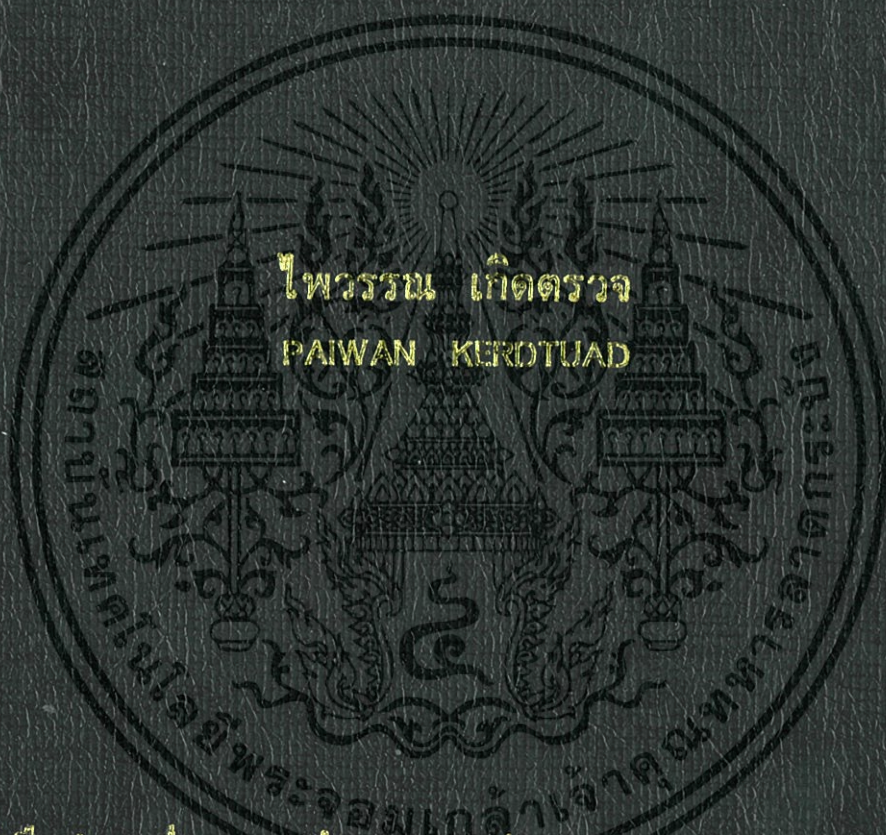


การศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
แบบสวิทช์รีลัคแตนซ์

STUDY OF MAXIMUM POWER CONVERSION OF A
SWITCHED-RELUCTANCE GENERATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-EN-M-020-037

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
แบบสวิตช์รีลักแตนซ์

STUDY OF MAXIMUM POWER CONVERSION OF A
SWITCHED-RELUCTANCE GENERATOR



T117947



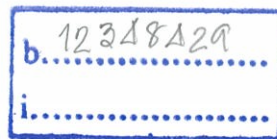
ฉพ.

พ ๑๘๔๗

เลขหมู่..... 2554

เลขทะเบียน 117947

วัน,เดือน,ปี 22 ต.ค. 2554



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2011-EN-M-020-037 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF MAXIMUM POWER CONVERSION OF A
SWITCHED-RELUCTANCE GENERATOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **KMITL-2011-EN-M-020-037** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011





FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลัคแตนซ์
Thesis Title STUDY OF MAXIMUM POWER CONVERSION OF
A SWITCHED-RELUCTANCE GENERATOR
นักศึกษา นายไพพรรณ เกิดตรวจ
รหัสประจำตัว 50060206
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2011-EN-M-020-037


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.พิชิต	ถ่ายอง	
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข	
ดร.สุเมธ	เนติศักดิ์ตานนท์	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
รศ.ดร.สุวัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2554 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขขีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีล็กแตนซ์
นักศึกษา	นายไพวรรณ เกิดตรวจ
รหัสนักศึกษา	50060206
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีล็กแตนซ์ (SRG) ซึ่งประกอบด้วยการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีล็กแตนซ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสเฟสขณะทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ และการสร้างระบบควบคุมสำหรับทดสอบการทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีล็กแตนซ์ (SRG) ที่ทำการทดสอบนั้นมีโครงสร้าง 4 เฟส แบบ 8/6 พิกัดกำลังไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 48 โวลต์ สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์นั้นใช้สวิตช์ 2 ตัวต่อเฟส และใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812 เป็นตัวควบคุมการทำงานหลัก ในการทดสอบนั้นได้ควบคุมให้ SRG ทำงานเป็นแบบกระแสพัลส์ (Single-Pulse Mode) ที่ความเร็วมากกว่าความเร็วพิกัด (Base Speed) จากนั้นทำการปรับมุม Turn-on และ Turn-off ไปที่มุมต่างๆ เพื่อศึกษารูปร่างของกระแส ซึ่งแปรผันตรงกับการแปลงผันกำลัง ผลที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการนำกระแส (Turn-on, Turn-off) กับความเร็วรอบที่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด การประยุกต์ใช้ข้อมูลความสัมพันธ์นี้คือการควบคุมให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้จ่ายกำลังได้เหมาะสมตามความต้องการของโหลด

Thesis Title	Study of Maximum Power Conversion of a Switched-Reluctance Generator
Student	Mr. Paiwan Kerdtuad
Student ID.	50060206
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2011
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Supat Kittiratsatcha

ABSTRACT

This thesis presents the study of maximum power conversion of a Switched Reluctance Generator (SRG), which includes modeling of the SRG by using the program MATLAB/Simulink. To study of the shape of phase current when operated at high speed range. And the control system of the SRG. The SRG is operated in single pulse mode where the rotor speed is above base speed. The turn-on and turn-off angle are varied to study the shape of the phase current which is directly related to the power conversion. A 4 Phase, 2.2kW, 8/6 SRG is used to collect the experimental results. The converter is the conventional 2-switched per phase and a TMS320F2812 Digital Signal Processing (DSP) is a main controller. The result is the relationship between conduction angle(Turn-on ,Turn-off) with a speed that the SRG makes the maximum power conversion. The application of this data is an optimal control of the Switched-Reluctance Generator.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติ-
รัตน์สัจจา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงาน(Center of Excellence for Innovative Energy
System : CInES) ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ
ในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ
และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ไพวรรณ เกิดตรวจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับการจากวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	5
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งโรเตอร์.....	6
2.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้า.....	8
2.4 การทำงานเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	9
2.4.1 การทำงานในโหมดควบคุมกระแส.....	10
2.4.2 การทำงานในโหมดกระแสพัลส์.....	11
2.5 การวิเคราะห์เพื่อหาค่าลึงไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	13
2.6 การแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	15
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	16
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	16
3.2 แบบจำลองหาค่าเส้นแรงแม่เหล็ก.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	แบบจำลองหาค่าความเหนี่ยวนำ.....	17
3.4	แบบจำลองหาค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ	18
3.5	แบบจำลองหาค่าแรงบิด.....	18
3.6	โครงสร้างของแบบจำลอง 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์.....	19
3.7	การทดสอบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink	20
3.8	สรุปผลการทดสอบแบบจำลอง.....	22
บทที่ 4	การออกแบบและสร้างระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์.....	22
4.1	โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์.....	22
4.2	การสร้างวงจรสำหรับควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์.....	23
4.2.1	วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า 3 เฟสแบบบริดจ์.....	23
4.2.2	วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบไม่สมมาตร.....	23
4.2.3	วงจรจับเกทและวงจรป้องกันกระแสเกิน	24
4.2.4	วงจรวัดกระแส	25
4.2.5	วงจรวัดแรงดันดีซีบัล.....	26
4.2.6	ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์.....	27
4.2.7	วงจรวัดความเร็ว.....	28
4.2.8	วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสำหรับชุดควบคุม.....	28
4.3	ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล(DSP).....	31
4.4	ตัวปรับความเร็วรอบสำหรับอินคักชั่นมอเตอร์.....	31
4.5	อินคักชั่นมอเตอร์แบบ 3 เฟส.....	32
4.6	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6.....	33
4.7	โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์.....	35
บทที่ 5	ผลการทดสอบ	36
5.1	วงจรการทดลอง.....	37
5.2	เปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสกับผลจากแบบจำลอง.....	38
5.3	ผลการทดสอบวงจรควบคุมการทำงานของ SRG.....	39
5.3.1	ผลการทดสอบสัญญาณขั้วนำเกทจาก DSP.....	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.2 ผลการทดสอบสัญญาณจากตัวเอ็น โค้ดเดอร์.....	39
5.3.3 ผลการทดสอบวงจรวัดตำแหน่ง โรเตอร์ที่ได้จากวงจร DAC.....	40
5.3.4 ผลการทดสอบสัญญาณขั้วนำเกทของ IGBT.....	40
5.4 ผลการทดสอบการควบคุมกระแสเฟส.....	41
5.4.1 ผลการทดสอบขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping	41
5.4.2 ผลการทดสอบขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping	41
5.4.3 ผลการทดสอบขณะทำงานใน โหมดกระแสพัลส์.....	42
5.5 ผลการทดสอบหาการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	43
5.5.1 รูปร่างของกระแสเฟสขณะแปลงผันพลังงานสูงสุด.....	42
5.5.2 ผลการทดลองขณะที่ SRG จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่ความเร็วต่างๆ.....	44
5.6 การวิเคราะห์หา มุมนำกระแสและความเร็วที่ SRG แปลงผันกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด....	46
5.7 มุมนำกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ SRG แปลงผัน ได้สูงสุด.....	50
5.8 ความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ SRG.....	51
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (EECON32).....	57
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (ECTI- CON 2011).....	63
ภาคผนวก ข. โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมการทำงานของ DSP.....	68
ภาคผนวก ค. ชุดควบคุมการทำงานสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีล็กแตนซ์..	94
ภาคผนวก ง. ข้อมูลด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีล็กแตนซ์.....	97
ภาคผนวก จ. ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	135

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าความต้านทานที่ขาเกต (RG) เทียบกับกระแสสูงสุดของ IGBT เบอร์ EXB850.....	24
5.1 พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
5.2 สรุปมูมนำกระแสที่ SRG สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้สูงสุดขณะทำงานที่ ความเร็วมากกว่าพิกัด.....	45
จ.1 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 35.0^\circ$	43
จ.2 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 37.5^\circ$	44
จ.3 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 40.0^\circ$	45
จ.4 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$	46
จ.5 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$	47
จ.6 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$	48
จ.7 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 50.0^\circ$	49
จ.8 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 15.0^\circ$, $\theta_{off} = 37.5^\circ$	50
จ.9 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 15.0^\circ$, $\theta_{off} = 40.0^\circ$	51
จ.10 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 15.0^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$	52
จ.11 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 15.0^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$	53
จ.12 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 15.0^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$	54
จ.13 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 15.0^\circ$, $\theta_{off} = 50.0^\circ$	55
จ.14 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 37.5^\circ$	56
จ.15 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 40.0^\circ$	57
จ.16 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$	58
จ.17 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$	59
จ.18 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$	60
จ.19 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 50.0^\circ$	61
จ.20 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$	62
จ.21 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 43.75^\circ$	63
จ.22 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$	64
จ.23 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 46.25^\circ$	65
จ.24 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$	66
จ.25 ผลการทดลองขณะทำงานที่มูม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 48.5^\circ$	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.26 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 43.75^\circ$	68
จ.27 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$	69
จ.28 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 46.25^\circ$	70
จ.29 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$	71
จ.30 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 25.0^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$	72
จ.31 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 25.0^\circ$, $\theta_{off} = 46.25^\circ$	73
จ.32 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 25.5^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$	74
จ.33 ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 25.0^\circ$, $\theta_{off} = 48.75^\circ$	75



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนการทำวิจัย..... 4
2.1	โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6..... 5
2.2	ตำแหน่งของโรเตอร์ที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดและต่ำสุด..... 6
2.3	เส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetizing Curves)..... 7
2.4	ค่าความเหนี่ยวนำกับกระแสในโหมดการทำงานมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 7
2.5	วงจรมุมลู่ 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์..... 8
2.6	ทิศทางการไหลของกระแสเฟสขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 9
2.7	ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ขณะทำงาน ในโหมด Soft Chopping..... 10
2.8	ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ขณะทำงาน ในโหมด Hard Chopping..... 11
2.9	ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ขณะทำงาน ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมากกว่าดีซีบัส..... 12
2.10	ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ขณะทำงาน ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเท่าดีซีบัส..... 12
2.12	ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ขณะทำงาน ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับน้อยกว่าดีซีบัส..... 13
3.1	แบบจำลอง 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์..... 16
3.2	แบบจำลองค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก..... 17
3.3	แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ..... 18
3.4	แบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ..... 18
3.5	แบบจำลองค่าแรงบิด..... 19
3.6	โครงสร้างของแบบจำลอง 1 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 19
3.7	ผลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่มีต่อรูปร่างของกระแสเฟส..... 20
3.8	ผลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่มีต่อรูปร่างของกระแสเฟสที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที... 20
3.9	ผลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่มีต่อรูปร่างของกระแสเฟสที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที.... 20
3.10	รูปร่างของกระแสเฟสขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมากกว่าแรงดันดีซีบัส..... 21
3.11	รูปร่างของกระแสเฟสขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเท่ากับแรงดันดีซีบัส..... 21
3.12	รูปร่างของกระแสเฟสขณะที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส..... 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	23
4.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์.....	24
4.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบไม่สมมาตร.....	24
4.4 วงจรขั้วนำเกตและวงจรป้องกันกระแสเกินสำหรับ IGBT Module.....	25
4.5 ตัววัดกระแสเบอร์ L08P150D15.....	26
4.6 วงจรวัดกระแสเฟส (Ia, Ib, Ic, Id) สำหรับช่อง ADC ของ DSP	26
4.7 ตัววัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ ISO124.....	27
4.8 วงจรวัดแรงดันคิซีบัส.....	27
4.9 เอ็น โค้ดเดอร์ เบอร์ R137 ของบริษัท Gurley Precision Instrument	28
4.10 สัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอ็น โค้ดเดอร์.....	28
4.11 วงจรวัดความเร็ว.....	29
4.12 วงจรเรียงกระแสไฟตรงคิซี 20 โวลท์สำหรับวงจรถักนำเกต.....	30
4.13 ชุดวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรวัดกระแสและวัดแรงดัน.....	31
4.14 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812.....	32
4.15 อินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส เบอร์ ND1-4-5A5.....	32
4.16 ผังวงจรการต่อของอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส เบอร์ ND1-4-5A5.....	33
4.17 อินดักชันมอเตอร์ (Induction Motor) แบบ 3 เฟส ขนาด 4 กิโลวัตต์.....	33
4.18 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 รุ่น RA165187.....	34
4.19 เวลาที่ใช้ในโปรแกรมขัดจังหวะ (Interrupt Service Routine).....	34
4.20 แสดงโปรแกรมหลักสำหรับควบคุมการทำงานแบบ SRG.....	35
4.21 แสดงโปรแกรม Interrupt สำหรับควบคุมการทำงานแบบ SRG.....	35
5.1 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน.....	36
5.2 วงจรของการวัดค่ากระแสเฟส แรงดันเฟสทั้ง 4 เฟส พร้อมกับกระแสและแรงดันไฟฟ้า ที่ SRG จ่ายให้กับโหลด.....	37
5.3 วงจรของการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเฟส A เทียบกับกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ SRG จ่ายให้กับโหลด.....	37
5.4 เปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสขณะที่ SRG ทำงานที่ 7200 รอบต่อนาที.....	38
5.5 เปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสขณะที่ SRG ทำงานที่ 6000 รอบต่อนาที.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 สัญญาณขับเคลื่อนของ IGBT ตัวบนที่ได้จากช่อง PWM ของตัว DSP ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping.....	39
5.7 สัญญาณ QEP1, QEP2 และ Index ที่ได้จากตัว Encoder.....	39
5.8 แสดงมุมทางกล มุมทางไฟฟ้าของเฟส และมุมทางไฟฟ้าของเฟส A.....	40
5.9 รูปร่างของกระแสเฟส A, B, C และ D ที่ได้จากวงจรวัดกระแส.....	40
5.10 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping.....	41
5.11 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping.....	41
5.12 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานในโหมดกระแสพัลส์ (Single Pulse Mode).....	42
5.13 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ.....	42
5.14 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานในโหมดกระแสพัลส์.....	43
5.15 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานในโหมดกระแสพัลส์และให้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด.....	43
5.16 กระแสเฟส และแรงดันเฟส ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าสูงกว่าแรงดันดีซีบัส.....	44
5.17 กระแสเฟส และแรงดันเฟส ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีบัส.....	44
5.18 กระแสเฟส และแรงดันเฟส ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส.....	44
5.19 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที.....	46
5.20 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที.....	46
5.21 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที.....	47
5.22 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที.....	47
5.23 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที.....	47
5.24 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 6200 รอบต่อนาที.....	48
5.25 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 6400 รอบต่อนาที.....	48
5.26 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 6600 รอบต่อนาที.....	48
5.27 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 6800 รอบต่อนาที.....	49
5.28 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 7000 รอบต่อนาที.....	49
5.29 ความสัมพันธ์ของมุนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที.....	49

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 รูปร่างของกระแสเฟสขณะที่ SRG ทำงานที่มุมนำกระแส $\theta_{on}=17.5^\circ, \theta_{off}=45.0^\circ$ ที่ความเร็ว 7000 รอบต่อนาทีขณะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดได้สูงสุด 1816 วัตต์.....	50
5.31 ความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ที่ SRG สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด.....	51
5.32 ความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ขณะที่ยุคนำกระแส $\theta_{off}=45^\circ$	51
5.33 ความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ขณะที่ยุคนำกระแส $\theta_{on}=15^\circ$	52
5.34 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแส (θ_{on}) และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ขณะที่ยุคนำกระแสจ่ายพลังงานเอาต์พุต 1000 วัตต์ ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที.....	52
ค.1 แสดงการติดตั้ง SRG ซึ่งที่เพลานั้นใช้ Coupling ยึดเข้ากับเพลานของ Induction Motor ที่ทำหน้าที่เป็น Primover	95
ค.2 แสดงระบบควบคุม SRG ที่สร้างขึ้นประกอบด้วย DSP เชื่อมต่อกับ PC ผ่านพอร์ต RS323, วงจรขับเกท, วงจร DAC, วงจรคอนเวอร์เตอร์ และวงจรควบคุมความเร็วของ Induction Motor.	95
ค.3 แสดงโหลดที่ใช้ในการทดสอบแบบความต้านทานปรับค่าได้ขนาดพิกัดกำลังสูงสุด 4 กิโลวัตต์.....	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอากาศยาน รถยนต์ไฮบริดจ์ และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม รวมไปถึงระบบสำรองพาวเวอร์(UPS)เป็นต้น สาเหตุที่มีการนำมาใช้งานใช้กันมากเนื่องมาจากข้อดีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบนี้คือน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีขดลวดที่โรเตอร์ มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนการผลิตและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ เมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอื่นๆ แต่มีคุณสมบัติของค่าความเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งโรเตอร์และกระแสเฟส ทำให้มีความยุ่งยากในการควบคุมการทำงาน เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ สามารถทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า[1] ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมของการนำกระแสให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละเฟส มีนักวิจัยหลายท่าน ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า(SRM) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์(SRG) เช่น แบบจำลองทางแม่เหล็กของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ที่ใช้เทคนิคคิวบิกสไปนน์[2] การวิเคราะห์แบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์[4] การวิเคราะห์หาอัตราการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์[3] การออกแบบและควบคุมคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด[5] การออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้ในรถยนต์ไฮบริดจ์[6] การออกแบบวงจรกำลังและรูปแบบการควบคุมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์[7] การออกแบบและควบคุมคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด[8]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์(SRG) โดยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์เพื่อศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่ความเร็วต่างๆ ว่ามีผลกับรูปร่างของกระแสอย่างไร[13] แบบจำลองนี้ประกอบด้วย แบบจำลองค่าเส้นแรงแม่เหล็ก $\lambda(i, \theta)$, แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ $L(i, \theta)$ และแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ $bemf(i, \theta)$ การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์นั้นได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink หลังจากนั้นได้ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 พิกัดกำลัง 2.2 กิโลวัตต์ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

(DSP) เบอร์ TMS320F2812 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ซึ่งควบคุมการทำงานแบบกระแสปัลส์(Single Pulse Mode) ที่ความเร็วมากกว่าพิกัด (Base Speed) แรงดันดีซีบัส 48 โวลต์ทงที่ โดยปรับมุมนำกระแสที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อศึกษารูปร่างของกระแสเฟสในขณะที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRG) ขนาดพิกัดกำลัง 2.2 กิโลวัตต์ 4 เฟส 8/6 ความเร็วพิกัด 6,000 รอบต่อนาที โดยควบคุมการทำงานเป็นแบบกระแสปัลส์(Single Pulse Mode) ที่ความเร็วโรเตอร์มากกว่าพิกัด(Base Speed) และแรงดันดีซีบัสทงที่ ทำการปรับมุมของการนำกระแส (Conducting Angle) ที่ค่าต่างๆ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสเฟส ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแปลงผันกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ในขณะที่ควบคุมการทำงานแบบกระแสปัลส์(Single Pulse Mode) ที่ความเร็วมากกว่าพิกัด กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเฟสนั้นจะแปรผันตามมุมนำกระแส (Conduction Angle) ของแต่ละเฟส

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งมีขอบเขตดังนี้

1. สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์เพื่อศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าด้านกลับต่อรูปร่างกระแส ขณะทำงานในโหมดกระแสปัลส์ ที่ความเร็วมากกว่าพิกัด โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

2. ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์แบบ 8/6 ขนาดพิกัดแรงดัน 48 โวลต์, พิกัดกำลังขนาด 2.2 กิโลวัตต์ โดยสามารถควบคุมการทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในชุดเดียวกัน

3. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล(DSP) เบอร์ TMS320F2812

4. ทดสอบการทำงานเพื่อหามุมนำกระแสและความเร็วที่เหมาะสมที่ SRG แปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRG)
2. สามารถประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Devices) ได้
3. เข้าใจหลักการทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ในการทำงานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆ
4. ประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRG) ในเชิงอุตสาหกรรมได้

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการทำวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ ขณะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG)

บทที่ 3 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสเฟส

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 พิกัดกำลังขนาด 2.2 กิโลวัตต์ และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 48 โวลต์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบ 2 สวิตช์ต่อเฟส วงจรขับนำเกตของ IGBT วงจรวัดกระแส วงจรวัดความเร็ว วงจรวัดแรงดัน โดยใช้ตัวประมวลผลดิจิทัล (Digital Signal Processing , DSP) เบอร์ TMS320F2812 เป็นตัวควบคุมการทำงานหลัก

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบระบบควบคุมการทำงานที่สร้างขึ้น และผลการทดสอบการทำงานของ SRG ที่มูนนำกระแสและความเร็วค่าต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของมูนนำกระแสและความเร็วของ SRG ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บรรณานุกรม

ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของ DSP โดยใช้ภาษาซี

ภาคผนวก ค. ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์

ภาคผนวก ง. ข้อมูลด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRG)

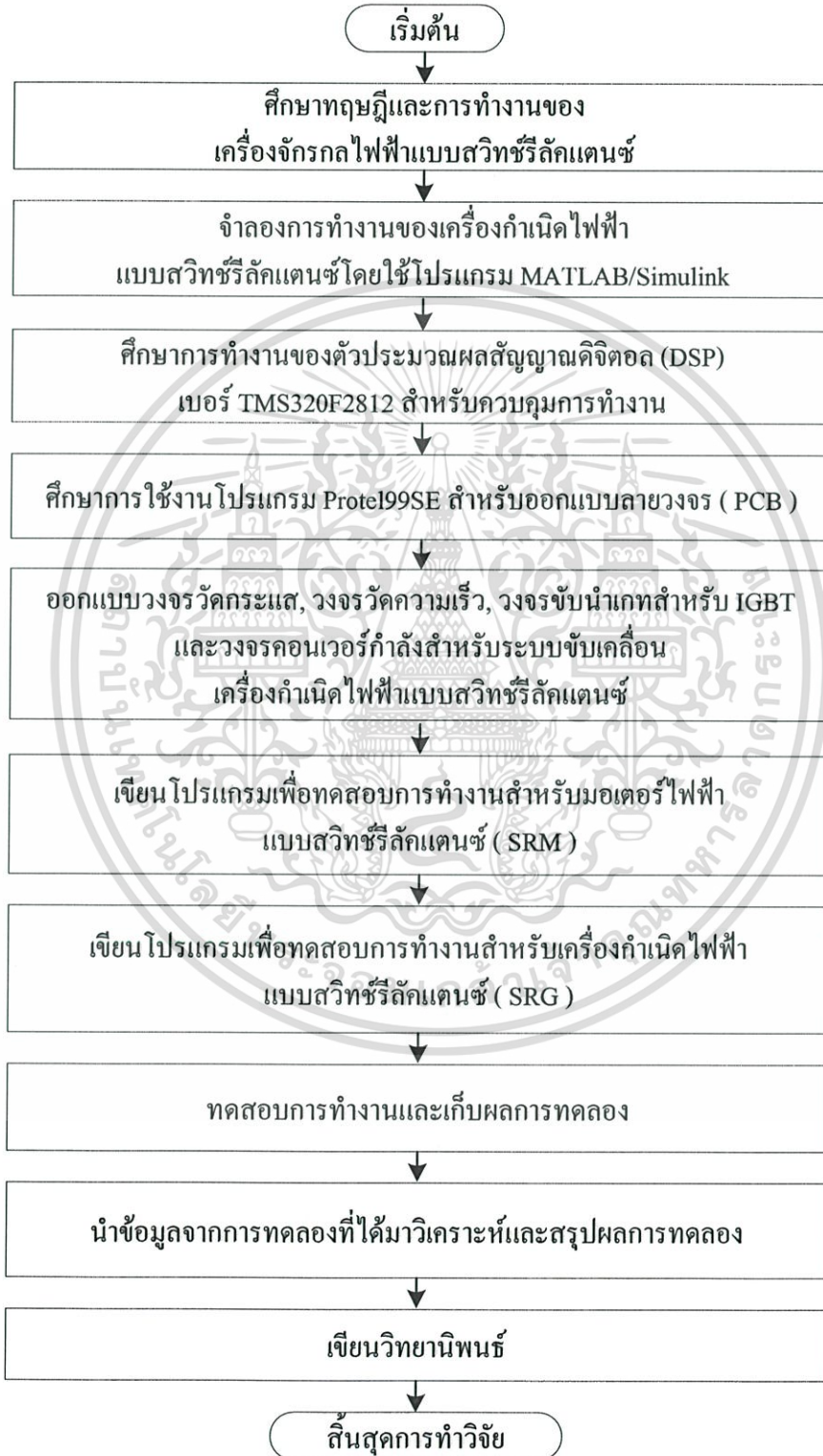
ภาคผนวก จ. ตารางบันทึกผลการทดลอง

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนในการทำงานวิจัยเรื่องการศึกษาการแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ สวิตซ์รีลักแตนซ์นั้น ได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 1.1



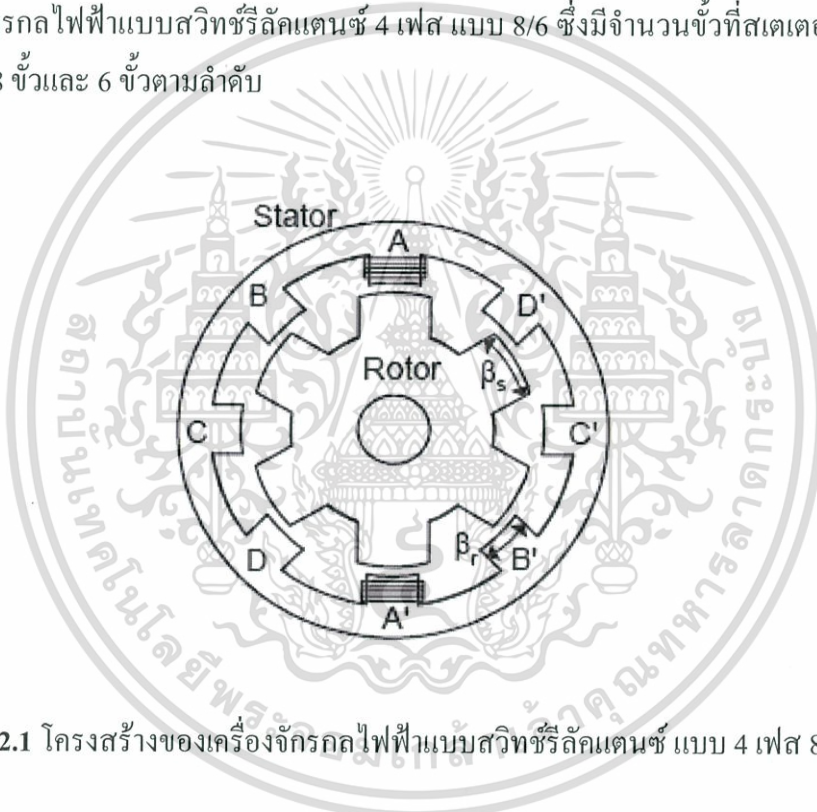
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 1.1 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้จะมีโครงสร้างแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่สเตเตอร์ แต่จะไม่มีขดลวดสนามหรือแม่เหล็กที่โรเตอร์ ซึ่งจะทำให้การสร้างเครื่องจักรกลชนิดนี้นั้นทำได้ง่ายและราคาถูกกว่าแบบอื่นๆ โดยทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles) ลักษณะดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.1 นั้นเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 ซึ่งมีจำนวนขั้วที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์เท่ากับ 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6

โครงสร้างของเครื่องจักรกลชนิดนี้สามารถสร้างกี่เฟสก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ จำนวนขั้วของสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนเฟส และจังหวะการสวิตช์ในหนึ่งรอบ (Number of Stock per Revolution, N_r) โดยจำนวนจังหวะสวิตช์ในหนึ่งรอบ ดังในสมการที่ 1

$$N_t = \frac{N_r N_s}{2} \quad (1)$$

เมื่อ N_t คือ จำนวนจังหวะการสวิตช์ในหนึ่งรอบ

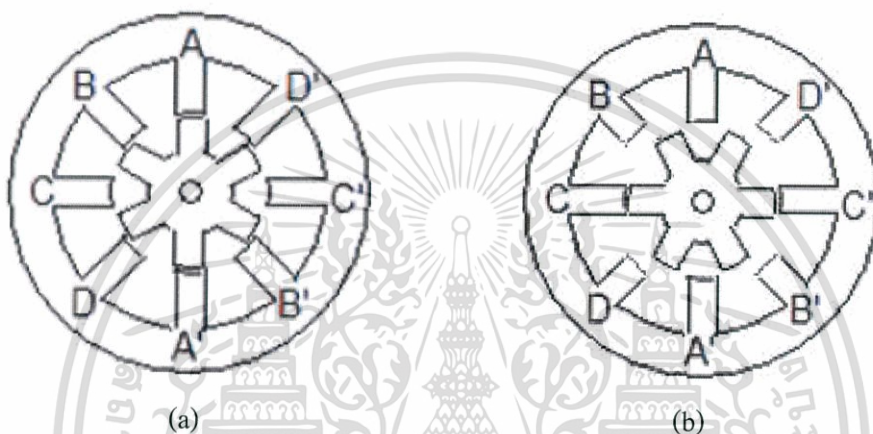
N_r คือ จำนวนขั้วของโรเตอร์

N_s คือ จำนวนขั้วของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งโรเตอร์

เมื่อตำแหน่งของโรเตอร์คู่ใดมีตำแหน่งตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่พิจารณา เราจะเรียกตำแหน่งนี้ว่าตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด เนื่องจากมีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance, R) ค่าน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.3(a) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเฟส A นั้นอยู่ในตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) ในทางกลับกันถ้าตำแหน่งขั้วของสเตเตอร์ของเฟสที่พิจารณานั้นอยู่ระหว่างขั้วของโรเตอร์นั้น จะเรียกตำแหน่งนี้ว่าอันอะไลน์ (Unaligned Position) ซึ่งตำแหน่งนี้จะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุด ดังในรูปที่ 2.3(b)



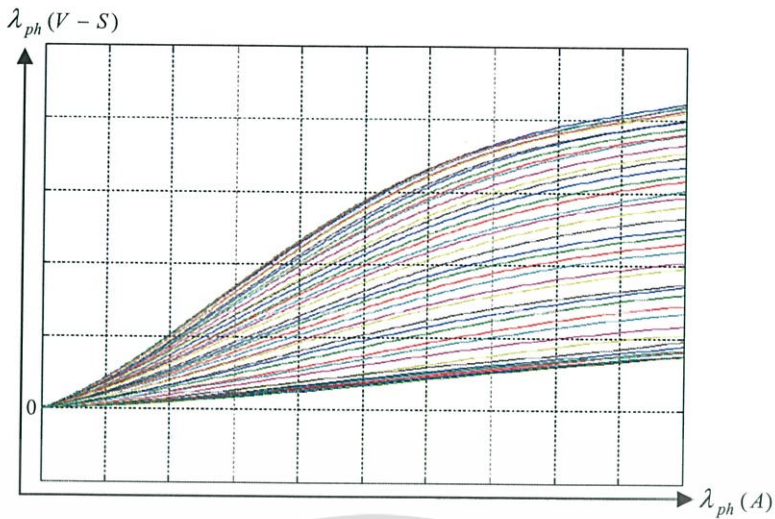
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งของ โรเตอร์ที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดและต่ำสุด

(a) ตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ของเฟส A

(b) ตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position) ของเฟส A

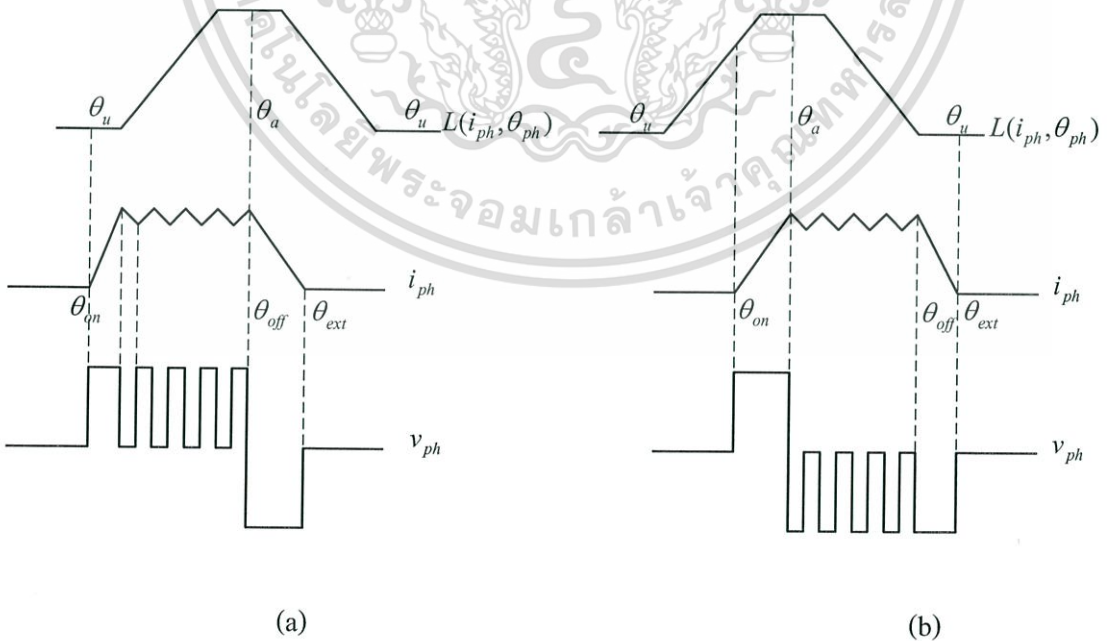
นอกจากตำแหน่งของโรเตอร์จะมีผลกับค่าความเหนี่ยวนำ (inductance, L) แล้ว ยังมีตัวแปรอีกอย่างหนึ่งที่มีผลกับค่าความเหนี่ยวนำนั่นก็คือกระแสเฟสของขดลวดสเตเตอร์ โดยความเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถเขียนเป็นเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetizing Curves) โดยเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็กของเครื่องจักรกลแต่ละตัวจะลักษณะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างและวัสดุที่นำมาใช้ทำโรเตอร์และสเตเตอร์ ตัวอย่างของเส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็กนั้นแสดงดังในรูปที่ 2.3 โดยจะแสดงความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้อย (flux Linkage, λ) จากตำแหน่งอะไลน์ (aligned position) ไปยังตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned Position) ที่ค่ากระแสต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่บริเวณตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned Position) นั้นค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวค้อยจะมีความเป็นเชิงเส้น เนื่องบริเวณนี้มีช่องอากาศสูงเนื่องจากอากาศมีความซาบซึม (permeability, μ) คงที่ [13] แต่บริเวณตำแหน่งอะไลน์นั้น จะมีความเป็นเชิงเส้นที่กระแสค่าต่ำๆ เท่านั้น เนื่องจากบริเวณนี้มีช่องอากาศแคบ ผลของแกนเหล็กต่อค่ารีลัคแตนซ์จึงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetizing Curves)

ในการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์นั้นจำเป็นต้องทำการสวิตช์จ่ายกระแสให้ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์มีค่าเป็นบวก ($\frac{dL}{d\theta} > 0$) และสำหรับการใช้งานในลักษณะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะต้องทำการสวิตช์จ่ายแรงดันให้ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์มีค่าเป็นลบ ($\frac{dL}{d\theta} < 0$) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดดังในรูปที่ 2.5

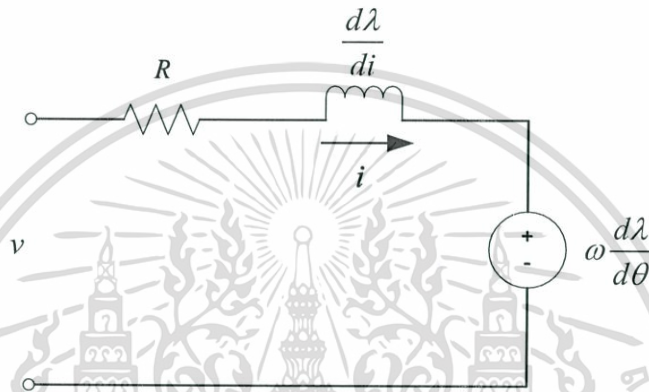


รูปที่ 2.4 ค่าความเหนี่ยวนำกับกระแสในโหมดการทำงานมอเตอร์ (a) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ นั้นสามารถทำงานเป็นได้ทั้งเครื่องกำเนิดและมอเตอร์ไฟฟ้า[1] ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมของการนำกระแสของชุดขั้วเคลื่อน โดยขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามุมของการนำกระแสจะอยู่ในช่วงที่ $\frac{dL}{d\theta} < 0$ หรือเป็นช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเป็นลบดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนการทำงานขณะที่เป็นมอเตอร์การนำกระแสจะอยู่ในช่วงที่ $\frac{dL}{d\theta} > 0$ หรือช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูล 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ทางพลวัตของ SRG ซึ่งเมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.5 สามารถเขียนสมการทางแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสดังนี้

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

เนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นจากสมการที่ (1) สามารถกระจายออกได้ดังนี้

$$v = R \cdot i + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (2)$$

หรือแทนค่า $\omega = d\theta/dt$ ใน สมการที่ (3) จะได้

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทอมที่ 3 ของสมการที่ (3) คือค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ($bemf$)

$$bemf = i\omega \frac{dL(i,\theta)}{d\theta} \quad (4)$$

โดยที่ v คือแรงดันเฟส

i คือกระแสเฟส

R คือความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

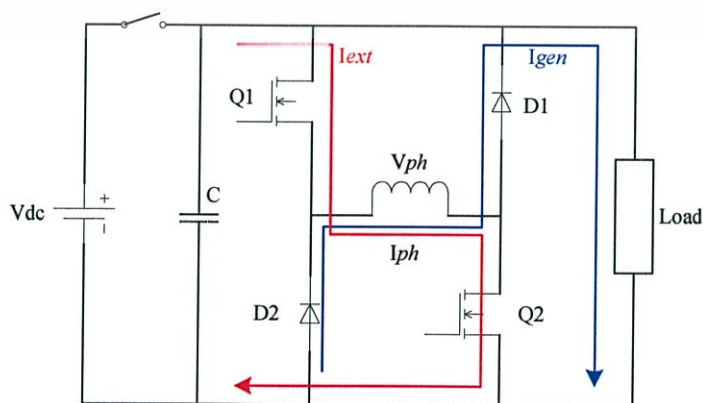
$L(i,\theta)$ คือค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส

θ คือตำแหน่งของโรเตอร์ และ ω คือความเร็วรอบของโรเตอร์

โดยปกติทิศทางการไหลของกระแสเฟสนั้นจะเป็นบวกเสมอ เนื่องจากว่าเครื่องหมายของค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับนั้นขึ้นกับค่า $\frac{dL}{d\theta}$ ซึ่งเมื่อค่า $\frac{dL}{d\theta} > 0$ แล้วค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีค่าเป็นบวก ผลทำให้กระแสมีค่าลดลง ซึ่งเป็นการทำงานในช่วงนี้จะเป็นมอเตอร์ ขณะที่ $\frac{dL}{d\theta} < 0$ นั้นค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีค่าเป็นลบ ผลจะทำให้กระแสเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการทำงานในช่วงนี้จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของโรเตอร์ (ω) และกระแสเฟส (i) ในขณะนั้น

2.4 การทำงานเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG

การอธิบายการทำงานเชิงพลวัตขณะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีลักษณะคล้ายกันกับมอเตอร์ แต่มุม turn – on จะอยู่ก่อนจุด Aligned ส่วนมุม turn – off จะอยู่ในช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำเป็นลบ และทิศทางการไหลของกระแสเฟสที่ไหลนั้นมี 2 ช่วงคือช่วงการกระตุ้นจากแหล่งจ่าย (I_{ext}) และช่วงที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่าย (I_{gen}) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



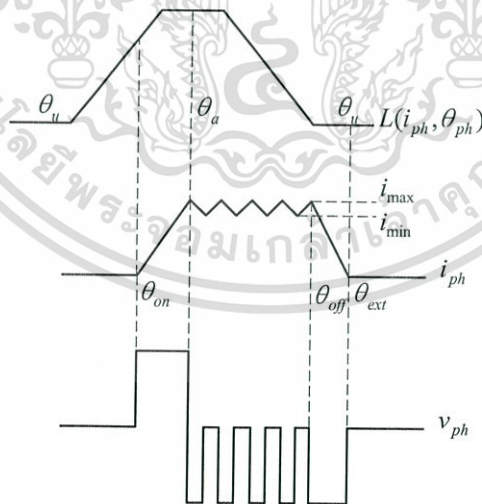
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.6 ทิศทางการไหลของกระแสเฟสขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG นี้สามารถควบคุมได้ 2 แบบซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล่าวคือ ขณะทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ SRG จะทำงานในโหมดควบคุมกระแส (Current Chopping Mode) และขณะทำงานที่ความเร็วรอบสูง SRG จะทำงานในโหมดกระแสพัลส์ (Single Pulse Mode)

2.4.1 การทำงานในโหมดควบคุมกระแส

ขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (Base Speed) นั้นแรงดันไฟฟ้าด้านกลับยังมีค่าต่ำ ทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดเฟสจะมีค่าสูง หากไม่มีการควบคุมจะทำให้เกิดความเสียหายกับตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดขับเคลื่อนได้ ในการควบคุมกระแสนั้นทำได้ 2 แบบ คือ Soft Chopping และ Hard Chopping ซึ่งการทำงานในแต่ละแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การควบคุมกระแสเฟสแบบ Soft Chopping : ในโหมดนี้หลังจากที่มุม θ_{on} สวิตช์ Q1 และ Q2 จะ turn - on ขดลวดเฟสจะได้รับแรงดันเท่ากับแรงดันที่คิซิปัส และกระแสเฟสจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดไว้ (i_{max}) หลังจากนั้นจะทำการ turn - off สวิตช์ Q1 และ Q2 แรงดันเฟสจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่คิซิปัสกลับขั้ว กระแสเฟสจะลดค่าให้ต่ำลง เมื่อกระแสลดลงถึงค่าต่ำสุด (i_{min}) แล้วจะทำการ turn - on เฉพาะสวิตช์ Q1 และ D1 เพื่อให้แรงดันเฟสลดลงเป็นศูนย์ เมื่อแรงดันเฟสลดลงกระแสเฟสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะ turn - off สวิตช์ Q1 และ Q2 อีกเพื่อควบคุมกระแสให้ต่ำลง จะเห็นได้ว่ารูปร่างของกระแสจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงระหว่างค่าสูงสุด (i_{max}) และค่าต่ำสุด (i_{min}) แสดงดังรูปที่ 2.7

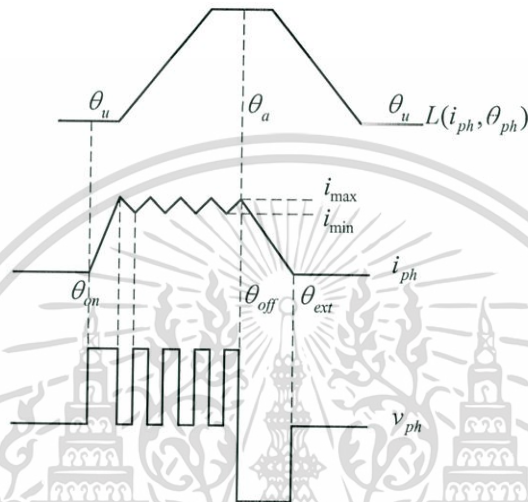


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG
ขณะทำงานในโหมด Soft Chopping

2. การควบคุมกระแสเฟสแบบ Hard Chopping : ในโหมดนี้หลังจากที่มุม θ_{on} สวิตช์ Q1 และ Q2 จะ turn - on ขดลวดเฟสจะได้รับแรงดันเท่ากับแรงดันที่คิซิปัส และกระแสเฟสจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัย ไม่สามารถเผยแพร่ไปทางอื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดไว้ (i_{max}) หลังจากนั้นจะทำการ turn-off สวิตช์ Q1 และ Q2 แรงดันเฟสจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ติชชีบัสกลับขั้ว กระแสเฟสจะลดค่าต่ำลง เมื่อกระแสลดลงถึงค่าต่ำสุด (i_{min}) แล้วจะทำการ turn-on เฉพาะสวิตช์ Q1 และ Q2 อีกเพื่อให้แรงดันเฟสเพิ่มเป็นบวกติชชีบัส เมื่อแรงดันเฟสลดลงกระแสเฟสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ จะเห็นได้ว่ารูปร่างของกระแสจะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงระหว่างค่าสูงสุด (i_{max}) และค่าต่ำสุด (i_{min}) ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเฟส เทียบกับค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส แสดงดังรูปที่ 2.8



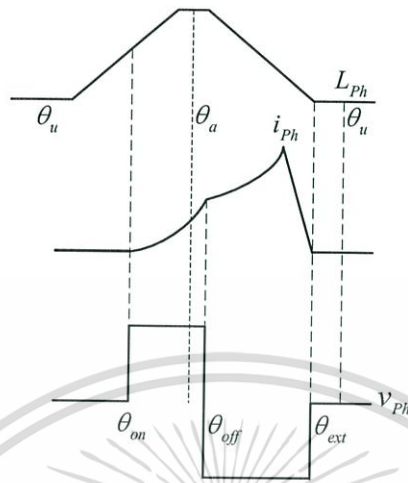
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Hard Chopping

เมื่อเปรียบเทียบการทำงานของสองโหมดที่ความถี่ในการสวิตช์เดียวกัน พบว่าการควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping นั้นจะมีกระแสกระเพื่อมสูงกว่าการควบคุมแบบ Soft Chopping มาก ดังนั้นการทำงานในโหมด Soft Chopping จะเหมาะสมกับการควบคุมกระแสในช่วงที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (Base Speed) หรือในขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG) นอกจากนี้การทำงานในโหมด Soft Chopping ยังทำให้มีเสียง (Acoustic Noise) ที่น้อยกว่า

2.4.2 การทำงานในโหมดกระแสพัลส์

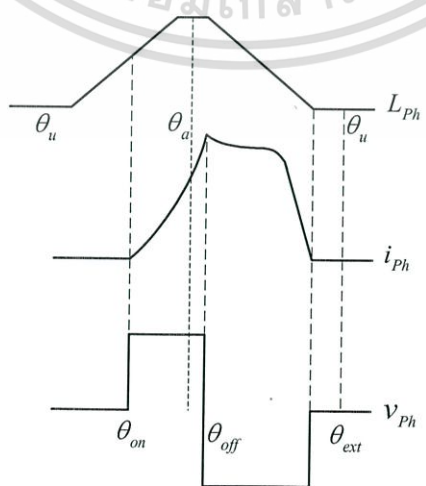
การทำงานในโหมดกระแสพัลส์นั้นค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีความสำคัญมาก เพราะจะมีผลกับรูปร่างของกระแส ดังรูปที่ 2.9 นั้นแสดงรูปร่างของกระแสหลังจากมุม θ_{off} ขณะที่แรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่ามากกว่าแรงดันติชชีบัสส่วนรูปที่ 2.10 นั้นแสดงรูปร่างกระแสหลังจากมุม θ_{off} โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าเท่ากับแรงดันติชชีบัส และในรูปที่ 2.11 นั้นแสดงกระแสเฟสหลังจากมุม θ_{off} โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าน้อยกว่าแรงดันติชชีบัส โดยทั่วไปการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานในโหมดนี้จะต้องหมุนให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด และผลของค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับที่มีค่าสูงจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่สูงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าด้านกลับมากกว่าดีซีบัส

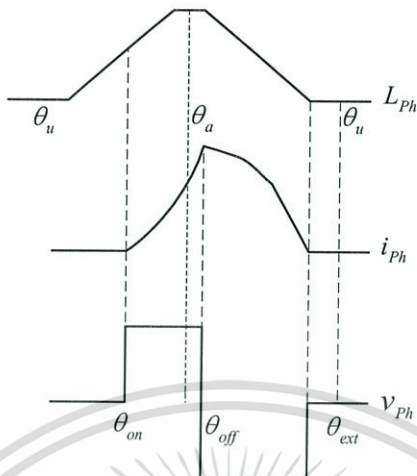
จากมุม θ_{on} จนถึงมุม θ_{off} กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นถูกส่งมาจากแหล่งจ่ายไฟดีซี ผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ไปยังขดลวดเฟสของเครื่องกำเนิด และพลังงานนี้ถูกเก็บไว้ในช่องอากาศในรูปของพลังงานแม่เหล็ก (Magnetic Energy) หลังจากมุม θ_{off} สวิตช์ กำลัง turn - off กระแสที่เรียกว่า Regenerated Current (I_{gen}) จะไหลผ่าน ไดโอด D1 และ D2 เพื่อคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่าย หรือป้อนให้กับโหลด ถ้ากำลังไฟฟ้าผลิตขึ้นได้ (Generated Power ; P_{gen}) มากกว่าพลังงานที่กระตุ้นจากแหล่งจ่าย (Excitation Power ; P_{ext})



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ในพื้นที่ของเว็บไซต์ของศูนย์วิจัยและนวัตกรรมด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้แล้ว และสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏบนเว็บไซต์ที่มีการนำไปใช้

สามารถบอกได้ว่าระบบได้ผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมดขึ้น โดยแปลงจากกำลังงานกล (Mechanical Power) ไปเป็นกำลังงานทางไฟฟ้า (Electrical Power)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SRG ขณะทำงานในโหมด Single Pulse ขณะที่แรงดันไฟฟ้าด้านกลับน้อยกว่าดีซีบัส

จากรูปที่ 2.10 สมการคำนวณหากระแสเฟสในช่วงต่างๆ ได้ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$i_{ext} = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i_{ph} d\theta \tag{5}$$

$$i_{gen} = \int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} i_{ph} d\theta \tag{6}$$

การคืนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เสมือนว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRG) นี้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าตัวหนึ่ง หากต้องการนำไปจ่ายโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดย อินเวอร์เตอร์ก่อนเสมอ

2.5 การวิเคราะห์เพื่อหากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์

กำลังไฟฟ้านเฉลี่ยคือผลรวมของกำลังเอาต์พุตของทุกเฟสรวมกันในหนึ่งรอบของการหมุน ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$P_{out} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \int_0^T v_{ph} i_{ph} dt = \frac{N}{T} \int_0^T v_{ph} i_{ph} dt \tag{7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N, T, v_{ph}, i_{ph} คือจำนวนเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, มุมของการนำกระแส, แรงดันและกระแสเฟส ตามลำดับ

$$\lambda_{ph} = \int_0^T v_{ph} dt = \begin{cases} \frac{v_{ph}}{\omega} \cdot (\theta - \theta_{on}) & \theta_{off} > \theta \geq \theta_{on} \\ \frac{v_{ph}}{\omega} \cdot (\theta_{off} - \theta_{on} - \theta) & \theta_{ext} > \theta \geq \theta_{off} \\ 0 & else \end{cases} \quad (8)$$

สำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ความเร็วมากกว่าพิกัด โดยที่แรงดันเฟสขึ้นกับมุมของการนำกระแส (Conduction Angles) ในรูปที่ 2.10 และจาก (1) เมื่อเราไม่พิจารณาแรงดันตกคร่อมขดลวดเฟส และค่าความเหนี่ยวนำแปรผันตามตำแหน่งโรเตอร์ เราสามารถคำนวณหาเส้นแรงแม่เหล็กได้ดังสมการที่(8) สมมุติว่าความเร็วโรเตอร์สูงมากจนทำให้เส้นแรงแม่เหล็กไม่สามารถอ้อมตัวได้ และค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสแปรผันตามตำแหน่งโรเตอร์อย่างเคียว แล้วสามารถหากระแสเฟสได้ดังนี้

$$i_{ph} = \frac{\lambda_{ph}}{L_{ph}(\theta)} = \begin{cases} \frac{v_{ph}(\theta - \theta_{on})}{\omega \cdot L_{ph}(\theta)} & \theta_{off} > \theta \geq \theta_{on} \\ \frac{v_{ph}(\theta_{off} - \theta_{on} - \theta)}{\omega \cdot L_{ph}(\theta)} & \theta_{ext} > \theta \geq \theta_{off} \\ 0 & else \end{cases} \quad (9)$$

เมื่อ θ_{ext} คือ ตำแหน่งที่กระแสเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์หลังจากมุม θ_{off} และสามารถหาได้จาก

$$\theta_{ext} = 2\theta_{off} - \theta_{on} \quad (10)$$

แทนสมการที่ 8 ลงในสมการที่ 7 จะสามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้จากสมการที่ (11)

$$P_{out} = \frac{N \cdot v_{ph}^2}{\omega} \left(\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} \frac{(\theta - \theta_{on}) d\theta}{L_{ph}(\theta)} - \int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} \frac{(\theta_{off} - \theta_{on} - \theta) d\theta}{L_{ph}(\theta)} \right) \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) พบว่าถ้าเราคงที่มุมของการนำกระแสแล้ว พลังงานเอาต์พุตที่ได้จะแปรผันตาม v_{ph}^2 / ω ซึ่งพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับสมการที่ (12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $P_{out} = \frac{N \cdot v_{ph}^2}{\omega} f(L_{ph}(\theta), \theta_{on}, \theta_{off}) \quad (12)$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การแปลงผันกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

ในการศึกษาการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ SRG นั้นจาก (12) พบว่ามีหลายตัวแปรที่ผลกับการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ (SRG) ซึ่งสามารถแยกได้ตามประเภทของการใช้งานดังนี้

กรณีที่ 1 : กำลังเอาต์พุตแปรผันตามมุมของการนำกระแส โดยที่ความเร็วโรเตอร์และแรงดันเฟสคงที่ ค่าความเหนี่ยวนำเฟสแปรผันตามกระแสเฟสและตำแหน่งโรเตอร์ การใช้งานในกรณีนี้คือลักษณะโดยทั่วไปเมื่อ SRG เชื่อมต่อกับกังหันก๊าซ (Gas Turbine) ทำงานที่ความเร็วคงที่และเชื่อมต่อกับยูนิตีกริด

$$P_{out} = f(\theta_{on}, \theta_{off}) \dots \omega, v_{ph} = const., \dots L = L(i_{ph}, \theta_{ph}) \quad (13)$$

กรณีที่ 2 : กำลังเอาต์พุตแปรผันตามความเร็วโรเตอร์ และมุมของการนำกระแส โดยที่แรงดันเฟสคงที่ ค่าความเหนี่ยวนำเฟสแปรผันตามกระแสเฟสและตำแหน่งโรเตอร์ การใช้งานในกรณีนี้คือลักษณะโดยทั่วไปเมื่อ SRG เชื่อมต่อกับกังหันลม (Wind Generator) ทำงานที่แรงดันคงที่และเชื่อมต่อกับยูนิตีกริด

$$P_{out} = f(\omega, \theta_{on}, \theta_{off}) \dots v_{ph} = const., \dots L = L(i_{ph}, \theta_{ph}) \quad (14)$$

กรณีที่ 3 : กำลังเอาต์พุตแปรผันตามความเร็วโรเตอร์ แรงดันเฟสและมุมของการนำกระแส โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำเฟสแปรผันตามกระแสเฟสและตำแหน่งโรเตอร์ การใช้งานในกรณีนี้คือลักษณะโดยทั่วไปเมื่อ SRG ทำงานเป็น Starter / Alternator ในรถยนต์ไฮบริดจ์ ซึ่งขั้วของ SRG เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ ซึ่งแรงดันที่ขั้วจะเปลี่ยนแปลงเวลาที่ชาร์จและ ดิสชาร์จ

$$P_{out} = f(\omega, v_{ph}, \theta_{on}, \theta_{off}) \dots L = L(i_{ph}, \theta_{ph}) \quad (15)$$

กรณีที่ 4 : กำลังเอาต์พุตแปรผันตามค่าความเหนี่ยวนำและมุมของการนำกระแส โดยที่ความเร็วโรเตอร์และแรงดันเฟสมีค่าคงที่ ในกรณีใช้ในการศึกษาผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุด

$$P_{out} = f(\omega, v_{ph}, \theta_{on}, \theta_{off}) \dots L = L(i_{ph}, \theta_{ph}) \quad (16)$$

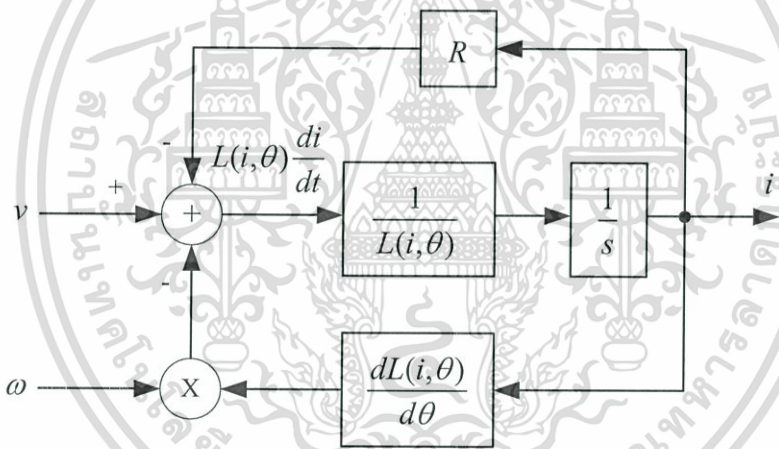
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในกรณีที่ 1 และ 2 ซึ่งผลการทดลองจะแสดงไว้ในบทที่ 5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในงานวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ เพื่อใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสเฟสที่ความเร็วและมุมนำกระแสค่าต่างๆซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นประกอบด้วย แบบจำลองของเส้นแรงแม่เหล็ก แบบจำลองของค่าความเหนี่ยวนำ และแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ เมื่อนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นมารวมกันแล้วก็จะสามารถจำลองการทำงานของ SRG ได้

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

จากสมการที่ (4) สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลอง 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

3.2 แบบจำลองค่าเส้นแรงแม่เหล็ก

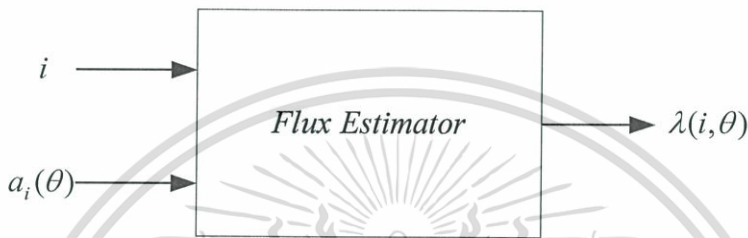
ในส่วนนี้จะวิเคราะห์การประมาณค่าเส้นแม่เหล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งสมการที่ใช้เป็นแบบโพลีโนเมียล อันดับสาม โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ $a_1(\theta)$ แสดงถึงค่าความเหนี่ยวนำแบบไม่อ้อมตัวของแกนเหล็ก ส่วนค่า $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ แสดงถึงค่าความเหนี่ยวนำแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รูปแบบของสมการเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ในฟังก์ชันโพลีโนเมียล อันดับสามนั้นแสดงในสมการที่ (17)

$$117947$$

สมการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์โดยวิธีคิวกัสไปล์นคือ

$$a_i(\theta) = a_i + b_i\theta + c_i\theta^2 + d_i\theta^3 \quad (18)$$

จากสมการที่ (17) และ (18) เมื่อทำการจำลองใน MATLAB/Simulink โดยใช้ข้อมูล ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์[2] จะได้ตัวประมาณค่าของเส้นแรงแม่เหล็กในเทอมของกระแสและสัมประสิทธิ์สไปล์นดังแสดงใน รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก

3.3 แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ

หากพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำและเส้นแรงแม่เหล็กในเทอมของกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์จะได้

$$L(i, \theta) = \frac{d\lambda(i, \theta)}{di} \quad (19)$$

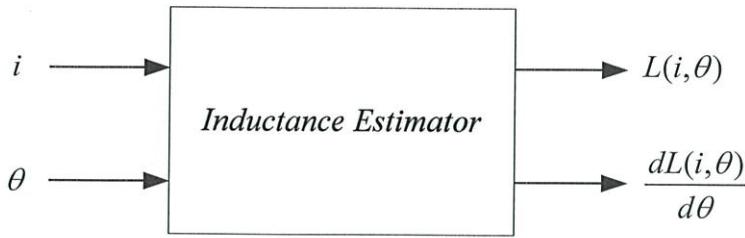
แทนค่าสมการที่ (5) ลงในสมการที่ (7) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำในเทอมของกระแสและสัมประสิทธิ์สไปล์น ดังนี้

$$L(i, \theta) = a_1(\theta) + 2ia_2(\theta) + 3i^2a_3(\theta) \quad (20)$$

และค่าของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำต่อตำแหน่งโรเตอร์นั้นสามารถหาได้โดยสมการที่ (21)

$$\frac{dL(i, \theta)}{d\theta} = \frac{da_1(\theta)}{d\theta} + 2i\frac{da_2(\theta)}{d\theta} + 3i^2\frac{da_3(\theta)}{d\theta} \quad (21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สมการที่ (20) และ (21) มาสร้างแบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 3.3 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



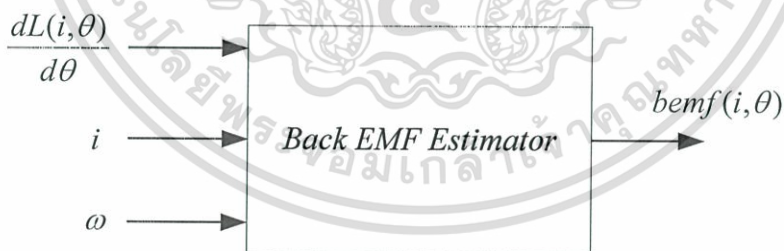
รูปที่ 3.3 แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ

3.4 แบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

การสร้างแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับนั้น พิจารณาจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3) และ (4) จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่อยู่ในเทอมของสัมประสิทธิ์สโปลน์ แสดงในสมการที่ (22) และในรูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

$$bemf(i, \theta) = i\omega \left(\frac{da_1(\theta)}{d\theta} + 2i \frac{da_2(\theta)}{d\theta} + 3i^2 \frac{da_3(\theta)}{d\theta} \right) \quad (22)$$

จากสมการที่ 22 สามารถสร้างแบบจำลองในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งตัวแปรที่นำมาใช้คำนวณประกอบด้วยกระแสเฟส ความเร็ว และค่าการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำต่อการเปลี่ยนตำแหน่งของโรเตอร์



รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

3.5 แบบจำลองค่าแรงบิด

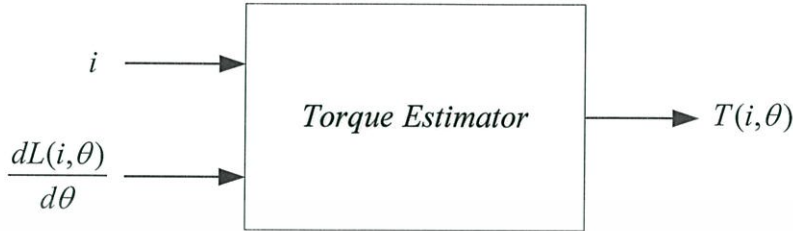
ในการสร้างแบบจำลองค่าแรงบิดนั้นพิจารณาจากสมการที่ (23) จะได้สมการแรงบิดที่อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์สโปลน์ดังนี้

$$T = \frac{d}{d\theta} \int_0^T \lambda(i, \theta) di \quad (23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{1}{2}i^2 \frac{ds_1(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{3}i^3 \frac{da_2(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{4}i^4 \frac{da_3(\theta)}{d\theta} \quad (24)$$

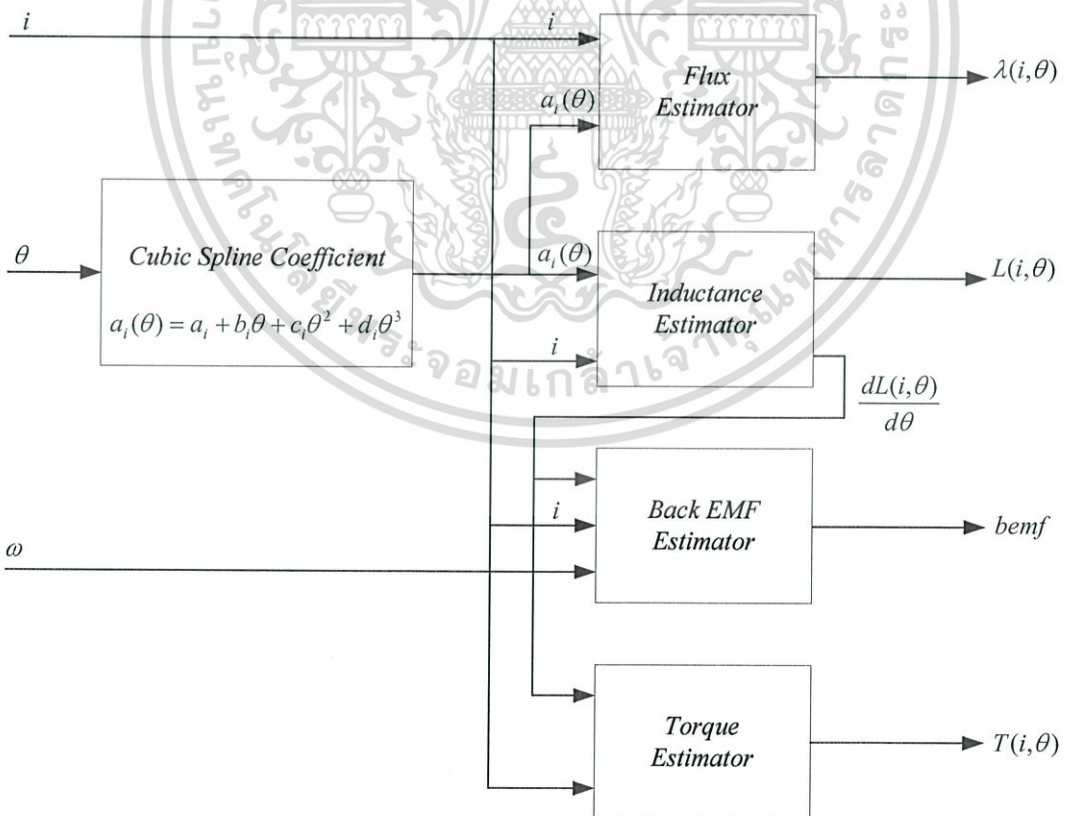
จากสมการที่ (24) สามารถสร้างแบบจำลองค่าแรงบิดได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองค่าแรงบิด

3.6 โครงสร้างของแบบจำลอง 1 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

เมื่อนำแบบจำลองทั้งหมดในข้างต้นมารวมกันเป็นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์แบบ 1 เฟสนั้นแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของแบบจำลอง 1 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

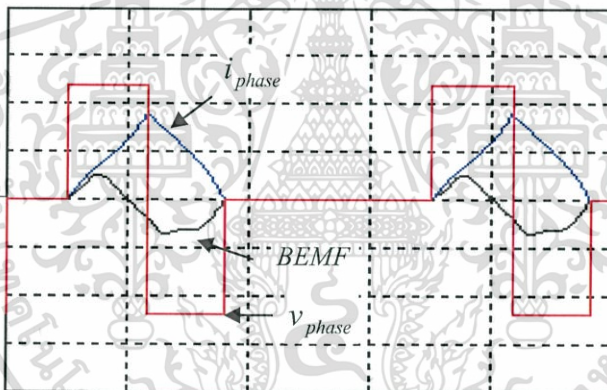
3.7 การทดสอบแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

ในการทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบดังตารางที่ 3.1 โดยจะทำการปรับมุมนำกระแสไปที่มุมหนึ่งแล้วทำการควบคุมให้ SRG ทำงานแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสเฟสซึ่งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ดังรูปที่ 3.7 ถึง 3.12

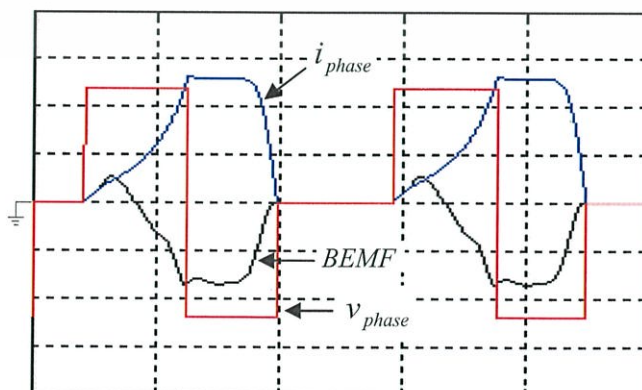
ตารางที่ 3.1

เงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

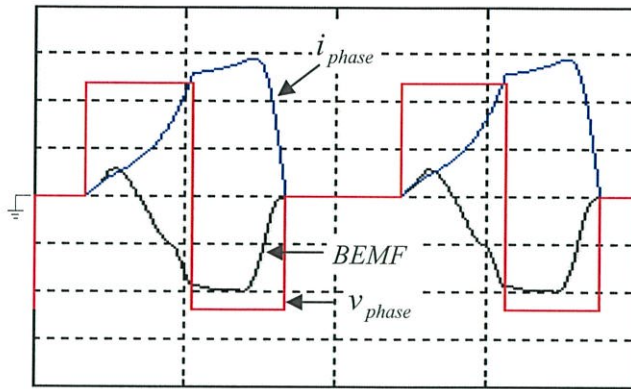
Turn-on angle [°]	Turn-off angle [°]	Rotor Speed [rpm]	Figure
15.00	45.00	5000	3.7
15.00	45.00	6000	3.8
15.00	45.00	7000	3.9
15.00	45.00	6000	3.10
15.00	45.00	7200	3.11



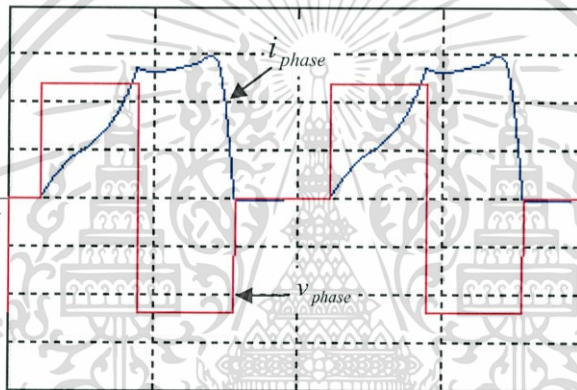
รูปที่ 3.7 กระแสเฟส แรงดันเฟส และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่ได้จากการจำลองการทำงานที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที และมุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$



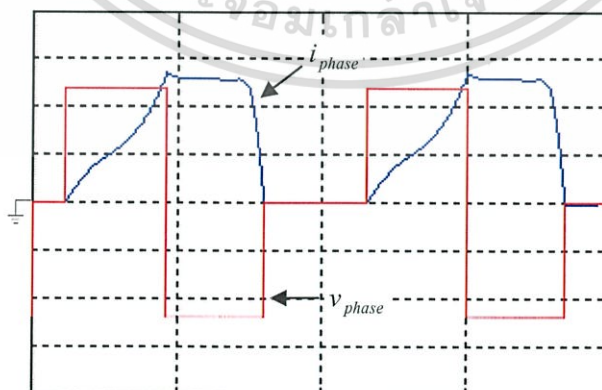
รูปที่ 3.8 กระแสเฟส แรงดันเฟส และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่ได้จากการจำลองการทำงานที่เอกสารเป็นเอกสารทสองวงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที และมุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลไปและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กระแสเฟส แรงดันเฟส และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่ได้จากการจำลองการทำงานที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที และมุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$

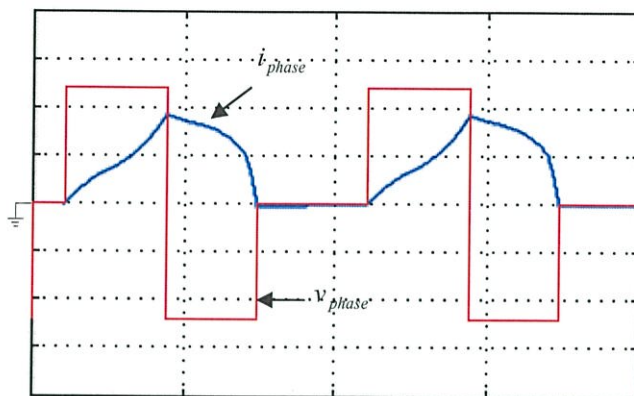


รูปที่ 3.10 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากการจำลองการทำงานที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที และมุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$



รูปที่ 3.11 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากการจำลองการทำงานที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที และมุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากการจำลองการทำงานที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที และมุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$

3.8 สรุปผลการทดสอบแบบจำลอง

จากกราฟผลการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ ที่ได้ในข้างต้นจะเห็นได้ว่า ขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัดนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับจะมีค่าน้อยลักษณะของรูปร่างกระแสเฟสแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.12 ในขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็วรอบเท่ากับพิกัดแล้วผลของแรงดันไฟฟ้าด้านกลับจะทำให้รูปร่างของกระแสเฟส ซึ่งจาก [2],[11] ได้อธิบายว่าลักษณะของกระแสเฟสแบบนี้ SRG จะให้พลังงานเอาต์พุตสูงสุด รูปร่างของกระแสเฟสนี้ได้แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.11 แต่ถ้าหากว่า SRG ทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัดตั้งแต่ 6000 รอบต่อนาทีไปแล้ว ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับจะมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีบัส แล้วรูปร่างของกระแสเฟสจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

จากผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าสามารถใช้สัมประสิทธิ์สไปลน์ ในการประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็ก, ค่าความเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าด้านกลับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ได้ ซึ่งประโยชน์ของการสร้างแบบจำลองนี้เพื่อเป็นแนวทาง ในการออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRG) ต่อไปในอนาคต

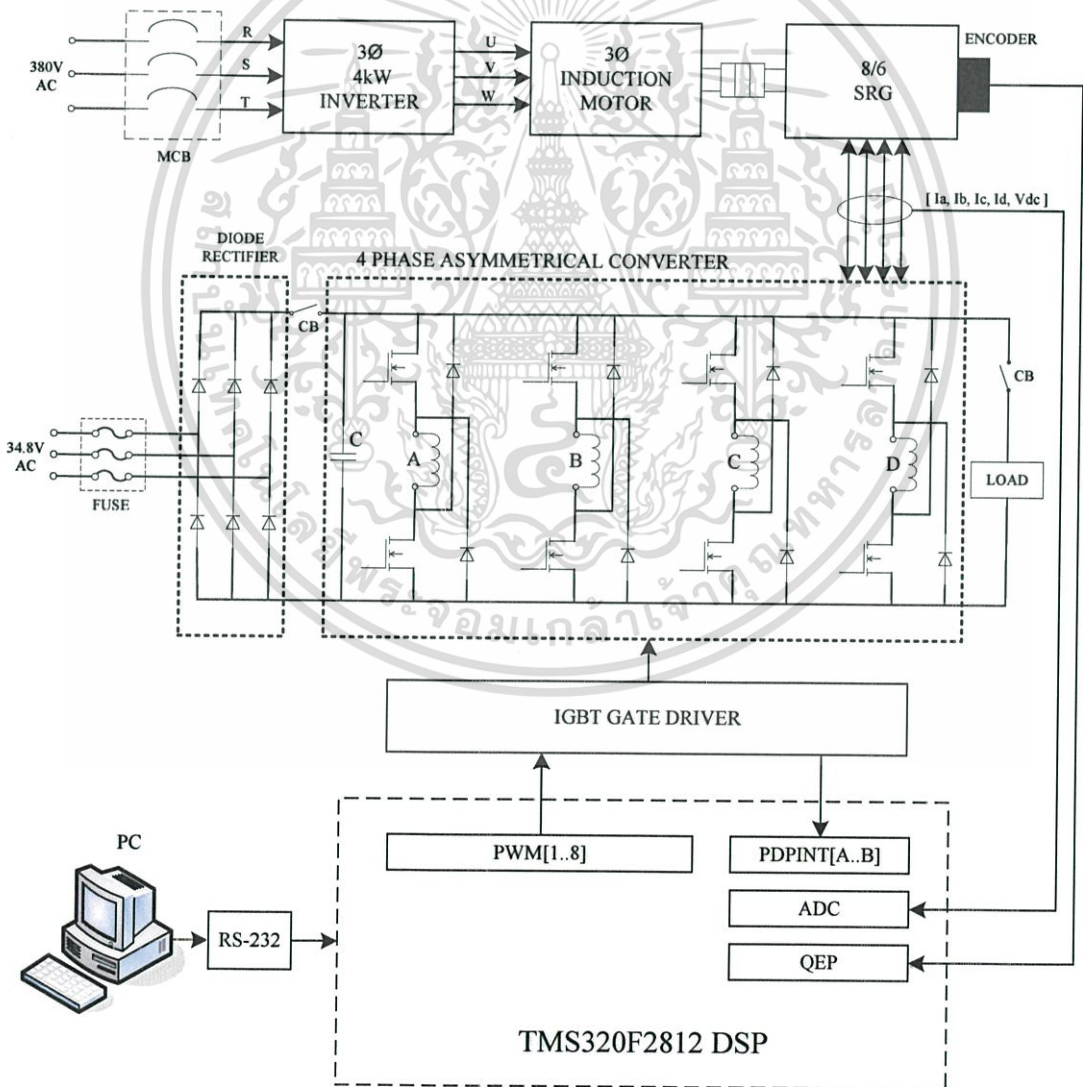
นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRG) ที่สร้างขึ้นนี้กับเครื่องจักรกลประเภทเดียวกันตัวอื่นๆได้โดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์สไปลน์ ให้เป็นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวใหม่และกำหนดมุมในการทำงาน ใหม่ตามลักษณะ โครงสร้าง ก็สามารถใช้ได้กับแบบจำลองนี้ได้

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างระบบควบคุม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมและวงจรกำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ ซึ่งประกอบด้วยชุดขับอินดักชันมอเตอร์ควบคุมความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ คอนเวอร์เตอร์กำลังแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Converter) ชุดขับนำเกต และตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) โครงสร้างโดยรวมดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1



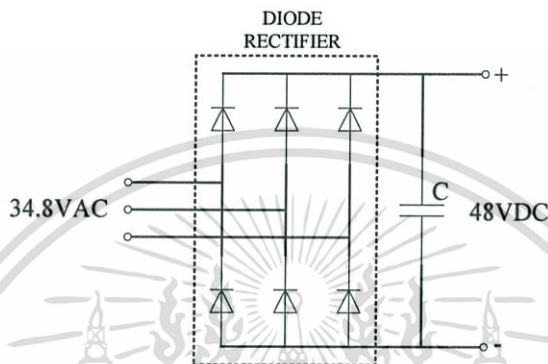
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างวงจรสำหรับควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์

4.2.1 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส

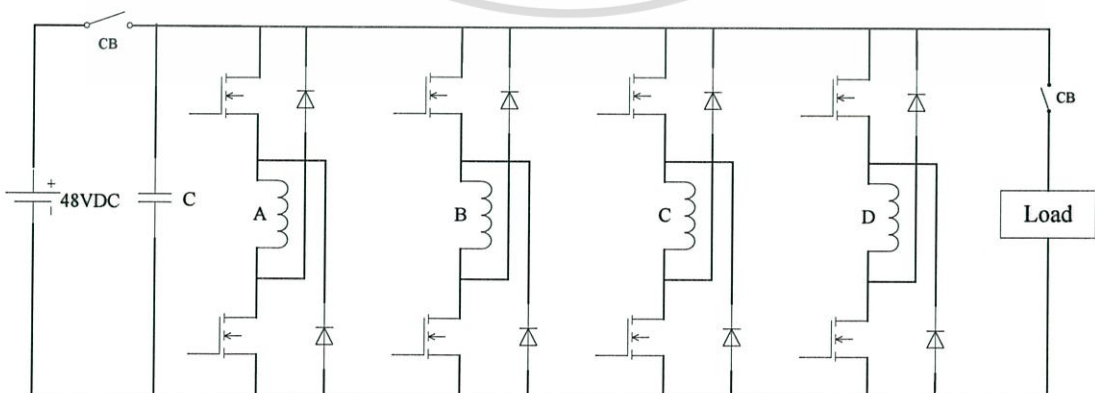
เนื่องจากพิกัดแรงดันของตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนี้นั้นมีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ดีซี ดังนั้นจึงได้สร้างวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบ 3 เฟสโดยใช้ไดโอดกำลังเบอร์ DF40AA120 เป็นตัวเรียงกระแสแบบ 3 เฟส โดยที่ปรับแรงดันเอซีด้านอินพุทไว้ที่ 34.8 โวลต์ เพื่อที่จะได้แรงดันกระแสตรงเท่ากับ 48 โวลต์ วงจรเรียงกระแส 3 เฟสนี้แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์

4.2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบไม่สมมาตร

วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังสำหรับขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์แบบ 8/6 ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่พิกัดแรงดัน 48 โวลต์ นั้นได้เลือกใช้ IGBT Module เบอร์ CM200DY-12NF ของบริษัท POWEREX ซึ่งมีพิกัดกระแส 200 แอมป์ และแรงดันพิกัดที่ 600 โวลต์ และเนื่องจากว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบ 4 เฟส ใน 1 เฟสจะใช้ IGBT จำนวน 2 ตัว ดังนั้น จึงใช้ IGBT ทั้งหมดจำนวน 8 ตัว ต่ออยู่บนดิซิบัสเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

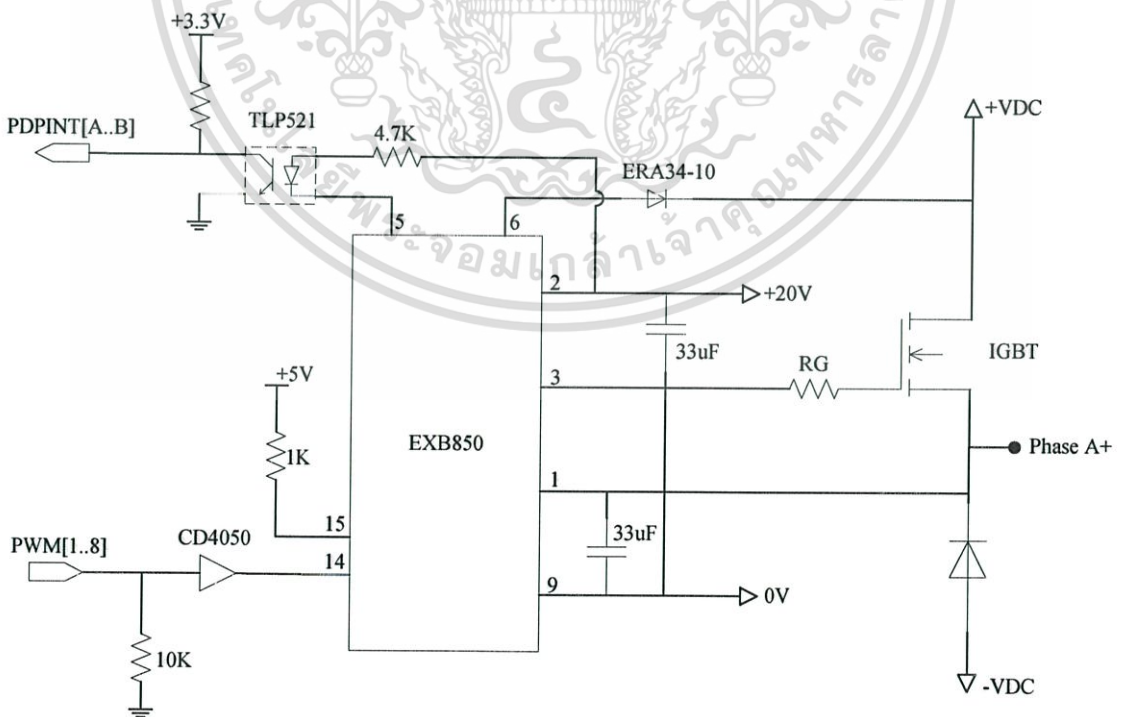
4.2.3 วงจรขับเกทและวงจรป้องกันกระแสเกินสำหรับไอจีบีทีกำลัง (IGBT Driver and Over Current Protection Circuit)

สำหรับวงจรขับนำเกทนั้นได้เลือกใช้ตัวขับเกทของ Fuji Electric เบอร์ EXB850 ซึ่งสามารถขับ IGBT Module ได้ขณะที่กระแสไหลได้สูงสุด 150 แอมป์ที่แรงดันพิกัด 600 โวลต์ดังรายละเอียดในตารางที่ 4-1 และนอกจากนี้ยังมีวงจรป้องกันกระแสเกิน(Over Current Detection) อยู่ภายในตัวโดยที่สัญญาณป้องกันนี้จะถูกส่งไปที่ขา PDPINTA สำหรับ PWM1-6 และ PDPINTB สำหรับ PWM7-8 ซึ่ง PDPINTA และ PDPINTB นี้จะเป็นอินเทอร์รัพท์ลำดับสูงสุดของ DSP เบอร์ TMS320F2812 ที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับ IGBT Module วงจรขับนำเกทและวงจรป้องกันกระแสเกินนี้แสดงดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.1

ค่าความต้านทานที่ขาเกท (RG) เทียบกับกระแสสูงสุดของ IGBT เบอร์ EXB850

พิกัดกระแส (IGBT)	600 V	10A	15A	30A	50A	75A	100A	150A
	1200V	-	8A	15A	25A	-	50A	75A
RG	-	250Ω	150Ω	32Ω	50Ω	33Ω	25Ω	15Ω

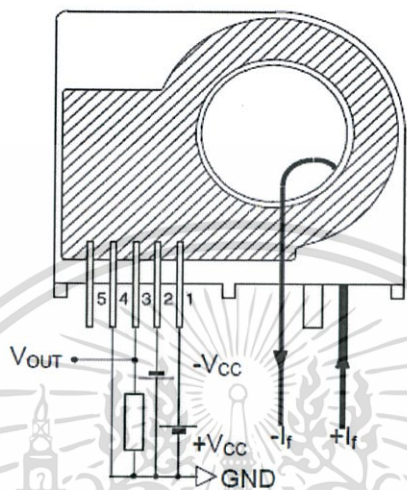


รูปที่ 4.4 วงจรขับนำเกทและวงจรป้องกันกระแสเกินสำหรับ IGBT Module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

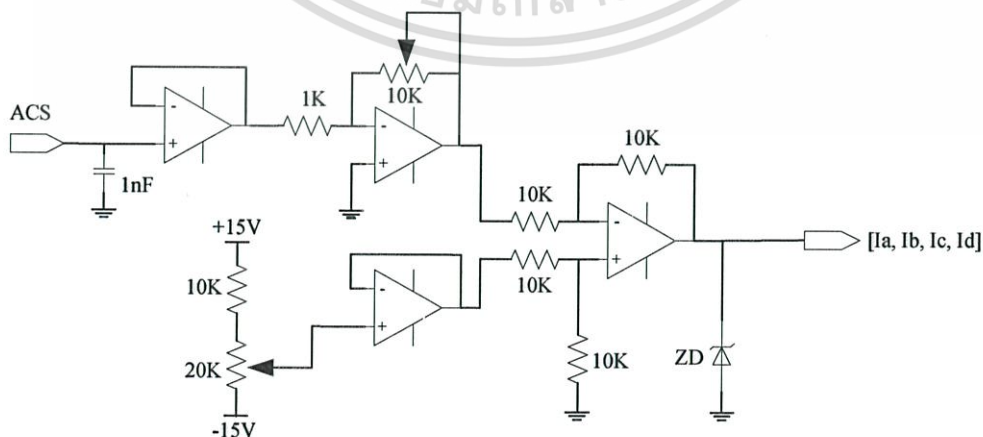
4.2.4 ชุดวงจรวัดกระแส (Current Sensor Circuit)

วงจรวัดกระแสนั้นได้ใช้ตัววัดกระแสแบบ Hall Effect Current Sensor ของบริษัท Tamura เบอร์ L08P150D15 ขนาดพิกัด 150 แอมป์ ซึ่งในการทำงานต้องใช้แหล่งจ่ายขนาด ± 15 โวลต์ และแรงดันเอาต์พุตขณะที่ไม่มีการไหลของกระแสจะอยู่ที่ 0 โวลต์ วงจรการใช้งานของตัววัดกระแสดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตัววัดกระแสเบอร์ L08P150D15

เนื่องจากว่าแรงดันที่ช่อง ADC ของตัว DSP นั้นรับแรงดันได้ในช่วง 0-3 โวลต์ที่ดีซึ่งนั่นเราจึงจำกัดแรงดันไม่ให้เกิน 3 โวลต์ที่ช่อง ADC นั้นได้ใช้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N5225B และนอกจากนี้ในวงจรขยายและวงจรกรองความถี่ในย่านต่ำ (Low Pass Filter) โดยใช้อปแอมป์เบอร์ TL082 ซึ่งเป็นไปตามวงจดังรูปที่ 4.6

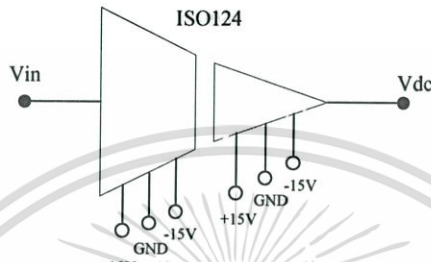


รูปที่ 4.6 วงจรวัดกระแสเฟส (Ia, Ib, Ic, Id) สำหรับช่อง ADC ของ DSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

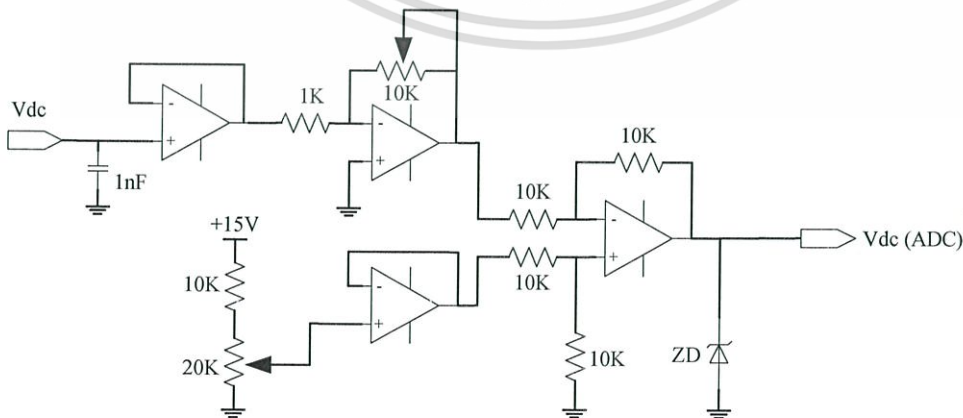
4.2.5 วงจรวัดแรงดัน (Voltage Sensor Circuit)

วงจรวัดแรงดันดีซีนั้นได้ใช้ตัววัดแรงดันของบริษัท BURR-BROWN เบอร์ ISO124 ซึ่งในการทำงานต้องใช้แหล่งจ่ายขนาด ± 15 โวลต์ 2 ชุดแบบแยกกราวด์ สำหรับภาคอินพุทและภาคเอาต์พุท ซึ่ง ISO124 นี้สามารถทนแรงดันสูงสุดระหว่าง 2 ภาคได้ 1500 โวลต์ มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1 พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุทและเอาต์พุทของ ISO124 นั้นมีค่าเท่ากับ ± 10 โวลต์ ซึ่งรายละเอียดของ ISO124 ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตัววัดแรงดันไฟฟ้าเบอร์ ISO124

และเนื่องจากว่าช่องรับสัญญาณอะนาล็อก (ADC) ของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) นั้นรับแรงดันดีซีสูงสุดได้ 3 โวลต์ ดังนั้นในวงจรวัดแรงดันจำเป็นต้องมีการปรับลดขนาดของแรงดันลงและควบคุมให้อยู่ในช่วง 0-3 โวลต์ ในการออกแบบได้เลือกใช้อปแอมป์เบอร์ TL082 เป็นตัวขยายสัญญาณที่ได้จากตัววัดแรงดัน ISO124 และเพื่อป้องกันแรงดันไม่ให้เกิน 3 โวลต์ ได้เลือกใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5225B ในส่วนเอาต์พุทก่อนจะเข้าที่ช่อง ADC ด้วย วงจรดังกล่าวนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8

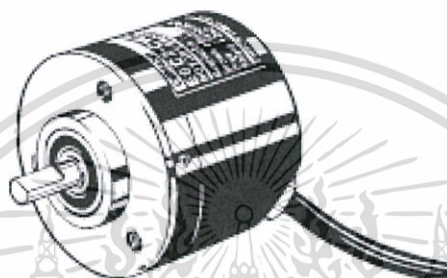


รูปที่ 4.8 วงจรวัดแรงดันดีซีบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ (Incremental Encoder)

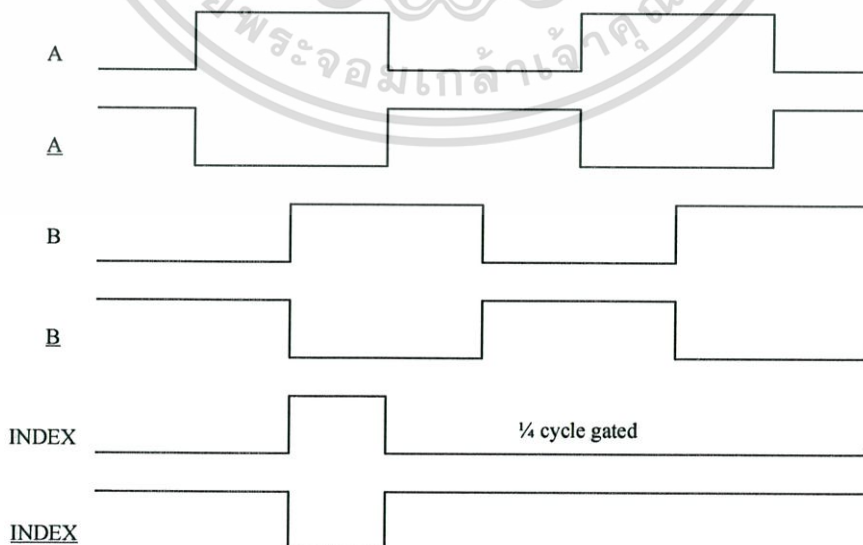
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งแบบ Incremental Encoder เบอร์ R137S ของบริษัท Gurley Precision Instruments ลักษณะทั่วไปของเอ็นโค้ดเดอร์นี้แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งขณะทำงานเมื่อหมุน 1 รอบจะมีเอาต์พุตออกมา 2 เฟสคือ เฟส A และ B โดยแต่ละเฟสจะมีพัลส์เอาต์พุต 3600 พัลส์ และทุกๆรอบของการหมุนจะมีสัญญาณอ้างอิง (INDEX) 1 พัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งในการทำงานต้องการแหล่งจ่าย +5 โวลต์เป็นไฟเลี้ยง รูปร่างของสัญญาณจะมีสองเฟส คือ A และ B จะต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 เอ็นโค้ดเดอร์ เบอร์ R137 ของบริษัท Gurley Precision Instrument

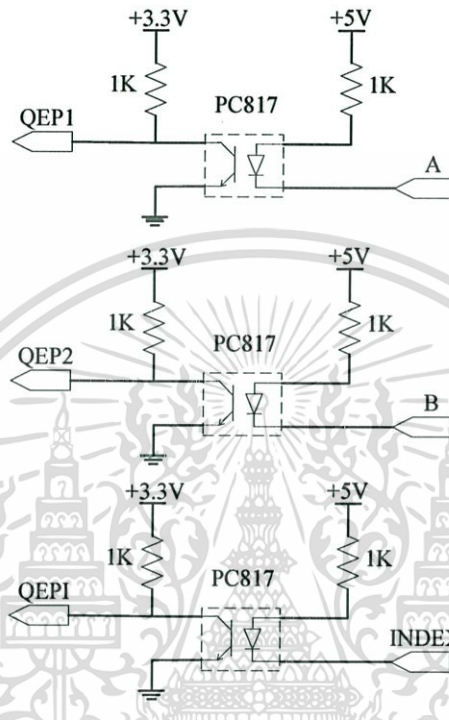
สัญญาณ Index ที่ออกมาจากตัวเอ็นโค้ดเดอร์นี้จะทำหน้าที่ในการรีเซ็ตคานับ (Counter) ในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ให้มีค่ากลับมาเป็นศูนย์ในทุกรอบของการหมุน

(CW Rotation Direction)



4.2.7 วงจรวัดความเร็ว (Speed Sensor Circuit)

วงจรวัดความเร็วรอบนี้ใช้ไอซี Opto-coupler เบอร์ PC817 ในการแยกกราวด์และลดระดับแรงดันให้เท่ากับ 3.3 โวลต์ ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่ในการแยกแวกระหว่างตัวเซ็นโค้ดเดอร์กับพอร์ต QEP ของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ซึ่งรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรวัดความเร็ว

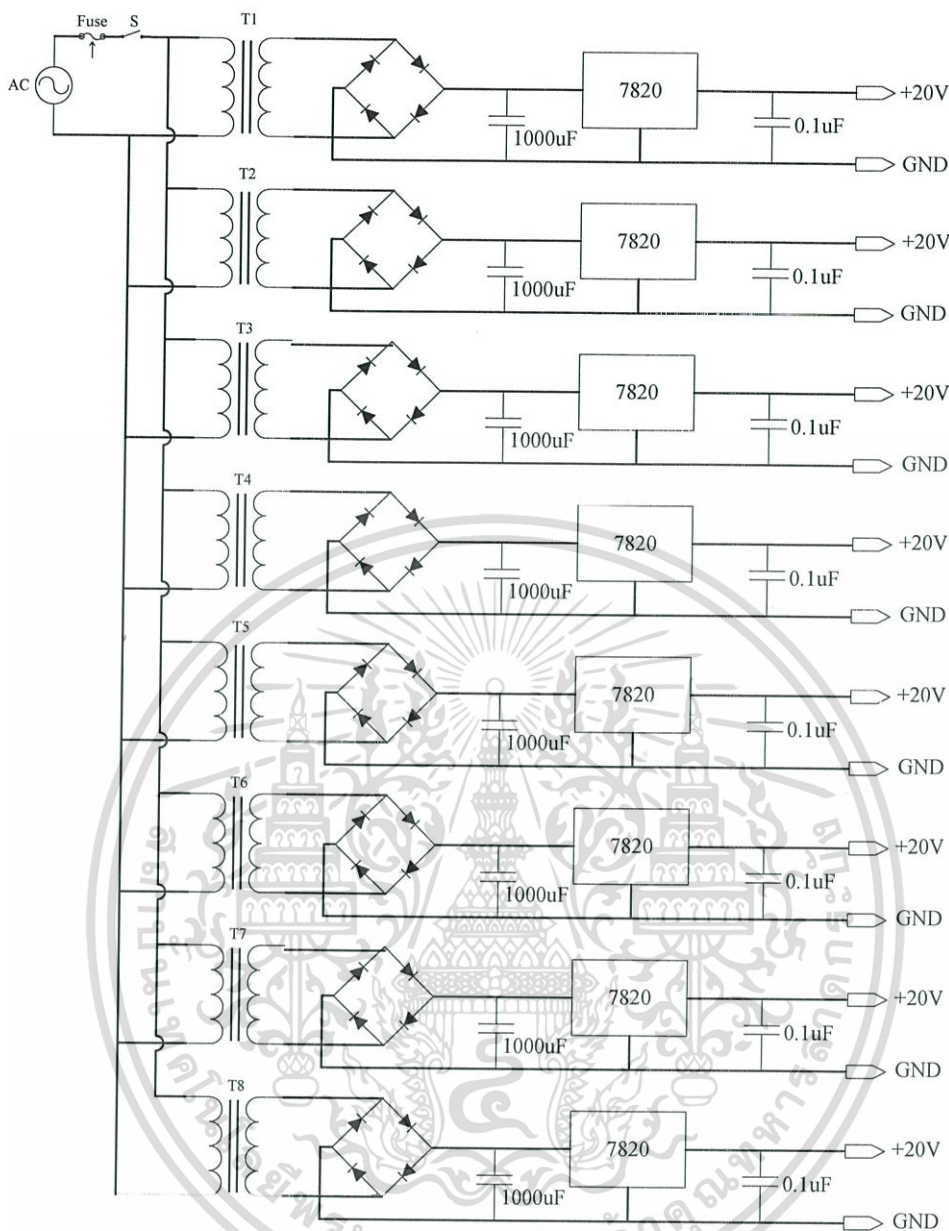
4.2.8 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuits)

การสร้างวงจรเรียงกระแสไฟดีซีสำหรับภาคการควบคุมนั้นจะประกอบด้วยดังต่อไปนี้คือ

1. วงจรเรียงกระแสไฟดีซีสำหรับไอซีขับเกทของ IGBT เบอร์ EXB850 ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงดัน +20 โวลต์ จำนวน 8 ชุด ในวงจรในแต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้
 - 1.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบลดแรงดันขนาด 220/24 โวลต์ จำนวน 1 ลูก
 - 1.2 ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์ เบอร์ KBP206G จำนวน 1 ตัว
 - 1.3 คาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์แบบอิเล็กโตไลต์ ขนาด 2,200 ไมโครฟารัด จำนวน 1 ตัว
 - 1.4 ไอซีเรกกูเรเตอร์ เบอร์ 7820 จำนวน 1 ตัว
 - 1.5 คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise filter) ขนาด 0.1 ไมโครฟารัด

สำหรับชุดวงจรเรียงกระแสสำหรับไอซีขับนำเกทนี้ได้เขียนรวมเป็นลายวงจรบนแผ่น PCB เดียวกัน และเชื่อมต่อกับวงจบบีบเกทด้วยสายไฟดีเกิลยวเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจาก

เอกสารกำลังจะทำงาน รายละเอียดของวงจรเรียงกระแสไฟตรงดังกล่าวนี้แสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

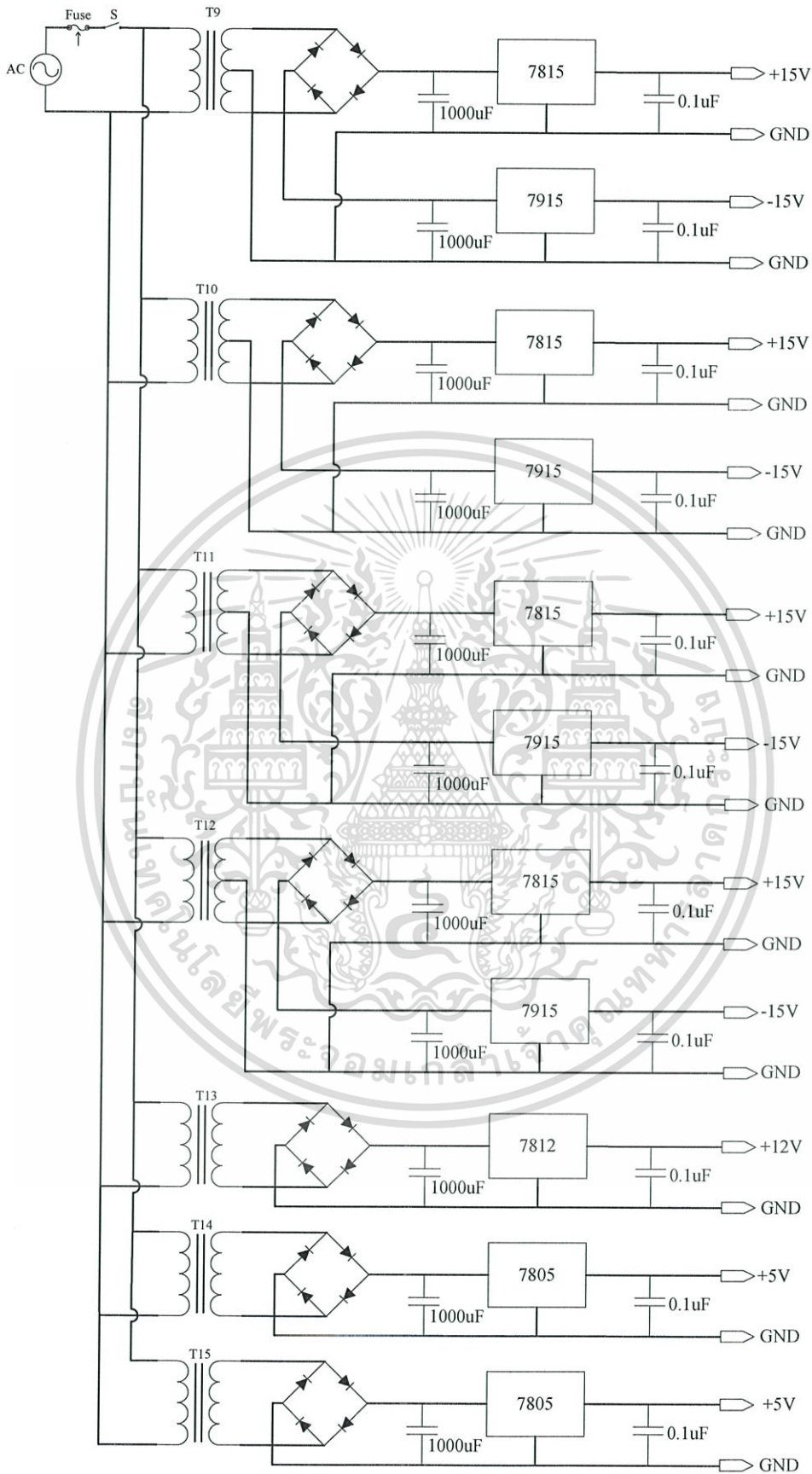


รูปที่ 4.12 วงจรเรียงกระแสไฟตรงคิซี 20 โวลต์สำหรับวงจรขั้วนำเกต

2. วงจรเรียงกระแสไฟคิซีสำหรับวงจรวัดกระแส, วัดแรงดัน, วงจรวัดความเร็ว, วงจรไอซี บัพเฟอร์แรงดัน และวงจรพัฒนาขยายความร้อน ในรูปที่ 4.13 ซึ่งต้องการไฟตรงขนาด ± 15 โวลต์, +12 โวลต์ และ +5 โวลต์ ตามลำดับ ชุดวงจรนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

- 1.1 หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/15-0-15 โวลต์, 220/15 โวลต์ และ 220/9 โวลต์
- 1.2 ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์ เบอร์ KBP206G
- 1.3 คาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์แบบอิเล็กโตไลต์ ขนาด 2,200 ไมโครฟารัด
- 1.4 ไอซีเรกูเลเตอร์ เบอร์ 7815, 7915, 7812 และ 7805

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 4.13 ชุดวงจรเรียงกระแสสำหรับวงจรวัดกระแสและวัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาอื่นใดที่มีอยู่ ผู้ใช้ประโยชน์จากการคัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์หรือผู้ถือลิขสิทธิ์อื่น ๆ อาจมีความผิดตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง ผู้ใช้ควรตรวจสอบและปฏิบัติตามข้อกำหนดการใช้งานของเอกสารฉบับนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing , DSP)

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812 ของบริษัท Texas Instruments ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้คือ

- ความเร็วของตัวประมวลผล 150 MHz. (6.67 nS. / cycle time)
- ตัวประมวลผลขนาด 32 บิต สถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard Bus Architecture)
- มีพอร์ตเอาต์พุตสำหรับสร้าง PWM จำนวน 16 พอร์ต
- มีพอร์ตรองรับสัญญาณอะนาล็อก จำนวน 16 พอร์ต
- มีพอร์ตรองรับสัญญาณจากเอ็นโคเดอร์ แบบ Incremental Encoder ได้จำนวน 2 ชุด



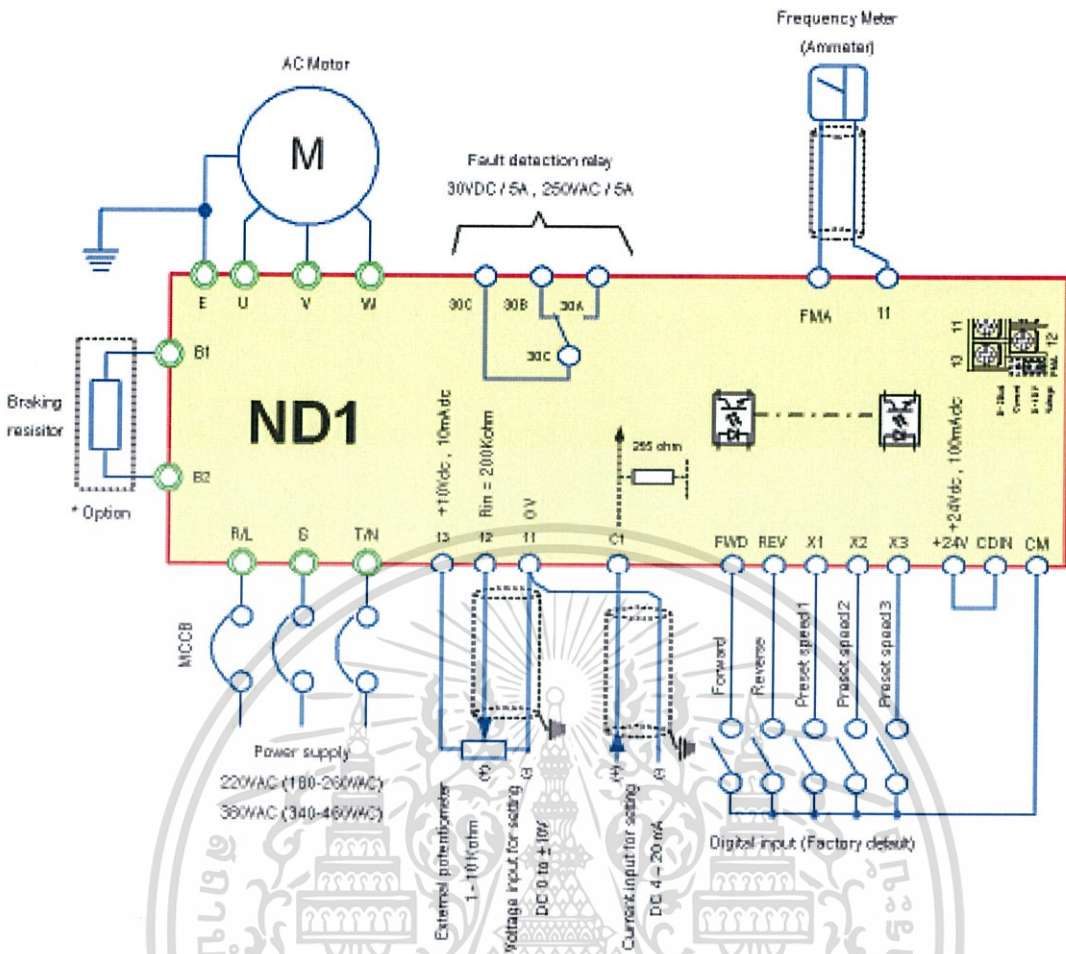
รูปที่ 4.14 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812

4.4 ตัวปรับความเร็วรอบสำหรับอินดักชันมอเตอร์แบบ 3 เฟส (3 Phase Inverter)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ อินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส 380 โวลท์ พิกัดกระแส 11 แอมป์ ขนาดกำลัง 5.5 แรงม้า เบอร์ ND1-4-5A5 ของบริษัท Novem Engineering ซึ่งสามารถปรับความเร็วสำหรับอินดักชันมอเตอร์ได้ตั้งแต่ 0-200 เฮิร์ต ลักษณะทั่วไปของอินเวอร์เตอร์นี้ดังในรูปที่ 4.19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดย **รูปที่ 4.15** อินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส เบอร์ ND1-4-5A5 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แผงวงจรการต่อของอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส เบอร์ ND1-4-5A5

4.5 อินдукชันมอเตอร์แบบ 3 เฟส (3 Phase Induction Motor)

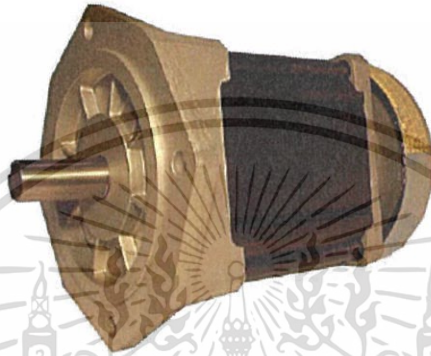
ในส่วนมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนกำลังไฟฟ้านั้น ได้เลือกใช้อินдукชันมอเตอร์ (Induction Motor) รุ่น M2QA112M2A ของบริษัท ABB ซึ่งมีพิกัดต่างๆ คือ แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 380 โวลต์, กำลังไฟฟ้า 4 กิโลวัตต์, 2 ขั้วแม่เหล็ก ความเร็วพิกัด 3,000 รอบต่อนาที ลักษณะของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 4.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.17 อินдукชันมอเตอร์ (Induction Motor) แบบ 3 เฟส ขนาด 4 กิโลวัตต์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

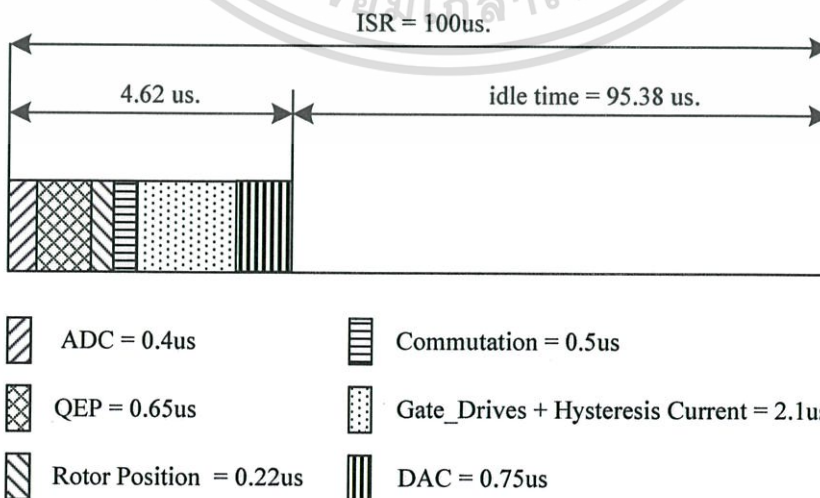
สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 รุ่น RA165187 ของบริษัท Motion System Technology (ประเทศญี่ปุ่น) ซึ่งมีพิกัดต่างๆ ดังนี้คือ แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 48 โวลต์, กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2.2 กิโลวัตต์, ความเร็วพิกัดเท่ากับ 6,000 รอบต่อนาที, ความเร็วสูงสุดที่ 12,000 รอบต่อนาที, แรงบิดพิกัดและแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 3.69 และ 4.20 นิวตัน-เมตร ตามลำดับ ลักษณะโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 4.22



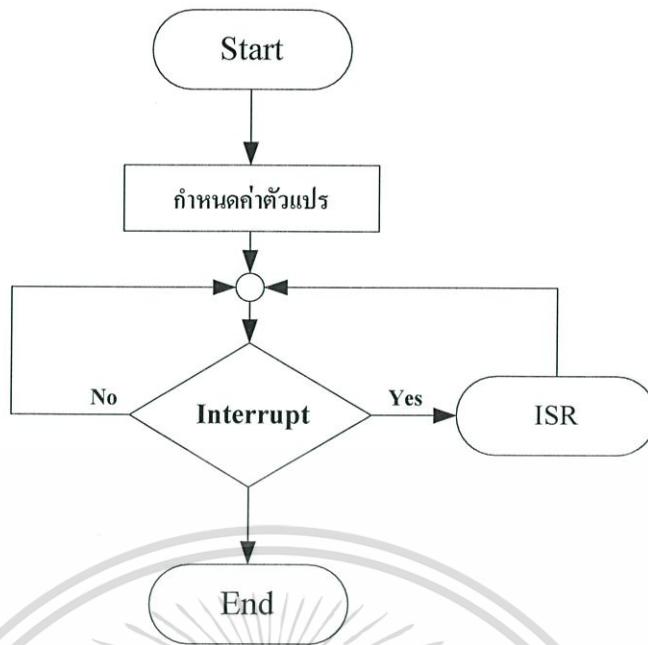
รูปที่ 4.18 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 รุ่น RA165187

4.3 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

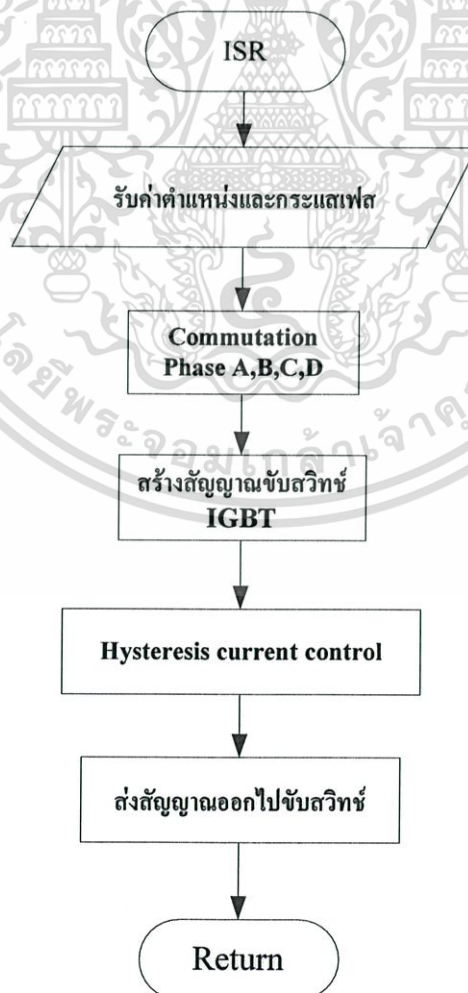
ในการเขียน โปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานนั้นกำหนดให้ใช้ความถี่ในการสวิตซ์เท่ากับ 10 kHz. ดังนั้นการทำงานของโปรแกรมจะทำการขัดจังหวะ (Interrupt) ทุกๆ 0.1 วินาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงโปรแกรมหลักสำหรับควบคุมการทำงานของ SRG



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งรูปที่ 4.21 แสดงโปรแกรม Interrupt สำหรับควบคุมการทำงานของ SRG ที่มีกรนำไปใช้

บทที่ 5

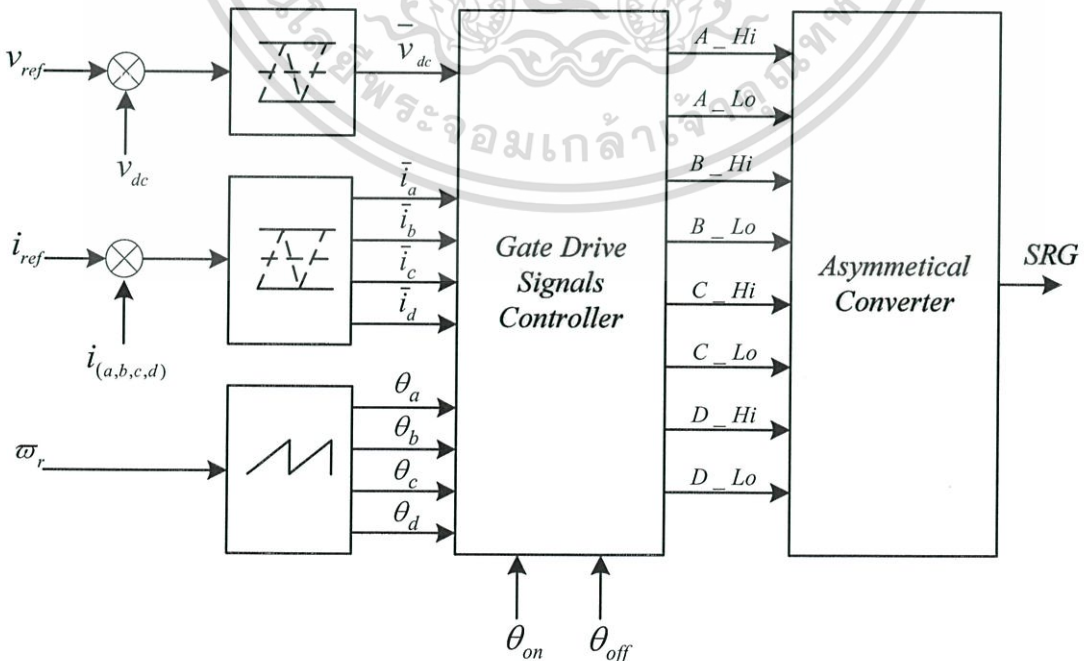
ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบการทำงาน ซึ่งประกอบด้วยผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulated Results) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสเฟสขณะที่เปลี่ยนมุมนำกระแสที่ความเร็วต่างๆ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และผลที่ได้จากการทดสอบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์(Experimental Results) ซึ่งควบคุมโดยใช้ตัวประมวลผลดิจิทัลเบอร์(DSP) TMS320F2812 โดยที่บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงานนั้นแสดงดังรูปที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของ SRG ที่ใช้ในการทดสอบนั้นแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในการทดสอบ

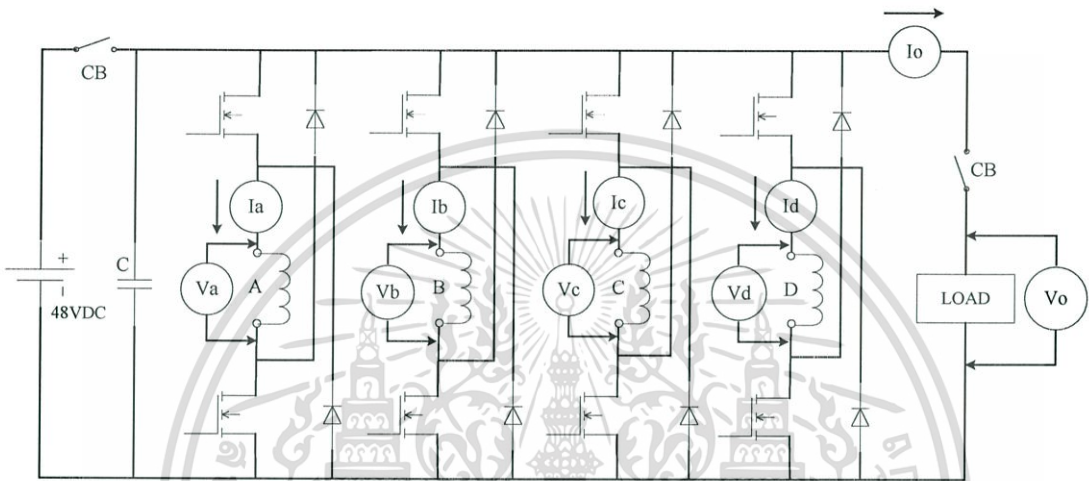
Number of Phase : 4	Rated Power : 2.2 kW
Rated Voltage : 48V	Phase Resistance : 15mΩ
Base Speed : 6000 rpm	La : 340uH
Pole Configuration : 8/6	Lu : 62uH



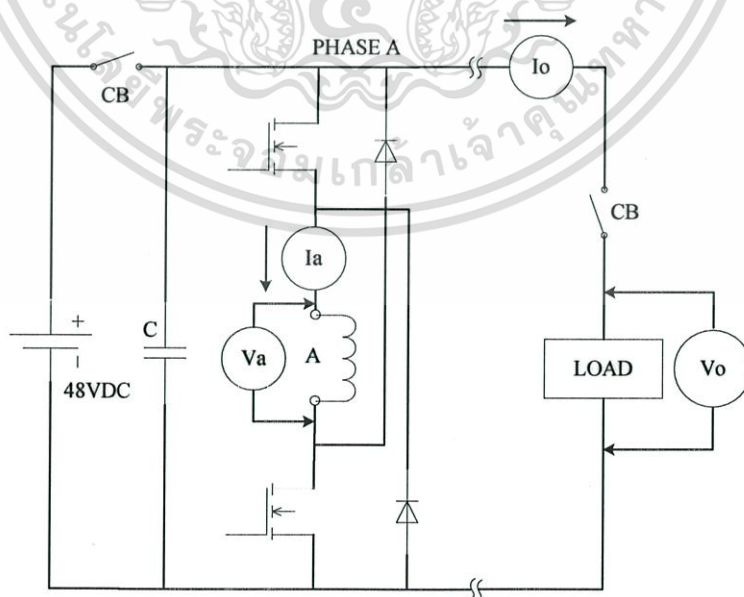
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 วงจรการทดลอง

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์นั้น ได้วัดค่ากระแสเฟส แรงดันเฟสทั้ง 4 เฟส พร้อมกับกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ SRG จ่ายให้กับโหลด ซึ่งในระบบควบคุมที่สร้างขึ้นนั้น ได้ติดตั้งวงจรสำหรับวัดดังกล่าวมาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจากรูปที่ 5.2 ได้แสดงวงจรที่จะใช้ในการวัดค่าไว้ สำหรับรูปที่ 5.3 แสดงวงจรของการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเฟส A เทียบกับกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ SRG จ่ายให้กับโหลด



รูปที่ 5.2 วงจรของการวัดค่ากระแสเฟส แรงดันเฟสทั้ง 4 เฟส พร้อมกับกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ SRG จ่ายให้กับโหลด



รูปที่ 5.3 วงจรของการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเฟส A เทียบกับกระแสและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีศึกษาเพื่อวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 แรงดันไฟฟ้าที่ SRG จ่ายให้กับโหลด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

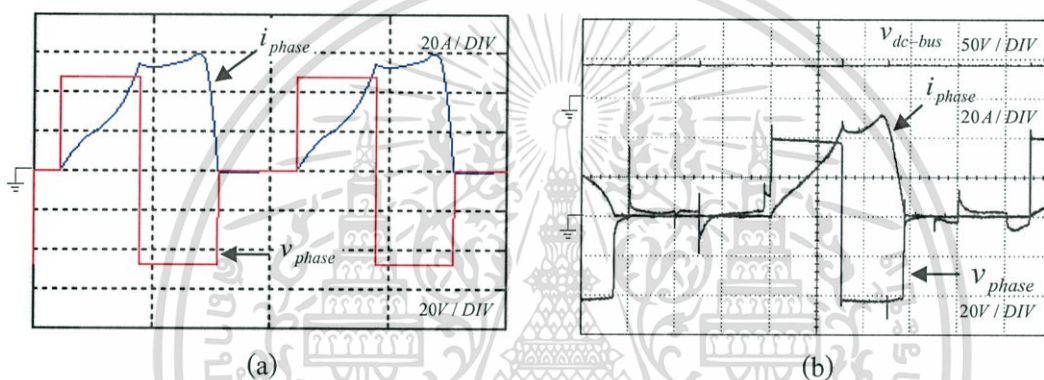
โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีดังนี้

1. Digital Oscilloscope สำหรับวัดกระแสและแรงดันเฟส ($I_a, I_b, I_c, I_d, V_a, V_b, V_c, V_d$)
2. Ammeter สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าที่ SRG จ่ายให้กับโหลด (I_o)
3. Voltmeter สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าคิซีที่คร่อมโหลด (V_o)

และเนื่องจาก SRG ถูกออกแบบมาให้แต่ละเฟสนั้นมีความต้านทานของขดลวดเฟสเท่ากันดังนั้น ในการทดลองจึงสามารถนำรูปคลื่นของกระแสและแรงดันเฟสเพียงเฟสเดียวมาวิเคราะห์ได้

5.2 เปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสกับผลจากแบบจำลอง

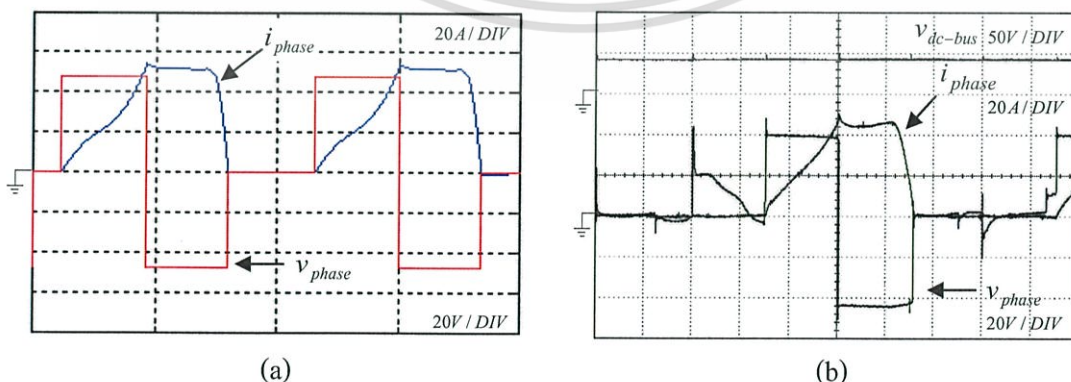
5.2.1. ขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสขณะที่ SRG ทำงานที่ 7200 รอบต่อนาที

- (a) ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- (b) ผลจากการทดสอบการทำงานจริงของ SRG แบบ 8/6

5.2.2 ขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสขณะที่ SRG ทำงานที่ 6000 รอบต่อนาที

- (a) ผลจากทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

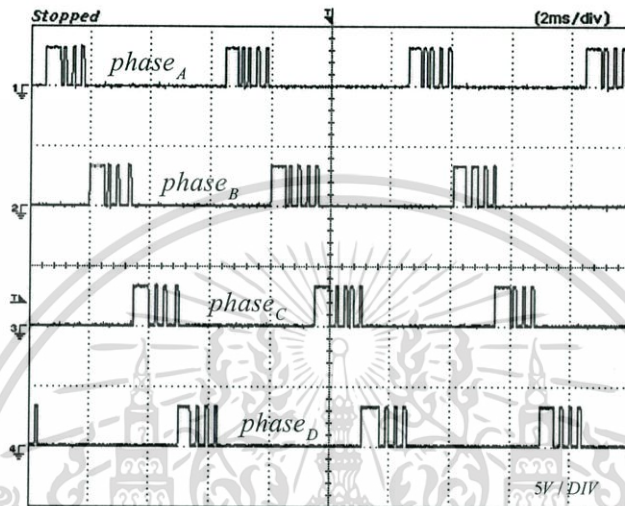
- (b) ผลจากการทดสอบการทำงานจริงของ SRG แบบ 8/6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ด้วยลิขสิทธิ์ใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดสอบวงจรควบคุมการทำงานของ SRG

5.3.1 ผลการทดสอบสัญญาณขั้วนำเกิดจาก DSP

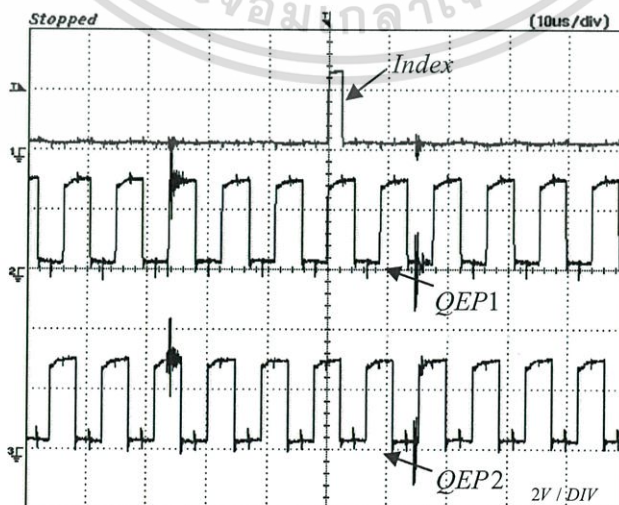
ในการทดสอบการทำงานของสัญญาณขั้วนำเกิดที่ได้จากตัว DSP นั้นได้ทำการวัดที่ช่อง PWM [1-8] ซึ่งแรงดันขั้วนำเกิดที่ออกมาจะอยู่ที่ 3.3 โวลต์ ดังรูปที่ 5.4 เป็นสัญญาณขั้วนำเกิดของ IGBTs ตัวบน ทั้ง 4 เฟส, เฟส A, เฟส B, เฟส C และ เฟส D ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 สัญญาณขั้วนำเกิดของ IGBT ตัวบนที่ได้จากช่อง PWM ของตัว DSP ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping

5.3.2 ผลการทดสอบสัญญาณจากตัวเอ็นโค้ดเดอร์

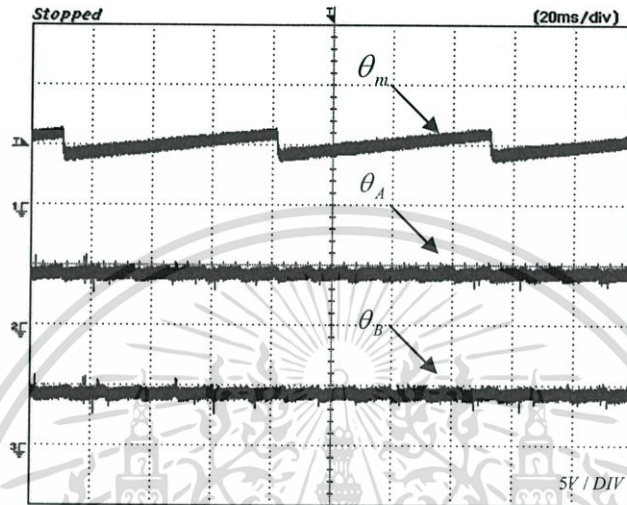
รูปสัญญาณที่ได้จากการทดสอบการทำงานตัวเอ็นโค้ดเดอร์นั้นได้แสดงดังรูปที่ 5.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.7 สัญญาณ QEP1, QEP2 และ Index ที่ได้จากตัว Encoder
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลการวัดตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากวงจร DAC ของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

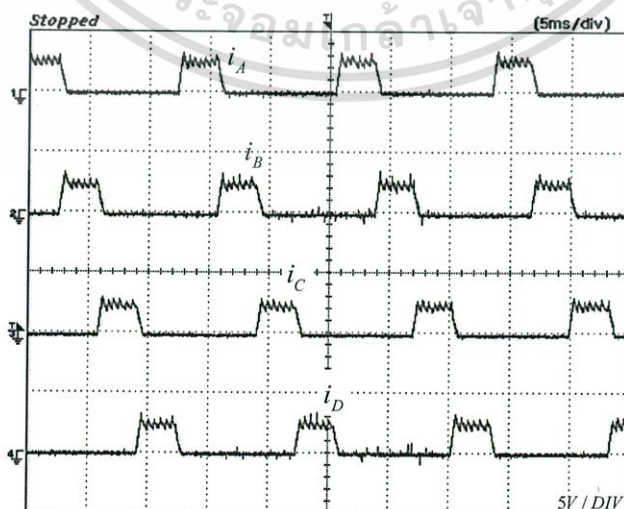
ในการคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์นั้นทำได้โดยการวัดสัญญาณจากตัว Encoder ซึ่งประกอบด้วย QEP1, QEP2 และสัญญาณ Index (QEPI) เข้ามาที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) แล้วนับจำนวนพัลส์ทั้งหมดใน 1 รอบทางกลจะนับได้ 14,400 พัลส์ จากนั้นจึงแปลงเป็นมุมทางไฟฟ้าของแต่ละเฟส ซึ่งรูปสัญญาณที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.8 แสดงมุมทางกล (θ_m) มุมทางไฟฟ้าของเฟส A (θ_a) และมุมทางไฟฟ้าของเฟส B (θ_b)

5.3.4 ผลการทดสอบวงจรวัดกระแสเฟส

ในการทดสอบวัดกระแสที่ได้ออกมาจากการวัดบนแผงวงจรวัดกระแสที่สร้างขึ้น ซึ่งค่ากระแสที่วัดได้จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าดังในรูปที่ 5.7

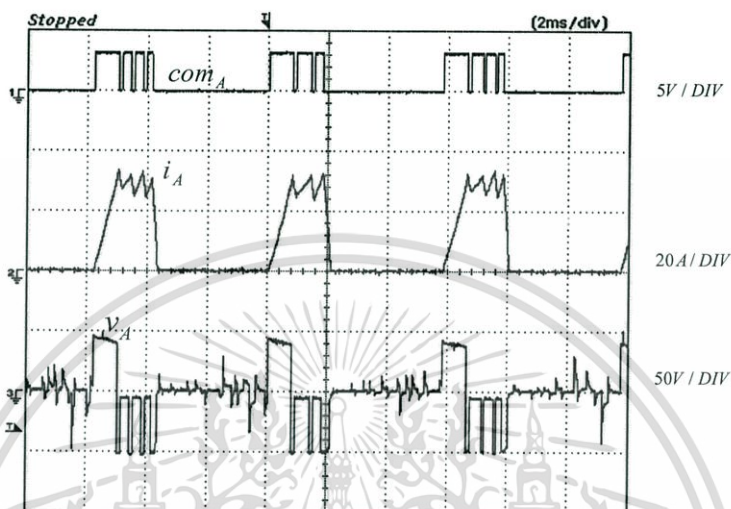


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.9 กระแสเฟส A, B, C และ D ที่ได้จากวงจรวัดกระแสไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดสอบการควบคุมกระแสเฟส

5.4.1 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping

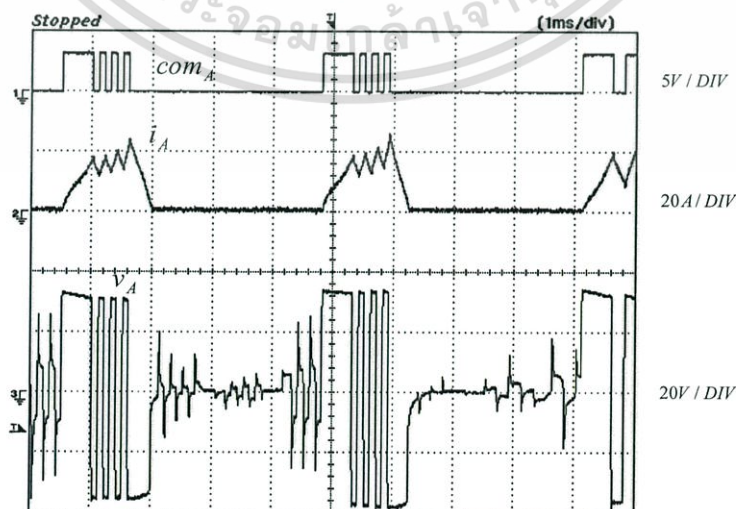
รูปร่างของกระแสเฟส แรงดันเฟส และสัญญาณขับเคลื่อนของเฟส A ขณะทำงานในโหมด Soft Chopping นั้นแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.10 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping

5.4.2 ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping

รูปร่างของกระแสเฟส แรงดันเฟส และสัญญาณขับเคลื่อนของเฟส A ขณะทำงานในโหมด Soft Chopping นั้นแสดงดังรูปที่ 5.9

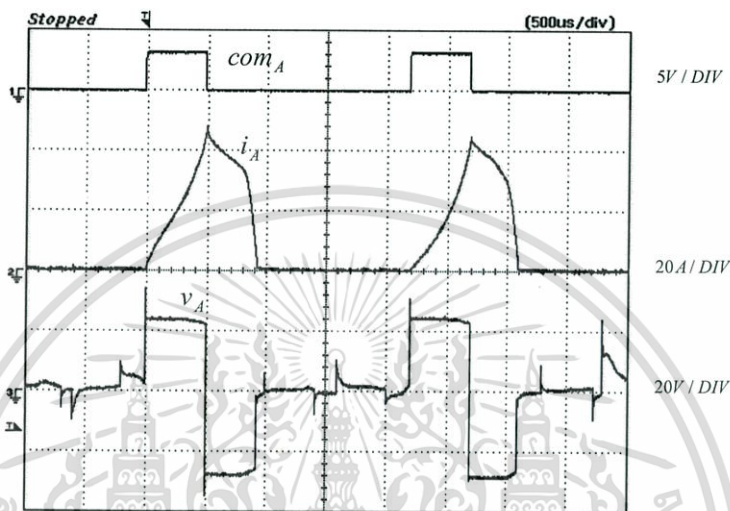


รูปที่ 5.11 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงาน

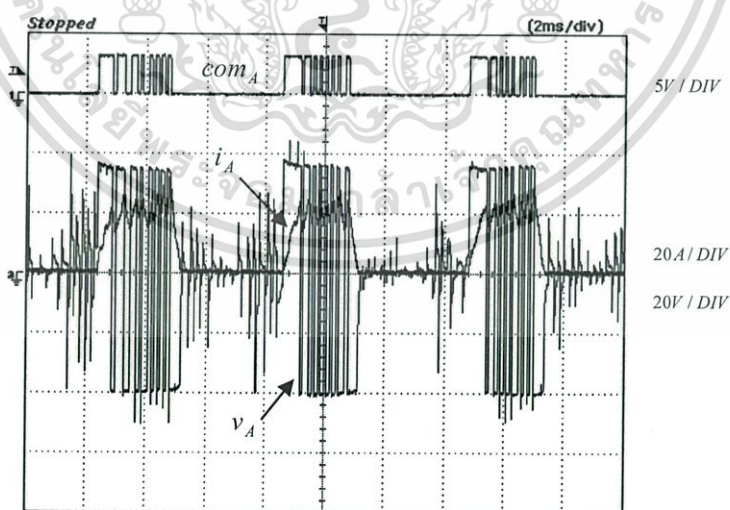
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญขาดเห็นาเบใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 หน้าที่ทำงานในโหมดกระแสพัลส์ แบบ Single Pulse

รูปร่างของกระแสเฟส แรงดันเฟส และสัญญาณขับเคลื่อนของเฟส A ขณะทำงานในโหมดกระแสพัลส์ นั้นแสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งขณะที่เริ่มต้นการทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ กระแสเฟสจะมีค่าสูงจึงควบคุมให้ SRG ทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเฟส A แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.12 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสเฟส และแรงดันเฟสของ SRG ขณะทำงานในโหมดกระแสพัลส์ (Single Pulse Mode)



รูปที่ 5.13 สัญญาณขับเคลื่อน กระแสแรงดันเฟส ขณะทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ

สำหรับการทดสอบเพื่อหาการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ SRG นั้น ได้ทำการปรับโหลดให้มี

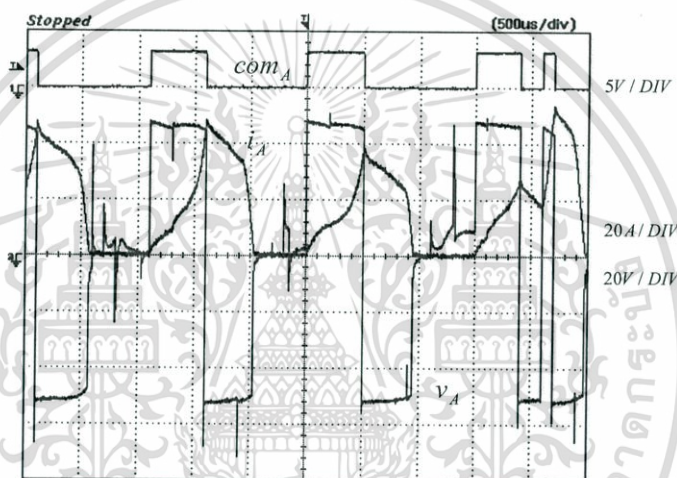
ค่าความต้านทานคงที่เท่ากับ 1.1 โอห์มคงที่ โดยวงจรการทดลองได้แสดงดังในรูปที่ 5.2 และ 5.3

ซึ่งผลการทดลองได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.5

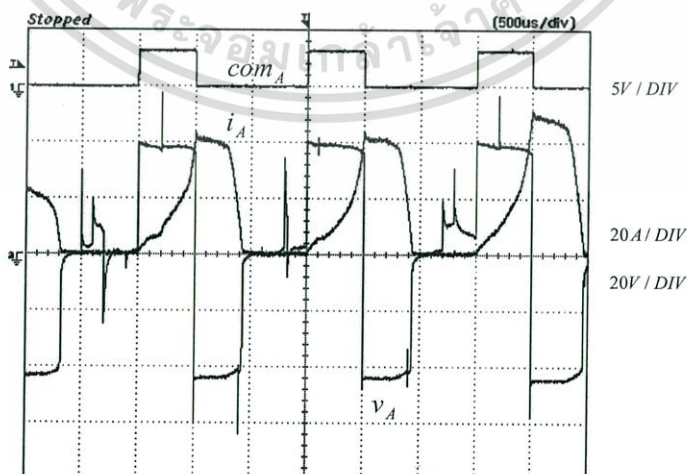
5.5 ผลการทดสอบหาการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสูงสุด

5.5.1 รูปร่างของกระแสฟลักซ์ที่แปลงผันกำลังสูงสุด

ในการทดสอบหากำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (SRG) นั้นได้ทำการทดสอบในโหมดกระพัลส์ (Single Pulse Mode) โดยทำการเปลี่ยนมุม θ_{on} และมุม θ_{off} ที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วทำการปรับความเร็วโรเตอร์ของ SRG จากหยุดนิ่งไปจนมากกว่าพิกัด (0 – 9,000 rpm) แล้วทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทและกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงในตารางที่ 5.2 ถึง 5.34 พร้อมทั้งสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสฟลักซ์ว่ามีลักษณะเป็น Flat Top ที่ความเร็วเท่าไร และมุมนำกระแสอยู่ที่ตำแหน่งไหน ซึ่ง ณ ตำแหน่งที่รูปคลื่นของกระแสฟลักซ์เป็น Flat Top นั้นเรียกว่าจุด ที่ SRG สามารถแปลงพลังงานได้สูงสุด (Maximum Power Conversion)[4]

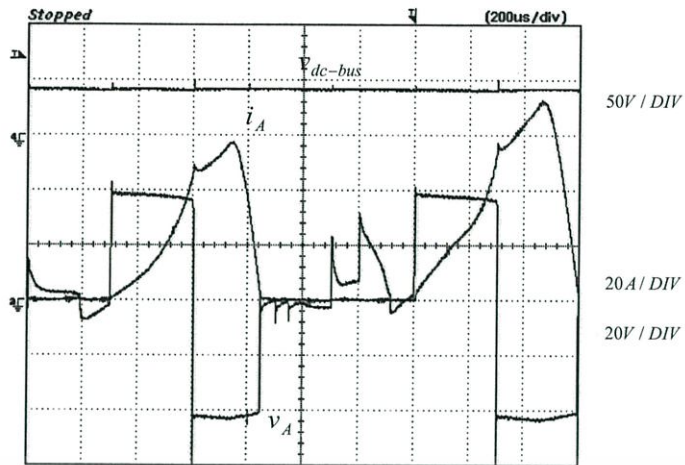


รูปที่ 5.14 กระแสและแรงดันเฟส A ของ SRG ขณะทำงานในโหมดกระพัลส์

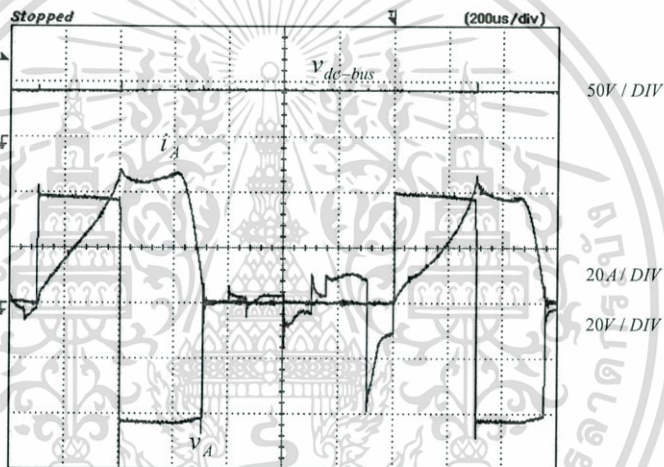


รูปที่ 5.15 สัญญาณขั้วเกท กระแสและแรงดันเฟส A ของ SRG ขณะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารในโหมดกระพัลส์ และให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กระแสแรงดันเฟส A ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าสูงกว่าแรงดันดีซีบัส



รูปที่ 5.17 กระแสแรงดันเฟส A ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีบัส



รูปที่ 5.18 กระแสแรงดันเฟส A ขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับมีค่าน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเก็บรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 ผลการทดลองขณะที่ SRG จ่ายกำลังไฟฟ้าโหลดที่ความเร็วต่างๆ

จากวงจรการทดลองที่ 5.2 และ 5.3 ในการทดสอบจ่ายโหลดของ SRG นั้น ได้เลือกใช้โหลด ความต้านทานค่าคงที่เท่ากับ 1.1 โอห์ม และตารางบันทึกผลการทดลองแสดงไว้ใน ภาคผนวก จ.

ตารางที่ 5.2

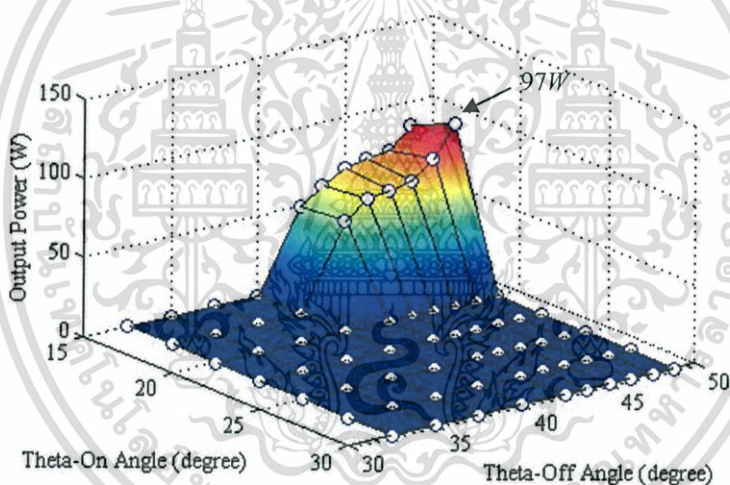
สรุปมุนำกระแสที่ SRG สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้สูงสุด
ขณะทำงานที่ความเร็วมากกว่าพิกัด

Turn-on angle [°]	Turn-off angle [°]	Rotor Speed [rpm]	Output Power [W]
12.50	50.00	6000	1216
12.50	50.00	6200	1338
12.50	50.00	6400	1452
12.50	42.50	6600	1494
15.00	45.00	6000	1433
15.00	45.00	6800	1514
17.50	46.25	6000	1214
17.50	46.25	6200	1305
17.50	46.25	6400	1457
17.50	46.25	6600	1410
17.50	46.25	6800	1527
17.50	46.25	7000	1705
17.50	46.25	7200	1816
20.00	42.50	6000	1094
20.00	43.75	6200	1168
20.00	43.75	6400	1267
20.00	42.50	6600	1347
20.00	42.75	6800	1434
20.00	43.75	7000	1551
20.00	42.50	7200	1634
20.00	47.50	7400	1600
22.50	45.00	6000	1163
22.50	45.00	6200	1236
22.50	45.00	6400	1317
22.50	45.00	6600	1364
22.50	43.75	6800	1370
22.50	47.50	7000	1415
25.00	45.00	6000	1437
25.00	45.00	6200	1533
25.00	47.50	6400	1101
25.00	48.75	6600	1200
25.00	47.50	6800	1235
25.00	47.50	7000	1257

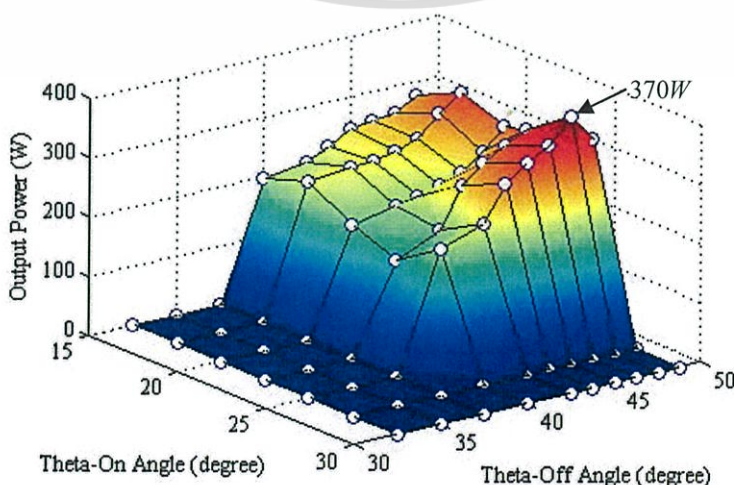
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับผู้ใช้ 7000 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การวิเคราะห์หามุมนำกระแสและความเร็วที่ SRG แปลงผันกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

จากตารางบันทึกผลการทดลองที่แสดงในภาคผนวก จ. เมื่อนำมุมของการนำกระแส (θ_{on} , θ_{off}) และกำลังไฟฟ้าที่ SRG จ่ายให้กับโหลดขณะทำงานที่ความเร็วต่างๆ มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ถึง 5.29 ตามลำดับ จากกราฟวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า มีบางช่วงของมุมนำกระแสที่กำลังไฟฟ้าที่ SRG ผลิตมาได้ไม่พอกับกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการซึ่งสาเหตุเกิดจากโครงสร้างของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ถูกออกแบบมาให้เป็นแบบกระตุ้นด้วยตัวเอง(Self Excitation) กล่าวคือหลังจากที่ SRG เริ่มทำงานได้แล้วจะทำการตัดแหล่งจ่ายไฟที่นำมากระตุ้นออกไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากำลังที่ผลิตขึ้นได้ (Generation Power) จากเฟส A ส่วนหนึ่งจะถูกนำไปเป็นกำลังกระตุ้น (Excitation Power) ให้กับเฟส B และเฟส C และเฟส D ตามลำดับ เมื่อกำลังที่ SRG ผลิตขึ้นได้ (Generation Power) ไม่พอกับกำลังที่จะใช้กระตุ้นให้เฟสต่อไปและกำลังที่ต้องจ่ายให้กับโหลด (Output Power) แล้ว SRG จะอยู่ในสถานะที่ไม่สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ กล่าวคือหลังจากที่ SRG เริ่มทำงานได้แล้ว

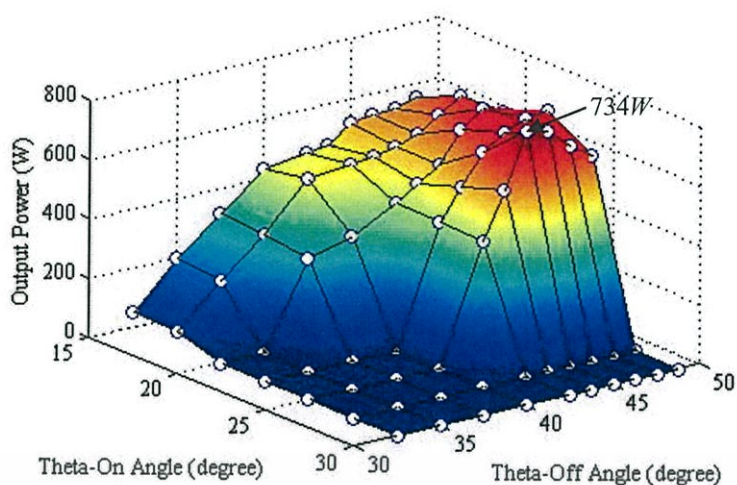


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 2000 รอบนาที

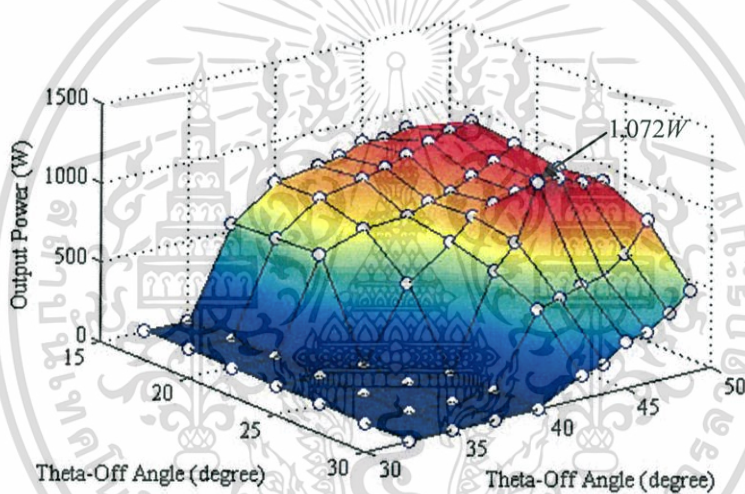


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที

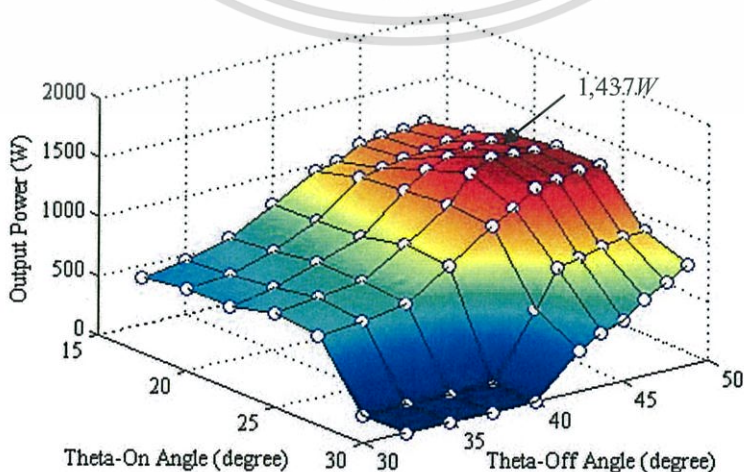
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ



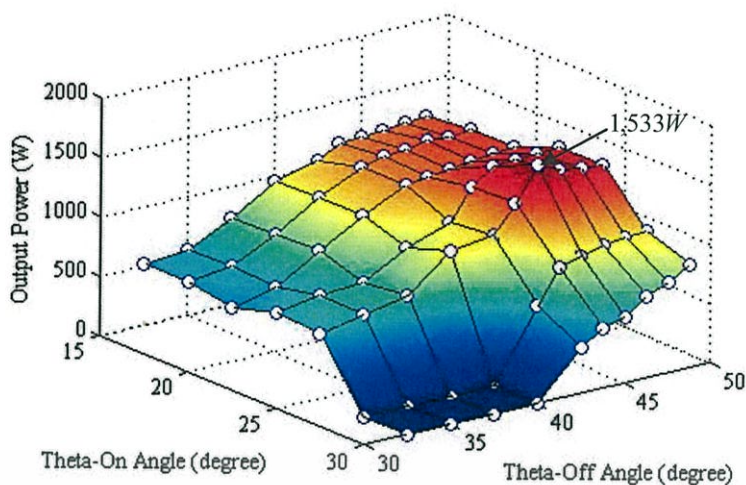
รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที



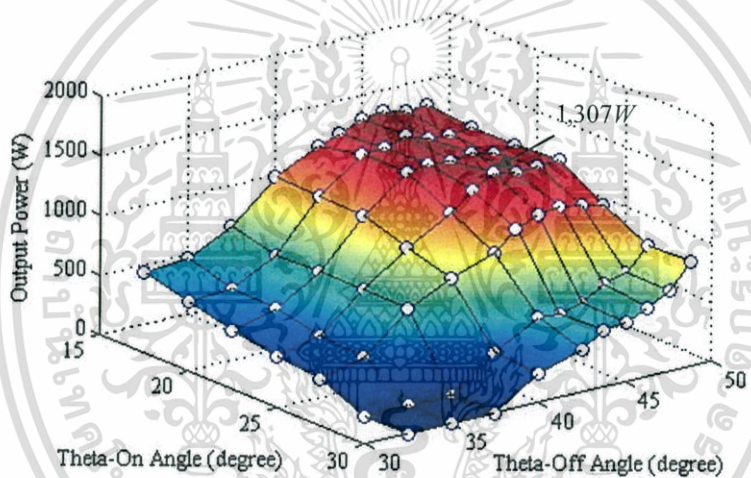
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที



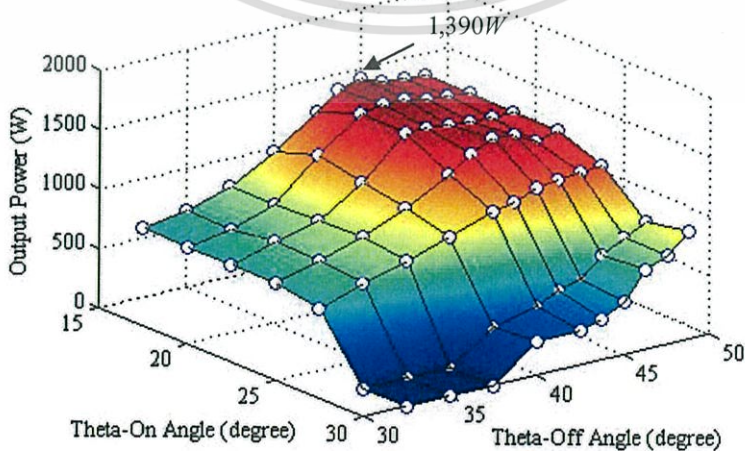
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น, ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



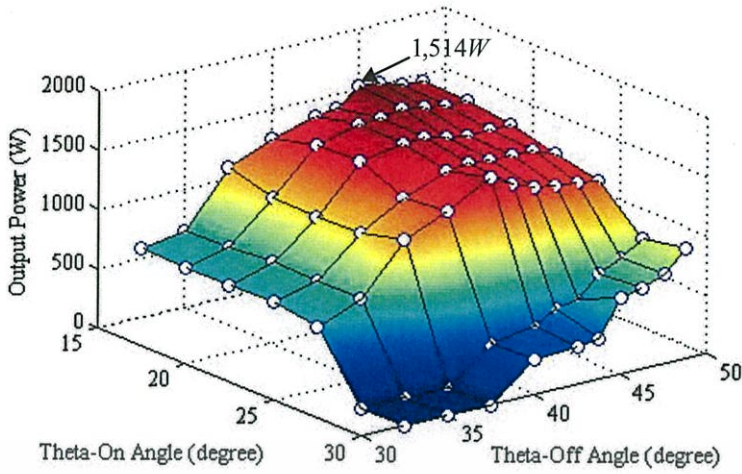
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 6200 รอบต่อนาที



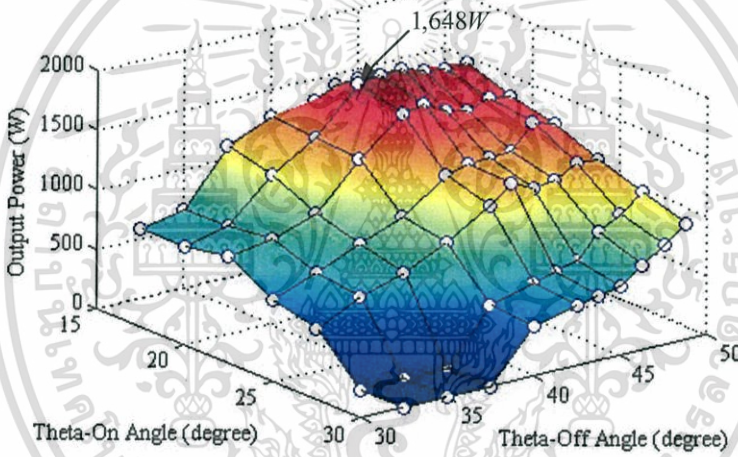
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 6400 รอบต่อนาที



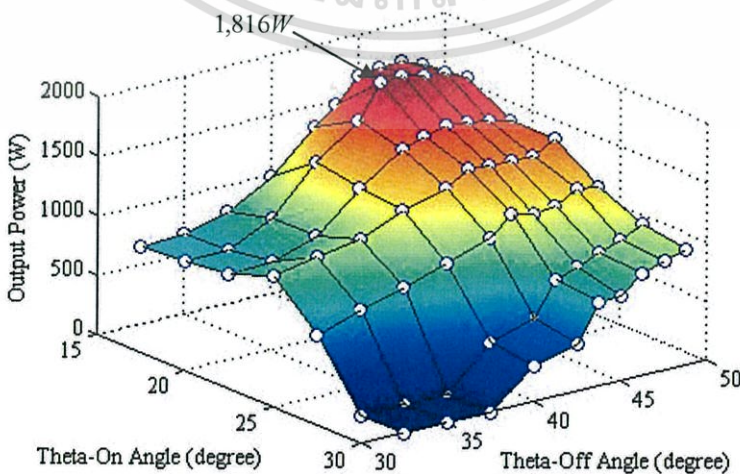
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ภายใต้การควบคุมของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 6600 รอบต่อนาที
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 6800 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 7000 รอบต่อนาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังสูงสุดที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำการตัดแหล่งจ่ายไฟตรงที่นำมากระตุ้นออกไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากำลังที่ผลิตขึ้นได้ (Generation Power) จากเฟส A ส่วนหนึ่งจะถูกนำไปเป็นกำลังกระตุ้น (Excitation Power) ให้กับเฟส B และเฟส C และเฟส D ที่จะทำงานต่อไปตามลำดับ เมื่อกำลังที่ SRG ผลิตขึ้นได้ (Generation Power) ไม่พอดีกับกำลังที่ใช้กระตุ้นให้เฟสต่อไป (Excitation Power) และกำลังที่ต้องจ่ายให้กับโหลด (Output Power) แล้ว SRG จะอยู่ในสถานะที่ไม่สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้ โดยสังเกตค่าจากผลการทดลองในตารางที่ จ.1 ถึง จ.33 ที่ค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทมีค่าเป็นศูนย์ ที่ความเร็วต่างๆ และที่ความเร็วสูง ตั้งแต่ 7600 รอบต่อนาทีขึ้นไป

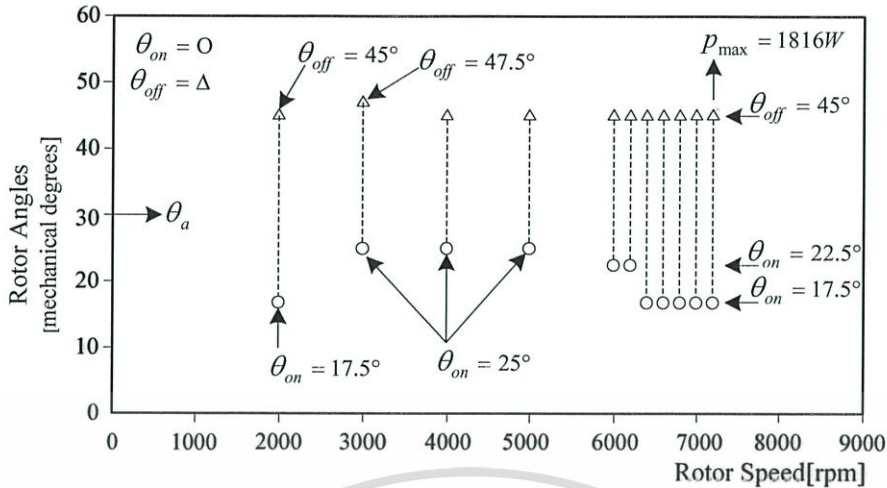
จากกราฟวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าที่ความเร็วคงที่ค่าหนึ่งนั้น จะมีมุมนำกระแส (θ_{on} , θ_{off}) อยู่ค่าหนึ่งที่ SRG สามารถแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นแล้ว การแปลงผันกำลังไฟฟ้าของ SRG ก็สามารถทำได้มากขึ้นเช่นกัน โดยสังเกตได้จากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5.7 มุมนำกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ SRG แปลงผันได้สูงสุด

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของ SRG ในรูปที่ 5.17 ถึง รูปที่ 5.27 พบว่าในขณะที่ SRG แปลงผันกำลังสูงสุดนั้นก็จะสามารถจ่ายกำลังให้กับโหลดได้สูงสุดเช่นกัน ดังผลการทดสอบที่มุมนำกระแสที่ $\theta_{on} = 17.5^\circ$ และ $\theta_{off} = 45.0^\circ$ ขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็ว 7200 รอบต่อนาที นั้น SRG กำลังทำงานอยู่ในสถานะที่แปลงพลังงานสูงสุด กล่าวคือรูปร่างของกระแสเฟสมีลักษณะเป็น Flat Top [4] ดังรูปที่ 5.29 ซึ่งในขณะนั้นสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ถึง 1816 วัตต์ และในตารางที่ 5.35 นั้นได้แสดงความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังไฟฟ้าที่ SRG สามารถจ่ายให้กับโหลดได้สูงสุดที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 5.30 รูปร่างของกระแสเฟสขณะ SRG ทำงานที่มุมนำกระแส $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$ ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความเร็ว 7000 รอบต่อนาที และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้สูงสุด 1816 วัตต์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

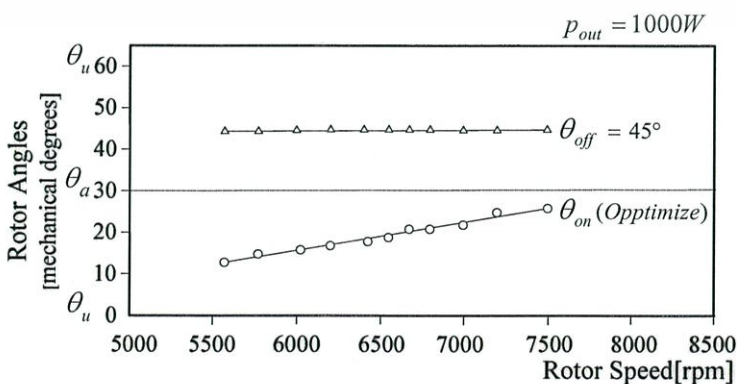


รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ที่ SRG สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

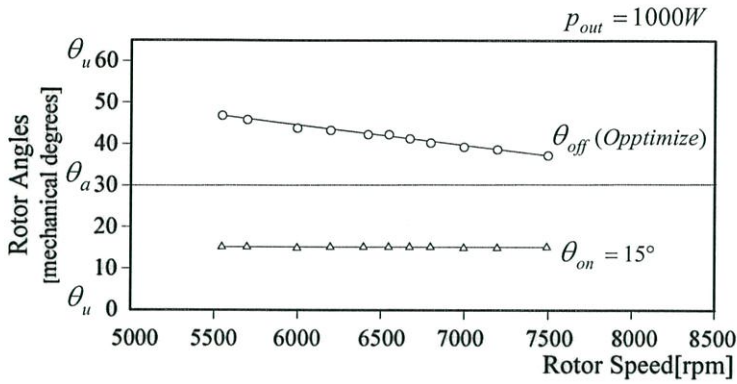
จากกราฟความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและพลังงานเอาต์พุตที่ความเร็วต่างๆ ในรูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.27 สามารถสรุปเป็นกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ของ SRG ที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังรูปที่ 5.28 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วมากกว่าพิกัดนั้นค่ามุมนำกระแสที่ SRG สามารถแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ มุมนำกระแส $\theta_{on} = 17.5^\circ$ และมุมหยุดนำกระแส $\theta_{off} = 45.0^\circ$ ซึ่งที่ความเร็ว 7200 รอบต่ออนาที นั้น SRG สามารถจ่ายกำลังให้โหลดได้ถึง 1816 วัตต์

5.8 ความเร็วและตำแหน่งของโรเตอร์ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ SRG

ในกรณีที่ต้องการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ เช่นต้องการควบคุมให้เอาต์พุตมีค่า 1000 วัตต์ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมนำกระแส (θ_{on} หรือ θ_{off}) และความเร็วของโรเตอร์นั้น ในรูปที่ 5.30 และ 5.31 ได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้กล่าวคือ

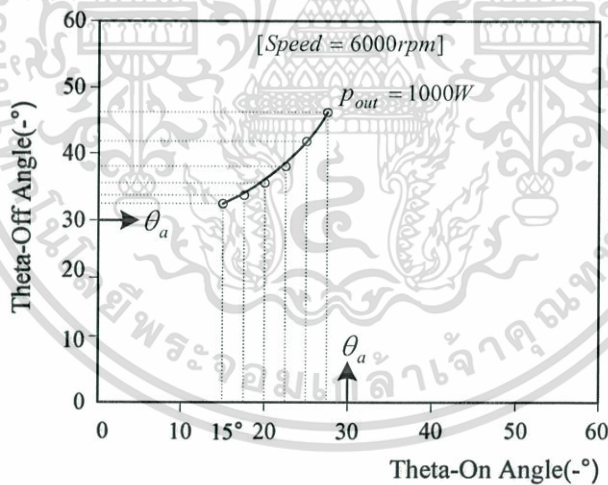


รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์
ขณะที่มุมนำกระแส $\theta_{on} = 15^\circ$

จากรูปที่ 5.30 และ 5.31 แสดงให้เห็นว่าถ้าหากเราต้องการควบคุมกำลังเอาต์พุตให้คงที่ที่ความเร็วโรเตอร์ต่าง ๆ นั้นเมื่อกำหนดให้มุมนำกระแส (θ_{on}) มีค่าคงที่แล้วจะต้องทำการเปลี่ยนมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) เพื่อที่จะรักษากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ได้ และหากคงที่มุมหยุดนำกระแส จะต้องปรับด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแส (θ_{on}) และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off})
ขณะที่ SRG จ่ายกำลังเอาต์พุต 1000 วัตต์ ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.32 แสดงให้เห็นว่าเมื่อ SRG ทำงานที่ความเร็วคงที่ เช่นที่ 6000 รอบต่อนาที แล้วหากต้องการเปลี่ยนแปลงมุมนำกระแส นั้นจะต้องทำการเปลี่ยนทั้งมุมนำกระแส (θ_{on}) และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) พร้อมกันจึงสามารถรักษากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากกราฟผลการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จะเห็นได้ว่า ขณะที่ SRG ทำงานในโหมดกระแสพัลส์ ที่ความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัดนั้นค่าแรงดัน ไฟฟ้าต้านกลับจะมีค่าน้อยลักษณะของรูปร่างกระแสไฟแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.12 ในขณะที่ SRG ทำงานที่ความเร็วรอบเท่ากับพิกัดแล้วผลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะทำให้รูปร่างของกระแสไฟ ซึ่งจาก [2],[11] ได้อธิบายว่าลักษณะของกระแสไฟแบบนี้ SRG จะให้พลังงานเอาท์พุทสูงสุด รูปร่างของกระแสไฟนี้ได้แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.11 แต่ถ้าหากว่า SRG ทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด ตั้งแต่ 6000 รอบต่อนาทีไปแล้ว ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับจะมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีบีส แล้วรูปร่างของกระแสไฟจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

นอกจากนี้พบว่าการใช้สัมประสิทธิ์สไปนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ ที่ได้จากการทำ Finite Element ในการประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็ก, ค่าความเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ได้ และผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทดสอบจริง ซึ่งประโยชน์ของการสร้างแบบจำลองนี้เพื่อเป็นแนวทาง ในการออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์(SRG) ต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ (SRG) ที่สร้างขึ้นนี้กับเครื่องจักรกลประเภทเดียวกันตัวอื่นๆ ได้โดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์สไปนซ์ ให้เป็นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวใหม่และกำหนดมุมในการทำงาน ใหม่ตามลักษณะโครงสร้างที่สามารถใช้ได้กับแบบจำลองนี้ได้

จากผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟสแบบ 8/6 ขนาดพิกัดกำลัง 2.2 กิโลวัตต์ที่สร้างขึ้นพบว่าขณะที่ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ให้ทำงานในโหมดกระแสพัลส์แล้วตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระแสไฟคือมุมนำกระแส และความเร็วโรเตอร์ ซึ่งมุมนำกระแส และความเร็วโรเตอร์ก็มีผลโดยตรงกับการแปลงผันพลังงานเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย ยกตัวอย่างเช่น

1. ที่มุมนำกระแส ($\theta_{on} = 20^\circ$ และ $\theta_{off} = 42.5^\circ$) ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาทีนั้น SRG จะสามารถจ่ายพลังงานให้โหลดได้ 1000 วัตต์ และถ้าหากเพิ่มความเร็วโรเตอร์เป็น 7200 รอบต่อ นาที SRG จะสามารถจ่ายพลังงานให้โหลดได้ถึง 1635 วัตต์

2. ที่มุมนำกระแส ($\theta_{on} = 17.5^\circ$ และ $\theta_{off} = 43.75^\circ$) ที่ความเร็วโรเตอร์ 6000 รอบต่อนาที SRG จะสามารถจ่ายพลังงานให้โหลดได้ 1000 วัตต์ และเมื่อเพิ่มความเร็วโรเตอร์เป็น 7200 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แล้ว SRG จะสามารถจ่ายพลังงานให้กับโหลดได้ถึง 1816 วัตต์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าถ้ารูปร่างของกระแสเฟสเป็นดังรูปที่ 5.14 นั้น SRG จะสามารถแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดกล่าวคือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น (Excitation Power) นั้นน้อยกว่าพลังงานที่ให้กำเนิด (Generation Power) และหากต้องการรักษาพลังงานเอาท์พุทให้มีค่าคงที่ ที่ความเร็วโรเตอร์ต่างๆนั้นจะต้องทำการปรับมุมนำกระแส (θ_{on} , θ_{off}) ตามด้วยดังในรูปที่ 5.29 และ 5.30 และถ้าเราต้องการรักษาพลังงานเอาท์พุทให้มีค่าคงที่ ๆ ความเร็วคงที่นั้นจะต้องปรับทั้งมุมนำกระแส และมุมหยุดนำกระแสพร้อมกันเพื่อให้ SRG สามารถรักษากำลังเอาท์พุทให้คงที่ ดังในรูปที่ 5.31 ได้เช่นกัน

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. สามารถนำค่ามุมนำกระแสของ SRG ที่เหมาะสมที่ความเร็วโรเตอร์ต่างๆ ที่ทดลองได้ไปใช้ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงานที่แปรผันกับความต้องการของโหลดค่าต่างๆ ได้
2. สามารถนำระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์นี้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่ระบบป้องกันไฟฟ้าฉุกเฉิน (UPS) แบบ Flywheel ได้
3. สามารถนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตขึ้นได้ไปเพิ่มระดับแรงดันโดยใช้วงจร Boost-Converter ก่อนแล้วจึงแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) เพื่อจ่ายให้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ
4. สามารถพัฒนาไปสู่ระบบผลิตไฟฟ้าแบบจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสวิตซ์รีลักแตนซ์ เชื่อมต่อกับกริด (Grid Connected) ของการไฟฟ้าได้

บรรณานุกรม

- [1] T.J.E. Miller, “Electronic Control of Switched Reluctance Machine”, Oxford : Newnes Power Engineering Series, 2001.
- [2] T.J.E. Miller, “Switched Reluctance Motors and Their Control”, Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
- [3] S.Khotpanya, S.Kittiratsatcha, “A Magnetic Model of a Three-Phase Switched Reluctance Machine using Cubic Spline Interpolation Technique”, Power Electronics and Drives System, 2005. PEDS 2005. IEEE International Conference on, volume 2, 28-01 Nov. 2005. pp:1167-1170.
- [4] S.Wongguokoon, S.Kittiratsatcha, “Analysis of a Switched Reluctance Generator for Maximum Energy Conversion”, Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on, 24-27 Nov. 2008. pp:125-129.
- [5] Stiebler. M, Ke Liu, “An Analytical Model of Switched Reluctance Machines,” Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 14, Issue 4, Dec. 1999. page(s):100-1107.
- [6] P.Chanchaensook, M.F.Rahman,” Control of a Four-Phase Switched Reluctance Generators: Experimental Investigations, IEMDC 03 Proceedings, vol. 2, pp. 842-848, 2003.
- [7] D.A.Torrey, “Switched Reluctance Generators and Their Control,” Industrial Electronics, IEEE Transactions on volume 49, Issue 1, Feb. 2002, page(s): 3-14.
- [8] I.Kioskeridis, C.Mademlis, “Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators,” Power Electronics, IEEE Transaction on, volume 1, Issue 4, Jul. 2006, page(s) : 1062-1072.
- [9] P.Asadi, M.Ehsani, B.Fahimi, “Design and Control Characterization of Switched Reluctance Generator for Maximum Output Power,” applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC’06, 19-23 Mar. 2006, page(s): 1639-1644.
- [10] Y.Chih Chang, C.Ming Liaw, “On the Design of Power Circuit and Control Scheme for Switched Reluctance Generator,” Power Electronics, IEEE Transaction on volume 23, Issue 1, Jan. 2008, page(s): 445-454.
- [11] ไพวรรณ เกิดตรวจ และ สุวัฒน์ กิตติรัตนสัจจา “แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ สวิตซ์รีลัคแตนซ์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 (EECON32), 28-30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (EECON32)

ไพวรรณ เกิดตรวจ และ สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา “แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 (EECON32), 28-30 ตุลาคม 2552

EECON 

28 - 30 ตุลาคม 2552
โรงแรมทวารวดี รีสอร์ท
ปราจีนบุรี

ไฟฟ้ากำลัง (PW) อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM) ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL) การควบคุมคลื่นพาหะดิจิทัล (DS)
ไฟโตนิกส์ (PH) วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
การควบคุมคลื่นพาหะดิจิทัล (DS)
วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

หอสมุดมหาวิทยาลัย
10 ก.ค. 2552
แจ้งผลการพิจารณาบทความ
21 ส.ค. 2552
หอสมุดมหาวิทยาลัย
18 ก.ย. 2552

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32
EECON-32 <http://eecon32.mahidol.ac.th>

CALL FOR PAPERS

Important Dates : 10 July 2009 - Manuscript Submissions
21 August 2009 - Acceptance Notification
18 September 2009 - Camera-Ready Submissions

32nd Electrical Engineering Conference
28 - 30 October 2009
Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand

EECON32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์

Modeling of a Switched Reluctance Generator

ไพวรรณ เกิดตรง และ สุวัฒน์ กิตติรัตน์สังจา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

โทรศัพท์ : 0-2326-4550 E-mail : s0060206@kmitl.ac.th, kksupat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์โดยใช้สัมประสิทธิ์สไปล์ในสมการของเส้นแรงแม่เหล็ก แบบจำลองประกอบด้วย 3 ส่วนคือ แบบจำลองเส้นแรงแม่เหล็ก, แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ และแบบจำลองแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ทดสอบแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์, สัมประสิทธิ์สไปล์, แบบจำลองค่าเส้นแรงแม่เหล็ก, แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ, แบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

Abstract

This paper presents the modeling of a switched-reluctance generator (SRG) by using Cubic Spline Coefficient of the Flux-Linkage Equation. The model consists of three parts which are flux linkage model, inductance model and back electromagnetic force model. The proposed model has been implemented in MATLAB/Simulink.

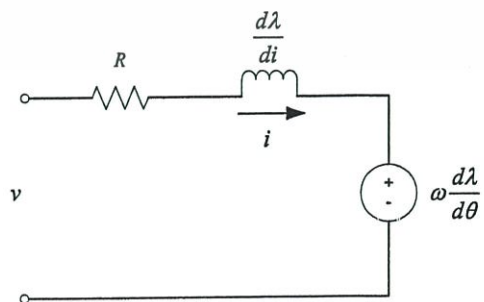
Keywords: Switched Reluctance Generator (SRG), Cubic Spline

Coefficient, flux linkage model, inductance model, back electromagnetic force model

1. บทนำ

ปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่นเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอากาศยาน รถยนต์ไฮบริดจ์ และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม เป็นต้น สาเหตุที่มีการนำมาใช้งานใช้กันมากเนื่องมาจากข้อดีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบนี้คือมีน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีขดลวดที่โรเตอร์ มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนการผลิตและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ เมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอื่นๆ แต่มีคุณสมบัติของค่าความเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งโรเตอร์และกระแสเฟส ทำให้มี

ความยุ่งยากในการควบคุมการทำงาน เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ สามารถทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า[1] ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมของการนำกระแสให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละเฟส มีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ เช่นแบบจำลองทางแม่เหล็กของเครื่องจักรกลแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ที่ใช้เทคนิคคิวบิกสไปล์[2] รวมไปถึงการวิเคราะห์หาอัตราการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสูงสุด[3] เป็นต้น สำหรับบทความนี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ โดยการใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับสาม มาเป็นสมการของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการนั้นได้แบ่งตำแหน่งของโรเตอร์ออกเป็นช่วงๆ ละ 2.5° โดยเริ่มจาก 0° คือตำแหน่ง Aligned จนถึง 45° ที่ตำแหน่ง Aligned อันถัดไป และใช้ฟังก์ชันของคิวบิกสไปล์ในการหาค่าดังกล่าว แบบจำลองนี้ประกอบด้วยแบบจำลองค่าเส้นแรงแม่เหล็ก $\lambda(i, \theta)$, แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ $L(i, \theta)$ และแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ $bemf(i, \theta)$ การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์นั้นได้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีและการสร้างแบบจำลอง

2.1 ทฤษฎีของ SRG

ในบทนี้จะทำการพิจารณาความสัมพันธ์ทางพลวัตของ SRG ซึ่งเมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการทางแรงดันไฟฟ้า 1 เฟสดังนี้

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \tag{1}$$

เนื่องจากว่าเส้นแรงแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นจากสมการที่ (1) สามารถกระจายออกได้ดังนี้

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \tag{2}$$

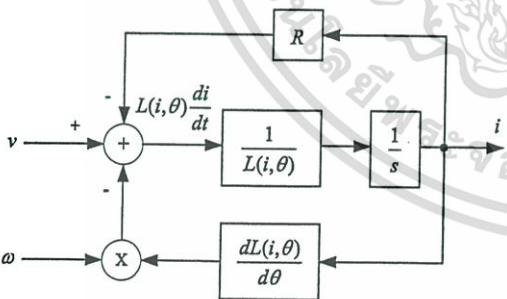
หรือแทนค่า $\omega = d\theta/dt$ ใน สมการที่ (2) จะได้

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \tag{3}$$

ในเทอมที่ 3 ของสมการที่ (3) คือค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (bemf)

$$bemf = i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \tag{4}$$

จากสมการที่ (3) สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้



รูปที่ 2 แบบจำลอง 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีตักแทนซ์

2.2 แบบจำลองค่าเส้นแรงแม่เหล็ก

ในส่วนนี้จะวิเคราะห์การประมาณค่าเส้นแม่เหล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่ง สมการที่ใช้เป็นแบบโพลีโนเมียล อันดับสาม โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ $a_1(\theta), a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ $a_1(\theta)$ แสดงถึงค่าความเหนี่ยวนำแบบไม่

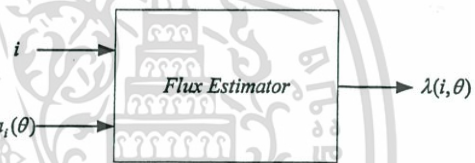
อิมตัวของแกนเหล็ก ส่วนค่า $a_2(\theta)$ และ $a_3(\theta)$ แสดงถึงค่าความเหนี่ยวนำแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รูปแบบของสมการเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ในฟังก์ชันโพลีโนเมียล อันดับสามนั้นแสดงในสมการที่ (5)

$$\lambda(i, \theta) = a_1(\theta)i + a_2(\theta)i^2 + a_3(\theta)i^3 \tag{5}$$

สมการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์โดยวิธีคิวกัสโปลันคือ

$$a_i(\theta) = a_i + b_i\theta + c_i\theta^2 + d_i\theta^3 \tag{6}$$

จากสมการที่ (5) และ (6) เมื่อทำการจำลองใน MATLAB/Simulink โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 1 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์สโปลัน ที่ได้จากการคำนวณด้วยกรรมวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์[2] จะได้ตัวประมาณค่าของเส้นแรงแม่เหล็กในเทอมของกระแสและสัมประสิทธิ์สโปลัน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก

2.3 แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ

หากพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำและเส้นแรงแม่เหล็กในเทอมของกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์จะได้

$$L(i, \theta) = \frac{d\lambda(i, \theta)}{di} \tag{7}$$

แทนค่าสมการที่ (5) ลงในสมการที่ (7) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำในเทอมของกระแสและสัมประสิทธิ์สโปลัน ดังนี้

$$L(i, \theta) = a_1(\theta) + 2ia_2(\theta) + 3i^2a_3(\theta) \tag{8}$$

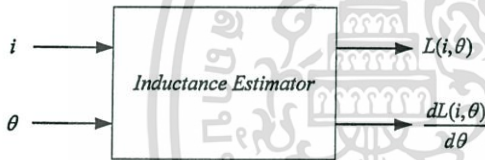
และค่าของการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำต่อตำแหน่งโรเตอร์นั้นสามารถหาได้โดยสมการที่ (9)

$$\frac{dL(i, \theta)}{d\theta} = \frac{da_1(\theta)}{d\theta} + 2i \frac{da_2(\theta)}{d\theta} + 3i^2 \frac{da_3(\theta)}{d\theta} \tag{9}$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สโปลน์ $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$, $a_3(\theta)$

$a_1(\theta)$				$a_2(\theta)$				$a_3(\theta)$			
d_i	c_i	b_i	a_i	d_i	c_i	b_i	a_i	d_i	c_i	b_i	a_i
1.15e-05	-0.00013	0.000208	0.003709	-1.35e-06	1.36e-05	-2.28e-05	-0.00013	3.58e-08	-3.50e-07	5.93e-07	1.55e-06
1.15e-05	-4.18e-05	-0.00022	0.003608	-1.35e-06	3.50e-06	2.01e-05	-0.00012	3.58e-08	-8.16e-08	-4.86e-07	1.41e-06
-9.70e-06	4.46e-05	-0.00021	0.002986	1.23e-06	-6.64e-06	1.22e-05	-7.31e-05	-3.35e-08	1.87e-09	-2.22e-07	2.44e-07
4.24e-06	-2.81e-05	-0.00017	0.00259	4.05e-07	2.62e-06	2.16e-06	-6.48e-05	9.65e-09	-6.43e-08	8.40e-08	3.33e-07
4.73e-08	3.73e-06	-0.00023	0.00206	1.94e-08	-4.22e-07	7.65e-06	-4.94e-05	-3.72e-10	8.06e-09	-5.67e-08	2.92e-07
-2.30e-06	4.09e-06	-0.00021	0.001512	1.74e-07	-2.76e-07	5.90e-06	-3.26e-05	-3.43e-09	5.27e-09	-2.33e-08	1.95e-07
9.14e-6	-1.32e-05	-0.00023	0.000978	-5.06e-07	1.03e-06	7.78e-06	-1.69e-05	7.40e-09	-2.04e-08	-6.12e-08	1.16e-07
-8.23e-06	5.54e-05	-0.00013	0.000458	4.94e-07	-2.77e-06	3.14e-06	1.07e-06	-6.91e-09	3.51e-08	-2.46e-08	-4.93e-08
1.92e-06	-6.36e-06	-4.13e-06	0.000358	-1.87e-07	9.37e-07	-1.17e-06	7.17e-09	3.36e-09	-1.68e-08	2.10e-08	1.82e-10
-1.92e-06	8.01e-06	1.27e-21	0.000338	1.87e-07	-4.68e-07	-9.08e-23	3.72e-09	-3.36e-09	8.39e-09	-7.09e-25	2.11e-10
8.23e-06	-6.36e-06	4.13e-06	0.000358	-4.94e-07	9.37e-07	1.17e-06	1.07e-06	6.91e-09	-1.68e-08	2.10e-08	1.82e-10
-9.14e-6	5.54e-05	0.000127	0.000458	5.06e-07	-2.77e-06	-3.14e-06	-1.69e-05	7.40e-09	3.51e-08	2.46e-08	-4.93e-08
2.30e-06	-1.32e-05	0.000232	0.000978	-1.74e-07	1.03e-06	-7.78e-06	-3.26e-05	3.43e-09	-2.04e-08	6.12e-08	1.16e-07
-4.73e-08	4.09e-06	0.000209	0.001512	-1.94e-08	-2.76e-07	-5.90e-06	-4.94e-05	3.72e-10	5.27e-09	2.33e-08	1.95e-07
-4.24e-06	3.73e-06	0.000229	0.00206	-4.05e-07	-4.22e-07	-7.65e-06	-6.48e-05	-9.65e-09	8.06e-09	5.67e-08	2.92e-07
9.70e-06	-2.81e-05	0.000168	0.00259	-1.23e-06	2.62e-06	-2.16e-06	-7.31e-05	3.35e-08	-6.43e-08	-8.40e-08	3.33e-07
-1.15e-05	4.46e-05	0.000209	0.002986	1.35e-06	-6.64e-06	-1.22e-05	-7.31e-05	-3.58e-08	1.87e-09	2.22e-07	2.44e-07
-1.15e-05	-4.18e-05	0.000217	0.003608	-1.35e-06	3.50e-06	-2.01e-05	-0.00012	-3.58e-08	-8.16e-08	4.86e-07	1.41e-06

สมการที่ (8) และ (9) มาสร้างแบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 4

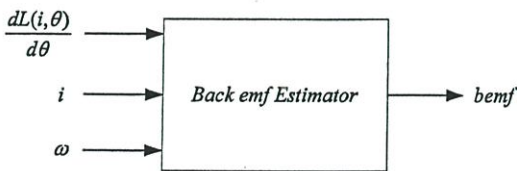


รูปที่ 4 แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำ

2.4 แบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

การสร้างแบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับนั้น พิจารณาจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4) และ (9) จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่อยู่ในเทอมของสัมประสิทธิ์สโปลน์ แสดงในสมการที่ (10) และในรูปที่ 5 แสดงแบบจำลองของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

$$bemf(i, \theta) = i\omega \left(\frac{da_1(\theta)}{d\theta} + 2i \frac{da_2(\theta)}{d\theta} + 3i^2 \frac{da_3(\theta)}{d\theta} \right) \quad (10)$$



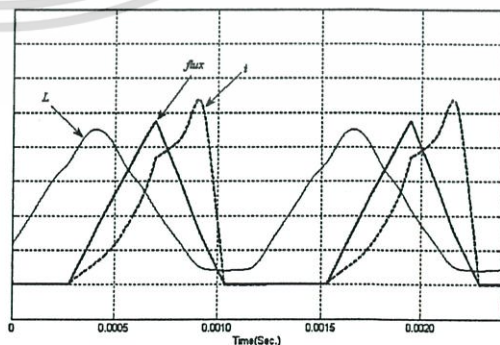
รูปที่ 5 แบบจำลองค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

3. ผลการจำลองด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink

ในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ สวิตร์รีตคแต่นั้นมีเงื่อนไขตามตารางที่ 2

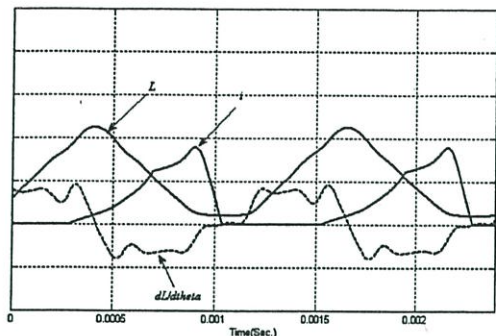
ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการจำลองการทำงาน

พารามิเตอร์ในการจำลอง	ค่าที่ใช้
แรงดันคัตรีบัส	12 โวลท์
ความเร็วพิกัด	5,000 รอบต่อนาที
ตำแหน่ง Aligned	0° และ 45° ทางไฟฟ้า
ตำแหน่ง Unaligned	22.5° ทางไฟฟ้า
มุม turn on	40° ทางไฟฟ้า
มุม turn off	10° ทางไฟฟ้า

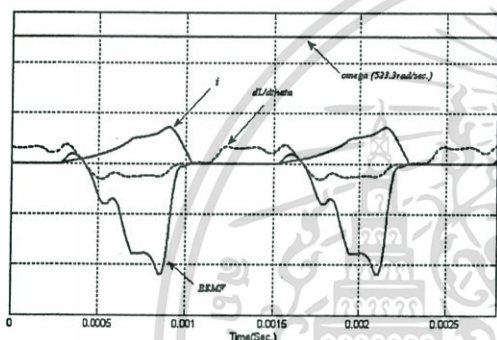


รูปที่ 6 เส้นแรงแม่เหล็ก, ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ค่าความเหนี่ยวนำและกระแสเฟสที่ได้จากแบบจำลองการทำงานที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และกระแสเฟส ขณะจำลองการทำงานที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 9 ความเหนี่ยวนำ, เส้นแรงแม่เหล็ก และค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ เทียบกับกระแส และแรงดันเฟส ขณะจำลองการทำงานที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที

4. สรุป

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าสามารถใช้สัมประสิทธิ์สไปนในการประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็ก, ค่า

ความเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งรีลัคแตนซ์ได้ ซึ่งประโยชน์ของการสร้างแบบจำลองนี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งรีลัคแตนซ์ต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงาน (Center of Excellence for Innovative Energy System ; CInES) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.J.E. Miller, Electronic Control of Switched Reluctance Machine, Oxford: Newnes Power Engineering Series, 2001.
- [2] S.Khotpanya, S.Kittiratsatcha, Kazuhisa, "A Magnetic Model of a Three-Phase Switched Reluctance Machine using Cubic Spline Interpolation Technique", Power Electronics and drives systems, 2005. PEDS 2005. IEEE International Conference on, volume 2, 28-01 Nov. 2005. pp:1167-1170.
- [3] S.Wongguokoon, S.Kittiratsatcha, "Analysis of a Switched-Reluctance Generator for Maximum Energy Conversion", Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on, 24-27 Nov. 2008. pp:125-129.



ไพวรรณ เกิดตรวจ ได้รับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานที่ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัทฮอนด้า แอคเซส เอเชีย แอนด์ โอเชียนเนีย จำกัด



สุพัฒน์ กิตติรัตน์สังจา ได้รับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ M.S. และ Ph.D. ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังจาก Rensselaer Polytechnic Institute มลรัฐนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่ทำการเกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องจักรกลแบบสวิตชิ่งรีลัคแตนซ์และงานส่องสว่างแบบ solid state

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ (ECTI-CON 2011)

P.Kerdtuad, S.Kittiratsatcha, "Study of Maximum Power Conversion of a Switched-Reluctance Generator",

Proceedings of ECTI-CON 2011, International Conference, May 17-20, 2011.



ECTI-CON 2011

May 17 - 20, 2011, Khon Kaen, Thailand

ECTI-CON 2011 is the eighth annual international conference organized by Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association, Thailand. The conference aims to be an international forum for presentation of technological advances and research results in the field of electrical engineering, electronics, computer, telecommunications, and information technology. Accepted papers will be published in the *Proceedings of ECTI-CON 2011* and will be available via *IEEE Xplore*. Acceptance will be based on quality, relevance, and originality.

<p>Steering Committee Basile Seiwachirong (11) (SIET) Prayoot Akkasetthaisri (11) (KMUTNB) Jitkasame Ngamnil (11) (MUT) Vana Veeravithya (11) (KMUTNB) Nungjeng Arendal (11) (KU) Wanlop Sarakomponchon (11) (KMUTL) Tuptin Angkuew (13) (CU) Chaisut Chat-uthaisri (13) (KMUTL) Prabhas Chongkivattanasri (13) (CU) Tinsane Achalikul (13) (KMUTT) Nipon Theera-Umporn (13) (CMU) Sansanee Auephawitayakul (13) (CMU) Aras Phorphaom (13) (KKU) Pukhong Uthayopas (13) (KKU) Wanchet Khan-ngen (13) (KMUTL) Thammirat Amornrak (13) (KMUTT)</p> <p>General Chair Mamei Krairikah (KMUTL)</p> <p>Vice Chairs Nawapak Eua-Arasri (KKU) Boonying Charoen (KKU)</p> <p>Technical Program Chair Prabhas Chongkivattanasri (CU)</p> <p>Local Arrangement Chair Watis Leelaporn (KKU) Anapap Meenchanboon (KKU)</p> <p>Publication & IS Chair Kanda Rungsongsa Sukkaw (KKU)</p> <p>Finance Chair Rujipan Sampansri (BU) Rujchai Ung-sunaywee (KKU)</p> <p>Registration Chair Anant Sukari (KKU) Pramin Astit (KKU)</p> <p>Publicity Chair Naratise Wongkarn (KKU)</p> <p>General Secretary Pattanawit Polpinit (KKU) Naraset Rungdechajitpon (KKU)</p>	 <p>The program of ECTI-CON 2011 will consist of plenary sessions, invited sessions, and regular technical sessions. Topics of interest for submission include, but are not restricted to:</p> <p>Area 1) Devices, Circuits and Systems: Semiconductor Devices, Analog Circuits, Digital Circuits, Mixed Signal Circuits, Nonlinear Circuits and Systems, Sensing and Sensor Networks, Filters and Data Conversion Circuits, RF and Wireless Circuits, Photonic and Optoelectronic Circuits, Low Power Design and VLSI Physical Design, Biomedical Circuits, Assembly and Packaging Technologies, Test and Reliability, Advanced Technologies (i.e. MEMS and Nano-electronic Devices, Metamaterials).</p> <p>Area 2) Computers and Information Technology: Computer Architecture, Computational Biology and Bioinformatics, Knowledge and Data Engineering, Learning Technologies, Multimedia Services and Technologies, Mobile Computing, Parallel/Distributed Computing and Grid Computing, Pattern Analysis and Machine Intelligence, Software Engineering, Visualization and Computer Graphics.</p> <p>Area 3) Communication Systems: Communication Theory and Information Theory, Antenna and Propagation, Microwave Theory and Techniques, Modulation, Coding, and Channel Analysis, Networks Design, Network Protocols, and Network Management, Optical Communication, Wireless/Mobile Communications & Technologies.</p> <p>Area 4) Controls: Control Theory and Applications, Adaptive and Learning Control Systems, Fuzzy and Neural Control, Mechatronics, Manufacturing Control Systems and Applications, Process Control Systems, Robotics and Automation.</p> <p>Area 5) Electrical Power Systems: Power Engineering and Power Systems, Electromagnetic Compatibility, Energy Conversion, High Voltage Engineering and Insulation, Power Delivery, Power Electronics, Illumination.</p> <p>Area 6) Signal Processing: Signal Processing Theory, Digital Signal Processing Algorithms, Digital Filter Design & Implementation, Array Processing, Adaptive Signal Processing, Audio, Speech, and Language Processing, Image Processing, Video Processing, Medical Signal Processing, Medical Imaging.</p> <p>Area 7) Other Related Fields: Hard Disk Drive Technologies, Intelligent Transportation Systems, Agrionics, Security, Embedded Systems, ECTI Education, ECTI Policy and Law, ECTI Management, etc.</p> <p>PAPER SUBMISSION:</p> <ul style="list-style-type: none"> Prospective authors are invited to submit original full papers without author's names and affiliations, in English, of not more than four (4) pages in standard IEEE two-column format only, reporting their original work and results, applications, and/or implementation in one or more of the listed topics. Papers must be submitted only by internet through the conference web site. Accepted papers are expected to be presented at the conference. http://www.ecti-con2011.org All papers are blind peer reviewed. At least one author of each accepted paper MUST register for the conference in order for the paper to be included in the program and it will be available through <i>IEEE Xplore</i>. <p>Important Dates:</p> <ul style="list-style-type: none"> Full paper submission due date: December 15, 2010 Notification of acceptance: February 1, 2011 Conference advance registration: March 1, 2011 Camera-ready paper submission: March 1, 2011 Conference date: May 17-20, 2011 <p>- Selected papers will be considered for publication in the special issue of the ECTI Transactions. For further information: http://www.ecti-thailand.org</p>
--	--

Contact Address: secretary@ecti-con2011.org OR <http://www.ecti-con2011.org>

ECTI Association
 99 M.18 Pabolyothin Rd., Khong Luang, Pathumthani 12120, THAILAND



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Maximum Power Conversion of a Switched-Reluctance Generator

P.Kerdtuad¹, S.Kittiratsatcha²

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand

¹paiwaker@honda.th.com

²kksupat@gmail.com

Abstract— This paper presents the study of maximum power conversion of a Switched Reluctance Generator (SRG). The SRG is operated in single pulse mode where the rotor speed is above base speed. The turn-on and turn-off angle are varied to study the shape of the phase current which is directly related to the power conversion. A 4 Phase, 2kW, 8/6 SRG is used to collect the experimental results. The converter is the conventional 2-switched per phase and a TMS320F2812 Digital Signal Processing (DSP) is a main controller.

Keywords - Switched-Reluctance Generator (SRG), Single Pulse Operation, Digital Signal Processing (DSP), Asymmetrical Converter.

I. INTRODUCTION

Switched Reluctance Generator (SRG) is an attractive solution for worldwide increasing demand of the renewable energy systems. It is high efficiency, low cost manufacturing and maintenance [5]. It has many applications of SRG that included hybrid electric vehicle, power system in aerospace, uninterruptible power supply and wind-turbine applications [2]. Many researcher are considered the optimal control for the maximum power conversion of the switched reluctance generator, [3] is presented an optimizing performance in current-controlled mode, [4] is presented an analysis of a switched-reluctance generator for maximum power conversion. [5] is presented the design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power. This paper proposed to study of maximum power conversion of SRG in single pulse mode at rotor speed is above base speed. The turn on and turn off angle are varied to study phase current which directly related to the power conversion. The proposed machine is a 4 phase, 2kW 48V and 8/6 poles SRG. by using the TMS320F2812 digital signal processing (DSP) for a main controller.

II. ANALYSIS OF SRG OPERATION

The voltage equation for a phase of switched reluctance generator is given by

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (2)$$

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + e \quad (3)$$

where v is the phase voltage, i is the phase current, R is the phase resistance, L is the phase inductance, θ is the rotor position, e is the back-EMF and ω is the rotor speed.

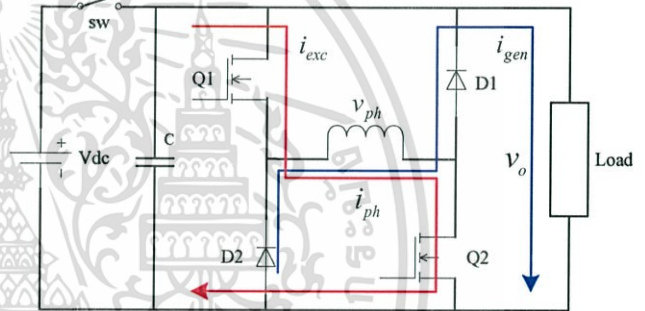


Fig.1. A phase circuit of switched reluctance generator

In case of single pulse mode operation, the currents flowing during θ_{on} and θ_{off} is called excitation current (i_{exc}). And the currents flowing during θ_{off} until θ_{ext} is called generation currents (i_{gen}). Fig. 2 was show phase current waveform in single pulse mode operation. The excitation and generation currents are given by

$$i_{exc} = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i_{ph} d\theta \quad (4)$$

$$i_{gen} = \int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} i_{ph} d\theta \quad (5)$$

III. STUDY OF MAXIMUM POWER CONVERSION

To find maximum output power of the SRG at above base speed operation, the phase voltage depending on switching angles, turn on and turn off. When ignoring the phase ohmic voltage drop compared to dc-bus voltage of (1), the phase flux linkage and phase currents are given by

$$\lambda_{ph} = \int_0^T v_{ph} dt = \begin{cases} \frac{v_{ph}}{\omega} \cdot (\theta - \theta_{on}) & \theta_{off} > \theta \geq \theta_{on} \\ \frac{v_{ph}}{\omega} \cdot (\theta_{off} - \theta_{on} - \theta) & \theta_{ext} > \theta \geq \theta_{off} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$i_{ph} = \frac{\lambda_{ph}}{L_{ph}(\theta)} = \begin{cases} \frac{v_{ph}(\theta - \theta_{on})}{\omega \cdot L_{ph}(\theta)} & \theta_{off} > \theta \geq \theta_{on} \\ \frac{v_{ph}(\theta_{off} - \theta_{on} - \theta)}{\omega \cdot L_{ph}(\theta)} & \theta_{ext} > \theta \geq \theta_{off} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

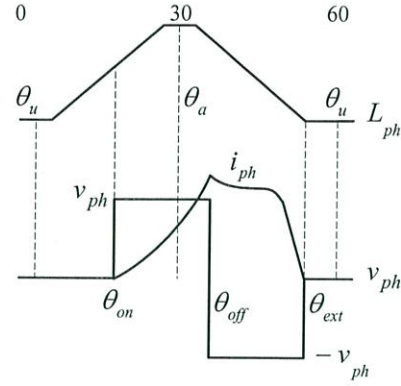


Fig.2 Ideal waveform of phase voltage and phase currents in single pulse mode operation

Where, θ_{ext} is the position that the current drop to zero after tuning off. Substituting (7) in (1), the average power will be calculated by

$$P_{out} = \frac{N \cdot v_{ph}^2}{\omega} \left(\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} \frac{(\theta - \theta_{on}) d\theta}{L_{ph}(\theta)} - \int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} \frac{(\theta_{off} - \theta_{on} - \theta) d\theta}{L_{ph}(\theta)} \right) \quad (8)$$

When the conducting angle was fixed, the output power is proportional to v_{ph}^2 / ω [5].

$$P_{out} = \frac{N \cdot v_{ph}^2}{\omega} f(L_{ph}(\theta), \theta_{on}, \theta_{off}) \quad (9)$$

From (9), There is has many variable effect to output power of the SRG, example are conduction angles, rotor speed, dc-bus voltage and phase inductance.

In this paper, the maximum power conversion was study when constant the rotor speed and dc-bus voltage, the phase inductance is a fixed function of current and rotor position.

$$P_{out} = f(\theta_{on}, \theta_{off}), \omega, v_{ph} = const., L = L(i_{ph}, \theta_{ph}) \quad (10)$$

So the output power of SRG was depended on conducting angles, turn on and turn off angles. Fig.2 is show phase current waveform when maximum power conversion, The back-EMF is equal to dc-bus voltage were optimal conducting angles and rotor speed is above base speed.

IV. EXPERIMENTAL SETUP

The parameters of the SRG is selected for this study are recorded in Table I.

TABLE I
4-PHASE, 48V, 2kW, 8/6 SRG PARAMETER

Number of Phase	: 4	Rated Power	: 2kW
Rated Voltage	: 48V	Phase Resistance	: 15mΩ
Based Speed	: 6000 rpm	La	: 340uH
Pole Configuration	: 8/6	Lu	: 62uH

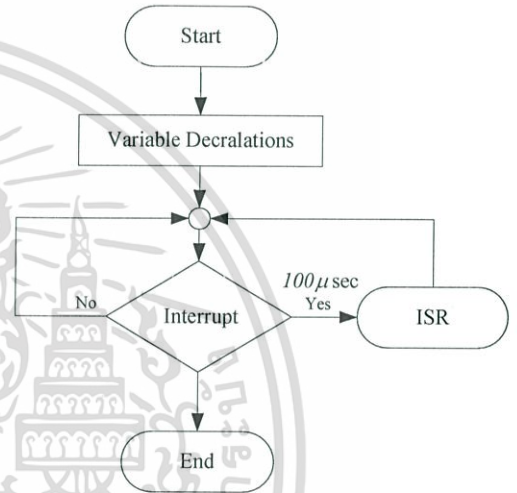


Fig.3 Block diagram of main program

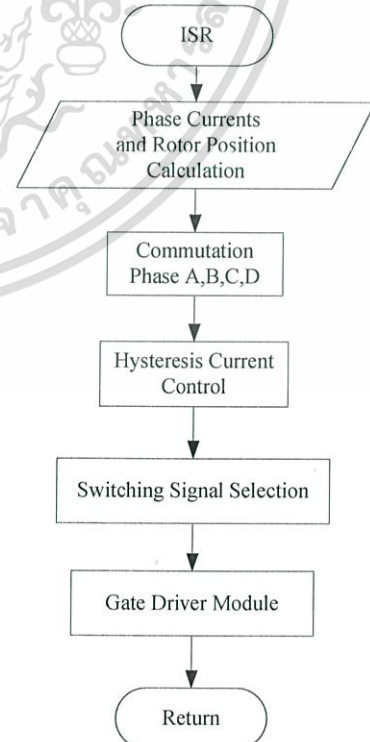


Fig.4 Block diagram of an interrupt service routine (ISR) program

A. Software Controller

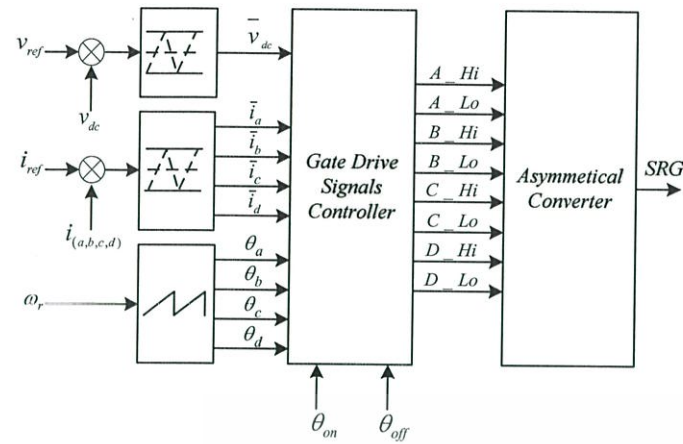


Fig. 5 Block diagram of the DSP controller

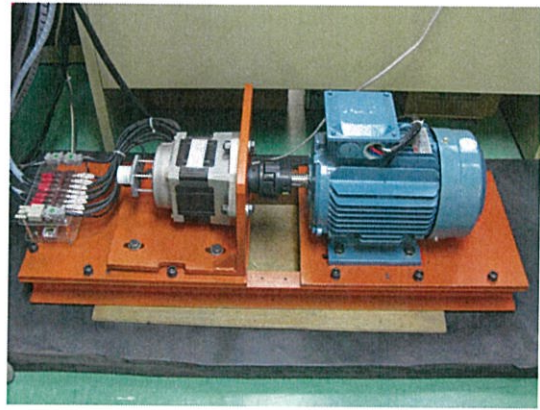


Fig.7 Photograph of the four-phase 3hp 8/6 SRG (on the left) coupled with a 5hp induction Motor prime mover (on the right)

The software controls consist of two parts, the main program and interrupt program. The frequency of switching used in the 10 kHz. The details are show in Fig.3 and 4, respectively. The dc-bus voltage are send from the voltage detector and to be compare with reference voltage is set in the program and maintain the voltage at 48V by using hysteresis voltage controller. The phase currents also used the hysteresis current controllers. The incremental encoder is used for detect the rotor position, output pulses from the encoder send to QEP ports of the DSP. Then DSP calculated and changed to rotor angle and four-phase electrical angle. The turn-on and turn-off angle are fixed by the program control. The algorithms from Fig.5 have been implemented on a TMS320F2812 DSP. The experimental layout of SRG control system is show in Fig.6. Fig.7 and Fig.8 are shows the completed hardware setup.

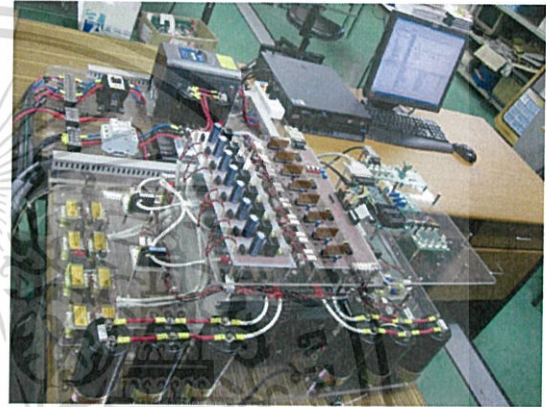


Fig.8 Photograph of a 5kVA asymmetrical converter connected with the EXB850 gate drive circuits and TMS320F2812 (DSP)

B. Experimental Layout

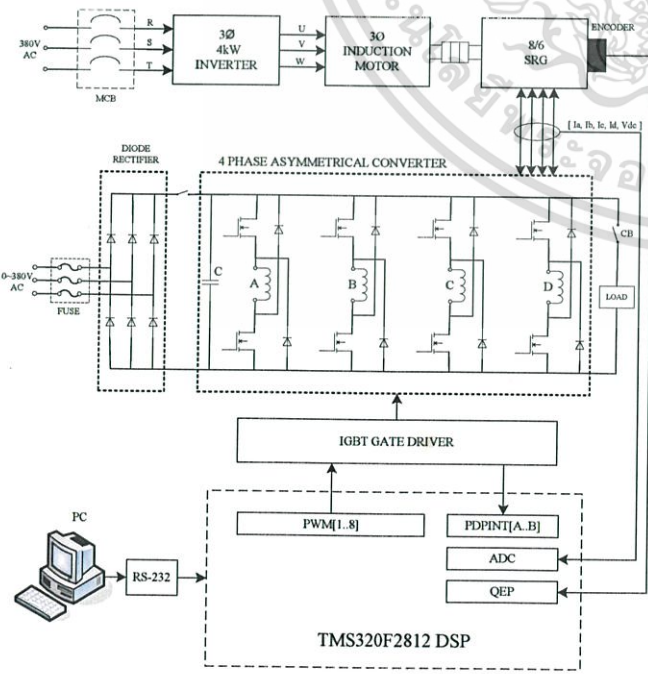


Fig. 6 Experimental layout for the SRG control system

V. SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS

The conditions to verify maximum power conversion of SRG used for simulation and experimental are shows as;

1. Constant rotor speed at above base speeds.
2. Self excitation
3. Adjust turn-on and turn-off angles to verify the shape of phase currents and measurement output power.

Fig.9 and 10 are simulated results. The phase current waveform in Fig.11 and 12 are show when SRG given maximum output power at 6000 and 7200 rpm.

TABLE II
OPTIMAL ANGLE AND SPEED FOR MAXIMUM POWER CONVERSION OF 8/6 SRG

Turn-on angle [°]	Turn-off angle [°]	Rotor Speed [rpm]	Maximum Power [W]
25.00	47.50	3000	370
25.00	45.00	4000	734
25.00	45.00	5000	1072
22.50	45.00	6000	1432
25.00	45.00	6200	1533
15.00	45.00	6800	1514
17.50	45.00	7000	1648
17.50	45.00	7200	1816

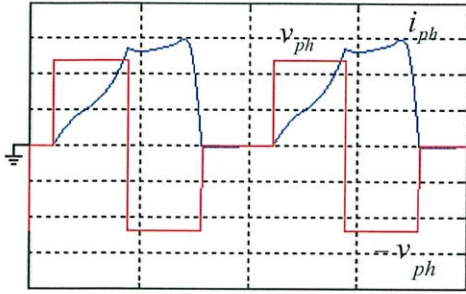


Fig.9 Simulated waveform of phase current, voltage at speed 7200 rpm. at turn-on angle = 17.5° and turn-off angle = 45.0°

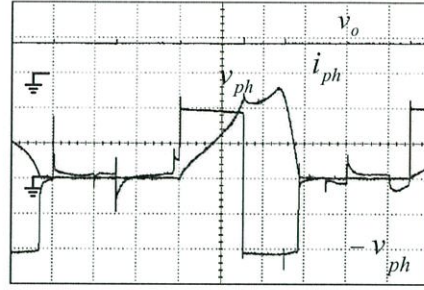


Fig.11 Measured waveform of phase current and voltage at speed 7200 rpm. at turn-on angle = 17.5° and turn-off angle = 45.0°

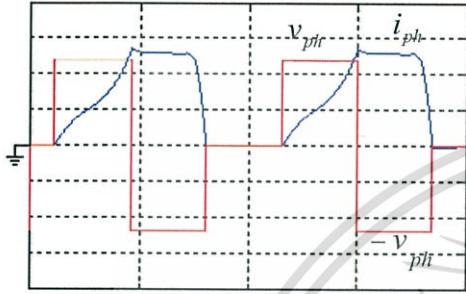


Fig.10 Simulated waveform of phase current and voltage at speed 6000 rpm. at turn-on angle = 17.5° and turn-off angle = 45.0°

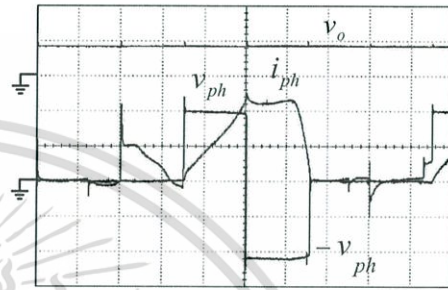


Fig.12 Measured waveform of phase current and voltage at speed 6000 rpm. at turn-on angle = 17.5° and turn-off angle = 45.0°

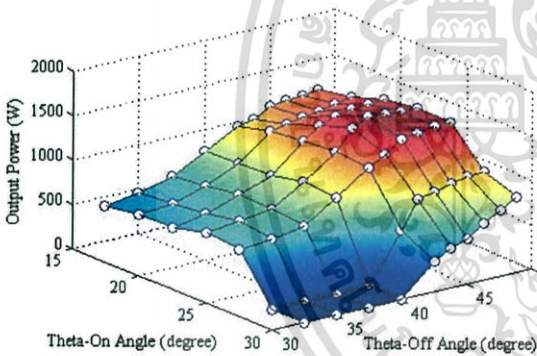


Fig.13 Measured output power versus turn-on and turn off angles when constant dc-bus voltage at rotor speed = 6000 rpm (self excitation)

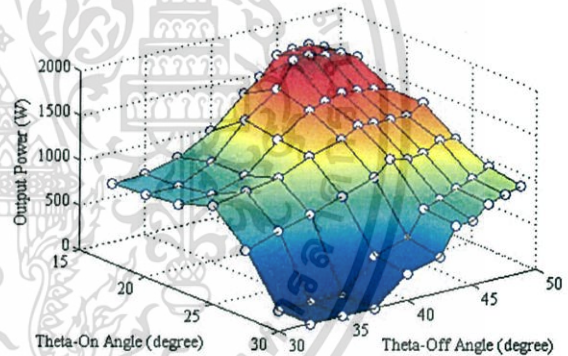


Fig.14 Measured output power versus turn-on and turn off angles when constant dc-bus voltage at rotor speed = 7200 rpm (self excitation)

VI. CONCLUSIONS

In this paper presented, the results of study of maximum power conversion of the switched reluctance generator. In single pulse mode operation, the output power of SRG was depended on conduction angles. In Fig.11 and 12 are show the phase currents waveform during operation at 6000 and 7200 rpm. The optimal turn on and turn off angles and maximum output power at any speed range was show in TABLE II. This data can be applied in future research, such as an optimal angles and output power control of SRG.

VII. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Center of Excellence for Innovative Energy System, CInES at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial support on this research.

VIII. REFERENCES

- [1] T. J. E. Miller, *Electronic Control of Switched Reluctance Machine*. Oxford, U.K.: Newnes 2001.
- [2] C. Mademlis, I. Kioskeridis, "Optimizing Performance in Current-Controlled Switched Reluctance Generators", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, volume 20, issue 3, September 2005, pp.556-565.
- [3] I. Kioskeridis, C. Mademlis, "Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators", *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol.21, no.4, July 2006, pp:1062-1072.
- [4] S.Wongguokoon, S.Kittiratsatcha, "Analysis of a Switched-Reluctance Generator for Maximum Energy Conversion", *Sustainable Energy Technologies*, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on 24-27 Nov. 2008. pp:125-129.
- [5] P.Asadi, M.Ehsani and B.Fahimi, "Design and Control characterization of switched reluctance generator for maximum output power", in 2006 applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.1639-1644.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#####
// FILE: Example_281xCpuTimer.c
// TITLE: Switched-Reluctance Generator Drive
// SPECIFICATION :
//     SRG => 48V, 2.2Kw, 6000 rpm.
#####
// $Release Date: August 10, 2010 : Switched Reluctance Generator Drive
#####
#include "DSP281x_Device.h" // DSP281x Headerfile Include File
#include "DSP281x_Examples.h" // DSP281x Examples Include File
#include "DSP281x_Gpio.h"
#include "f281xqep.h"
#include "f281xpwmDAC.h"
#include "DSP281x_Spi.h"
#include "DSP281x_Adc.h"

// Local Variable declaration
int16 check=0;
int16 CheckA=0;
int16 CheckB=0;
int16 CheckC=0;
int16 CheckD=0;
int16 ElecTheta;
int16 MechTheta;
int16 LineEncoder;
int16 PolePairs;
int16 RawTheta;
int16 QepPpr = 3600; // QEP pulse per revolution
int16 i;
int16 j;
int16 A;
int16 B;
int16 C;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int16 D;
int16 ThetaA =0;
int16 ThetaB =0;
int16 ThetaC =0;
int16 ThetaD =0;
int16 ElecThetaA;
int16 ElecThetaB;
int16 ElecThetaC;
int16 ElecThetaD;
int16 ComA;
int16 ComB;
int16 ComC;
int16 ComD;
int16 Ia;
int16 Ib;
int16 Ic;
int16 Id;
int16 Iref;
int16 Imax;
int16 Imin;
int16 Ihys;
int16 Va;
int16 Vb;
int16 Vc;
int16 Vd;
int16 Vdc;
int16 Vref;
int16 Vmax;
int16 Vmin;
int16 Vhys;
int16 Gate_Drive_A;

```

```
int16 Gate_Drive_B;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```
int16 Gate_Drive_C;
```

ไม่ว่ากรรมใดๆทางอื่น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

int16 Gate_Drive_D;

int16 Gate_Drives;
int16 Gate_Drive_Lo;

int16 Gate_DriveA_Hi;
int16 Gate_DriveB_Hi;
int16 Gate_DriveC_Hi;
int16 Gate_DriveD_Hi;
int16 Gate_DriveA_Lo;
int16 Gate_DriveB_Lo;
int16 Gate_DriveC_Lo;
int16 Gate_DriveD_Lo;

int16 PwmDacCh1 = 0;
int16 PwmDacCh2 = 0;
int16 PwmDacCh3 = 0;

// For SRG Drive
int16 ThetaOn = 2000; // SRG, ThetaOn = 2350, Turn on angle at 55 Degree (ElecTheta)
int16 ThetaOff= 50; // SRG, ThetaOff= 600, Turn Off angle at15 Degree (ElecTheta)
int16 ThetaOff_Reg = 100; // SRG, Turn Off angle, when DC-Bus voltage is over

// For SRM Drive
int16 ThetaOn_SRM = 1100; // SRM, [1100]
int16 ThetaOff_SRM = 1800; // SRM, [1700]
QEP qep1 = QEP_DEFAULTS;
PWMDAC pwmdac1 = PWMDAC_DEFAULTS;

// Prototype statements for functions found within this file.
void delay_loop(void);
interrupt void adc_isr(void);
interrupt void EvaTimer2(void);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

interrupt void cpu_timer0_isr(void);
interrupt void PDPINTA_ISR(void);
interrupt void PDPINTB_ISR(void);
void main(void)
{
    InitSysCtrl();
    EALLOW;

    GpioMuxRegs.GPAMUX.all = 0x0700;    // Set GPIOA pin to primary function
    GpioMuxRegs.GPADIR.all = 0x0FFF;    // Set GPIOA pin as output function
    SysCtrlRegs.HISPCP.all = 0x3;      // HSPCLK = SYSCLKOUT/6 (ADC Module)
    GpioMuxRegs.GPDMUX.bit.T1CTRIIP_PDPA_GPIOD0 = 0; // Set GPIOD0 to GPIO
                                                function
    GpioMuxRegs.GPDDIR.bit.GPIOD0 = 1; // Set GPIOD0 to output pin
    EDIS;
    DINT;
    InitPieCtrl();
    // Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
    IER = 0x0000;
    IFR = 0x0000;
    InitPieVectTable();
    // ISR functions found within this file.
    EALLOW;
    PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr;
    PieVectTable.CAPINT3 = &EvaTimer2;
    PieVectTable.ADCINT = &adc_isr;
    EDIS;
    InitCpuTimers(); // For this example, only initialize the Cpu Timers
                    // Configure CPU-Timer 0 to interrupt every 0.1 mSec:
                    // 150MHz CPU Freq, 0.1mSec. Period (in uSeconds)
    ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 150, 100); // Switching Frequency = 10 kHz.
    StartCpuTimer0();

```

```

// Enable CAP3 interrupt bits for GP_Timer2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP3INT = 1;
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

EvaRegs.EVAIFRC.bit.CAP3INT = 1;
// Set up the capture pins to primary functions
EALLOW;
GpioMuxRegs.GPAMUX.all |= 0x0700;
EDIS;

// Initialize ADC Module
InitAdc();

// Initialize PWMDAC Module
    pwmdac1.PeriodMax = 2500;
    pwmdac1.PwmDacInPointer0 = &PwmDacCh1;
    pwmdac1.PwmDacInPointer1 = &PwmDacCh2;
    pwmdac1.PwmDacInPointer2 = &PwmDacCh3;
    pwmdac1.init(&pwmdac1);
// Initialize QEP module
qep1.LineEncoder = QepPpr;
qep1.init(&qep1);

// Enable ADCINT in the PIE; Group 1 interrupt 6
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6 = 1;
// Enable TINT0 in the PIE: Group 1 interrupt 7
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;
// Enable PIE group 3 interrupt 7 for CAP3INT
PieCtrlRegs.PIEIER3.all = M_INT7;
// Enable CPU INT1 which is connected to CPU-Timer 0 and INT3 for CAP3INT:
IER |= (M_INT1 | M_INT3 | M_INT7);

// Enable global Interrupts and higher priority real-time debug events:
EINT; // Enable Global interrupt INTM
ERTM; // Enable Global realtime interrupt DBGM

// Configuration of ADC Module
AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0004; // Setup 2 conv's on SEQ1
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // Setup ADCINA0 as 1st SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // Setup ADCINA1 as 2nd SEQ1 conv.

```

```

    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; // Setup ADCINA2 as 3rd SEQ1 conv.
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; // Setup ADCINA3 as 4th SEQ1 conv.
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.EVA_SOC_SEQ1 = 1; // Enable EVASOC to start SEQ1
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1; // Enable SEQ1 interrupt (every EOS)
// Assumes EVA Clock is already enabled in InitSysCtrl();
    EvaRegs.T1CMPR = 750; // Setup T1 compare value
    EvaRegs.T1PR = 1250; // Setup period register
    EvaRegs.GPTCONA.bit.T1TOADC = 1; // Enable EVASOC in EVA
    EvaRegs.T1CON.all = 0x1042; // Enable timer 1 compare (upcount mode)
// To reset QEP counter
// EvaRegs.T2CNT = 0;
// Step 6. IDLE loop. Just sit and loop forever
for(;;)
}
void delay_loop()
{
    short i;
    for (i = 1; i < 2500; i++){
    }
interrupt void adc_isr(void)
{
    // To check actual value of Current and DC-Bus voltage
    while (AdcRegs.ADCST.bit.SEQ1_BSY == 1);
    {};
    Ia = AdcRegs.ADCRESULT0 >>4; // Changed to 12 bits value.
    Ib = AdcRegs.ADCRESULT1 >>4; // Changed to 12 bits value.
    Ic = AdcRegs.ADCRESULT2 >>4; // Changed to 12 bits value.
    Id = AdcRegs.ADCRESULT3 >>4; // Changed to 12 bits value.
    Vdc= AdcRegs.ADCRESULT4 >>4; // Changed to 12 bits value.
// Reinitialize for next ADC sequence
    AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reset SEQ1
    AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1; // Clear INT SEQ1 bit
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Acknowledge interrupt to PIE

```

```

// GpioDataRegs.GPDDAT.bit.GPIOD0 = 0;
}

interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
//=====
// To check maximum range of the ISR program      //
// GpioDataRegs.GPDDAT.bit.GPIOD0 = 1;           //
//=====

// To find maximum and minimum value of phase current
    Iref = 1365;      // Reference current at 1.0V [ 1365 = 4095*(1.0V/3.0V) ]
    Ihys = 10;       // Hysteresis band
    Imax = Iref + Ihys; // Maximum current ( ADCIN )
    Imin = Iref - Ihys; // Minimum current ( ADCIN )
// To find maximum and minimum value of DC-Bus voltage
    Vref = 4095;     // Reference voltage at 48V
    Vhys = 20;      // Hysteresis band = 2V
    Vmax = Vref + Vhys; // Maximum voltage at 53V
    Vmin = Vref - Vhys; // Minimum voltage at 43V
// -----
// Check Pulse Counts from QEP Encoder ( 4*3600 = 14400 Pulse / Rev. )
// -----

    qep1.calc(&qep1);

    MechTheta = EvaRegs.T2CNT; // Maximum counts = 14400

    RawTheta = MechTheta;

// To find ElecTheta of Phase A
if ( MechTheta >=0 & MechTheta <=2399 ) // Angle = 60 degree => 2400 Pulse
    RawTheta = MechTheta - 2399;

else if ( MechTheta > 2399 & MechTheta <=4799 ) // Angle = 120 degree => 4800 pulse
    RawTheta = MechTheta - 4799;

else if ( MechTheta > 4799 & MechTheta <=7199 ) // Angle = 180 degree => 7200 pulse
    RawTheta = MechTheta - 7199;

```

```

else if ( MechTheta > 7199 & MechTheta <=9599 ) // Angle = 240 degree => 9600 pulse
    RawTheta = MechTheta - 9599;
else if ( MechTheta > 9599 & MechTheta <=11999 ) // Angle = 300 degree => 12000 pulse
    RawTheta = MechTheta - 11999;
else if ( MechTheta >11999 & MechTheta <=14399 ) // Angle = 360 degree => 14400 pulse
    RawTheta = MechTheta - 14399;

//*****//

ElecTheta = RawTheta + 2399;
ThetaA = ElecTheta;
ComA = ThetaA;

// To find ElecTheta of Phase B
B = ThetaA;
B = B + 1800;
if (B > 2399)
    ThetaB = B-2399;
else
    ThetaB = B;

// To find ElecTheta of Phase C
C = ThetaB;
C = C + 1800;
if (C > 2399)
    ThetaC = C-2399;
else
    ThetaC = C;

// To find ElecTheta of Phase D
D = ThetaC;
D = D + 1800;
if (D > 2399)
    ThetaD = D-2399;
else
    ThetaD = D;

```

// Connect to DC-Bus voltage regulation module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 /*
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if ( Vdc >= Vmax )           // If Vdc => 48 Volt, Reduced ThetaOff
    ThetaOff = ThetaOff_Reg;
else if ( Vdc <= Vmin )      // If Vdc <= 48 Volt, Used old ThetaOff
    ThetaOff = ThetaOff;

*/

// To find the Commutation of Phase A
ComA = ThetaA;

// For SRG control [ Soft Chopping Mode ]
/*

if (ComA >= ThetaOn & ComA <= 2399)
{
    if (CheckA == 0)
    {
        if (Ia <= Imin )
        {
            Gate_DriveA_Hi = 1;
            Gate_DriveA_Lo = 1;
        }
        else if (Ia >= Imax )
        {
            Gate_DriveA_Hi = 0;
            Gate_DriveA_Lo = 0;
            CheckA = 1;
        }
    }
}

else if (CheckA == 1)
{
    if (Ia <= Imin )
    {
        Gate_DriveA_Hi = 1;
        Gate_DriveA_Lo = 0;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
        Gate_DriveA_Hi = 0;
        Gate_DriveA_Lo = 0;
    }
}
}
else if (ComA >= 0 & ComA <= ThetaOff)
{

```

```

    if (CheckA == 0)
    {
        if (Ia <= Imin )
        {
            Gate_DriveA_Hi = 1;
            Gate_DriveA_Lo = 1;
        }
        else if (Ia >= Imax )
        {
            Gate_DriveA_Hi = 0;
            Gate_DriveA_Lo = 0;
            CheckA = 1;
        }
    }
    else if (CheckA == 1)
    {

```

```

        if (Ia <= Imin )
        {
            Gate_DriveA_Hi = 1;
            Gate_DriveA_Lo = 0;
        }
        else if (Ia >= Imax )
        {

```

```

            Gate_DriveA_Hi = 0;
            Gate_DriveA_Lo = 0;
        }
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        }
    }
}
else
{
    Gate_DriveA_Hi = 0;
    Gate_DriveA_Lo = 0;
    CheckA = 0;
}
}
*/
// For SRG control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComA >= ThetaOn & ComA <= 2399)
{
    if (Ia <= Imin )
    {
        Gate_DriveA_Hi = 1;
        Gate_DriveA_Lo = 1;
    }
    else if (Ia >= Imax )
    {
        Gate_DriveA_Hi = 0;
        Gate_DriveA_Lo = 0;
    }
}
}
else if (ComA >= 0 & ComA <= ThetaOff)
{
    if (Ia <= Imin )
    {
        Gate_DriveA_Hi = 1;
        Gate_DriveA_Lo = 1;
    }
    else if (Ia >= Imax )
    {
        Gate_DriveA_Hi = 0;
        Gate_DriveA_Lo = 0;
    }
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Gate_DriveA_Hi = 0;
Gate_DriveA_Lo = 0;
}
}
else
{
Gate_DriveA_Hi = 0;
Gate_DriveA_Lo = 0;
}
// ==> For SRM control
/* if (ComA >= ThetaOn_SRM & ComA <= ThetaOff_SRM)
{
if ( Ia <= Imin ) // Current Regulation of Phase A
{
Gate_DriveA_Hi = 1;
Gate_DriveA_Lo = 1;
}
else if( Ia >= Imax )
{
Gate_DriveA_Hi = 0;
Gate_DriveA_Lo = 0;
}
}
}
else
{
Gate_DriveA_Hi = 0;
Gate_DriveA_Lo = 0;
}
*/

```

// Connected to Gate Drive Module of Phase A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA0 = Gate_DriveA_Hi; // Gate_DriveA_Hi;
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA1 = Gate_DriveA_Lo; // Gate_DriveA_Lo;
// To find the Commutation of Phase B
ComB = ThetaB;
// For SRG control [ Soft Chopping Mode ]
/*
if (ComB >= ThetaOn & ComB <= 2399)
{
    if (CheckB == 0)
    {
        if (Ib <= Imin )
        {
            Gate_DriveB_Hi = 1;
            Gate_DriveB_Lo = 1;
        }
        else if (Ib >= Imax )
        {
            Gate_DriveB_Hi = 0;
            Gate_DriveB_Lo = 0;
            CheckB = 1;
        }
    }
    else if (CheckB == 1)
    {
        if (Ib <= Imin )
        {
            Gate_DriveB_Hi = 1;
            Gate_DriveB_Lo = 0;
        }
        else if (Ib >= Imax )
        {
            Gate_DriveB_Hi = 0;
            Gate_DriveB_Lo = 0;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}
else if (ComB >= 0 & ComB <= ThetaOff)
{
    if (CheckB == 0)
    {
        if (Ib <= Imin )
        {
            Gate_DriveB_Hi = 1;
            Gate_DriveB_Lo = 1;
        }
        else if (Ib >= Imax )
        {
            Gate_DriveB_Hi = 0;
            Gate_DriveB_Lo = 0;
            CheckB = 1;
        }
        else if (CheckB == 1)
        {
            if (Ib <= Imin )
            {
                Gate_DriveB_Hi = 1;
                Gate_DriveB_Lo = 0;
            }
            else if (Ib >= Imax )
            {
                Gate_DriveB_Hi = 0;
                Gate_DriveB_Lo = 0;
            }
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 else
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    Gate_DriveB_Hi = 0;
    Gate_DriveB_Lo = 0;
    CheckB = 0;
}

*/

// For SRG control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComB >= ThetaOn & ComB <= 2399)
{
    if (Ib <= Imin )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 1;
        Gate_DriveB_Lo = 1;
    }
    else if (Ib >= Imax )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 0;
        Gate_DriveB_Lo = 0;
    }
}
else if (ComB >= 0 & ComB <= ThetaOff)
{
    if (Ib <= Imin )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 1;
        Gate_DriveB_Lo = 1;
    }
    else if (Ib >= Imax )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 0;
        Gate_DriveB_Lo = 0;
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
{
    Gate_DriveB_Hi = 0;
    Gate_DriveB_Lo = 0;
}

// ==> For SRM control
/*    if (ComB >= ThetaOn_SRM & ComB <= ThetaOff_SRM)
{
    if ( Ib <= Imin )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 1;
        Gate_DriveB_Lo = 1;
    }
    else if( Ib >= Imax )
    {
        Gate_DriveB_Hi = 0;
        Gate_DriveB_Lo = 0;
    }
}
else
{
    Gate_DriveB_Hi = 0;
    Gate_DriveB_Lo = 0;
}
*/

// Connected to Gate Drive Module of Phase B
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA2 = Gate_DriveB_Hi; // Gate_DriveB_Hi;
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA3 = Gate_DriveB_Lo; // Gate_DriveB_Lo;

// To find the Commutation of Phase C
ComC = ThetaC;

```

// For SRG control [Soft Chopping Mode]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 /*
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (ComC >= ThetaOn & ComC <= 2399)
{
    if (CheckC == 0)
    {
        if (Ic <= Imin )
        {
            Gate_DriveC_Hi = 1;
            Gate_DriveC_Lo = 1;
        }
        else if (Ic >= Imax )
        {
            Gate_DriveC_Hi = 0;
            Gate_DriveC_Lo = 0;
            CheckC = 1;
        }
    }
    else if (CheckC == 1)
    {
        if (Ic <= Imin )
        {
            Gate_DriveC_Hi = 1;
            Gate_DriveC_Lo = 0;
        }
        else if (Ic >= Imax )
        {
            Gate_DriveC_Hi = 0;
            Gate_DriveC_Lo = 0;
        }
    }
}
}
else if (ComC >= 0 & ComC <= ThetaOff)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 if (CheckC == 0)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    if (Ic <= Imin )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 1;
    }
    else if (Ic >= Imax )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 0;
        CheckC = 1;
    }
}
else if (CheckC == 1)
{
    if (Ic <= Imin )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 0;
    }
    else if (Ic >= Imax )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 0;
    }
}
}
else
{
    Gate_DriveC_Hi = 0;
    Gate_DriveC_Lo = 0;
    CheckC = 0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

*/
// For SRG control [ Hard Chopping Mode ]
if (ComC >= ThetaOn & ComC <= 2399)
{
    if (Ic <= Imin )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 1;
    }
    else if (Ic >= Imax )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 0;
    }
}
else if (ComC >= 0 & ComC <= ThetaOff)
{
    if (Ic <= Imin )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 1;
        Gate_DriveC_Lo = 1;
    }
    else if (Ic >= Imax )
    {
        Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 0;
    }
}
}
else
{
    Gate_DriveC_Hi = 0;
    Gate_DriveC_Lo = 0;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// ==> For SRM control
/*      if (ComC >= ThetaOn_SRM & ComC <= ThetaOff_SRM)
    {
        if ( Ic <= Imin )
            {
                Gate_DriveC_Hi = 1;
                Gate_DriveC_Lo = 1;
            }
        else if( Ic >= Imax )
            {
                Gate_DriveC_Hi = 0;
                Gate_DriveC_Lo = 0;
            }
    }
else
    {
        Gate_DriveC_Hi = 0;
        Gate_DriveC_Lo = 0;
    }
*/
// Connected to Gate Drive Module of Phase C
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA4 = Gate_DriveC_Hi; //Gate_DriveC_Hi
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA5 = Gate_DriveC_Lo; //Gate_DriveC_Lo
// To find the Commutation of Phase D
    ComD = ThetaD;
// For SRG control [ Soft Chopping Mode ]
/*
    if (ComD >= ThetaOn & ComD <= 2399)
        {
            if (CheckD == 0)
                {
                    if (Id <= Imin )

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Gate_DriveD_Hi = 1;
Gate_DriveD_Lo = 1;
}
else if (Id >= Imax )
{
Gate_DriveD_Hi = 0;
Gate_DriveD_Lo = 0;
CheckD = 1;
}
}
else if (CheckD == 1)
{
if (Id <= Imin )
{
Gate_DriveD_Hi = 1;
Gate_DriveD_Lo = 0;
}
else if (Id >= Imax )
{
Gate_DriveD_Hi = 0;
Gate_DriveD_Lo = 0;
}
}
}
else if (ComD >= 0 & ComD <= ThetaOff)
{
if (CheckD == 0)
{
if (Id <= Imin )
{
Gate_DriveD_Hi = 1;
Gate_DriveD_Lo = 1;
}
}
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if (Id >= Imax )
{
Gate_DriveD_Hi = 0;
Gate_DriveD_Lo = 0;
CheckD = 1;
}
}
else if (CheckD == 1)
{
if (Id <= Imin )
{
Gate_DriveD_Hi = 1;
Gate_DriveD_Lo = 0;
}
else if (Id >= Imax )
{
Gate_DriveD_Hi = 0;
Gate_DriveD_Lo = 0;
}
}
}
else
{
Gate_DriveD_Hi = 0;
Gate_DriveD_Lo = 0;
CheckD = 0;
}
}
*/

```

// For SRG control [Hard Chopping Mode]

```
if (ComD >= ThetaOn & ComD <= 2399)
```

```
{
if (Id <= Imin )
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
        Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 1;
    }
else if (Id >= Imax )
    {
        Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 0;
    }
}
else if (ComD >= 0 & ComD <= ThetaOff)
{
    if (Id <= Imin )
    {
        Gate_DriveD_Hi = 1;
        Gate_DriveD_Lo = 1;
    }
    else if (Id >= Imax )
    {
        Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 0;
    }
}
else
{
    Gate_DriveD_Hi = 0;
    Gate_DriveD_Lo = 0;
}

// ==> For SRM control
/*    if (ComD >= ThetaOn_SRM & ComD <= ThetaOff_SRM)
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        {
            Gate_DriveD_Hi = 1;
            Gate_DriveD_Lo = 1;
        }
    else if( Id >= Imax )
    {
        Gate_DriveD_Hi = 0;
        Gate_DriveD_Lo = 0;
    }
}
else
{
    Gate_DriveD_Hi = 0;
    Gate_DriveD_Lo = 0;
}
*/
// Connected to Gate Drive Module of Phase D
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA6 = Gate_DriveD_Hi;
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA7 = Gate_DriveD_Lo;
// Connected input of the PWMDAC Module
PwmDacCh1 = MechTheta;
PwmDacCh2 = ThetaA;
PwmDacCh3 = ThetaB;
// Call the PWMDAC update function
pwmdac1.update(&pwmdac1);
// Acknowledge this interrupt to receive more interrupts from group 1
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
// End of programe lenght check
// GpioDataRegs.GPDDAT.bit.GPIOD0 = 0;
}
interrupt void EvaTimer2(void)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 // Connect to QEP driver to update with next ISR
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

qep1.isr(&qep1);
// Enable more interrupts from this timer
    EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP3INT = 1;
    EvaRegs.EVAIFRC.all = BIT2;
// Acknowledge interrupt to receive more interrupts from PIE group 3
    PieCtrlRegs.PIEACK.all |= PIEACK_GROUP3;
}
//=====
// End //
//=====

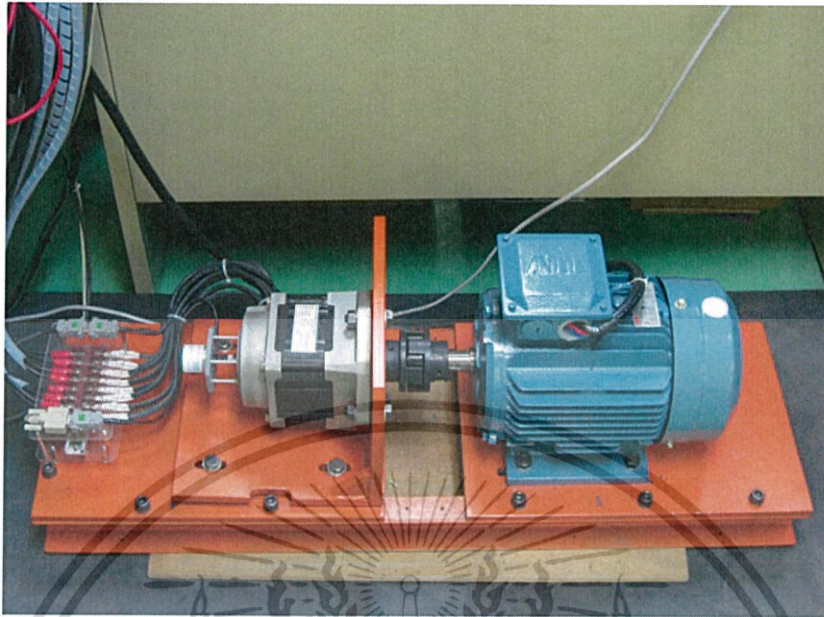
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

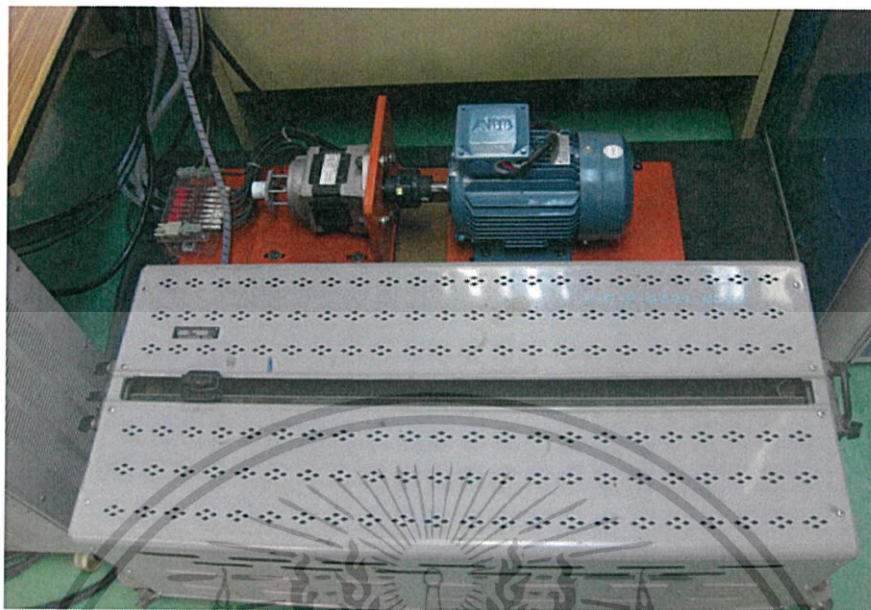


รูปที่ ค.1 แสดงการติดตั้ง SRG ซึ่งที่เพลานั้นใช้ Coupling ยึดเข้ากับเพลลาของ Induction Motor ที่ทำหน้าที่เป็น Primover



รูปที่ ค.2 แสดงระบบควบคุม SRG ที่สร้างขึ้นประกอบด้วย DSP เชื่อมต่อกับ PC ผ่านพอร์ต RS323, วงจรขั้วเกต, วงจรDAC, วงจรคอนเวอร์เตอร์ และวงจรควบคุมความเร็วของ Induction Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

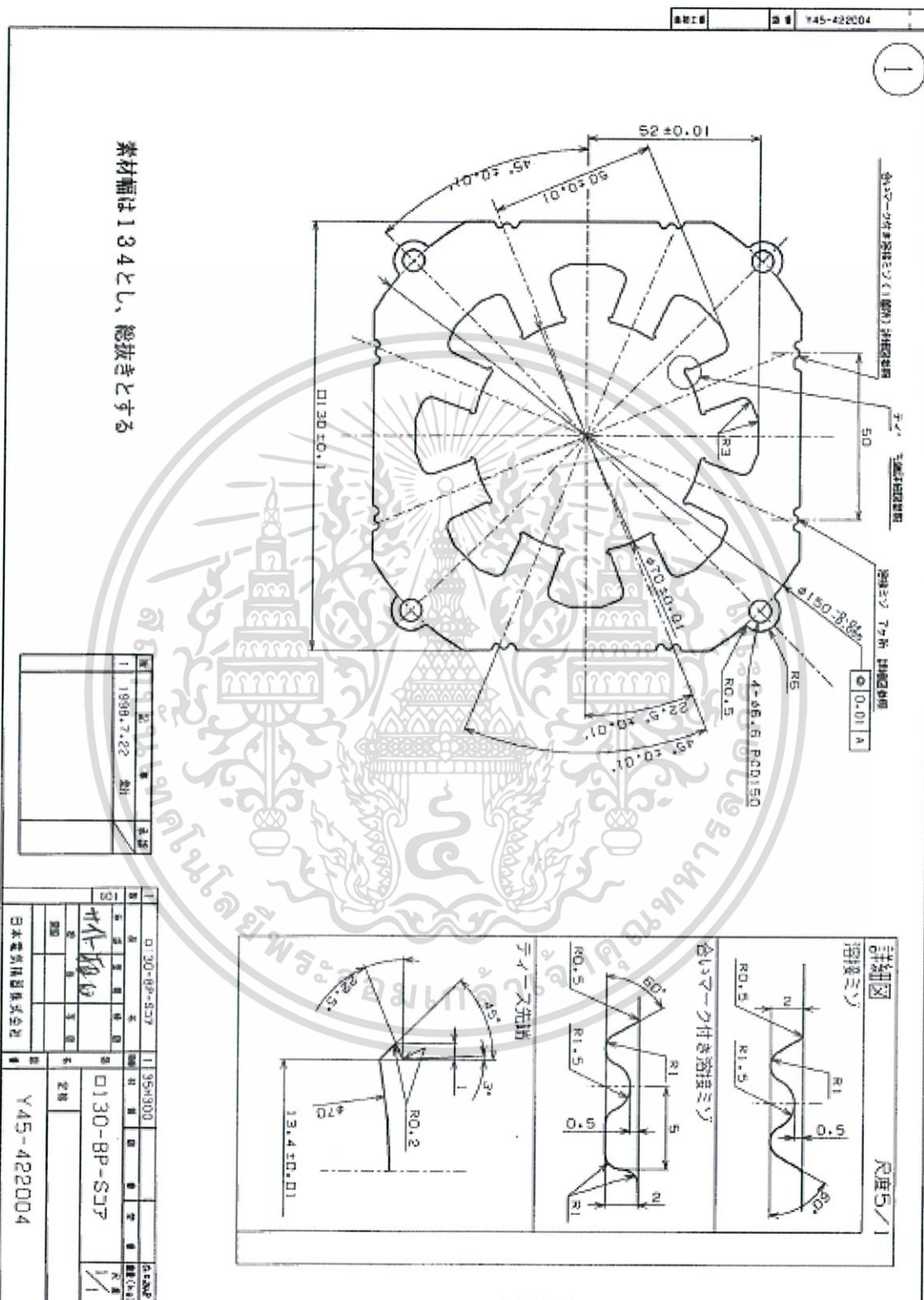


รูปที่ ค.3 แสดงโหลดที่ใช้ในการทดสอบแบบความต้านทานปรับค่าได้
ขนาดพิกัดกำลังสูงสุด 4 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.
ข้อมูลด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6
ขนาดพิกัดกำลัง 2.2 กิโลวัตต์ พิกัดแรงดัน 48 โวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ.

ตารางบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1

ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 35.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	0.00	0.00	0.00
2800	0.00	0.00	0.00
3000	0.00	0.00	0.00
3200	0.00	0.00	0.00
3400	0.00	0.00	0.00
3600	0.00	0.00	0.00
3800	0.00	0.00	0.00
4000	0.00	0.00	0.00
4200	0.00	0.00	0.00
4400	0.00	0.00	0.00
4600	0.00	0.00	0.00
4800	0.00	0.00	0.00
5000	0.00	0.00	0.00
5200	0.00	0.00	0.00
5400	0.00	0.00	0.00
5600	43.82	6.70	293.59
5800	44.83	7.20	322.78
6000	45.13	7.30	329.45
6200	48.89	8.30	405.79
6400	53.03	11.30	599.24
6600	55.48	11.90	660.21
6800	56.09	12.80	717.95
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.2

ผลการทดลองขณะทำงานที่มุม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 37.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	0.00	0.00	0.00
2800	18.99	7.70	146.22
3000	20.64	8.40	173.38
3200	22.73	9.20	209.12
3400	24.72	10.00	247.20
3600	26.64	11.00	293.04
3800	28.45	11.60	330.02
4000	30.27	12.60	381.40
4200	31.52	13.10	412.91
4400	34.56	14.40	497.66
4600	35.62	14.90	530.74
4800	38.10	16.00	609.60
5000	39.95	16.80	671.16
5200	41.29	17.40	718.45
5400	43.29	18.40	796.54
5600	46.02	19.80	911.20
5800	47.56	20.50	974.98
6000	49.33	21.10	1040.86
6200	51.68	22.60	1167.97
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3

ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 40.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	13.61	4.70	63.97
2400	15.53	5.60	86.97
2600	17.38	6.40	111.23
2800	19.19	7.30	140.09
3000	21.14	8.00	169.12
3200	22.93	8.80	201.78
3400	24.95	9.60	239.52
3600	26.91	10.50	282.56
3800	28.87	11.30	326.23
4000	30.71	12.00	368.52
4200	32.16	12.70	408.43
4400	34.77	14.00	486.78
4600	35.96	14.70	528.61
4800	39.53	15.80	624.57
5000	40.55	16.70	677.19
5200	41.87	17.30	724.35
5400	44.61	18.40	820.82
5600	46.98	19.70	925.51
5800	48.13	20.10	967.41
6000	49.93	20.90	1043.54
6200	51.33	21.90	1124.13
6400	55.52	23.90	1326.93
6600	57.52	24.60	1414.99
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยหรือการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.4

ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	11.44	4.10	46.90
2200	13.51	4.80	64.85
2400	15.56	5.60	87.14
2600	17.65	6.60	116.49
2800	19.54	7.40	144.60
3000	21.31	8.20	174.74
3200	23.31	9.00	209.79
3400	25.43	10.00	254.30
3600	27.49	10.80	296.89
3800	29.16	11.50	335.34
4000	31.41	12.70	398.91
4200	33.35	13.20	440.22
4400	35.75	14.70	525.53
4600	36.57	14.90	544.89
4800	40.19	16.80	675.19
5000	41.31	17.20	710.53
5200	42.93	17.50	751.28
5400	45.33	19.10	865.80
5600	48.65	20.50	997.33
5800	49.01	20.80	1019.41
6000	50.03	21.10	1055.63
6200	52.52	22.40	1176.45
6400	56.24	24.10	1355.38
6600	58.57	25.50	1493.54
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเอกสารนี้โดยไม่ขออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.5

ผลการทดลองขณะที่ SRG ทำงานที่มุม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	8.88	2.60	23.09
2000	11.72	3.70	43.36
2200	13.98	4.70	65.71
2400	16.26	5.70	92.68
2600	18.56	6.80	126.21
2800	20.45	7.50	153.38
3000	22.07	8.20	180.97
3200	24.18	9.10	220.04
3400	26.49	10.10	267.55
3600	28.74	10.90	313.27
3800	29.73	11.50	341.90
4000	32.12	12.60	404.71
4200	33.52	12.80	429.06
4400	36.53	14.70	536.99
4600	36.83	14.80	545.08
4800	40.91	16.50	675.02
5000	42.49	17.30	735.08
5200	43.77	17.80	779.11
5400	46.03	19.00	874.57
5600	49.49	20.60	1019.49
5800	49.84	20.90	1041.66
6000	50.80	21.20	1076.96
6200	53.94	22.30	1202.86
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.6

ผลการทดสอบที่มุม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	9.18	3.10	28.46
2000	12.24	4.40	53.86
2200	14.00	5.20	72.80
2400	16.64	6.20	103.17
2600	18.71	7.20	134.71
2800	20.97	8.10	169.86
3000	22.75	9.00	204.75
3200	24.67	9.80	241.77
3400	26.91	10.70	287.94
3600	29.14	11.60	338.02
3800	30.52	12.50	381.50
4000	32.64	13.30	434.11
4200	33.91	14.20	481.52
4400	36.72	15.20	558.14
4600	37.77	15.80	596.77
4800	41.14	17.20	707.61
5000	42.40	18.00	763.20
5200	43.71	18.60	813.01
5400	46.74	19.70	920.78
5600	49.55	21.10	1045.51
5800	50.35	21.50	1082.53
6000	51.44	22.10	1136.82
6200	54.32	23.30	1265.66
6400	57.60	24.20	1393.92
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.7

ผลการทดสอบที่มุม $\theta_{on} = 12.5^\circ$, $\theta_{off} = 50^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	9.35	4.10	38.34
2000	12.63	5.40	68.20
2200	14.99	6.40	95.94
2400	17.26	7.40	127.72
2600	19.47	8.30	161.60
2800	21.77	9.30	202.46
3000	23.76	10.20	242.35
3200	25.61	11.00	281.71
3400	28.14	12.10	340.49
3600	29.42	12.70	373.63
3800	31.18	13.70	427.17
4000	33.49	14.40	482.26
4200	34.93	15.40	537.92
4400	37.50	16.50	618.75
4600	38.85	17.00	660.45
4800	41.42	18.20	753.84
5000	43.22	19.20	829.82
5200	44.75	20.00	895.00
5400	47.74	21.30	1016.86
5600	49.64	22.20	1102.01
5800	50.99	22.70	1157.47
6000	51.98	23.40	1216.33
6200	54.84	24.40	1338.10
6400	56.74	25.60	1452.54
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.8
ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 37.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	14.30	5.90	84.37
2400	16.17	6.70	108.34
2600	18.16	7.60	138.02
2800	19.95	8.50	169.58
3000	22.04	9.40	207.18
3200	24.06	10.30	247.82
3400	26.25	11.20	294.00
3600	28.01	12.00	336.12
3800	29.89	12.80	382.59
4000	31.93	13.80	440.63
4200	33.70	14.70	495.39
4400	36.17	15.70	567.87
4600	38.09	16.90	643.72
4800	40.01	17.70	708.18
5000	42.35	19.10	808.89
5200	45.31	20.10	910.73
5400	46.98	21.00	986.58
5600	48.99	21.70	1063.08
5800	50.86	22.70	1154.52
6000	54.17	24.40	1321.75
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.9
ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 40^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	0.00	0.00	0.00
2800	0.00	0.00	0.00
3000	21.64	9.10	196.92
3200	23.88	9.50	226.86
3400	26.43	10.60	280.16
3600	28.00	11.50	322.00
3800	30.06	12.20	366.73
4000	32.00	13.50	432.00
4200	34.18	14.10	481.94
4400	36.17	15.20	549.78
4600	38.47	16.10	619.37
4800	40.27	17.10	688.62
5000	42.09	18.20	766.04
5200	45.23	19.20	868.42
5400	46.90	19.80	928.62
5600	48.29	21.00	1014.09
5800	50.92	21.70	1104.96
6000	54.32	23.60	1281.95
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.10

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	9.78	0.50	4.89
2000	12.26	0.80	9.81
2200	14.14	1.10	15.55
2400	16.30	2.00	32.60
2600	18.61	2.90	53.97
2800	20.49	3.70	75.81
3000	22.18	4.50	99.81
3200	24.59	5.60	137.70
3400	27.12	6.60	178.99
3600	28.78	7.30	210.09
3800	30.56	8.10	247.54
4000	33.51	9.20	308.29
4200	34.47	9.80	337.81
4400	37.03	11.30	418.44
4600	39.49	12.20	481.78
4800	40.87	12.70	519.05
5000	43.63	14.10	615.18
5200	46.47	15.60	724.93
5400	47.91	16.10	771.35
5600	49.24	16.70	822.31
5800	51.57	17.80	917.95
6000	54.42	19.80	1077.52
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.11

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 45^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	9.77	4.10	40.06
2000	12.54	5.40	67.72
2200	15.34	6.50	99.71
2400	17.18	7.40	127.13
2600	19.98	8.50	169.83
2800	21.77	9.40	204.64
3000	23.72	10.30	244.32
3200	25.81	11.20	289.07
3400	28.36	12.60	357.34
3600	29.82	12.90	384.68
3800	31.94	13.90	443.97
4000	34.25	15.10	517.18
4200	35.89	15.80	567.06
4400	38.30	17.00	651.10
4600	40.86	18.20	743.65
4800	41.70	18.60	775.62
5000	44.02	19.60	862.79
5200	47.89	21.30	1020.06
5400	48.87	21.90	1070.25
5600	49.99	22.40	1119.78
5800	52.55	23.50	1234.93
6000	56.42	25.40	1433.07
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.12

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	9.73	3.70	36.00
2000	13.52	0.54	7.30
2200	15.01	6.30	94.56
2400	18.30	7.40	135.42
2600	20.46	8.40	171.86
2800	22.58	9.30	209.99
3000	25.01	10.20	255.10
3200	27.22	11.30	307.59
3400	29.18	12.20	356.00
3600	30.97	13.00	402.61
3800	33.08	13.90	459.81
4000	35.37	15.00	530.55
4200	37.17	15.90	591.00
4400	39.68	16.90	670.59
4600	41.31	17.50	722.93
4800	42.38	18.30	775.55
5000	45.40	19.60	889.84
5200	48.20	21.00	1012.20
5400	49.55	21.60	1070.28
5600	50.68	22.20	1125.10
5800	53.40	22.40	1196.16
6000	56.78	25.10	1425.18
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.13

บันทึกผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 15^\circ$, $\theta_{off} = 50^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	10.12	0.20	2.02
2000	13.46	1.60	21.54
2200	16.17	2.60	42.04
2400	18.63	3.60	67.07
2600	20.82	4.60	95.77
2800	13.08	5.50	71.94
3000	25.27	6.50	164.26
3200	27.72	7.60	210.67
3400	29.08	8.20	238.46
3600	31.37	9.30	291.74
3800	33.40	10.30	344.02
4000	35.56	11.30	401.83
4200	37.17	12.00	446.04
4400	39.47	13.20	521.00
4600	41.79	14.10	589.24
4800	43.33	14.80	641.28
5000	45.00	16.00	720.00
5200	48.20	17.00	819.40
5400	49.70	17.70	879.69
5600	51.15	18.50	946.28
5800	54.07	20.10	1086.81
6000	56.60	21.20	1199.92
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.14

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 37.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	0.00	0.00	0.00
2800	0.00	0.00	0.00
3000	0.00	0.00	0.00
3200	0.00	0.00	0.00
3400	0.00	0.00	0.00
3600	0.00	0.00	0.00
3800	30.59	12.70	388.49
4000	31.81	13.10	416.71
4200	35.95	15.10	542.85
4400	36.49	15.50	565.60
4600	38.76	16.60	643.42
4800	42.79	18.40	787.34
5000	43.00	18.80	808.40
5200	45.76	19.60	896.90
5400	48.63	21.00	1021.23
5600	52.06	22.00	1145.32
5800	53.31	23.50	1252.79
6000	54.43	24.00	1306.32
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.15

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 40.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	15.73	5.50	86.52
2400	17.63	6.40	112.83
2600	20.20	7.40	149.48
2800	22.94	8.30	190.40
3000	24.06	9.20	221.35
3200	26.19	10.10	264.52
3400	28.16	11.10	312.58
3600	30.17	11.90	359.02
3800	32.53	13.10	426.14
4000	34.01	13.60	462.54
4200	36.51	15.00	547.65
4400	38.76	16.00	620.16
4600	39.74	17.00	675.58
4800	42.49	18.20	773.32
5000	44.74	19.10	854.53
5200	46.40	20.20	937.28
5400	48.72	21.20	1032.86
5600	51.82	22.50	1165.95
5800	53.43	23.50	1255.61
6000	55.62	24.80	1379.38
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.16

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	12.59	10.20	128.42
2800	13.34	10.80	144.07
3000	14.52	12.30	178.60
3200	16.32	13.30	217.06
3400	17.45	14.50	253.03
3600	18.85	15.60	294.06
3800	20.69	17.30	357.94
4000	21.13	18.10	382.45
4200	23.01	19.50	448.70
4400	24.25	20.10	487.43
4600	25.35	21.50	545.03
4800	27.01	23.02	621.77
5000	28.20	24.05	678.21
5200	29.30	25.10	735.43
5400	31.25	27.20	850.00
5600	32.13	28.15	904.46
5800	33.75	29.75	1004.06
6000	34.50	30.25	1043.63
6200	36.01	31.70	1141.52
6400	37.50	33.10	1241.25
6600	39.01	34.60	1349.75
6800	39.98	35.80	1431.28
7000	42.78	37.85	1619.22
7200	45.32	39.45	1787.87
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ.17

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	9.19	7.30	67.09
2400	11.30	9.00	101.70
2600	12.60	10.10	127.26
2800	14.12	11.50	162.38
3000	15.50	12.80	198.40
3200	17.50	14.01	245.18
3400	18.19	15.15	275.58
3600	19.70	16.30	321.11
3800	21.35	17.80	380.03
4000	22.25	18.60	413.85
4200	23.89	20.20	482.58
4400	24.78	21.10	522.86
4600	26.11	22.20	579.64
4800	27.60	23.70	654.12
5000	28.90	24.90	719.61
5200	30.00	26.20	786.00
5400	32.01	27.80	889.88
5600	32.89	29.30	963.68
5800	34.12	30.12	1027.69
6000	35.16	31.20	1096.99
6200	37.11	32.50	1206.08
6400	38.45	34.00	1307.30
6600	39.56	35.15	1390.53
6800	40.78	36.45	1486.43
7000	42.54	38.75	1648.43
7200	45.35	40.02	1814.91
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ.18

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	10.33	4.10	42.35
2000	14.03	5.60	78.57
2200	17.19	6.90	118.61
2400	19.33	7.80	150.77
2600	21.9	8.90	194.91
2800	24.2	10.00	242.00
3000	26.12	10.90	284.71
3200	28.45	12.00	341.40
3400	30.62	13.00	398.06
3600	32.54	14.00	455.56
3800	34.63	14.00	484.82
4000	36.35	15.70	570.70
4200	38.78	16.80	651.50
4400	40.5	17.60	712.80
4600	42.09	18.30	770.25
4800	45.62	20.10	916.96
5000	47.45	20.90	991.71
5200	48.61	21.40	1040.25
5400	51.96	23.10	1200.28
5600	54.49	24.20	1318.66
5800	57.22	25.60	1464.83
6000	58.19	26.20	1524.58
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ.19

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 17.5^\circ$, $\theta_{off} = 50.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	11.72	4.70	55.08
2000	15.52	6.30	97.78
2200	18.3	7.50	137.25
2400	20.83	8.50	177.06
2600	22.86	9.60	219.46
2800	25.51	10.70	272.96
3000	27.3	11.40	311.22
3200	29.46	12.60	371.20
3400	31.54	13.50	425.79
3600	33.91	14.40	488.30
3800	35.55	15.40	547.47
4000	37.84	16.30	616.79
4200	40.1	17.30	693.73
4400	41.83	18.10	757.12
4600	44.2	19.10	844.22
4800	46.73	20.50	957.97
5000	48.23	21.10	1017.65
5200	49.66	22.00	1092.52
5400	52.26	23.20	1212.43
5600	55.13	24.60	1356.20
5800	57.2	25.60	1464.32
6000	58.06	26.40	1532.78
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.20

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 42.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	0.00	0.00	0.00
2800	14.07	11.30	158.99
3000	15.20	12.30	186.96
3200	16.30	13.30	216.79
3400	17.87	14.90	266.26
3600	19.25	16.30	313.78
3800	20.30	17.30	351.19
4000	21.32	18.90	402.95
4200	22.89	19.70	450.93
4400	24.15	20.80	502.32
4600	25.33	21.10	534.46
4800	26.60	23.00	611.80
5000	28.25	24.80	700.60
5200	29.80	26.80	798.64
5400	30.95	27.40	848.03
5600	32.09	28.30	908.15
5800	32.79	28.70	941.07
6000	34.98	31.30	1094.87
6200	35.43	32.40	1147.93
6400	37.50	33.20	1245.00
6600	38.50	35.00	1347.50
6800	39.64	35.90	1423.08
7000	40.71	36.90	1502.20
7200	42.80	38.20	1634.96
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ.21

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 43.75^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	11.70	8.80	102.96
2600	12.25	9.80	120.05
2800	13.85	11.00	152.35
3000	15.25	12.20	186.05
3200	16.40	13.10	214.84
3400	17.85	14.50	258.83
3600	19.15	15.70	300.66
3800	20.38	16.90	344.42
4000	22.02	18.20	400.76
4200	28.98	19.50	565.11
4400	24.35	20.20	491.87
4600	25.64	22.10	566.64
4800	26.70	22.58	602.89
5000	28.18	24.80	698.86
5200	29.56	26.10	771.52
5400	30.29	27.10	820.86
5600	32.20	28.30	911.26
5800	32.70	30.30	990.81
6000	34.70	31.20	1082.64
6200	36.25	32.20	1167.25
6400	37.50	33.80	1267.50
6600	38.70	34.60	1339.02
6800	40.07	35.80	1434.51
7000	41.05	37.80	1551.69
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.22

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	10.26	8.80	90.29
2600	12.47	10.40	129.69
2800	13.97	11.60	162.05
3000	15.39	12.80	196.99
3200	16.77	14.00	234.78
3400	18.10	15.20	275.12
3600	18.92	16.20	306.50
3800	20.81	17.90	372.50
4000	21.57	18.40	396.89
4200	23.79	20.30	482.94
4400	24.46	20.70	506.32
4600	25.91	22.30	577.79
4800	27.29	23.80	649.50
5000	28.13	24.50	689.19
5200	28.75	25.70	738.88
5400	30.86	27.60	851.74
5600	31.75	28.50	904.88
5800	32.89	29.60	973.54
6000	33.40	30.00	1002.00
6200	35.21	31.40	1105.59
6400	36.68	33.20	1217.78
6600	37.75	34.50	1302.38
6800	38.88	34.80	1353.02
7000	40.10	36.00	1443.60
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.23

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 46.25^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	10.54	8.50	89.59
2600	12.20	9.90	120.78
2800	13.82	11.20	154.78
3000	15.25	12.10	184.53
3200	16.55	13.70	226.74
3400	17.72	14.50	256.94
3600	18.93	15.40	291.52
3800	20.90	17.00	355.30
4000	21.49	17.70	380.37
4200	23.51	19.50	458.45
4400	24.23	20.10	487.02
4600	25.92	21.40	554.69
4800	27.01	23.20	626.63
5000	27.95	23.70	662.42
5200	29.09	24.50	712.71
5400	30.90	26.30	812.67
5600	32.08	27.70	888.62
5800	33.29	28.60	952.09
6000	33.61	29.20	981.41
6200	35.91	30.60	1098.85
6400	36.90	32.30	1191.87
6600	38.00	33.00	1254.00
6800	39.96	34.00	1358.64
7000	39.96	35.20	1406.59
7200	41.29	36.30	1498.83
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.24

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	10.50	8.80	92.40
2600	12.40	10.20	126.48
2800	13.90	11.50	159.85
3000	15.30	12.70	194.31
3200	16.80	13.90	233.52
3400	17.70	14.70	260.19
3600	18.90	16.10	304.29
3800	20.70	17.50	362.25
4000	21.40	18.40	393.76
4200	23.00	20.00	460.00
4400	24.20	20.70	500.94
4600	25.50	22.00	561.00
4800	27.30	23.30	636.09
5000	28.00	24.20	677.60
5200	29.10	25.30	736.23
5400	30.70	26.60	816.62
5600	32.30	28.20	910.86
5800	33.20	29.20	969.44
6000	33.60	29.90	1004.64
6200	35.70	31.70	1131.69
6400	37.50	32.80	1230.00
6600	38.10	34.20	1303.02
6800	39.30	34.90	1371.57
7000	40.60	36.00	1461.60
7200	41.30	36.70	1515.71
7400	42.00	38.10	1600.20
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.25

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 20.0^\circ$, $\theta_{off} = 48.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	10.14	9.00	91.26
2600	12.03	10.50	126.32
2800	13.75	12.10	166.38
3000	15.19	13.10	198.99
3200	16.70	14.60	243.82
3400	17.98	15.40	276.89
3600	18.87	16.50	311.36
3800	20.89	18.20	380.20
4000	21.39	18.80	402.13
4200	23.10	20.20	466.62
4400	24.46	21.50	525.89
4600	25.70	22.70	583.39
4800	27.03	23.90	646.02
5000	28.10	24.80	696.88
5200	29.09	25.80	750.52
5400	30.91	27.40	846.93
5600	31.87	28.70	914.67
5800	33.06	29.70	981.88
6000	33.84	30.40	1028.74
6200	35.14	31.80	1117.45
6400	36.79	33.20	1221.43
6600	38.44	34.00	1306.96
6800	38.89	34.90	1357.26
7000	40.00	36.00	1440.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.26

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 43.75^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0.00	0.00	0.00
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	0.00	0.00	0.00
2800	0.00	0.00	0.00
3000	0.00	0.00	0.00
3200	0.00	0.00	0.00
3400	16.50	15.40	254.10
3600	17.60	16.90	297.44
3800	19.15	18.20	348.53
4000	20.20	19.20	387.84
4200	21.10	20.70	436.77
4400	22.60	22.00	497.20
4600	23.50	22.80	535.80
4800	24.75	24.50	606.38
5000	26.25	29.50	774.38
5200	26.70	30.00	801.00
5400	27.50	31.00	852.50
5600	29.50	32.70	964.65
5800	30.50	34.20	1043.10
6000	31.30	35.80	1120.54
6200	31.50	36.60	1152.90
6400	32.10	37.20	1194.12
6600	33.40	38.50	1285.90
6800	34.00	40.30	1370.20
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ.27

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0.00	0.00	0.00
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	11.50	13.70	157.55
2800	13.30	15.20	202.16
3000	14.50	16.30	236.35
3200	15.85	17.70	280.55
3400	16.80	18.90	317.52
3600	18.00	20.20	363.60
3800	19.50	21.60	421.20
4000	20.50	22.50	461.25
4200	21.50	23.30	500.95
4400	22.93	25.20	577.84
4600	23.90	26.30	628.57
4800	25.20	27.30	687.96
5000	26.30	29.40	773.22
5200	27.50	30.20	830.50
5400	28.70	31.40	901.18
5600	30.00	33.10	993.00
5800	31.00	33.80	1047.80
6000	32.50	35.80	1163.50
6200	33.60	36.80	1236.48
6400	34.50	38.20	1317.90
6600	34.90	39.10	1364.59
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเว็บไซต์ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.28

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 46.25^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0.00
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	9.75	8.70	84.83
2600	11.50	10.50	120.75
2800	13.20	11.90	157.08
3000	14.50	13.10	189.95
3200	15.20	14.50	220.40
3400	16.90	15.80	267.02
3600	18.20	17.10	311.22
3800	20.00	19.10	382.00
4000	20.30	19.50	395.85
4200	21.50	20.90	449.35
4400	22.80	22.10	503.88
4600	23.75	23.40	555.75
4800	25.20	25.70	647.64
5000	26.40	26.10	689.04
5200	27.60	27.50	759.00
5400	28.50	28.50	812.25
5600	30.20	30.10	909.02
5800	31.10	31.90	992.09
6000	31.50	33.50	1055.25
6200	32.70	35.20	1151.04
6400	33.00	34.80	1148.40
6600	34.00	36.50	1241.00
6800	36.40	37.20	1354.08
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.29

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 22.5^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0.00
1000	0.0	0.0	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	9.90	8.90	88.11
2600	11.50	10.50	120.75
2800	13.10	11.90	155.89
3000	14.50	13.40	194.30
3200	15.50	14.90	230.95
3400	16.90	15.80	267.02
3600	18.30	17.20	314.76
3800	19.40	18.90	366.66
4000	20.50	19.40	397.70
4200	21.58	21.10	455.34
4400	22.90	22.40	512.96
4600	24.00	23.50	564.00
4800	25.30	25.20	637.56
5000	26.50	26.70	707.55
5200	27.60	27.80	767.28
5400	28.50	28.70	817.95
5600	29.90	30.10	899.99
5800	31.30	31.80	995.34
6000	32.20	33.00	1062.60
6200	32.50	34.50	1121.25
6400	33.30	35.90	1195.47
6600	34.40	36.70	1262.48
6800	35.50	38.10	1352.55
6900	36.30	39.00	1415.70
7000	0.00	0.00	0.00
7100	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.30

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 25.0^\circ$, $\theta_{off} = 45.0^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0.00	0.00	0.00
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	15.01	16.2	243.162
2800	17.21	18.3	314.943
3000	18.69	19.8	370.062
3200	20.36	22	447.92
3400	21.86	23	502.78
3600	23.35	24.7	576.745
3800	24.71	26.3	649.873
4000	26.24	28	734.72
4200	27.05	29.3	792.565
4400	29.03	31	899.93
4600	30.34	32.6	989.084
4800	30.97	34.2	1059.174
5000	30.9	34.7	1072.23
5200	33.1	36.8	1218.08
5400	35.2	38.1	1341.12
5600	35.58	39.7	1412.526
5800	35.9	40.3	1446.77
6000	35.85	40.1	1437.585
6200	36.94	41.5	1533.01
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ.31

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 25.0^\circ$, $\theta_{off} = 46.25^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	11.27	11.9	134.113
2400	13.91	14.1	196.131
2600	15.31	15.7	240.367
2800	16.98	17.3	293.754
3000	18.92	19.1	361.372
3200	20.58	21	432.18
3400	22.43	22.7	509.161
3600	23.42	23.5	550.37
3800	24.7	25.8	637.26
4000	26.32	27.3	718.536
4200	26.9	28.5	766.65
4400	29.11	30.2	879.122
4600	30.7	31.9	979.33
4800	30.8	33.6	1034.88
5000	31.19	34.3	1069.817
5200	32.45	36.5	1184.425
5400	34.3	38.2	1310.26
5600	0.00	0.00	0.00
5800	0.00	0.00	0.00
6000	0.00	0.00	0.00
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.32

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 25.0^\circ$, $\theta_{off} = 47.5^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0	0	0
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	11.27	11.9	134.113
2400	13.91	14.1	196.131
2600	15.31	15.7	240.367
2800	16.98	17.3	293.754
3000	18.92	19.1	361.372
3200	20.58	21	432.18
3400	22.43	22.7	509.161
3600	23.42	23.5	550.37
3800	24.7	25.8	637.26
4000	26.32	27.3	718.536
4200	26.9	28.5	766.65
4400	29.11	30.2	879.122
4600	30.7	31.9	979.33
4800	30.8	33.6	1034.88
5000	31.19	34.3	1069.817
5200	32.45	36.5	1184.425
5400	34.3	38.2	1310.26
5600	0.00	0.00	0.00
5800	0.00	0.00	0.00
6000	0.00	0.00	0.00
6200	0.00	0.00	0.00
6400	0.00	0.00	0.00
6600	0.00	0.00	0.00
6800	0.00	0.00	0.00
7000	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ จ.33

ผลการทดลองที่มุม $\theta_{on} = 25.0^\circ$, $\theta_{off} = 48.75^\circ$

Speed (rpm)	Vo(V)	Io(A)	Po(W)
0	0.00	0.00	0.00
1000	0.00	0.00	0.00
1200	0.00	0.00	0.00
1400	0.00	0.00	0.00
1600	0.00	0.00	0.00
1800	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00
2200	0.00	0.00	0.00
2400	0.00	0.00	0.00
2600	10.50	9.80	102.90
2800	12.60	11.80	148.68
3000	13.50	12.60	170.10
3200	14.90	13.80	205.62
3400	16.26	15.50	252.03
3600	17.26	16.70	288.24
3800	18.42	18.10	333.40
4000	19.44	19.30	375.19
4200	20.60	20.40	420.24
4400	21.63	21.40	462.88
4600	23.00	22.60	519.80
4800	24.35	24.80	603.88
5000	25.25	25.50	643.88
5200	26.25	26.40	693.00
5400	27.50	28.30	778.25
5600	28.58	29.50	843.11
5800	30.00	30.80	924.00
6000	30.50	31.20	951.60
6200	31.60	31.70	1001.72
6400	32.58	33.80	1101.20
6600	31.60	34.60	1093.36
6800	35.00	35.30	1235.50
7000	34.30	35.80	1227.94
7200	0.00	0.00	0.00
7400	0.00	0.00	0.00
7600	0.00	0.00	0.00
7800	0.00	0.00	0.00
8000	0.00	0.00	0.00
8200	0.00	0.00	0.00
8400	0.00	0.00	0.00
8600	0.00	0.00	0.00
8800	0.00	0.00	0.00
9000	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล ไพบรรณ เกิดตรวจ
วัน-เดือน-ปีเกิด 24 ธันวาคม 2521
สถานที่เกิด อำเภอนาดูน จังหวัดเลย

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง
สาขาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น
พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2550 ศึกษาต่อในระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ในสาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2546-2549 ทำงานในตำแหน่ง Design Engineer บริษัท Suzuki Motor
R&D Asia จำกัด
พ.ศ. 2549-ปัจจุบัน ทำงานในตำแหน่ง Design Engineer บริษัท Honda
Access Asia & Oceania จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้