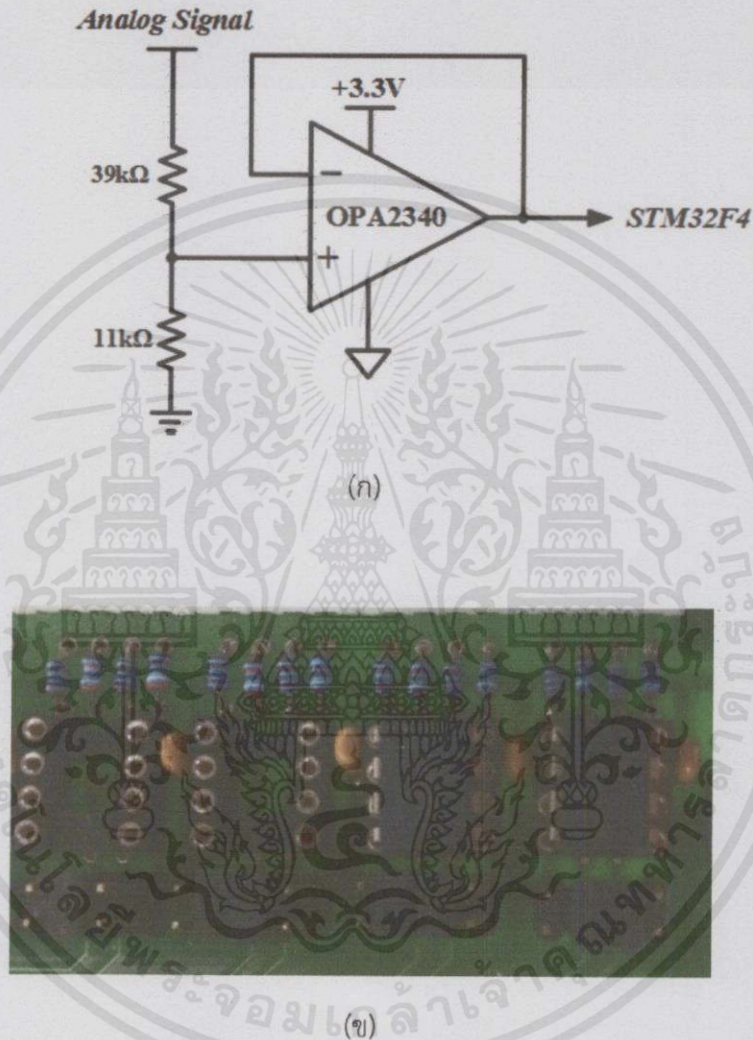


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (ข) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนลิขสิทธิ์ในเนื้อหาและรูปภาพประกอบที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 (ก) ไดอะแกรมวงจรขับเคลื่อน และ (ข) วงจรขับเคลื่อน

3.4.3.3 วงจรบัฟเฟอร์

ในการรับค่าสัญญาณแอนะล็อกภายนอกจะมีการใช้วงจรแบ่งแรงดันและวงจรบัฟเฟอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 3.15 เพื่อช่วยในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่ไม่เกิน 3 V ก่อนเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ไมโครคอนโทรลเลอร์รับได้



รูปที่ 3.15 (ก) ไดอะแกรมวงจรบัฟเฟอร์ และ (ข) วงจรบัฟเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการทดสอบและผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร ที่ป้อนด้วยแรงจ่ายไฟฟ้าสองเฟสจากอินเวอร์เตอร์สองเฟสที่ได้ทำขึ้น เพื่อแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรที่ค่าความถี่ต่าง ซึ่งมอเตอร์ต่อคัลป์ลิงอยู่กับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงนั้นต่ออยู่กับหลอดไฟซึ่งเป็นภาระแบบความต้านทาน (R)

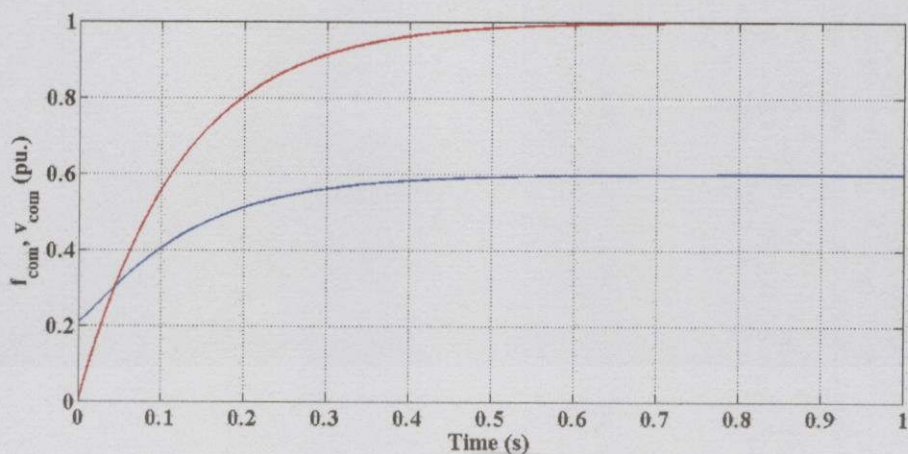
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. Digital Oscilloscope : RIGOL DS1104
2. Multimeter : FLUKE 115
3. Digital Clamp Meter : KYORITSU KT203
4. Differential Probe : PINTEK DP-25

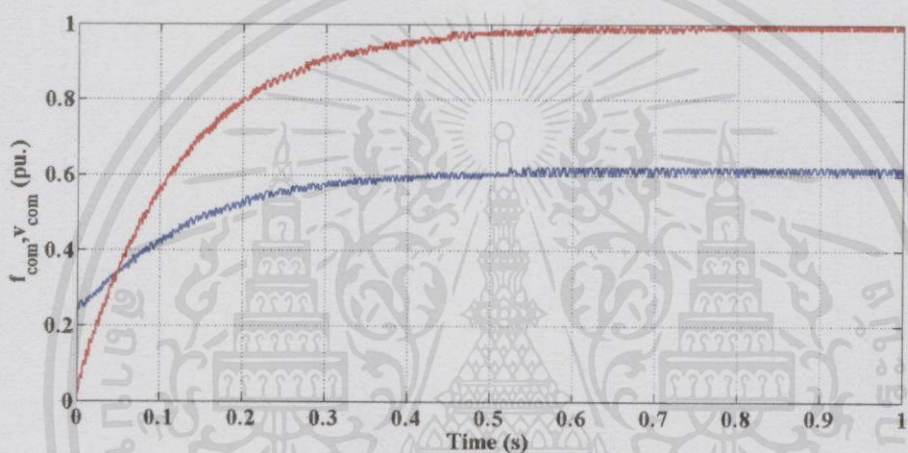
4.3 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบทำการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้าสองเฟสจากอินเวอร์เตอร์ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ต่อคัลป์ลิงกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าขึ้น แล้วพิจารณาการทำงานของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

ในการเริ่มการทำงานมอเตอร์จะถูกควบคุมให้เริ่มการทำงานโดยคำสั่งกำหนดความถี่ไว้ที่ 50 Hz และทำการเพิ่มความถี่ต่ำสุดไปยังความถี่ 50 Hz โดยป้อนข้อมูลความถี่ที่ต้องการผ่านคำสั่งวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบดีสครีต (discrete low pass filter) ดังรูปที่ 4.1



(ก)

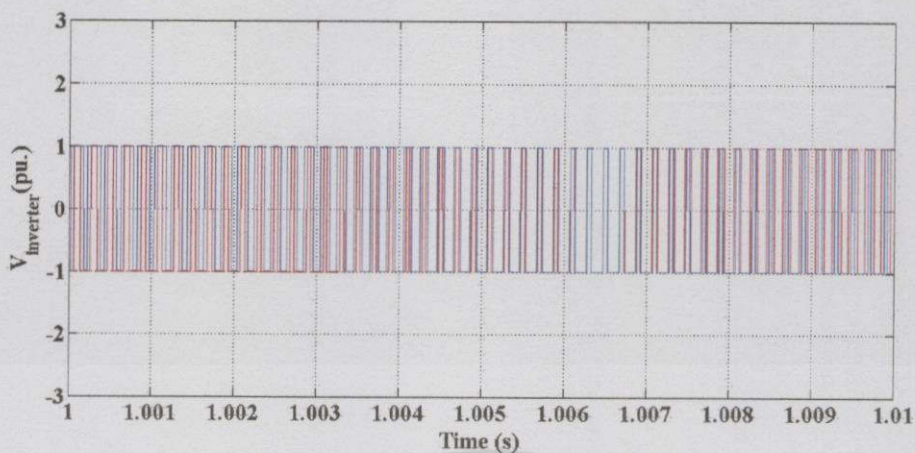


(ข)

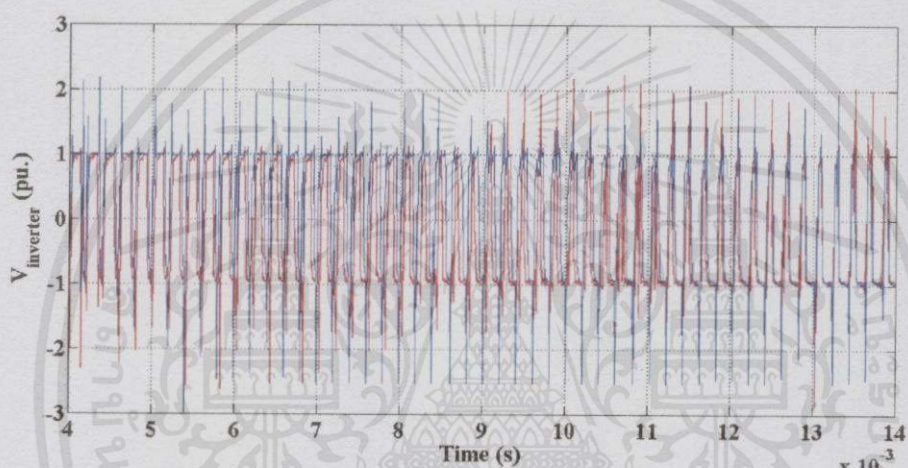
รูปที่ 4.1 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงคำสั่งการเพิ่มความถี่ต่ำสุดไปยังความถี่ 50 Hz

ผลการทดลองที่ปรากฏในบทนี้รูปคลื่นแรงดันที่ได้จะมีลักษณะเป็นพัลส์ ตามการสวิตช์ของสัญญาณ ดังรูปที่ 4.2 จึงทำการใส่วงจรกรอง เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ชอยด์ ดังรูปที่ 4.3 เพื่อความง่ายต่อการวัดมุมต่างเฟส ดังนั้น ในผลการทดลองจึงแสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรกรองความถี่ผ่านแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



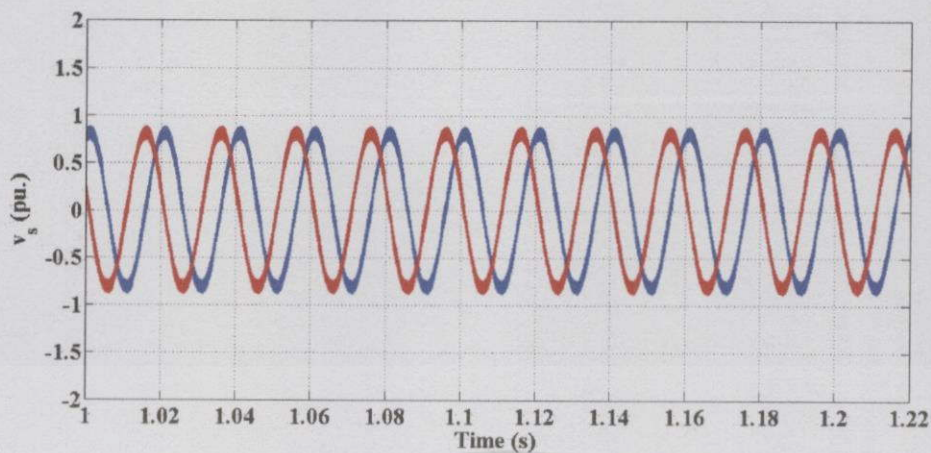
(ก)



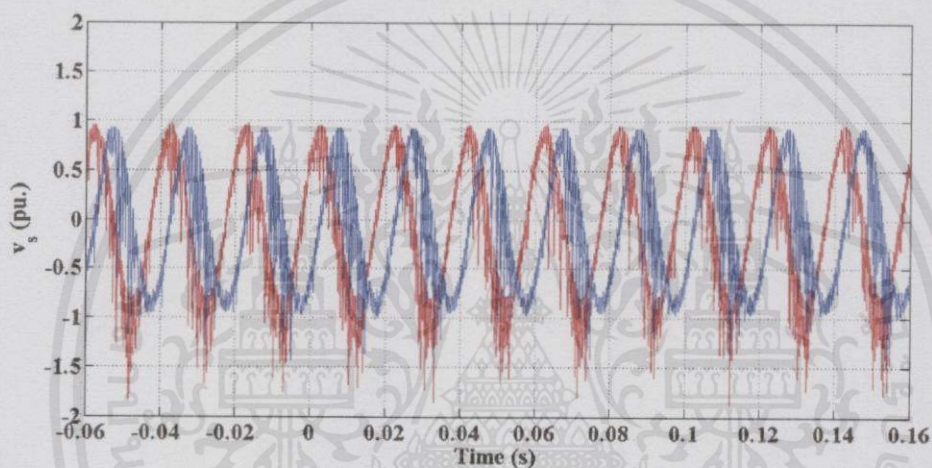
(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดันที่วัดได้โดยไม่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดันที่วัดได้โดยผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

ซึ่งการทดลอง แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

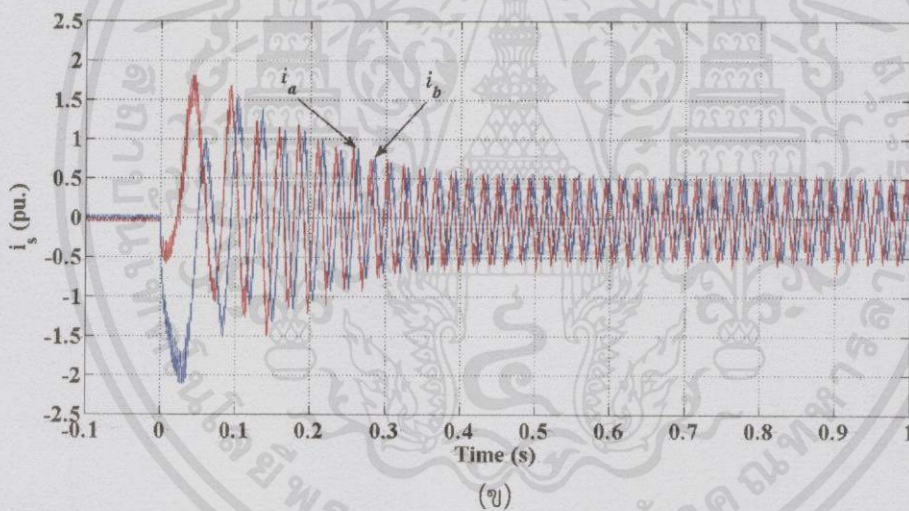
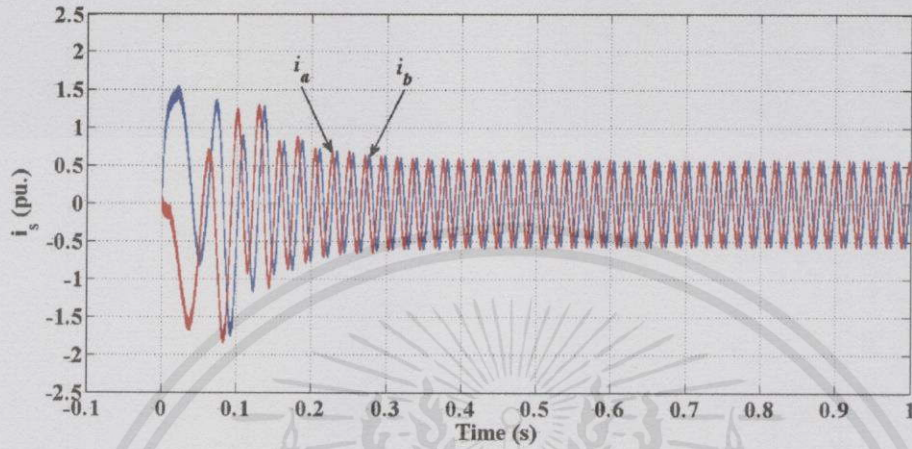
1. ขณะเริ่มการทำงานของมอเตอร์
2. เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากสภาวะไร้ภาระไฟฟ้าเป็นภาระขนาด 150 w
3. เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากภาระขนาด 150 w สู่ 300 w

ซึ่งแต่ละการทดสอบมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

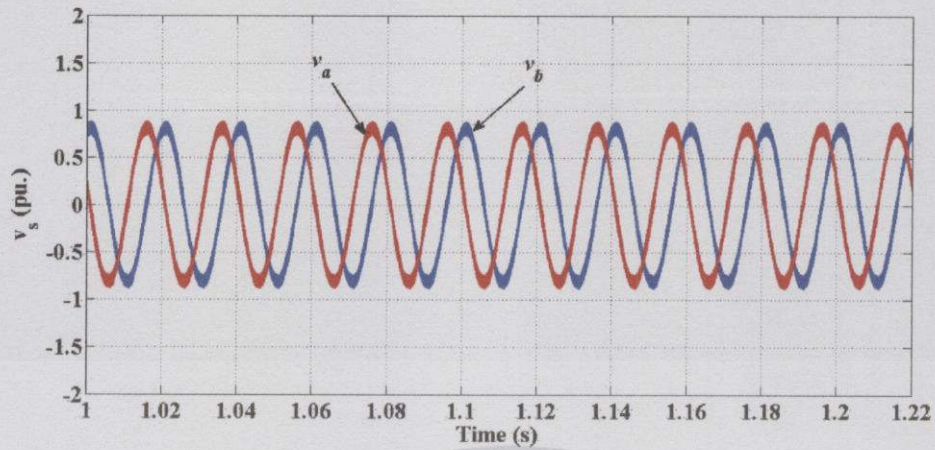
4.3.1 การเริ่มทำงานของมอเตอร์

ทดสอบการเริ่มทำงานของมอเตอร์ที่ค่าความถี่ต่างๆ โดยเริ่มจากความถี่ 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ โดยยังไม่มีภาระทางกล มีผลการทดสอบเป็นดังนี้

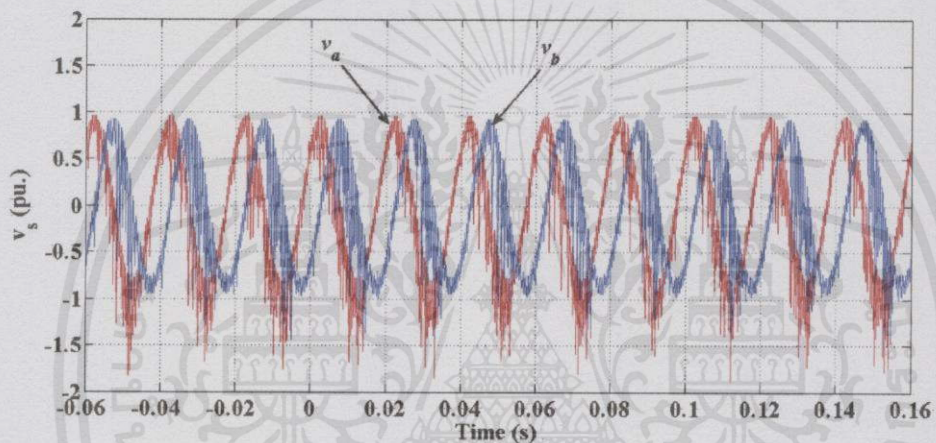


รูปที่ 4.4 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟสภายใต้สภาวะเริ่มเดินที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



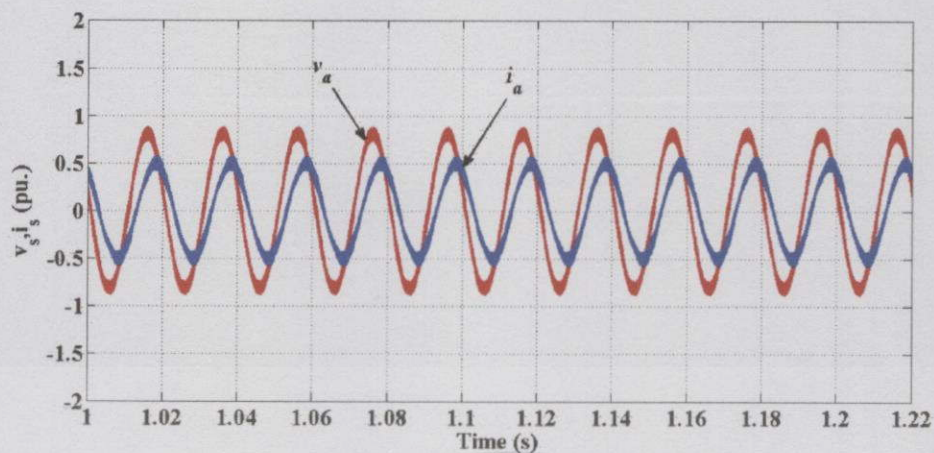
(ก)



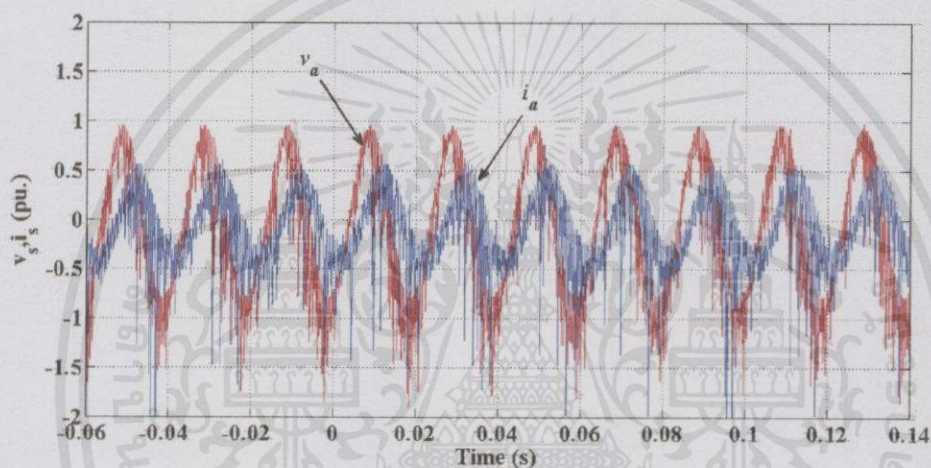
(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



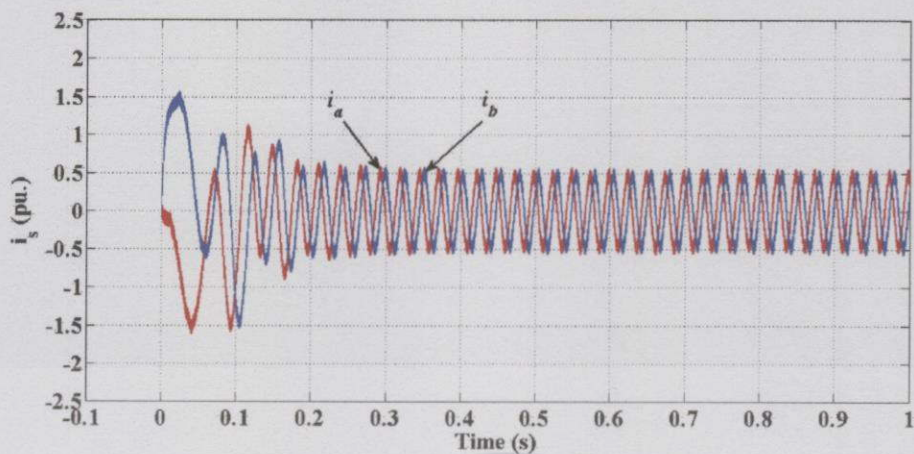
(ก)



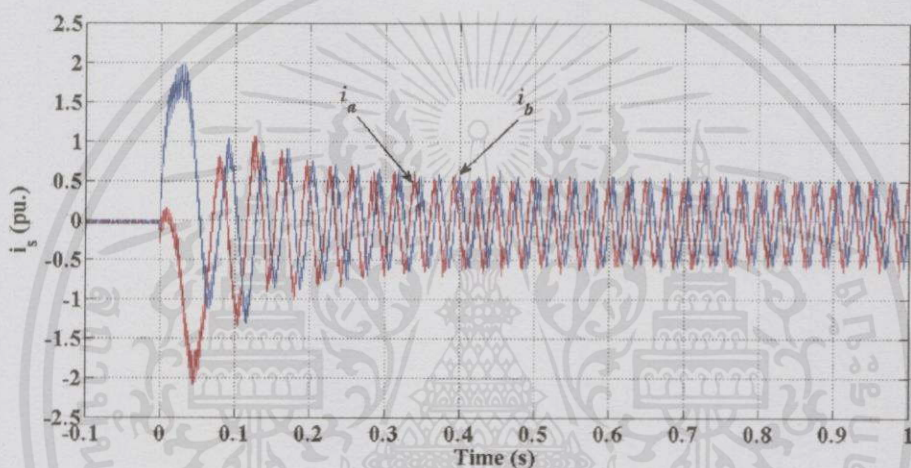
(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



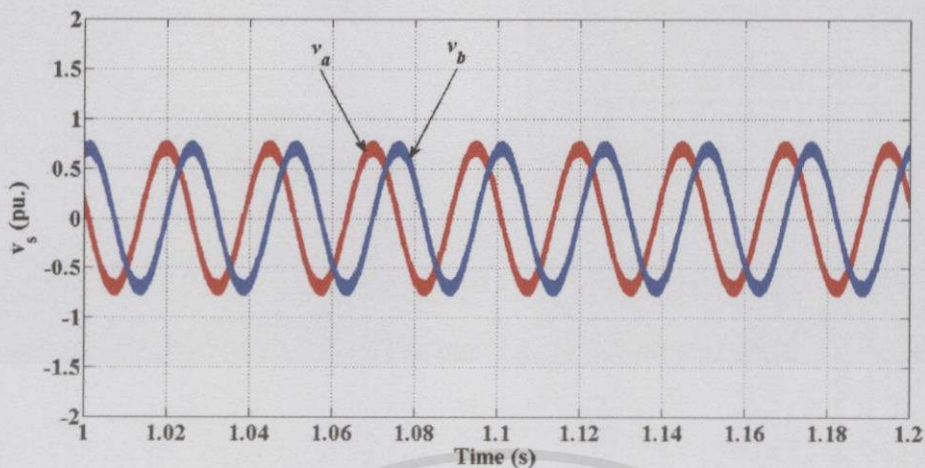
(ก)



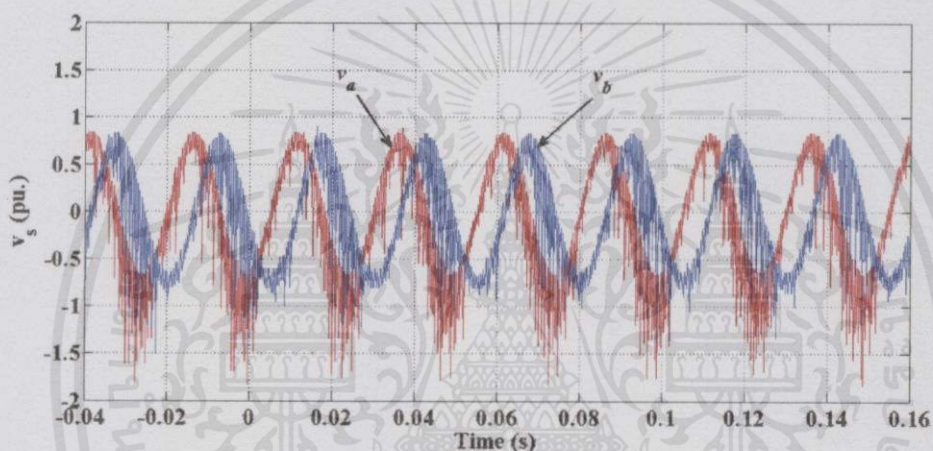
(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟสภายใต้สภาวะเริ่มต้นที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 40 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



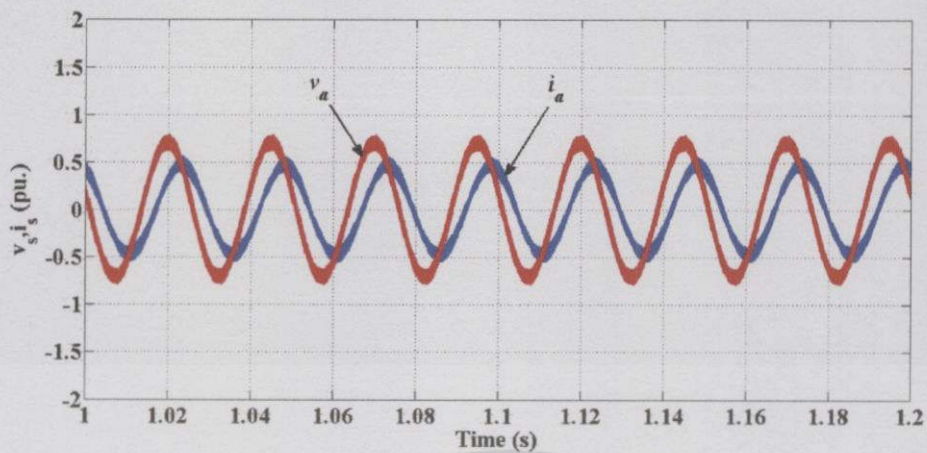
(ก)



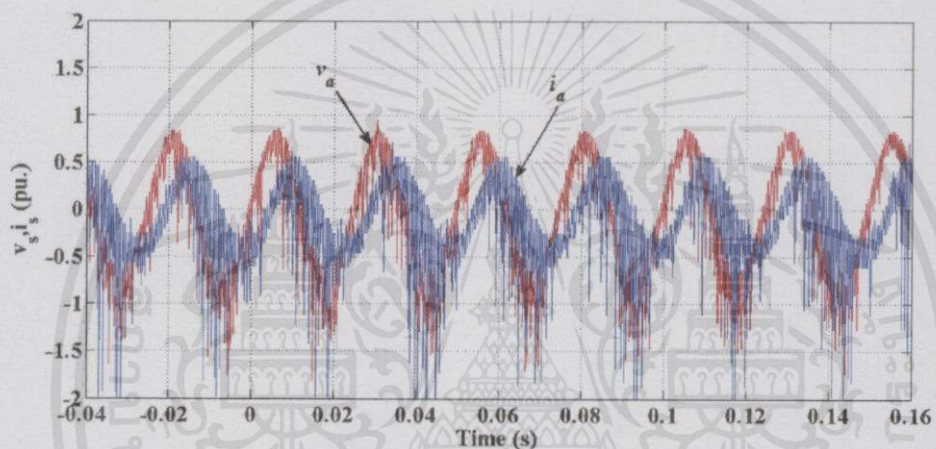
(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 40 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



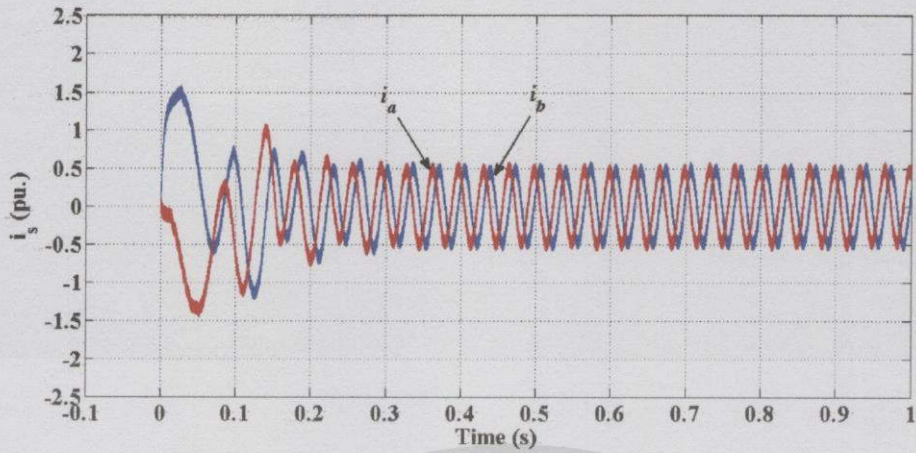
(ก)



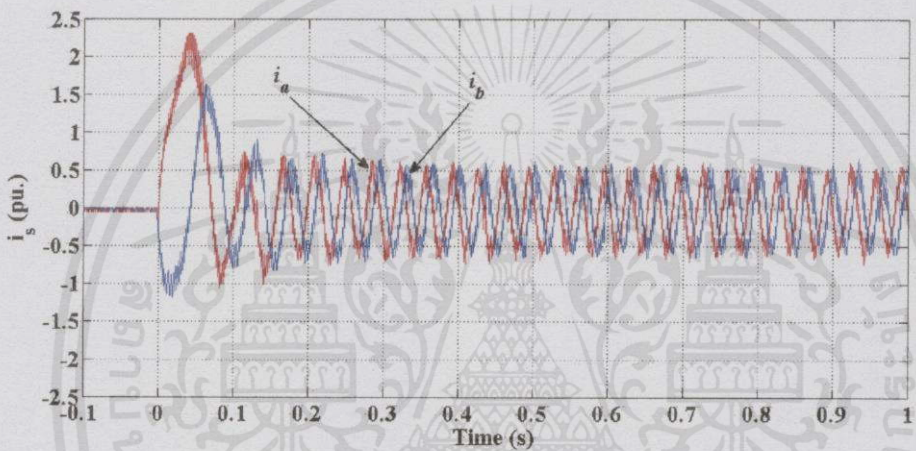
(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 40 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



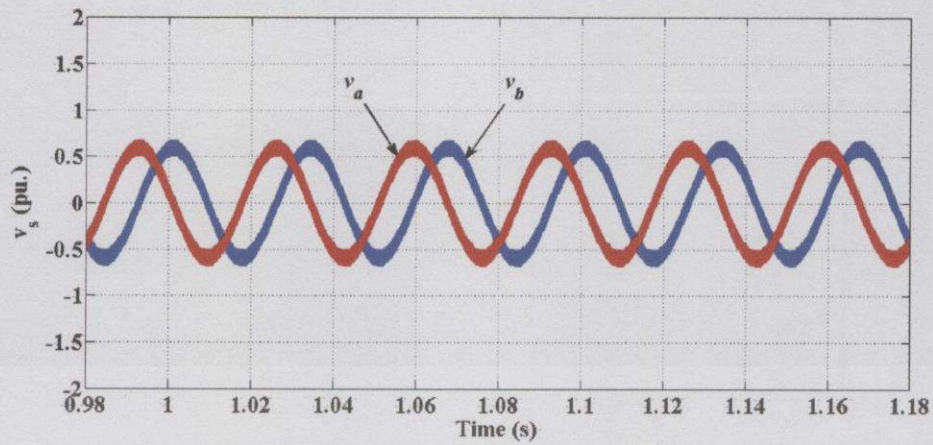
(ก)



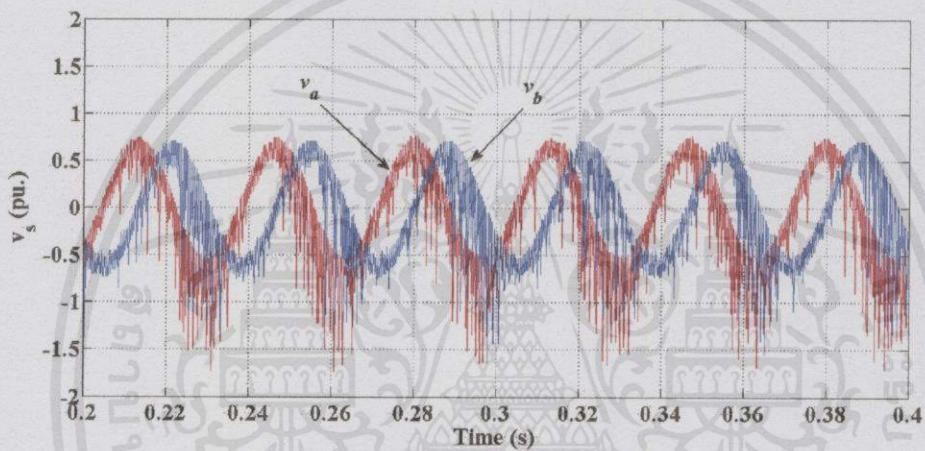
(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟสภายใต้สภาวะเริ่มต้นที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



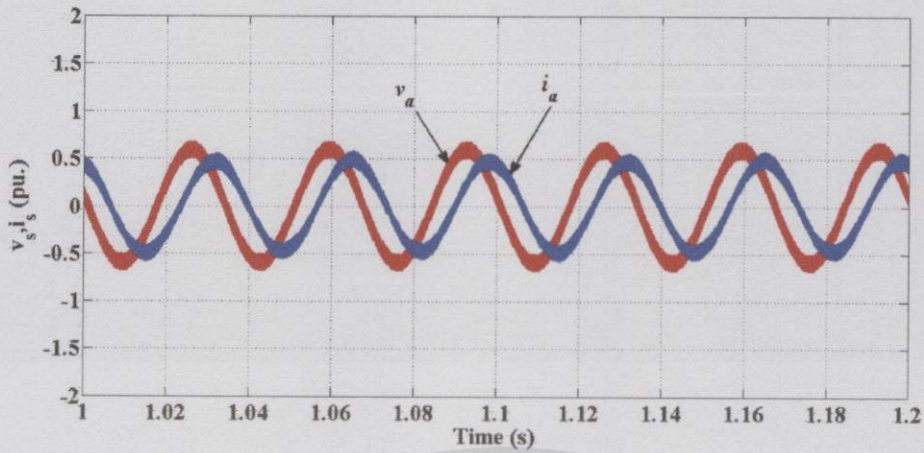
(ก)



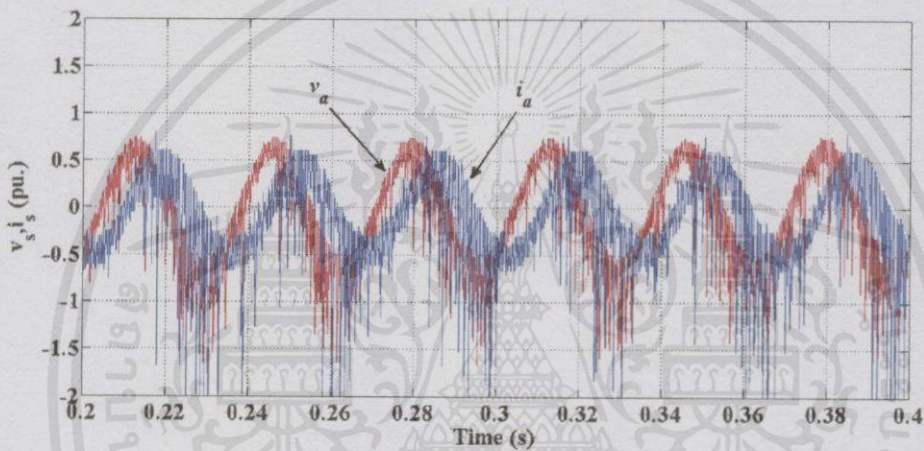
(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



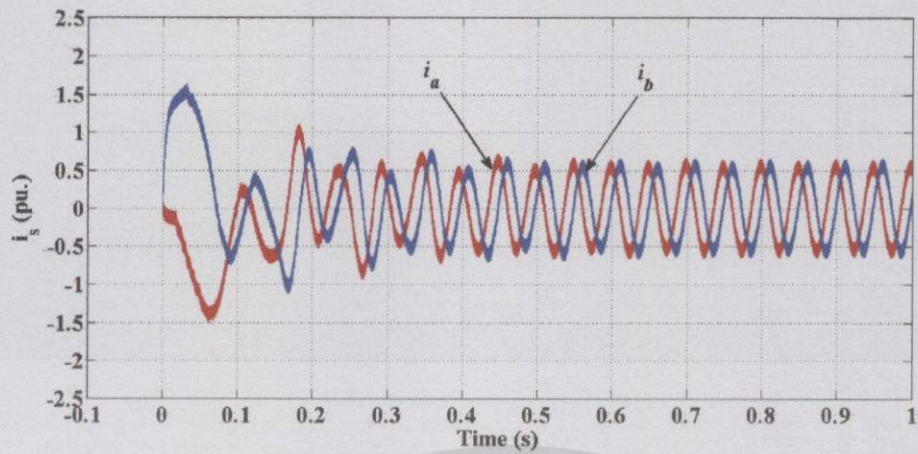
(ก)



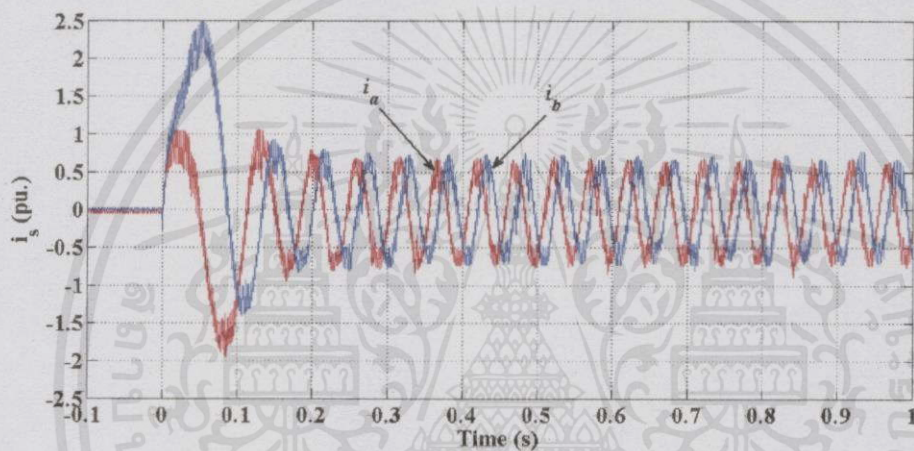
(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



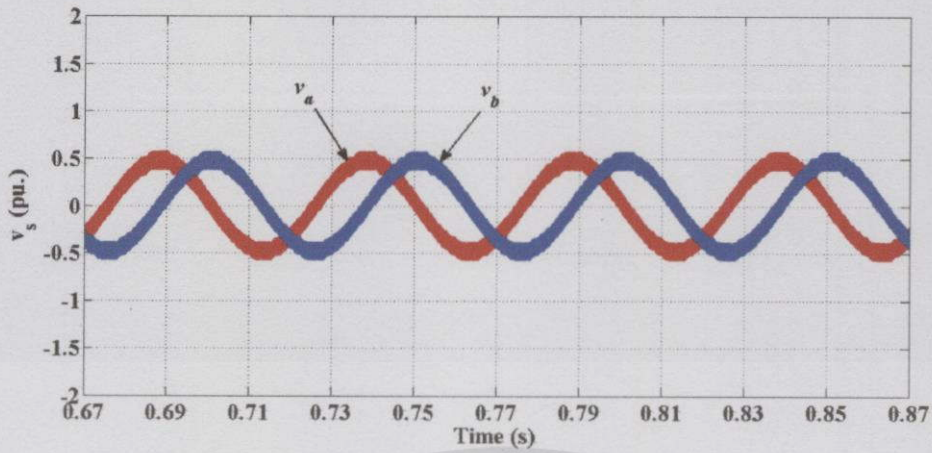
(ก)



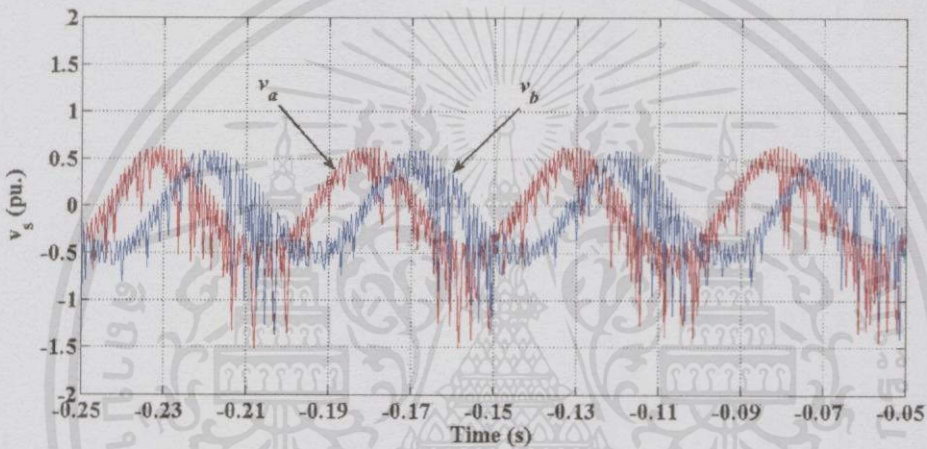
(ข)

รูปที่ 4.13 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟสภายใต้สภาวะเริ่มต้นที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



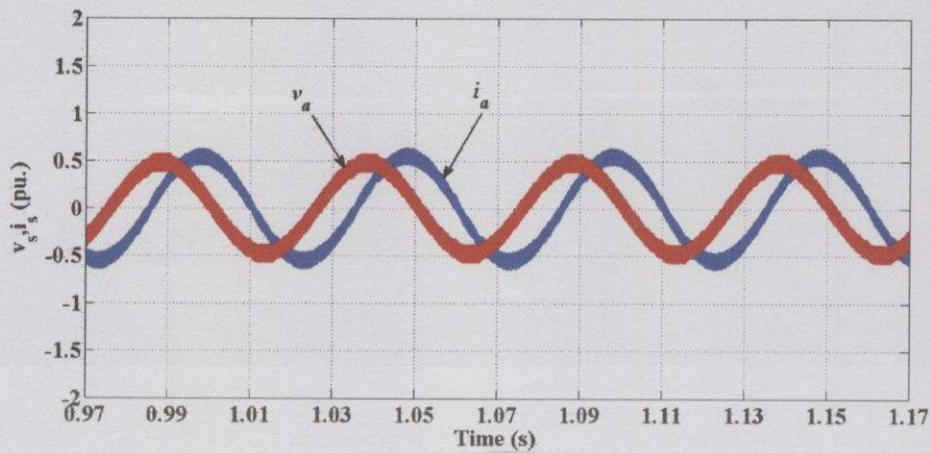
(ก)



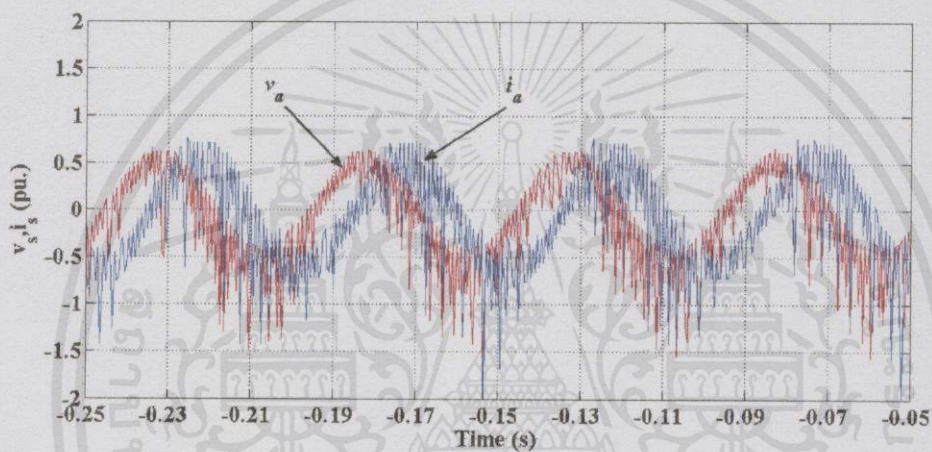
(ข)

รูปที่ 4.14 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดัน ทั้งสองเฟส ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของเฟส a ภายใต้สภาวะคงตัวที่ความถี่ 20 Hz

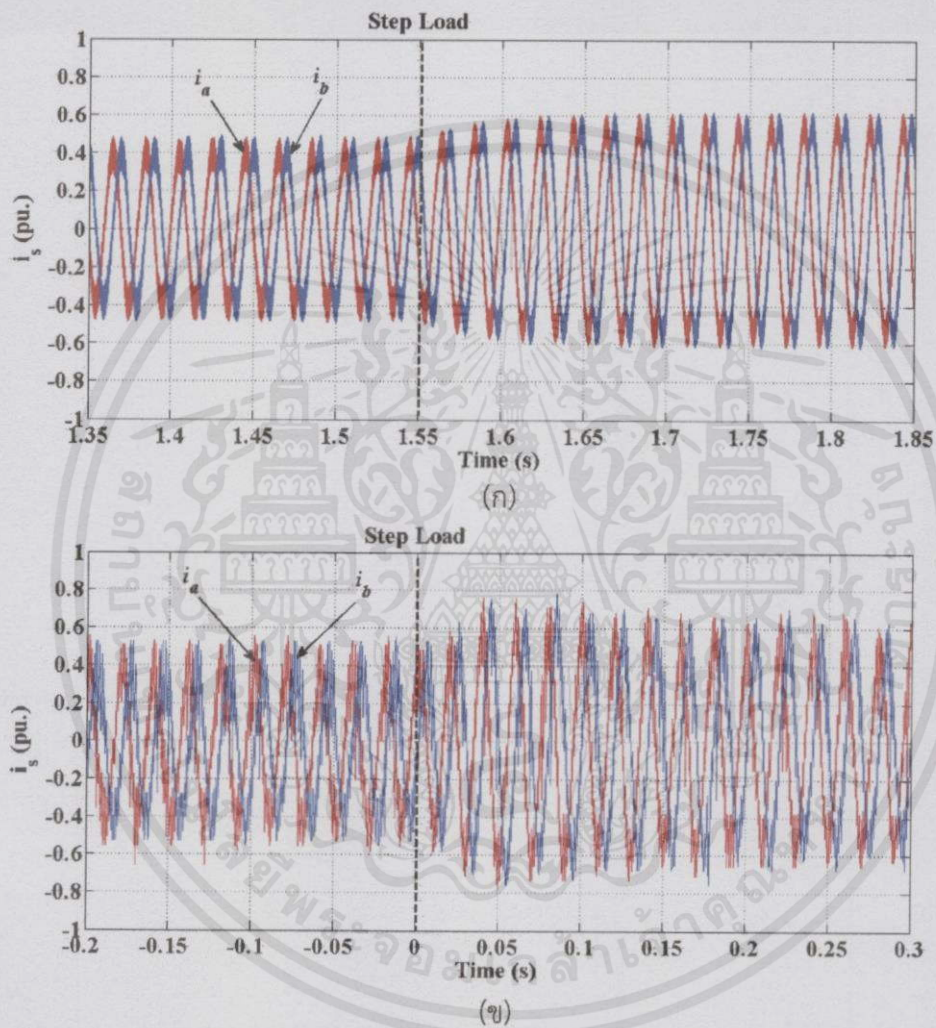
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดสอบการเพิ่มภาระแบบขั้นบันได

4.3.2.1 เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากสภาวะไร้ภาระไฟฟ้าเป็นภาระขนาด

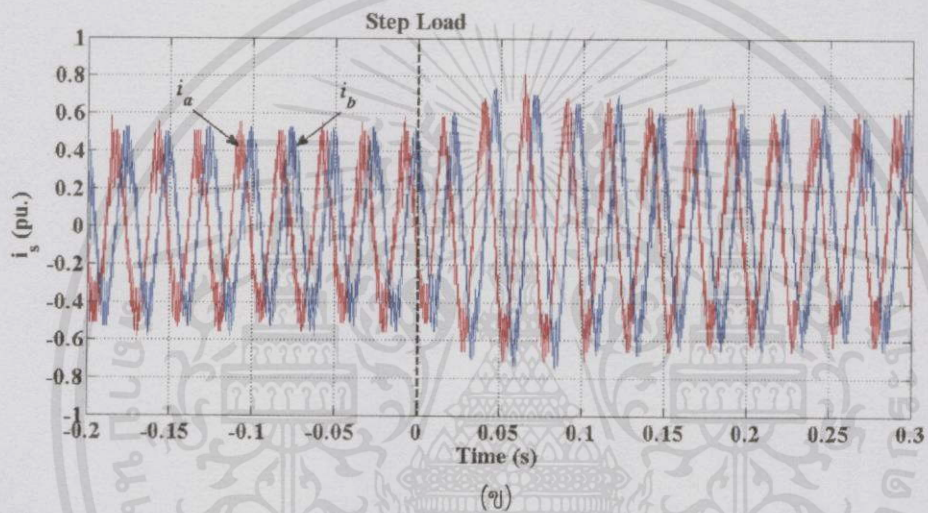
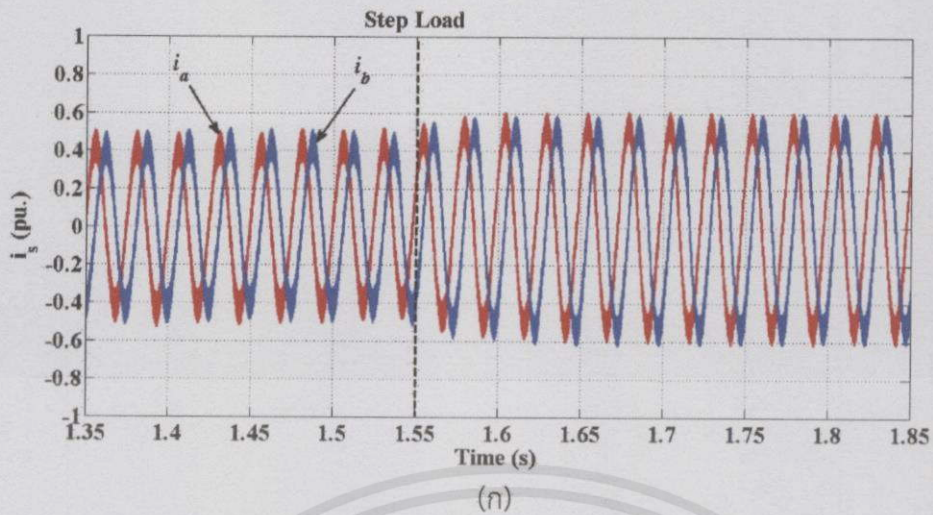
150 w

ทดสอบการเพิ่มภาระตัวต้านทานจากสภาวะไร้ภาระไฟฟ้าเป็นภาระขนาด 150 w ที่ค่าความถี่ต่างๆ โดยเริ่มจากความถี่ 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ



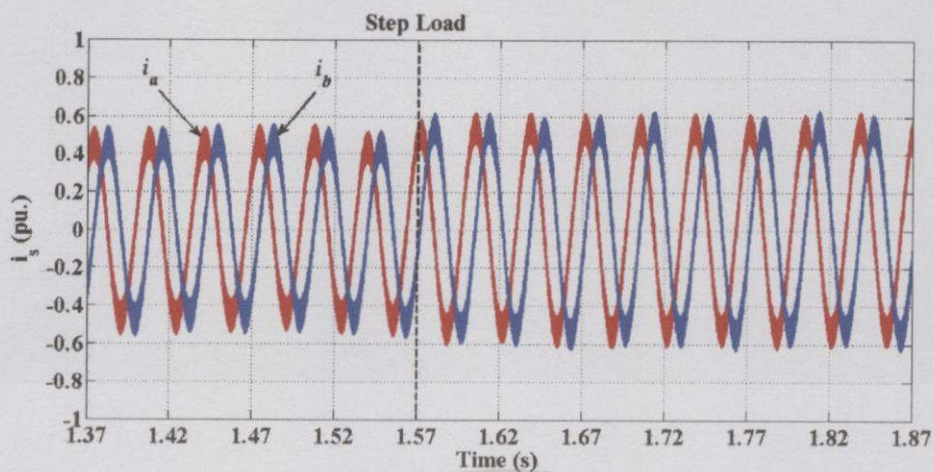
รูปที่ 4.16 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

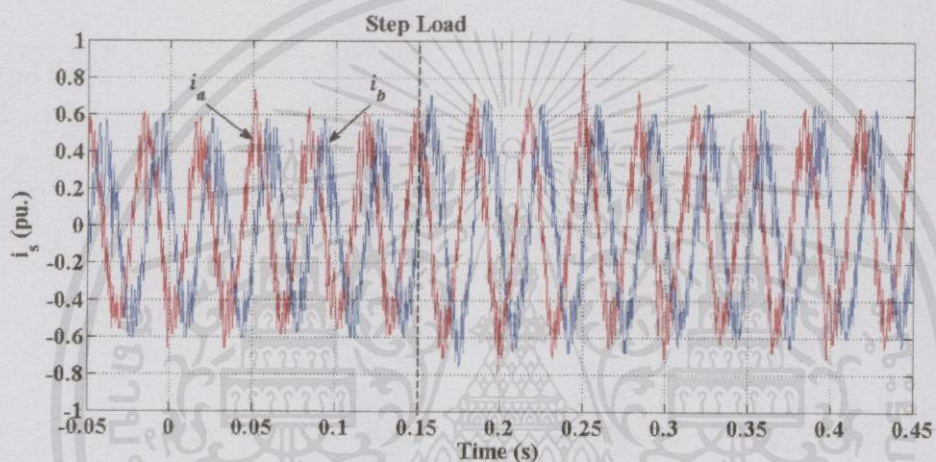


รูปที่ 4.17 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 40 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



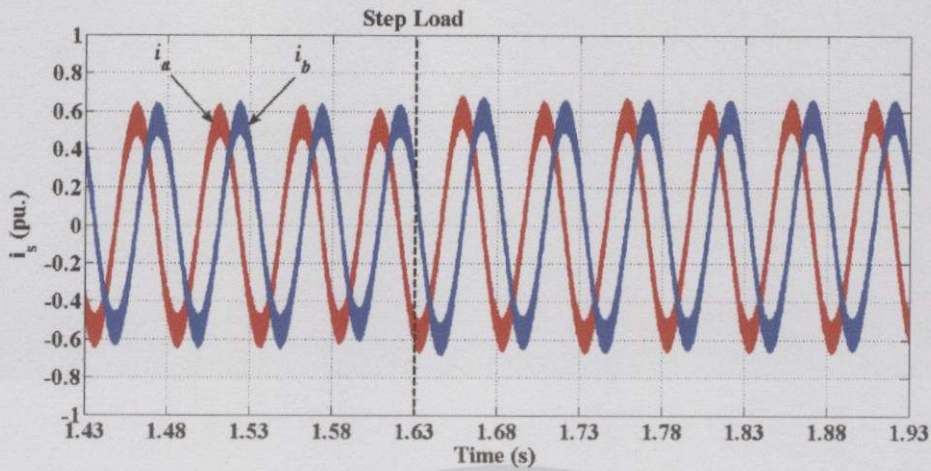
(ก)



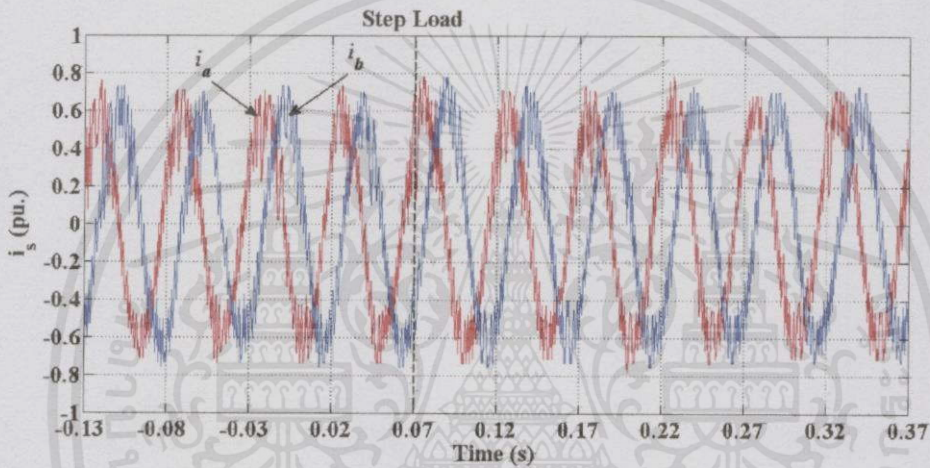
(ข)

รูปที่ 4.18 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



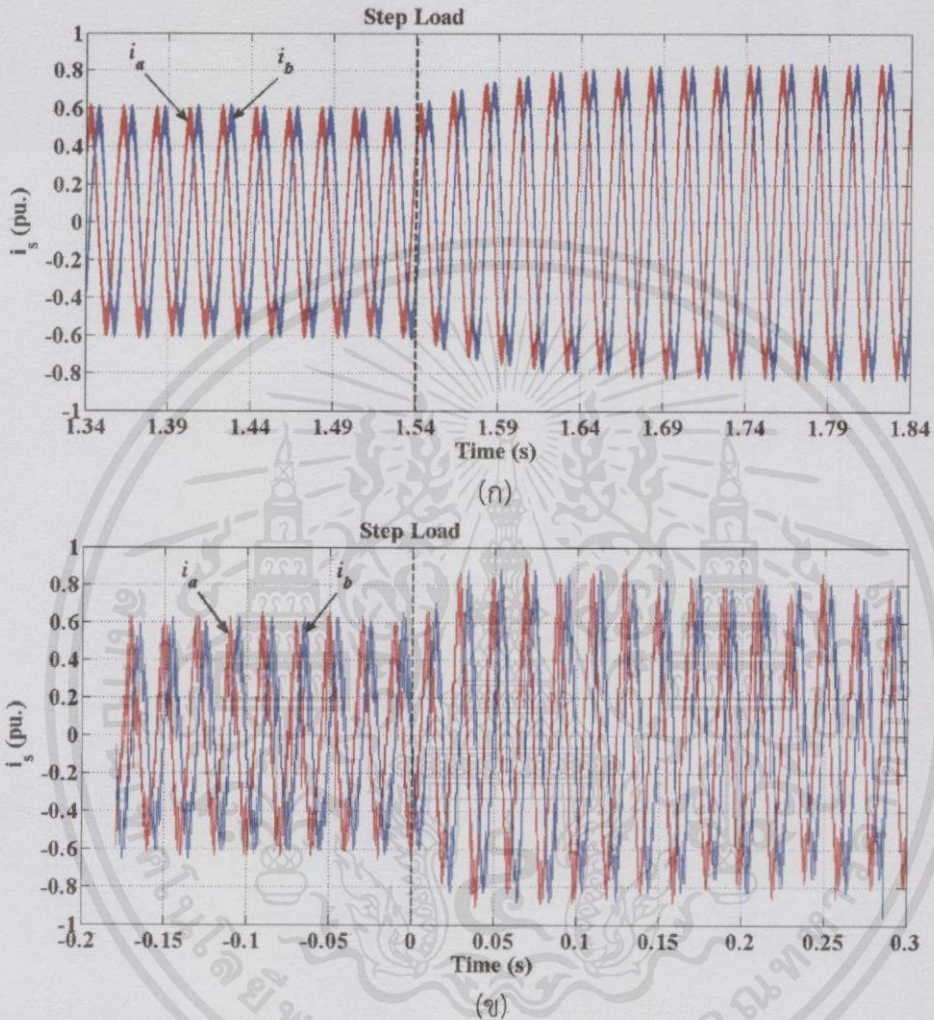
(ข)

รูปที่ 4.19 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสภาวะไร้ภาระไปสู่ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

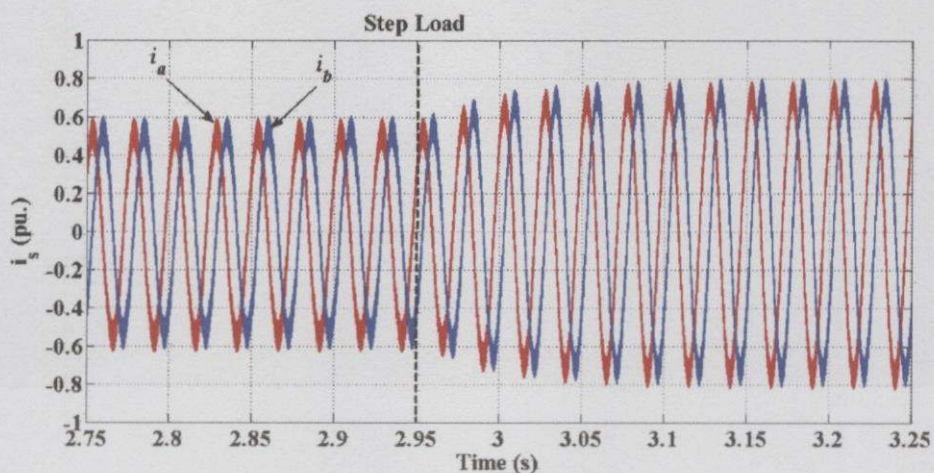
4.3.2.2 เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากภาระขนาด 150 w สู่ 300 w

ทดสอบการเพิ่มภาระตัวต้านทานจากภาระขนาด 150 w สู่ 300 w ที่ค่าความถี่ต่างๆ โดยเริ่มจากความถี่ 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ

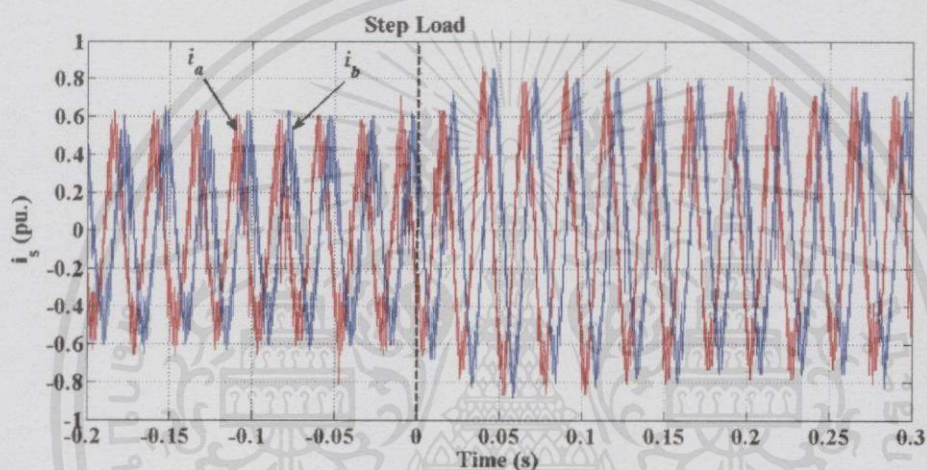


รูปที่ 4.20 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



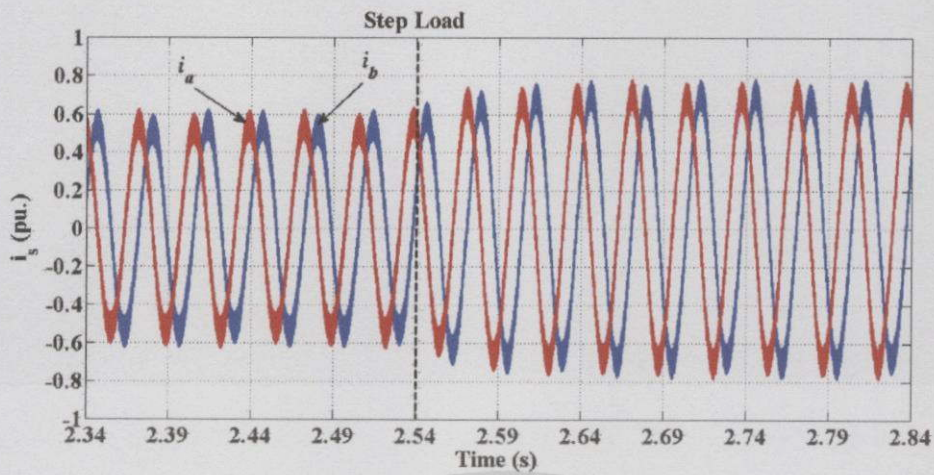
(ก)



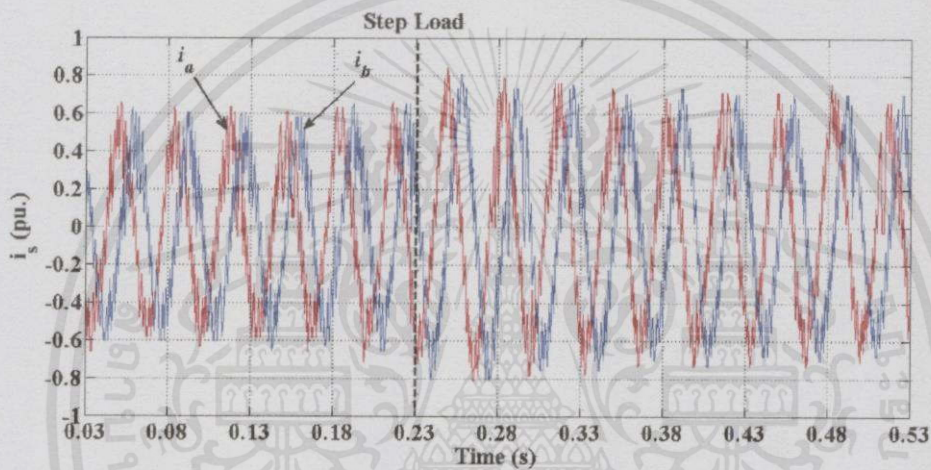
(ข)

รูปที่ 4.21 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 40 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



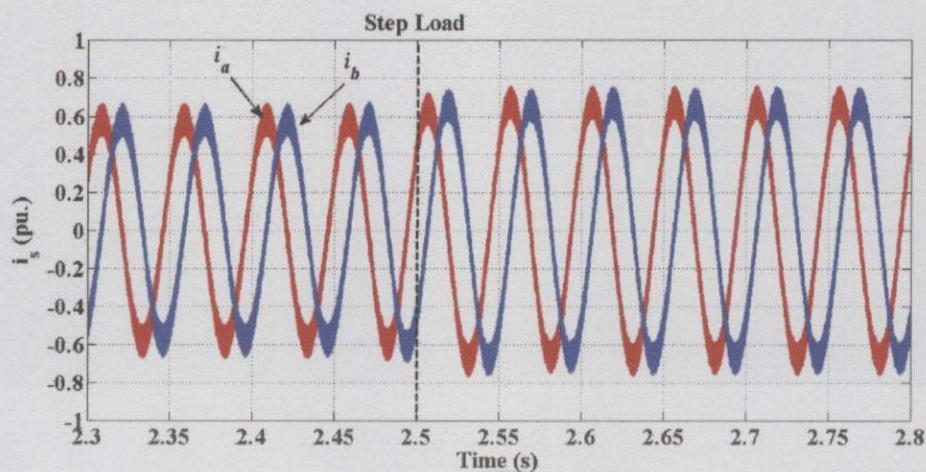
(ก)



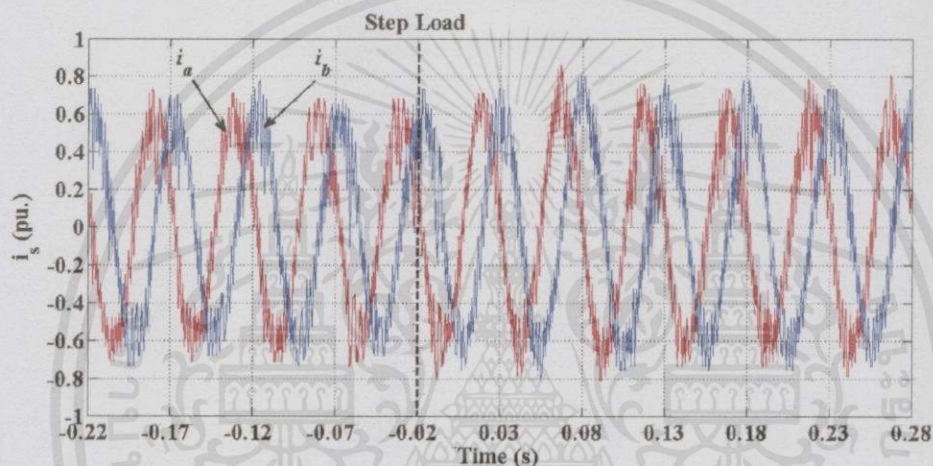
(ข)

รูปที่ 4.22 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากการเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 20 Hz

จากการทดลอง รูปคลื่นกระแสและแรงดันทั้งสองเฟสมีความสมมาตรกันและมีแอมพลิจูดเท่ากัน และจากการทดสอบการเริ่มทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้าแบบชั้บบันได ที่ความถี่ต่างๆ พบว่า เมื่อค่าความถี่ลดลง จะทำให้ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของมอเตอร์มีค่ามากขึ้น และจากการเพิ่มภาระทางไฟฟ้ามากขึ้น จะเห็นว่าค่ากระแสที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ประสิทธิภาพของระบบ

ประสิทธิภาพของระบบที่ทำการทดสอบกับภาระตัวต้านทานขนาด 300 W ที่ความถี่ต่างๆ ได้แก่ 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz และ 20 Hz ซึ่งทำการวัดกำลังไฟฟ้าขาเข้าที่ dc link และกำลังไฟฟ้าด้านขาออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่วัดได้เป็นของอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส รวมถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากไม่ได้แยกค่าความสูญเสียของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการคำนวณประสิทธิภาพดังสมการที่ 4.1 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} I_{in}} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ η คือ ค่าประสิทธิภาพของระบบ (%)
 P_{in} คือ กำลังทางด้านขาเข้า (W)
 P_{out} คือ กำลังทางด้านขาออก (W)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

f (Hz)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)	η (%)
50	311	0.60	186.60	126.00	1.12	141.12	75.63
40	311	0.45	139.95	101.60	0.97	98.55	70.42
30	311	0.30	93.30	76.80	0.82	62.98	67.50
20	311	0.20	62.20	51.20	0.72	36.86	59.27

จากตารางที่ 4.1 และสมการที่ 4.1 คำนวณประสิทธิภาพของระบบที่ความถี่ต่างๆได้ ดังนี้

ที่ความถี่ 50 Hz มีค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 75.63%

ที่ความถี่ 40 Hz มีค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 70.42%

ที่ความถี่ 30 Hz มีค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 67.50%

ที่ความถี่ 20 Hz มีค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 59.27%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร โดยการเริ่มการทำงานของมอเตอร์นั้นจะทำงานตามคำสั่งจากความถี่ต่ำไปยังค่าความถี่ที่ได้กำหนดค่าเอาไว้ โดยได้ทำการทดลองการเริ่มการทำงานของมอเตอร์ และการเปลี่ยนภาระทางกลในสภาวะต่างๆ ที่ความถี่ 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ วัดกระแสสองเฟสขณะเริ่มต้นการทำงานกับกระแสสองเฟสขณะเปลี่ยนภาระทางกลแล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์พบว่าผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกันไปทิศทางเดียวกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 แต่สิ่งที่ยังขาดและไม่ได้นำไปคิดเป็นตัวแปรในการทดลองครั้งนี้คือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องจากวงจรสมมูลที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดลองครั้งนี้คือ วงจรสมมูลที่ไม่คิดค่าความสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมาก และพารามิเตอร์ทางกลก็เช่นกันที่เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ประมาณค่าได้ยากต้องอาศัยการทดสอบเฉพาะ ซึ่งถ้าหากได้เพิ่มตัวแปรดังกล่าวเข้าไปก็必将ทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องและแม่นยำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่ความถี่ต่างๆ พบว่าเมื่อความถี่ลดลงประสิทธิภาพของระบบจะต่ำลงด้วย

5.2 สรุป

จากการศึกษาระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร พบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรนี้สามารถขับเคลื่อนได้ด้วยแหล่งจ่ายสองเฟสที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา จึงได้ทำการออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสที่มีการสวิตช์แบบไขว้ชอยดอลที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม เพื่อนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ใช้การควบคุมการทำงานแบบสเกลาร์คอนโทรลโดยการคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ซึ่งจากผลการทดลองสามารถทำการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ที่ค่าความถี่ต่างๆจนถึงพิกัด 50 เฮิร์ตซ์

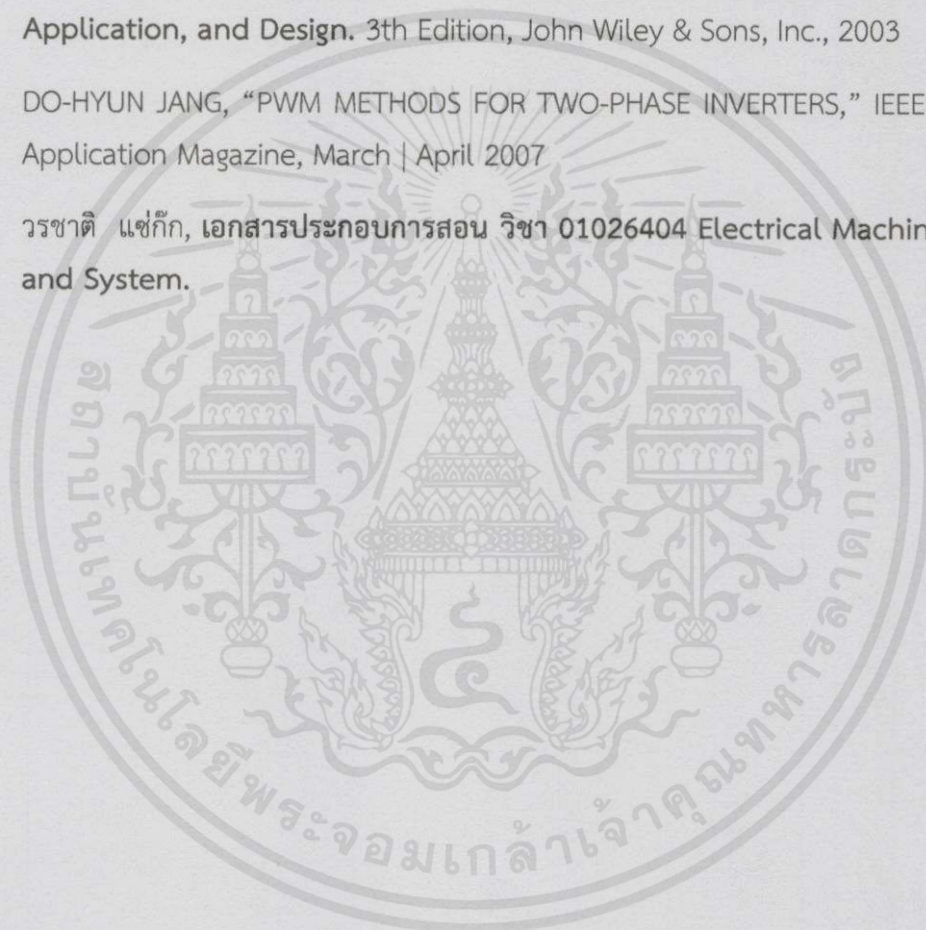
5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การทำงานที่ความถี่ต่ำๆ กระแสสเตเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นจนเกินค่าพิกัดกระแสของมอเตอร์ ดังนั้นจึงควรพัฒนาระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่ต่ำๆได้

2. ในการทำการทดลอง ยังมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นที่ส่งผลทำให้รูปคลื่นกระแสและรูปคลื่นแรงดันผิดเพี้ยนอาจจะแก้ไขได้ด้วยการตีเกลียวสายไฟเพื่อลดสัญญาณรบกวน หรือใช้สายชีลด์ในสายสัญญาณเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Paul C. Krause, and Oleg Wasynczuk, **Electromechanical Motion Devices**. McGraw-Hill Book Company, 1989
- [2] Bimal K. Bose, **Modern Power Electronics and AC Drives**. Prentice Hall PTR, 2001
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, **Power Electronic Converters, Application, and Design**. 3th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [4] DO-HYUN JANG, "PWM METHODS FOR TWO-PHASE INVERTERS," IEEE Industry Application Magazine, March | April 2007
- [5] วรชาติ แซ่ก๊ก, **เอกสารประกอบการสอน วิชา 01026404 Electrical Machine Drives and System**.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่

จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5 การคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยการคงค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำแมกนีไตต์ซึ่งต่อความถี่ดังในรูปที่ 2.15 ซึ่งถ้ารักษาระแสแมกนีไตต์ซึ่งให้คงที่ ฟลักซ์ที่สร้างสนามแม่เหล็กก็จะคงที่ได้ ในภาคผนวกส่วนนี้จะแสดงขั้นตอนในการหาสมการการคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่โดยเริ่มจากสมการกระแสที่สเตเตอร์ (\tilde{I}_s) นำมาจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\tilde{I}_s = \tilde{I}_m + I_r' \quad (ก.1)$$

$$= \frac{\tilde{V}_m}{jX_m} + \frac{\tilde{V}_m}{\left(\frac{R_r'}{s} + jX_{rl}'\right)} \quad (ก.2)$$

$$= \tilde{V}_m \left[\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\left(\frac{R_r'}{s} + jX_{rl}'\right)} \right] \quad (ก.3)$$

และจากแรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์ (\tilde{V}_s)

$$\tilde{V}_s = \tilde{V}_m + \tilde{I}_s (R_s + jX_{sl}') \quad (ก.4)$$

แทนค่ากระแสที่สเตเตอร์ (\tilde{I}_s) จากสมการที่ (ก.3) ลงในสมการที่ (ก.4) จะได้

$$\tilde{V}_s = \tilde{V}_m + \tilde{V}_m \left[\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\left(\frac{R_r'}{s} + jX_{rl}'\right)} \right] (R_s + jX_{sl}') \quad (ก.5)$$

จากเงื่อนไขการส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) ที่ว่า $\frac{R_r'}{s} = X_{rl}'$ แทนลงในสมการที่ (ก.5) จะได้

$$\tilde{V}_s = \tilde{V}_m \left[1 + (R_s + jX_{sl}') \left\{ \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{X_{rl}'(1+j)} \right\} \right] \quad (ก.6)$$

$$= \tilde{V}_m \left[1 + (R_s + jX_{sl}') \left\{ \frac{-j}{X_m} + \frac{1-j}{2X_{rl}'} \right\} \right] \quad (ก.7)$$

และเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำแมกนีไตต์ซึ่ง (X_m) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ (X_{rl}') ดังนั้นจึงประมาณให้ค่าดังกล่าวมีค่าเป็น 0 จะได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{V}_s = \tilde{V}_m \left[1 + \left\{ (R_s + jX_{sl}) \times \frac{(1-j)}{2X'_{rl}} \right\} \right] \quad (\text{ก.8})$$

$$= \tilde{V}_m \left(\frac{2X'_{rl} + R_s + jX_{sl} - jR_s + X_{sl}}{2X'_{rl}} \right) \quad (\text{ก.9})$$

ซึ่งสามารถหาขนาดของแรงดันที่สเตอร์ได้ตั้งสมการที่ (ก.10)

$$V_s = \frac{V_m}{2X'_{rl}} \sqrt{(R_s + X_{sl} + 2X'_{rl})^2 + (X_{sl} - R_s)^2} \quad (\text{ก.10})$$

ที่พิกัดความถี่นำ ω เข้าไปหารในสมการที่ (ก.10) จะได้

$$\frac{V_s}{\omega} = \frac{V_m}{\omega} \left(\frac{\sqrt{(R_s + X_{sl} + 2X'_{rl})^2 + (X_{sl} - R_s)^2}}{2X'_{rl}} \right) \quad (\text{ก.11})$$

ที่ความถี่ใดๆ $K_f = \frac{f}{f_{rated}}$ โดยที่ $f \leq f_{rated}$ จะได้

$$\frac{V_{skf}}{K_f \omega} = \frac{V_{mkf}}{K_f \omega} \left(\frac{\sqrt{(R_s + K_f X_{sl} + 2K_f X'_{rl})^2 + (K_f X_{sl} - R_s)^2}}{2K_f X'_{rl}} \right) \quad (\text{ก.12})$$

ซึ่งสามารถหาอัตราส่วนการคงค่าแรงดันต่อความถี่ได้จากสมการที่ (ก.12) หารด้วย (ก.11) จะได้

$$\frac{V_{skf}}{V_s} = \frac{\sqrt{(R_s + K_f X_{sl} + 2K_f X'_{rl})^2 + (K_f X_{sl} - R_s)^2}}{\sqrt{(R_s + X_{sl} + 2X'_{rl})^2 + (X_{sl} - R_s)^2}} \quad (\text{ก.13})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

จากรูปที่ 3.3 ในบทที่ 3 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการคงค่าแรงดันต่อความถี่คงที่นั้น จะต้องมีการนำค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์มาใช้ ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์นั้นทำได้โดยใช้แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์สองเฟสจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส แล้วทำการทดสอบ No-load test, Block rotor test และ DC test

ข.1 วิธีการทดสอบและค่าที่วัดได้

ข.1.1 การทดสอบ No-load test

การทดสอบแบบ No-load test ทำได้โดยการใช้อินเวอร์เตอร์สองเฟสจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส แล้วทำการวัดค่าได้ผลดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 No-load test

V_{nl} (V)	I_{nl} (A)	P_{nl} (W)
166.877	1.068	44.556

ข.1.2 การทดสอบ Block rotor test

การทดสอบแบบ Block rotor test ทำได้โดยการยึดโรเตอร์ไว้ไม่ให้หมุน แล้วป้อนแหล่งจ่ายเข้าไปโดยไม่ให้กระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์เกินพิกัดของมอเตอร์ ทำการวัดค่าได้ผลดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 Block rotor test

V_{bl} (V)	I_{bl} (A)	P_{bl} (W)
84.853	3.1996	185.499

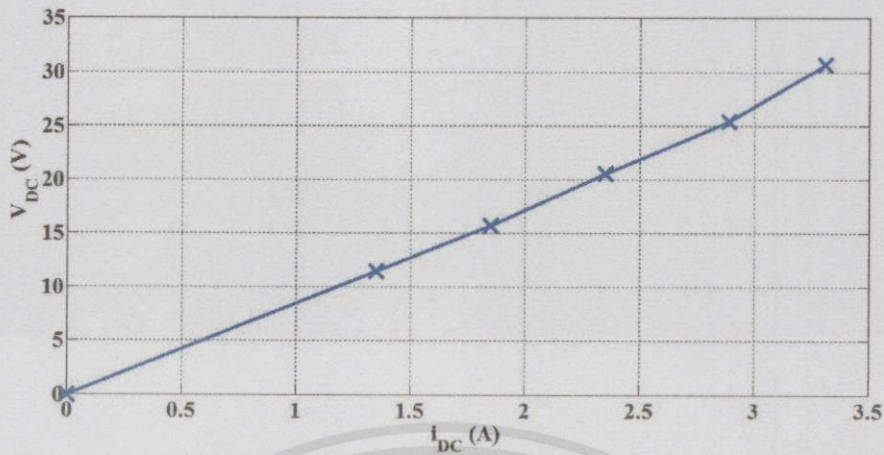
ข.1.3 การทำ DC test

การทำ DC test ทำได้โดยการใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงป้อนเข้าที่ขดลวดของมอเตอร์เพียงขดเดียว แล้วค่อยๆทำการขึ้นแรงดันแล้ววัดค่ากระแสที่ป้อนเข้าโดยไม่ให้เกินค่าที่พิกัด ได้ผลดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 DC test

V_{DC} (V)	11.48	15.72	20.59	25.44	30.65
I_{DC} (A)	1.35	1.85	2.35	2.89	3.31

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งชื่อและนามสกุลของผู้นิพนธ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดันกระแสตรง

จากรูปที่ ข.1 นำมาหาค่า r_s จากความชันของกราฟได้

$$r_s = \frac{\Delta V_{DC}}{\Delta I_{DC}} \quad (\text{ข.1})$$

ข.2 การหาค่าพารามิเตอร์

จาก ข.1 เป็นการหาค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์นั้นคำนวณได้จากสมการต่างๆ ดังนี้

$$X_{sl} + X_{sm} \cong \frac{V_{nl}}{I_{nl}} \quad (\text{ข.2})$$

$$r'_r = \frac{P_{bl}}{2I_{bl}^2} - r_s \quad (\text{ข.3})$$

$$|Z_{bl}| = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} \quad (\text{ข.4})$$

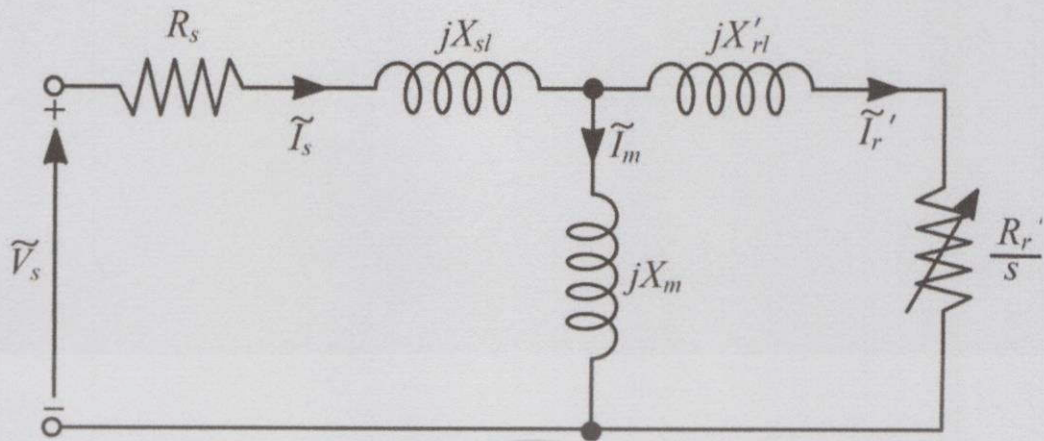
$$\text{ซึ่ง } |(r_s + r'_r) + j(X_{sl} + X'_{rl})| = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} \quad (\text{ข.5})$$

$$X_{sl} \cong X'_{rl} \quad (\text{ข.6})$$

$$X_{sm} \cong \frac{V_{nl}}{I_{nl}} - X_{sl} \quad (\text{ข.7})$$

เมื่อหาค่าต่างๆได้ สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

โดยที่

$$R_s = 9.524\Omega$$

$$\frac{R'_r}{s} = \frac{8.636}{s}$$

$$jX_{sl} = j9.684\Omega$$

$$jX'_{rl} = 9.684\Omega$$

$$jX_m = j146.568\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



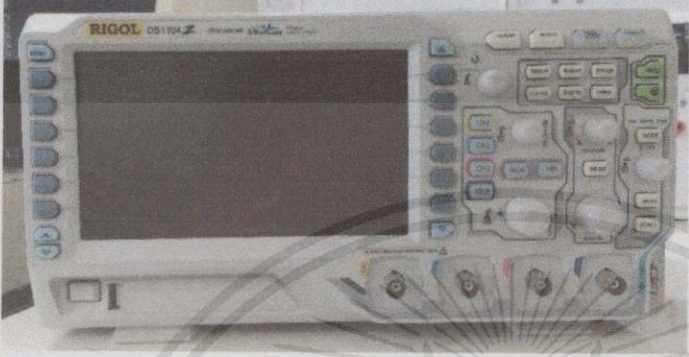


ภาคผนวก ค

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวงจรการทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวงจรการทดสอบจริง

	<p>Digital Oscilloscope RIGOL รุ่น DS1104</p>
	<p>Differential Probe PINTEK รุ่น DP-25</p>
	<p>Multimeter FLUKE รุ่น 115</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค (ต่อ)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวงจรการทดสอบจริง

	<p>มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสต่อเข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง</p>
	<p>วงจรการทดสอบกับภาวะตัวต้านทาน</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

A Symmetrical Two-Phase Induction Machine Drive

กัมปนาท อิงเมือง คชากรณ์ ไบชิต และ คุณชวลิต ชื่นอ้อม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

บทคัดย่อ

เป้าหมายของบทความนี้นำเสนอการศึกษาและการสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรขนาด 0.5 แรงม้า โดยการควบคุมสเกลาร์แบบวงเปิดชนิดคงค่าแรงดันต่อความถี่ ในการออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมนั้นจะทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎี โดยการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M4 STM32F407 ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่ามีความแม่นยำไม่แพ้การทดลองจริง

คำสำคัญ: เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร, การควบคุมสเกลาร์

Abstract

The aim of this paper is to present the study and construction of a 0.5 hp two phase induction with drive system. The open-loop constant V/f control is applied to control the motor. The drive system is designed by simulation using MATLAB/Simulink program. The system is implemented and the experimental system controlled by the ARM Cortex M4 STM32F407 microcontroller to substantiate the simulator results.

Keywords: Two phase induction machine, Scalar control

1. บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน ซึ่งปัจจุบันได้แบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส และ สามเฟส ซึ่งได้มีการทำวิจัยเกี่ยวกับการขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองประเภทนี้อยู่มากมาย แต่ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนั้น จะพบว่าข้อเสียหลักๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสองเฟสชนิดสภาวะไม่สมมาตร (Asymmetrical) เพื่อความสะดวกในการใช้

แหล่งจ่ายไฟเพียงเฟสเดียว แต่อย่างไรก็ตามปัญหาในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวก็คือ แรงบิดกระเพื่อม ดังนั้นจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับการศึกษาค้นคว้าการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

อย่างไรก็ตาม การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร ต้องอาศัยแหล่งจ่าย สองเฟสที่มีมุมต่างกัน ทางไฟฟ้าทางออกที่เหมาะสมคือการใช้อินเวอร์เตอร์สองเฟส โดยใช้แหล่งจ่ายหนึ่งเฟสแปลงเป็นแรงดันกระแสตรง โดยแยกเป็นสองเฟสแล้วผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งแรงดันและความถี่ได้ ด้วยเหตุนี้โครงการนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรโดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบสเกลาร์

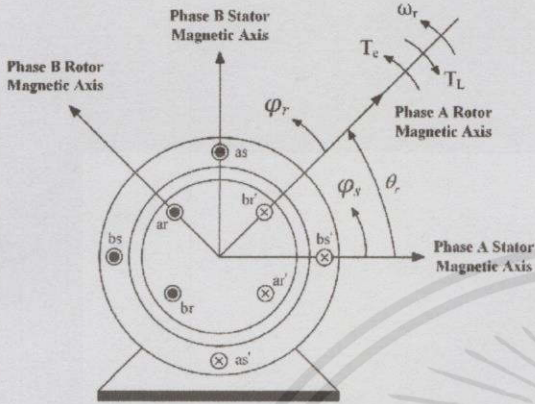
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

โดยทั่วไปเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทตามรูปแบบของโรเตอร์คือ ชนิดกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) และ โรเตอร์ขดลวด (Wound rotor) [1] โดยโครงการนี้จะมุ่งประเด็นไปที่โรเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก จากรูปที่ 1 สมมติให้โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสมีการพันขดลวดเท่ากับทั้งสองเฟสและวางห่างกันทำมุม 90 องศา ซึ่งมีค่าความต้านทานขดลวดเท่ากัน ดังนั้นทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์จึงสมมาตร ด้วยเหตุนี้จึงเรียกเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดว่าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสมมาตร

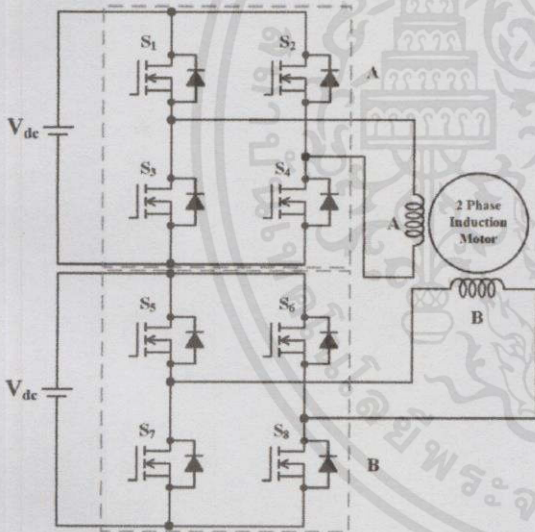
เนื่องจากระยะห่างของช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์สม่ำเสมอ คือมีช่องว่างอากาศสม่ำเสมอ ขดลวดที่โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกตัดวงจร ซึ่งโดยส่วนใหญ่การใช้งานจะป้อนแหล่งจ่ายผ่านขดลวดทางสเตเตอร์ทางเดียว หรือเรียกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนทางเดียว แต่บางงานที่เป็นงานเฉพาะก็สามารถป้อนแหล่งจ่ายผ่านขดลวดทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ หรือเรียกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนสองทาง

มุมขั้วของสเตเตอร์แทนด้วย เทียบกับแกนสนามแม่เหล็กสเตเตอร์เฟส A มุมขั้วของโรเตอร์แทนด้วย เทียบกับแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์เฟส A ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์คือ และเป็นมุมขั้วระหว่างแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์เฟส A กับแกนสนามแม่เหล็กสเตเตอร์เฟส A



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟส



รูปที่ 2 อินเวอร์เตอร์สองเฟสชนิดสี่กิ่งสำหรับขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสที่ใช้ในการทดลอง

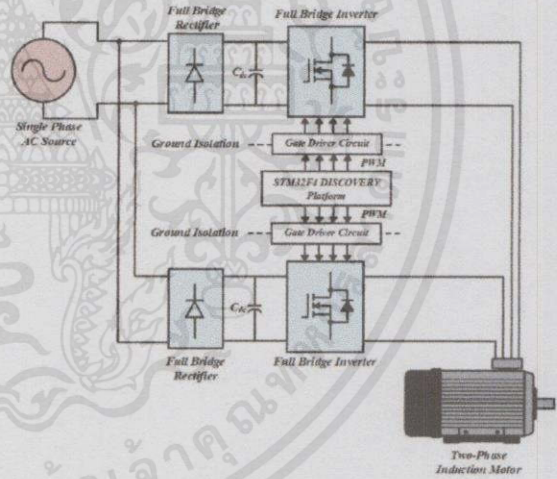
อินเวอร์เตอร์ หรือคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้เป็นอินเวอร์เตอร์สองเฟสเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสดังในรูปที่ 2 ซึ่งเป็น พูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวจำนวนสองชุด 8 สวิตช์แยกในการควบคุมมอเตอร์ในแต่ละเฟส โดยอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้นั้นมีเงื่อนไขการทำงานเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว คือสวิตช์ S_1, S_2 และ S_3, S_4 จะต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลาเพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรกันในบัส ดังนั้นในช่วงเวลาที่มีการ

เปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตช์จะต้องมีการใส่เดดไทม์ (Dead Time) เข้าไปเพื่อป้องกันการลัดวงจรดังกล่าวด้วยเช่นกัน อีกทั้งในวงจรได้ใช้ตัวเก็บประจุจำนวน 2 ชุดแยกกันในแต่ละเฟสเพื่อป้องกันการเกิดกระแสไหลวนเมื่อกระแสสองเฟสไม่สมดุล

2.3 การควบคุมแบบสเกลาร์

การควบคุมแบบสเกลาร์ แบบการคงค่าแรงดันต่อความถี่ ออกแบบมาเพื่อความสะดวกในการปรับความเร็วของมอเตอร์ โดยใช้ อินเวอร์เตอร์ควบคุมขนาดของแรงดันและความถี่ให้ถูกต้องตามคำสั่งความเร็ว ซึ่งไม่มีการป้อนกลับความเร็ว การคงค่าแรงดันต่อความถี่ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เพราะทำการควบคุมได้ง่าย ถ้าทำการลดความถี่ลงแต่ยังคงที่ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายไว้ จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศอิ่มตัว ส่งผลให้กระแสที่สเตเตอร์สูงขึ้นและรูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะผิดเพี้ยนไปมาก [2] เพราะฉะนั้นย่านความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ที่คิด ต้องมีการลดค่าแรงดันที่สเตเตอร์อย่างเป็นสัดส่วนเพื่อรักษาเส้นแรงแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศให้คงที่

3. การออกแบบและการประกอบสร้าง



รูปที่ 3 โดอะแกรมการทำงานของวงจรขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตร

จากโดอะแกรมการทำงาน ในรูปที่ 3 สามารถแบ่งวงจรการทำงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ วงจรกำลัง และวงจรควบคุม ในส่วนของวงจรกำลัง เริ่มต้นโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วงจรเรียงกระแสแบบพูลบริดจ์ทั้งสองวงจร เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มคลื่น โดยมีการต่อตัวเก็บประจุขนาด 2200 μF เพื่อให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีความเรียบยิ่งขึ้น และจากนั้นก็เข้าสู่วงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งวงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เปรียบเสมือน

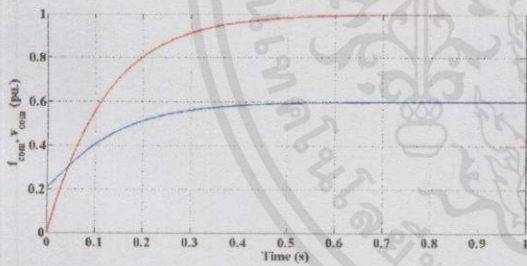
วางจรรยาบรรณแรงดัน โดยแรงดันขาออกที่ได้จะมีลักษณะเป็นพัลส์ชนิดที่
ดับเบิ้ลยูเอ็ม สำหรับขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบ
สมมาตร

ในส่วนขงวงจรถวลุมจะทำหน้าที่ในการควบคุมระบบเพื่อให้
อินเวอร์เตอร์ทำงาน โดยการสร้างสัญญาณพีดีดับเบิ้ลยูเอ็มจาก
ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F407VG ในการควบคุมการทำงาน
ของมอเตอร์กำลังในวงจรถวลุมอินเวอร์เตอร์ ซึ่งโครงงานนี้ จะทำการควบคุม
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสเกลาร์ โดยการควบคุมแรงดันที่สเตเตอร์
ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความถี่อ้างอิง เพื่อให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ และ
ป้องกันไม่ให้ฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว

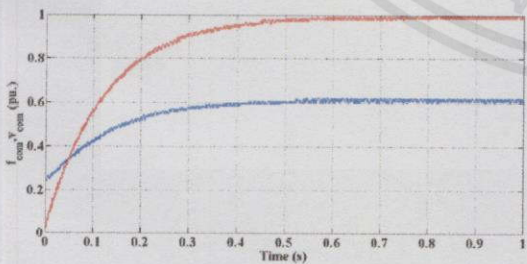
4. วิธีทดสอบ และผลการทดสอบ

ในการทดสอบทำการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้าสองเฟสจาก
อินเวอร์เตอร์ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่ต่อคล้ายกับ
เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นทำการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าขึ้น แล้ว
พิจารณาการทำงานของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

ในการเริ่มการทำงานมอเตอร์จะถูกควบคุมให้เริ่มการทำงาน โดย
คำสั่งกำหนดความถี่ไว้ที่ 50 Hz และทำการเพิ่มความถี่ต่ำสุด ไปยังความถี่
50 Hz โดยป้อนข้อมูลความถี่ที่ต้องการผ่านคำสั่งวงจรถวลุมความถี่ต่ำ
ผ่านแบบดีสครีต (discrete low pass filter) ดังรูปที่ 4



(ก)



(ข)

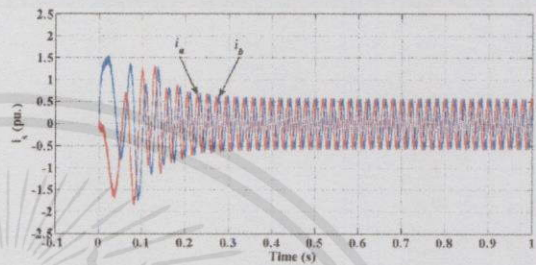
รูปที่ 4 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดง

คำสั่งการเพิ่มความถี่ต่ำสุดไปยังความถี่ 50 Hz

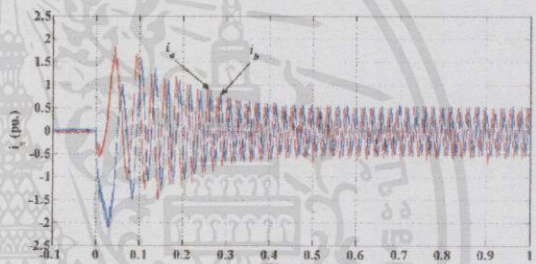
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ปรากฏในบทนี้รูปคลื่นแรงดันที่ได้จะมีลักษณะ
เป็นพัลส์ ตามการสวิตช์ของสัญญาณ จึงทำการใส่วงจรถวลุม เพื่อให้
รูปคลื่นแรงดันมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์มูชอยด์ เพื่อความง่ายต่อการวัด
มุมต่างเฟส ดังนั้น ในผลการทดลองจึงแสดงรูปคลื่นแรงดันที่ผ่านวงจรถวลุม
ความถี่ที่ผ่านแล้ว ซึ่งการทดลอง แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

4.1 ขณะเริ่มการทำงานของมอเตอร์

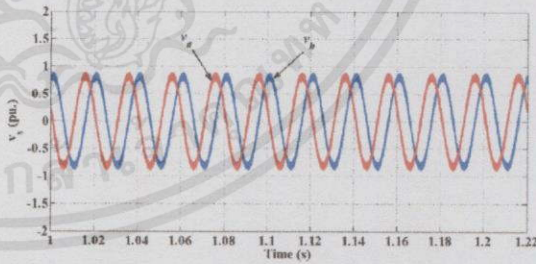


(ก)

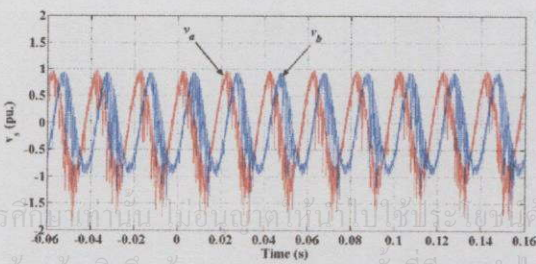


(ข)

รูปที่ 5 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดง
รูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟสภายใต้สภาวะเริ่มเดินที่ความถี่สุดท้ายเท่ากับ
50 Hz

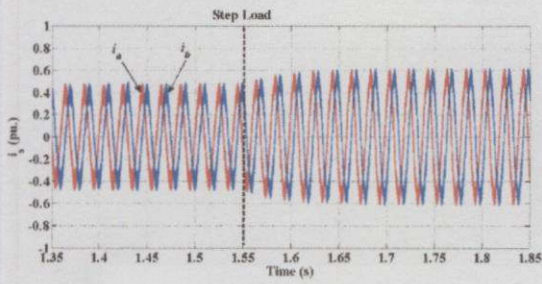


(ก)

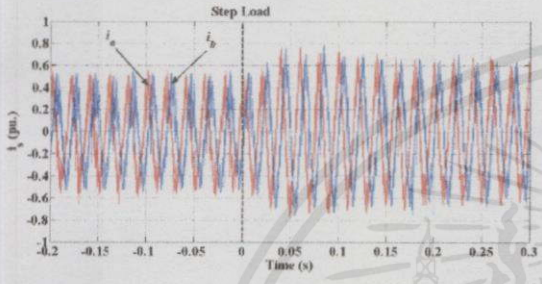


(ข)

4.2 เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากสถานะไร้ภาระไฟฟ้าสู่ภาระขนาด 150 w



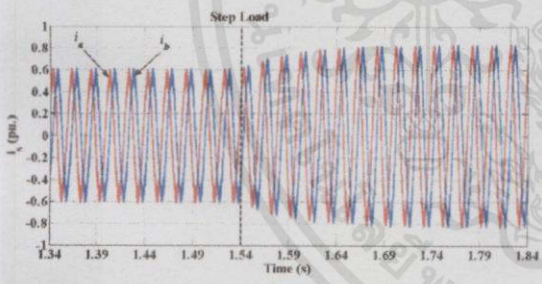
(ก)



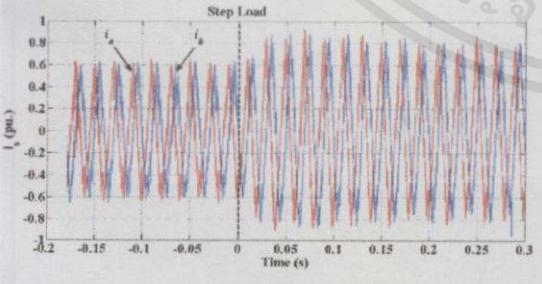
(ข)

รูปที่ 6 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากสถานะไร้ภาระไปสู่ภาระขนาด 150 W ที่ความถี่ 50 Hz

4.3 เพิ่มภาระแบบขั้นบันไดจากภาระขนาด 150 w สู่ 300 w



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ (ข) ผลการทดลอง แสดงรูปคลื่นกระแสทั้งสองเฟส ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล จากภาระเพิ่มภาระขนาด 150 W สู่ภาระขนาด 300 W ที่ความถี่ 50 Hz

จากการทดลอง รูปคลื่นกระแสและแรงดันทั้งสองเฟสมีความสมมาตรกันและมีแอมพลิจูดเท่ากัน และจากการทดสอบการเริ่มทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสในสภาวะไร้ภาระทางไฟฟ้าแบบขั้นบันได ที่ความถี่ต่างๆ พบว่า เมื่อค่าความถี่ลดลง จะทำให้ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของมอเตอร์มีค่ามากขึ้น และจากการเพิ่มภาระทางไฟฟ้ามากขึ้น จะเห็นว่า ค่ากระแสที่ค่ากระแสที่สเตเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรนั้นพบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบสมมาตรนี้สามารถขับเคลื่อนได้ด้วยแหล่งจ่ายสองเฟสที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา จึงได้ออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสที่มีการสวิตช์แบบไซนูซอยดอลที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม เพื่อนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสและใช้การควบคุมการทำงานแบบสเกลาร์คอนโทรลโดยการคงค่าอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ซึ่งจากผลการทดลองสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ที่ค่าความถี่ต่างๆจนถึงที่กีด 50 เฮิร์ตซ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Paul C. Krause, and Oleg Wasynczuk, *Electromechanical Motion Devices*. McGraw-Hill Book Company, 1989
- [2] Bimal K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2001
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronic Converters, Application, and Design*. 3th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [4] DO-HYUN JANG, "PWM METHODS FOR TWO-PHASE INVERTERS," IEEE Industry Application Magazine, March | April 2007
- [5] วราชาติ แซ่ก๊ก, *เอกสารประกอบการสอน วิชา 01026404 Electrical Machine Drives and System*.

เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายกัมปนาท อิงเมือง รหัสนักศึกษา 54010093
เกิดวันที่ 23 มกราคม 2536 ที่จังหวัดสมุทรสาคร
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาวชากรณม์ ใบচিত รหัสนักศึกษา 54010146
เกิดวันที่ 16 เมษายน 2535 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายคุณชวัล ชื่นอิม รหัสนักศึกษา 54010158
เกิดวันที่ 8 เมษายน 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้