มุมกระตุ้นที่เหมาะสมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานใน โหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุด

OPTIMAL EXCITATION ANGLES OF A SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR FOR MAXIMUM OUTPUT POWER

ไพโรจน์ ทองประศรี
PAIROTE THONGPRASRI

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559
KMITL-2016-EN-D-018-179

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

มุมกระตุ้นที่เหมาะสมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุด

OPTIMAL EXCITATION ANGLES OF A SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR FOR MAXIMUM OUTPUT POWER

T148655

ไพโรจน์ ทองประศรี
PAIROTE THONGPRASRI

เลขหมู่.........
เลขทะเบียน 148655
วัน.เดือน.ปี 14 พ.ย. 2560

b. 00265202
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-D-018-179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMAL EXCITATION ANGLES OF A SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR FOR MAXIMUM OUTPUT POWER

PAIROTE THONGPRASRI

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-D-018-179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2016
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ มุมกระตุ้นที่เหมาะสมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุด
Thesis Title Optimal Excitation Angles of a Switched Reluctance Generator for Maximum Output Power
นักศึกษา นายไพโรจน์ ทองประศรี
รหัสประจำตัว 53610118
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-179

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		**ลายมือชื่อ**
รศ.ดร.อานันทวัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.ชนินทร์	บุญลักษณานุสรณ์	
ผศ.ดร.สุเมธ	เนติลัดดานนท์	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2559 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. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	มุมกระตุ้นที่เหมาะสมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุด
นักศึกษา	นายไพโรจน์ ทองประศรี
รหัสประจำตัว	53610118
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมในโหมดกระแสพัลส์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เอสอาร์จี) สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุด 2 วิธี วิธีแรกแบบจำลองความเหนี่ยวนำถูกประยุกต์มาจากฟังก์ชันเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องโดยถูกแบ่งเป็น 3 ขอบเขต ขึ้นอยู่กับกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ แบบจำลองนี้ต้องการพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์ของเอสอาร์จีที่ตำแหน่งตรงขั้วและตำแหน่งไม่ตรงขั้ว พารามิเตอร์นี้ง่ายต่อการหาโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปร่างของกระแสเฟสที่เหมาะสมเมื่อเอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถูกตรวจหาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแส แบบจำลองกระแสได้มาจากการประยุกต์สมการแรงดันร่วมกับแบบจำลองความเหนี่ยวนำที่ได้นำเสนอ ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมคือ แรงดันดีซีบัส ความเร็วโรเตอร์ และมุมกระตุ้น (มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส) ได้ถูกวิเคราะห์จากรูปร่างกระแสเฟสแบบแฟลทท็อป รูปร่างกระแสเฟสแบบนี้เป็นรูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสม ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องเมื่อเทียบกับผลการทดลอง วิธีที่สอง มุมนำกระแสที่เหมาะสมอยู่ที่ตำแหน่ง -15° ซึ่งได้ถูกตรวจหาผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแส แบบจำลองของกระแสนี้ถูกประยุกต์มาจากกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กแบบไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ในเทอมของแรงดันดีซีบัส ความเร็วโรเตอร์ และมุมกระตุ้น รูปร่างกระแสแบบแฟลทท็อป ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์หามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของมุมที่เกิดกระแสเฟสสูงสุดและอัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสและที่ตำแหน่งการเกิดค่ากระแสเฟสสูงสุด ชุดทดลอง 8/6 เอสอาร์จี ได้ถูกใช้สำหรับทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการที่ได้นำเสนอ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเอสอาร์จีสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมที่ได้นำเสนอ และรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างแบบแฟลทท็อป กำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Optimal Excitation Angles of a Switched Reluctance Generator for Maximum Output Power
Student	Mr.Pairote Thongprasri
Student ID.	53610118
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Supat Kittiratsatcha

ABSTRACT

This thesis proposes 2 methods for analysis of control variables in single pulse mode of a Switched Reluctance Generator (SRG) to maximize output power. The first method, the inductance model applied from the flux linkage function is divided into 3 regions depending on the current and rotor position. This model requires the geometrical parameters of an SRG at aligned and unaligned positions. The parameters are easily quantified using the FEM. The optimal shape of phase current is investigated using the mathematical model of current be generated when the SRG produces maximum power. The current model is derived from the phase voltage equation in combination with the proposed inductance model. The optimal control variables are dc bus voltage, shaft speed, and excitation angles (turn-on and turn-off angles) which are analyzed from the phase current shape flat-topped. This is optimal shape of phase current. The analytical results are demonstrated the accuracy compared with the experimental results. The second method, the optimal turn-on angle is on rotor position -15° which is investigated through the mathematical model of current. This current model is applied from a nonlinear magnetization curve in terms of dc bus voltage, shaft speed, and excitation angles. The flat-topped phase current is analyzed to determine the optimal turn-off angle depending on the position of angle at peak phase current and the ratio of flux linkage at turn-off angle and peak phase current positions. The 8/6 SRG experimental setup is used to confirm the accuracy of the proposed method. Regarding to the results, the SRG can generate the maximum output power when the proposed optimal excitation angles are applied and the phase current becomes flat-topped. The maximum output power obtained from the analytical model is slightly different from the measurements. Therefore, the proposed method is accurate and reliable.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะที่ดี เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการศึกษาในระดับปริญญาเอก

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องทำวิจัย ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำเป็นลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ไพโรจน์ ทองประศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	7
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.2 โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์	10
2.3 สมการพื้นฐานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์	13
2.4 การทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์	14
2.5 การควบคุมกระแสในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์	15
2.5.1 การควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping และ Hard Chopping	16
2.5.2 การควบคุมแบบกระแสพัลส์ (Single Pulse)	17
2.6 วงรอบการถ่ายเทพลังงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์	19
บทที่ 3 การวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	21
3.1 การวิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้กระแสมีลักษณะแฟลททอป	21
3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแส	22
3.1.2 การวิเคราะห์หาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม	25
3.2 การวิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยคงที่ค่ามุมนำกระแส เพื่อให้เอสอาร์จีกำเนิดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด	26
3.2.1 กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็ก	28
3.2.2 สมการกระแสเฟส	31
3.2.3 วิธีการหามุมกระตุ้นที่เหมาะสม	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ระบบควบคุมมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.......................... 37
4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมการทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.................................37
4.1.1 มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส.. 38
4.1.2 มอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์แบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์.........................38
4.1.3 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์...40
4.1.4 ตัวตรวจวัดกระแส.. 41
4.1.5 ตัวตรวจวัดแรงดัน.. 42
4.1.6 ตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล...43
4.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์.......................................43

บทที่ 5 ผลจำลองการทำงานและผลการทดลอง...47
5.1 ผลการทดลองวัดสัญญาณตำแหน่งของขดลวดเฟสทั้ง 4 เฟส และสัญญาณขับนำเกท ของวงจรคอนเวอร์เตอร์...47
5.2 การทดลองควบคุมมุมกระตุ้นที่เหมาะสม เพื่อให้กระแสของเอสอารจี มีรูปร่างแบบแฟลทท็อป...49
5.2.1 ผลจำลองการทำงานด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง..........................51
5.2.2 การทดลองหาประสิทธิภาพของระบบ...53
5.3 การทดลองควบคุมมุมกระตุ้นที่เหมาะสม โดยคงที่ค่ามุมนำกระแสที่เหมาะสมไว้ เพื่อให้เอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าด้านออกให้สูงสุด..59
5.3.1 ผลการทดลองวัดสัญญาณกระแสเฟสและแรงดันเฟสในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า......61
5.3.2 ผลการทดลองวัดสัญญาณรูปร่างของกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วย มุมกระตุ้นที่เหมาะสม...62
5.3.3 ผลการทดลองหาค่ามุมนำกระแสที่เหมาะสม...66
5.3.4 ผลการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันดีซีบัสต่อความเร็วรอบของโรเตอร์......75
5.3.5 ผลการทดลองวัดสัญญาณรูปร่างของกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุม ด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม...82

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ...88
6.1 สรุปผลการวิจัย...88
6.2 ข้อเสนอแนะ..89

เอกสารอ้างอิง...90

ภาคผนวก...94
ภาคผนวก ก. เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง..94
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..96
ประวัติผู้เขียน...125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 พารามิเตอร์ของเอสอาร์จี....11
2.2 การควบคุมแรงดันเฟสของเอสอาร์จี....16
3.1 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟสสูงสุด 45A....32
3.2 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้ง 3 กรณี (เฟสเดียว) เมื่อควบคุม i_{peak} = 45A 34
3.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมเอสอาร์จีทั้ง 3 กรณี....35
5.1 ตัวแปรควบคุมของกระแสเฟสทั้ง 3 แบบ เมื่อถูกกำหนดค่าสูงสุด 40 A 51
5.2 ตัวแปรควบคุมและผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์....56
5.3 ตัวแปรควบคุมและผลที่ได้จากการทดลอง....56
5.4 ตัวแปรควบคุมที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์....56
5.5 ค่าที่ได้จากระบบกำเนิดไฟฟ้าของเอสอาร์จี....59
5.6 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45A สำหรับใช้ในการทดลอง....63
5.7 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45 A เมื่อ y = 0.042....68
5.8 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45 A เมื่อ y = 0.044....71
5.9 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45 A เมื่อ y = 0.046....74
5.10 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45 A ที่แรงดันดีซีบัส 25V....77
5.11 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 40 A ที่แรงดันดีซีบัส 22V....79
5.12 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 35 A ที่แรงดันดีซีบัส 22V....81
5.13 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการควบคุมกระแสเฟส 35A 40A และ 45A....82
5.14 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการควบคุมกระแสเฟส 45A เมื่อแรงดันดีซีบัสคงที่....83
5.15 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม เมื่อแรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบไม่คงที่....86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเฟสของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ 3
1.2 รูปร่างของกระแสเฟสในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์ที่ความเร็วรอบสูง 4
1.3 รูปร่างกระแสลักษณะแฟลททอป (แบบเชิงเส้น) 4
1.4 ความสัมพันธ์ของกระแสเฟสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง 6
2.1 โครงสร้างของเอสอาร์จี 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ 10
2.2 การวิเคราะห์ด้วยการคำนวณแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) แบ่งช่วงละ 3° ระหว่างตำแหน่งตรงขั้วที่ติดกัน ($0 - 60^{\circ}$) 12
2.3 รูปร่างของความเหนี่ยวนำเฟส ณ ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ 12
2.4 กราฟคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลอง 12
2.5 วงจรสมมูลของขดลวดเฟส 13
2.6 วงจรสมมูล 1 เฟสของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ 14
2.7 รูปคลื่นของแรงดันเฟส กระแสเฟส และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในโหมดการทำงาน แบบกระแสพัลส์ 14
2.8 วงจรแสงดภาพของคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส 15
2.9 การควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping 16
2.10 การควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping 16
2.11 รูปร่างของกระแสเฟสเมื่อแรงดันดีซีบัสต่ำกว่าแรงดันต้านกลับ 18
2.12 รูปร่างของกระแสเฟสเมื่อแรงดันดีซีบัสสมดุลกับแรงดันต้านกลับ 18
2.13 รูปร่างของกระแสเฟสเมื่อแรงดันดีซีบัสสูงกว่าแรงดันต้านกลับ 19
2.14 กราฟค่าพลังงานสะสม และพลังงานร่วม 20
3.1 รูปร่างของกระแสเฟส เมื่อควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่และปรับมุมหยุดนำกระแส 21
3.2 รูปร่างของกระแสเฟส เมื่อปรับมุมนำกระแสและควบคุมมหยุดนำกระแสให้คงที่ 21
3.3 พารามิเตอร์ที่ตำแหน่ง S และ m บนกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กของเอสอาร์จี 22
3.4 กราฟคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบ กับการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM 23
3.5 รูปร่างความเหนี่ยวนำเฟสถูกแบ่งเป็น 3 ขอบเขต 24
3.6 ความเหนี่ยวนำเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับวิเคราะห์ด้วย FEM 24
3.7 รูปร่างของกระแสเฟสในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์ที่ความเร็วรอบสูง 27
3.8 ความสัมพันธ์ของกระแสเฟสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง 27
3.9 กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่งตรงขั้ว และไม่ตรงขั้ว 29
3.10 กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากการทดลอง 30
3.11 รูปร่างสัญญาณในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์ 33
3.12 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ของ y ทั้ง 3 กรณี เมื่อควบคุม กระแสเฟสสูงสุดที่ 45A 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.13 รูปร่างของกระแสเฟสสูงสุดที่ 35A 40A และ 45A เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม....35
3.14 บล็อกไดอะแกรมสำหรับหาค่ามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม....36
4.1 โครงสร้างระบบควบคุมการทำงานของเอสอาร์จี....37
4.2 มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส (รุ่น M2QA11M2A)....37
4.3 อินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส (รุ่น ND1-4-5A5)....38
4.4 มอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ (แบบ RA16587)....38
4.5 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ (แบบ RA16587)....39
4.6 กราฟความสัมพันธ์ของตำแหน่งตัวตรวจจับเฟสและขดลวดทั้ง 4 เฟส....39
4.7 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสองสวิทช์ต่อเฟส....39
4.8 วงจรขับนำเกท....40
4.9 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังและวงจรขับนำเกท....40
4.10 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์....41
4.11 สัญญาณพัลส์ของตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์....41
4.12 วงจรวัดความเร็วโรเตอร์....41
4.13 ตัวตรวจวัดกระแส....42
4.14 วงจรวัดกระแสเฟส....42
4.15 ตัวตรวจวัดแรงดัน....42
4.16 วงจรวัดแรงดันดีซีบัส....43
4.17 ตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล 32 บิท....43
4.18 บล็อกไดอะแกรมชุดทดลองสำหรับหามุมกระตุ้นเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุดของเอสอาร์จี 4 เฟส ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวประมวลผลแบบดิจิทัล....44
4.19 ความสัมพันธ์ของตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์กับรูปร่างของค่าความเหนี่ยวนำเฟส....44
4.20 ความสัมพันธ์ของจำนวนพัลส์กับตำแหน่งของขดลวดเฟส....44
4.21 วงจรคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส....45
4.22 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมกระแส 3 โหมด....45
4.23 แผนผังการคำนวณสำหรับหาค่ามุมกระตุ้นที่เหมาะสม....46
5.1 สัญญาณตรวจจับตำแหน่งขดลวดเฟสทั้ง 4 เฟส....47
5.2 สัญญาณด้านออกของตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์....47
5.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์....48
5.4 สัญญาณขับนำเกทโหมดการควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping....48
5.5 สัญญาณขับนำเกทโหมดการควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping....49
5.6 สัญญาณขับนำเกทโหมดการควบคุมกระแสแบบ Single Pulse....49
5.7 ชุดทดลองมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า....50
5.8 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมการทำงานของเอสอาร์จี สำหรับวิเคราะห์ตัวแปรควบคุม....50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.9 กระแสเฟสแบบ a ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.85° และ θ_{off} = 5.5° 51

5.10 กระแสเฟสแบบ b ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.85° และ θ_{off} = 9° 52

5.11 กระแสเฟสแบบ c ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.85° และ θ_{off} = 9.5° 53

5.12 วงรอบปิดการแปลงผันพลังงานทั้ง 3 แบบ....53

5.13 กระแสเฟสแบบที่ 1 ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -9.2° และ θ_{off} = 9° 54

5.14 กระแสเฟสแบบที่ 2 ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.8° และ θ_{off} = 9° 55

5.15 กระแสเฟสแบบที่ 3 ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -8.15° และ θ_{off} = 9° 55

5.16 รูปร่างกระแสเฟสแบบแฟลททีอปทั้ง 3 กรณีที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์....57

5.17 รูปร่างกระแสเฟสแบบแฟลททีอปทั้ง 3 กรณีที่เกิดจากการทดลอง....58

5.18 ชุดทดลองมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า....60

5.19 การทดลองวัดรูปคลื่นสัญญาณขับนำเกท สัญญาณแรงดันเฟส และกระแสเฟสที่ขดลวดเฟส A....61

5.20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสของขดลวดเฟส A โหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที มุมนำกระแส (θ_{on}) -5° และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 10° 61

5.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสของขดลวดเฟส A โหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที มุมนำกระแส (θ_{on}) -5° และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 10° 61

5.22 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสของขดลวดเฟส A โหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที มุมนำกระแส (θ_{on}) -5° และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 5° 62

5.23 วงจรสำหรับใช้วัดรูปคลื่นสัญญาณเฟสและสัญญาณแรงดันออก....62

5.24 รูปร่างของกระแสเฟสในกรณี $e<u$ ($y=0.048$ หรือ $y>y_{opt}$) 63

5.25 รูปร่างของกระแสเฟสในกรณี $e=u$ ($y=0.042$ หรือ $y=y_{opt}$) 63

5.26 รูปร่างของกระแสเฟสในกรณี $e>u$ ($y=0.038$ หรือ $y<y_{opt}$) 64

5.27 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในกรณี $e<u$ 64

5.28 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในกรณี $e=u$ 64

5.29 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในกรณี $e>u$ 65

5.30 รูปร่างของกระแสเฟสทั้ง 3 กรณีเมื่อควบคุมค่าสูงสุดที่ 45A....65

5.31 วงรอบปิดของการแปลงผันพลังงาน....65

5.32 มุมนำกระแส -21° มุมหยุดนำกระแส 3.34° 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.33 มุมนำกระแส -19° มุมหยุดนำกระแส 4.34° 66
5.34 มุมนำกระแส -17° มุมหยุดนำกระแส 5.34° 66
5.35 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.34° 67
5.36 มุมนำกระแส -13° มุมหยุดนำกระแส 7.34° 67
5.37 มุมนำกระแส -11° มุมหยุดนำกระแส 8.34° 67
5.38 มุมนำกระแส -9° มุมหยุดนำกระแส 9.34° 67
5.39 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ เมื่อ $y = 0.042$ ที่ได้จาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง 68
5.40 มุมนำกระแส -21° มุมหยุดนำกระแส 3.13° 69
5.41 มุมนำกระแส -19° มุมหยุดนำกระแส 4.13° 69
5.42 มุมนำกระแส -17° มุมหยุดนำกระแส 5.13° 69
5.43 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.13° 70
5.44 มุมนำกระแส -13° มุมหยุดนำกระแส 7.13° 70
5.45 มุมนำกระแส -11° มุมหยุดนำกระแส 8.13° 70
5.46 มุมนำกระแส -9° มุมหยุดนำกระแส 9.13° 70
5.47 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ เมื่อ $y = 0.044$ ที่ได้จาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง 71
5.48 มุมนำกระแส -21° มุมหยุดนำกระแส 2.91° 72
5.49 มุมนำกระแส -19° มุมหยุดนำกระแส 3.91° 72
5.50 มุมนำกระแส -17° มุมหยุดนำกระแส 4.91° 72
5.51 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.91° 73
5.52 มุมนำกระแส -13° มุมหยุดนำกระแส 6.91° 73
5.53 มุมนำกระแส -11° มุมหยุดนำกระแส 7.91° 73
5.54 มุมนำกระแส -9° มุมหยุดนำกระแส 8.91° 73
5.55 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ เมื่อ $y = 0.046$ ที่ได้จาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง 74
5.56 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้ง 3 กรณี 75
5.57 มุมนำกระแส -21.5° มุมหยุดนำกระแส 3.7° $(y = 0.038)$ 75
5.58 มุมนำกระแส -19.5° มุมหยุดนำกระแส 4.2° $(y = 0.040)$ 76
5.59 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.26° $(y = 0.42)$ 76
5.60 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.5° $(y = 0.044)$ 76
5.61 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 4.8° $(y = 0.046)$ 76
5.62 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 25V และกระแสเฟส สูงสุด 45A ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง 77
5.63 มุมนำกระแส -20.8° มุมหยุดนำกระแส 3.85° $(y = 0.035)$ 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.64 มุมนำกระแส -19.8° มุมหยุดนำกระแส 4.15° ($y = 0.037$) 78
5.65 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.3° ($y = 0.039$) 78
5.66 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5° ($y = 0.041$) 78
5.67 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 4.4° ($y = 0.043$) 78
5.68 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 22V และกระแสเฟส สูงสุด 40A ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง....79
5.69 มุมนำกระแส -22.5° มุมหยุดนำกระแส 3° ($y = 0.032$) 79
5.70 มุมนำกระแส -21.5° มุมหยุดนำกระแส 3.31° ($y = 0.034$) 80
5.71 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.34° ($y = 0.036$) 80
5.72 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.6° ($y = 0.038$) 80
5.73 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.1° ($y = 0.040$) 80
5.74 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 22V และกระแสเฟส สูงสุด 35A ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง....81
5.75 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ทั้ง 3 กรณี....82
5.76 รูปร่างของกระแสเฟส 3 กรณี เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม....82
5.77 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีที่ 1....83
5.78 รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 1....83
5.79 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีที่ 2....84
5.80 รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 2....84
5.81 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีที่ 3....85
5.82 รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 3....85
5.83 กำลังไฟฟ้าด้านออกที่มุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆทั้ง 3 กรณี....86
5.84 รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมทั้ง 3 กรณี....87
6.1 รูปร่างกระแสเฟสทั้ง 3 แบบที่ได้จากการทดลอง เมื่อ i_{peak} ที่ 45 A และ θ_{on} ที่ -15°....88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ (Switched Reluctance Machine) มีความสามารถทำงานในโหมดมอเตอร์หรือเรียกว่าเอสอาร์เอ็ม (Switched Reluctance Motor : SRM) และในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือเรียกว่าเอสอาร์จี (Switched Reluctance Generator : SRG) โดยการปรับตำแหน่งมุมกระตุ้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ เอสอาร์จีมีลักษณะที่เด่นเมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่นทางด้านโครงสร้างคือที่โรเตอร์ไม่มีการพันขดลวด ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนต่ำ แรงเฉื่อยต่ำ และมีความคงทนในสภาวะที่อุณหภูมิสูง [1] ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันแก๊สของงานสำหรับอากาศยาน ยานพาหนะที่ใช้พลังงานผสมผสาน [2]-[4] และถูกใช้ในงานระบบไฟฟ้าสำรองโดยใช้ฟลายวีลเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน [5] สำหรับการควบคุมมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ให้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดกระแสพัลส์เพื่อให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดขึ้นอยู่กับตำแหน่งมุมกระตุ้น (Excitation angles) คือ ตำแหน่งมุมนำกระแส (θ_{on}) และตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) โดยมุมกระตุ้นได้ถูกนิยามไว้ในบทความวิจัย [4] คือมุมนำกระแสเป็นตัวกำหนดฐานของระดับกำลังไฟฟ้าด้านออก ส่วนตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสเป็นตัวกำหนดการได้มาซึ่งประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่แต่ละระดับกำลังไฟฟ้าและความเร็วของโรเตอร์ เนื่องจากคุณลักษณะของเอสอาร์จีมีความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างสูง ดังนั้นจึงไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุดในเทอมของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบและตัวแปรที่ใช้ในการควบคุม ในบทความวิจัย [4],[6] ได้อธิบายการได้มาของกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดของเอสอาร์จีผ่านการจำลองทำงานของแบบจำลองเอสอาร์จีซ้ำหลายๆครั้งเพื่อหารูปร่างของกำลังไฟฟ้าด้านออกแล้วนำมาวิเคราะห์หาจุดที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด อย่างไรก็ตามวิธีนี้ผลของข้อมูลของตำแหน่งที่ใช้กระตุ้นให้เอสอาร์จีทำงานแล้วทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดจะถูกเก็บข้อมูลอยู่ในรูปแบบของตาราง (lookup-table) ซึ่งการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกก็คือการเลือกข้อมูลตำแหน่งมุมกระตุ้นจากตารางที่เก็บข้อมูลไว้นั่นเอง โดยทั่วไปการวิเคราะห์ตัวแปรสำหรับควบคุมให้เอสอาร์จีทำงานจะใช้การวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองของเอสอาร์จีซึ่งวิธีการสร้างแบบจำลองของเอสอาร์จีมีหลายวิธี ได้แก่ สร้างมาจากข้อมูลที่เก็บในรูปแบบของตาราง สร้างมาจากการประมาณค่าในช่วงโดยใช้เทคนิคคิวบิคสไปลน์ และสร้างมาจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2],[7] สร้างมาจากการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลทางแม่เหล็ก [8]-[10] ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่ามีความเที่ยงตรงสูง อย่างไรก็ตามแบบจำลองของเอสอาร์จีที่ถูกสร้างมาจากการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลทางแม่เหล็กและได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีข้อมูลที่ได้มาจากการคำนวณมาก ส่วนแบบจำลองของเอสอาร์จีที่ได้มาจากการประมาณค่าในช่วงโดยใช้เทคนิคคิวบิคสไปลน์และสร้างมาจากข้อมูลที่เก็บในรูปแบบของตารางมีความต้องการข้อมูลตำแหน่งของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องและกระแสเฟสเป็นจำนวนมากซึ่งโดยทั่วไปข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการทดลองหรือใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากอุปสรรคที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้มีงานวิจัยที่ศึกษาเพื่อหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของเอสอาร์จีแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้ข้อมูลทางคณิตศาสตร์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักรกลไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแม่เหล็ก [7] อย่างไรก็ตามแนวคิดนี้จะไม่ประสบผลสำเร็จถ้าไม่รู้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเอสอาร์จี บทความวิจัย [11]-[12] ได้ประสบความสำเร็จในการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กหรือกราฟความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับกระแสเฟส (Magnetization Curve) อย่างง่ายซึ่งได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความถูกต้องโดยไม่จำเป็นต้องรู้ข้อมูลทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมของเอสอาร์จีในโหมดกระแสพัลส์เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2 วิธี วิธีแรก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเหนี่ยวนำได้ถูกประยุกต์มาจากฟังก์ชันเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ซึ่งต้องการค่าพารามิเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องและกระแส ที่ตำแหน่งตรงขั้ว และไม่ตรงขั้ว สมการกระแสได้ถูกนำไปตรวจหารูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสม สมการกระแสเฟสที่นำเสนอได้มาจากการแทนค่าแบบจำลองความเหนี่ยวนำลงในสมการแรงดัน รูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสมได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม สำหรับวิธีที่สอง รูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสมได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหามุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยคงค่ามุมนำกระแสไว้ สมการกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นฟังก์ชันอยู่ในเทอมของตัวแปรควบคุมประกอบด้วย มุมนำกระแส/มุมหยุดนำกระแส $(\theta_{on}/\theta_{off})$ แรงดันดีซีบัส (u) ความเร็วโรเตอร์ (ω) ซึ่งถูกประยุกต์มาจากฟังก์ชันเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องแบบไม่เป็นเชิงเส้น สัดส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสและมุมที่ทำให้เกิดกระแสสูงสุดของรูปร่างกระแสแบบแฟลทท็อป (Flat top) ได้ถูกวิเคราะห์เพื่อที่จะหามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม ผลจากการทดลองเมื่อควบคุมเอสอาร์จีด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม เอสอาร์จีสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด และรูปร่างกระแสเฟสมีลักษณะเป็นแบบแฟลทท็อป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์รูปร่างของกระแสเฟส ที่มีผลต่อการเกิดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดของเอสอาร์จีในโหมดการกระตุ้นการทำงานแบบกระแสพัลส์

1.2.3 เพื่อศึกษาวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อการทำงานของเอสอาร์จี ที่ถูกกระตุ้นในโหมดกระแสพัลส์

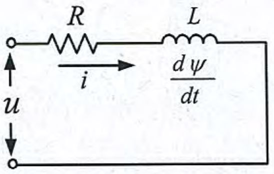
1.2.4 เพื่อให้สามารถออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในเทอมของตัวแปรแรงดันดีซีบัส ความเร็วโรเตอร์ มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส สำหรับหามุมกระตุ้นที่เหมาะสมในโหมดกระแสพัลส์เพื่อควบคุมเอสอาร์จีให้กำเนิดกำลังไฟฟ้าด้านออกมีค่าสูงสุด

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แรงดันเฟสของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเฟสที่แสดงในรูปที่ 1.1 สามารถหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ (1.1)

$$u = i \cdot R + \frac{d\psi}{dt} \tag{1.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเฟสของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

จากสมการที่ (1.1) สามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องได้ดังสมการที่ (1.2)

$$\psi = \int (u - i \cdot R)dt = \frac{1}{\omega}\int (u - i \cdot R)d\theta \qquad (1.2)$$

เนื่องจากค่าความต้านทานเฟส (R) มีค่าน้อยมากดังนั้นแรงดันที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานเฟสมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันดีซีบัส (u) และเมื่อพิจารณาสมการที่ (1.2) ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น เมื่อไม่นำค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานเฟสมาคิด ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องสามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (1.3)

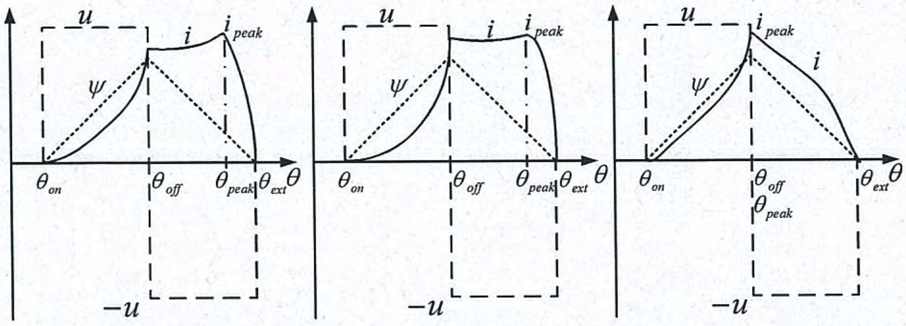
$$\psi = \int u dt = \frac{1}{\omega}\int u d\theta \qquad (1.3)$$

พิจารณาสมการที่ (1.1) ค่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องประกอบไปด้วยฟังก์ชันของกระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นสมการของแรงดันเฟสสามารถหาได้ดังสมการที่ (1.4) ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชัน 3 ตัวคือ แรงดันที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานเฟส แรงดันที่เกิดขึ้นที่ความเหนี่ยวนำเฟส และแรงดันต้านกลับ (back emf : e) โดยที่ $e = i \cdot \omega \dfrac{dL}{d\theta}$

$$\begin{aligned} u &= i \cdot R + \frac{d\psi(i,\theta)}{dt} \\ &= i \cdot R + \frac{d\psi}{dt} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\psi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ &= i \cdot R + L\frac{di}{dt} + \omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \end{aligned} \qquad (1.4)$$

ในรูปที่ 1.2 แสดงรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วรอบของโรเตอร์มีค่าสูง ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณี จากสมการที่ (1.4) เมื่อไม่คิดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานเฟส ในกรณี $u < e$ รูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.2(ก) โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเฟสจะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ในกรณี $u = e$ รูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.2(ข) เป็นแบบ "แฟลทท็อป" โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเฟสจะมีค่าคงที่หลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ในกรณี $u > e$ รูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.2(ค) โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเฟสจะมีค่าลดลงหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) $u < e$ (ข) $u = e$ (ค) $u > e$

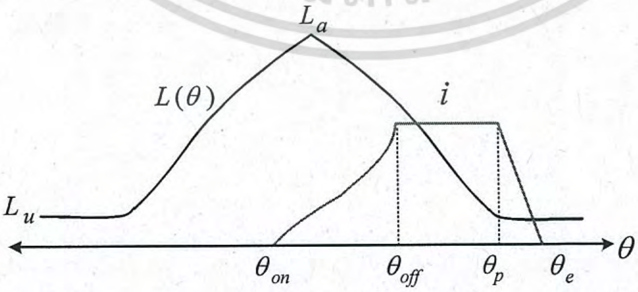
รูปที่ 1.2 รูปร่างของกระแสเฟสในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์ที่ความเร็วรอบสูง

วิธีที่ 1 วิเคราะห์หาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมเพื่อให้เอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด โดยใช้สมการกระแสที่นำเสนอดังแสดงในสมการที่ (1.5)

$$i = \begin{cases} \dfrac{u(\theta - \theta_{on})}{\omega\left[L_u + \left(\dfrac{L_a - L_u}{a + bi}\right) f(\theta)\right]} & ,\theta_{on} \le \theta < \theta_{off} \\ \dfrac{u(\theta_e - \theta)}{\omega\left[L_u + \left(\dfrac{L_a - L_u}{a + bi}\right) f(\theta)\right]} & ,\theta_{off} \le \theta \le \theta_e \\ 0 & ,else \end{cases} \tag{1.5}$$

โดยที่ ฟังก์ชันเชิงมุมโดยที่ $f(\theta)$ หาได้จาก

$$f(\theta) = \begin{cases} 0.5 + 0.5\cos\left(\theta \dfrac{\pi}{\theta_k}\right) & ,-\theta_k \le \theta \le \theta_k \\ 0 & ,else \end{cases} \tag{1.6}$$



รูปที่ 1.3 รูปร่างกระแสลักษณะแฟลททอป (แบบเชิงเส้น)

ในรูปที่ 1.3 เป็นรูปร่างกระแสเฟสที่มีลักษณะแฟลทท็อป ซึ่งจะทำให้เอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ดังนั้นค่ากระแสสูงสุดที่ตำแหน่ง θ_{off} แทนด้วย $i_{\max 1}$ และที่ตำแหน่ง θ_p แทนด้วย $i_{\max 2}$ มีค่าเท่ากันอยู่ในช่วง $\theta_{off} \le \theta \le \theta_p$ หาได้จากสมการที่ (1.7) และ (1.8) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็น... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{\max 1} = \frac{u(\theta_{off} - \theta_{on})}{\omega\left[L_u + \left(\frac{L_a - L_u}{a + bi_{\max 1}}\right)\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\theta_{off}\frac{\pi}{\theta_k}\right)\right)\right]} \tag{1.7}$$

$$i_{\max 2} = \frac{u(2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta_p)}{\omega\left[L_u + \left(\frac{L_a - L_u}{a + bi_{\max 2}}\right)\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\theta_p\frac{\pi}{\theta_k}\right)\right)\right]} \tag{1.8}$$

การวิเคราะห์หาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมเพื่อให้กระแสเฟสมีรูปร่างลักษณะ แฟลทท็อป โดยมุมนำกระแสที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการแทนสมการที่ (1.7) ลงในสมการที่ (1.8)

$$\theta_{on}^{opt} = \frac{\theta_{off}^{opt}(L_u + 2qf_1(\theta) - qf_2(\theta)) - \theta_3(L_u + qf_1(\theta))}{q(f_1(\theta) - f_2(\theta))} \tag{1.9}$$

โดยที่ $q = \frac{L_a - L_u}{a + bi_{\max}}$

$$f_1(\theta) = 0.5 + 0.5\cos\left(\theta_{off}^{opt}\frac{\pi}{\theta_k}\right)$$

$$f_2(\theta) = 0.5 + 0.5\cos\left(\theta_p\frac{\pi}{\theta_k}\right)$$

มุมของโรเตอร์ (θ) ที่ตำแหน่งกระแสสูงสุดสามารถหาได้จากสมการ $\frac{di}{d\theta} = 0$

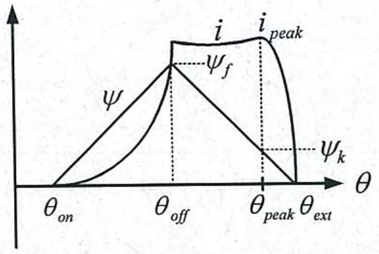
$$\pi(L_a - L_u)\sin\left(\theta\frac{\pi}{\theta_k}\right) = 2\left(\frac{u}{\omega}\right)\theta_k(a + bi_{\max}) \tag{1.10}$$

มุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม เกิดจากการแทน θ เท่ากับ θ_{off} ลงในสมการที่ (1.10)

$$\theta_{off}^{opt} = \frac{\theta_k}{\pi}\sin^{-1}\left(\frac{2u\theta_k}{\omega\pi(L_a - L_u)}(a + bi_{\max})\right) \tag{1.11}$$

วิธีที่ 2 การหาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมโดยคงที่ค่ามุมนำกระแส ในบทความวิจัย [13]-[14] ได้สรุปไว้ว่าถ้าควบคุมให้เอสอาร์จีทำงานแล้วทำให้รูปร่างของกระแสเฟสมีลักษณะแบบ แฟลทท็อป จะทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้มุมกระตุ้นที่เหมาะ สม (มุมนำกระแสที่เหมาะสม ($\theta_{on,opt}$) และมุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม ($\theta_{off,opt}$)) คือมุมกระตุ้นซึ่งควบคุมเอสอาร์จีแล้วทำให้กระแสมีรูปร่างแบบแฟลทท็อป

เอกสารนี้ได้รับอนุญาตให้ใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ของกระแสเฟสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง

$$\psi(i,\theta)=\int_0^t u dt=\int_0^\theta \frac{u}{\omega}d\theta=\begin{cases}\frac{u}{\omega}\cdot(\theta-\theta_{on}) & ,\theta_{on}<\theta\le\theta_{off}\\ \frac{u}{\omega}\cdot(2\theta_{off}-\theta_{on}-\theta) & ,\theta_{off}<\theta\le\theta_{ext}\\ 0 & ,\quad else\end{cases} \tag{1.12}$$

ความสัมพันธ์ของกระแสเฟสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่แสดงในรูปที่ 1.4 โดยตำแหน่งมุมที่ทำให้กระแสเฟสมีค่าเป็นศูนย์ (extinct angle : θ_{ext}) มีค่าคือ $\theta_{ext}=2\theta_{off}-\theta_{on}$ ดังนั้นค่าของ $\theta_{off}-\theta_{on}$ มีค่าเท่ากับ $\theta_{ext}-\theta_{off}$ สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องสามารถหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ (1.12) กำหนดให้สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่ง θ_{off} คือ ψ_f และที่ตำแหน่ง θ_{peak} คือ ψ_k ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (1.13) และ (1.14) ตามลำดับ

$$\psi_f=\frac{1}{\omega}\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} u d\theta=\frac{u}{\omega}(\theta_{off}-\theta_{on}) \tag{1.13}$$

$$\psi_k=\frac{1}{\omega}\int_{\theta_{peak}}^{\theta_{ext}} u d\theta=\frac{u}{\omega}(\theta_{ext}-\theta_{peak}) \tag{1.14}$$

กำหนดให้ x คืออัตราส่วนของ $\frac{\psi_k}{\psi_f}$ มีค่าดังแสดงในสมการที่ (1.15)

$$x=\frac{\theta_{ext}-\theta_{peak}}{\theta_{off}-\theta_{on}}=\frac{2\theta_{off}-\theta_{on}-\theta_{peak}}{\theta_{off}-\theta_{on}} \tag{1.15}$$

จากสมการที่ (1.15) สามารถหาค่ามุมหยุดนำกระแสได้ คือ

$$\theta_{off}=\frac{[\theta_{on}(x-1)]-\theta_{peak}}{(x-2)} \tag{1.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสมการที่ (1.16) ค่าของมุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม $(\theta_{off,opt})$ สามารถหาค่าได้ ถ้าทราบตำแหน่งมุมนำกระแสที่เหมาะสม $(\theta_{on,opt})$ ค่าที่เหมาะสมของ x หรือ x_{opt} และค่า θ_{peak}

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยเรื่องมุมกระตุ้นที่เหมาะสมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุด สามารถแบ่งเป็นบทได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บทที่ 4 ระบบควบคุมมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

บทที่ 5 ผลจำลองการทำงานและผลการทดลอง

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก. เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ประวัติผู้เขียน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ ในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.5.2 วิเคราะห์กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ 4 เฟส 8 ขั้ว สเต เตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ ด้วยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.3 ศึกษาการทำงานของตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลขนาด 32 บิท เบอร์ TMS320F 28027 และ TMS320F2812 เพื่อเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ในโหมดกระแสพัลส์

1.5.4 ศึกษาการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ วงจรขับนำเกท วงจรตรวจวัดความเร็วรอบของโรเตอร์ วงจรวัดแรงดันดีซีบัส วงจรวัดกระแสเฟส

1.5.5 ทดสอบการทำงานวงจรส่วนประกอบต่างๆ สำหรับควบคุมมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.5.6 ทดสอบการทำงานมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ตัวแปรควบคุมที่ได้จากการนำเสนอ

1.5.7 ทดสอบพร้อมทั้งเก็บข้อมูล

1.5.8 นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับหลักการทางทฤษฎี

1.5.9 พิมพ์วิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เข้าใจหลักการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.6.2 สามารถวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมการทำงานของเอสอาร์จีที่ถูกกระตุ้นในโหมดกระแสพัลส์ได้

1.6.3 สามารถวิเคราะห์รูปร่างของกระแสเฟสที่มีผลต่อการเกิดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดของเอสอาร์จี ในโหมดการกระตุ้นการทำงานแบบกระแสพัลส์ได้

1.6.4 สามารถออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในเทอมของตัวแปรแรงดันดีซีบัส ความเร็วโรเตอร์ มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส สำหรับวิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่เหมาะสมในโหมดกระแสพัลส์เพื่อควบคุมให้เอสอาร์จีทำงานเกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยส่วนมากเน้นไปที่การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดมอเตอร์ (เอสอาร์เอ็ม) แต่สำหรับการควบคุมการทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เอสอาร์จี) นั้นงานวิจัยยังไม่เป็นที่กว้างขวางมากนัก บทความวิจัย [3] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมในสภาวะที่เหมาะสมของมุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสซึ่งถูกประมวลผลด้วยตัวควบคุมแบบดิจิทัล โดยผลที่ได้ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและลดการกระเพื่อมของแรงบิด บทความวิจัย [4] ได้แสดงถึงวิธีการควบคุมการทำงานแบบป้อนกลับในโหมดกระแสพัลส์ของเอสอาร์จีที่ความเร็วสูงเพียงพอ ซึ่งสรุปให้เห็นว่าตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวคือมุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสมีผลต่อการควบคุมการกำเนิดกำลังไฟฟ้า บทความวิจัย [6] ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสมการแรงดันเฟสของเอสอาร์จี ระดับของแรงดันดีซีบัส การสวิทชิ่ง ความเร็วโรเตอร์ และความเหนี่ยวนำเฟส ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออก สำหรับการควบคุมการทำงานของเอสอาร์จีมีวัตถุประสงค์หลักคือควบคุมระดับแรงดันดีซีบัสให้มีค่าคงที่ตามต้องการและให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นตัวควบคุมต้องมีความสามารถในการควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานของเอสอาร์จี ได้แก่ ระดับกระแส มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส ซึ่งหลักการควบคุมได้ถูกบรรยายไว้ในบทความวิจัย [13],[15] วงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมการทำงานของเอสอาร์จีได้ถูกบรรยายในบทความวิจัย [14] ซึ่งประสิทธิภาพของการแปลงผันพลังงานได้ถูกปรับปรุงโดยวิธีการปรับแรงดันดีซีบัสด้วยความเร็วของโรเตอร์ บทความวิจัย [16] ได้นำเสนอถึงความพยายามถึงการศึกษาการควบคุมผ่านการจำลองทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่ และปรับมุมหยุดนำกระแสเพื่อให้ได้กระแสดีซีลิงค์ตามต้องการ แบบจำลองการทำงานโดยการควบคุมแรงดันดีซีบัสแบบเชิงเส้นรวมถึงการศึกษาถึงการลดสัดส่วนของพลังงานที่กระตุ้นให้เอสอาร์จีทำงานได้ถูกนำเสนอในบทความวิจัย [17] รายละเอียดการออกแบบเอสอาร์จีสำหรับประยุกต์ใช้กับกังหันที่ใช้พลังงานจากแก๊สซึ่งกำลังด้านออกได้ถูกควบคุมด้วยวิธีการปรับค่าของระดับกระแส โดยการควบคุมมุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสให้คงที่ซึ่งรายละเอียดได้ถูกบรรยายไว้ในบทความวิจัย [18] การวิเคราะห์ความผิดพร่องและการสืบสวนของการกระตุ้นการทำงานของเอสอาร์จีได้ถูกอธิบายไว้ในบทความวิจัย [19] การทำงานของเอสอาร์จี 1 เฟสภายใต้การทำงานในสภาวะความผิดพร่องได้ถูกบรรยายไว้ในบทความวิจัย [20] วิธีการหามุมกระตุ้นของเอสอาร์จีในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์เพื่อลดการสูญเสียหรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยวิธีการทดลองซ้ำจำนวนมาก ซึ่งจะพบว่ามีตำแหน่งมุมกระตุ้นที่เหมาะสมเพียงค่าเดียวที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดหรือการลดการสูญเสียได้ถูกบรรยายในบทความวิจัย [21] บทความวิจัย [22] นำเสนอยุทธวิธีการควบคุมโดยการปรับเปลี่ยนมุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสของเอสอาร์จี 3 เฟส เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและลดกระแสกระเพื่อมของดีซีลิงค์ซึ่งเป็นผลมาจากการคอมมิวเตทของกระแสเฟสที่ความเร็วสูง และในบทความวิจัย [23] ได้นำเสนอการจำลองทำงานเพื่อศึกษาสมรรถนะของเอสอาร์จีเพื่อประยุกต์ใช้กับงานที่ความเร็วไม่คงที่ โดยแบบจำลองการทำงานประยุกต์มาจากกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetization Curve) จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 แล้วว่าเอสอาร์จีมีข้อดี คือ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ แรงเฉื่อยต่ำ

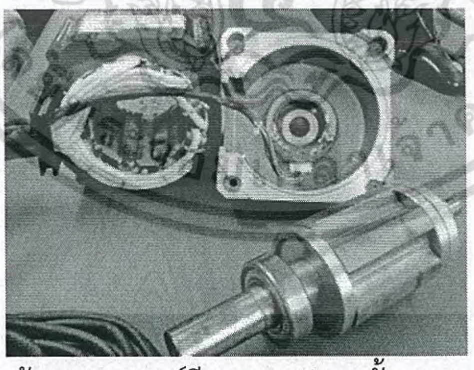
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามเอสอาร์จีต้องการตัวตรวจจับตำแหน่งของขดลวดเฟส เกิดการสั่นและเกิดเสียงดับรบกวนขณะทำงาน [24] โดยเอสอาร์จีสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน ตัวอย่างเช่น ในการประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันแก๊สสำที่ต่ออยู่กับระบบสำหรับอากาศยาน [18] ซึ่งการทำงานของเอสอาร์จีจะมีความเร็วและแรงดันดีซีบัสที่คงที่ ดังนั้นการกำเนิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเอสอาร์จีจะมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับมุมกระตุ้นที่เหมาะสมเท่านั้น การประยุกต์ใช้กับพลังงานลมโดยการควบคุมแรงดันดีซีบัสให้คงที่ [25] ดังนั้นการกำเนิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเอสอาร์จีขึ้นอยู่กับมุมกระตุ้นที่เหมาะสมในแต่ละรอบของความเร็ว และการประยุกต์ใช้ในรถยนต์พลังงานไฟฟ้า [26] การกำเนิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเอสอาร์จีขึ้นอยู่กับมุมกระตุ้นที่เหมาะสมแต่ละความเร็วรอบและแรงดันดีซีบัส เนื่องจากแรงดันดีซีบัสอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะของการประจุไฟฟ้าหรือการคายประจุไฟฟ้า

บทความวิจัย [27] ได้บรรยายไว้ว่าการหากำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีจำเป็นต้องรู้รูปร่างของกระแสเฟสและได้นำเสนอสมการกระแสซึ่งประยุกต์มาจากคุณสมบัติทางแม่เหล็กสำหรับหามุมกระตุ้นที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในรูปแบบของการจำลองการทำงาน ซึ่งมีความน่าเชื่อถือแต่วิธีการหาค่อนข้างจะยุ่งยากและซับซ้อน สำหรับงานวิจัยนี้รูปร่างกระแสเฟสของเอสอาร์จีได้ถูกวิเคราะห์ผ่านสมการซึ่งอยู่ในเทอมของตัวแปรควบคุมซึ่งถูกประยุกต์มาจากกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็ก เพื่อใช้วิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่เหมาะสมสำหรับการกำเนิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นให้เอสอาร์จีทำงานในตำแหน่งที่เหมาะสมรูปร่างของกระแสจะมีลักษณะแบบแฟลทท็อป

2.2 โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ 4 เฟส มีขั้วสเตเตอร์ 8 ขั้ว และขั้วโรเตอร์ 6 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเอสอาร์จีแบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์

รูปที่ 2.2 แสดงการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FEMM4.2 ซึ่งเป็นการคำนวณแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) พารามิเตอร์ที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 วิธีการวิเคราะห์โดยการเลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์ออกเป็นช่วงๆ แต่ละช่วงห่างกัน 3° จบครบ 60°

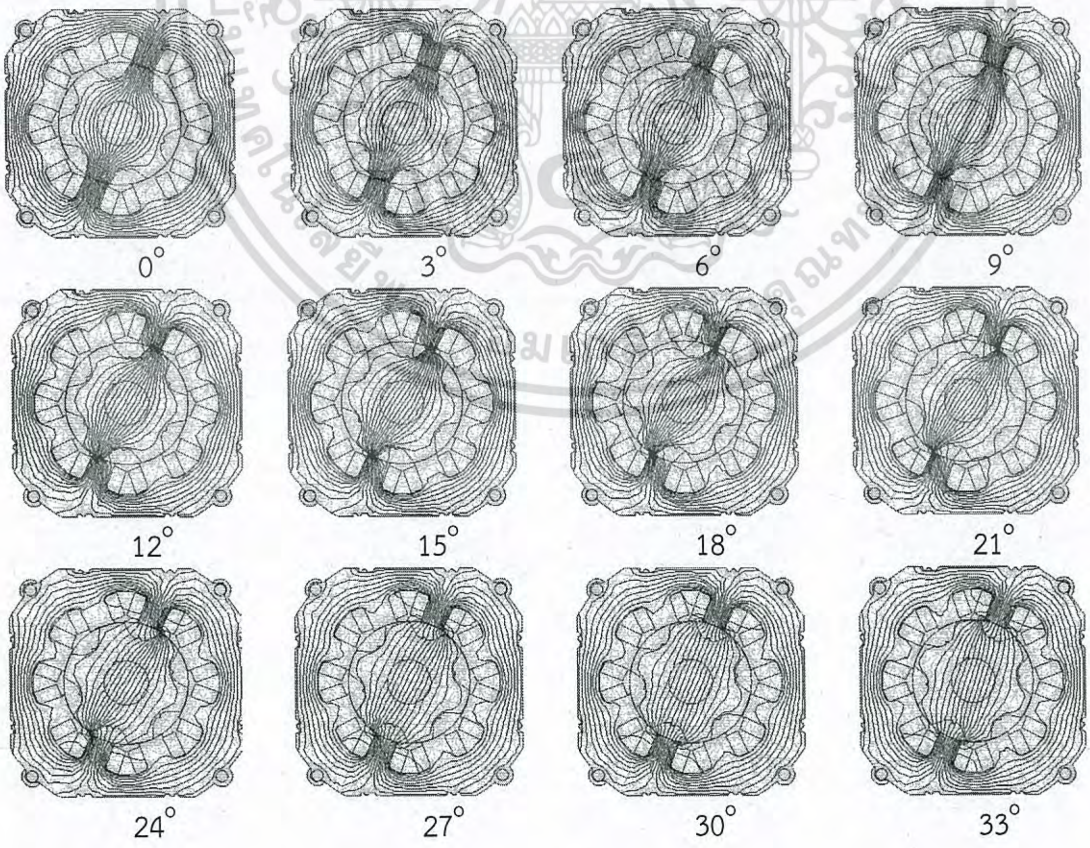
ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำเฟสกับตำแหน่งของโรเตอร์ โดยที่ตำแหน่งตรงขั้ว (Aligned) มีค่าความเหนี่ยวนำเฟสสูงสุด และที่ตำแหน่งไม่ตรงขั้ว (Unaligned) มีค่าความเหนี่ยวนำเฟสต่ำสุด ส่วนในรูปที่ 2.4 แสดง

เอกสารนี้ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์หรือเพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

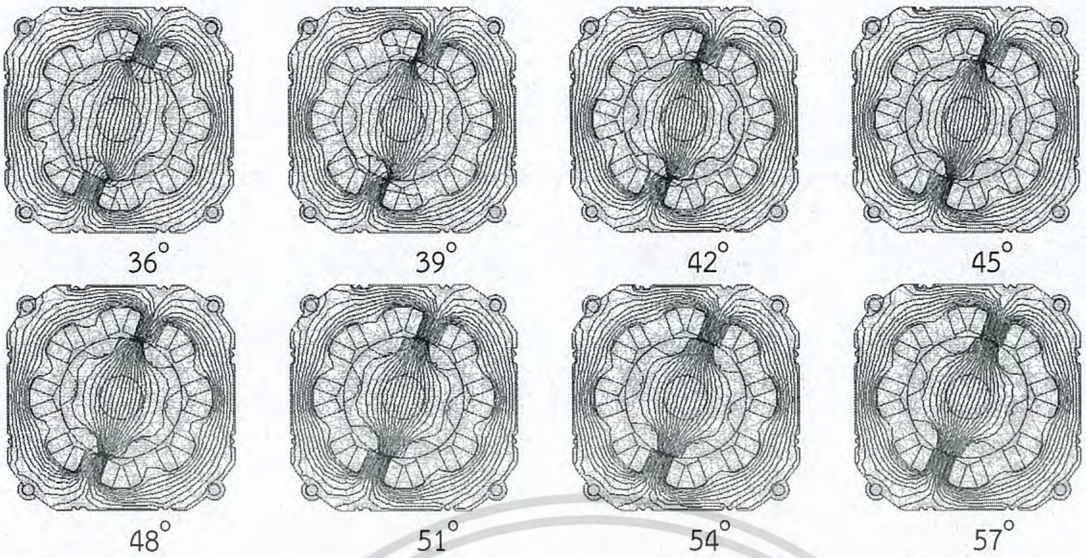
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับกระแสเฟส หรือกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการคำนวณแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการทดลอง

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของเอสอาร์จี

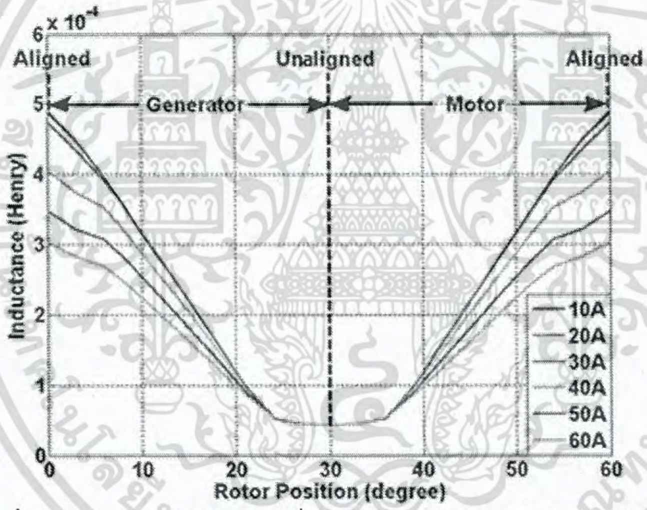
พารามิเตอร์	ขนาด
Outer diameter of stator	150 mm
Inner diameter of stator	70 mm
Length of air gap	0.5 mm
Stator pole arc	22°
Rotor pole arc	24°
Stack length	70 mm
Numbers of phases	4
Numbers of poles and phases	8/6
Rated Power	2.23 kW
Rated Voltage	48 V
Aligned Resistance	490 μH
Unaligned Resistance	40 μH



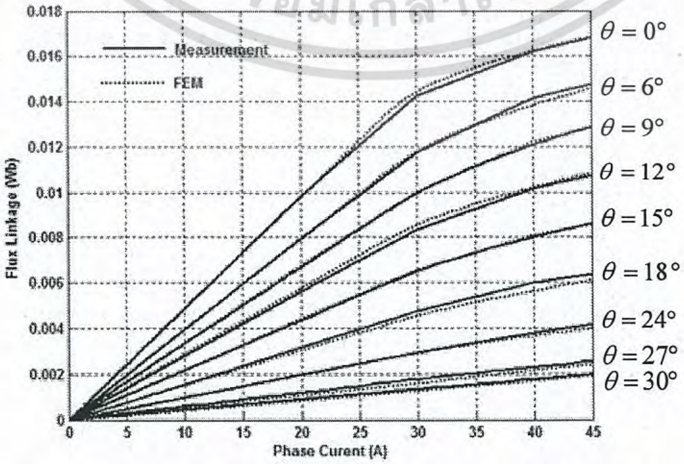
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์ด้วยการคำนวณแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) แบ่งช่วงละ 3° ระหว่างตำแหน่งตรงขั้วที่ติดกัน (0° - 60°)



รูปที่ 2.3 รูปร่างของความเหนี่ยวนำเฟส ณ ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ



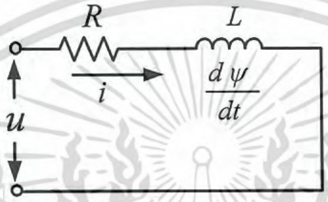
รูปที่ 2.4 กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณแบบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ชนิดสวิช์รีลัคแตนซ์ สามารถทำงานในโหมดของมอเตอร์ได้โดยควบคุมให้มอเตอร์นี้ทำงานในช่วงค่าการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำเฟสมีค่าเพิ่มขึ้น $(\frac{dL}{d\theta} > 0)$ และเมื่อต้องการให้ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องควบคุมให้ให้มอเตอร์นี้ทำงานในช่วงค่าการเปลี่ยนแปลงของความเหนี่ยวนำเฟสมีค่าลดลง $(\frac{dL}{d\theta} < 0)$

2.3 สมการพื้นฐานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

วงจรสมมูลของมอเตอร์แบบสวิทช์รีลัคแตนซ์ สามารถนำมาวิเคราะห์การทำงานได้โดยในวงจรไม่คิดค่ามิวชวลอินดักแตนซ์ระหว่างเฟส แรงดันเฟสที่เกิดขึ้นหาได้จากสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของขดลวดเฟส

$$u = i \cdot R + \frac{d\psi}{dt} \tag{2.1}$$

โดยที่ u คือแรงดันดีซีบัส

R คือค่าความความต้านทานของขดลวดเฟส

จากสมการที่ (2.1) สามารถหาค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ψ) ได้ดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$\psi = \int (u - i \cdot R)dt = \frac{1}{\omega}\int (u - i \cdot R)d\theta \tag{2.2}$$

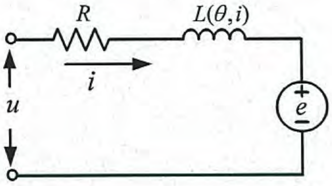
พิจารณาในสมการที่ (2.1) ค่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันของกระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์ ดังนั้นสมการของแรงดันเฟสสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชัน 3 ตัวคือ แรงดันที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานเฟส แรงดันที่เกิดขึ้นที่ความเหนี่ยวนำเฟส และแรงดันต้านกลับ (back emf : e)

$$\begin{aligned} u &= i \cdot R + \frac{d\psi(i,\theta)}{dt} \\ &= i \cdot R + \frac{d\psi}{dt} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\psi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ &= i \cdot R + L\frac{di}{dt} + \omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \end{aligned} \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า $\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$ เป็นค่าของความเร็วของโรเตอร์ และ $e = i \cdot \omega \dfrac{dL}{d\theta}$

และจากสมการที่ (2.3) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูล 1 เฟสของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6

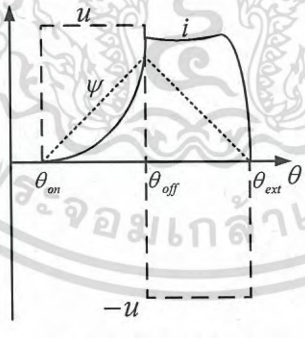


รูปที่ 2.6 วงจรสมมูล 1 เฟสของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

จากรูปที่ 2.6 แรงดันต้านกลับคือ $e = \cdot\omega \cdot i \cdot \dfrac{dL(\theta,i)}{d\theta}$ เมื่อทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยตัวเหนี่ยวนำแต่ละเฟสถูกกระตุ้นหลังจากตำแหน่งตรงขั้ว ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำเฟสจะมีค่าลดลง $(\dfrac{dL}{d\theta} < 0)$ แรงดันต้านกลับจึงมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นลบ โดยขนาดของแรงดันต้านกลับจะเปลี่ยนตามความเร็วของโรเตอร์ ซึ่งกระแสเฟสขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต้านกลับและแหล่งจ่ายแรงดัน

2.4 การทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

พิจารณาในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของแรงดันเฟส กระแสเฟส และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์



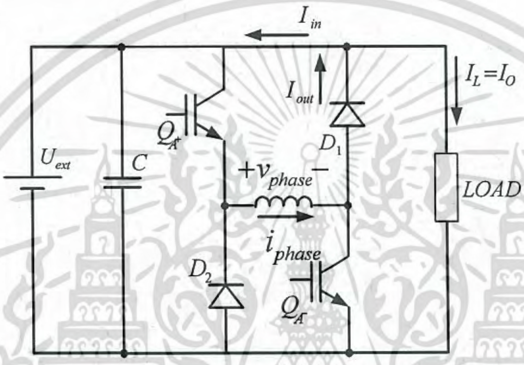
รูปที่ 2.7 รูปคลื่นของแรงดันเฟส กระแสเฟส และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงวงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบการอธิบายการทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีพลังงานจากภายนอกกระตุ้นทุกๆรอบการทำงาน อยู่ในระหว่างช่วง $\theta_{on} - \theta_{off}$ โดยพลังงานภายนอกซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างแรงดันดีซีบัสกับพลังงานด้านเข้าทางกลจากเครื่องต้นกำลัง (prime mover) ซึ่งจะไม่มีพลังงานจ่ายไปยังโหลดในช่วงโหมดของการกระตุ้น ซึ่งขณะนี้สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Q_A^+ และ Q_A^- อยู่ในสภาวะนำกระแส โดยในโหมดนี้พลังงานที่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นเข้าไปได้ถูกนำไปสร้างพลังงานสนามไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น และเมื่อสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Q_A^+ และ Q_B^+ ไม่นำกระแสก็จะเข้าสู่โหมดของการกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเกิดอยู่ระหว่างช่วง $\theta_{off} - \theta_{ext}$ โดยพลังงานไฟฟ้าที่ถูกสะสมไว้ก็จะถูกจ่ายออกไปยังโหลดผ่านทางไดโอดฟรีวิวลิ่ง และในเวลาเดียวกันพลังงานทางกลก็จะถูกแปลงผันโดยตรงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่กำเนิดได้ต้องมีค่ามากกว่าพลังงานภายนอกที่ถูกกระตุ้นเข้าไป

ในรูปที่ 2.8 กระแสที่เกิดจากแรงดันดีซีบัส (I_{in}) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) ส่วนกระแสที่เกิดจากโหมดการกำเนิดไฟฟ้า (I_{out}) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.5) กระแสสุทธิที่เกิดขึ้นเมื่อทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (I_o) หาได้จากสมการที่ (2.6) และกำลังไฟฟ้าด้านออก (P_{out}) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.7)



รูปที่ 2.8 วงจรแสดงภาพของคอนเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส [13]

$$I_{in} = \frac{1}{2\pi}\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i\, d\theta \tag{2.4}$$

$$I_{out} = \frac{1}{2\pi}\int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} i\, d\theta \tag{2.5}$$

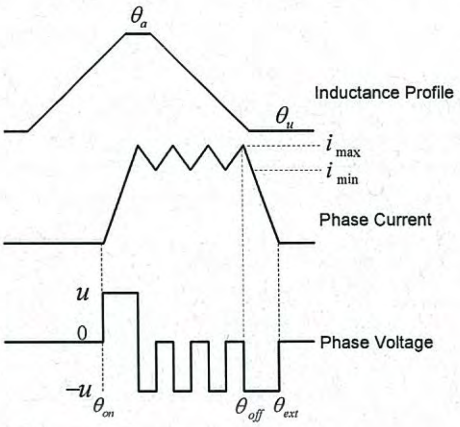
$$I_o = I_{out} - I_{in} \tag{2.6}$$

$$P_{out} = N_{ph} \cdot u \cdot I_o \tag{2.7}$$

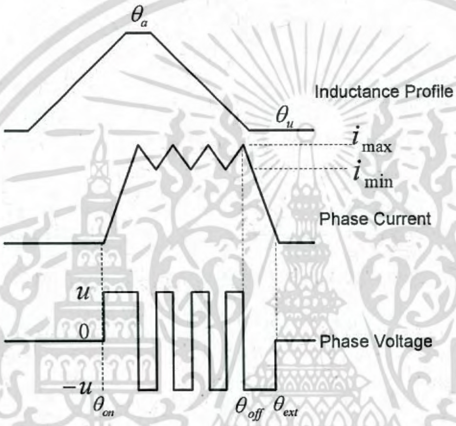
2.5 การควบคุมกระแสในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

การควบคุมกระแสเฟสขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วต่ำการควบคุมกระแสอยู่ในโหมดกระแสช๊อปปิ้ง (Soft Chopping และ Hard Chopping) ซึ่งการควบคุมกระแสในโหมดนี้มีความจำเป็นเมื่อความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำจะส่งผลให้แรงดันต้านกลับมีค่าต่ำทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดเฟสมีค่าสูงดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องควบคุมกระแสเพื่อป้องกันความเสียหายต่อตัวมอเตอร์และระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ และเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วสูงการควบคุมกระแสอยู่ในโหมดกระแสพัลส์ (Single Pulse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping



รูปที่ 2.10 การควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping

2.5.1 การควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping และ Hard Chopping ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ ซึ่งการควบคุมกระแสในโหมดนี้เมื่อกระตุ้นให้เอสอาร์จีนำกระแส (Q_A^+ และ Q_A^- นำกระแส) ที่ตำแหน่งนำกระแส (θ_{on}) ขดลวดเฟสจะได้รับแรงดันเท่ากับแรงดันดีซีบัส เนื่องจากแรงดันต้านกลับมีค่าต่ำจึงส่งผลให้กระแสเฟสเพิ่มขึ้นสูง ดังนั้นการควบคุมกระแสเฟสเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันความเสียหายไม่ให้เกิดขึ้นที่มอเตอร์และระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยกระแสเฟสจะถูกควบคุมอยู่ระหว่างค่าต่ำสุด ($i_{\min}$) และค่าสูงสุด ($i_{\max}$) ตามการควบคุมแรงดันเฟส ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การควบคุมแรงดันเฟสของเอสอาร์จี

แรงดันเฟส	สภาวะการทำงาน			
	Q_A^+	Q_A^-	D_1	D_2
u	On	On	Off	Off
0	On	Off	On	Off
0	Off	On	Off	On
$-u$	Off	Off	On	On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อควบคุมกระแสทั้ง 2 แบบที่ความถี่ในการสวิทช์เดียวกันแล้วพบว่าการควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping กระแสจะมีการกระเพื่อมสูงกว่าและมีเสียงรบกวน (Acoustic Noise) สูงกว่าการควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping

2.5.2 การควบคุมแบบกระแสพัลส์ (Single Pulse) เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วสูง รูปร่างของกระเฟสที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ คือเมื่อแรงดันดีซีบัสมีค่าต่ำกว่าแรงดันต้านกลับกระแสเฟสจะเพิ่มสูงขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส θ_{off} และลดลงมาเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง θ_{ext} ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อแรงดันดีซีบัสมีค่าเท่ากับแรงดันต้านกลับกระแสเฟสจะคงที่หลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส θ_{off} และลดลงมาเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง θ_{ext} ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และเมื่อแรงดันดีซีบัสมีสูงกว่าแรงดันต้านกลับกระแสเฟสจะลดลงหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส θ_{off} และลดลงมาเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง θ_{ext} ดังแสดงในรูปที่ 2.13

พิจารณาเลือกมุมการนำกระแสโดยในช่วงที่ θ_{on} เกิดขึ้นก่อน θ_a (θ_a คือตำแหน่งที่เกิดค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด และ θ_u คือตำแหน่งที่เกิดค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุด) โหมดการทำงานยังเป็นมอเตอร์แรงบิดมีเครื่องหมายเป็นบวก ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าของความเหนี่ยวนำเฟสยังอยู่ในช่วงการเพิ่มขึ้นและจำนวนของพลังงานที่สะสมก็เพิ่มตาม เนื่องจากความต้านทานเฟสมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานเฟสมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันดีซีบัส สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ไม่คิดเทอมของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.3) ทำให้ได้สมการที่ (2.8)

$$u = L\frac{di}{dt} + \omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \tag{2.8}$$

ที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ซึ่งเกิดขึ้นหลังตำแหน่งตรงขั้ว ถ้า $\frac{di}{dt}$ มีค่าเพิ่มขึ้น (+) เทอมของแรงดันต้านกลับจะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันดีซีบัส เนื่องจาก $\frac{dL}{d\theta}$ มีค่าลดลง (-) และเทอมของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟสมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันดีซีบัส (+) จากสมการที่ (2.8) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$u = L\frac{di}{dt} - \omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \tag{2.9}$$

และจากสมการที่ (2.9) ทำให้พบว่า แรงดันต้านกลับจะมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีบัสรวมกับแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส หรือกล่าวได้ว่าแรงดันต้านกลับมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีบัส $(u < e)$ ซึ่งรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.11

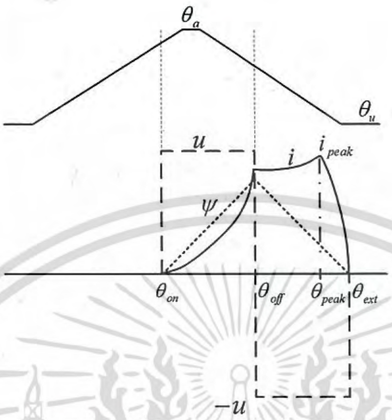
ที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ซึ่งเกิดขึ้นหลังตำแหน่งตรงขั้ว เมื่อกระแสเฟสมีค่าคงที่ ดังนั้น $\frac{di}{dt}$ มีค่าคงที่เป็นศูนย์ เทอมของแรงดันต้านกลับจะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันดีซีบัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

148655

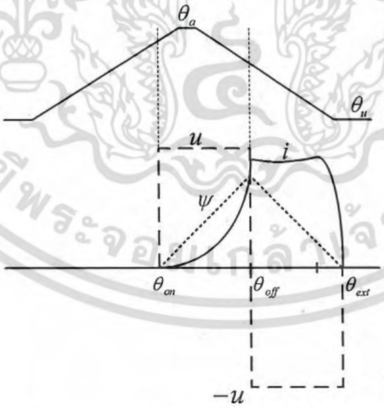
เนื่องจาก $\frac{dL}{d\theta}$ มีค่าลดลง (-) และเทอมของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟสมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันดีซีบัส (+) จากสมการที่ (2.8) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.10)

$$u = -\omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.11 รูปร่างของกระแสเฟสเมื่อแรงดันดีซีบัสต่ำกว่าแรงดันต้านกลับ

และจากสมการที่ (2.10) ทำให้พบว่า แรงดันต้านกลับจะมีค่าเท่ากับแรงดันดีซี หรือกล่าวได้ว่าแรงดันต้านกลับมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีบัส $(u = e)$ ซึ่งรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.12

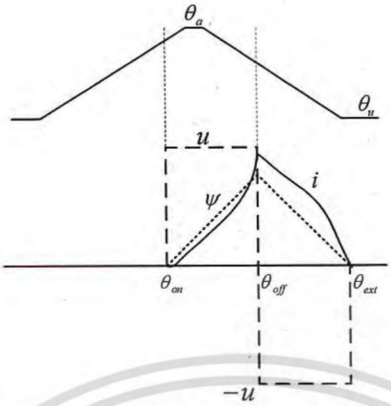


รูปที่ 2.12 รูปร่างของกระแสเฟสเมื่อแรงดันดีซีบัสสมดุลกับแรงดันต้านกลับ

ที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ซึ่งเกิดขึ้นหลังตำแหน่งตรงขั้ว ถ้า $\frac{di}{dt}$ มีค่าลดลง (-) เทอมของแรงดันต้านกลับจะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันดีซีบัส เนื่องจาก $\frac{dL}{d\theta}$ มีค่าลดลง (-) และเทอมของแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟสมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันดีซีบัส (-) จากสมการที่ (2.8) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = -L\frac{di}{dt} - \omega \cdot i \cdot \frac{dL}{d\theta} \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.13 รูปร่างของกระแสเฟสเมื่อแรงดันดีซีบัสสูงกว่าแรงดันต้านกลับ

จากสมการที่ (2.11) ทำให้พบว่า แรงดันดีซีบัสจะมีค่าเท่ากับแรงดันต้านกลับรวมกับแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส หรือกล่าวได้ว่าแรงดันต้านกลับมีค่าน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส $(u > e)$ ซึ่งรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.13

2.6 วงรอบการถ่ายเทพลังงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

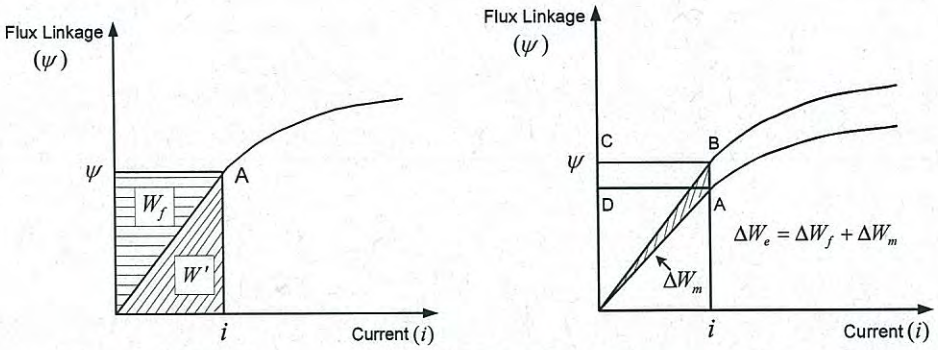
ในการวิเคราะห์มอเตอร์ชนิดสวิทซ์รีลัคแตนซ์นั้นยากที่จะหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ในช่วงอิ่มตัว (Saturation) และในส่วนของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญทางสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ โดยกราฟรูปร่างของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในขดลวดสเตเตอร์ต่อกระแสเฟสที่กระตุ้นเข้าไปในแต่ละตำแหน่งของโรเตอร์ $(\psi(\theta,i))$ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 แรงบิดที่สร้างขึ้นพิจารณาจากพื้นที่วงปิดภายในกราฟเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องต่อกระแสของแต่ละเฟส โดยพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่าย (Input Electrical Energy : W_e) เท่ากับผลรวมของพลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็ก (Stored Field Energy : W_f) กับพลังงานที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกล (Mechanical Energy : W_m) โดยมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$W_e = W_f + W_m \tag{2.12}$$

โดยที่ $W_e = \int i d\psi$

ในรูปที่ 2.14 (ก) ถ้าโรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่ง A พลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเท่ากับพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่ายซึ่งเท่ากับพื้นที่ด้านบนของกราฟคุณสมบัติเส้นแรงเม่เหล็ก องค์ประกอบของพลังงานร่วม (Conergy : W') ซึ่งอยู่ด้านล่างของกราฟคุณสมบัติเส้นแรงเม่เหล็ก ในช่วงที่โรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานกันกับแหล่งจ่าย และมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่สะสมอยู่ในสนามแม่เหล็กเมื่อให้กระแสคงที่ในช่วงที่โรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โรเตอร์อยู่ในตำแหน่ง A (ข) โรเตอร์เปลี่ยนแปลงจากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B

รูปที่ 2.14 กราฟค่าพลังงานสะสม และพลังงานร่วม

เมื่อโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งโดยเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B และกระแสคงที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\Delta W_e = \int_{\psi_A}^{\psi_B} i d\psi = area(ABCD) \tag{2.13}$$

พลังงานทั้งหมดที่ได้จากแหล่งจ่ายจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล และมีบางส่วนถูกเก็บในสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ในกรณีของเครื่องจักรกลหมุนค่าพลังงานกลจะอยู่ในเทอมของแรงบิดและเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโรเตอร์ดังสมการที่ 2.14

$$\Delta W_m = T_e \cdot \Delta\theta \tag{2.14}$$

ในกรณีที่กระแสคงที่พลังงานกลที่เกิดขึ้นเท่ากับค่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสนามแม่เหล็กร่วม ดังแสดงในสมการที่ 2.15

$$\Delta W_m = \Delta W^{'} \tag{2.15}$$

พลังงานสนามแม่เหล็กร่วม สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.16

$$W^{'} = \int_0^i \psi di \tag{2.16}$$

และแรงบิดที่ตำแหน่งต่างๆต่อเฟสมีค่าดังแสดงในสมการที่ (2.17)

$$T_e = \left[\frac{\partial W^{'}}{\partial \theta}\right]_{i=const.} \tag{2.17}$$

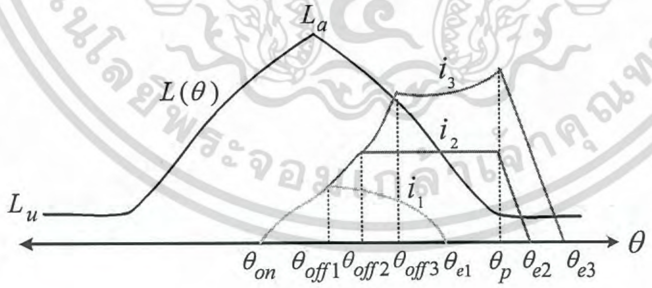
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

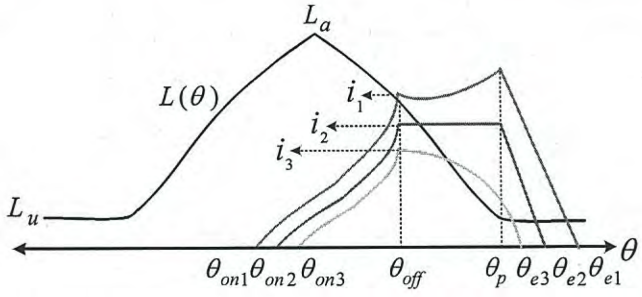
ตัวแปรควบคุมการทำงานแบบกระแสพัลส์ของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เอสอาร์จี) ประกอบด้วย แรงดันดีซีบัส (u) ความเร็วโรเตอร์ (ω) และมุมนำกระแส/หยุดนำกระแส ($\theta_{on} / \theta_{off}$) ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีให้มีค่าสูงสุด โดยใช้วิธีการควบคุมมุมกระตุ้น (มุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแส) วิธีการนี้รูปร่างกระแสเฟสจะเปลี่ยนเมื่อปรับมุมกระตุ้นโดยควบคุมแรงดันดีซีบัสและความเร็วโรเตอร์ให้คงที่ รูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสมจะถูกตรวจสอบเพื่อใช้วิเคราะห์หาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม และนำเสนอวิธีการควบคุมมุมกระตุ้นของเอสอาร์จีให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด โดยควบคุมมุมนำกระแสที่เหมาะสมให้คงที่ สำหรับค่าที่เหมาะสมของมุมหยุดนำกระแสสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ ซึ่งถูกวิเคราะห์มาจากรูปร่างกระแสที่เหมาะสม

3.1 การวิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้กระแสมีลักษณะแฟลทท็อป

สำหรับวิธีการควบคุมตำแหน่งของมุม (Angle Position Control : APC) กำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์สามารถปรับได้จากรูปร่างกระแสเฟส [28] โดยเมื่อควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่ และทำการปรับมุมหยุดนำกระแสรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในทางตรงข้ามเมื่อปรับมุมนำกระแสโดยควบคุมหยุดนำกระแสให้คงที่รูปร่างที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 รูปร่างของกระแสเฟส เมื่อควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่และปรับมุมหยุดนำกระแส



รูปที่ 3.2 รูปร่างของกระแสเฟส เมื่อปรับมุมนำกระแสและควบคุมมุมหยุดนำกระแสให้คงที่

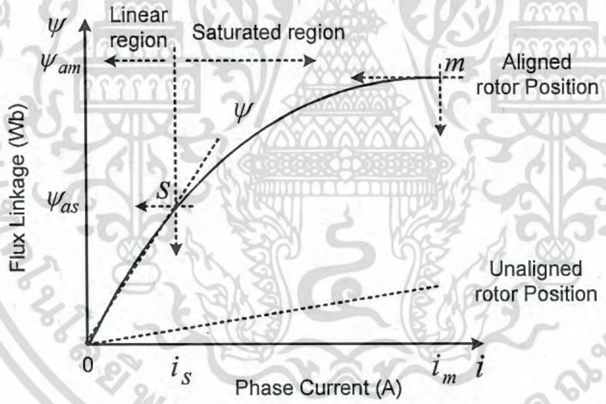
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 รูปร่างกระแสเฟสที่เกิดขึ้นจากการปรับมุมกระตุ้นมี 3 รูปแบบ ที่มีลักษณะคล้ายกัน เพื่อที่จะตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าด้านออกจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อควบคุมให้รูปร่างกระแสเฟสมีลักษณะอย่างไร ดังนั้นจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสขึ้นมาเพื่อใช้ตรวจสอบ

3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสได้มาจากการแทนค่าแบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำลงในสมการที่ 3.1) ซึ่งเป็นสมการแรงดันพื้นฐานโดยไม่มีคิดค่าความเหนี่ยวนำเฟสร่วม และอุปกรณ์สวิตซ์เป็นอุดมคติ

$$u = \omega L(\theta)\frac{di}{d\theta} + \omega i \frac{\partial L(i,\theta)}{\partial \theta} \tag{3.1}$$

แบบจำลองค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ประยุกต์มาจากฟังก์ชันเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องของ Stiebler [29] แต่ฟังก์ชันนี้อยู่ในรูปต่อหน่วย ฟังก์ชัน Froelich [30] คือ $\psi = (i/(a+b))$ ถูกนำมาใช้เพื่อปรับฟังก์ชันของ Stiebler ให้เป็นระบบที่ใช้งานจริง โดยต้องการค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องและกระแสที่ตำแหน่ง s และ m ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ตำแหน่งของ s และ m บนกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กของเอสอาร์จี

ตัวแปร a และ b คือความชันและจุดเริ่มไม่เป็นเชิงเส้นตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการแทนค่า ψ_{as}, i_s ที่ตำแหน่ง s และ ค่า ψ_{am}, i_m ที่ตำแหน่ง m ลงใน ฟังก์ชัน Froelich

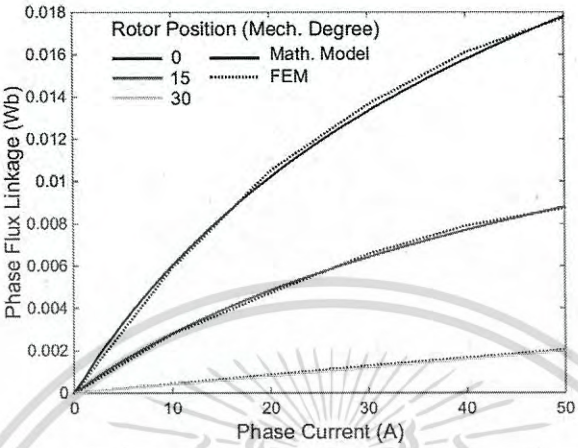
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในระบบจำนวนจริง สามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$\psi(i,\theta) = L_u i + (L_a - L_u)\frac{i}{a+bi} f(\theta) \tag{3.2}$$

โดยที่ θ_k คือตำแหน่งที่สเตเตอร์กับโรเตอร์แยกจากกันพอดี และฟังก์ชันเชิงมุม $f(\theta)$ หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(\theta)=\begin{cases}0.5+0.5\cos\left(\theta\dfrac{\pi}{\theta_k}\right) & ,-\theta_k \le \theta \le \theta_k \\ 0 & ,else\end{cases} \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.4 กราฟคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

รูปที่ 3.4 แสดงผลการเปรียบเทียบกราฟคุณสมบัติแม่เหล็กที่เกิดจากฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องในสมการที่ 3.2) และวิธีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์

โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้มาจากวิธีการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย L_a = 470 μH, L_u = 42 μH, θ_k = 27°, a = 0.65, and b = 0.155.

ความเหนี่ยวนำระหว่างเฟสไม่ถูกนำมาคิดเนื่องจากมีค่าน้อยมาก [31, 32] โดยทั่วไปความเหนี่ยวนำเฟสสามารถหาได้จากสมการ $L(i,\theta)=\psi(i,\theta)/i$ ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความเหนี่ยวนำที่ได้คือ

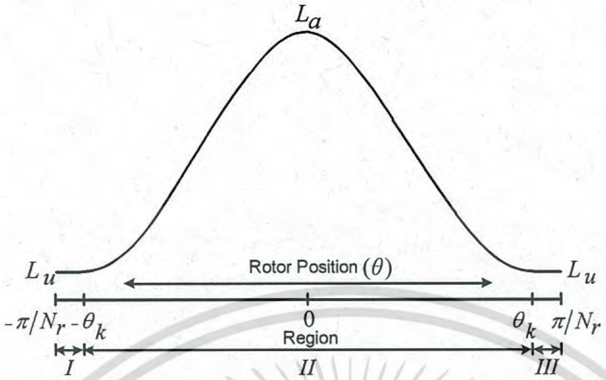
$$L(i,\theta)=L_u+\frac{L_a-L_u}{a+bi}f(\theta) \tag{3.4}$$

$$L(i,\theta)=\begin{cases}L_u & ,-\dfrac{\pi}{N_r}\le\theta<-\theta_k \\ L_u+\dfrac{L_a-L_u}{a+bi}f(\theta) & ,-\theta_k\le\theta\le\theta_k \\ L_u & ,\theta_k<\theta\le\dfrac{\pi}{N_r}\end{cases} \tag{3.5}$$

โดยฟังก์ชั่นเชิงมุมอยู่ในช่วง $-\theta_k \le \theta \le \theta_k$ ความเหนี่ยวนำเฟสอยู่ในช่วง $2\pi/N_r$ หรืออยู่

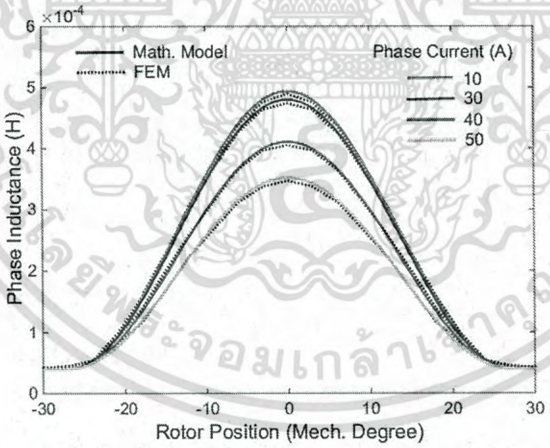
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง $-\pi/N_r$ ถึง π/N_r ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (3.5) ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสและตำแหน่งของโรเตอร์ โดยถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปร่างความเหนี่ยวนำเฟสถูกแบ่งเป็น 3 ขอบเขต

ความเหนี่ยวนำเฟสในรูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบจากวิธีการที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้ทั้งสองแบบเหมือนกันแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตสาสตร์



รูปที่ 3.6 ความเหนี่ยวนำเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

$$i = \begin{cases} \dfrac{u(\theta - \theta_{on})}{\omega\left[L_u + \left(\dfrac{L_a - L_u}{a + bi}\right) f(\theta)\right]} & ,\theta_{on} \le \theta < \theta_{off} \\ \dfrac{u(\theta_e - \theta)}{\omega\left[L_u + \left(\dfrac{L_a - L_u}{a + bi}\right) f(\theta)\right]} & ,\theta_{off} \le \theta \le \theta_e \\ 0 & ,else \end{cases} \tag{3.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (3.6) เป็นสมการกระแสที่ใช้ตรวจสอบหารูปร่างกระแสที่เหมาะสม เกิดจากการแทนสมการที่ (3.1) ลงในสมการที่ (3.5)

ถ้าต้องการทราบแรงบิดเฟสสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$T(i,\theta) = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(i,\theta)}{\partial \theta}$$

$$= (L_a - L_u) \left(\frac{(a+bi) f'(\theta) + b f(\theta) \left((L_a - L_u) f(\theta) i + \frac{u}{\omega} b \right) + c}{(2bL_u + d)(a+bi)^2} \right) i^2 \tag{3.7}$$

โดยที่ $c = u \begin{cases} -a & ,\theta_{on} \le \theta < \theta_{off} \\ a & ,\theta_{off} \le \theta \le \theta_e \\ 0 & ,else \end{cases}$

$$d = aL_u + (L_a - L_u) f(\theta) - \frac{b}{\omega} h$$

$$h = \frac{u}{\omega} \begin{cases} u(\theta - \theta_{on}) & ,\theta_{on} \le \theta < \theta_{off} \\ u(\theta_e - \theta) & ,\theta_{off} \le \theta \le \theta_e \\ 0 & ,else \end{cases}$$

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 รูปร่างกระแสเฟสแบบ i_2 มีลักษณะเป็นแบบ แฟลทท็อป ซึ่งจะทำให้เอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด [33] ดังนั้นค่ากระแสสูงสุดที่ตำแหน่ง θ_{off} แทนด้วย $i_{\max 1}$ และที่ตำแหน่ง θ_p แทนด้วย $i_{\max 2}$ มีค่าเท่ากันอยู่ในช่วง $\theta_{off} \le \theta \le \theta_p$ หาได้จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ

$$i_{\max 1} = \frac{u(\theta_{off} - \theta_{on})}{\omega \left[L_u + \left(\frac{L_a - L_u}{a + b i_{\max 1}} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\theta_{off} \frac{\pi}{\theta_k} \right) \right) \right]} \tag{3.8}$$

$$i_{\max 2} = \frac{u(2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta_p)}{\omega \left[L_u + \left(\frac{L_a - L_u}{a + b i_{\max 2}} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\theta_p \frac{\pi}{\theta_k} \right) \right) \right]} \tag{3.9}$$

3.1.2 การวิเคราะห์หาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม เพื่อให้กระแสเฟสมีรูปร่างลักษณะแฟลทท็อป โดยมุมนำกระแสที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการแทนสมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.9)

$$\theta_{on}^{opt} = \frac{\theta_{off}^{opt} (L_u + 2q f_1(\theta) - q f_2(\theta)) - \theta_3 (L_u + q f_1(\theta))}{q(f_1(\theta) - f_2(\theta))} \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $q = \dfrac{L_a - L_u}{a + bi_{\max}}$

$$f_1(\theta) = 0.5 + 0.5\cos\left(\theta_{off}^{opt}\frac{\pi}{\theta_k}\right)$$

$$f_2(\theta) = 0.5 + 0.5\cos\left(\theta_p\frac{\pi}{\theta_k}\right)$$

มุมของโรเตอร์ (θ) ที่ตำแหน่งกระแสสูงสุดสามารถหาได้จากสมการ $\dfrac{di}{d\theta} = 0$

$$\pi(L_a - L_u)\sin\left(\theta\frac{\pi}{\theta_k}\right) = 2\left(\frac{u}{\omega}\right)\theta_k(a + bi_{\max}) \tag{3.11}$$

มุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม เกิดจากการแทน θ เท่ากับ θ_{off} ลงในสมการที่ (3.11)

$$\theta_{off}^{opt} = \frac{\theta_k}{\pi}\sin^{-1}\left(\frac{2u\theta_k}{\omega\pi(L_a - L_u)}(a + bi_{\max})\right) \tag{3.12}$$

โดยกระแสทางด้านออกสามารถหาได้จากสมการที่ 3.13

$$I_L = \frac{1}{2\pi/N_r}\left(\int_{\theta_{off}}^{\theta_e} id\theta - \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} id\theta\right) \tag{3.13}$$

และกำลังไฟฟ้าด้านออก(เฟส)ของเอสอาร์จีสามารถหาได้จาก

$$P_{out} = I_L u \tag{3.14}$$

เมื่อกำหนด θ_p, u และ $i_{\max}$ ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์รูปร่างกระแสเฟสแบบแฟลททอ็ป สามารถหาได้จากขั้นตอนต่อไปนี้

1. ความเร็วของโรเตอร์ (ω) หาได้โดยการแทน u และ $i_{\max}$ และแทน $\theta = \theta_p$ ลงในสมการที่ (3.11)

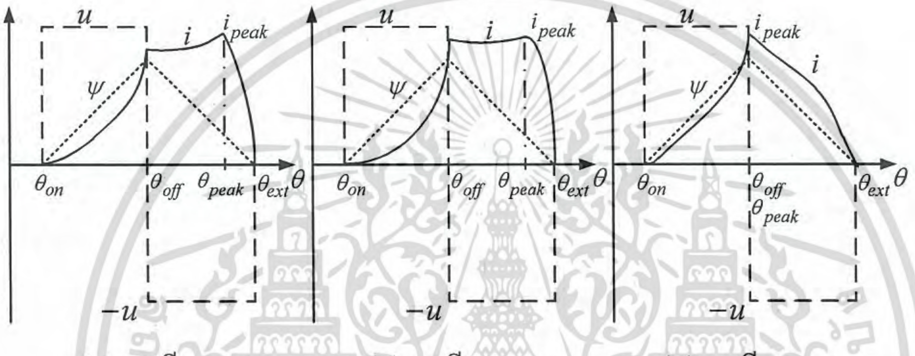
2. มุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม (θ_{off}^{opt}) หาได้โดยการแทน θ_p, u, $i_{\max}$ และ ω ลงในสมการที่ (3.12)

3. มุมนำกระแสที่เหมาะสม (θ_{off}^{on}) หาได้จากสมการที่ (3.10)

3.2 การวิเคราะห์หามุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยคงที่ค่ามุมนำกระแส เพื่อให้เอสอาร์จีกำเนิดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีลิขสิทธิ์ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

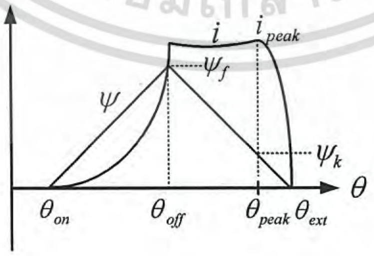
วิธีการควบคุมตำแหน่งของมุม (APC) เมื่อควบคุมมุมนำกระแสให้คงที่และปรับมุมหยุดนำกระแส รูปร่างของกระแสเฟสสามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เมื่อความเร็วรอบของโรเตอร์มีค่าสูง ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 3 กรณี จากสมการที่ (2.4) เมื่อไม่คิดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานเฟส ในกรณี $u<e$ รูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7(ก) โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเฟสจะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ในกรณี $u=e$ รูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7(ข) เป็นแบบ "แฟลทท็อป" โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเฟสจะมีค่าคงที่หลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) ในกรณี $u>e$ รูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7(ค) โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเฟสจะมีค่าลดลงหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส (θ_{off})



(ก) กรณี $u<e$ (ข) กรณี $u=e$ (ค) กรณี $u>e$

รูปที่ 3.7 รูปร่างของกระแสเฟสในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์ที่ความเร็วรอบสูง

ในบทความวิจัย [13-14] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมให้เอสอาร์จีทำงานแล้วทำให้รูปร่างของกระแสเฟสมีลักษณะแบบแฟลทท็อป จะทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้มุมกระตุ้นที่เหมาะสม (มุมนำกระแสที่เหมาะสม ($\theta_{on,opt}$) และมุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม ($\theta_{off,opt}$) คือมุมกระตุ้นที่ควบคุมให้กระแสเฟสของเอสอาร์จีมีรูปร่างแบบแฟลทท็อป



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของกระแสเฟสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง

ความสัมพันธ์ของกระแสเฟสและเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่แสดงในรูปที่ 3.8 โดยตำแหน่งมุมที่ทำให้กระแสเฟสมีค่าเป็นศูนย์ (extinct angle : θ_{ext}) มีค่าคือ $\theta_{ext} = 2\theta_{off} - \theta_{on}$ ดังนั้นค่าของ $(\theta_{off} - \theta_{on})$ มีค่าเท่ากับ $(\theta_{ext} - \theta_{off})$ สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องสามารถหาค่าได้ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในสมการที่ (3.15) กำหนดให้สมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่ง θ_{off} คือ ψ_f และที่ตำแหน่ง θ_{peak} คือ ψ_k ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ

$$\psi(i,\theta)=\int_0^t u dt=\int_0^\theta \frac{u}{\omega}d\theta=\begin{cases}\frac{u}{\omega}\cdot(\theta-\theta_{on}) & ,\theta_{on}<\theta\le\theta_{off}\\ \frac{u}{\omega}\cdot(2\theta_{off}-\theta_{on}-\theta) & ,\theta_{off}<\theta\le\theta_{ext}\\ 0 & , \quad else\end{cases} \tag{3.15}$$

$$\psi_f=\frac{1}{\omega}\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} u d\theta=\frac{u}{\omega}(\theta_{off}-\theta_{on}) \tag{3.16}$$

$$\psi_k=\frac{1}{\omega}\int_{\theta_{peak}}^{\theta_{ext}} u d\theta=\frac{u}{\omega}(\theta_{ext}-\theta_{peak}) \tag{3.17}$$

กำหนดให้ x คืออัตราส่วนของ $\frac{\psi_k}{\psi_f}$ มีค่าดังแสดงในสมการที่ (3.18)

$$x=\frac{\theta_{ext}-\theta_{peak}}{\theta_{off}-\theta_{on}}=\frac{2\theta_{off}-\theta_{on}-\theta_{peak}}{\theta_{off}-\theta_{on}} \tag{3.18}$$

จากสมการที่ (3.18) สามารถหาค่ามุมหยุดนำกระแสได้ คือ

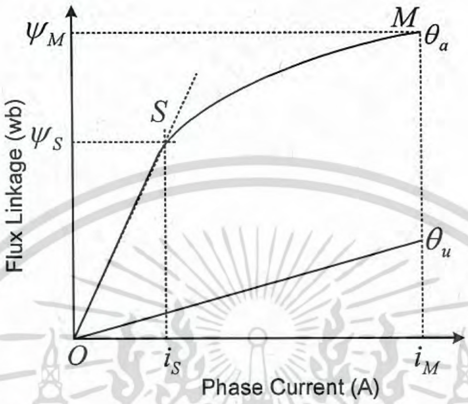
$$\theta_{off}=\frac{[\theta_{on}(x-1)]-\theta_{peak}}{(x-2)} \tag{3.19}$$

มุมกระตุ้นที่เหมาะสมประกอบด้วย มุมนำกระแสที่เหมาะสม $(\theta_{on,opt})$ และมุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม $(\theta_{off,opt})$ ซึ่งเป็นมุมกระตุ้นที่ใช้สำหรับควบคุมให้เอสอาร์จีทำงานแล้วรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบแฟลทท็อป ดังนั้นเมื่อพิจารณาตัวแปรในสมการที่ (3.19) เมื่อทราบค่าตำแหน่งมุมนำกระแสที่เหมาะสม $(\theta_{on,opt})$ และค่าที่เหมาะสมของ x หรือ x_{opt} แล้วทำให้เราสามารถหาค่าของมุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม $(\theta_{off,opt})$ ได้

3.2.1 กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็ก สำหรับมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์นั้นมีความอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กสูงดังนั้นในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ผ่านวงจรสมมูลทางแม่เหล็กจึงเป็นเรื่องยาก ดังนั้นในงานวิจัยส่วนใหญ่จะวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ผ่านกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กแทน วิธีการได้มาของกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น ได้มาจากการทดลองซึ่งวิธีนี้ให้ความแม่นยำสูงแต่เป็นเรื่องยุ่งยากที่จะต้องเตรียมชุดทดลองและเครื่องมือสำหรับวัดค่า หรือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างมาจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [2],[7] ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่ามีความเที่ยงตรงสูงแต่ข้อมูลถูกเก็บในรูปแบบของตารางและมีจำนวนมาก จำนวนข้อมูลที่มีมากและอยู่ในรูปแบบของตารางนี้เป็นอุปสรรคสำหรับการนำมาวิเคราะห์หาสมการของกระแสเฟส บทความวิจัย [6],[12] ได้แสดงให้เห็นถึงผลสำเร็จในการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กอย่างง่ายซึ่งได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความถูกต้องโดยไม่จำเป็นต้องรู้ข้อมูลทางแม่เหล็กของเครื่องจักรกลไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่งตรงขั้ว และไม่ตรงขั้ว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กได้ถูกบรรยายในบทความวิจัย [6], [12] ซึ่งเป็นแบบไม่เชิงเส้นได้แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ โดยแบบจำลองนี้ต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ของกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กที่ตำแหน่งตรงขั้ว (aligned position : θ_a) และที่ตำแหน่งไม่ตรงขั้ว (aligned position : θ_u) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของกราฟที่ตำแหน่งไม่ตรงขั้วของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่สัมพันธ์กับกระแสเฟส (i) ณ ตำแหน่งโรเตอร์ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและที่ตำแหน่งนี้ค่าความต้านทานเฟส (L_u) มีค่าต่ำสุด สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.20)

$$\psi_u(i) = L_u \cdot i \tag{3.20}$$

ส่วนกราฟที่ตำแหน่งไม่ตรงขั้วในรูปที่ 3.9 นั้นความต้านทานของวงจรแม่เหล็กมีค่าต่ำสุดและช่องอากาศมีค่าน้อยที่สุดส่งผลให้ความต้านทานเฟสที่ตำแหน่งตรงขั้ว (L_a) มีค่าสูงสุด และเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่สัมพันธ์กับกระแสเฟส ณ ตำแหน่งโรเตอร์ จะมีลักษณะไม่เชิงเส้น โดยกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กนี้ประกอบไปด้วยเส้นกราฟ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นเส้นตรงเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งเริ่มต้น O ถึงตำแหน่ง S และส่วนที่สองคือเส้นกราฟที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่ง S ถึงตำแหน่ง M โดยที่ตำแหน่ง S เป็นตำแหน่งที่กราฟเกิดการโค้งซึ่งกระแสที่ตำแหน่งนี้ถูกกำหนดให้เป็น i_S ส่วนที่ตำแหน่ง M คือตำแหน่งที่กระแสเฟสสูงสุดที่ตำแหน่งตรงขั้วซึ่งกระแสที่ตำแหน่งนี้ถูกกำหนดให้เป็น i_M ดังนั้นสมการเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่งตรงขั้วสามารถหาได้ดังนี้

$$\psi_a(i) = L_a \cdot i, \quad i \le i \tag{3.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi_a(i) = \psi_{S0} + \sqrt{4a(i - i_S)}, \quad i > i_S \tag{3.22}$$

โดยที่ $i_{S0} = i_S - \dfrac{a}{L_a^{\ 2}}$

$\psi_{S0} = \psi_S - \dfrac{2a}{L_a}$

$a = \dfrac{\psi_{MS}^2}{4(i_{MS} - \dfrac{\psi_{MS}}{L_a})}$

$\psi_{MS} = \psi_M - \psi_S$

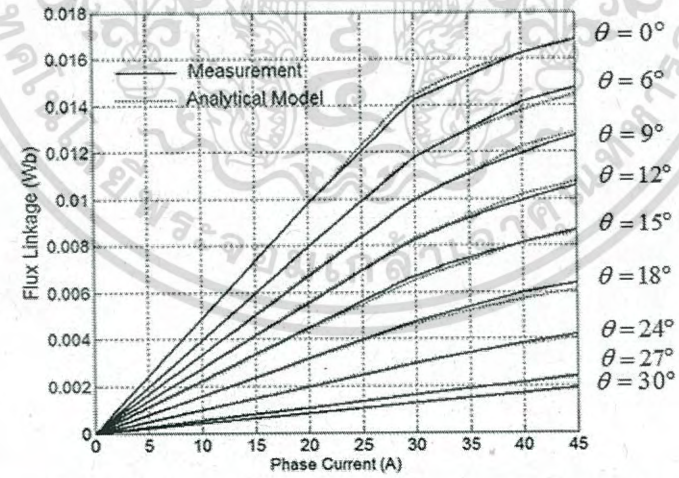
$i_{MS} = i_M - i_S$

ความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องกับกระแสเฟส ณ ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.23)

$$\psi(i,\theta) = \frac{1}{2}\left[\psi_a(i) - \psi_u(i)\right]\left[\cos(N_r(\theta + \frac{2\pi}{N_r})) + 1\right] + \psi_u(i) \tag{3.23}$$

โดยที่ N_r คือจำนวนขั้วของโรเตอร์

θ คือตำแหน่งมุมของโรเตอร์ซึ่งอยู่ในรูปของเรเดียน



รูปที่ 3.10 กราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากการทดลอง

รูปที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบกราฟคุณสมบัติเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.23) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในบทความวิจัย [6],[12] ให้ผลมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ

ข้อมูลที่ใช้สำหรับคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.23) ดังนี้

$\psi_M = 0.017\,Wb, \quad \psi_S = 0.0125\,Wb, \quad i_M = 45\,A, \quad i_S = 25\,A, \quad L_a = 490\,\mu H, \quad L_u = 40\mu H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 สมการกระแสเฟสสามารถหาได้โดยแทนสมการที่ (3.23) ลงในสมการ (3.15) ทำให้สามารถหาสมการของกระแสเฟสได้ดังนี้

$$i=\begin{cases}\dfrac{2c}{L_a(k+1)+L_u(1-k)}, & i\le i_S\\ \left(-B+\sqrt{B^2-4AC}\right)/2A, & i>i_S\end{cases} \tag{3.24}$$

โดยที่ $k=\cos\left(N_r(\theta+\dfrac{2\pi}{N_r})\right)$

$$c=\begin{cases}\dfrac{u}{\omega}\cdot(\theta-\theta_{on}) & ,\theta_{on}<\theta\le\theta_{off}\\ \dfrac{u}{\omega}\cdot(2\theta_{off}-\theta_{on}-\theta) & ,\theta_{off}<\theta\le\theta_{ext}\\ 0 & , else\end{cases}$$

$$A=\left(\frac{L_u{}^2(k-1)^2}{4a(k+1)^2}\right)$$

$$B=\left(\frac{4L_u\cdot c(k-1)+2\psi_{S0}\cdot L_u(1-k^2)}{4a(k+1)^2}-1\right)$$

$$C=\left(\frac{\psi_{S0}{}^2(k+1)^2-4\psi_{S0}\cdot c(k+1)+4c^2}{4a(k+1)^2}+i_{S0}\right)$$

3.2.3 วิธีการหามุมกระตุ้นที่เหมาะสม โดยวิเคราะห์จากรูปร่างของกระแสเฟสซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันดีซีบัส ความเร็ว และมุมกระตุ้น ค่าของกระแสเฟสสูงสุด (i_{peak}) จะเกิดอยู่ที่ตำแหน่ง θ_{peak} ซึ่งอยู่ในช่วงตำแหน่ง θ_{off} ถึง θ_{ext} จากสมการที่ (3.24) สามารถหาค่ากระแสเฟสสูงสุดได้ดังนี้

$$\left.\frac{di}{d\theta}\right|_{\theta_{peak}}=0 \quad ,\theta_{off}<\theta\le\theta_{ext}$$

$$i_{peak}=\begin{cases}\dfrac{u}{\omega}\cdot\left[\dfrac{2}{N_r\cdot\sin\left[N_r(\theta_{peak}+\dfrac{2\pi}{N_r})\right]\cdot\left[L_a-L_u\right]}\right] & ,i\le i_S\\ \dfrac{\left[\dfrac{u}{\omega}\cdot\left(\dfrac{N_r}{2}\cdot\sin\left[N_r(\theta_{peak}+\dfrac{2\pi}{N_r})\right]\right)^{-1}+L_u i_{S0}-\psi_{S0}\right]^2}{4a}+i_{S0} & ,i>i_S\end{cases} \tag{3.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ y คืออัตราส่วนของแรงดันดีซีบัสและความเร็วโรเตอร์ เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.25) ฟังก์ชัน $\sin\left[N_r\left(\theta_{peak}+\frac{2\pi}{N_r}\right)\right]$ มีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 1 ดังนั้นค่าสูงสุดของ y สามารถหาได้ดังนี้

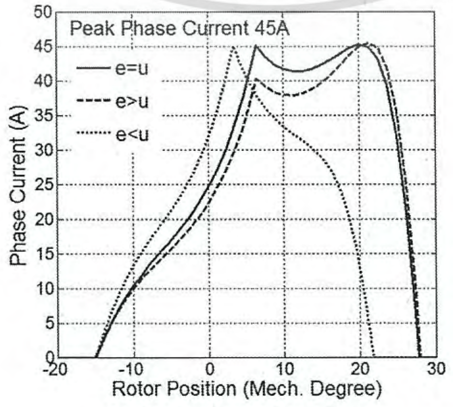
$$\left.\frac{u}{\omega}\right|_{max} = y_{opt} = \begin{cases} \dfrac{(N_r\cdot[L_a-L_u]\cdot i_{peak})}{2} & ,i \le i_S \\ \dfrac{N_r}{2}\left(\sqrt{4a\cdot(i_{peak}-i_{S0})}-L_u i_{S0}+\psi_{S0}\right) & ,i > i_S \end{cases} \tag{3.26}$$

จากสมการที่ (3.26) เมื่อควบคุม $i_{peak}=45A$ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้ $a=3.128\times10^{-6}, \psi_{S0}=-0.007766, i_{S0}=-3.026$ และ $L_u=40\times10^{-6}$ ซึ่งทำให้ได้ค่าของ $y_{opt}=0.042$ ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดค่า y ที่ใช้ในการวิเคราะห์จำนวน 3 กรณี โดยกระแสเฟสสูงสุดถูกควบคุมขนาดให้ได้ 45A โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟสสูงสุด 45A

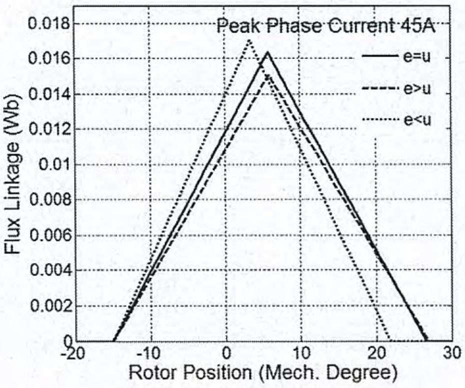
$y=u/\omega$	$u\ (V)$	$\omega\ (rad/S)$	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)
0.048 $(e<u)$	27	558	-15	4.40
0.042 $(e=u)$	27	642	-15	6.34
0.038 $(e>u)$	27	717	-15	6.75

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 กรณี โดยรูปร่างของกระแสเฟสดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) ส่วนในรูปที่ 3.11(ข) แสดงเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง และในรูปที่ 3.11(ค) แสดงวงรอบปิดของการแปลงผันพลังงาน และเมื่อพิจารณารอบวงปิดการแปลงผันพลังงานในรูปที่ 3.11(ค) จะพบว่ากรณีของแรงดันดีซีบัสสมดุลกับแรงดันต้านกลับ $(e=u)$ จะให้ค่าการแปลงผันพลังงานสูงสุด

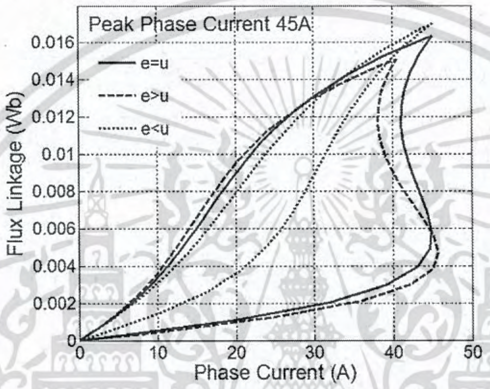


(ก) รูปร่างกระแสเฟสทั้ง 3 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รูปร่างของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องทั้ง 3 กรณี



(ค) วงรอบปิดของการแปลงผันพลังงานทั้ง 3 กรณี

รูปที่ 3.11 รูปร่างสัญญาณในโหมดการทำงานแบบกระแสพัลส์

รูปที่ 3.11(ค) แสดงวงรอบปิดของการแปลงผันกำลังงานที่เกิดขึ้นทั้ง 3 กรณี 1) ค่า $y = 0.038$ หรือ $y < y_{opt}$ 2) ค่า $y = 0.042$ หรือ $y = y_{opt}$ และ3) $y = 0.048$ หรือ $y > y_{opt}$ ผลจากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 3.2 ซึ่งในกรณีที่ $y = 0.048$ หรือ $y > y_{opt}$ ค่าแรงดันต้านกลับมีค่าน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส ค่าของกระแสที่เกิดขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสจะมีขนาดลดลง ในกรณีที่ $y = 0.042$ หรือ $y = y_{opt}$ ค่าแรงดันต้านกลับและค่าของแรงดันดีซีบัสสมดุลกัน ค่าของกระแสที่เกิดขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสจะมีขนาดคงที่จนถึงตำแหน่งมุมที่ทำให้เกิดค่ากระแสเฟสสูงสุด และกรณีที่ $y = 0.038$ หรือ $y < y_{opt}$ ค่าแรงดันต้านกลับมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีบัส ค่าของกระแสที่เกิดขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสจะมีขนาดเพิ่มขึ้น

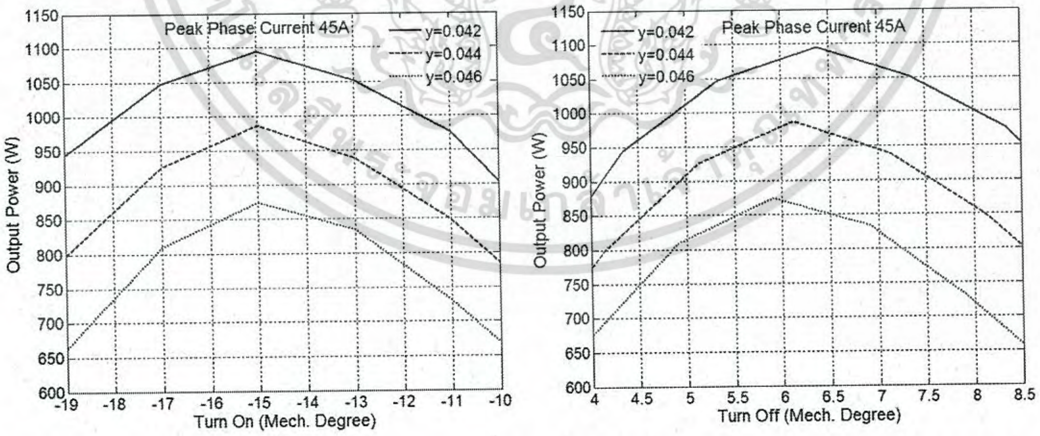
สำหรับกำลังไฟฟ้าด้านออก(เฟสเดียว) ของเอสอาร์จีทั้ง 3 กรณีที่แสดงในตารางที่ 3.3 กรณีที่ $y = 0.048$ กำลังไฟฟ้าด้านออกมีค่า 142.53W ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด กรณีที่ $y = 0.038$ กำลังไฟฟ้าทางด้านออกมีค่า 219.75W และในกรณีที่ $y = 0.042$ กำลังไฟฟ้าทางด้านออกมีค่า 275.02W ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้การควบคุมมุมกระตุ้นของเอสอาร์จีที่เหมาะสมนั้นรูปร่างของกระแสที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกับกรณีของ $y = 0.042$ ซึ่งรูปร่างของกระแสเฟสมีลักษณะแบบแฟลททอป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้ง 3 กรณี (เฟสเดียว) เมื่อควบคุม $i_{peak} = 45A$

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์		
$u\ (V)$	27	27	27
$\omega\ (rad/s)$	558	642	717
$y = \frac{u}{\omega}$	0.048	0.042	0.038
$I_{in} = \frac{1}{2\pi}\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} id\theta\ (A)$	6.33	6.58	6.72
$I_{out} = \frac{1}{2\pi}\int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} id\theta\ (A)$	11.609	16.766	14.859
$I_o = I_{out} - I_{in}\ (A)$	5.279	10.186	8.139
$P_{out} = I_o \cdot u\ (W)$	142.53	275.02	219.75
$\theta_{on}\ (°)$	-15	-15	-15
$\theta_{off}\ (°)$	4.40	6.34	6.75

รูปที่ 3.12 แสดงผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกำลังไฟฟ้าด้านออกเปรียบเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ 3 กรณีคือ 1) $y = 0.042$ 2) $y = 0.044$ และ3) $y = 0.046$ กำหนดค่าแรงดันดีซีบัสคงที่ 27V ทุกกรณี มุมกระตุ้นจะถูกปรับเปลี่ยนไปที่ตำแหน่งๆต่างๆเพื่อให้ได้ค่าสูงสุดของกระแสเฟสอยู่ที่ 45A



(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ (ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

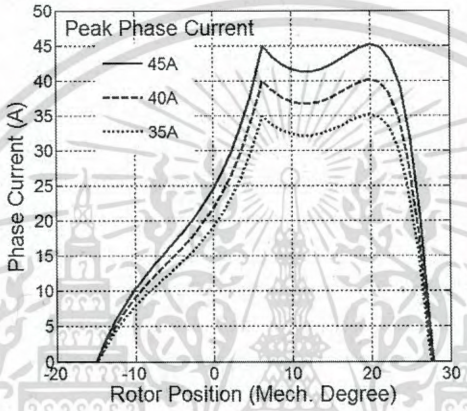
รูปที่ 3.12 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ของ y ทั้ง 3 กรณี เมื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุดที่ 45A

รูปที่ 3.12(ก) แสดงค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมนำกระแสที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าทุกกรณีของการเกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตำแหน่งมุมนำกระแสอยู่ที่ -15° ดังนั้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้กำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งมุมนำกระแสที่เหมาะสม ($\theta_{on,opt}$) สำหรับในรูปที่ 3.12 (ข) แสดงผลของค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมหยุดนำกระแส ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม ($\theta_{off,opt}$) ขึ้นอยู่กับตัวแปรสำหรับควบคุม คือความเร็ว (ω) และแรงดันดีซีบัส (u)

การหาค่ามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสมสามารถหาได้โดยแทนค่า x_{opt} และ θ_{peak} แทนลงในสมการที่ (3.19) โดยค่าของ θ_{peak} หาได้จากสมการที่ (3.25) และเมื่อพิจารณาค่า x ที่ได้จากสมการที่ (3.18) พบว่าค่าของ x มีค่าเท่ากันทั้ง 3 กรณีซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.266 ดังนั้นค่านี้จึงเป็นค่าที่เหมาะสมของ x_{opt}



รูปที่ 3.13 รูปร่างของกระแสเฟสสูงสุดที่ 35A 40A และ 45A เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุม ด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม

ผลจำลองการทำงานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมในโหมดกระแสพัลส์ เมื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุดที่ 35A 40A และ 45A ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมเอสอาร์จีดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมเอสอาร์จีทั้ง 3 กรณี

u (V)	ω (rad/s)	i_{peak} (A)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	θ_{peak} (°)	θ_{ext} (°)	$x=\frac{\theta_{ext}-\theta_{peak}}{\theta_{off}-\theta_{on}}$
27	642	45	-15	6.34	22	27.68	0.266
27	692	40	-15	6.30	21.93	27.60	0.266
27	757	35	-15	6.26	21.86	27.52	0.266

ดังนั้นสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม สามารถหาได้ตามกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยค่าตำแหน่งที่เหมาะสมของมุมนำกระแส และ x คือ -15° และ 0.266 ตามลำดับ โดยมีค่าของแรงดันดีซีบัส และความเร็วของโรเตอร์เป็นตัวแปรเริ่มต้นในการวิเคราะห์

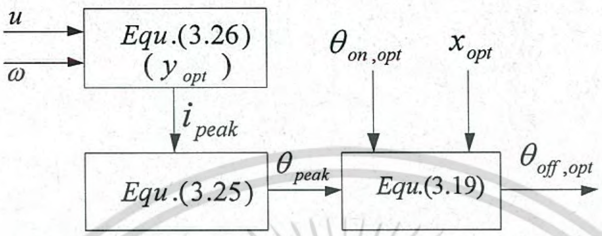
จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.14 การหาค่ามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสมมีหลักการ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. รับค่าแรงดันดีซีบัส และความเร็วโรเตอร์เพื่อคำนวณหาค่ากระแสสูงสุดโดยใช้สมการที่ (3.26)

2. เมื่อทราบค่ากระแสสูงสุดแล้ว ทำให้สามารถทราบตำแหน่งมุมที่เกิดกระแสสูงสุดได้จากการคำนวณในสมการที่ (3.25)

3. เมื่อทราบค่า ตำแหน่งมุมที่เกิดกระแสสูงสุด ตำแหน่งมุมนำกระแสที่เหมาะสม และค่าที่เหมาะสมของ x แล้ว ทำให้สามารถคำนวณมุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสมได้จากสมการที่ (3.19)



รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมสำหรับหาค่ามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม

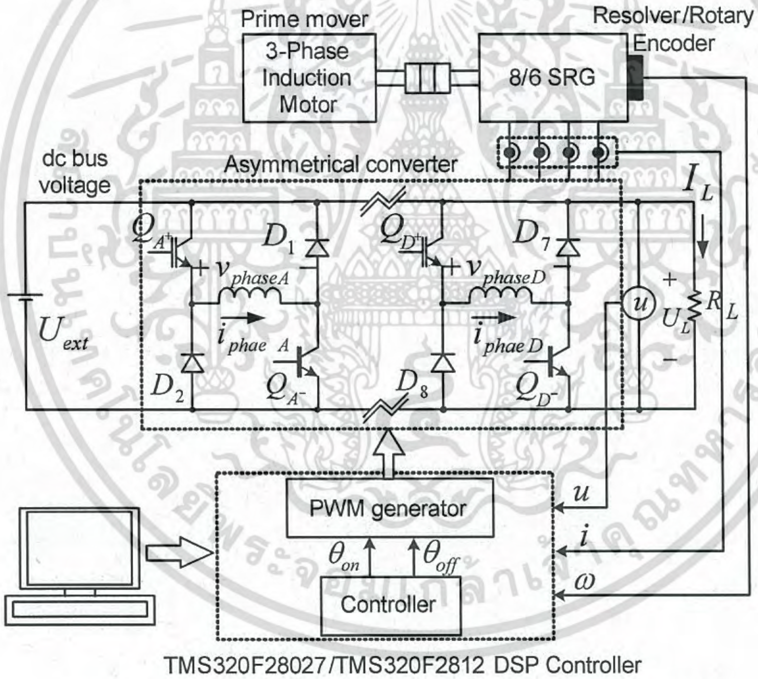
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ระบบควบคุมมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

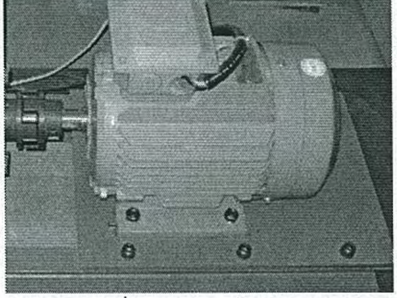
ระบบควบคุมการทำงานของเอสอาร์จีมีโครงสร้างหลักของระบบควบคุมประกอบไปด้วย ชุดขับต้นกำลัง (Prime mover) โดยในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำเป็นชุดขับต้นกำลัง และวงจรแปลงผันกำลังแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Converter) ซึ่งมีตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Signal Processing Controller) เป็นตัวควบคุมการทำงานของเอสอาร์จี

4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมการทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โครงสร้างของระบบควบคุมการทำงานของเอสอาร์จีสำหรับหามุมกระตุ้นที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



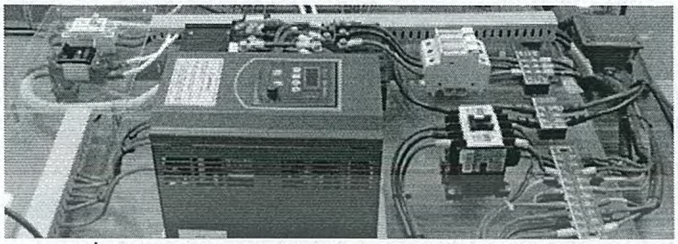
รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมการทำงานของเอสอาร์จี



รูปที่ 4.2 มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส (รุ่น M2QA112M2A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส (3-Phase Induction Motor) พิกัด 4kW 2 ขั้วแม่เหล็ก ความเร็วพิกัดอยู่ที่ 3,000 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส พิกัด 5.5HP พิกัดกระแส 11A เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งสามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 0-200Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.3



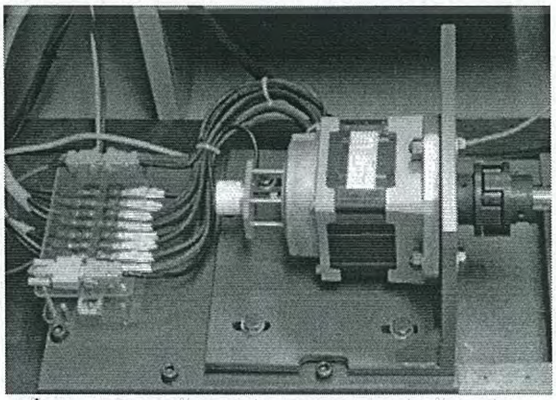
รูปที่ 4.3 อินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส (รุ่น ND1-4-5A5)

4.1.2 มอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์แบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ พิกัด 2.23kW พิกัดแรงดัน 48V พิกัดความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ชนิดนี้มีขดลวดเฟสทั้ง 4 เฟส (เฟส A เฟส B เฟส C และเฟส D) มีตัวตรวจวัดเฟสทั้ง 4 เฟส คือ Z_1 Z_2 Z_3 และ Z_4 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และในรูปที่ 4.6 คือกราฟความสัมพันธ์ของตำแหน่งตัวตรวจวัดเฟสและขดลวดทั้ง 4 เฟส เมื่อมอเตอร์มีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา จำนวนจังหวะกระตุ้นในแต่ละรอบ (Number of Strokes per Revolution : N_{stroke}) สามารถหาได้จากสมการที่ (4.1) และมุมของจังหวะกระตุ้น (Stroke Angle) ในแต่ละครั้ง สามารถหาได้จากสมการที่ (4.2)

$$N_{stroke} = N_{ph} \cdot N_r \tag{4.1}$$

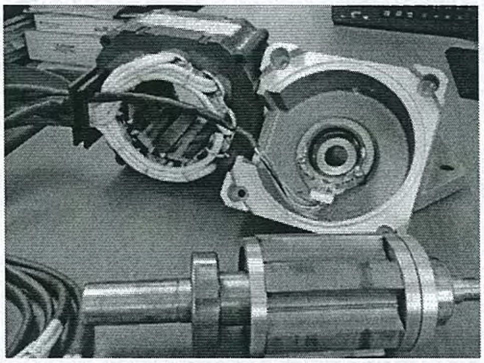
$$Stroke\ Angle = \frac{2\pi}{N_{ph} \cdot N_r} \tag{4.2}$$

โดยที่ N_{ph} คือจำนวนเฟส และ N_r คือจำนวนขั้วของโรเตอร์ ดังนั้นจำนวนจังหวะกระตุ้นในแต่ละรอบของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้ คือ 24 จังหวะและมุมของจังหวะกระตุ้น (Stroke Angle) ในแต่ละครั้งคือ 15 องศา โดยมีมุมระหว่างตำแหน่งตรงขั้วที่ติดกันเท่ากับ 60 องศา

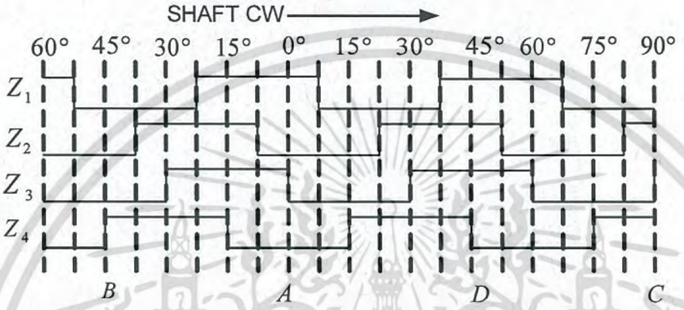


รูปที่ 4.4 มอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ (แบบ RA16587)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง... ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

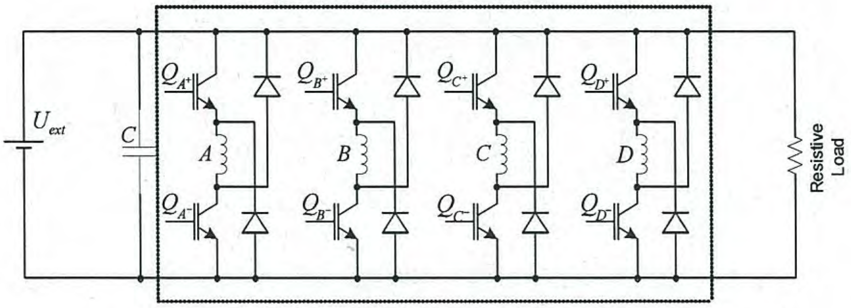


รูปที่ 4.5 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ (แบบ RA16587)



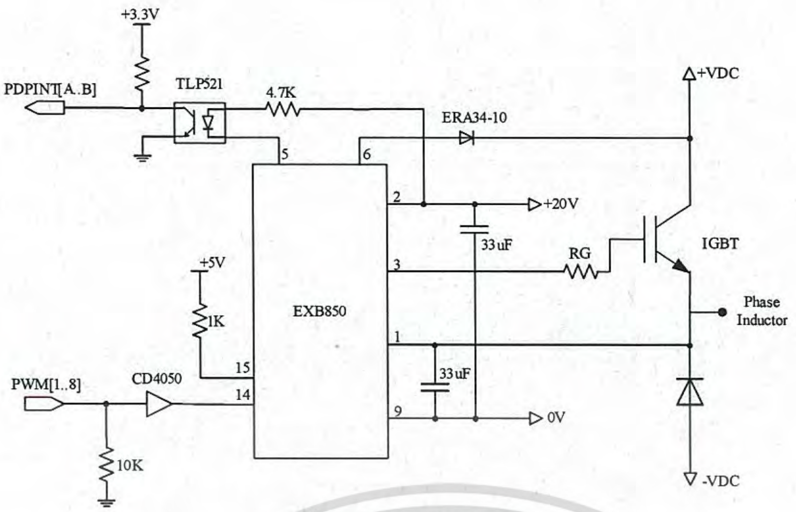
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของตำแหน่งตัวตรวจวัดเฟสและขดลวดทั้ง 4 เฟส

วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์เป็นแบบสองสวิทช์ต่อเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งวงจรนี้สามารถสร้างแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟสได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ งานวิจัยนี้ใช้ IGBT Module เบอร์ CM200DY-12NF ซึ่งมีพิกัดกระแส 200A และแรงดันพิกัดที่ 600V โดยวงจรขับนำเกท IGBT Module ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งใช้ตัวขับเกทเบอร์ EXB850 โดยสามารถขับ IGBT Module ที่พิกัดกระแสสูงสุด 150A พิกัดแรงดัน 600V และนอกจากนี้ยังมีวงจรป้องกันกระแสเกิน (Over Current Detection) อยู่ภายในตัวโดยสัญญาณป้องกันนี้จะถูกส่งไปประมวลผลที่ขา PDPINTA สำหรับ PWM1-6 และ PDPINTB สำหรับ PWM7 และ PWM8 ซึ่ง PDPINTA และ PDPINTB นี้จะเป็นการขัดจังหวะลำดับสูงสุดของตัวประมวลผลแบบดิจิทัล DSP เบอร์ TMS320F2812 เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับ IGBT Module วงจรขับนำเกทและวงจรป้องกันกระแสเกิน



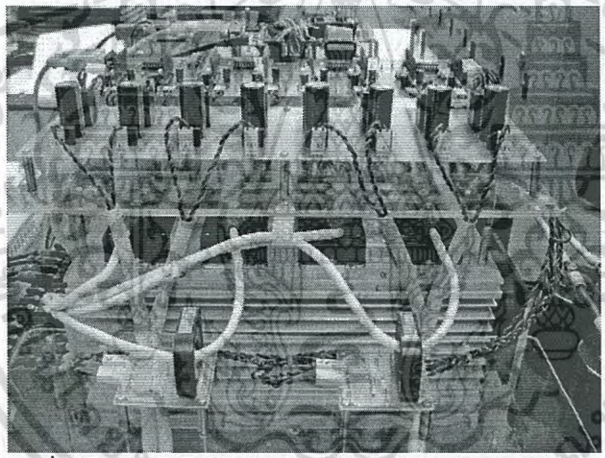
รูปที่ 4.7 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสองสวิทช์ต่อเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 วงจรขับนำเกท

รูปที่ 4.9 แสดงรูปวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสองสวิทช์ต่อเฟสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ และรูปวงจรขับนำเกท

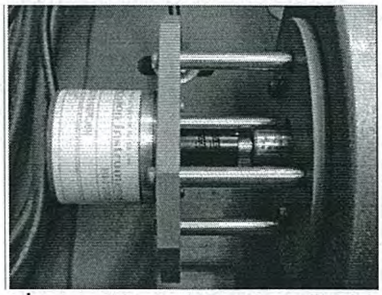


รูปที่ 4.9 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังและวงจรขับนำเกท

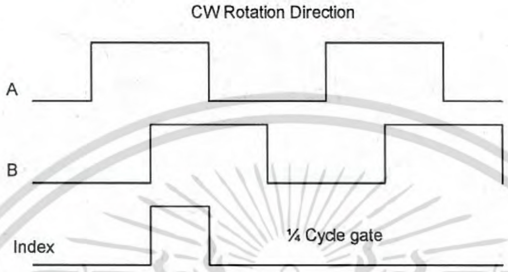
4.1.3 ตัวตรวจวัดตำแหน่งโรเตอร์ (Rotary Encoder) เป็นการตรวจจับตำแหน่งแบบ Incremental Encoder ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งการทำงานเมื่อหมุน 1 รอบจะมีสัญญาณพัลส์ออกมา 2 เฟส คือเฟส A และเฟส B โดยรูปร่างของสัญญาณทั้งสองเฟสจะต่างเฟสกัน 90 องศา ซึ่งแต่ละเฟสจะมีพัลส์ด้านออกจำนวน 3,600 พัลส์ และทุกๆรอบของการหมุนจะมีสัญญาณอ้างอิง (Index) จำนวน 1 พัลส์ โดยสัญญาณอ้างอิงนี้ถูกส่งให้ตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัลกำหนดเป็นตำแหน่งตรงขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับจำนวนพัลส์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับเฟสมอเตอร์ทั้ง 4 เฟส มีค่าเท่ากับ 14,400 พัลส์ และจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นระหว่างโรเตอร์มีค่าเท่ากับ 2,400 พัลส์

ในงานวิจัยนี้วงจรวัดความเร็วรอบใช้ไอซี Opto-coupler เบอร์ PC817 ในการแยกกราวด์และลดระดับแรงดันให้มีค่า 3.3V ซึ่งวงจรนี้ทำหน้าที่ในการแยกกราวด์ระหว่างตัวตรวจวัดตำแหน่งโรเตอร์กับพอร์ต QEP ของตัวประมวลผลแบบสัญญาณดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 4.12

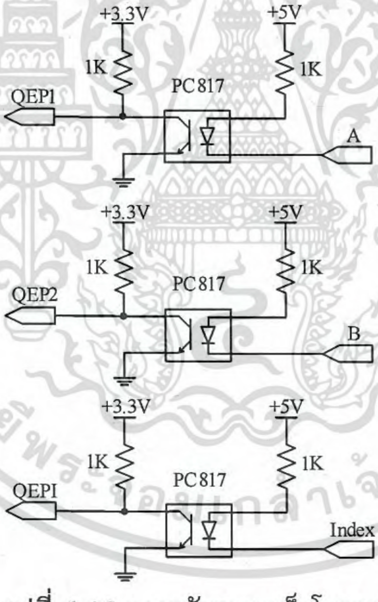
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ตัวตรวจวัดตำแหน่งโรเตอร์



รูปที่ 4.11 สัญญาณพัลส์ของตัวตรวจวัดตำแหน่งโรเตอร์



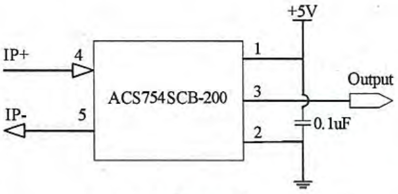
รูปที่ 4.12 วงจรวัดความเร็วโรเตอร์

4.1.4 ตัวตรวจวัดกระแส (Current Sensor) ทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสเฟสของมอเตอร์ทั้ง 4 เฟส โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจวัดกระแสแบบ Hall Effect Current Sensor เบอร์ ACS754SCB-200 ซึ่งสามารถวัดกระแสขนาดพิกัด 200A ดังแสดงในรูปที่ 4.13

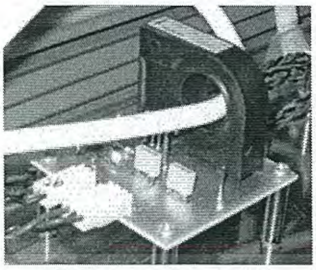
ตัวตรวจวัดกระแสให้สัญญาณด้านออกเป็นแรงดันสำหรับส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลแบบดิจิทัลแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล แต่เนื่องจากตัวประมวลผลสามารถรับแรงดันได้ไม่เกิน 3 โวลท์ ดังนั้นจำเป็นต้องควบคุมแรงดันของตัวตรวจวัดกระแสไม่ให้เกิน 3 โวลท์ โดยใช้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N5225B และตัดสัญญาณรบกวนออกโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Filter) ในรูปที่ 4.14 แสดงวงจรวัดกระแสเฟสของมอเตอร์ทั้ง 4 เฟส ซึ่งออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรคือ เบอร์ TL082 และซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N5225B

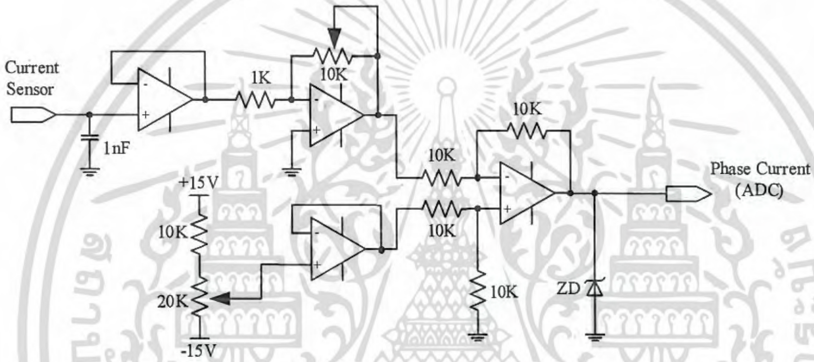


(ก) สัญลักษณ์



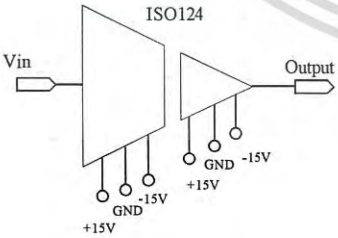
(ข) วงจรสำหรับใช้งาน

รูปที่ 4.13 ตัวตรวจวัดกระแส



รูปที่ 4.14 วงจรวัดกระแสเฟส

4.15 ตัวตรวจวัดแรงดัน (Voltage Sensor) ทำหน้าที่ตรวจวัดแรงดันดีซีบัสของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจวัดแรงดันเบอร์ ISO 124 สามารถวัดแรงดันได้สูงสุด 1,500V สัญญาณแรงดันด้านออกมีค่าอยู่ในช่วง $\pm$ 10V ดังแสดงในรูปที่ 4.15



(ก) สัญลักษณ์

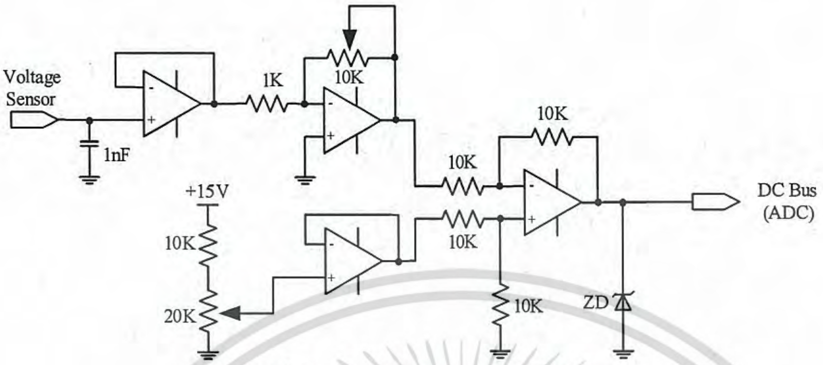
(ข) วงจรสำหรับใช้งาน

รูปที่ 4.15 ตัวตรวจวัดแรงดัน

ตัวตรวจวัดแรงดันให้สัญญาณด้านออกเป็นแรงดันสำหรับส่งสัญญาณให้ตัวประมวลผลแบบดิจิทัลแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) แต่เนื่องจากตัวประมวลผลสามารถรับแรงดันได้ไม่เกิน 3V ดังนั้นจำเป็นต้องควบคุมแรงดันของตัวตรวจวัดแรงดันไม่ให้เกิน 3V โดยใช้ซีเนอร์

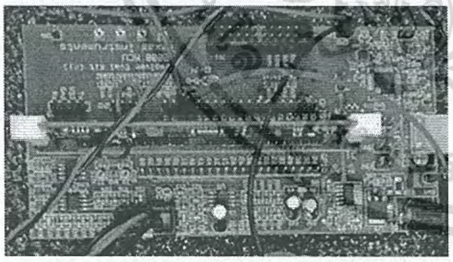
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอด เบอร์ 1N5225B และตัดสัญญาณรบกวนออกโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ในรูปที่ 4.16 แสดงวงจรวัดแรงดันดีซีบัสของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรคือ เบอร์ TL082 และซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N5225B

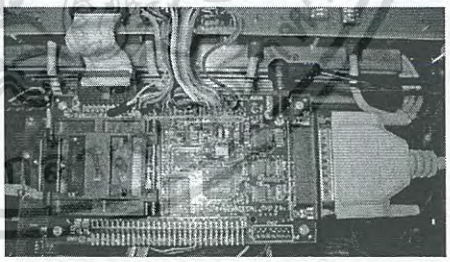


รูปที่ 4.16 วงจรวัดแรงดันดีซีบัส

4.16 ตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Signal Processing : DSP) ทำหน้าที่ประมวลผลและควบคุมการทำงานของเอสอาร์จี ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวประมวลผลแบบดิจิทัลแบบ 32 บิท เบอร์ TMS320F28027 ดังแสดงในรูปที่ 4.17(ก) และเบอร์ TMS320F2812 ซึ่งเบอร์นี้มีความเร็วมีในการประมวลผล 150MHz มีพอร์ตสำหรับรับสัญญาณจากตัวตรวจวัดตำแหน่งโรเตอร์แบบ Incremental Encoder จำนวน 2 ชุด และมีพอร์ตสำหรับแปลงสัญญาณแอนา ล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จำนวน 16 พอร์ต ดังแสดงในรูปที่ 4.17(ข) สำหรับวิจัยนี้การเขียนโปรแกรมจะเขียนผ่านโปรแกรม Code Composer Studio ซึ่งสามารถเขียนได้ทั้งภาษา C และภาษา Assembly ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ภาษา C เนื่องจากเป็นภาษาที่เข้าใจง่ายกว่าภาษา Assembly



(ก) เบอร์ TMS320F28027



(ข) เบอร์ TMS320F2812

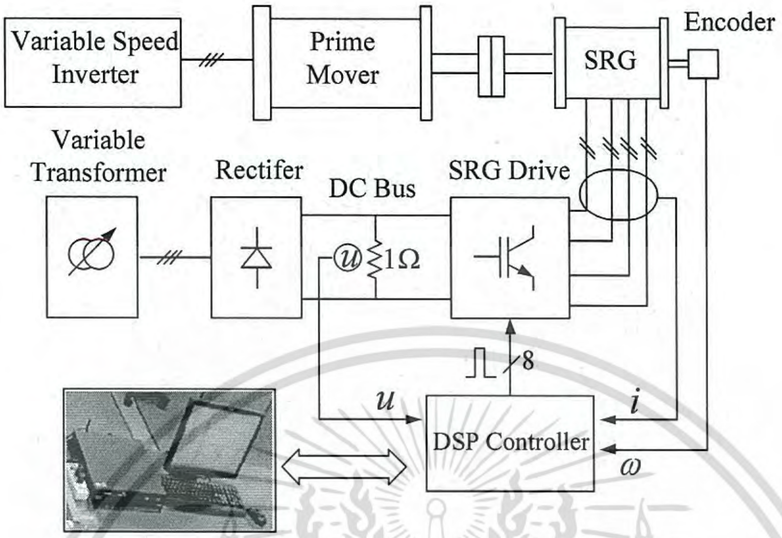
รูปที่ 4.17 ตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล 32 บิท

4.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์

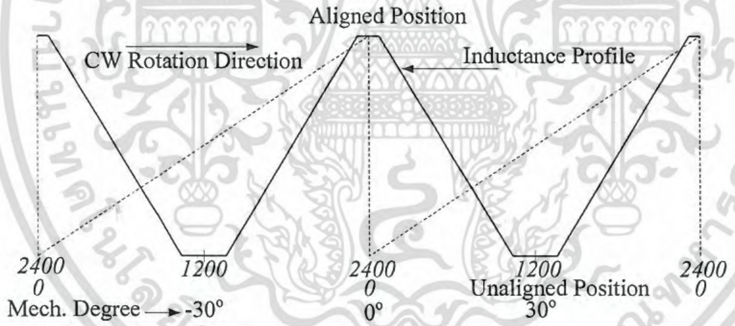
ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในรูปที่ 4.18 มีหน้าที่ประมวลผลสำหรับหาค่ามุมกระตุ้นที่เหมาะสมเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุดของเอสอาร์จี 4 เฟส (8/6) สำหรับการออกแบบโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์นั้นสิ่งสำคัญคือความถูกต้องของตำแหน่งมุมสำหรับกระตุ้นให้มอเตอร์ทำงาน ในรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์ที่ได้จากการนับของตัวตรวจวัดตำแหน่งโรเตอร์กับรูปร่างของค่าความเหนี่ยวนำเฟส ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

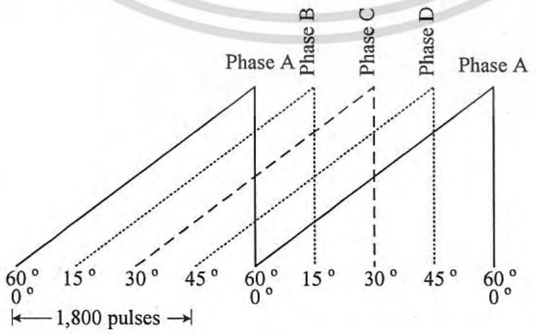
ความสัมพันธ์นี้จะถูกนำไปประมวลผลด้วยตัวประมวลผลแบบดิจิทัลสำหรับกำหนดตำแหน่งมุมสำหรับนำกระแส (θ_{on}) และตำแหน่งมุมสำหรับหยุดนำกระแส (θ_{off})



รูปที่ 4.18 บล็อกไดอะแกรมชุดทดลองของเอสอาร์จี เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุดของเอสอาร์จี 4 เฟส ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์จำนวนพัลส์ของตัวตรวจวัดตำแหน่งโรเตอร์กับรูปร่างของความเหนี่ยวนำ

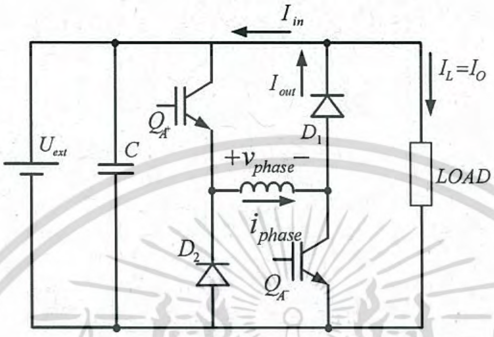


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของจำนวนพัลส์กับตำแหน่งของขดลวดเฟส

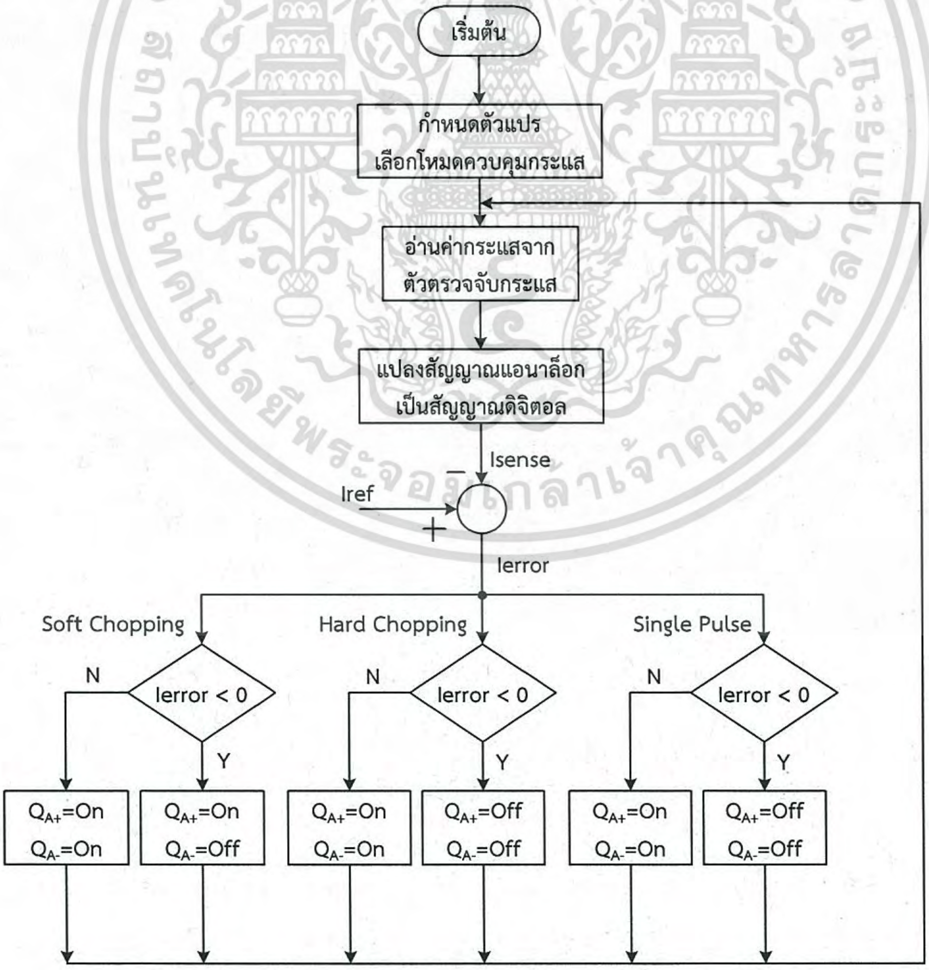
จากรูปที่ 4.19 เมื่อพิจารณาจะพบว่าจำนวนพัลส์ 40 ลูกมีค่าเทียบเท่ามุม 1 องศาทางกล และมุมของจังหวะกระตุ้น (Stroke Angle) ในแต่ละครั้งคือ 15 องศา มอเตอร์มีจำนวนเฟส 4 เฟส

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นมุมระหว่างตำแหน่งตรงขั้วของขดลวดเฟส A ที่ติดกันมีค่าความห่างเท่ากับ 60 องศา เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งตัวตรวจวัดเฟสและขดลวดทั้ง 4 เฟส ในการลำดับเฟสการหมุนของขดลวดจะลำดับจากเฟส A ไปเฟส D ไปเฟส C และไปเฟส B ตามลำดับ ในรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนพัลส์กับตำแหน่งของขดลวดเฟส ซึ่งจากรูปจะพบว่าขดลวดเฟส A อยู่ห่างจากขดลวดเฟส D เป็นมุม 45 องศาทางกล ดังนั้นจำนวนพัลส์มีค่าเท่ากับ 45x40=1,800 พัลส์



รูปที่ 4.21 วงจรคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

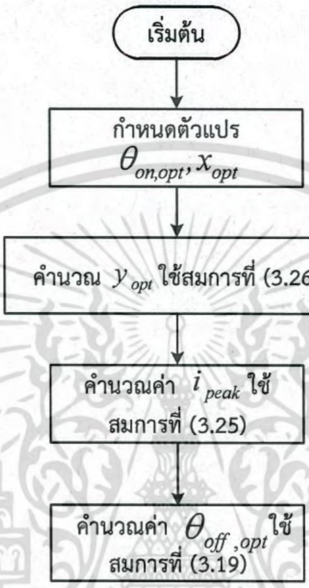


รูปที่ 4.22 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมกระแส 3 โหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโหมดการควบคุมกระแสแบ่งเป็น 3 โหมด คือแบบ Soft Chopping Hard Chopping และ Single Pulse ซึ่งทั้ง 3 แบบแตกต่างกันในเรื่องการควบคุมการสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่แสดงในรูปที่ 4.21 และในรูปที่ 4.22 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมสำหรับควบคุมกระแสในโหมด Soft Chopping Hard Chopping และ Single Pulse

สำหรับตำแหน่งมุมกระตุ้นที่เหมาะสมคำนวณได้ตามแผนผังดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยค่าตำแหน่งที่เหมาะสมของมุมนำกระแส $\theta_{on,opt}$ และ x คือ -15° และ 0.266 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 แผนผังการคำนวณสำหรับหาค่ามุมกระตุ้นที่เหมาะสม

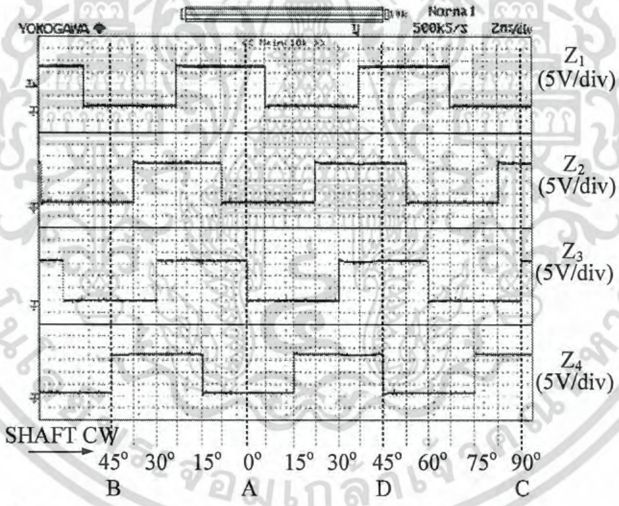
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลจำลองการทำงานและผลการทดลอง

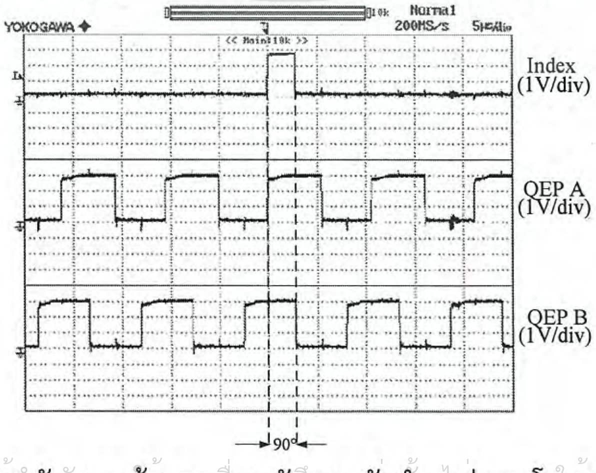
บทนี้นำเสนอผลของการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหามุมกระตุ้นที่เหมาะสมของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าสูงสุดเมื่อควบคุมการทำงานในโหมดกระแสพัลส์

5.1 ผลการทดลองวัดสัญญาณตำแหน่งของขดลวดเฟสทั้ง 4 เฟส และสัญญาณขับนำเกทของวงจรคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 5.1 แสดงผลการทดลองวัดสัญญาณตำแหน่งของขดลวดเฟส 4 เฟส (Z_1 Z_2 Z_3 และ Z_4) โดยในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์แบบ 4 เฟส 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ ดังนั้นจำนวนจังหวะกระตุ้นในแต่ละรอบของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 24 จังหวะและมุมของจังหวะกระตุ้น (Stroke Angle) ในแต่ละครั้งจะมีค่าเท่ากับ 15 องศา โดยมีมุมระหว่างตำแหน่งตรงขั้วที่ติดกันมีค่าเท่ากับ 60 องศาทางกล โดยในรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า Z_3 ถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งตรงขั้วของขดลวดเฟส A



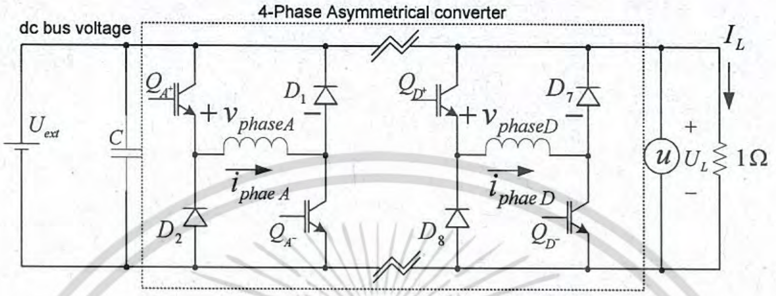
รูปที่ 5.1 สัญญาณตรวจวัดตำแหน่งขดลวดเฟสทั้ง 4 เฟส



รูปที่ 5.2 สัญญาณด้านออกของตัวตรวจวัดตำแหน่งของโรเตอร์

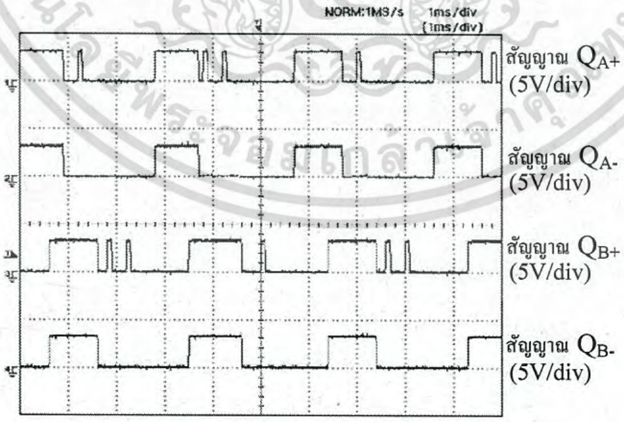
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ... ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 แสดงผลการทดลองวัดสัญญาณตัวตรวจวัดตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งเป็นการตรวจวัดตำแหน่งเมื่อหมุน 1 รอบ จะมีสัญญาณพัลส์ออกมา 2 เฟส คือ QEP A และ QEP B โดยรูปร่างของสัญญาณทั้งสองเฟสจะต่างเฟสกัน 90 องศา และทุกๆ รอบของการหมุนจะมีสัญญาณอ้างอิง (Index) จำนวน 1 พัลส์ โดยสัญญาณ Index นี้จะถูกนำไปใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของสวิทช์ในสภาวะนำกระแส (Turn-on) หรือหยุดนำกระแส (Turn-off) ของวงจรคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.3 วงจรคอนเวอร์เตอร์

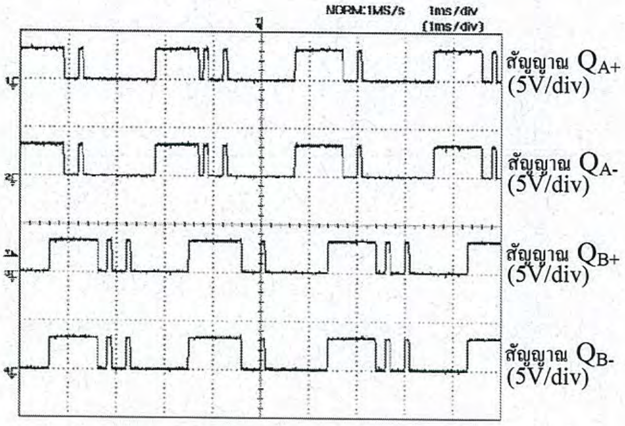
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิทช์ต่อเฟส โดยมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ 4 เฟส (เฟส A B C และ D) โดยมีสัญญาณสำหรับขับนำเกทให้สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (IGBT) จำนวน 4 ชุด คือ Q_A Q_B Q_C และ Q_D สัญญาณเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นมาจากตัวประมวลผลแบบดิจิทัลซึ่งสอดคล้องกับมุมสำหรับการนำกระแส (θ_{on}) และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) เมื่อความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำ จะส่งผลให้แรงดันต้านกลับมีค่าต่ำทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดเฟสมีค่าสูงเพื่อป้องกันความเสียหายต่อตัวมอเตอร์และระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสเฟสจะถูกควบคุมอยู่ระหว่างค่าต่ำสุด $(i_{\min})$ และค่าสูงสุด $(i_{\max})$ ตามการควบคุมแรงดันเฟส



รูปที่ 5.4 สัญญาณขับนำเกทโหมดการควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping

ในรูปที่ 5.4 แสดงผลการทดลองวัดรูปคลื่นสัญญาณขับนำเกทเมื่อควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping ที่ขดลวดเฟส A และเฟส B โดยเมื่อกระแสเฟสมีค่าระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด Q_{A+} Q_{A-} และ Q_{B+} Q_{B-} นำกระแส เมื่อกระแสเฟสมีค่าสูงกว่าระดับค่าสูงสุด Q_{A+} และ Q_{B+} นำกระแส แต่ Q_{A-} และ Q_{B-} หยุดนำกระแส

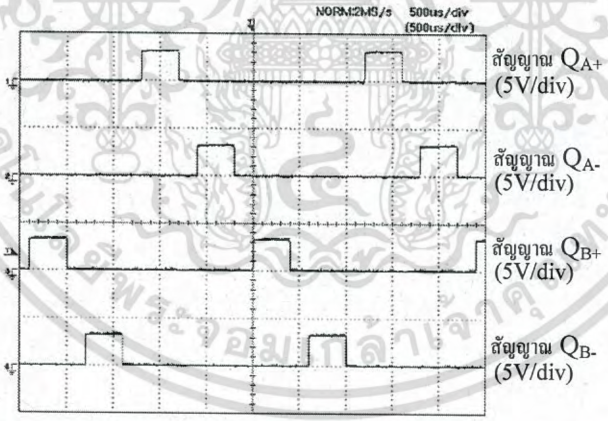
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สัญญาณขับนำเกทโหมดการควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping

ในรูปที่ 5.5 แสดงผลการทดลองวัดสัญญาณขับนำเกทเมื่อควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping ที่ขดลวดเฟส A และเฟส B โดยเมื่อกระแสเฟสมีค่าระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด Q_{A+} Q_{A-} และ Q_{B+} Q_{B-} นำกระแส เมื่อกระแสเฟสมีค่าสูงกว่าระดับค่าสูงสุด Q_{A+} Q_{A-} และ Q_{B+} Q_{B-} หยุดนำกระแส

เมื่อความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูง จะส่งผลให้แรงดันต้านกลับมีค่าสูงทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดเฟสมีค่าลดต่ำลง ดังนั้นการควบคุมกระแสแบบนี้จะเป็นลักษณะรูปคลื่นพัลส์หนึ่งลูกคลื่นดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงผลการทดลองวัดสัญญาณขับนำเกทเมื่อควบคุมแบบกระแสพัลส์ (Single Pulse) ที่ขดลวดเฟส A เฟส B เฟส C และเฟส D



รูปที่ 5.6 สัญญาณขับนำเกทโหมดการควบคุมกระแสแบบ Single Pulse

5.2 การทดลองควบคุมมุมกระตุ้นที่เหมาะสม เพื่อให้กระแสเฟสของเอสอาร์จีมีรูปร่างแบบแฟลทท็อป

ชุดทดลองสำหรับวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมสำหรับหามุมกระตุ้นที่เหมาะสม เพื่อให้กระแสเฟสของเอสอาร์จีมีรูปร่างแบบแฟลทท็อป ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ประกอบด้วย

(a) เอสอาร์จี 4 เฟส แบบ 8 ขั้วสเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ ติดตั้งตัวรีโซลเวอร์สำหรับวัดตำแหน่งโรเตอร์

(b) มอเตอร์ 3 เฟส แบบเหนี่ยวนำ ใช้ตัวขับต้นกำลังทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

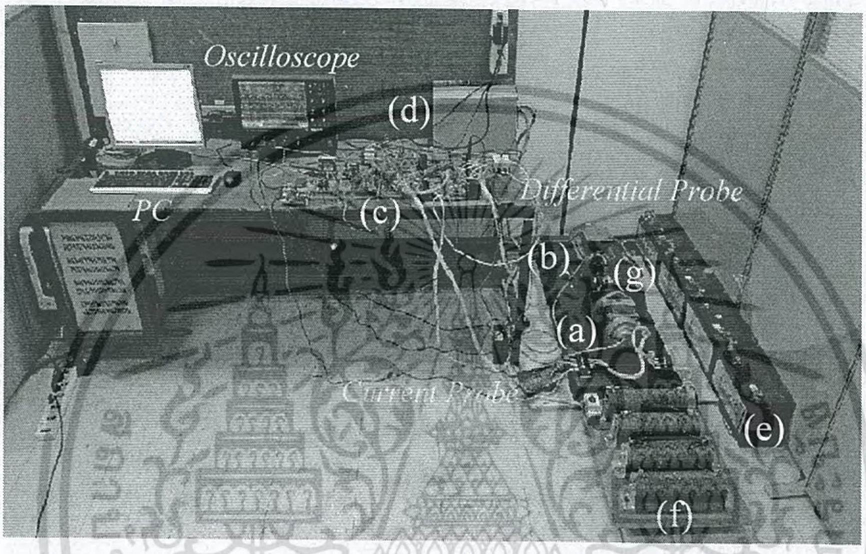
(c) วงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิด 4 เฟส แบบบริดจ์ไม่สมมาตร และตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล TMS320F28027

(d) อินเวอร์เตอร์ ใช้สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบหนี่ยวนำโดยวิธีการปรับความถี่

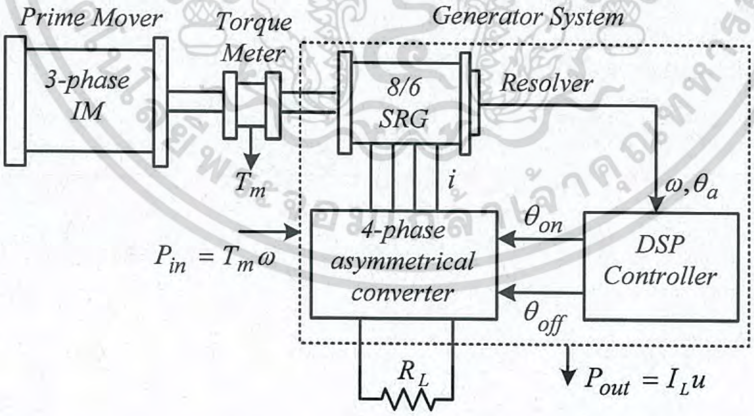
(e) แบตเตอรี่ 12V 120A ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันดีซีบัสให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์

(f) โหลดชนิดความต้านทาน มีค่า 1.25 โอห์ม

(g) เครื่องมือวัดแรงบิดของมอเตอร์ (Torque meter)



รูปที่ 5.7 ชุดทดลองการทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์



รูปที่ 5.8 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมการทำงานของเอสอาร์จี สำหรับวิเคราะห์ตัวแปรควบคุม

ในรูปที่ 5.8 การทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือการเปลี่ยนพลังงานกลจากตัวขับต้นกำลัง (Prime Mover) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อเอสอาร์จีหมุนตัวตรวจวัดตำแหน่งจะส่งสัญญาณอ้างอิงไปที่ตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล (DSP Controller) สำหรับประมวลผลตามคำสั่งการเลือกมุมนำกระแส (θ_{on}) และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) เพื่อควบคุมการทำงานของสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 4 เฟส แบบบริดจ์ไม่สมมาตร สำหรับการวัดกำลังทางกลด้านเข้า (P_{in})

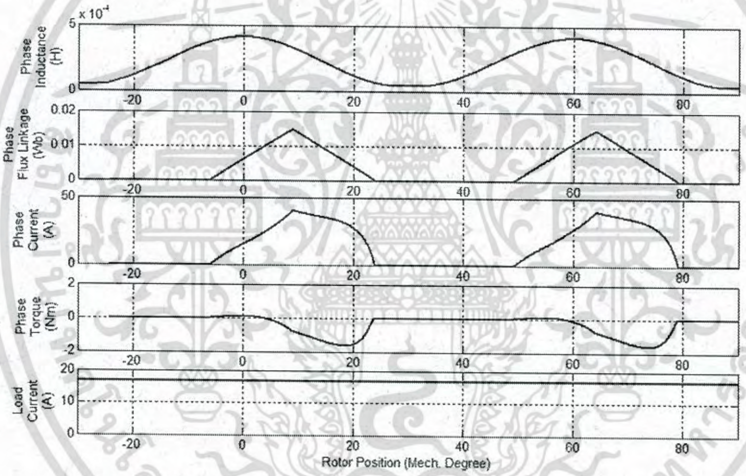
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาได้จากแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องวัด (T_m) คูณกับความเร็วรอบของโรเตอร์ (ω) ส่วนการหากำลังทางด้านออกหาได้จากกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด (I_L) คูณกับแรงดันดีซีบัส (u)

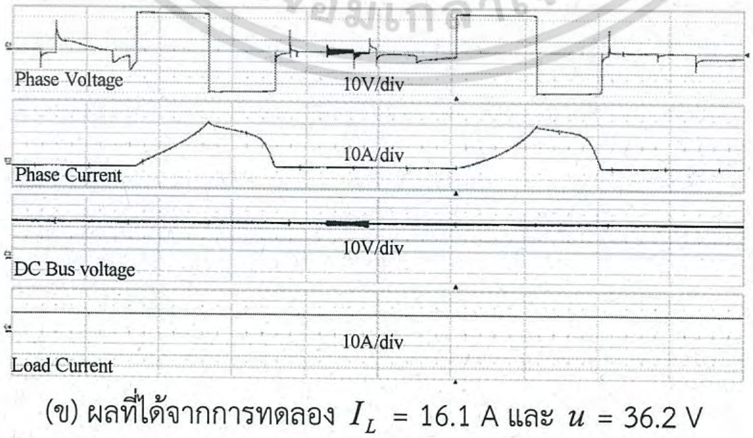
5.2.1 ผลจำลองการทำงานด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง เพื่อหารูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสม เมื่อรูปร่างของกระแสเฟสทั้ง 3 แบบ ได้ถูกกำหนดให้มีค่าสูงสุดเท่ากันอยู่ที่ 40A โดยใช้ตัวแปรควบคุมดังตารางที่ 5.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.9 – 5.11

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรควบคุมของกระแสเฟสทั้ง 3 แบบ เมื่อถูกกำหนดค่าสูงสุดที่ 40A

แบบ	u (V)	ω (rad/s)	i_{max} (A)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	I_L (A)	P_{out} (W)
a	36	513	40	-7.8	5.5	16.70	601.2
b	36	586	40	-7.8	9	27.80	1000.8
c	36	648	40	-7.8	9.5	24.68	888.5



(ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการคณิตศาสตร์

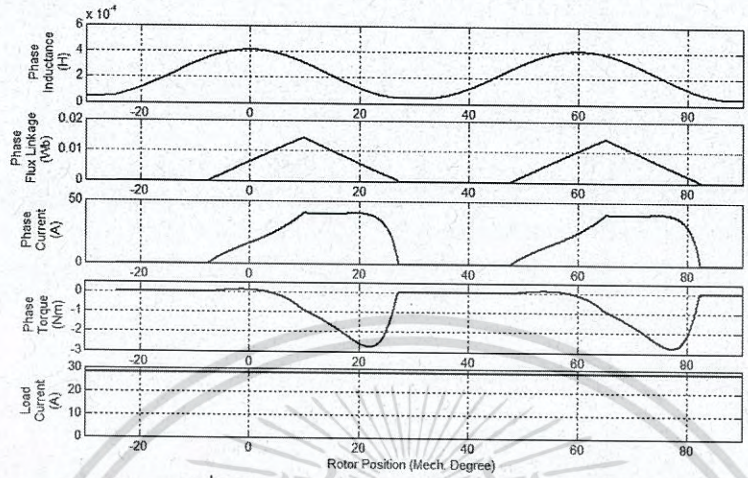


(ข) ผลที่ได้จากการทดลอง I_L = 16.1 A และ u = 36.2 V

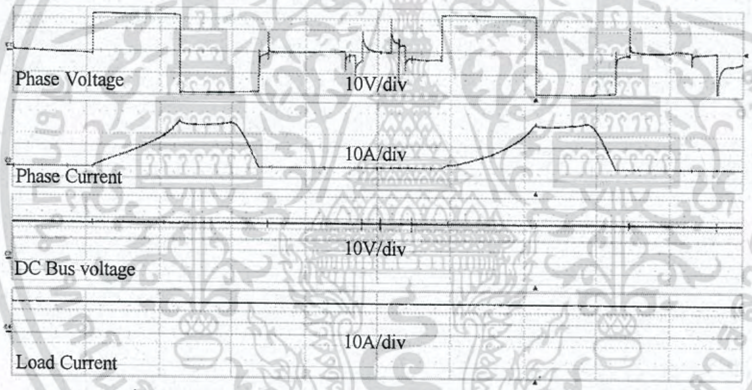
รูปที่ 5.9 กระแสเฟสแบบ a ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.8° และ θ_{off} = 5.5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย L_u = 42 μH , L_a = 470 μH , β_s = 23°, β_r = 23.5°, a = 0.65, และ b = 0.155

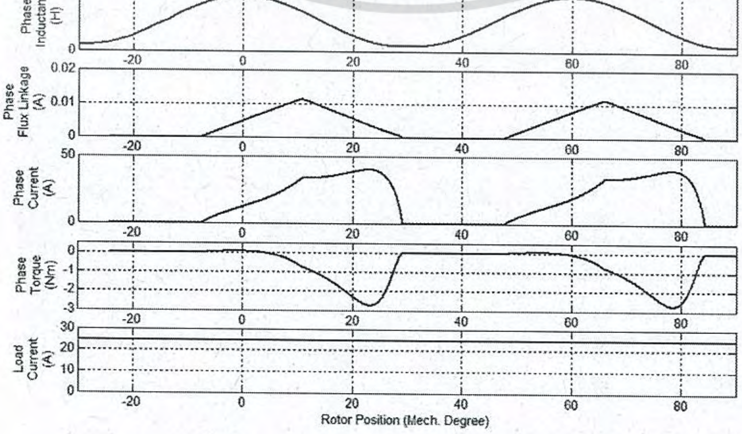


(ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการคณิตศาสตร์



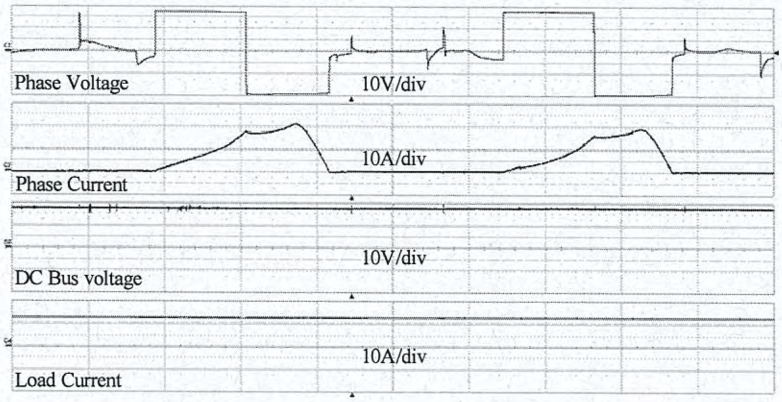
(ข) ผลที่ได้จากการทดลอง I_L = 26.8 A และ u = 36.1 V

รูปที่ 5.10 กระแสเฟสแบบ b ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.8° และ θ_{off} = 9°



(ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการคณิตศาสตร์

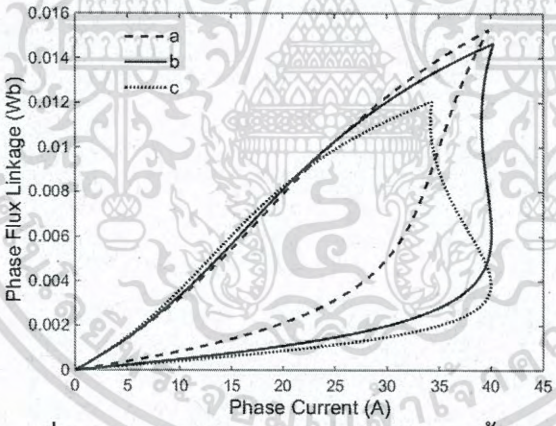
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ผลที่ได้จากการทดลอง I_L = 23.7 A และ u = 36.2 V

รูปที่ 5.11 กระแสเฟสแบบ c ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.8° และ θ_{off} = 9.5°

ในรูปที่ 5.9 – 5.11 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วยรูปคลื่นสัญญาณจากบนลงล่าง คือ ค่าความเหนี่ยวนำเฟสจากสมการที่ (3.5) เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องเฟสจากสมการที่ (3.2) กระแสเฟสจากสมการที่ (3.6) แรงบิดเฟสจากสมการที่ (3.7) และกระแสที่ไหลผ่านโหลดจากสมการที่ (3.13) ส่วนผลการทดลอง ประกอบด้วยรูปคลื่นสัญญาณจากบนลงล่าง คือ แรงดันเฟส กระแสเฟส แรงดันดีซีบัส และกระแสที่ไหลผ่านโหลด



รูปที่ 5.12 วงรอบปิดการแปลงผันพลังงานทั้ง 3 แบบ

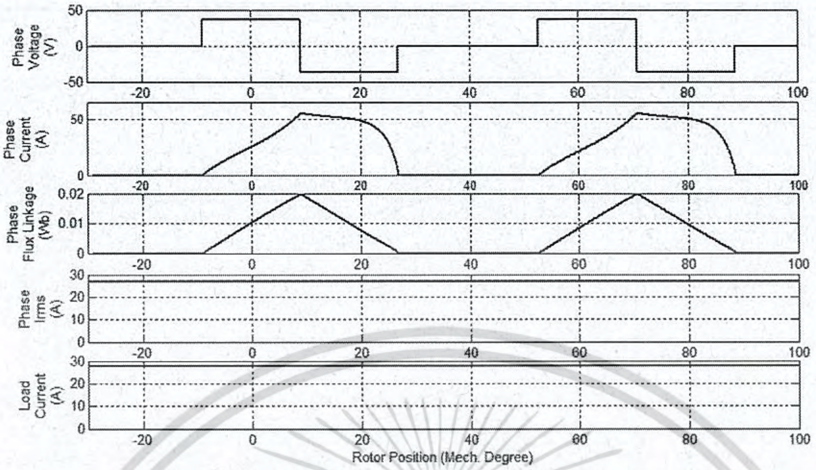
จากวงรอบปิดของการแปลงผันพลังงานของรูปร่างกระแสเฟสทั้ง 3 แบบ พบว่ากระแสเฟสแบบ b ให้ค่าการแปลงผันพลังงานสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง คือกระแสแบบ b ที่มีลักษณะแบบแฟลทท็อป จากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดของเอสอาร์จีมีค่า 967.5 W ในขณะที่กระแสแบบ a และแบบ c เอสอาร์จีมีค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกอยู่ที่ 582.8 W และ 857.9 W ตามลำดับ

สรุปได้ว่าถ้าต้องการให้เอสอาร์จีเกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด ต้องควบคุมให้กระแสเฟสของเอสอาร์จีมีรูปร่างแบบแฟลทท็อป

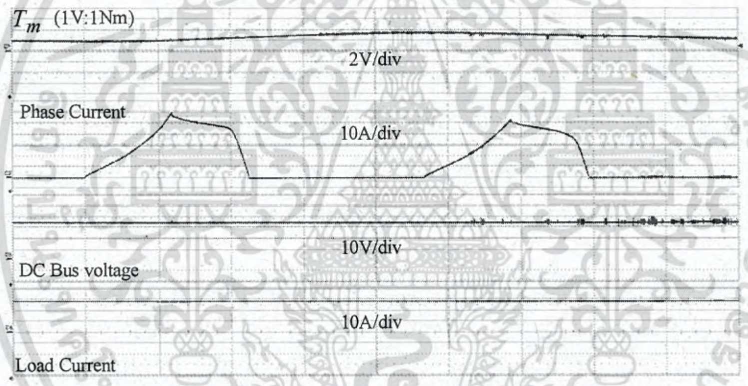
5.2.2 การทดลองหาประสิทธิภาพของระบบ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปร่างกระแสเฟสของเอสอาร์จี 3 รูปแบบ เมื่อกำหนดให้กำลังไฟฟ้าด้านออกเท่ากัน 1,000 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการจำลองการทำงาน ตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกบันทึกลงในตารางที่ 5.2

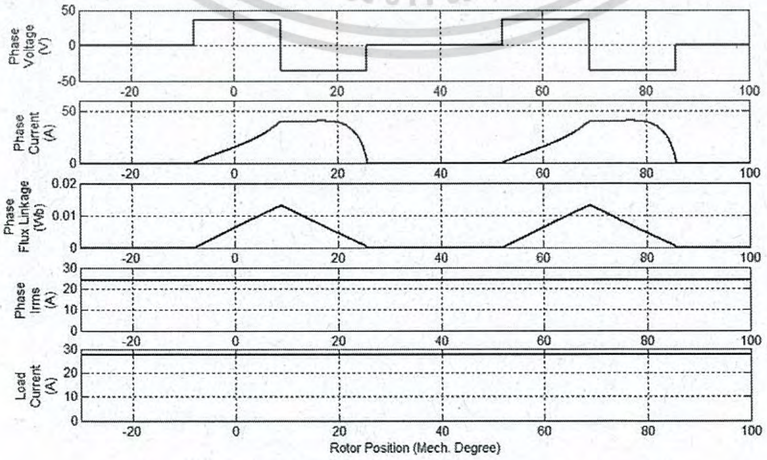


(ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการคณิตศาสตร์



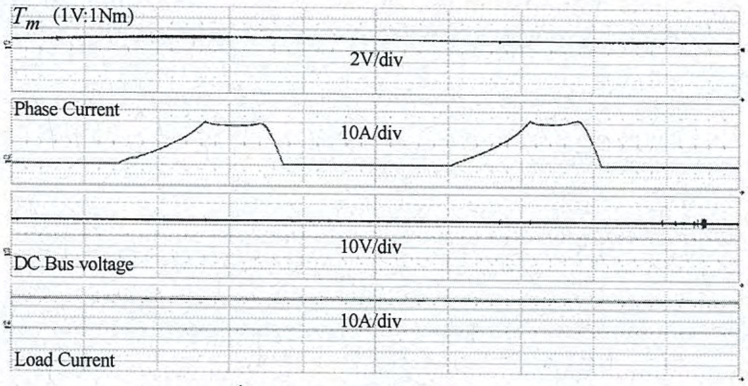
(ข) ผลที่ได้จากการทดลอง $i_{\max}$ = 55 A

รูปที่ 5.13 กระแสเฟสแบบ 1 ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -9.2° และ θ_{off} = 9°



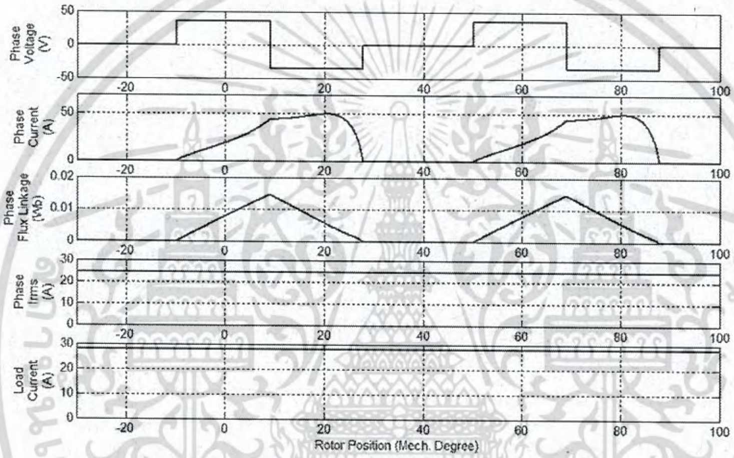
(ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

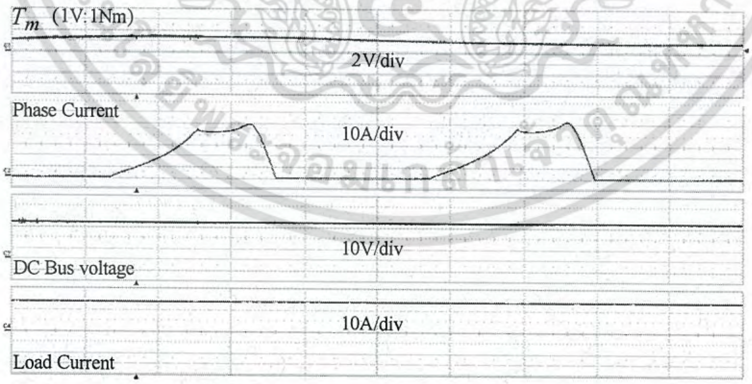


(ข) ผลที่ได้จากการทดลอง i_{max} = 40 A

รูปที่ 5.14 กระแสเฟสแบบ 2 ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -7.8° และ θ_{off} = 9°



(ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการคณิตศาสตร์



ผลที่ได้จากการทดลอง (ข) i_{max} = 50 A

รูปที่ 5.15 กระแสเฟสแบบ 3 ที่มุมกระตุ้น θ_{on} = -8.15° และ θ_{off} = 9°

ในรูปที่ 5.13 – 5.15 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วยรูปคลื่นสัญญาณจากบนลงล่าง คือ ค่าแรงดันเฟส กระแสเฟส เส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องเฟส กระแสอาร์เอ็มเอส กระแสที่ไหลผ่านโหลด ส่วนผลการทดลอง ประกอบด้วยรูปคลื่นสัญญาณจากบนลงล่าง คือ แรงบิดเฉลี่ย กระแสเฟส แรงดันดีซีบัส และกระแสที่ไหลผ่านโหลด ผลที่ได้สรุปอยู่ในตารางที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ตัวแปรควบคุมและผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

แบบ	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	ω (rad/s)	i_{max} (A)	λ_{max} (Wb)	I_{rms} (A)
1	-9.20	9	524	55	0.0193	26.81
2	-7.80	9	586	40	0.0132	23.85
3	-8.15	9	605	50	0.0145	24.54

ตารางที่ 5.3 ตัวแปรควบคุมและผลที่ได้จากการทดลอง

แบบ	ω (rad/s)	T_m (Nm)	P_{in} (W)	u (V)	I_L (A)	P_{out} (W)	η (%)
1	524	2.58	1,351.9	36.2	26.7	965.5	71.4
2	586	2.04	1,195.4	36.1	26.8	967.5	80.9
3	605	2.11	1,276.6	36.3	26.6	965.6	75.6

การสูญเสียในขดลวดขึ้นอยู่กับกระแสอาร์เอ็มเอ็ส และการสูญเสียในแกนเหล็กขึ้นอยู่กับค่าสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในตารางที่ 5.2 พบว่าระบบจะมีการสูญเสียต่ำสุด เมื่อเอสอาร์จีทำงานและกระแสเฟสของเอสอาร์จีที่เกิดขึ้นมีลักษณะแฟลททอป (แบบ 2) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง คือแบบ 2 จะมีประสิทธิภาพของระบบสูงสุดที่ 80.9 %

5.2.3 ผลการจำลองการทำงานด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และผลการทดลอง เมื่อกำหนด θ_p = 23.25°, u = 24 V, 36 V และ 48 V, i_{max} = 30 A, 40 A, และ 50 A ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม สามารถหาได้จากขั้นตอนต่อไปนี้

i. ความเร็วของโรเตอร์ (ω) หาได้โดยการแทน u และ $i_{\max}$ และแทน $\theta = \theta_p$ ลงในสมการที่ (3.11)

ii. มุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม (θ_{off}^{opt}) หาได้โดยการแทน θ_p, u, $i_{\max}$ และ ω ลงในสมการที่ (3.12)

iii. มุมนำกระแสที่เหมาะสม (θ_{on}^{opt}) หาได้จากสมการที่ (3.10)

ตารางที่ 5.4 ตัวแปรควบคุมที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์

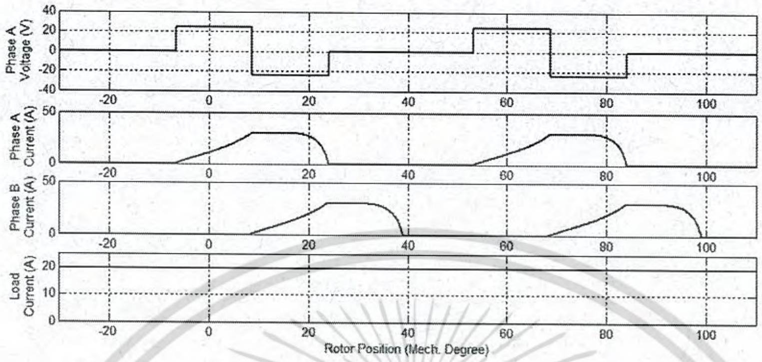
กรณี	θ_p (°)	u (V)	i_{max} (A)	ω (rad/s)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	I_L (A)
i	23.25	24	30	547	-7.2	8.8	19.59
ii	23.25	36	40	586	-7.8	9	27.8
iii	23.25	48	50	628	-8.4	9.2	39.76

จากขั้นตอนข้างต้นสามารถสรุปค่าที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.4 โดยค่ากระแสด้านออก

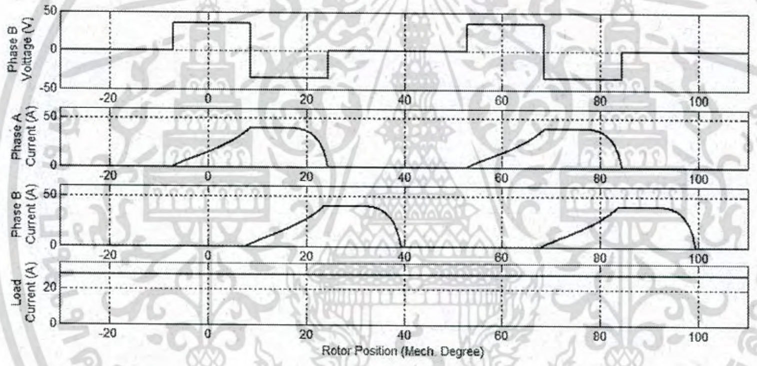
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์สำหรับการใช้งานที่ไม่แสวงหาผลกำไรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13)

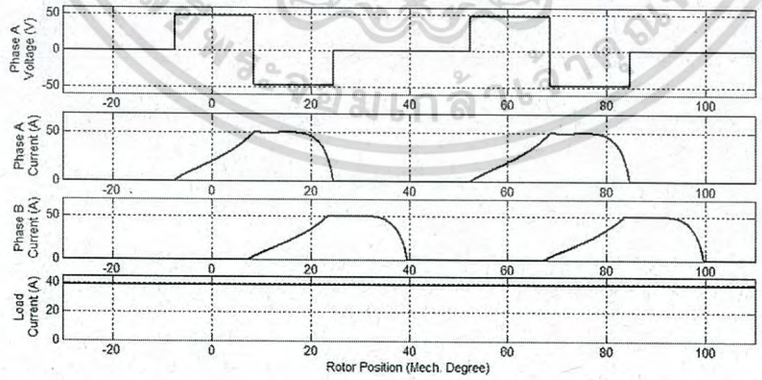
รูปร่างของแรงดันเฟส A กระแสของเฟส A และ B กระแสด้านออกของเอสอาร์จี จำนวน 3 กรณี ในรูปที่ 5.16 เกิดจากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ตัวแปรควบคุมในตาราง ที่ 5.4 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของกระแสเฟสมีลักษณะแฟลทท็อป ทั้ง 3 กรณี



(ก) กรณี i: $\theta_{on} = -7.2^{\circ}$, $\theta_{off} = 8.8^{\circ}$, and $I_L = 19.59$ A



(ข) กรณี ii: $\theta_{on} = -7.8^{\circ}$, $\theta_{off} = 9^{\circ}$, and $I_L = 27.8$ A



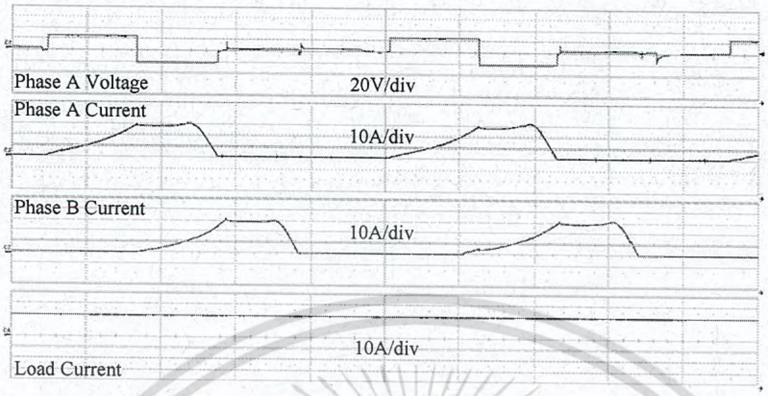
(ค) กรณี iii: $\theta_{on} = -8.4^{\circ}$, $\theta_{off} = 9.2^{\circ}$, and $I_L = 39.76$ A

รูปที่ 5.16 รูปร่างกระแสเฟสแบบแฟลทท็อปทั้ง 3 กรณีที่เกิดจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

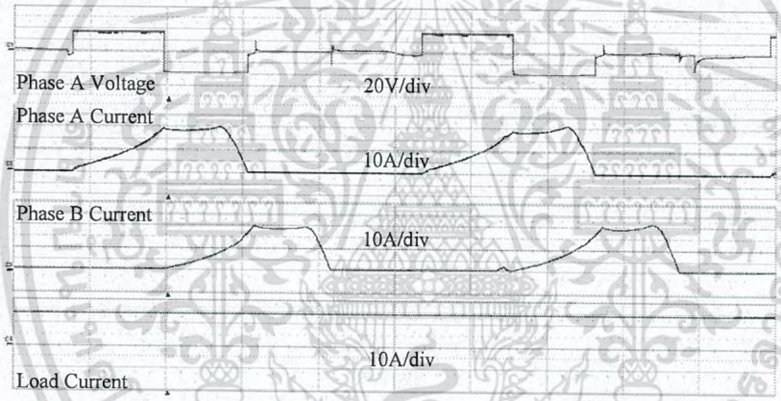
รูปที่ 5.17 แสดงรูปร่างของแรงดันเฟส A กระแสของเฟส A และ B กระแสด้านออกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

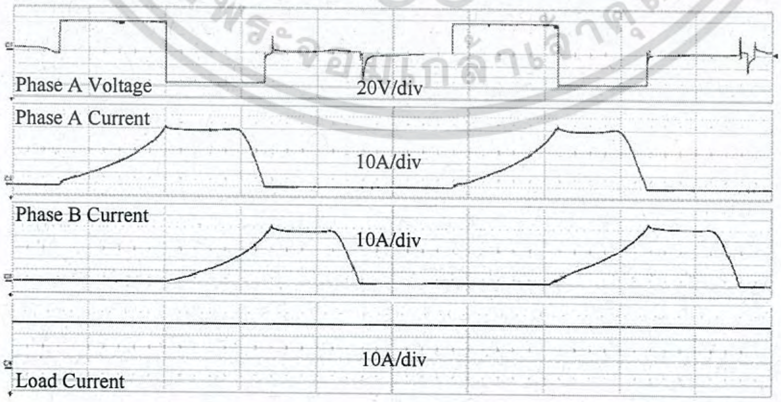
เอสอาร์จี ทั้ง 3 กรณี ที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ตัวแปรควบคุมในตารางที่ 5.4 กำลังไฟฟ้าด้านออกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.14) โดยกรณีที่ i) มีค่า 454.9 W สำหรับกรณีที่ ii) มีค่า 967.5 W และกรณีที่ iii) มีค่า 1841.2 W



(ก) กรณี i: $i_{\max} = 30$ A, $\theta_{on} = -7.2^{\circ}$, $\theta_{off} = 8.8^{\circ}$, และ $I_L = 18.8$ A และ $u = 24.2$ V



(ข) กรณี ii: $i_{\max} = 40$ A, $\theta_{on} = -7.8^{\circ}$, $\theta_{off} = 9^{\circ}$, และ $I_L = 26.8$ A, และ $u = 36.1$ V



(ค) กรณี iii: $i_{\max} = 50$ A, $\theta_{on} = -8.4^{\circ}$, $\theta_{off} = 9.2^{\circ}$, และ $I_L = 38.2$ A, และ $u = 48.2$ V

รูปที่ 5.17 รูปร่างกระแสเฟสแบบแฟลทท็อป ทั้ง 3 กรณีที่เกิดจากการทดลอง

จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลของการทดลอง แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเฟสมีลักษณะแบบแฟลททีอป เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลให้เอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าด้านออกได้สูงสุด

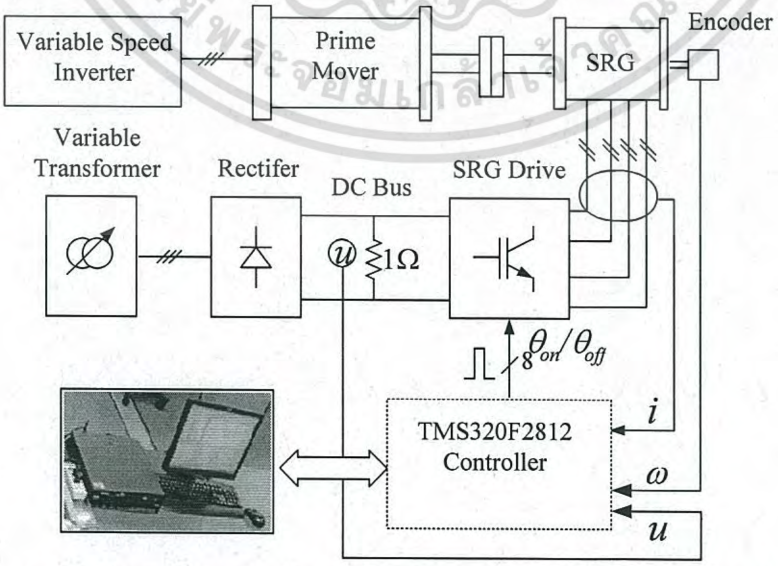
ตารางที่ 5.5 ค่าที่ได้จากระบบกำเนิดไฟฟ้าของเอสอาร์จี

กรณี	ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศสาสตร์			ผลที่ได้จากการทดลอง		
	u (V)	I_L (A)	P_{out} (W)	u (V)	I_L (A)	P_{out} (W)
i	24	19.59	470.2	24.2	18.8	454.9
ii	36	27.8	1000.8	36.1	26.8	967.5
iii	48	39.76	1908.5	48.2	38.2	1841.2

จากตารางที่ 5.5 คือผลสรุปที่ได้จากระบบกำเนิดไฟฟ้าของเอสอาร์จี เมื่อเปรียบเทียบกำลังทางด้านออกพบว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองเฉลี่ย 3.49% เนื่องจากในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ได้คิดค่าความต้านทานเฟส

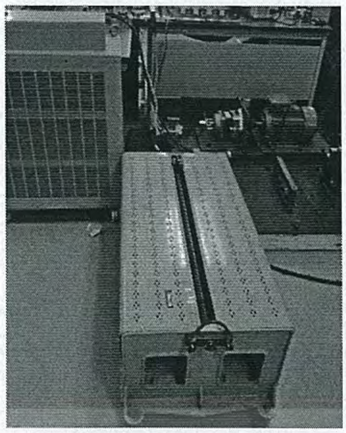
5.3 การทดลองควบคุมมุมกระตุ้นที่เหมาะสม โดยคงที่ค่ามุมนำกระแสที่เหมาะสมไว้เพื่อให้เอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าด้านออกได้สูงสุด

ชุดทดลองระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเอสอาร์จีในรูปที่ 5.18 โดยมีหลักการการทำงานดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.18(ก) และในรูปที่ 5.18 (ข) – (จ) คือชุดทดลองที่ใช้งานประกอบด้วย มอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์แบบ 4 เฟส 8 ขั้ว สเตเตอร์ 6 ขั้วโรเตอร์ และมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (ตัวขับต้นกำลัง) คอนเวอร์เตอร์ ตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัลสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ และโหลดชนิดความต้านทาน

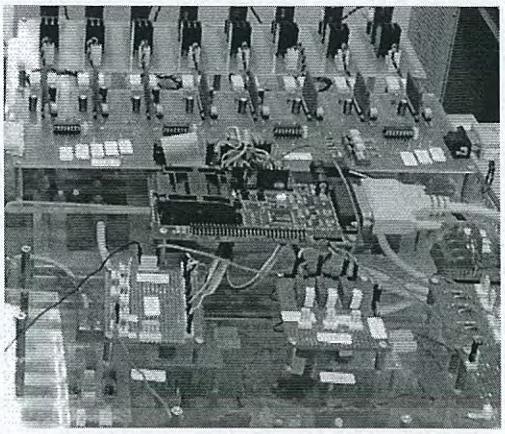


(ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าของเอสอาร์จี

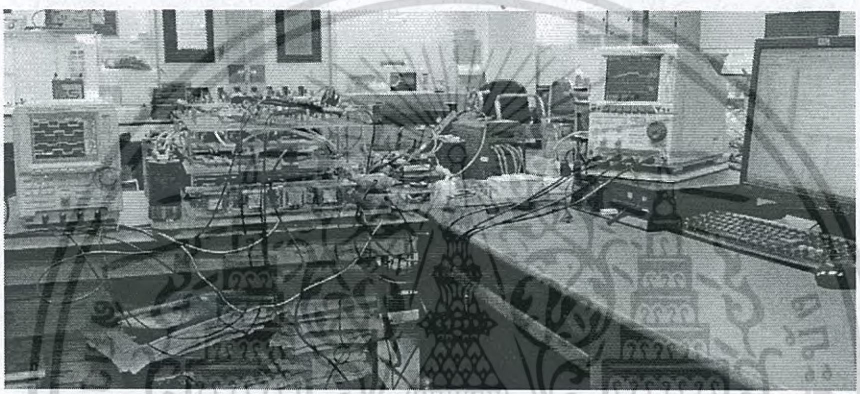
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



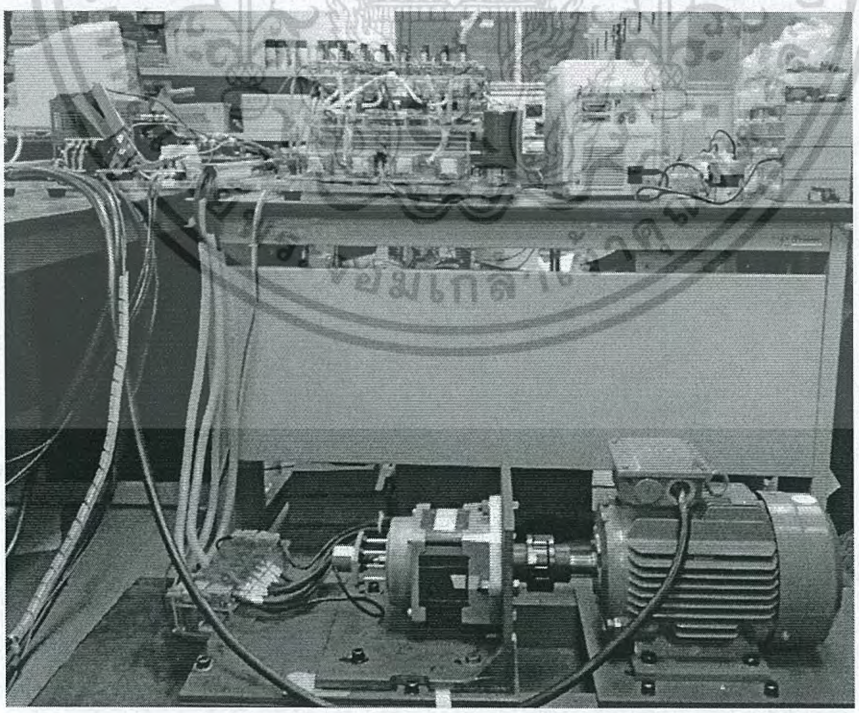
(ข) โหลดชนิดความต้านทาน



(ค) ชุดประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล



(ง) คอนเวอร์เตอร์กำลัง

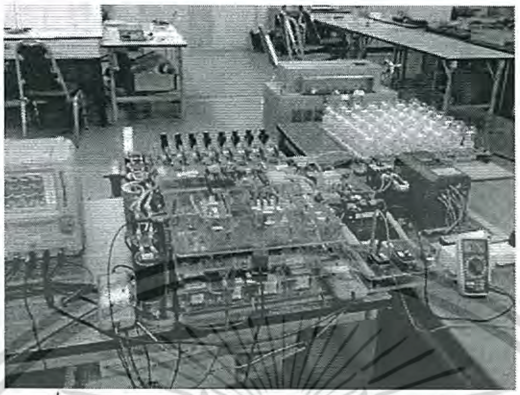


(จ) ตัวขับต้นกำลังและเอสอาร์จี

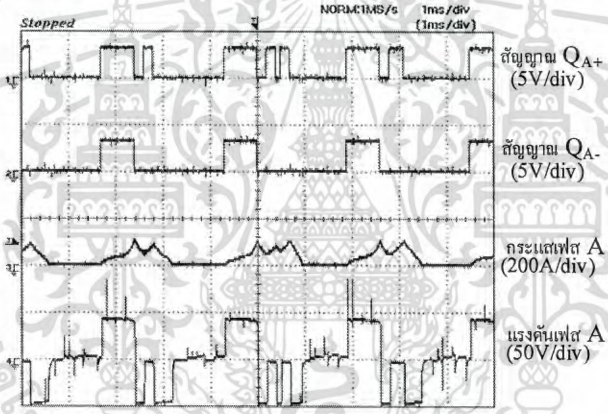
รูปที่ 5.18 ชุดทดลองมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

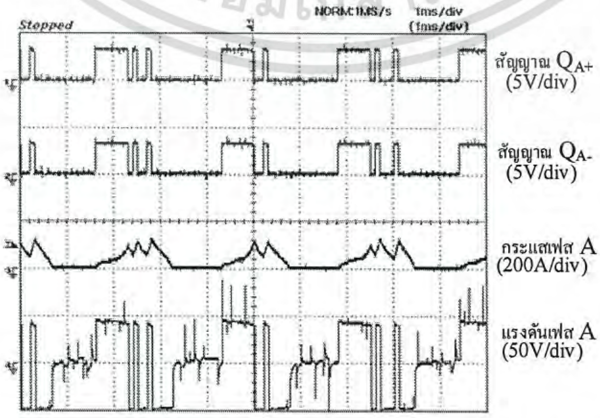
5.3.1 ผลการทดลองวัดสัญญาณกระแสเฟสและแรงดันเฟสในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในโหมดการควบคุมกระแสแบบ Soft/Hard Chopping และแบบ Single Pulse ซึ่งการทดลองจะวัดสัญญาณที่ขดลวดเฟส A ดังแสดงในรูปที่ 5.19 โดยใช้ค่าแรงดันดีซีบัส 47 โวลท์ ตัวเก็บประจุ 3,300 uF/450V และโหลดเป็นหลอดไส้จำนวน 49 หลอด (หลอดไส้แต่ละหลอดพิกัด 220V 100W)



รูปที่ 5.19 การทดลองวัดรูปคลื่นสัญญาณขับนำเกท สัญญาณแรงดันและกระแสเฟสที่ขดลวดเฟส A

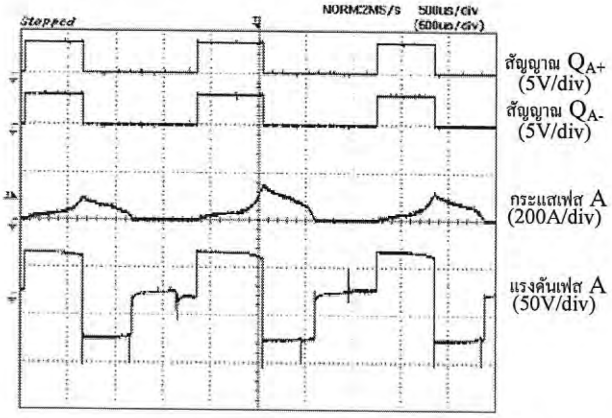


รูปที่ 5.20 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสขดลวดเฟส A โหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที มุมนำกระแส (θ_{on}) -5° และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 10°



รูปที่ 5.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสขดลวดเฟส A โหมดควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที มุมนำกระแส (θ_{on}) -5° และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 10°

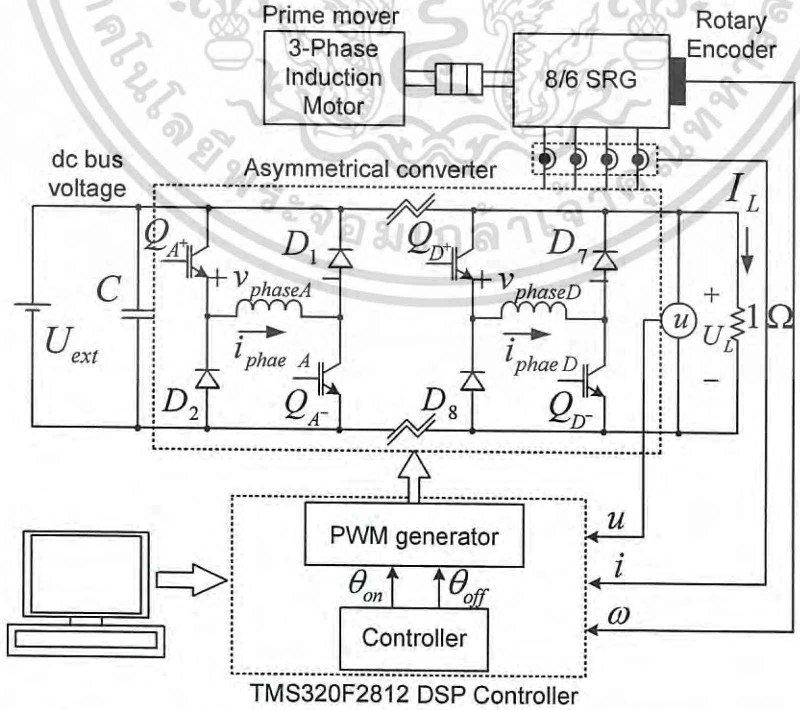
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเฟสขดลวดเฟส A โหมดควบคุมกระแสแบบ Single Pulse ความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที มุมนำกระแส (θ_{on}) -5° และมุมหยุดนำกระแส (θ_{off}) 5°

รูปที่ 5.20 แสดงผลการทดลองวัดรูปคลื่นสัญญาณในโหมดการควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping ที่ขดลวดเฟส A รูปที่ 5.21 แสดงผลการทดลองวัดรูปคลื่นสัญญาณในโหมดการควบคุมแบบ Hard Chopping ที่ขดลวดเฟส A และในรูปที่ 5.22 แสดงผลการทดลองวัดรูปคลื่นสัญญาณในโหมดการควบคุมกระแสแบบ Single Pulse ที่ขดลวดเฟส A

5.3.2 ผลการทดลองวัดสัญญาณรูปร่างของกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม



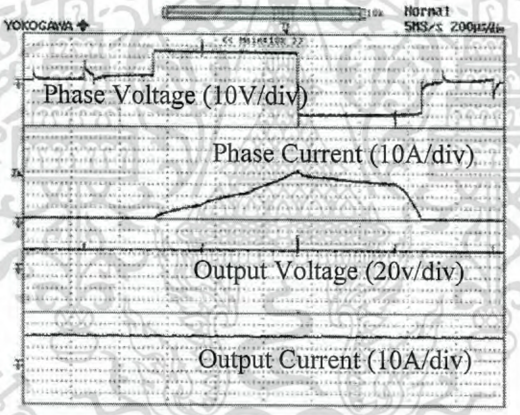
รูปที่ 5.23 วงจรสำหรับใช้วัดรูปคลื่นสัญญาณเฟสและสัญญาณด้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

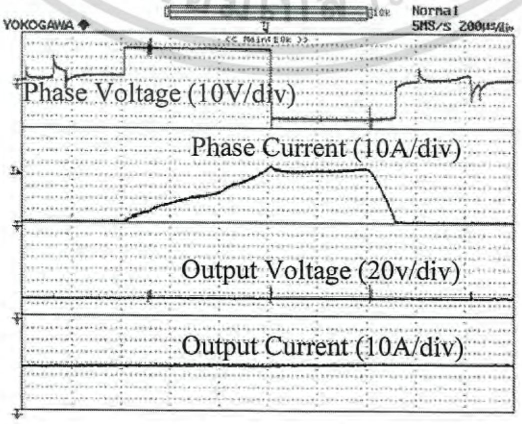
จากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของกระแสเฟสที่มีลักษณะแบบแฟลทท็อป เอสอาร์จีจะให้กำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ วงจรที่ใช้สำหรับทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.23 โดยได้ทำการทดลองวัดรูปคลื่นของกระแสเฟสและแรงดันเฟสของขดลวดเฟส A ค่าของกระแสและแรงดันด้านออกของเอสอาร์จี ซึ่งในการทดลองใช้โหลดเป็นความต้านทาน 1 โอห์ม แรงดันดีซีบัสคงที่ 27V ควบคุมค่ากระแสเฟสสูงสุดที่ 45A โดยการปรับมุมกระตุ้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ควบคุมและผลของการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 5.6 และผลการทดลองวัดรูปร่างกระแสเฟสที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.24 - 5.26

ตารางที่ 5.6 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45A สำหรับใช้ในการทดลอง

$y=\left(\dfrac{u}{\omega}\right)$	u (V)	ω (rad/S)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	I_L (A)	U_L (V)	P_L (W)
0.048	27	558	-15°	4.40°	20.6	27.68	570.21
0.042	27	642	-15°	6.34°	39.86	27.60	1,100.14
0.038	27	717	-15°	6.75°	31.97	27.52	879.81

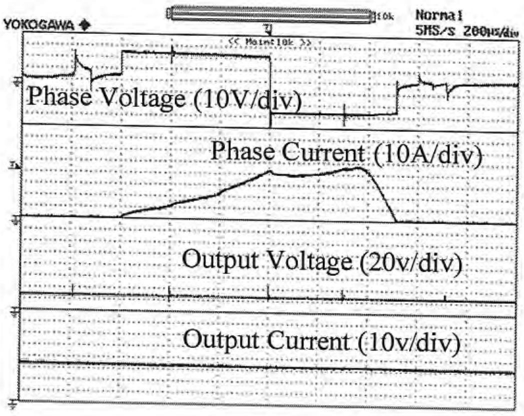


รูปที่ 5.24 รูปร่างของกระแสเฟสในกรณี $e<u$ ($y = 0.048$ หรือ $y > y_{opt}$)



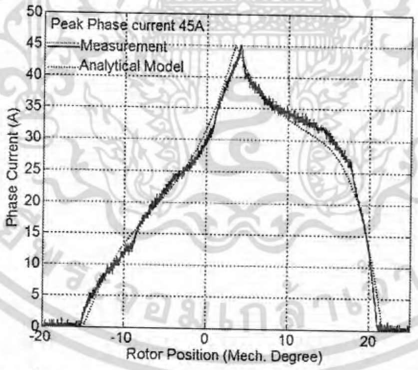
รูปที่ 5.25 รูปร่างของกระแสเฟสในกรณี $e=u$ ($y = 0.042$ หรือ $y = y_{opt}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

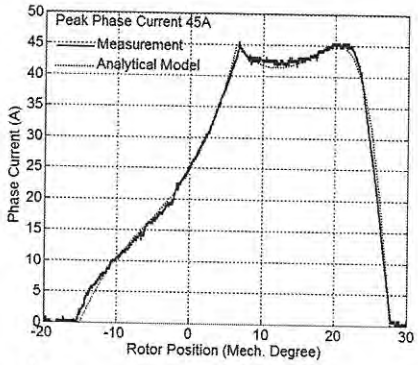


รูปที่ 5.26 รูปร่างของกระแสเฟสในกรณี $e > u$ ($y = 0.038$ หรือ $y < y_{opt}$)

ผลการทดลองในตารางที่ 5.6 เมื่อเปรียบเทียบผลทั้ง 3 กรณีสรุปได้ว่าในกรณีที่ $y = 0.042$ ซึ่งเป็นค่า y_{opt} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.17) จะกำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดรูปร่างของกระแสเฟสจะมีลักษณะแบบแฟลทท็อป ซึ่งเป็นลักษณะของการที่แรงดันต้านกลับสมดุลกับแรงดันดีซีบัส $(e = u)$ ในกรณี $y = 0.048$ จะกำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกต่ำสุดซึ่งรูปร่างของกระแสจะมีลักษณะลดลงหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสซึ่งเป็นลักษณะของการที่แรงดันต้านกลับน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส $(e < u)$ และในกรณี $y = 0.038$ รูปร่างของกระแสจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสซึ่งเป็นลักษณะของการที่แรงดันต้านกลับมากกว่าแรงดันดีซีบัส $(e > u)$

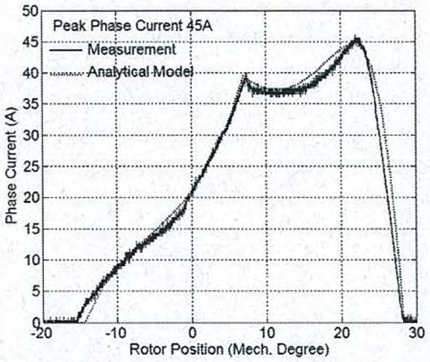


รูปที่ 5.27 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในกรณี $e < u$



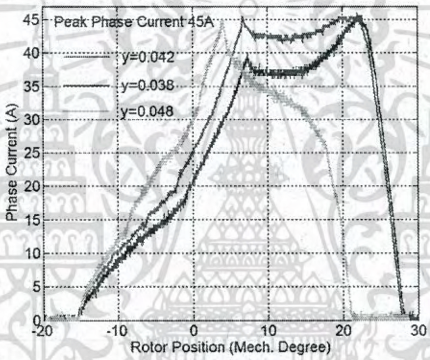
รูปที่ 5.28 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในกรณี $e = u$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

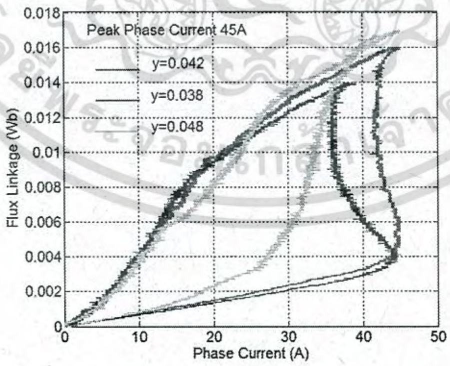


รูปที่ 5.29 รูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในกรณี $e > u$

ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสที่ได้จากการการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณี $e < u$ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.27 สำหรับกรณี $e = u$ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.28 และในกรณี $e > u$ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.30 รูปร่างของกระแสเฟสทั้ง 3 กรณีเมื่อควบคุมค่าสูงสุดที่ 45A



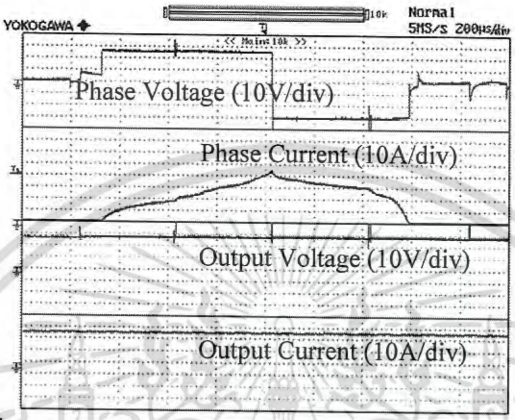
รูปที่ 5.31 วงรอบปิดของการแปลงผันพลังงาน

รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของกระแสเฟสเมื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุดที่ 45A ทั้ง 3 กรณี และในรูปที่ 5.31 แสดงวงรอบปิดของการแปลงผันพลังงานทั้ง 3 กรณี จะพบว่ากรณีของแรงดันดีซีบัสสมดุลกับแรงดันต้านกลับ $(e = u)$ เอสอาร์จีจะให้กำเนิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 5.6

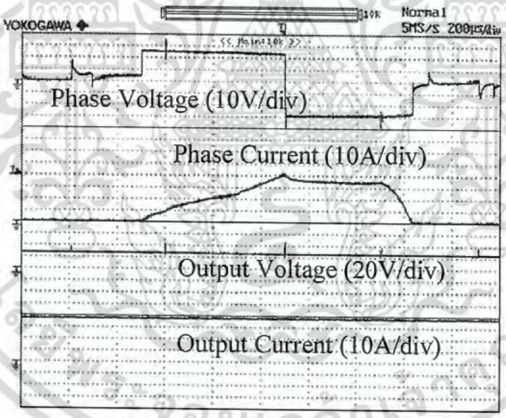
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลการทดลองหาค่ามุมนำกระแสที่เหมาะสม มุมนำกระแสที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกตรวจสอบความถูกต้องจากการทดลอง ซึ่งในการทดลองได้ทำการควบคุมการทำงานของเอสอาร์จีในโหมดกระแสพัลส์ โดยวิธีการปรับตำแหน่งมุมนำกระแสและมุมหยุดนำกระแสให้มีค่ากระแสเฟสสูงสุด 45A โดยเปรียบเทียบ 3 กรณีดังนี้

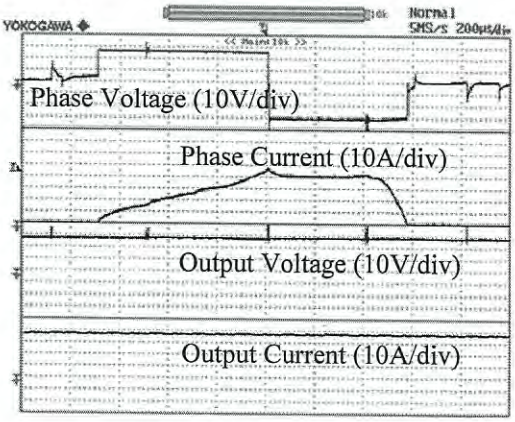
กรณีที่ 1 กำหนดค่า $y = 0.042$ $(u = 27V, \omega = 642\,rad/S)$ โหลดเป็นความต้านทาน 1 Ω ซึ่งผลของการวัดสัญญาณกระแสเฟส แรงดันเฟส กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 5.32 ถึงรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.32 มุมนำกระแส -21° มุมหยุดนำกระแส 3.34°

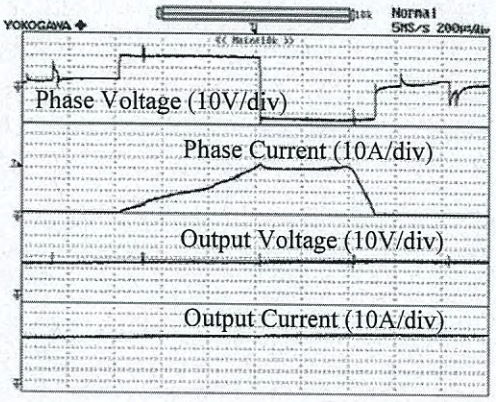


รูปที่ 5.33 มุมนำกระแส -19° มุมหยุดนำกระแส 4.34°

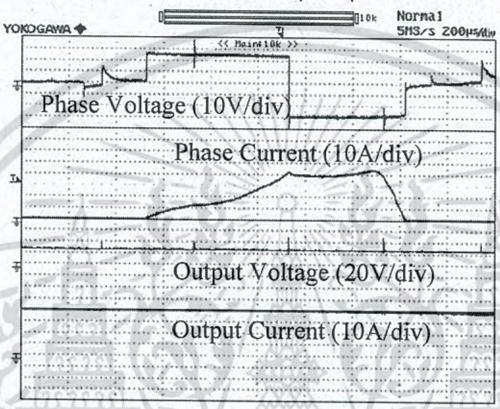


รูปที่ 5.34 มุมนำกระแส -17° มุมหยุดนำกระแส 5.34°

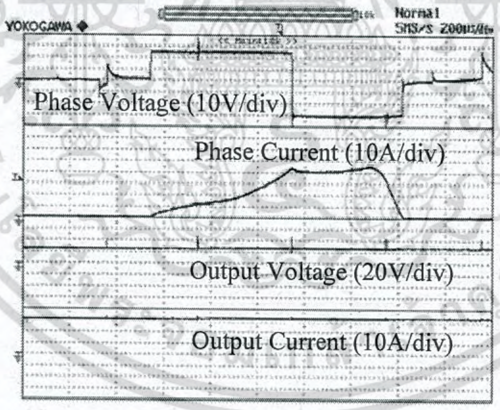
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



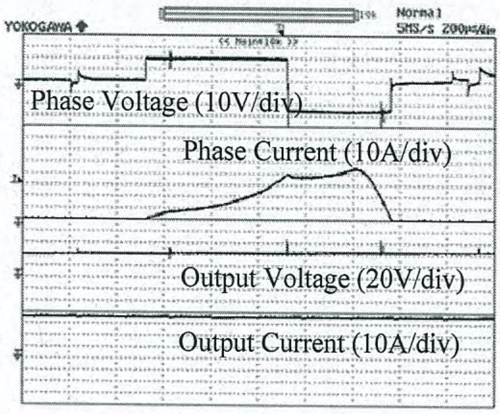
รูปที่ 5.35 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.34°



รูปที่ 5.36 มุมนำกระแส -13° มุมหยุดนำกระแส 7.34°



รูปที่ 5.37 มุมนำกระแส -11° มุมหยุดนำกระแส 8.34°



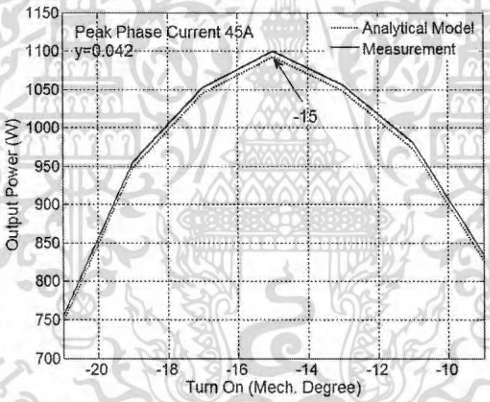
รูปที่ 5.38 มุมนำกระแส -9° มุมหยุดนำกระแส 9.34°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

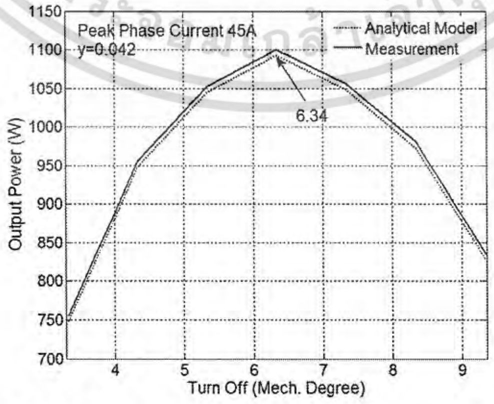
ค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุม ผลของการวัดค่ากระแสด้านออก และแรงดันด้านออก สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.7 และในรูปที่ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านออกที่ตำแหน่งมุมนำกระแสตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

ตารางที่ 5.7 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45A เมื่อ $y = 0.042$

มุมนำกระแส (°)	มุมหยุดนำกระแส (°)	กระแสด้านออก (A)	แรงดันด้านออก (V)	กำลังไฟฟ้าด้านออก (W)
-21	3.34	27.45	27.53	755.70
-19	4.34	34.95	27.34	955.53
-17	5.34	38.95	27.01	1052.04
-15	6.34	39.86	27.60	1100.14
-13	7.34	39.11	27.01	1056.36
-11	8.34	35.77	27.40	980.09
-9	9.34	30.78	27.13	835.06



(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ

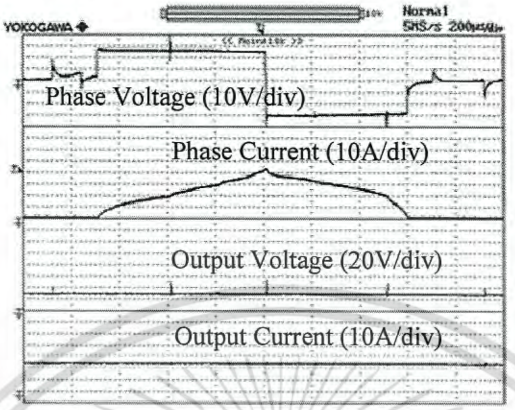


(ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

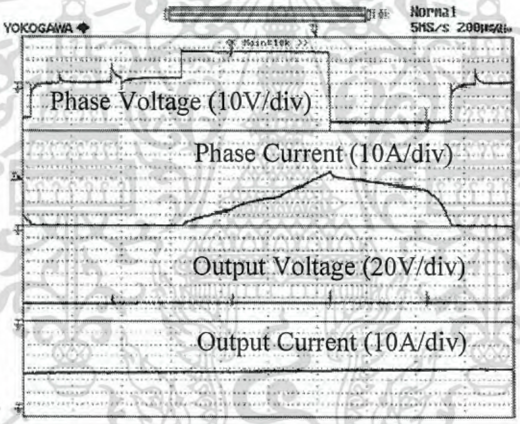
รูปที่ 5.39 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ เมื่อ $y = 0.042$ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

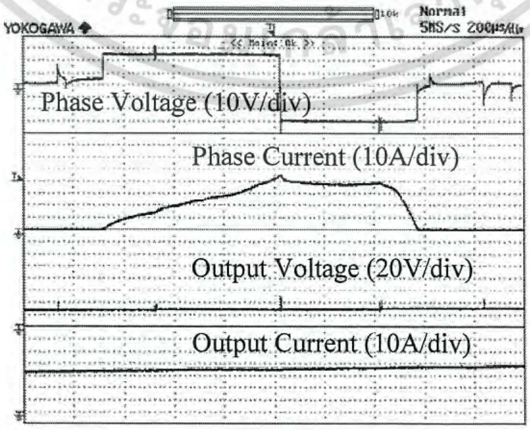
กรณีที่ 2 กำหนดค่า $y = 0.044 \quad (u = 27V, \omega = 613 rad / S)$ โหลดเป็นความต้านทาน 1Ω ซึ่งผลของการวัดสัญญาณกระแสเฟส แรงดันเฟส กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 5.40 ถึงรูปที่ 5.46



รูปที่ 4.40 มุมนำกระแส -21° มุมหยุดนำกระแส 3.13°

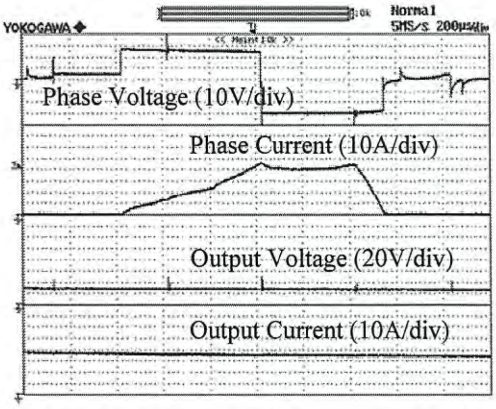


รูปที่ 5.41 มุมนำกระแส -19° มุมหยุดนำกระแส 4.13°

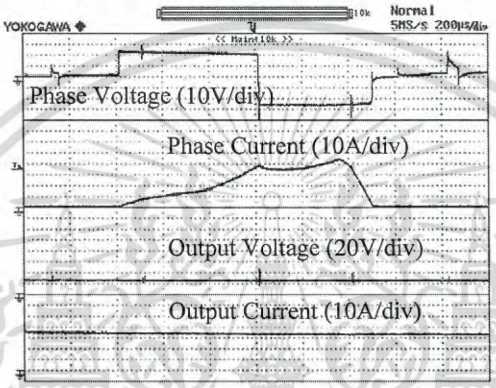


รูปที่ 5.42 มุมนำกระแส -17° มุมหยุดนำกระแส 5.13°

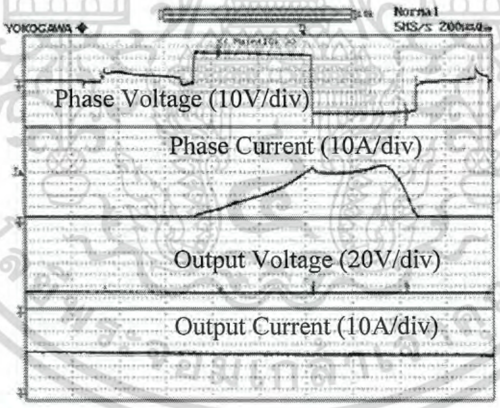
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



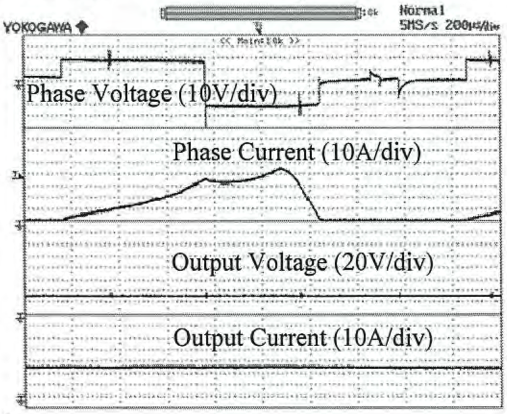
รูปที่ 5.43 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.13°



รูปที่ 5.44 มุมนำกระแส -13° มุมหยุดนำกระแส 7.13°



รูปที่ 5.45 มุมนำกระแส -11° มุมหยุดนำกระแส 8.13°



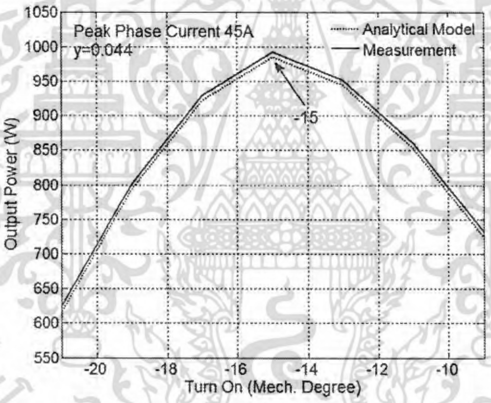
รูปที่ 5.46 มุมนำกระแส -9° มุมหยุดนำกระแส 9.13°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

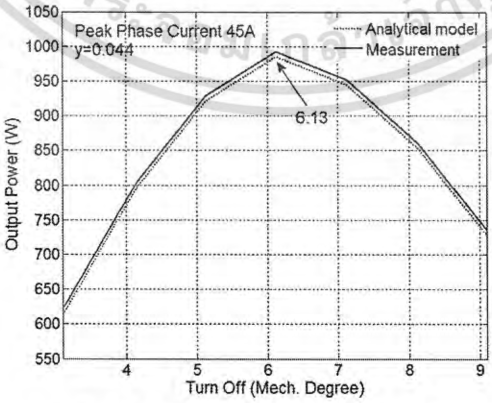
ตารางที่ 5.8 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45A เมื่อ $y = 0.044$

มุมนำกระแส (°)	มุมหยุดนำกระแส (°)	กระแสด้านออก (A)	แรงดันด้านออก (V)	กำลังไฟฟ้าด้านออก (W)
-21	3.13	22.94	27.24	624.91
-19	4.13	29.43	27.25	801.96
-17	5.13	33.85	27.45	929.18
-15	6.13	36.35	27.31	992.71
-13	7.13	34.39	27.67	951.84
-11	8.13	31.28	27.49	859.88
-9	9.13	26.54	27.57	731.70

ค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุม ผลของการวัดค่ากระแสด้านออก และแรงดันด้านออก สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.8 และในรูปที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านออกที่ตำแหน่งมุมนำกระแสตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง



(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ

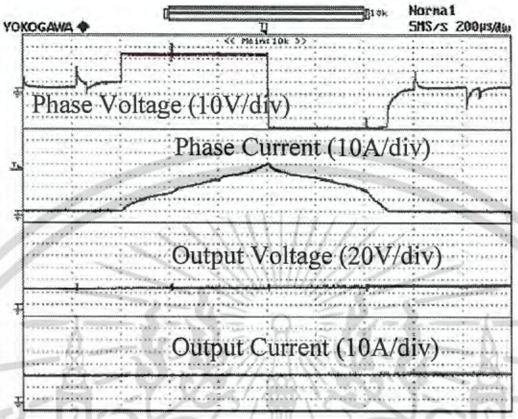


(ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

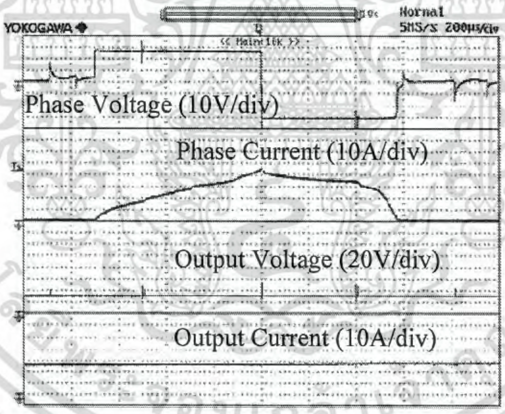
รูปที่ 5.47 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ เมื่อ $y = 0.044$ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

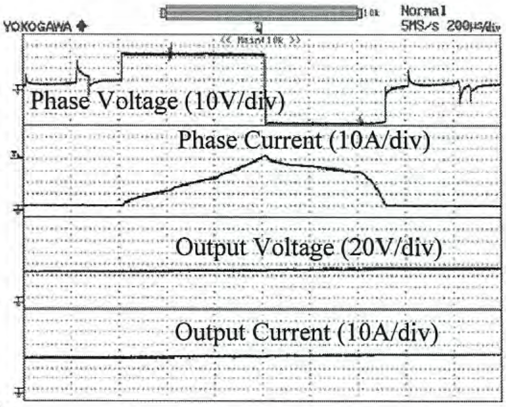
กรณีที่ 3 กำหนดค่า $y = 0.046 \quad (u = 27V, \omega = 586 rad/S)$ โหลดเป็นความต้านทาน 1Ω ซึ่งผลของการวัดสัญญาณกระแสเฟส แรงดันเฟส กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 5.48 ถึงรูปที่ 5.54 โดยสามารถสรุปค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมและผลของการวัดค่ากระแสด้านออก และแรงดันด้านออกได้ดังแสดงในตารางที่ 5.9 และในรูปที่ 5.55 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านออกที่ตำแหน่งมุมนำกระแสตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง



รูปที่ 5.48 มุมนำกระแส -21° มุมหยุดนำกระแส 2.91°

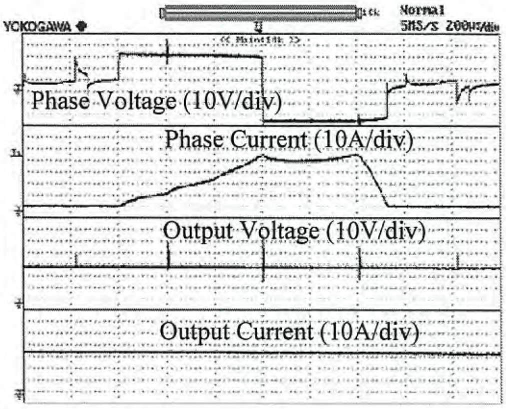


รูปที่ 5.49 มุมนำกระแส -19° มุมหยุดนำกระแส 3.91°

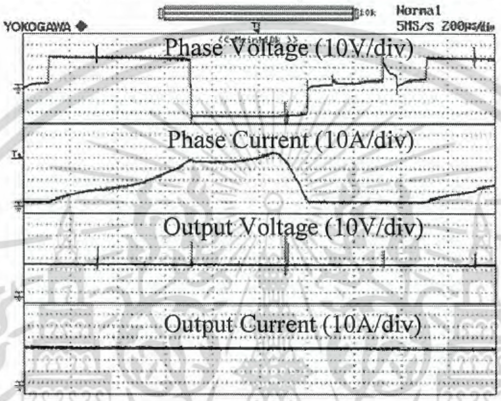


รูปที่ 5.50 มุมนำกระแส -17° มุมหยุดนำกระแส 4.91°

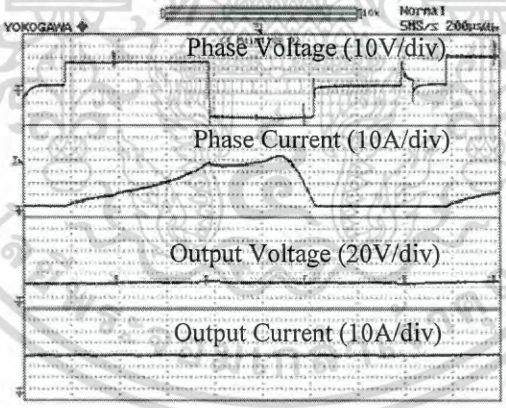
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



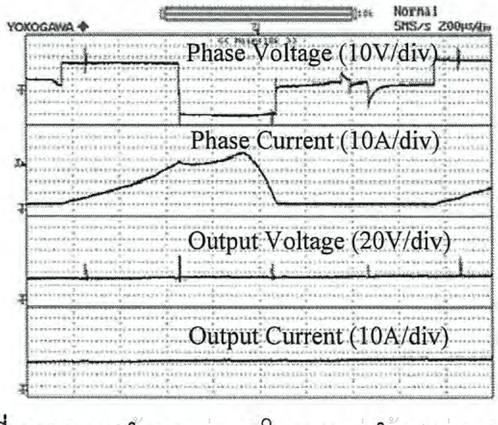
รูปที่ 5.51 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.91°



รูปที่ 5.52 มุมนำกระแส -13° มุมหยุดนำกระแส 6.91°



รูปที่ 5.53 มุมนำกระแส -11° มุมหยุดนำกระแส 7.91°

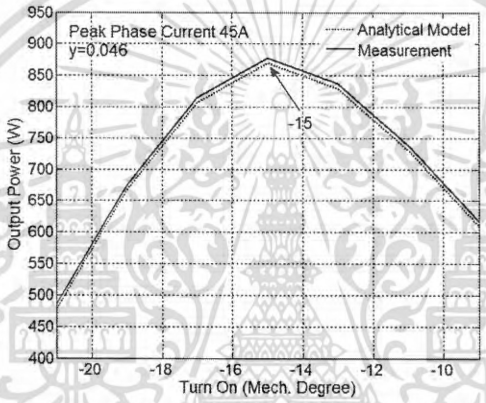


รูปที่ 5.54 มุมนำกระแส -9° มุมหยุดนำกระแส 8.91°

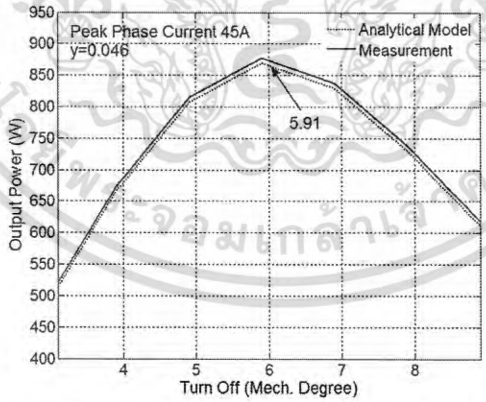
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงว ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45A เมื่อ $y = 0.046$

มุมนำกระแส (°)	มุมหยุดนำกระแส (°)	กระแสด้านออก (A)	แรงดันด้านออก (V)	กำลังไฟฟ้าด้านออก (W)
-21	2.91	17.78	27.33	485.92
-19	3.91	24.58	27.45	674.93
-17	4.91	29.57	27.54	814.35
-15	5.91	32.08	27.35	877.38
-13	6.91	30.28	27.66	837.54
-11	7.91	27.24	27.10	738.20
-9	8.91	22.61	27.32	617.70



(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ

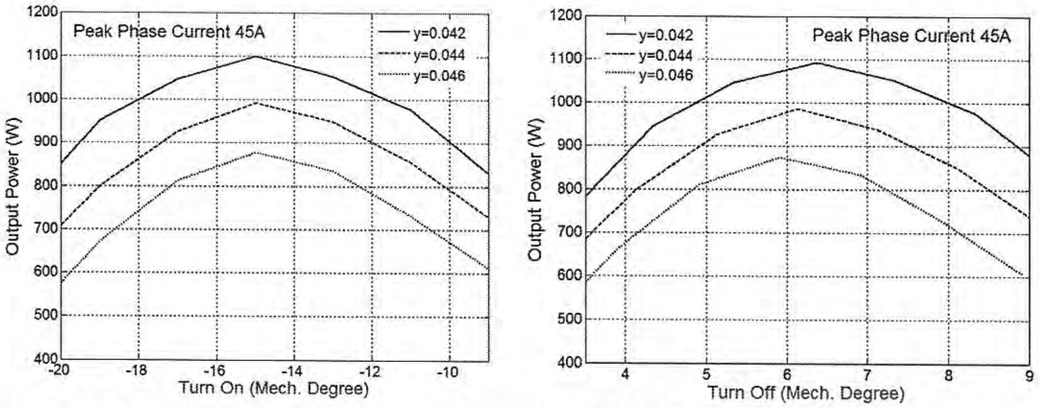


(ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

รูปที่ 5.55 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ เมื่อ $y = 0.046$ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

รูปที่ 5.56 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสและกำลังไฟฟ้าด้านออกทั้ง 3 กรณี เมื่อพิจารณาจะพบว่ามุมนำกระแสที่ -15° เป็นมุมที่เอสอาร์จีสามารถกำเนิดกำลังไฟฟ้าด้านออกได้มากที่สุดดังนั้นในงานวิจัยนี้มุมสำหรับนำกระแสที่เหมาะสมอยู่ที่ -15°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



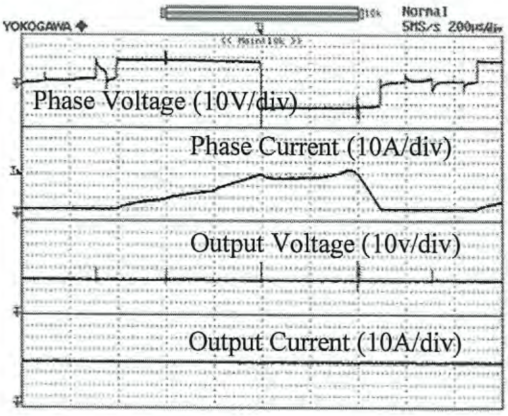
(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ (ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

รูปที่ 5.56 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านอออกเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้ง 3 กรณี

5.3.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของแรงดันดีซีบัสต่อความเร็วรอบของโรเตอร์ รูปร่างของกระแสเฟสขึ้นอยู่กับตัวแปรควบคุมได้แก่ แรงดันดีซีบัส ความเร็วรอบ และมุมกระตุ้น ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่าในกรณีที่เอสอาร์จีถูกกระตุ้นด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้รูปร่างของกระแสเฟสมีลักษณะแบบแฟลทท็อป ซึ่งจะทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแรงดันดีซีบัสต่อความเร็วรอบจะส่งผลต่อระดับของกำลังไฟฟ้าด้านออก สำหรับการหาแรงดันดีซีบัสต่อความเร็วรอบที่กระแสเฟสสูงสุด (y_{opt}) นั้นหาได้จากสมการที่ (3.12) ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ โดยทำการทดลอง 3 กรณีคือ

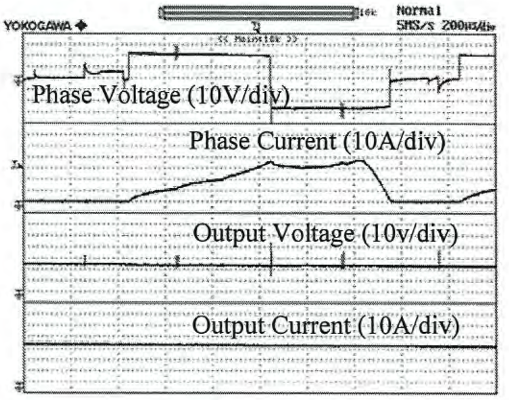
กรณีที่ 1 ปรับมุมกระตุ้นและ y เพื่อควบคุมให้กระแสเฟสสูงสุดอยู่ที่ 45A โดยควบคุมแรงดันดีซีบัสคงที่ 22V โหลดเป็นความต้านทาน 1Ω ผลจากการคำนวณในสมการที่ (3.12) ค่า y_{opt} มีค่าเท่ากับ 0.042 ซึ่งผลของการวัดสัญญาณกระแสเฟส แรงดันเฟส กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 5.57 ถึงรูปที่ 5.61

รูปที่ 5.62 แสดงความสัมพันธ์ของ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุด 45A แรงดันดีซีบัส 22V โดยสามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 5.10 ในรูปที่ 5.62 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของแรงดันดีซีบัสต่อความเร็วโรเตอร์ที่กระแสเฟสสูงสุดอยู่ที่ 0.042 ซึ่งเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม ผลที่ได้จะทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด

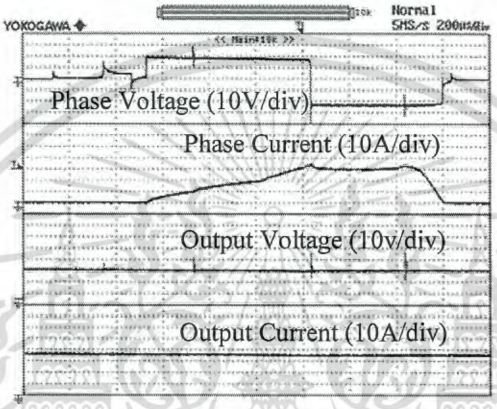


รูปที่ 5.57 มุมนำกระแส -21.5° มุมหยุดนำกระแส 3.7° ($y = 0.038$)

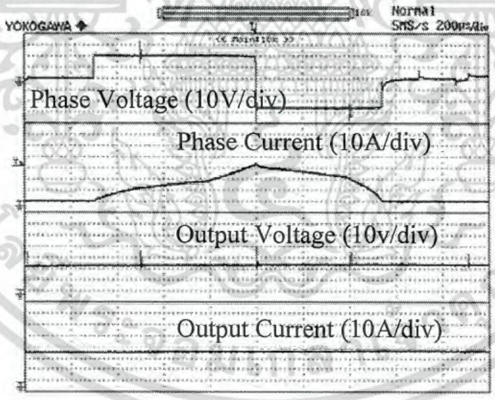
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



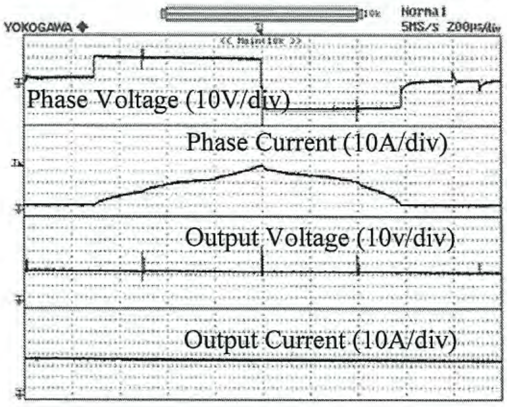
รูปที่ 5.58 มุมนำกระแส -19.5° มุมหยุดนำกระแส 4.2° ($y = 0.040$)



รูปที่ 5.59 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.26° ($y = 0.042$)

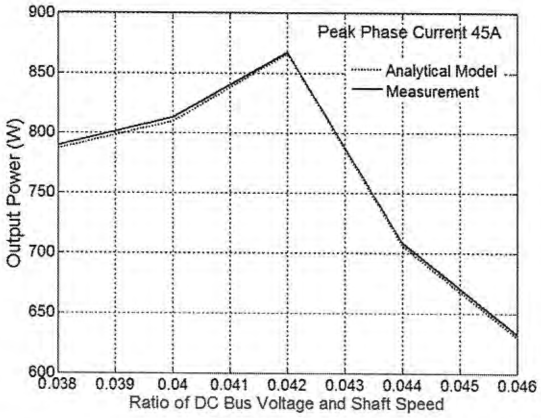


รูปที่ 5.60 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.5° ($y = 0.044$)



รูปที่ 5.61 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 4.8° ($y = 0.046$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

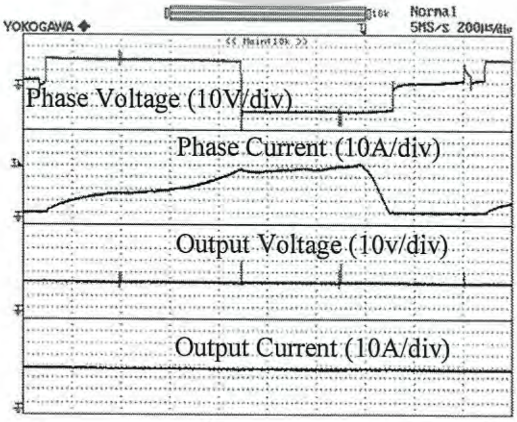


รูปที่ 5.62 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 22V และกระแสเฟสสูงสุด 45A ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

ตารางที่ 5.10 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 45A ที่แรงดันดีซีบัส 25V

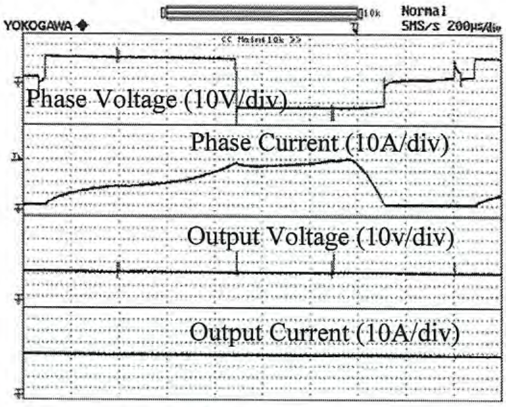
มุมนำกระแส (°)	มุมหยุดนำกระแส (°)	กระแสด้านออก (A)	แรงดันด้านออก (V)	y	P_{out} (W)
-21.5	3.7	35.36	22.33	0.038	789.36
-19.5	4.2	36.07	22.45	0.040	809.77
-15	6.26	38.36	22.54	0.042	864.63
-15	5.5	31.62	22.35	0.044	706.71
-15	4.8	28.19	22.66	0.046	638.78

กรณีที่ 2 ปรับมุมกระตุ้นและ y เพื่อควบคุมให้กระแสเฟสสูงสุดอยู่ที่ 40A โดยควบคุมแรงดันดีซีบัสคงที่ 22V โหลดเป็นความต้านทาน 1Ω ผลจากการคำนวณในสมการที่ (3.12) ค่า y_{opt} มีค่าเท่ากับ 0.039 ซึ่งผลของการวัดสัญญาณกระแสเฟส แรงดันเฟส กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 5.63 ถึงรูปที่ 6.67 และในรูปที่ 6.68 แสดงความสัมพันธ์ของ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุด 40A แรงดันดีซีบัส 22V โดยสามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 5.11

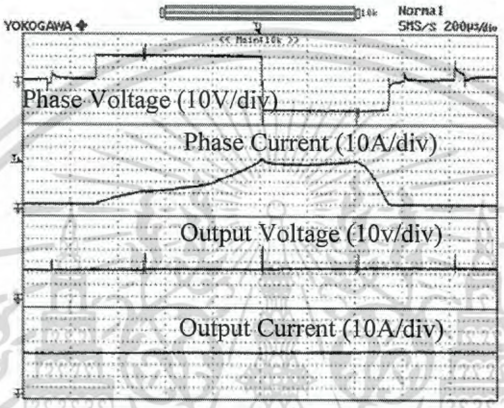


รูปที่ 5.63 มุมนำกระแส -20.8° มุมหยุดนำกระแส 3.85° ($y = 0.035$)

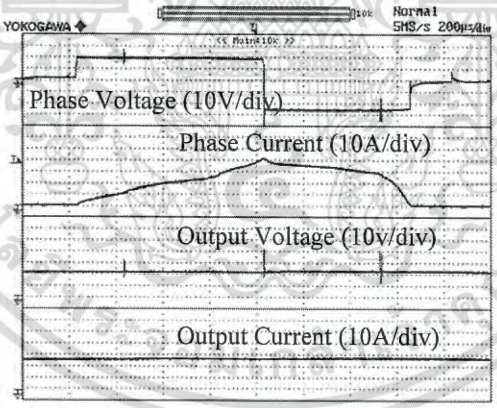
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



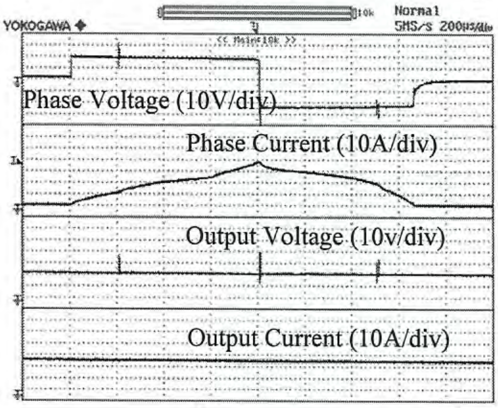
รูปที่ 5.64 มุมนำกระแส -19.8° มุมหยุดนำกระแส 4.15° ($y = 0.037$)



รูปที่ 5.65 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.3° ($y = 0.039$)

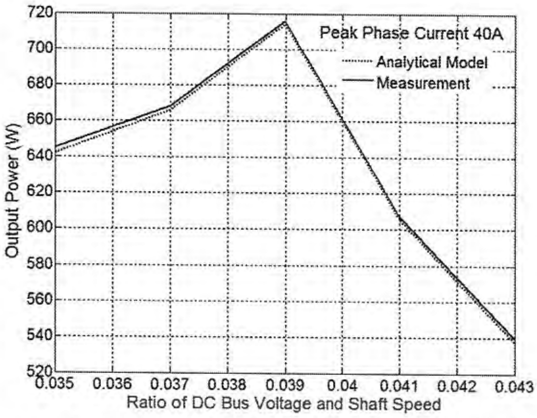


รูปที่ 5.66 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5° ($y = 0.041$)



รูปที่ 5.67 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 4.4° ($y = 0.043$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



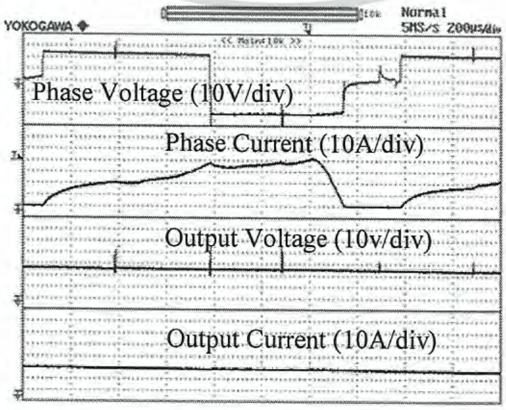
รูปที่ 5.68 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 22V และกระแสเฟสสูงสุด 40A ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

ตารางที่ 5.11 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 40A ที่แรงดันดีซีบัส 22V

มุมนำกระแส (°)	มุมหยุดนำกระแส (°)	กระแสด้านออก (A)	แรงดันด้านออก (V)	y	P_{out} (W)
-20.8	3.85	29.01	22.3	0.035	646.93
-19.8	4.15	30.22	22.1	0.037	667.86
-15	6.3	32.29	22.2	0.039	716.83
-15	5	27.21	22.3	0.041	606.78
-15	4.4	24.32	22.2	0.043	539.90

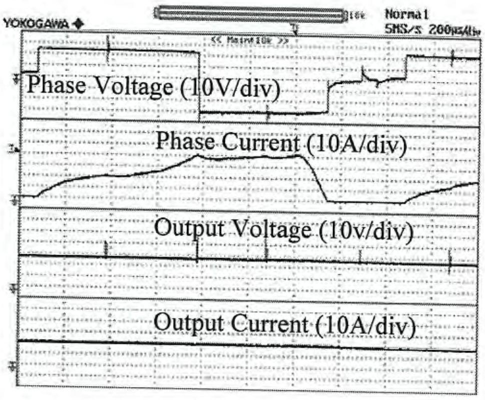
จากรูปที่ 5.68 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของแรงดันดีซีบัสต่อความเร็วโรเตอร์ที่กระแสเฟสสูงสุดอยู่ที่ 0.039 ซึ่งเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม ผลที่ได้จะทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด

กรณีที่ 3 ปรับมุมกระตุ้นและ y เพื่อควบคุมให้กระแสเฟสสูงสุดอยู่ที่ 35A โดยควบคุมแรงดันดีซีบัสคงที่ 22V โหลดเป็นความต้านทาน 1 Ω

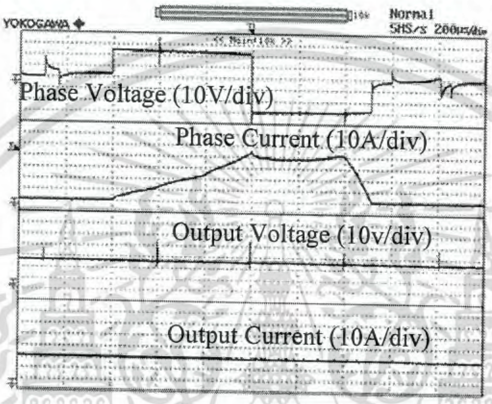


รูปที่ 5.69 มุมนำกระแส -22.5° มุมหยุดนำกระแส 3° ($y = 0.032$)

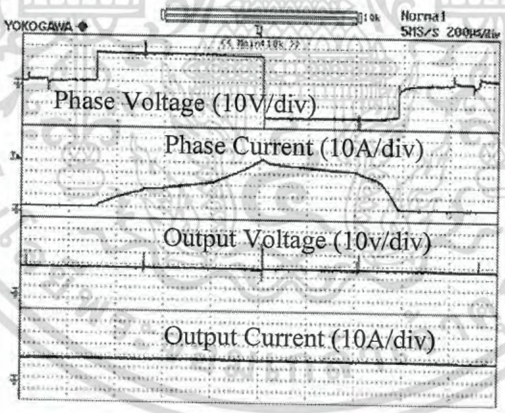
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



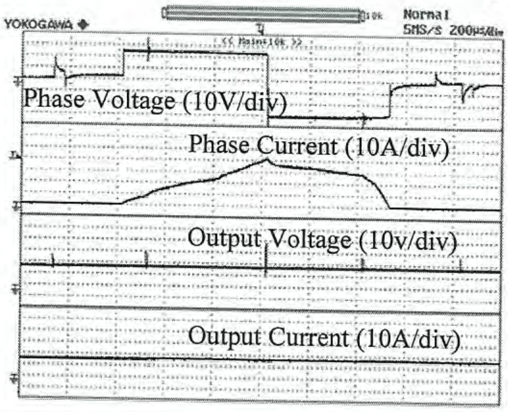
รูปที่ 5.70 มุมนำกระแส -21.5° มุมหยุดนำกระแส 3.31° ($y = 0.034$)



รูปที่ 5.71 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 6.34° ($y = 0.036$)



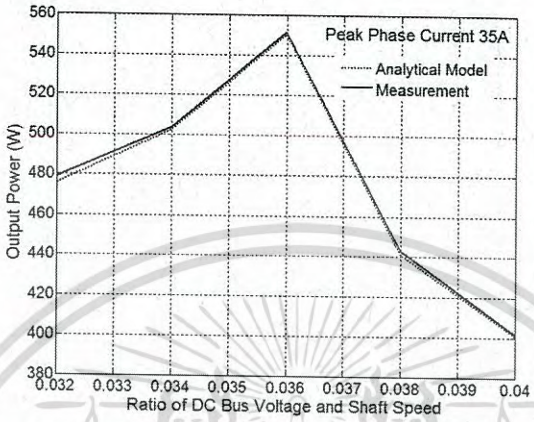
รูปที่ 5.72 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.6° ($y = 0.038$)



รูปที่ 5.73 มุมนำกระแส -15° มุมหยุดนำกระแส 5.1° ($y = 0.040$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการคำนวณในสมการที่ (3.12) ค่า y_{opt} มีค่าเท่ากับ 0.036ซึ่งผลของการวัดสัญญาณกระแสเฟส แรงดันเฟส กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 5.69 ถึงรูปที่ 5.73 และในรูปที่ 5.74 แสดงความสัมพันธ์ของ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุด 35A แรงดันดีซีบัส 22V โดยสามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 5.12



รูปที่ 5.74 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ที่ค่าต่างๆเมื่อควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 22V และกระแสเฟสสูงสุด 35A ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

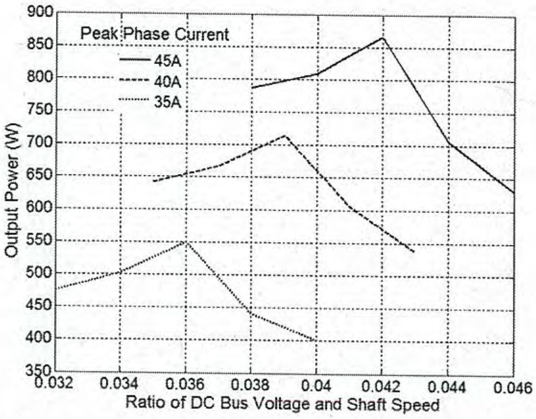
จากรูปที่ 5.74 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของแรงดันดีซีบัสต่อความเร็วโรเตอร์ที่กระแสเฟสสูงสุดอยู่ที่ 0.036 ซึ่งเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม ผลที่ได้จะทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด

ตารางที่ 5.12 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมกระแสเฟส 35A ที่แรงดันดีซีบัส 22V

มุมนำกระแส (°)	มุมหยุดนำกระแส (°)	กระแสด้านออก (A)	แรงดันด้านออก (V)	y	P_{out} (W)
-22.5	3	21.62	22.2	0.032	479.96
-21.5	3.31	22.54	22.4	0.034	504.89
-15	6.34	24.66	22.3	0.036	549.92
-15	5.6	19.95	22.3	0.038	444.88
-15	5.1	18.28	22.1	0.040	403.98

รูปที่ 5.75 แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าสูงสุดทั้ง 3 กรณีเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมและอัตราส่วนของแรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบที่กระแสเฟสสูงสุด ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.12) โดยมีค่าอยู่ที่ 0.042 0.039 และ 0.036 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



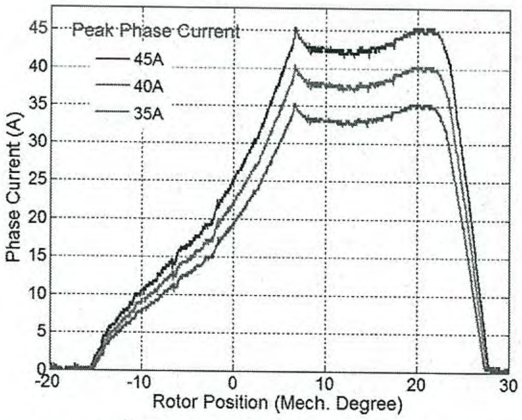
รูปที่ 5.75 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับ y ทั้ง 3 กรณี

5.3.5 ผลการทดลองควบคุมการทำงานของเอสอาร์จีด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วนเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสและที่ตำแหน่งกระแสเฟสสูงสุด $(x=\frac{\psi_k}{\psi_f})$ ซึ่งในการทดลองได้ทำการควบคุมเอสอาร์จีด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้กระแสเฟสสูงสุดอยู่ที่ 35A 40A และ 45A โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมดังแสดงในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการควบคุมกระแสเฟส 35A 40A และ 45A

u (V)	ω (rad/s)	i_{peak} (A)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	θ_{peak} (°)	θ_{ext} (°)	x
27	757	35	-15	6.34	21.86	27.52	0.266
27	692	40	-15	6.30	21.93	27.60	0.266
27	642	45	-15	6.26	22	27.68	0.266

จากตารางที่ 5.13 พบว่ารูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อเอสอาร์จีถูกกระตุ้นด้วยมุมที่เหมาะสมจะมีลักษณะเป็นแบบแฟลทท็อปทั้ง 3 กรณี ดังรูปที่ 5.76 ซึ่งรูปร่างของกระแสเฟสทั้งหมดสามารถนำมาหาค่าที่เหมาะสมของ x ได้โดยแทนค่าลงในสมการที่ (3.4) ซึ่งค่า x_{opt} ที่ได้มีค่า 0.266



รูปที่ 5.76 รูปร่างของกระแสเฟสทั้ง 3 กรณี เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม

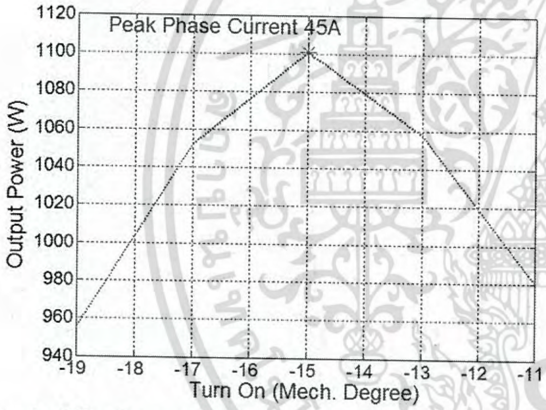
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการหามุมกระตุ้นที่เหมาะสมของเอสอาร์จี ในกรณีที่แรงดันดีซีบัสคงที่ส่วนความเร็วรอบไม่คงที่ การทดลองแบ่งเป็น 3 กรณีดังแสดงในตารางที่ 5.14

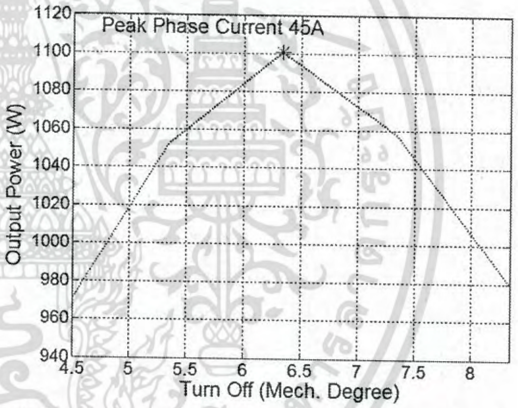
ตารางที่ 5.14 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการควบคุมกระแสเฟส 45A เมื่อแรงดันดีซีบัสคงที่

กรณี	u (V)	ω (rad/s)	i_{peak} (A)	$\theta_{on,opt}$ (°)	$\theta_{off,opt}$ (°)	x_{opt}
1	27	642	45	-15	6.34	0.266
2	27	656	45	-15	6.13	0.266
3	27	740	45	-15	5.91	0.266

การทดลองในกรณีที่ 1 ทำการปรับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุดที่ 45A โดยควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 27V โดยในรูปที่ 5.77 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ

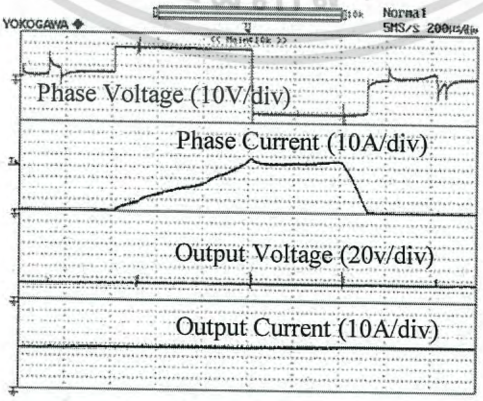


(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ



(ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

รูปที่ 5.77 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีที่ 1



$(\theta_{on} = -15°, \theta_{off} = 6.34, I_L = 39.86A, U_L = 27.6V, P_{out} = 1{,}100.14W)$

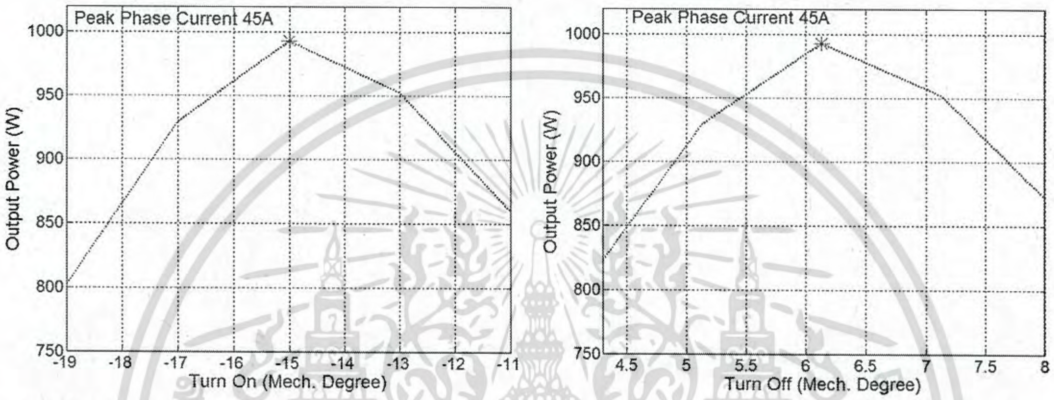
รูปที่ 5.78 รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมเอสอาร์จีที่แสดงในตารางที่ 5.14 ประกอบด้วยค่า x_{opt} $\theta_{on,opt}$ ซึ่งมีค่าคือ 0.266 และ -15° ตามลำดับ สำหรับค่า $\theta_{off,opt}$ หาได้จากสมการที่ (3.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.34°

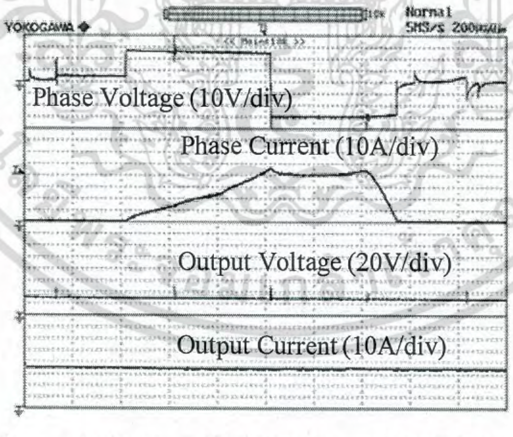
รูปที่ 5.78 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 1 เมื่อเอสอาร์จีถูกกระตุ้นด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้กำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด และกระแสเฟสมีรูปร่างแบบแฟลททอ็ป

การทดลองในกรณีที่ 2 ทำการปรับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุดที่ 45A โดยควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 27V โดยในรูปที่ 5.79 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ



(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ (ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

รูปที่ 5.79 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีที่ 2



$$(\theta_{on} = -15°, \theta_{off} = 6.13, I_L = 35.97A, U_L = 27.6V, P_{out} = 992.77W)$$

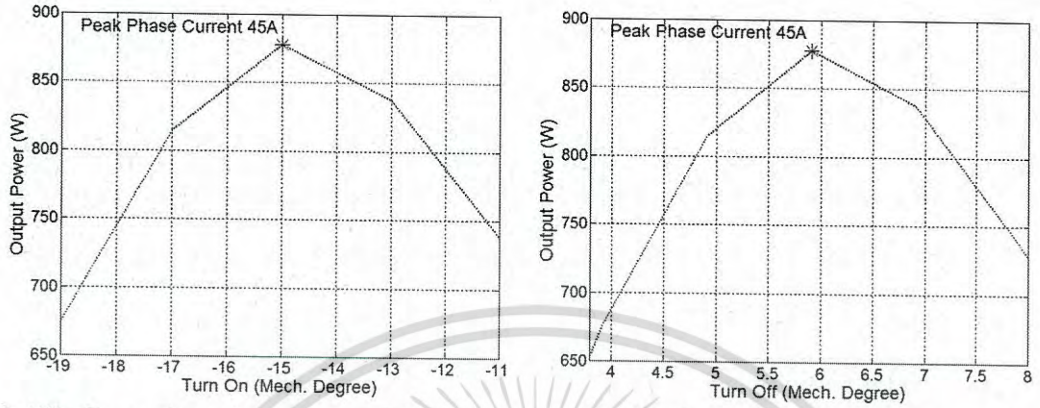
รูปที่ 5.80 รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 2

พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมเอสอาร์จีที่แสดงในตารางที่ 5.14 ประกอบด้วยค่า x_{opt} $\theta_{on,opt}$ ซึ่งมีค่าคือ 0.266 และ -15° ตามลำดับ สำหรับค่า $\theta_{off,opt}$ หาได้จากสมการที่ (3.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.13°

รูปที่ 5.80 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 2 เมื่อเอสอาร์จีถูกกระตุ้นด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้กำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด และกระแสเฟสมีรูปร่างแบบแฟลททอ็ป

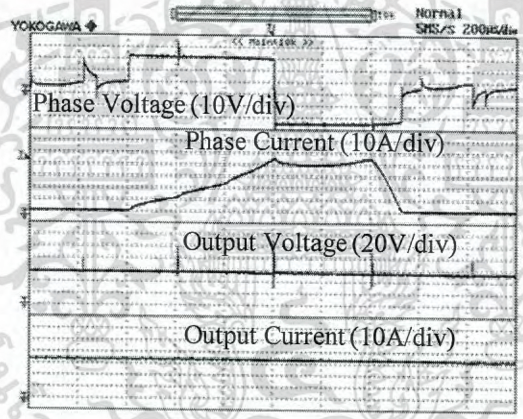
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในกรณีที่ 3 ทำการปรับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุดที่ 45A โดยควบคุมแรงดันดีซีบัสที่ 27V โดยในรูปที่ 5.81 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จีเทียบกับมุมกระตุ้นที่ตำแหน่งต่างๆ



(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ (ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

รูปที่ 5.81 กำลังไฟฟ้าด้านออกเทียบกับมุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ สำหรับกรณีที่ 3



$$(\theta_{on} = -15°, \theta_{off} = 5.91, I_L = 31.78A, U_L = 27.6V, P_{out} = 877.13W)$$

รูปที่ 5.82 รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 3

พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมเอสอาร์จีที่แสดงในตารางที่ 5.14 ประกอบด้วยค่า x_{opt} $\theta_{on,opt}$ ซึ่งมีค่าคือ 0.266 และ -15° ตามลำดับ สำหรับค่า $\theta_{off,opt}$ หาได้จากสมการที่ (3.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.91°

รูปที่ 5.82 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 3 เมื่อเอสอาร์จีถูกกระตุ้นด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้กำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุด และกระแสเฟสมีรูปร่างแบบแฟลทท็อป

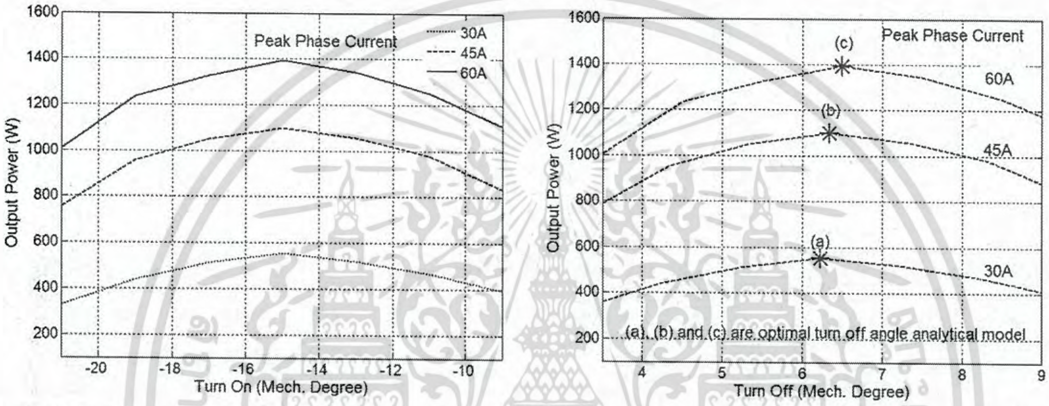
ทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการหามุมกระตุ้นที่เหมาะสมของเอสอาร์จี ในกรณีที่แรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบไม่คงที่ โดยในการทดลองแบ่งเป็น 3 กรณีดังแสดงในตารางที่ 5.15 จากรูปที่ 5.83 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกที่ตำแหน่งมุมกระตุ้นต่างๆ ทั้ง 3 กรณี โดยในรูปที่ 5.83 (ก) แสดงให้เห็นว่ามุมนำกระแสที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดอยู่ที่ –15° ทุกกรณี และในรูปที่ 5.83(ข) แสดงค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสตำแหน่งต่างๆ โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง (a) (b) และ (c) เป็นตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดทั้ง 3 กรณีตามลำดับ และในรูปที่ 5.84 แสดงรูปร่างของกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกกระตุ้นด้วยมุมที่เหมาะสมทั้ง 3 กรณีตามลำดับ

ตารางที่ 5.15 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม เมื่อแรงดันดีซีบัสและความเร็วรอบไม่คงที่

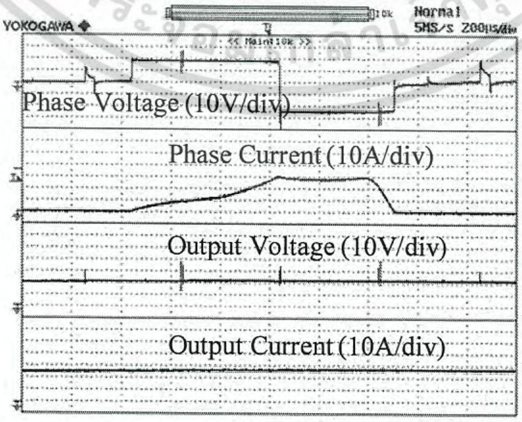
กรณี	u (V)	ω (rad/s)	i_{peak} (A)	$\theta_{on,opt}$ (°)	θ_{peak} (°)	θ_{ext} (°)	y_{opt}	$\theta_{off,opt}$ (°)
1	21	656	30	-15	21.81	27.46	0.266	6.23
2	27	642	45	-15	22	27.68	0.266	6.34
3	37	740	60	-15	22.28	28	0.266	6.50



(ก) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมนำกระแสต่างๆ (ข) กำลังไฟฟ้า ณ ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสต่างๆ

รูปที่ 5.83 กำลังไฟฟ้าด้านออกที่มุมกระตุ้นตำแหน่งต่างๆ ทั้ง 3 กรณี

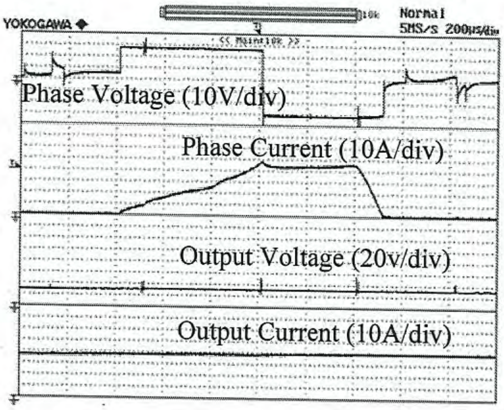
พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมเอสอาร์จีที่แสดงในตารางที่ 5.15 ประกอบด้วยค่า x_{opt} $\theta_{on,opt}$ ซึ่งมีค่าคือ 0.266 และ -15° ตามลำดับ สำหรับค่า $\theta_{off,opt}$ หาได้จากสมการที่ (3.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.23° 6.34° และ 6.50° ดังแสดงในรูปที่ 5.84(ก) ถึง 5.84(ค) ตามลำดับ



$$(\theta_{on} = -15°, \theta_{off} = 6.23°, I_L = 25.87A, U_L = 21.4V, P_{out} = 553.62W)$$

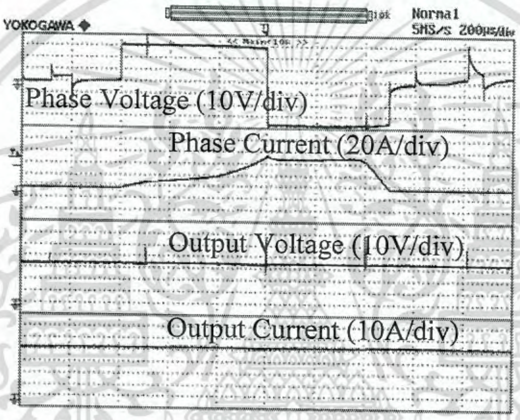
(ก) รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$(\theta_{on} = -15°, \theta_{off} = 6.34°, I_L = 39.86A, U_L = 27.6V, P_{out} = 1{,}100.14W)$

(ข) รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 2



$(\theta_{on} = -15°, \theta_{off} = 6.50°, I_L = 37.27A, U_L = 37.4V, P_{out} = 1{,}393.9W)$

(ค) รูปร่างกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม สำหรับกรณีที่ 3

รูปที่ 5.84 รูปร่างของกระแสเฟสเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม ทั้ง 3 กรณี

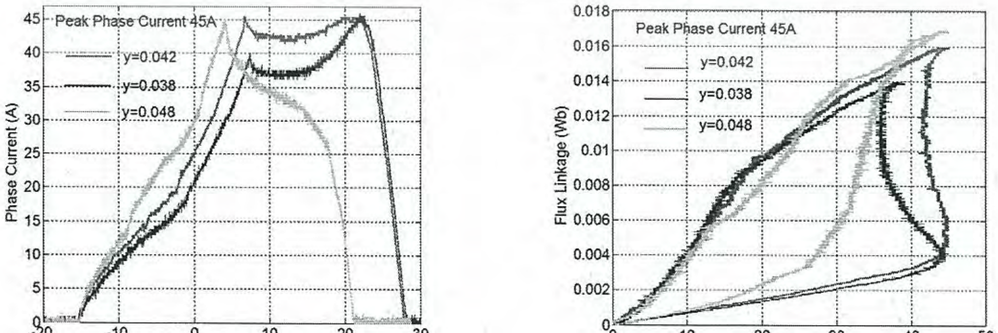
ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อคงที่ค่ามุมนำกระแสที่เหมาะสมอยู่ที่ -15° แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสามารถคำนวณหาค่ามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสมได้ และเมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม ระบบจะเกิดกำลังไฟฟ้าด้านออกสูงสุดและรูปร่างของกระแสเฟสมีลักษณะแบบแฟลทท็อปทั้ง 3 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรควบคุมของเอสอาร์จีในโหมดกระแสพัลส์เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 2 วิธี วิธีแรกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเหนี่ยวนำได้ถูกประยุกต์มาจากฟังก์ชันเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ซึ่งต้องการค่าพารามิเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องและกระแส ที่ตำแหน่งตรงขั้ว และไม่ตรงขั้ว โดยความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความเหนี่ยวนำได้ถูกยืนยันจากการเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิธีการควบคุมตำแหน่งของมุม (APC) รูปร่างของกระแสเฟสส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าด้านออกของเอสอาร์จี โดยวิธีการปรับมุมกระตุ้นและคงที่ค่าแรงดันดีซีบัสกับความเร็วโรเตอร์ไว้ สมการกระแสเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อที่จะตรวจสอบรูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยสมการกระแสเฟสได้มาจากการแทนค่าแบบจำลองความเหนี่ยวนำลงในสมการแรงดัน ความถูกต้องของสมการกระแสถูกยืนยันจากผลจากการจำลองการทำงานและการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งรูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสมที่ทำให้เอสอาร์จีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ “แฟลทท็อป” ในการวิเคราะห์หาตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมจะถูกวิเคราะห์จากรูปร่างกระแสเฟสที่เหมาะสมโดยใช้สมการกระแสที่นำเสนอ สำหรับวิธีที่สองรูปร่างกระแสเฟสแบบแฟลทท็อป ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหามุมกระตุ้นที่เหมาะสมโดยคงค่ามุมนำกระแสไว้ เพื่อที่จะให้ทราบค่ามุมนำกระแสที่เหมาะสม สมการกระแสได้ถูกนำเสนออยู่ในเทอมของตัวแปรควบคุมซึ่งถูกประยุกต์มาจากฟังก์ชันเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยรูปร่างของกระแสที่ได้จากการทดลองและจากวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของสมการกระแสที่ได้นำเสนอ มุมนำกระแสที่เหมาะสมซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองมีค่าเท่ากันคือ -15° สัดส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่ตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสและมุมที่ทำให้เกิดกระแสสูงสุดของรูปร่างกระแสแบบแฟลทท็อป ได้ถูกวิเคราะห์เพื่อที่จะหามุมหยุดนำกระแสที่เหมาะสม ผลจากการทดลองเอสอาร์จีสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อควบคุมด้วยมุมกระตุ้นที่เหมาะสม โดยรูปร่างกระแสเฟสมีลักษณะเป็นแบบแฟลทท็อป



(ก) รูปร่างกระแสเฟส (ข) วงรอบปิดการแปลงผันพลังงาน

รูปที่ 6.1 รูปร่างของกระแสเฟสทั้ง 3 แบบที่ได้จากการทดลอง เมื่อ i_{peak} ที่ 45A และ θ_{on} ที่ -15°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 6.1 เมื่อควบคุมกระแสเฟสสูงสุดของเอสอาร์จีให้เท่ากัน แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของกระแสเฟสแบบแฟลทท็อป เอสอาร์จีจะกำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งกระแสเฟสในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันต้านกลับสมดุลกับแรงดันดีซีบัส $(e = u)$ เมื่อแรงดันต้านกลับน้อยกว่าแรงดันดีซีบัส $(e < u)$ เอสอาร์จีจะกำเนิดค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกต่ำสุดซึ่งรูปร่างของกระแสจะมีลักษณะลดลงหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแส และเมื่อแรงดันต้านกลับมากกว่าแรงดันดีซีบัส $(e > u)$ รูปร่างของกระแสจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นหลังจากตำแหน่งมุมหยุดนำกระแสซึ่งเอสอาร์จีจะกำเนิดกำลังไฟฟ้าสูงแต่น้อยกว่าในกรณีที่แรงดันต้านกลับสมดุลกับแรงดันดีซีบัส

การสูญเสียหลักของระบบเกิดจากการสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper loss : P_{Cu}) สามารถหาค่าได้จาก $P_{Cu} = N_{ph} I_{rms}^2 R$ [34] ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการคำนวณขึ้นอยู่กับกระแส และการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss : P_C) สามารถหาได้คำนวณได้จาก $P_C = K_h f B_m^{a+bB_m} + K_e f^2 B_m^2$ [35] ขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ซึ่งการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องขึ้นอยู่กับกระแสเป็นปัจจัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้ค่าของกระแสที่เกิดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่ามากกว่าค่ากระแสที่เกิดจากการทดลอง เนื่องจากแบบจำลองไม่มีคิดค่าความต้านทานเฟส ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองจึงมีความแตกต่างเล็กน้อยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อเอสอาร์จีถูกควบคุมด้วยตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่ได้นำเสนอ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดโดยรูปร่างกระแสที่เกิดขึ้นเป็นแบบแฟลทท็อป และเมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าทางด้านออกจะใช้กระแสเป็นตัวแปรหลักในการคำนวณ ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองจึงมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้นี้ยืนยันถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่า ข้อควรระวังที่สุดสำหรับชุดทดลองควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดสวิทช์รีลัคแตนซ์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์แบบ Incremental Encoder ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบสูงๆ น็อตสกูรสำหรับยึดตัวตรวจจับตำแหน่งกับมอเตอร์อาจมีการคลายออก ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นอาจทำให้มุมที่ใช้ในการกระตุ้นให้มอเตอร์ทำงานเกิดการคลาดเคลื่อนตาม สำหรับพลังงานภายนอกคือแรงดันดีซีบัสสำหรับจ่ายเข้าไปให้มอเตอร์ทำงานในสโตรกแรกต้องมีกระแสสูงเพียงพอและจ่ายกระแสได้ต่อเนื่อง ถ้ากระแสไม่สูงและจ่ายกระแสได้ไม่ต่อเนื่องรูปร่างของกระแสเฟสที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถเกิดรูปร่างแบบแฟลทท็อปได้ ซึ่งกระแสเฟสจะเกิดได้ในกรณีเดียว คือกรณีที่แรงดันต้านกลับน้อยกว่าแรงดันดีซีบัสเท่านั้น ในส่วนของวงจรป้องกันกระแสเกินควรเพิ่มวงจรในส่วนของฮาร์ดแวร์ เนื่องจากในชุดทดลองที่ใช้นี้ป้องกันกระแสเกินโดยการควบคุมสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็มจากตัวประมวลผลแบบสัญญาณดิจิทัลเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Yan Cai. Qingxin Yang, Lihua Su, Yanbin Wen, and Yiming You. "Nonlinear Modeling for Switched Reluctance Motor by Measuring Flux Linkage Curves." **Prof. 2nd IEEE Conf. On Com. and Tech.**, 2010. pp. V6-47-V6-51

[2] H. P. Chi, R. L. Lin, and J. F. Chen. "Simplified flux-linkage model for switched-reluctance motors." Proc **IEE Conf. On Pow. Appl.,** vol. 152, no. 3, May. 2005. pp. 577-583

[3] Iordanis Kioskeridis and Christos Mademlis. "Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators." **IEEE Trans. On Pow. Elec.,** vol. 21, no. 4, Jul. 2006. pp. 1062-1071

[4] Yilmaz Sozer and David A. Torrey. "Closed Loop Control of Excitation Parameters for High Speed Switched-Reluctance Generators." **IEEE Trans. On Pow. Elec.,** vol. 19, no. 2, Mar. 2004. pp. 355-362

[5] Roberto Cardenas, Ruben Pena, Marcelo Perez, Jon Clare, Greg Asher, and Patrick Wheeler. "Power Smoothing Using a Flywheel Driven by a Switched Reluctance Machine." **IEEE Trans. On Ind. Elec.,** vol. 53, no. 4, Aug. 2006. pp. 1086-1093

[6] P. Asadi, M. Ehsani, and B. Fahimi. "Design and Control Characterization of Switched Reluctance Generator for Maximum Output power." **IEEE.,** 2006. pp. 1639-1644

[7] Emil P., Liviu S., and Ioan-Adrian V."Switched Reluctance Motor Analytical Models Comparative Analysis." **IEEE.,** 2010. pp. 285-290

[8] Syed A. and Iqbal H. "A Geometry Simplified Analytical Model of Switched Reluctance Machines for Real-Time Controller Implementation." **IEEE.,** 2002. pp. 839-844

[9] T.J.E. Miller, M. Glinka, M. McGip, C. Cossar, G. Gallegos-Lopez, D. Ionel, and M. Olaru. "Ultra-fast Model of the Switched Reluctance Motor." **IEEE.,** 1998. pp. 319-326

[10] Xu L. Y. and Ruckstater E. "Direct Modeling of Switched Reluctance Machine by Couple Field-Circuit Method Energy Conversion." **IEEE Trans.,** vol. 10, no. 3, 1995. pp. 446-454

[11] T.J.E. Miller and M. McGilp. "Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design." **Prof. IEE.,** vol. 137, no. 6, Nov. 1990. pp. 337-347

[12] Christophe Roux and Medhat M. Morcos. "On the Use of a Simplified Model for Switched Reluctance Motors." **IEEE Trans. On Con.,** vol. 17, no. 3, Sep. 2002. pp. 400-405

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] T. J. E. Miller. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines.** Oxford. UK. Newnes. 2001.

[14] T. Sawata, P.C. Kjaer, C. Cossar, and T. J. E. Miller. "A Control Strategy for the Switched Reluctance Generator." **Proc. IEEE. Conf. On Elec.,** 1998. pp. 2131-2136

[15] D. A. Torrey. "Switched reluctance generators and their control." **IEEE. Trans. On Ind. Elec.,** vol. 49, no. 1, Feb. 2002. pp. 3-14

[16] D. E. Cameron and J. H. Lang. "The control of high-speed variable reluctance generators in electric power systems." **IEEE. Trans. On Ind. Appl.,** vol. 29, no. 6, Dec. 1993. pp. 1106-1109

[17] P. C. Kjaer, C. Cossar, J. J. Gribble, Y. Li, and T. J. E. Miller. "Switched reluctance generator control using an inverse machine model." **Proc. ICEM'94,** Paris, France 1994. pp. 380-385

[18] C. A. Ferreira, S. R. Jones, W. S. Heglund, and W. D. Jones. "Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application." **IEEE. Trans. On Ind. Appl.,** vol. 31, no. 3, Jun. 1995. pp. 553-561

[19] I. Husain, A. Radun, and J. Nairus. "Fault analysis and excitation requirements for switched reluctance generators." **IEEE. Trans. On Ener. Conv.,** vol. 17, no. 1, Mar. 2002. pp. 67-72

[20] T. Sawata, P.C. Kjaer, C. Cossar, and T. J. E. Miller. "A Study on operation under faults with the single-phase SR generator." **IEEE. Trans. On Ind. Appl.,** vol. 35, no. 4, Aug. 1999. pp. 782-789

[21] Jawad Faiz and Reza Fazai. "Optimal Excitation Angles of a High Speed Switched Reluctance Generator by Efficiency Maximization." **Proc. EPE-PEMC'06,** Slovenia, 2006. pp. 287-291

[22] Sandeep Narla, Yilmaz Sozer, and Iqbal Husain."Switched Reluctance Generator Controls for Optimal Power Generation and Battery charging." **IEEE.,** 2011. pp. 3575-3581

[23] Hoang Le-Huy."Performance Study of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Generator Using a Nonlinear Model Based on Magnetization Curves." **IEEE.,** 2009. pp. 3910-3915

[24] Kai Xin, Qionghua Zhan, and Jianwu Luo. "A New Simple Sensorless Control Method for Switched Reluctance Motor Drives" **Journal of Elec. Eng. & Tech.,** Vol. 1, No. 1, 2006. pp. 52-57

[25] R. Cardenas, W.F. Ray, and G. M. Asher."Switched reluctance generators for wind energy applications." **Proc. IEEE ESC.,** 1995. pp. 559-564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[26] B. Fahimi, A. R. B. Emadi, and Jr. Sepc. "A switched reluctance machine base startor/generator for more electric cars" **IEEE. Trans. On Energ. Conv.,** 2004. pp. 116-124

[27] Xin cao, Zhiquan Deng, Tian Yao, Jun Cai, and Zheng Zhuang. "Analysis and Application of Phase current in Switched Reluctance Generators." **IEEE Trans. On Appl. Supercon.,** vol. 20, 2010. pp. 1063-1067

[28] S. Yu, F. Zhang, D. H. Lee, and J. W. Ahn, "High efficiency operation of a switched reluctance generator over a wide speed range," **Journal of Power Electronics**, vol. 15, no. 1, 2015, pp. 123–130

[29] M. Stiebler and K. Liu, "An analytical model of switched reluctance machines," **IEEE Trans. On Ener. Conv.**, vol. 14, no. 4, Dec. 1999, pp. 1100–1107

[30] R. L. Lin, J. F. Chen and H. P. Chi, "Spice-based flux-linkage model for switched reluctance motors", **in Proc. Conf. Elec. Pow. Appl.**, 2005, pp. 1468-1476

[31] M. Krishnamurthy, B. Fahimi, and C. S. Edrington, "On the measurement of mutual Inductance for a switched reluctance machine," **in Proc. Conf. Pow. Elec. Spec.**, 2006, pp. 1-7

[32] H. K. Bae and R. Krishnan, "A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance", **in Proc. Conf. Indus. Elec. Soci.,** 2000, pp. 369-374

[33] S. Yu, D. H. Lee, and J. W. Ahn, "Efficiency analysis of switched reluctance generator according to current shape under rated speed", **Journal of Inter. Conf. on Elec. Mach. and Sys.**, Nov 2013, vol. 2, no. 4, pp. 491-497

[34] P. N. Materu and R. Krishan, "Estimation of switched reluctance motor loses," **IEEE Trans. On Ind. Appl.**, Jun. 1992, vol. 28, no. 3, pp. 668–679

[35] P. Rafajdus, V. Hrabovcova, and P. Hudak, "Investigation of losses and efficiency in switched reluctance motor," **in Proc. Conf. Pow. Elec. and Mot. Cont.,** 2006, pp. 296-301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

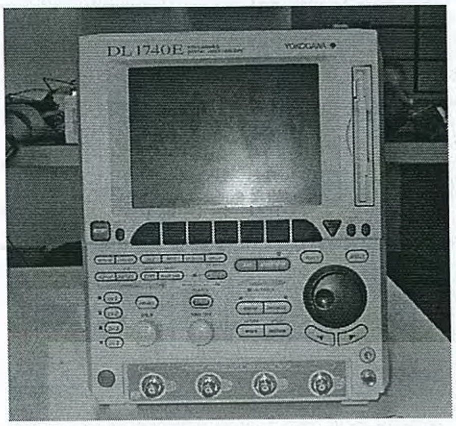
ภาคผนวก ก.

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

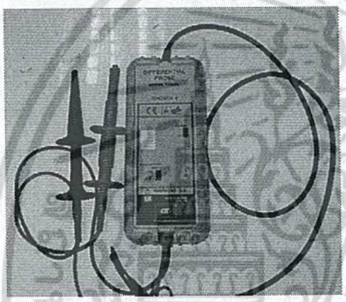
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

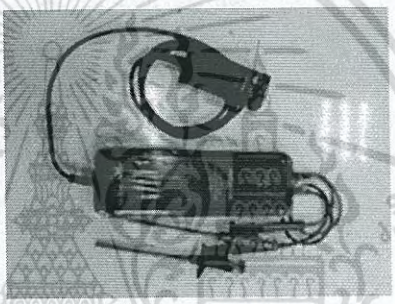
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ออสซิลโลสโคป



2. สายวัดสัญญาณแรงดัน (DIFFERENTIAL PROBE)





3. สายวัดสัญญาณกระแส (CURRENT PROBE)

4. มัลติมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Pairote Thongprasri and Supat Kittiratsatcha. “Optimal Excitation Angles of a Switched Reluctance Generator for Maximum Output Power.” **Journal of Electrical Engineering & Technology (JEET),** vol. 9, no. 5, Sep. 2014. pp. 1527-1536
2. Pairote Thongprasri and Supat Kittiratsatcha. “Analysis of Control Variables to Maximize Output Power for Switched Reluctance Generators in Single Pulse Mode Operation.” **Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES),** vol. 31, no. 10, Oct. 2016. pp. 1208-1220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

www.jeet.or.kr

Vol.9, No.5 September 2014

ISSN(Print) 1975-0102 / ISSN(Online) : 2093-7423

Journal of Electrical Engineering & Technology

Electric Power Engineering

Real-Time Maximum Power Point Tracking Method Based on Three Points Approximation by Digital Controller for PV System --- Seung-Tak Kim, Tae-Ho Bang, Seong-Chan Lee and Jung-Wook Park 1447

A Simple Power Management Scheme with Enhanced Stability for a Solar PV/Wind/Fuel Cell Fed Standalone Hybrid Power Supply using Embedded and Neural Network Controller --- Thangavel. S and Saravanan. S 1454

Power Loss Modeling of Individual IGBT and Advanced Voltage Balancing Scheme for MMC in VSC-HVDC System --- Gum Tae Son, Soo Hyoung Lee and Jung-Wook Park 1471

Reliability Evaluation Technique for Electrical Distribution Networks Considering Planned Outages --- Bo Hu, Xiao-Hui He and Kan Cao 1482

Hardware-in-the-loop Simulation Method for a Wind Farm Controller Using Real Time Digital Simulator --- Gyeong-Hun Kim, Jong-Yul Kim, Jin-Hong Jeon, Seul-Ki Kim, Eung-Sang Kim, Ju-Han Lee, Minwon Park and In-Keun Yu 1489

Power Interruption Costs to Commercial Customers of Electricity in Korea --- Dong-Sub Kim and Kil-Sin Kim 1495

A Techno-Economic Feasibility Analysis on LVDC Distribution System for Rural Electrification in South Korea --- David Afamefuna, Il-Yop Chung, Don Hur, Ju-Yong Kim and Jintae Cho 1501

Modeling of a Compressed Air Energy Electrification by Using Induction Generator Based on Field Oriented Control Principle --- Varin Vongmanee and Veerapol Monyakul 1511

Probabilistic Assessment of Total Transfer Capability Using SQP and Weather Effects --- Kyu-Ho Kim, Jin-Wook Park, Sang-Bong Rhee, Sungwoo Bae, Kyung-Bin Song, Junmin Cha and Kwang Y. Lee 1520

Electric Machinery and Power Electronics

Optimal Excitation Angles of a Switched Reluctance Generator for Maximum Output Power --- Pairote Thongprasri and Supat Kittiratsatcha 1527

Single Input Multi Output DC/DC Converter: An Approach to Voltage Balancing in Multilevel --- M. R. Banaei, B. Nayeri and E. Salary 1537

An Adaptive Optimization Algorithm Based on Kriging Interpolation with Spherical Model and its Application to Optimal Design of Switched Reluctance Motor --- Bin Xia, Ziyan Ren, Yanli Zhang and Chang-Seop Koh 1544

Time Domain Based Digital Controller for Buck-Boost Converter --- Vijayalakshmi, S and Sree Renga Raja, T 1551

Control-to-output Transfer Function of the Open-loop Step-up Converter in CCM Operation --- Faqiang Wang and Xikui Ma 1562

Torque Ripple Minimization in Direct Torque Control of Brushless DC Motor --- Zhenguo Li, Songfa Zhang, Shenghai Zhou and Jin-Woo Ahn 1569

Minimization of Torque Ripple for an IPMSM with a Notched Rotor Using the Particle Swarm Optimization Method --- Pan Seok Shin, Ho Youn Kim and Yong Bae Kim 1577

A Simple Strategy for Sensorless Speed Control for an IPMSM During Startup and Over Wide Speed --- Hyun-Woo Sim, June-Seok Lee and Kyo-Beum Lee 1582

A Novel Single Phase Soft Switched PFC Converter --- Nihan ALTINTAŞ 1592

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

JOURNAL of ELECTRICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY

itor-In-Chief
eseok Choi Gyeongsang National University, Korea
E-mail: jschoi@gnu.ac.kr
Tel: +82-55-772-1715
Fax: +82-55-772-1719

Co Editor-In-Chief
Kunihiko Hidaka The University of Tokyo, Japan
E-mail: hidaka@hvg.t.u-tokyo.ac.jp
Tel: +81-3-5841-6654
Fax: +81-3-5841-6068

Editors

yongjun Lee
orea University, Korea
mail: leeb@korea.ac.kr
l: +82-2-3290-3242
x: +82-2-921-0544

ng-Pyo Hong
nyang University, Korea
mail: hongjp@hanyang.ac.kr
l: +82-2-2220-0455
x: +82-2-2220-4465

Suk Won Min
Soonchunhyang University, Korea
E-mail: swonmin@sch.ac.kr
Tel: +82-41-530-1338
Fax: +82-41-530-1548

Il Hwan Kim
Kwangwon University, Korea
E-mail: ihkim@kangwon.ac.kr
Tel: +82-33-250-6347
Fax: +82-33-242-2059

Mohammad Shahidehpour
Illionois Institute of Technology, USA
E-mail: ms.@iit.edu
Tel: +1-312-567-5737

Zhengming Zhao
Tsinghua University, China
E-mail: zhaozm@mail.tsinghua.edu.cn
Tel: +86-10-6277-3237

Minoru Sasaki
Gifu University, Japan
E-mail: sasaki@gifu-u.ac.jp
Tel&Fax: +81-58-293-2541

Editorial Board

ishnu P. Pal	Indian Institute of Technology, Delhi, INDIA
young-Kuk Lee	Sungkyunkwan University, Korea
han Park	Seoul National University, Korea
hang-Hoi Ahn	Yeungnam University, Korea
aeseok Rho	Korea University of Technology and Education, Korea
ongjin Kweon	KEPCO, Korea
ong Jun Kim	Cheongju University, Korea
aryar Jabbari	University of California, USA
eun Ho Lee	Kookmin University, Korea
iri.Venkataramanan	University of Wisconsin-Madison, USA
. Asama	University of Tokyo, Japan
o Chan Kim	Jeju National University, Korea
ongrae Kim	Soonchunhyang University, Korea
yang-beom Lee	Soongsil University, Korea
yeong-Seok Kim	Chung-Ang University, Korea
yung Chul Kim	Korea Railroad Research Institute, Korea
ae Young Yoon	Korea Electrotechnology Research Institute, Korea
ae-Hyoung Park	Dankook University, Korea
ang-Young Choi	Chungnam National University, Korea
in-Woo Jung	Dongguk University, Korea
ong-Bae Park	Konkuk University, Korea
ong-Eun Ha	Seoul National University of Science and Technology, Korea
Joon Goo Park	Kyungpook National University, Korea
Joung-hu Park	Soongsil University, Korea
Jung-Wook Park	Yonsei University, Korea
Jung-Ik Ha	Seoul National University, Korea
Mahmud Fotuhi-Firuzabad	Sharif University of Technology, Iran
Nakazawa Nobyaki	Gunma University, Japan
Nam H. Jo	Soongsil University, Korea
Nobuaki Nakazawa	Gunma University, Japan
Rae-Young Kim	Hanyang University, Korea
Rajesh Karki	University of Saskatchewan, Canada
Raj K. Aggarwal	University of Bath, UK
Sang Mo Koo	Kwangwoon University, Korea
Sang Shin Kwak	Chung-Ang University, Korea
Seong-Cheol Kim	Seoul National University, Korea
Sol Kim	Yuhan College, Korea
Soohee Han	Konkuk University, Korea
Tae Young Ma	Gyeongsang National University, Korea
Tae Kyun Kim	KEPCO, Korea
Wangheon Lee	Hansei University, Korea
Yeong Han Chun	Hongik University, Korea
Yong Moo Chang	Hanyang University, Korea
Y. C. Kang	Chonbuk National University, Korea

Secretariat
Gilsoo Jang
Korea University, Korea
E-mail: gjang@korea.ac.kr
Tel: +82-2-3290-3246
Fax: +82-2-3290-3692

Manuscript Editor
Sohee Park
E-mail: jeet@kiee.or.kr
Tel: +82-2-553-0151
Fax: +82-2-566-9957

HE JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY is a publication of The Korean Institute of Electrical Engineers. Responsibility for the contents rests upon the authors and not upon KIEE. The Journal is published bimonthly, appearing on the first day of January, March, May, July, September, November.

Printing Date : August 25, 2014 **Publication Date** : September 1, 2014

ndexed/abstracted in:
Science Citation Index Expanded (SCIE), CC/EC&T (Current Contents-Engineering, Computing &Technology), SCOPUS, National Research Foundation of Korea Index.

The Korean Institute of Electrical Engineers
Tel: +82-2-553-0151 Fax: +82-2-566-9957
URL: http://www.jeet.or.kr
E-mail: jeet@kiee.or.kr

J Electr Eng Technol Vol. 9, No. 5: 1527-1536, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2014.9.5.1527

ISSN(Print) 1975-0102
ISSN(Online) 2093-7423

Optimal Excitation Angles of a Switched Reluctance Generator for Maximum Output Power

Pairote Thongprasri† and Supat Kittiratsatcha*

Abstract – This paper investigates the optimal values of turn-on and turn-off angles, and ratio of flux linkage at turn-off angle and peak phase current positions of optimal control for accomplishing maximum output power in an 8/6 Switched Reluctance Generator (8/6 SRG). Phase current waveform is analyzed to determine optimal excitation angles (optimal turn-on and turn-off angles) of the SRG for maximum output power which is applied from a nonlinear magnetization curve in terms of control variables (dc bus voltage, shaft speed, and excitation angles). The optimal excitation angles in single pulse mode of operation are proposed via the analytical model. Simulated and experimental results have verified the accuracy of the analytical model.

Keywords: Switched reluctance generator, Output power, Excitation angles, Magnetization curve, Analytical model

1. Introduction

Switched reluctance generators (SRG) has been applied to many fields because of its merits such as low manufacturing cost, low inertia, fault tolerance [1, 2] high efficiency and reliability [3]. However, an SRG requires position sensor and produces acoustic noise and vibration [2, 3]. Torque production and energy conversion process of the SRG are described [4], and the SRG control systems for regulating speed and output power use a DSP controller as processor with excitation angles from a ROM-based table of switch positions. SRGs have proved for some applications, for example, starter/generator for gas turbine of aircrafts running at constant speed and connected to utility line [3] generating maximum output power depends on optimal excitation angles due to dc bus voltage and shaft speed are constant, wind generator connected with a fixed voltage unity line [5] so maximum output power depends on optimal excitation angles at each shaft speed, starter alternator in car [6] generating maximum output power depends on optimal excitation angles at each shaft speed and dc bus voltage due to its voltage may change during charging or discharging periods. To control generating maximum output power of SRG we must know relationship of control variables included dc bus voltage, shaft speed, and excitation angles. However there is no analytical equation for output power in terms of design parameters and control variables due to highly nonlinear characteristics of an SRG, therefore iterative simulation and experiments of an SRG have been used for finding output power profile [7]. Almost simulation models used to study generating maximum output power of SRG are based on lookup-table techniques [8], magnetic equivalent circuit analysis [9], cubic-spline interpolations [10], and finite-element analysis (FEA) [11] which are very accurate, however these models require either numerous values of flux-linkage and current position or information magnetic properties about an SRG. A simple model of the nonlinear magnetization characteristics of an SRG has been proposed [12, 13] which is easy to build, its accuracy, and the machine geometry is unknowable. Finding the output power requires the knowledge of the current waveform that the expression of phase current based on magnetic field energy proposed [14] for applying to optimize method of firing based on simulations is reliable but complicated. The closed loop power control algorithm for the SRG which relies on experimental characterization at only four operating points, turn-on and turn-off angles, speed, and power, is presented [16]. Analysis of the phase inductance and the phase current divided into five periods during the excitation period and commutation period of an SRG for creating the triggering signals of the main switches are described [17]. The relationship between commutation angles and output power is described [18] that the impact of changes in excitation angles on the output voltage or power had been examined by applying various combinations of turn-on and turn-off angles. Phase current and phase flux linkage of an SRG with optimal excitation angles obtained from a nonlinear SRG model based on MATLAB/SIMULINK are analyzed to find the relationship between the conventional and freewheeling excitation patterns through SF-transform for output power maximization and optimal symmetric freewheeling excitation [19].

From those described above, there is no analytical equation for output power in terms of control variables due

† Corresponding Author: Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. (sfengprt@src.ku.ac.th)
* Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. (kksupat@kmitl.ac.th)
Received: May 22, 2013; Accepted: September 16, 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

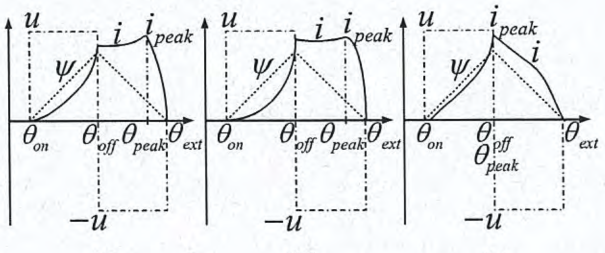
to highly nonlinear characteristics of an SRG, and phase current is significant parameter to find optimal excitation angles of an SRG for maximum output power. In this paper the mathematical expression of a nonlinear magnetization curve used is simple that depends on the two magnetization curves in aligned and unaligned positions of the rotor, phase current waveform used to determine optimal excitation angles of an 8/6 SRG is applied from a nonlinear magnetization curve in term of control variables included dc bus voltage (u), shaft speed (ω), and excitation angles ((turn-on (θ_{on}) and turn-off (θ_{off}) angles) and its effectiveness is validated through simulated and experimental results.

2. Analysis of SRG Operation

SRG is a machine which excitation energy is supplied in every stroke. During the conducting period $\theta_{on} - \theta_{off}$ (Fig. 1), the excitation energy is converted to electrical energy after the aligned angle. No energy is supplied to the load during the conducting period. During the de-fluxing period $\theta_{off} - \theta_{ext}$ (Fig. 1), the store field energy is released as output energy through the freewheeling diodes (Fig. 2). The electrical energy produced during the de-fluxing period exceeds the excitation energy. The phase voltage has just θ_{on} and θ_{off} switching angles as shown in Fig. 1.

Figs. 1(a) - (c) show idealized current waveforms with single pulse control that the peak current occurs at $\theta_{off} - \theta_{peak}$. Fig. 1(a) shows the case that the current increase after turning off the switches at θ_{off}, when the back emf in the coil is larger than the dc bus voltage $(e > u)$. Fig 1(b) shows the case that the constant current after turning off the switches at θ_{off} until θ_{peak}, when the back emf and the dc bus voltage balance $(e = u)$. Fig. 1(c) shows the case that the current decrease after turning off the switches at θ_{off}, when the back emf in the coil is smaller than the dc bus voltage $(e < u)$. The control method which regulates u with speed in order to maximize the output power by keeping the condition of $u = e$ is proposed [1, 15].

In this paper, the control scheme of an 8/6 SRG for maximum output power which controls the current



(a) (b) (c)

Fig. 1. Phase of voltage and current, and flux linkage

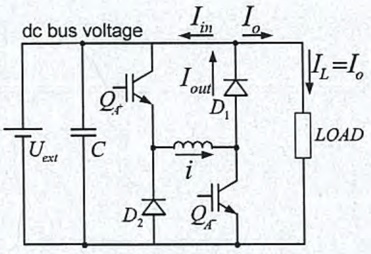


Fig. 2. Generator circuit for a phase

waveform like the case of $e = u$ is proposed. The analytical model and its accuracy are validated through simulated and experimental results.

The voltage equation for a phase of the switched reluctance machine by neglecting the mutual inductance between the phases is given as:

$$u = Ri + L\frac{di}{dt} + e \tag{1}$$

Where u is the dc bus voltage, i is the phase current, R is the phase resistance, L is the phase inductance, e is the back emf, θ is the rotor position, and ω is the shaft speed. The back emf is defined as $e = \omega i \frac{dL}{d\theta}$.

Phase resistance variation is small and ohmic drop on phase resistance is usually negligible compared to dc bus voltage, so we don't consider phase resistance variation in our analysis, flux linkage equals to:

$$\Psi = \int_0^t u dt = \frac{u}{\omega}\begin{cases}(\theta - \theta_{on}), & \theta_{on} < \theta \leq \theta_{off} \\ (\theta_{ext} - \theta), & \theta_{off} < \theta \leq \theta_{ext} \\ 0 \quad , & else\end{cases} \tag{2}$$

Where extinct angle $(\theta_{ext}) = 2\theta_{off} - \theta_{on}$. The circuit diagram of a generator with one phase leg has been proposed [1] as shown in Fig. 2. The integral of the currents in Fig. 2 can be defined as:

$$I_{in} = \frac{1}{2\pi}\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i d\theta \tag{3}$$

$$I_{out} = \frac{1}{2\pi}\int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} i d\theta \tag{4}$$

The net generated current $(I_o) = I_{out} - I_{in}$, and phase output power $(P_{out}) = u \cdot I_o$.

3. Phase Current Formulation

In earlier contribution of magnetization curve in Fig. 3 proposed [12, 13]; at unaligned position (θ_u) is linear to phase current, and at aligned position (θ_a) approximated by two curves composes of a straight line from coordinate origin O to point S and a curve from point S to point M. An analytical model proposed [12, 13] can describe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

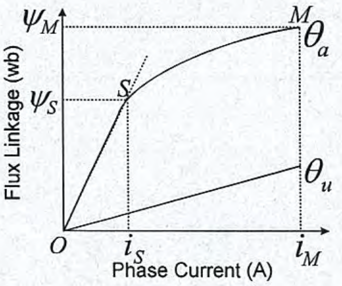


Fig. 3. Flux linkage curves in θ_u and θ_a

magnetization characteristics of machines with sufficient accuracy. This analytical model described by flux linkage depends on phase current and rotor position as shown in (5).

$$\Psi(i,\theta) = \frac{1}{2}[\Psi_a(i) - \Psi_u(i)]\left[\cos\left(N_r\left(\theta + \frac{2\pi}{N_r}\right)\right) + 1\right] + \Psi_u(i) \quad (5)$$

When

$$\Psi_u(i) = L_u \cdot i$$

$$\Psi_a(i) = \begin{cases} L_a \cdot i\,, & i \le i_S \\ \Psi_{S0} + \sqrt{4a(i - i_{S0})}, & i > i_S \end{cases}$$

$$i_{S0} = i_S - \frac{a}{L_a^2}, \Psi_{S0} = \Psi_S - \frac{2a}{L_a}$$

$$\Psi_{MS} = \Psi_M - \Psi_S,\ \ i_{MS} = i_M - i_S$$

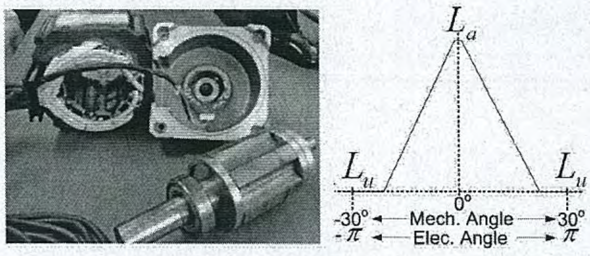
$$a = \frac{\Psi_{MS}^2}{4(i_{MS} - \frac{\Psi_{MS}}{L_a})}$$

Where L_u is inductance of the coil for the unaligned position, L_a is inductance of the coil for the aligned position, N_r is pole number of rotor, θ is rotor angle in radian. Note that Ψ_S, i_S and Ψ_M, i_M are the values of the flux and current taken at points *S* and *M* respectively.

Table 1 shows parameters of the candidate SRG used in this paper which has eight poles on the stator and six poles on the rotor as shown in Figs. 4(a), and (b) shows idealized inductance versus rotor position.

Table 1. Parameters of the candidate SRG

Parameter	Value
Outer diameter of stator	150 mm
Inner diameter of stator	70 mm
Length of air gap	0.5 mm
Stator pole arc	22°
Rotor pole arc	24°
Stack length	70 mm
Numbers of phases	4 Phase
Numbers of poles	8/6
Rated Power	2.23kW
Rated Voltage	48V
Aligned Inductance	490μH
Unaligned Inductance	40μH



(a) (b)

Fig. 4. The candidate SRG used in paper: (a) Structure of the 8/6 SRG; (b) Idealized inductance versus rotor position

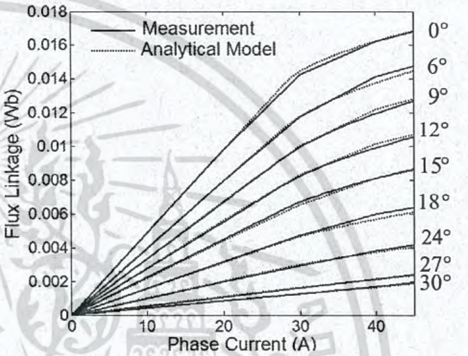


Fig. 5. Magnetization curves of the candidate SRG

Fig. 5 shows the magnetization curves of the candidate SRG at different rotor positions, both from measurement and the analytical model proposed [12, 13]. Parameters of the analytical model used to calculate in (5) are $L_u = 40\mu H$, $L_a = 490\mu H, i_S = 25A, i_M = 45A, \Psi_S = 0.0125Wb$, and $\Psi_M = 0.017Wb$.

The significant variable to control an SRG for maximum output power is phase current. The phase current equation in this paper obtains from substituting (2) into (5). Since the magnetization curve in Fig. 3 approximated by two curves composes of a straight line from coordinate origin O to point S therefore phase current in this period ($i \le i_S$) can be obtained from (6) and a curve from point S to point M therefore phase current in this period ($i > i_S$) can be obtained from (7).

$$i = \frac{2c}{L_a(k+1) + L_u(1-k)}\,, \quad i \le i_S \quad (6)$$

$$A \cdot i^2 + B \cdot i + C = 0,\ i > i_S \quad (7)$$

Where

$$c = \frac{u}{\omega}\begin{cases} (\theta - \theta_{on})\,, & \theta_{on} < \theta \le \theta_{off} \\ (\theta_{ext} - \theta)\,, & \theta_{off} < \theta \le \theta_{ext} \\ 0\,, & else \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = cos\left[N_r\left(\theta + \frac{2\pi}{N_r}\right)\right]$$

$$A = \left[\frac{L_u^2(k-1)^2}{4a(k+1)^2}\right]$$

$$B = \left[\frac{4L_u \cdot c(k-1) + 2\Psi_{S0} \cdot L_u(1-k^2)}{4a(k+1)^2} - 1\right]$$

$$C = \left[\frac{\Psi_{S0}^2(k+1)^2 - 4\Psi_{S0} \cdot c(k+1) + 4c^2}{4a(k+1)^2} + i_{S0}\right]$$

4. Optimal Excitation Angles

The case of $P_{out} = f(\theta_{on}, \theta_{off})$ when dc bus voltage (u) and shaft speed (ω) are constant, therefore output power will be a constant function of just switching angles proposed [7]. In Fig. 6 shows the relationship of phase current and flux linkage waveforms, when conducting period is equals to de-fluxing period. Flux linkage at θ_{off} and θ_{peak} positions are defined as Ψ_f and Ψ_k respectively, and their equations are given as:

$$\Psi_f = \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} \frac{u}{\omega} d\theta = \frac{u}{\omega}(\theta_{off} - \theta_{on}) \quad (8)$$

$$\Psi_k = \int_{\theta_{peak}}^{\theta_{ext}} \frac{u}{\omega} d\theta = \frac{u}{\omega}(\theta_{ext} - \theta_{peak}) \quad (9)$$

To simplify the analysis, $x$is defined as a ratio ofΨ_k and Ψ_f that it can be expressed as:

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

Then (10) can be rewritten as:

$$\theta_{off} = \frac{(x-1)\cdot\theta_{on} - \theta_{peak}}{(x-2)} \quad (11)$$

Phase current depends on dc bus voltage, shaft speed, and excitation angles that peak phase current (i_{peak}) at θ_{peak} position can occur in during generation period.

$$\left.\frac{di}{d\theta}\right|_{\theta_{peak}} = 0, \ \theta_{off} < \theta \leq \theta_{ext}$$

Then θ_{peak} can be obtainedas follow:

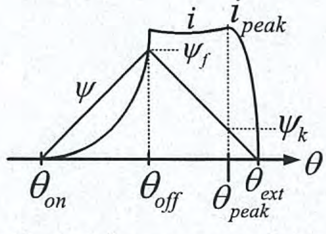


Fig. 6. Idealized of phase current and flux linkage.

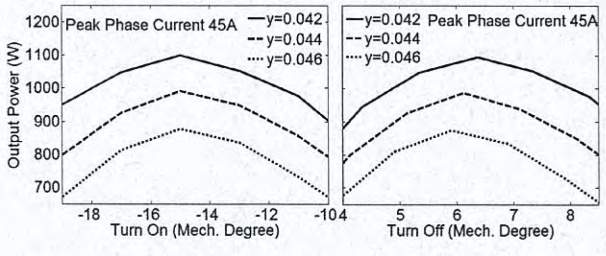
$$sin\left[N_r\left(\theta_{peak} + \frac{2\pi}{N_r}\right)\right] = \begin{cases} \dfrac{i_{peak}}{2N_r\left(\frac{u}{\omega}\right)(L_a - L_u)} & , i \leq i_s \\ \dfrac{N_r\sqrt{4a(i_{peak} - i_{S0})} - L_u \cdot i_{S0} + \Psi_{S0}}{2\left(\frac{u}{\omega}\right)} & , i > i_s \end{cases} \quad (12)$$

An SRG operates in single pulse mode, the phase current waveforms of the SRG limited the peak value to be equal can occur in three cases as shown in Fig. 1, and when the SRG is controlled with the constant of dc bus voltage and shaft speed therefore the peak phase current can be known by; to simplify the analysis, y is defined as a ratio of the dc bus voltage and the shaft speed and y_{opt} is defined as a ratio of the dc bus voltage and the shaft speed at peak phase current, in (12) implies that the peak phase current can exist either at turn-off position or after, the value of $sin\left[N_r\left(\theta_{peak} + \frac{2\pi}{N_r}\right)\right]$ in (12) never exceeds 1. Those mean a ratio of the dc bus voltage and the shaft speed at peak phase current$\left(\left.\frac{u}{\omega}\right|_{i_{peak}} = y_{opt}\right)$ can be expressed as:

$$y_{opt} = \begin{cases} \dfrac{i_{peak}}{2N_r(L_a - L_u)} & , i \leq i_S \\ \dfrac{N_r\sqrt{4a(i_{peak} - i_{S0})} - L_u \cdot i_{S0} + \Psi_{S0}}{2} & , i > i_S \end{cases} \quad (13)$$

To find the optimal turn-on angle ($\theta_{on.opt}$) the analytical model is simulated for three cases of y; $y = 0.042$, $y = 0.044$, and $y = 0.046$ that all cases are fixed u at 27V when the excitation angles were adjusted to limit the peak value of the phase current to 45A, and the output power (4-phase) can be known by $P_{out} = 4 \times (u \cdot I_o)$. There are many combinations of turn-on and turn-off angles as shown in Fig. 7. Apparently the maximum output power exists at turn-on angle at -15° for all cases as shown in Fig. 7(a). This simulation result has been also confirmed [7]. Also in this paper the value of optimal turn-on angle ($\theta_{on,opt}$) is -15°. Fig. 7(b) shows output power versus turn-off angle.

Fig. 8(a) shows the phase current waveforms with single

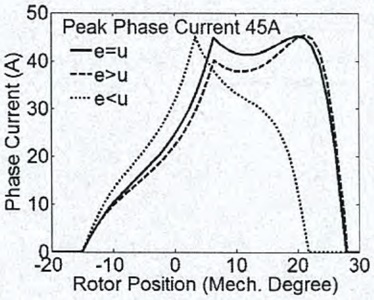


(a) (b)

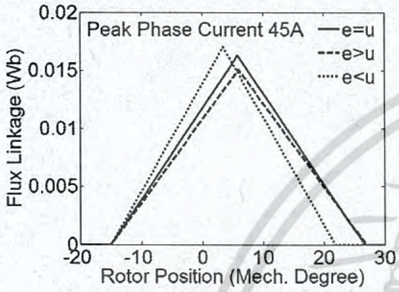
Fig. 7. Output power at different excitation angles: (a) Output power versus turn-on angle (b) Output power versus turn-off angle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

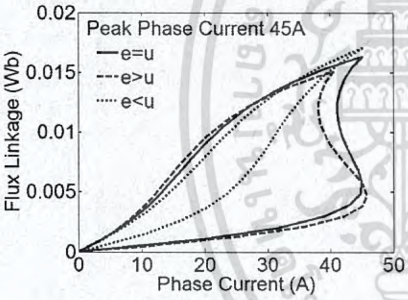
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Phase current waveforms



(b) Flux linkage waveforms



(c) Energy conversion loops

Fig. 8. Phase current and flux linkage waveforms, and energy conversion loops in single pulse mode of operation

pulse control at $y = 0.038$, $y = 0.042$, and $y = 0.048$ with u = 27V for all cases when excitation angles were adjusted to limit the peak value of the phase current to 45A, Fig. 8(b) shows their flux linkage waveforms for three cases based on (5) with $L_u = 40\mu\text{H}$, $L_a = 490\mu\text{H}, i_S = 25A, i_M = 45\text{A}, \Psi_S = 0.0125Wb$, and $\Psi_M = 0.017\text{Wb}$, and Fig. 8(c) shows their energy conversion loops. For peak phase current at 45A, consequently the y_{opt} based on (13) is 0.042. Simulation results; the case of $y = 0.048$ or $y > y_{opt}$ back emf in the coil is smaller than dc bus voltage ($e < u$) and the current decreases after θ_{off}, the case of $y = 0.042$ or $y = y_{opt}$ back emf in the coil and dc bus voltage balance ($e = u$) and the current stays constant from θ_{off} until θ_{peak} that the SRG generates maximum output power confirmed [1, 15], and the case of $y = 0.038$ or $y < y_{opt}$ back emf in the coil is larger than dc bus voltage ($e > u$) and the current increases after θ_{off}.

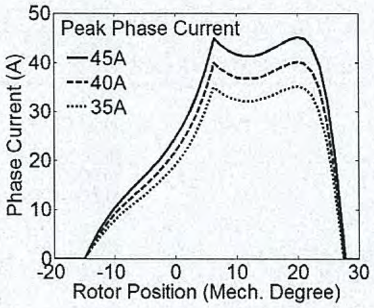


Fig. 9. Phase current waveforms with optimal excitation angles

To find the optimal value of $x(x_{opt})$ that the θ_{peak} needs to be resolved using the relation of θ_{peak} with i_{peak} based on (12). Phase current in case of $e = u$ in Fig. 8(a), the x_{opt} can be known by calculating in (10) that is 0.266.

The optimal turn-off angle $(\theta_{off.opt})$can be known by substituting x_{opt} and θ_{peak} into (11).

To validate the value of x_{opt}, Fig. 9 shows three phase current waveforms based on (6) and (7) that limit the peak value of the phase current to 35A, 40A, and 45A. The values of $\theta_{on,opt}$, x_{opt}, and u for three cases are fixed at -15°, 0.266 and 27V respectively. θ_{peak} and $\theta_{off.opt}$ can be known by calculating in (12) and (11) respectively. Simulation results, waveforms of the phase current for all three cases are similar to phase current waveform in case of $e = u$.

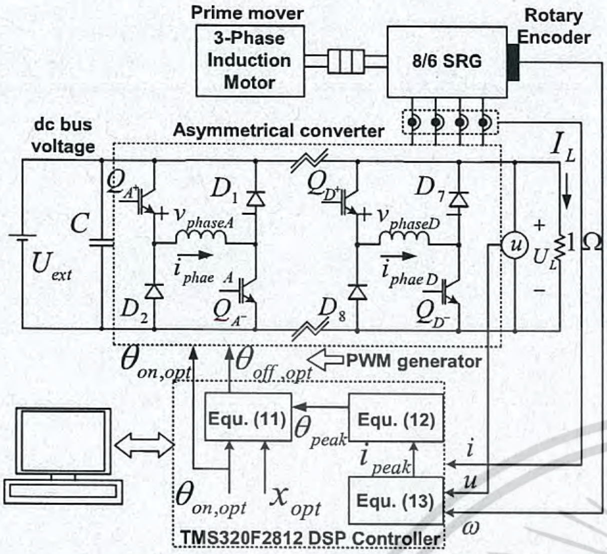
5. Experimental Results

The proposed model is verified via comparison with laboratory measurements, the schematic layout of the experimental system is shown in Fig. 10(a), and the test-bed in laboratory is established shown in Fig. 10(b). The 3-phase induction motor drives the 8/6 SRG which is excited through a 4-phase asymmetrical converter. This converter uses the same dc source for excitation through the IGBTs and demagnetization through the diodes. The converted energy supplies to a sufficiently stiff dc source to prevent the dc bus level running away during generation period. The rotary encoder provides rotor position as pulse train (3,600count/rev) to TMS320F2812 DSP controller. The values of excitation angles which drive the gate of converter are processed by the controller. The y ratio can be controlled by adjusting dc bus voltage and shaft speed. The output power has been measured on a test-bed of variations of ratio of dc bus voltage and shaft speed, and excitation angles.

For experiment to validate the value of x_{opt}; Fig. 11(a) shows the measured waveforms of phase of voltage and current and average output of voltage and current when the SRG is controlled to limit i_{peak} to 45A with the optimal excitation angles. The u and ω used for experiment are

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

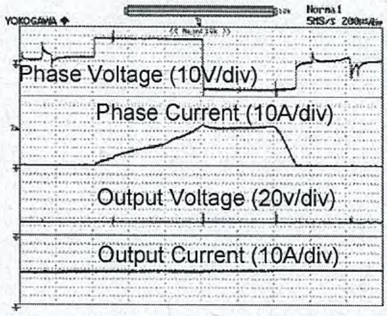
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



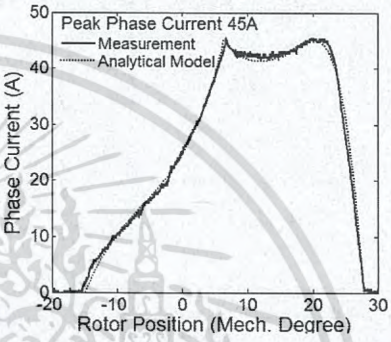
(a) Schematic layout of the experimental system

(b) Converter and a TMS320F2812 DSP Controller, Prime mover and the SRG, and Resistive load

Fig. 10. Experimental setup, converter, load and SRG



(a) $x = x_{opt};\ x = 0.266$

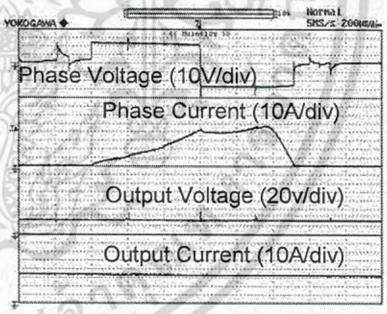


(b) θ_{on}= -15°θ_{off}= 6.34°

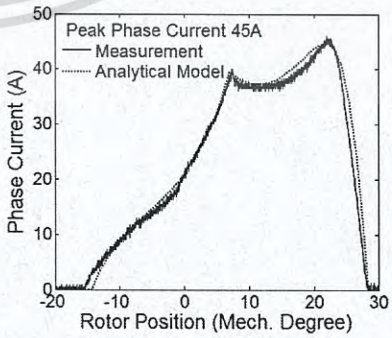
Fig. 11. Optimal excitation angle for $x = x_{opt}$ (I_L = 39.86A, U_L = 27.6V, P_{out} = 1100.14W)

27V and 642 rad/s respectively that the values of $\theta_{on,opt}$ and x_{opt} obtained from the simulation results of analytical model are -15° and 0.266 respectively. For $\theta_{off.opt}$ is 6.34° based on (11), Fig. 12(a) shows the measured waveforms of phase of voltage and current and average output of voltage and current when the SRG is controlled to limit i_{peak} to 45A with u and ω used for experiment are 27V and 717 rad/s respectively that the values of θ_{on} and x are -15° and 0.253 respectively. For θ_{off} is 6.75° based on (11), Fig. 13(a) shows the measured waveforms of phase of voltage and current and average output of voltage and current when the SRG is controlled to limit i_{peak} to 45A with u and ω used for experiment are 27V and 558 rad/s respectively that the values of θ_{on} and x are -15° and 1 respectively. For θ_{off} is 4.40° based on (11), and Figs. 11(b), 12(b), and 13(b) show phase current waveform both from measurement and analytical model.

Experimental results; the SRG controlled with optimal excitation angles in Fig. 11 generates maximum output power that the optimal excitation angles are θ_{on} = -15° and θ_{off}= 6.34°.



(a) $x < x_{opt};\ x = 0.253$

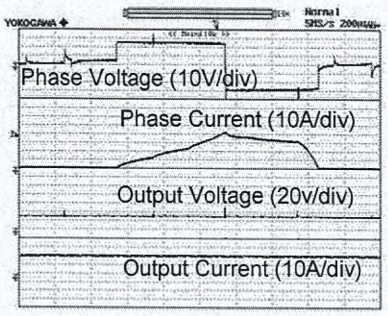


(b) θ_{on}= -15°θ_{off}= 6.75°

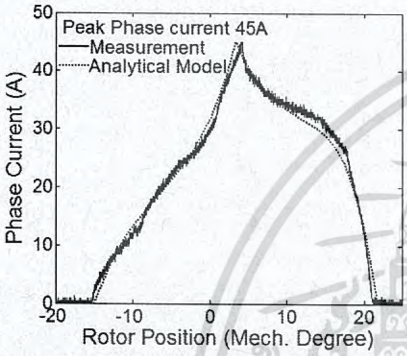
Fig. 12. Excitation angle for $x < x_{opt}$ (I_L = 31.97A, U_L = 27.52V, P_{out} = 879.81W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) $x > x_{opt}$; $x = 1$



(b) θ_{on}= -15°θ_{off}= 4.40°

Fig. 13. Excitation angle for $x > x_{opt}$ (I_L = 20.6A, U_L = 27.68V, P_{out} = 570.21W)

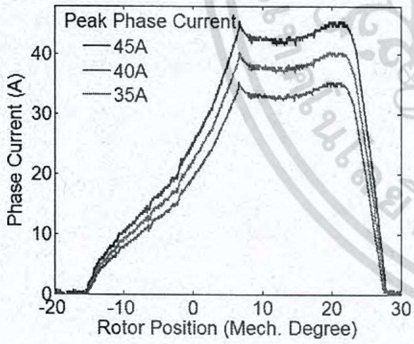
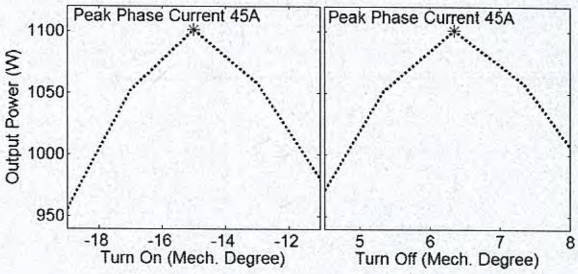


Fig. 14. Phase current waveforms with x_{opt} = 0.266 for all three cases of i_{peak}; 35A, 40A, and 45A

Table 2. Parameters for three cases of phase current

u (V)	ω (rad/s)	i_{peak} (A)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	θ_{peak} (°)	θ_{ext} (°)	x
27	757	35	-15	6.26	21.86	27.52	0.266
27	692	40	-15	6.30	21.93	27.60	0.266
27	642	45	-15	6.34	22	27.68	0.266

For experiment to validate the value of x_{opt}, Fig. 14 shows the measured phase current waveforms for all three cases of i_{peak}; 35A, 40A, and 45A. Table 2 shows the optimal control variables for all three cases that the values of $\theta_{on,opt}$, x_{opt}, and u for three cases are fixed at -15°, 0.266 and 27V respectively and $\theta_{off.opt}$ can be known by calculating in (11). Experimental results, waveforms of the phase current for all three cases are similar to phase current waveform in case of $e = u$.



(a) P_{out} vs θ_{on} (b) P_{out} vs θ_{off}

Fig. 15. Output power at different excitation angles; case 1

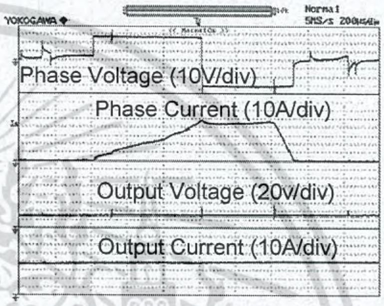
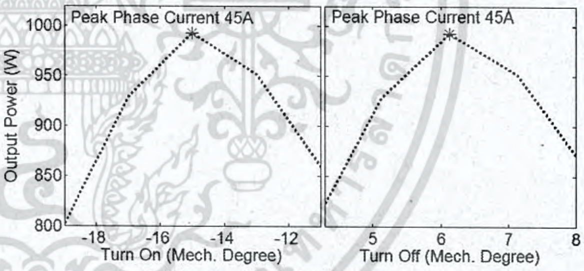


Fig. 16. Optimal excitation angles (θ_{on}=-15°θ_{off}=6.34°) (I_L = 39.86A, U_L = 27.6V, P_{out} = 1100.14W)



(a)P_{out} vs θ_{on}(b) P_{out} vs θ_{off}

Fig. 17. Output power at different excitation angles; case 2

Table 3. Parameters for three cases

Case	u (V)	ω (rad/s)	i_{peak} (A)	$\theta_{on,opt}$ (°)	x_{opt}	$\theta_{off,opt}$ (°)
1	27	642	45	-15	0.266	6.34
2	27	656	45	-15	0.266	6.13
3	27	740	45	-15	0.266	5.91

For experiment to validate the optimal excitation angles for three cases when u is fixed; Figs. 15, 17, and 19 show output power versus different excitation angles when excitation angles were adjusted to limit i_{peak} = 45A for

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

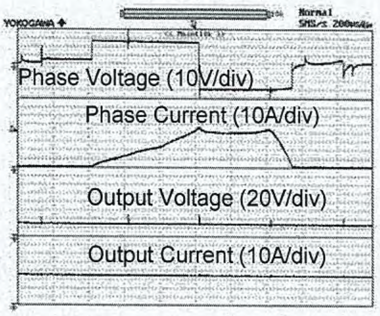
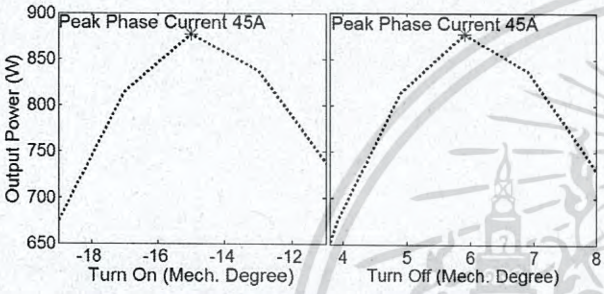


Fig. 18. Optimal excitation angles (θ_{on}=-15°θ_{off}=6.13°) (I_L = 35.97A, U_L = 27.6V, P_{out} = 992.77W)



(a) P_{out}vsθ_{on} (b) P_{out} vs θ_{off}

Fig. 19. Output power at different excitation angles; case 3

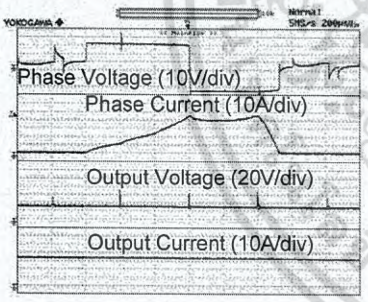


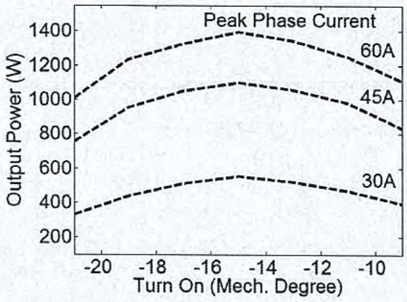
Fig. 20. Optimal excitation angles (θ_{on}=-15°, θ_{off}=5.91°) (I_L = 31.78A, U_L = 27.6V, P_{out} = 877.13W)

Table 4. Optimal control variables

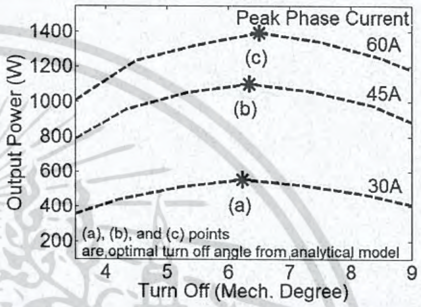
u (V)	ω (rad/s)	i_{peak} (A)	$\theta_{on,opt}$ (°)	θ_{peak} (°)	θ_{ext} (°)	x_{opt}	$\theta_{off,opt}$ (°)
21	656	30	-15	21.81	27.46	0.266	6.23
27	642	45	-15	22	27.68	0.266	6.34
37	740	60	-15	22.28	28	0.266	6.50

all three cases with the values of u and ω shown in Table 3. The values of optimal excitation angles based on the proposed method are shown in Table 3 that the SRG generates maximum output power and the waveforms of phase current for case 1 to case 3 are shown in Figs. 16, 18, and 20 respectively.

For experiment to validate the optimal excitation angles



(a) P_{out}vs θ_{on}



(b) P_{out}vs θ_{off}

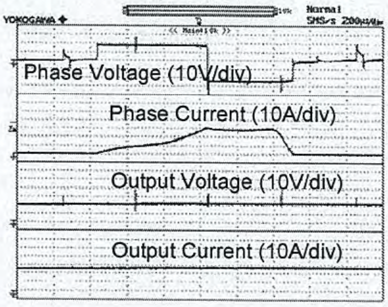
Fig. 21. Output power at different excitation angles

with different u and ω, all dashed lines obtained from measurements in Fig. 21 show output power versus different excitation angles when excitation angles were adjusted to limit peak phase current for three cases; 30A, 45A, and 60A, with u and ω as shown in Table 4. Experimental results; maximum output power apparently exists at turn-on angle at -15° for all cases as shown in Fig. 21(a), three points; (a), (b), and (c), of noted by asterisk in Fig. 21(b) are the $\theta_{off.opt}$ based on (11) as shown in table 4 and Figs. 22(a)-(c) show phase of voltage and current, and average output of voltage and current when the SRG controlled with the optimal excitation angles generates maximum output power.

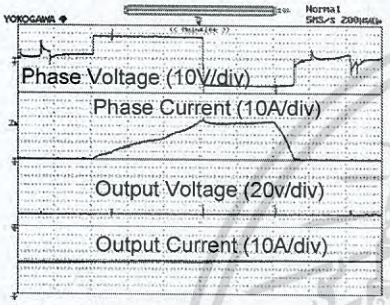
6. Conclusion

Optimal excitation angles of an 8/6 SRG analyzed from phase current waveform are presented in this paper. The phase current equation is significant factor for determining the optimal excitation angles that depends on optimal values of excitation angles ($\theta_{on,opt}$ and $\theta_{off,opt}$), a ratio of flux linkage at turn-off angle and peak phase current positions (x_{opt}). The analytical model is applied from a nonlinear magnetization curve in terms of dc bus voltage (u), shaft speed (ω), and excitation angles (θ_{on} and θ_{off}). The experimental results have confirmed the accuracy of the analytical model for determining the optimal excitation angles of the SRG for maximum output power. All cases for the SRG controlled with the optimal excitation angles

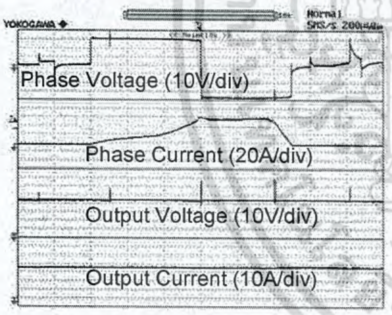
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Optimal excitation angles (θ_{on}= -15°, θ_{off}= 6.23°)
(I_L = 25.87A, U_L = 21.4V, P_{out} = 553.62W)



(b) Optimal excitation angles (θ_{on}= -15°, θ_{off}= 6.34°)
(I_L = 39.86A, U_L = 27.6V, P_{out} = 1100.14W)



(c) Optimal excitation angles (θ_{on}= -15°, θ_{off}=6.50°)
(I_L = 37.27A, U_L = 37.4V, P_{out} = 1393.9W)

Fig. 22. Optimal excitation angles at (a) i_{peak} = 30A, $(b) i_{peak}$ = 45A, and $(c) i_{peak}$ = 60A

in single pulse mode of operation generate maximum output power and phase current waveforms are similar to the case of $e = u$. Simulation and experimental results; the value of $\theta_{on,opt}$ is -15°, the value of $\theta_{off,opt}$ can be known by substituting x_{opt} = 0.266 and θ_{peak} into (11).

References

[1] T. J. E. Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", Oxford, *UK,Newnes*, 2001.

[2] K. Xin, Q. Zhan, and J. Luo, "A New Simple Sensor less Control Method for Switched Reluctance Motor Drives", *Journal of ElecEng& Tech*, Vol.1, no. 1, pp. 52-57, 2006.

[3] C. A. Ferreira, S. R. Jones, W. S. Heglund, and W. D. Jones, "Detailed Design of a 30-kW Switched Reluctance Starter/Generators System for a Gas Turbine Engine Application", *IEEE Trans on IndAppl*, vol. 31, no. 3, pp.553-561, 1995.

[4] D. A. Torrey, "Switched Reluctance Generators and Their Control", *IEEE Trans on IndElec*, vol. 49, no. 1, pp. 3-14, 2002.

[5] R. Cardenas, W. F. Ray, and G. M. Asher, "Swithced Reluctance Generators for Wind Energy Applications", *Proc IEEE*, pp. 559-564, 1995.

[6] B. Fahimi, A. Emadi, and R. B. SepeJr, "A switched Reluctance Machine-Base Startor/Alternator for More Electic Cars", *IEEE Trans on EnergConv*, vol. 19, no. 1, pp. 116-124, 2004.

[7] P. Asadi, M. Ehsani, and B. Fahimi. "Design and Control Characterization of Switched Reluctance Generator for Maximum Output Power", *Proc IEEE*, pp. 1639-1644, 2006.

[8] F. Soares and P. J. C. Branco, "Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/ Simulink Environment", *IEEE Trans on Aero and Elec Sys*, vol. 37, no. 3, pp. 989-1009, 2001.

[9] J. M. Kokernak and D. A. Torrey, "Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched-Reluctance Machine", *IEEE Trans on Mag*, vol. 36, no. 2, pp. 500-507, 2000.

[10] D. W. J. Pulle, "New Data Base for Switched Reluctance Drive Simulation", *Proc. IEE on ElecPowAppl*, vol. 138, no. 6, pp. 331-337, 1991.

[11] Y. Xu and D. A. Torrey, "Study of the Mutually Coupled Switched Reluctance Machine Using the Finite Element-Circuit Coupled Method", *Proc. IEE on ElecPowAppl*, vol. 149, no. 2, pp. 81-86, 2002.

[12] C. Roux and M. M. Morcos, "On the Use of a Simplified Model for Switched Reluctance Motors", *IEEE Trans on EnerConv*, vol. 17, no. 3, pp. 400- 405, 2002.

[13] Y. Cai, Q. Yang, L. Su, Y. Wen, and Y. You, "Nonlinear Modeling for Switched Reluctance Motor by Measuring Flux Linkage Curves", *ProcIEEE on Com Eng and Tech*, V6-47-V6-51, 2010.

[14] X. Cao, Z. Deng, T. Yao, J. Cai, and Z. Zhuang, "Analysis and Application of Phase Current in Switched Reluctance Generators", *IEEE Trans. on Appl Sup*, vol. 20, no. 3, pp. 1063-1067, 2010.

[15] T. Sawata. P. C. Kjaer, C. Cossar, and T. J. E. Miller, "A Control Strategy for the Switched Reluctance Generator", *ProcICEM on Elec Mach and Sys*, pp. 2131-2136, 1998.

[16] Y. Sozer and D. A. Torrey, "Closed Loop Control of Excitation Parameters for High Speed Switched-Reluctance Generators", *IEEE Trans on PowElec*, vol. 19, no. 2, pp. 355-362, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] H. Chen and J. J. Gu, "Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators", *IEEE/ASME Trans on Mech*, vol. 15, no. 3, pp. 421-432, 2010.
[18] M. Ziapour, E. A fjei, and M. Yousefi. "Optimam Commutation Angles for Voltage Regulation of a High Speed Switched Reluctance Generator", *Proc PEDST,* pp. 271-276, 2013.
[19] V. Nasirian, S. Kaboli and A. Davoudi, "Output power Maximization and Optimal Symmetric Freewheeling Excitation for Switched Reluctance Generators", *IEEE Trans on IndAppl*, vol. 49, no. 3, pp. 1031-1042, 2013.

Pairote Thongprasri He received M. Eng. Degree in electrical engineering from KMITL. Now he is studying in D. Eng. Program (electrical engineering) at KMITL. His research interests are switched reluctance machine and power electronics.

Supat Kittiratsatcha He received the M.S. and Ph.D. degrees in electric power engineering from Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. He is an Associate Professor with the Department of Electrical Engineering at KMITL. His research interests include switched reluctance machine design and solid state lighting.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLIED COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS SOCIETY JOURNAL

October 2016
Vol. 31 No. 10
ISSN 1054-4887

The ACES Journal is abstracted in INSPEC, in Engineering Index, DTIC, Science Citation Index Expanded, the Research Alert, and to Current Contents/Engineering, Computing & Technology.

The illustrations on the front cover have been obtained from the research groups at the Department of Electrical Engineering, The University of Mississippi.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE APPLIED COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS SOCIETY
http://aces-society.org

EDITOR-IN-CHIEF

Atef Elsherbeni
Colorado School of Mines, EECS Dept.
Golden, CO 80401, USA

ASSOCIATE EDITORS-IN-CHIEF

Sami Barmada
University of Pisa. ESE Dept.
Pisa, Italy, 56122

Mohammed Hadi
Kuwait University, EE Dept.
Safat, Kuwait

Alistair Duffy
De Montfort University
Leicester, UK

Mohamed Bakr
McMaster University, ECE Dept.
Hamilton, ON, L8S 4K1, Canada

Abdul Arkadan
Marquette University, ECE Dept.
Milwaukee, WI 53201, USA

Paolo Mezzanotte
University of Perugia
I-06125 Perugia, Italy

Antonio Musolino
University of Pisa
56126 Pisa, Italy

Marco Arjona López
La Laguna Institute of Technology
Torreon, Coahuila 27266, Mexico

EDITORIAL ASSISTANTS

Matthew J. Inman
University of Mississippi, EE Dept.
University, MS 38677, USA

Shanell Lopez
Colorado School of Mines, EECS Dept.
Golden, CO 80401, USA

EMERITUS EDITORS-IN-CHIEF

Duncan C. Baker
EE Dept. U. of Pretoria
0002 Pretoria, South Africa

Robert M. Bevensee
Box 812
Alamo, CA 94507-0516, USA

Allen Glisson
University of Mississippi, EE Dept.
University, MS 38677, USA

Ahmed Kishk
Concordia University, ECS Dept.
Montreal, QC H3G 1M8, Canada

David E. Stein
USAF Scientific Advisory Board
Washington, DC 20330, USA

EMERITUS ASSOCIATE EDITORS-IN-CHIEF

Yasushi Kanai
Niigata Inst. of Technology
Kashiwazaki, Japan

Levent Gurel
Bilkent University
Ankara, Turkey

Erdem Topsakal
Mississippi State University, EE Dept.
Mississippi State, MS 39762, USA

Alexander Yakovlev
University of Mississippi, EE Dept.
University, MS 38677, USA

Ozlem Kilic
Catholic University of America
Washington, DC 20064, USA

Fan Yang
Tsinghua University, EE Dept.
Beijing 100084, China

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE APPLIED COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS SOCIETY

JOURNAL

Vol. 31 No. 10 October 2016

TABLE OF CONTENTS

Numerical Simulation of High Electron Mobility Transistors based on the Spectral Element Method
Feng Li, Qing H. Liu, and David P. Klemer 1144

An Efficient ACA Solution for Electromagnetic Scattering from Discrete Body of Revolution
Zhenhong Fan, Zi He, and Rushan Chen 1151

Electromagnetic Scattering from a PEMC Circular Cylinder Coated by Topological Insulator (TI)
Anjum Shahzad, Ahsan Illahi, Shakeel Ahmed, Akhtar Hussain, and Qaisar A. Naqvi 1158

Nonlinear Analysis and Performance Improvement of Amplifying Aperture Coupled Reflectarray Antenna
Iman Aryanian, Abdolali Abdipour, and Gholamreza Moradi 1164

Parameterized Model Order Reduction for Efficient Time and Frequency Domain Global Sensitivity Analysis of PEEC Circuits
Luca De Camillis, Giulio Antonini, and Francesco Ferranti 1170

Finite Difference Analysis of an Open-Ended, Coaxial Sensor Made of Semi-Rigid Coaxial Cable for Determination of Moisture in Tenera Oil Palm Fruit
Ee M. Cheng, Zulkifly Abbas, MohamedFareq AbdulMalek, Kim Y. Lee, Kok Y. You, Shing F. Khor, Jumiah Hassan, and Hishammudin Zainuddin 1181

Design of PSR with Different Feed Configurations and Partition Lens System for Skin Cancer Treatment
Petrishia Arockiasamy and Sasikala Mohan 1193

Design, Simulation and Fabrication of a Wide Bandwidth Envelope Tracking Power Amplifier
Iman Aryanian, Abdolali Abdipour, and Abbas Mohammadi 1202

Analysis of Control Variables to Maximize Output Power for Switched Reluctance Generators in Single Pulse Mode Operation
Pairote Thongprasri and Supat Kittiratsatcha 1208

© 2016, The Applied Computational Electromagnetics Society

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACES JOURNAL, Vol. 31, No.10, October 2016

Analysis of Control Variables to Maximize Output Power for Switched Reluctance Generators in Single Pulse Mode Operation

Pairote Thongprasri and Supat Kittiratsatcha

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
sfengprt@src.ku.ac.th, kksupat@kmitl.ac.th

Abstract **—** This paper presents an analytical modeling method of optimal control variables to maximize the output power for switched reluctance generators (SRGs) in single pulse mode operation. A method to obtain the phase current equation used to determine the optimal control variables is proposed. The phase current equation is derived from the phase voltage equation in combination with the inductance model. The inductance model proposed in this paper is applied from the flux linkage function. The characteristics of the phase current and the energy conversion relations are analyzed to determine the optimal phase current shape. The analytical results indicate that the optimal shape can be generated when the SRG is controlled with the optimal control variables. The optimal shape is used for analysis based on the phase current equation to determine the optimal control variables. An 8/6 SRG experimental setup is used to validate the proposed method. The optimal control variables obtained from the proposed method are used to control the SRG. Based on the experimental results, the SRG can produce the maximum output power.

Index Terms **—** Control variables, optimal phase current shape, switched reluctance generator.

I. INTRODUCTION

A switched reluctance generator (SRG) is a potential candidate in various applications, such as an automotive starter/generator [1, 2] an engine starter/ generator [3, 4] and for variable speed wind energy [5] because it has a simple structure and low cost, is fault tolerant with a rugged structure, and involves easy starting/generating realization, high speed adaptability, with a high generation efficiency.

Its highly nonlinear nature is the main problem of the SRG, since the behavior of the SRG cannot be described by mathematical equations using conventional methods for a suitable controller design [6]. The SRG model is used for simulation to determine the relationship between output power and control variables since there is no analytical equation with which to determine the output power based on design parameters and control variables [7]. The dynamic model of an SRG using a cubic spline technique has been proposed to find the flux linkage, inductance, torque, and output power [8]. A model SRG based on the Finite Element Method (FEM) and power control methods for a small wind power generation system has been proposed in [9]. The SRG model is used to find the output power curve versus the shaft speed. This curve is analyzed to determine the optimal switching on-off angle for maximum efficiency in the system.

The output power of the SRG in single pulse mode can be controlled by adjusting the excitation angles, with the turn-on/off angle being fixed while the turn-off/on angle is adjusted, or by adjusting both the turn-on and turn-off angles. Constant output power control of the SRG has been proposed by controlling the turn-on angle with a fuzzy logic algorithm while the turn-off angle is fixed [10]. The optimal excitation angles for output power control using automatic closed loop control have been proposed so that the optimal turn-off angle in terms of power and speed is determined from an analytical fit curve [11], while the optimal turn-on angle is automatically adjusted based on the closed loop power control to regulate the output power. The optimal excitation angles have been proposed for maximum system efficiency calculated using the ratio of the two flux linkages [12]. The minimum torque ripple occurs in this case. With two flux linkages, one is the position at which the stator and rotor pole corners begin overlap and the other is the position at maximum value. A Modified Angle Position Control (MAPC) method has been proposed to determine the optimal shape of the phase current [13]. The optimal turn-on angle is fixed and the optimal turn-off angle can be determined by the analytical model of the SRG for the maximum energy conversion [14, 15].

A mathematical model for analyzing control variables and describing the behavior of the SRG and the flux linkage versus current characteristics calculation is essential. There are at least two methods to obtain flux linkage versus current characteristics—an analytical approach based on the FEM and an experimental

Submitted On: November 28, 2015
Accepted On: July 17, 2016

1054-4887 © ACES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

approach based on direct measurements. The flux linkage model based on the FEM has well known reliability, however it requires intensive computation and many details of the machine geometry and structure [16]. Analytical nonlinear models of flux linkage have been described in [17-20] that are accurate and reliable. The model based on machine geometry introduced in [17] is complicated and depends on flux linkage at aligned and unaligned positions, and a position-dependent function. The position-dependent term has a physical significance in that its coefficient needs to be related to the machine geometry. The model proposed in [18] is a little complex because the flux linkage curve is divided into 2 parts, namely, linear and nonlinear. However, it only requires the flux linkage versus current characteristics at the aligned and unaligned positions. The model described in [19] based on a Fourier series with a limited number of terms is complex since it is necessary to know the flux linkage versus current characteristics at the aligned, unaligned, and midway positions. The coefficients in terms of the Fourier series depend on the flux linkage positions at aligned, unaligned, and midway positions so that the flux linkage at the aligned and midway positions can be calculated via curve fitting based on an arc-tangent function. The Stiebler model proposed [20] is simple in that it is composed of an angular function and aligned and unaligned flux linkage. However, it is proposed in a per-unit system.

An analytical modeling method of the optimal control variables to maximize the output power of the SRGs in single pulse mode operation is presented in this paper. The control variables comprise a dc bus voltage, a shaft speed or angular velocity, and excitation angles. This paper proposes a method to obtain the phase current equation used to determine the optimal control variables. The phase current equation is derived from the phase voltage equation in combination with the inductance model. The proposed inductance model in a real system is applied from the flux linkage function in a per-unit system introduced by Stiebler. It requires the geometrical parameters of an SRG at the aligned and unaligned rotor positions. These parameters are easily quantified using the FEM. The optimal phase current shape depending on the control variables is investigated to determine the optimal shape. Finally, the optimal shape of the phase current is used to determine the optimal control variables. An 8/6 SRG experimental setup is used to verify the proposed method.

II. PRINCIPLE OF SRG IN SINGLE PULSE MODE OPERATION

A 4-phase 8/6 SRG is used in this paper which is driven by a 4-phase asymmetrical bridge converter as shown in Fig. 1. When S_A and $S_{A'}$ are both on, the phase A voltage is u. If S_A and $S_{A'}$ are both off, the phase A voltage is $-u$.

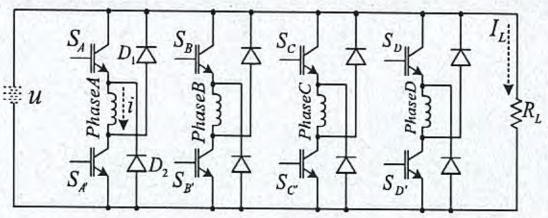


Fig. 1. 4-phase asymmetrical bridge converter.

The mutual inductance between individual phases of the SRG is usually neglected. Therefore, the equation of voltage for each phase of SRG is expressed as:

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

The voltage equation at constant speed is given by:

$$u = Ri + L(\theta)\frac{di}{dt} + e, \tag{2}$$

where u represents the dc bus voltage, i is the phase current, R and L are the phase of resistance and inductance, respectively, ω is the angular velocity, and the back emf is defined as:

$$e = i\omega\frac{\partial L(i,\theta)}{\partial\theta}. \tag{3}$$

The energy converted is the area enclosed by the loci which is expressed as:

$$W = \oint \lambda di = \oint id\lambda. \tag{4}$$

The SRG requires an excitation source in order to generate electrical energy. The SRG (phase A) is excited by the asymmetrical bridge converter as shown in Fig. 2. This converter is used as the dc source [21] for the exciting phase A of the SRG through two switches as shown in Fig. 2 (bottom) and demagnetizing the same phase through two diodes as shown in Fig. 2 (top).

In Fig. 2, the current builds in the SRG phase winding when the controllable switches are closed and no energy is supplied to the load. When the controllable switches are opened, the stored energy is supplied to the load through the two diodes. The average load current can be defined as:

$$I_L = \frac{1}{2\pi/N_r}\left(\int_{\theta_{off}}^{\theta_e} id\theta - \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} id\theta\right), \tag{5}$$

where turn-on θ_{on} and turn-off θ_{off} angles represent the controllable switches which are closed and opened, respectively, θ_e is the angle at which the phase current is depleted and it is given as $2\theta_{off} - \theta_{on}$, θ is the rotor position and N_r is the number of rotor poles.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

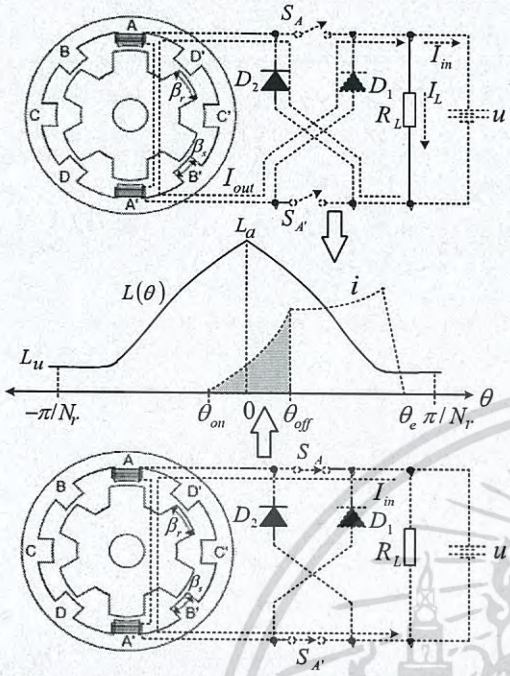


Fig. 2. Power generation process for the SRG in single pulse mode.

The average electric power of the SRG is the summation of the output power of each phase in one revolution which is given by:

$$P_{out} = I_L u \,. \tag{6}$$

The main electrical losses of an SRG are copper loss and iron loss. The copper loss P_{Cu} depends on the rms phase current I_{rms} on the range $\theta_{off} \le \theta \le \theta_e$ [22] which is expressed as:

$$P_{Cu} = N_{ph} I_{rms}^2 R \,, \tag{7}$$

and

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi / N_r} \int_{\theta_{off}}^{\theta_e} i^2 d\theta \,. \tag{8}$$

The iron loss is in proportion to the excitation magnetic motive force and the stroke frequency. It is not uniformly distributed in the core since the flux shape is non-sinusoidal and the flux harmonic spectrum differs in various parts of the magnetic spectrum. The iron loss [23] can be approximately calculated as:

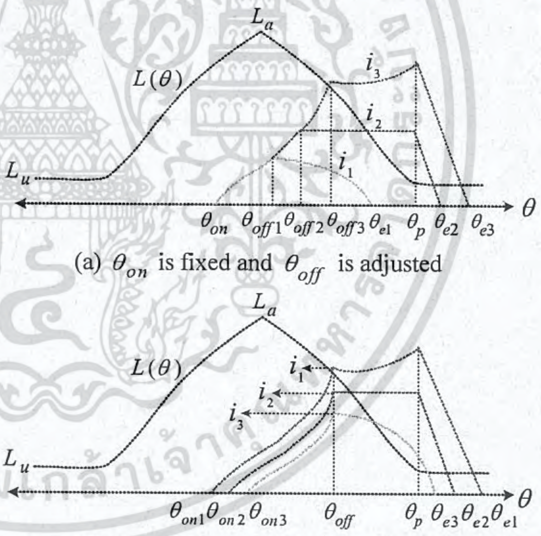
$$P_C = K_h f B_m^{a+bB_m} + K_e f^2 B_m^2 \,, \tag{9}$$

where f is the stroke frequency, K_h and K_e are the hysteresis and eddy-current loss coefficients, respectively, a and b are the constants of the exponent, and B_m is the amplitude of flux density for sinusoidal variation.

III. ANGLE POSITION CONTROL METHOD

The control variables of the SRG are the dc bus voltage u, the angular velocity ω, the phase current i, and turn-on/off angle $\theta_{on} / \theta_{off}$. The Angle Position Control (APC) method can control the phase current shape by adjusting θ_{on} and θ_{off} while u and ω are constant. The output power can be adjusted by the phase current. The advantages of the APC method [13] are that the optimal θ_{on} and θ_{off} can improve efficiency, the multiple phases can be conducted at the same time, and the torque adjustment range is wide.

The effect of θ_{on} and θ_{off} on the phase current shape using the APC method is illustrated in Fig. 3, where θ_{on} is fixed and θ_{off} is adjusted as shown in Fig. 3 (a) and θ_{off} is fixed and θ_{on} is adjusted as shown in Fig. 3 (b).



(a) θ_{on} is fixed and θ_{off} is adjusted

(b) θ_{off} is fixed and θ_{on} is adjusted

Fig. 3. Phase current shapes using the angle position control method.

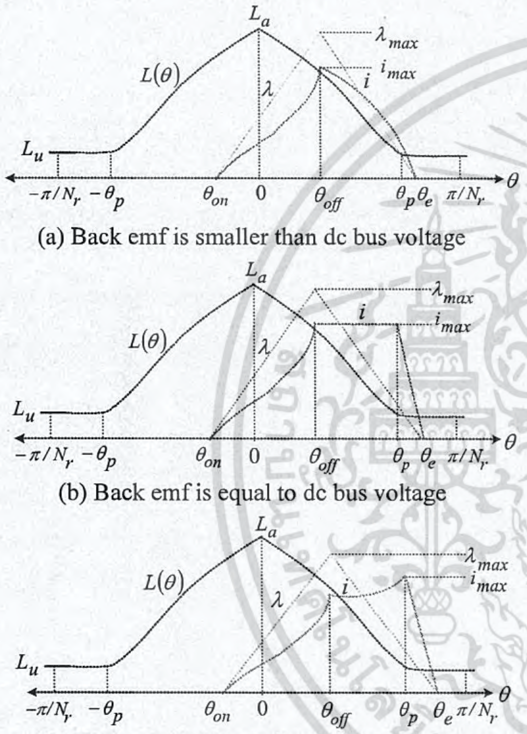
When the resistance of the phase windings and the voltage drops of the main switches and diodes are neglected, the voltage Equation in (2) can be expressed as:

$$u = \omega L(\theta) \frac{di}{d\theta} + \omega i \frac{\partial L(i,\theta)}{\partial \theta} \,. \tag{10}$$

The maximum value of the phase current in Fig.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 is in the range $\theta_{off} \le \theta \le \theta_p$ and θ_p equals $(\beta_r + \beta_s)/2$, where β_r is the rotor pole arc and β_s is the stator pole arc. Considering (10), if the back emf is smaller than the dc bus voltage, then $di/d\theta < 0$. The phase current shape in this case is shown in Fig. 4 (a). If the back emf is equal to the dc bus voltage, then $di/d\theta = 0$. In this case, the phase current shape is shown in Fig. 4 (b). If the back emf is bigger than the dc bus voltage, then $di/d\theta > 0$ and the phase current shape is shown in Fig. 4 (c).



(a) Back emf is smaller than dc bus voltage

(b) Back emf is equal to dc bus voltage

(c) Back emf is bigger than dc bus voltage

Fig. 4. Three kinds of phase current and flux linkage at different turn-on and turn-off angles with the same maximum value of the phase current.

From (9), the iron loss depends on the maximum flux linkage. The maximum value of the flux linkage in Fig. 4 occurs for θ_{off}. The copper loss depends on the rms phase current which can be quantified by (7).

The energy conversion loops for 3 kinds of i and λ by the loci are shown in Fig. 5. The maximum output power can be produced when the phase current is controlled in the shape of a flat top (Fig. 4 (b)). This result has been confirmed by [24].

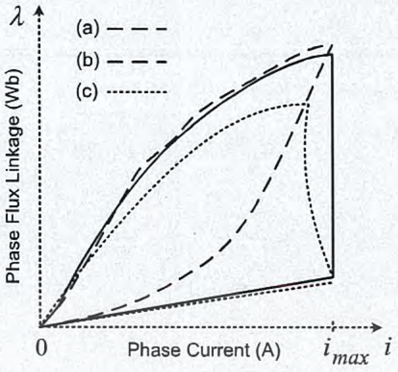


Fig. 5. Energy conversion loops by the loci with the same maximum value of the phase current.

IV. PROPOSED METHOD FOR ANALYZING THE OPTIMAL CONTROL VARIABLES

An analytical modeling method of the optimal control variables to maximize output power of the SRGs in single pulse mode operation is presented in this paper. This paper proposes a method to obtain the phase current equation used to determine the optimal control variables. The phase current equation will be derived from the phase voltage equation in combination with the inductance model. The inductance model is applied from the flux linkage function. Finally, the optimal shape of the phase current is used to determine the optimal control variables.

A. Flux linkage model

The flux linkage model in a real system as shown in Fig. 6 has been developed from the flux linkage function in a per-unit system introduced by Stiebler [20]. It requires the geometrical parameters of an SRG at the aligned and unaligned rotor positions. These parameters are easily determined using an experiment or the FEM. The parameters comprise inductance at positions of aligned L_a and unaligned L_u, and flux linkage at points s and m as shown in Fig. 6.

The flux linkage function in Fig. 6 is composed of the linear and saturated regions. The saturated region begins at point s and finishes at point m. The flux linkage of the saturated region can be determined using a Froelich function [25] $\lambda = (i/(a+b))$, where a and b are constants as the slope and intercept, respectively. The constants a and b can be determined by substituting the λ_{as}, i_s of the point s and λ_{am}, i_m of the point m into the Froelich function.

The proposed model of the flux linkage can be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

expressed as:

$$\lambda(i,\theta) = L_u i + (L_a - L_u)\frac{i}{a+bi} f(\theta), \quad (11)$$

where θ_k is the effective overlap position of the stator and rotor poles, and the angular function is given by:

$$f(\theta) = \begin{cases} 0.5 + 0.5\cos\left(\theta \dfrac{\pi}{\theta_k}\right) & , -\theta_k \le \theta \le \theta_k \\ 0 & , else \end{cases} . \quad (12)$$

To verify the proposed method, an 8/6 SRG is used to determine its geometrical parameters using the FEM with its specifications as shown in Table 1.

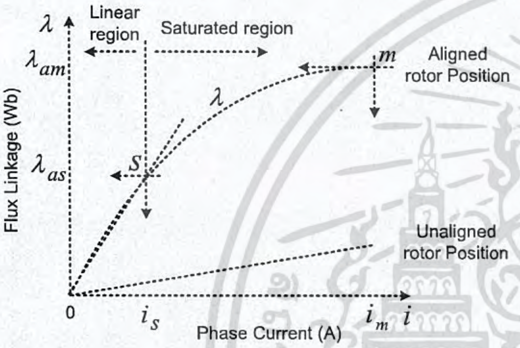


Fig. 6. Magnetization curve of an SRG.

Table1: Specifications of the candidate SRG

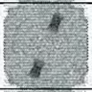
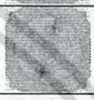
Parameter	Value
Outer diameter of stator	150 mm
Inner diameter of stator	70 mm
Stack length	72 mm
Length of air gap	0.5 mm
Number of phases	4
Stator/Rotor pole arc	23°/23.5°
Number of stator poles/rotor poles	8/6
Rated voltage/power/speed	48 V/2.3 kW/ 6000 rpm

The relationship between the flux linkage and current at rotor positions 0°, 15°, and 30° is obtained using the FEM and are shown in Table 2.

The parameters obtained using the FEM for calculation in this paper consist of $L_a = 470\,\mu H$, $L_u = 42\,\mu H$, $\theta_k = 27°$, $a = 0.65$, and $b = 0.155$.

Figure 7 shows the resultant magnetization curve at rotor positions 0°, 15°, and 30° obtained from the analytical model (11) compared with the FEM which demonstrates the validity of the proposed model.

Table 2: Analytical results obtained using the FEM

Current (A)	Rotor Position (Mech. Degree)		
	0°	15°	30°
50			
40			
30			
20			
10			

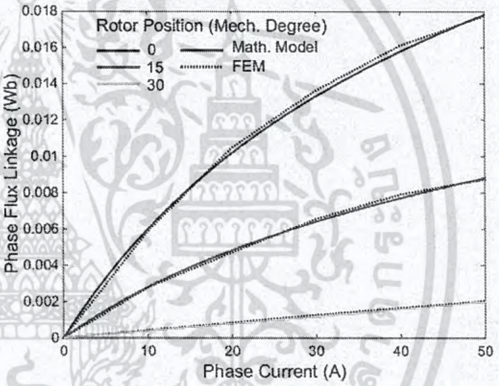


Fig. 7. Magnetization curves of the candidate SRG at rotor positions 0°, 15°, and 30° obtained using the analytical model (solid lines) and the FEM (dotted lines).

B. Proposed model of phase current

The phase inductance involves much more than a comparison with the mutual inductance, as the mutual inductance is neglected [26, 27]. It is known by $L(i,\theta) = \lambda(i,\theta)/i$. Therefore, based on (11) and (12), the phase inductance is;

$$L(i,\theta) = L_u + \frac{L_a - L_u}{a+bi} f(\theta), \quad (13)$$

where the angular function $f(\theta)$ is in the range $-\theta_k \le \theta \le \theta_k$.

The inductance profile is a periodic function with period of $2\pi / N_r$ or the rage from $-\pi / N_r$ to π / N_r. Consequently, the phase inductance model proposed in this paper is divided into three regions depending on the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

phase current and rotor position as shown in Fig. 8. It can be expressed as:

$$L(i,\theta)=\begin{cases} L_u & ,-\dfrac{\pi}{N_r}\le\theta<-\theta_k \\ L_u+\dfrac{L_a-L_u}{a+bi}f(\theta) & ,-\theta_k\le\theta\le\theta_k \\ L_u & ,\theta_k<\theta\le\dfrac{\pi}{N_r} \end{cases} \quad (14)$$

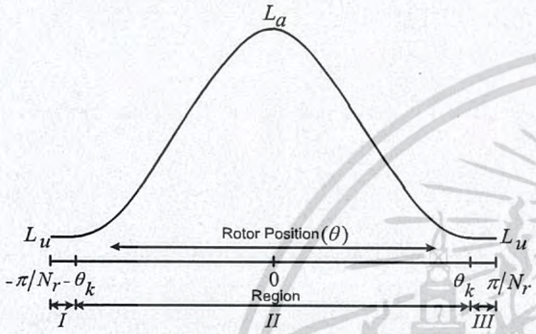


Fig. 8. Phase inductance profile is divided into three regions.

Figure 9 depicts the phase inductance of the candidate SRG obtained using the proposed analytical model (14) and the FEM so that the characteristics of the phase inductance versus the current and rotor position closely match each other.

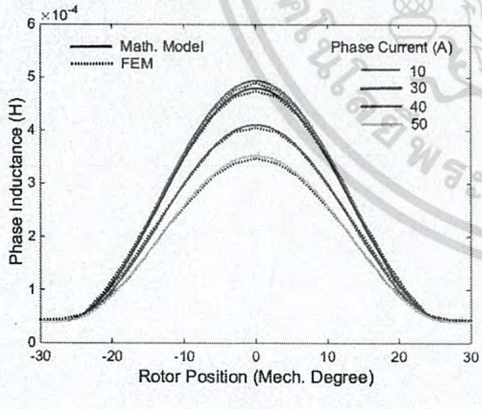


Fig. 9. Phase inductance of the candidate SRG obtained using the mathematical model and the FEM.

The expression of the phase current is obtained by substituting the inductance model (14) into the phase voltage Equation (10). It can be expressed as:

$$i=\begin{cases} \dfrac{u(\theta-\theta_{on})}{\omega\left[L_u+\left(\dfrac{L_a-L_u}{a+bi}\right)f(\theta)\right]} & ,\theta_{on}\le\theta<\theta_{off} \\ \dfrac{u(\theta_e-\theta)}{\omega\left[L_u+\left(\dfrac{L_a-L_u}{a+bi}\right)f(\theta)\right]} & ,\theta_{off}\le\theta\le\theta_e \\ 0 & ,else \end{cases} \quad (15)$$

The phase torque is given by:

$$T(i,\theta)=\frac{1}{2}i^2\frac{\partial L(i,\theta)}{\partial\theta}$$

$$=\left(\frac{(a+bi)f'(\theta)+bf(\theta)\left((L_a-L_u)f(\theta)i+\dfrac{u}{\omega}b\right)+c}{(2bL_u+d)(a+bi)^2}\right)\times(L_a-L_u)i^2, \quad (16)$$

where

$$c=u\begin{cases} -a & ,\theta_{on}\le\theta<\theta_{off} \\ a & ,\theta_{off}\le\theta\le\theta_e \\ 0 & ,else \end{cases},$$

$$d=aL_u+(L_a-L_u)f(\theta)-\frac{b}{\omega}h,$$

$$h=\frac{u}{\omega}\begin{cases} u(\theta-\theta_{on}) & ,\theta_{on}\le\theta<\theta_{off} \\ u(\theta_e-\theta) & ,\theta_{off}\le\theta\le\theta_e \\ 0 & ,else \end{cases}.$$

C. Analysis of optimal control variables

To obtain the maximum output power, the optimal control variables are required from Equation (15) as mentioned in the previous topic. The maximum value of the phase current in Fig. 4 can occur when θ is in the range $\theta_{off}\le\theta\le\theta_p$. Therefore, the maximum value of the phase current based on (15) can be given as:

$$i_{\max}=\frac{u(\theta_e-\theta)}{\omega\left[L_u+\left(\dfrac{L_a-L_u}{a+bi_{\max}}\right)f(\theta)\right]}. \quad (17)$$

The maximum output power can be produced when the phase current is controlled in the shape of a flat top

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

as shown in Fig. 4 (b). This result has been confirmed by [24]. Therefore, the shape of the phase current in Fig. 4 (b) is used to determine the optimal control variables so that the maximum value exists in the interval θ_{off} to θ_p.

The maximum value of the phase current at $\theta = \theta_{off}$ or $i_{\max 1}$ can be known by substituting $\theta = \theta_{off}$ into (17) which is given by:

$$i_{\max 1} = \frac{u(\theta_{off} - \theta_{on})}{\omega\left[L_u + \left(\frac{L_a - L_u}{a + bi_{\max 1}}\right)\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\theta_{off}\frac{\pi}{\theta_k}\right)\right)\right]}. \tag{18}$$

Furthermore, the maximum value of the phase current at $\theta = \theta_p$ or $i_{\max 2}$ can be determined by substituting $\theta = \theta_p$ into (17) which is expressed as:

$$i_{\max 2} = \frac{u(2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta_p)}{\omega\left[L_u + \left(\frac{L_a - L_u}{a + bi_{\max 2}}\right)\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\theta_p\frac{\pi}{\theta_k}\right)\right)\right]}. \tag{19}$$

Now $i_{\max 1}$ is equal to the $i_{\max 2}$ since the shape of phase current is flat topped. The optimal turn-on angle can be calculated by substituting $i_{\max 1}$ into $i_{\max 2}$.

Consequently,

$$\theta_{on}^{opt} = \frac{\theta_{off}^{opt}(L_u + 2qf_1(\theta) - qf_2(\theta)) - \theta_3(L_u + qf_1(\theta))}{q(f_1(\theta) - f_2(\theta))}, \tag{20}$$

where

$$q = \frac{L_a - L_u}{a + bi_{\max}},$$

$$f_1(\theta) = 0.5 + 0.5\cos\left(\theta_{off}^{opt}\frac{\pi}{\theta_k}\right),$$

$$f_2(\theta) = 0.5 + 0.5\cos\left(\theta_p\frac{\pi}{\theta_k}\right).$$

Based on (15) in the range $\theta_{off} \le \theta \le \theta_p$, the position of θ at the maximum current point can be determined by $\frac{di}{d\theta} = 0$:

$$\pi(L_a - L_u)\sin\left(\theta\frac{\pi}{\theta_k}\right) = 2\left(\frac{u}{\omega}\right)\theta_k(a + bi_{\max}). \tag{21}$$

Then, the optimal turn-off angle can be found by substituting θ_{off} into θ:

$$\theta_{off}^{opt} = \frac{\theta_k}{\pi}\sin^{-1}\left(\frac{2u\theta_k}{\omega\pi(L_a - L_u)}(a + bi_{\max})\right). \tag{22}$$

Ultimately, as θ_p, u, and $i_{\max}$ are defined, the control variables of the SRG for maximum output power can be calculated as follows:

i. The angular velocity ω can be determined by substituting values of u, $i_{\max}$, and $\theta = \theta_p$ into (21).

ii. The value of θ_{off}^{opt} can be found by applying the values of θ_p, u, $i_{\max}$, and ω into (22).

iii. The value of θ_{on}^{opt} can be determined from (20).

V. ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS

To verify the proposed method, an 8/6 SRG system is set up as shown in Fig. 10. A 3-phase induction motor is used as the prime mover so that its speed is controlled by an inverter. The parameters of the SRG are shown in Table 1. A battery rated at 12 V and 120A is used as the constant dc bus voltage u. The average torque T_m of the prime mover is measured by a rotational torque transducer which is connected between the prime mover and the SRG. The shaft speed or angular velocity ω and aligned position θ_a are detected by a resolver mounted on the SRG. The SRG is driven by a 4-phase asymmetrical bridge converter so that excitation angles are created by a TMS320F28027. The R_L equals 1.25 Ω and is used as the resistive load.

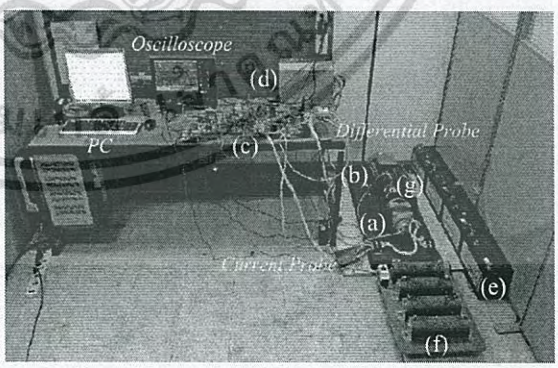


Fig. 10. Experimental setup: (a) 8/6 SRG with a resolver, (b) prime mover, (c) asymmetrical bridge converter and TMS320F28027 DSP controller, (d) variable speed inverter, (e) 12 V, 120 A battery, (f) resistive load, and (g) torque meter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 11 shows the schematic layout of the experimental setup so that the mechanical input power can be calculated by:

$$P_{in} = T_m \omega . \quad (23)$$

The efficiency of the system is defined as:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (24)$$

where P_{out} is the electrical output power and P_{in} is the mechanical input power.

In this paper, the parameters used for analysis comprise $L_u = 42\ \mu H$, $L_a = 470\ \mu H$, $\beta_s = 23°$, $\beta_r = 23.5°$, $a = 0.65$, and $b = 0.155$.

The relationship between the system efficiency of the SRG and the 3 kinds of phase current are investigated, if the P_{out}, u, and θ_{off} are defined as 1000 W, 36 V, and 9°, respectively, the I_L equals to 27.78 A obtained from (6). Analytical results based on the mathematical models (5), (8), (11), and (15) and Figs. 12-14 show the power generation waveforms when the turn-on angle and angular velocity have been adjusted to control I_L = 27.78 A. The values of θ_{on}, θ_{off}, ω, $i_{\max}$, λ_{max}, and I_{rms} are summarized in Table 3.

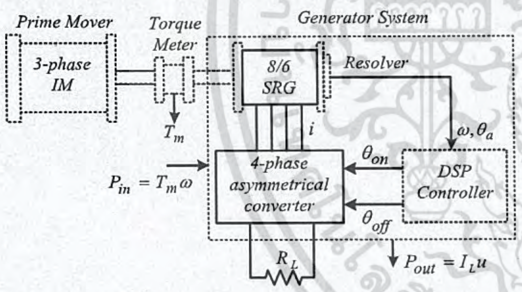


Fig. 11. Schematic layout of the experimental setup.

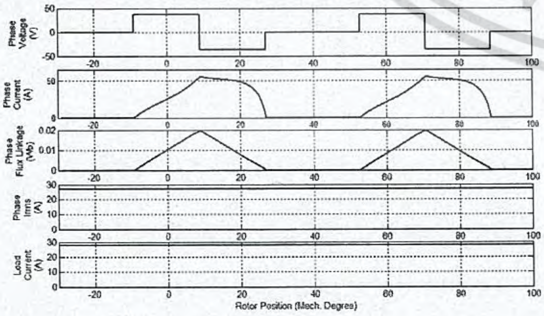


Fig. 12. Case 1: θ_{on} and θ_{off} are -9.20° and 9°.

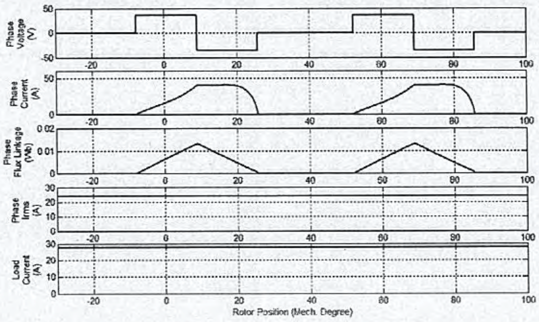


Fig. 13. Case 2: θ_{on} and θ_{off} are -7.80° and 9°.

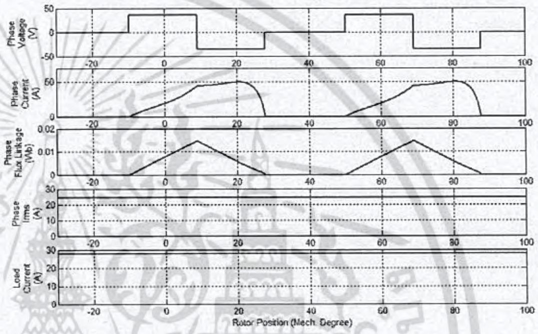


Fig. 14. Case 3: θ_{on} and θ_{off} are -8.15° and 9°.

Table 3: Results obtained from analytical model

Case	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	ω (rad/s)	$i_{\max}$ (A)	$\lambda_{\max}$ (Wb)	I_{rms} (A)
1	-9.20	9	524	55	0.0193	26.81
2	-7.80	9	586	40	0.0132	23.85
3	-8.15	9	605	50	0.0145	24.54

Based on (7) and (9), the copper loss and iron loss depend on I_{rms} and λ_{max}, respectively. In Table 3, the maximum efficiency of the system occurs in case 2 since the copper loss and iron loss are lowest.

The experimental results in Figs. 15-17 show the waveforms of the average torque of the prime mover, phase current, dc bus voltage, and load current. Their values are summarized in Table 4.

The efficiency of the system can be determined using (24). In Table 4, the maximum efficiency of the system occurs in case 2 where the shape of the phase current is flat topped. This result corresponds with the result obtained from the proposed analytical model.

The relationship between the output power of the SRG and the 3 kinds of phase current is investigated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where the maximum value of the 3 kinds of the phase current is controlled at 40 A by adjusting the control variables. The analytical results, the shapes of the phase inductance, phase flux linkage, phase current, phase torque, and load current obtained from analytical models (14), (11), (15), and (16), respectively, are shown in Figs. 18 (a)-(c). The energy conversion loops are shown in Fig. 18 (d) with the maximum output power occurring in case b. In this case, the phase current shape is flat topped. The control variables are summarized in Table 5.

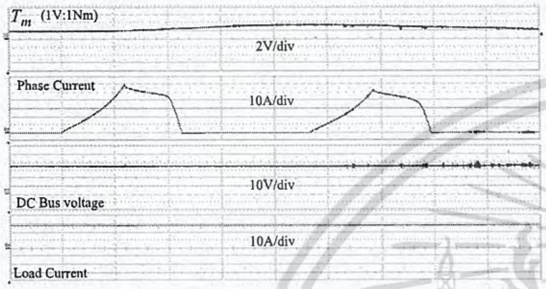


Fig. 15. Case 1: i_{max} = 55 A, θ_{on} and θ_{off} are -9.20° and 9°.

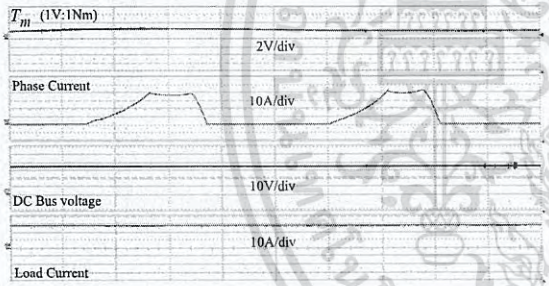


Fig. 16. Case 2: i_{max} = 40 A, θ_{on} and θ_{off} are -7.80° and 9°.

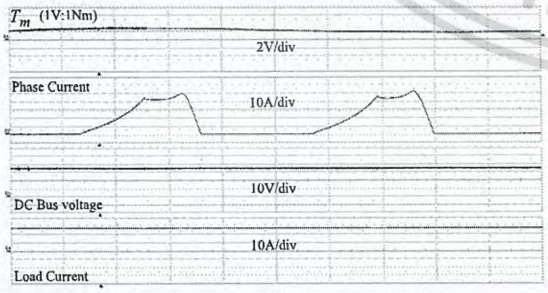


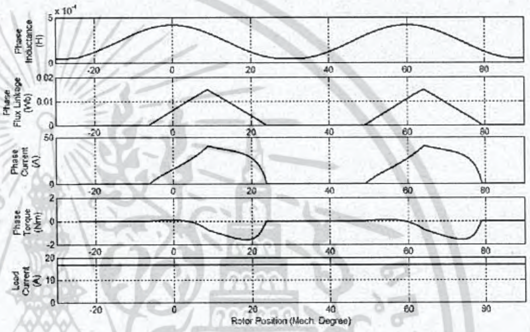
Fig. 17. Case 3: i_{max} = 50 A, θ_{on} and θ_{off} are -8.15° and 9°.

Table 4: System efficiency obtained by 3 kinds of i

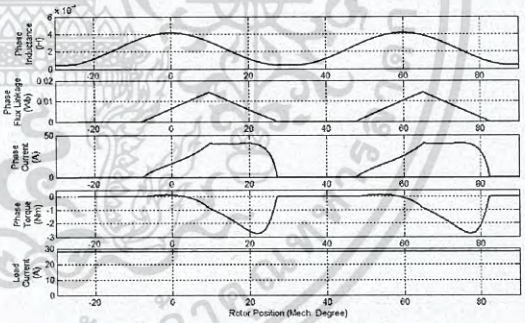
Case	ω (rad/s)	T_m (Nm)	P_{in} (W)	u (V)	I_L (A)	P_{out} (W)	η (%)
1	524	2.58	1351.9	36.2	26.7	965.5	71.4
2	586	2.04	1195.4	36.1	26.8	967.5	80.9
3	605	2.11	1276.6	36.3	26.6	965.6	75.6

Table 5: Three cases of control variables

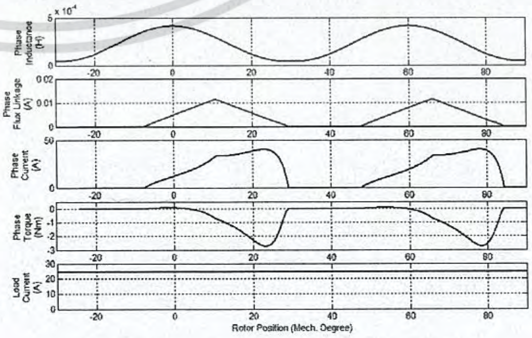
Case	u (V)	ω (rad/s)	i_{max} (A)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	I_L (A)	P_{out} (W)
a	36	513	40	-7.8	5.5	16.70	601.2
b	36	586	40	-7.8	9	27.80	1000.8
c	36	648	40	-7.8	9.5	24.68	888.5



(a) Case a: θ_{on} = -7.8° and θ_{off} = 5.5°

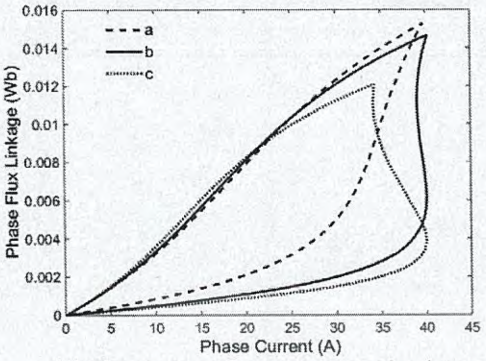


(b) Case b: θ_{on} = -7.8° and θ_{off} = 9°



(c) Case c: θ_{on} = -7.8° and θ_{off} = 9.5°

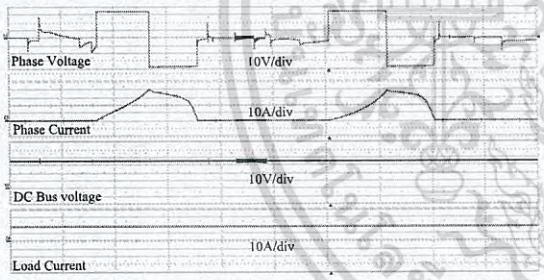
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



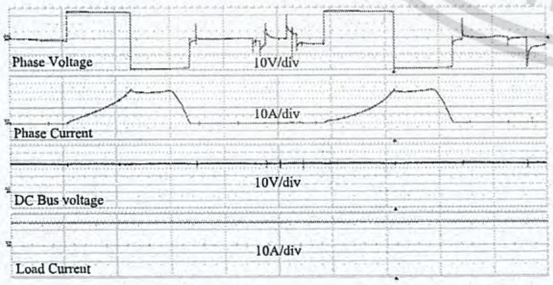
(d) Three cases of energy conversion loop

Fig. 18. Relationship between P_{out} and 3 kinds of i.

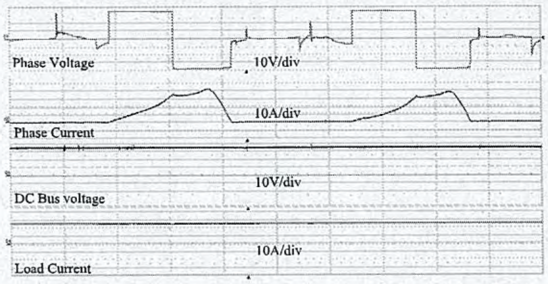
The experimental results in Fig. 19 show the waveforms of the phase voltage, phase current, dc bus voltage, and load current. The 3 cases of output power are: case a = 582.8 W, case b = 967.5 W, and case c = 857.9 W. The output power obtained from the measurement is less than the output power obtained from the analytical model since the resistance of the phase windings in the analytical model is neglected. The SRG can produce the maximum output power in case b so that this result corresponds with the analytical result.



(a) Case a: i_{max} = 40 A, θ_{on} = -7.8°, θ_{off} = 5.5°, I_L = 16.1 A, and u = 36.2 V



(b) Case b: i_{max} = 40 A, θ_{on} = -7.8°, θ_{off} = 9°, I_L = 26.8 A, and u = 36.1 V



(c) Case c: i_{max} = 40 A, θ_{on} = -7.8°, θ_{off} = 9.5°, I_L = 23.7 A, and u = 36.2 V

Fig. 19. Relationship between P_{out} and 3 kinds of i at the same maximum value based on measurement.

To maximize the output power, the optimal control variables ω, θ_{off}^{opt}, and θ_{on}^{opt} can be calculated as follows:

i. The angular velocity ω can be determined by substituting u, i_{max}, and $\theta = \theta_p$ into (21).
ii. The value of θ_{off}^{opt} can be found by using the values of θ_p, u, i_{max}, and ω in (22).
iii. The value of θ_{on}^{opt} can be determined from (20).

Table 6 shows the control variables obtained by the proposed model where θ_p, u, and i_{max} are defined as: θ_p = 23.25°, u = 24 V, 36 V, and 48 V, and i_{max} = 30 A, 40 A, and 50 A.

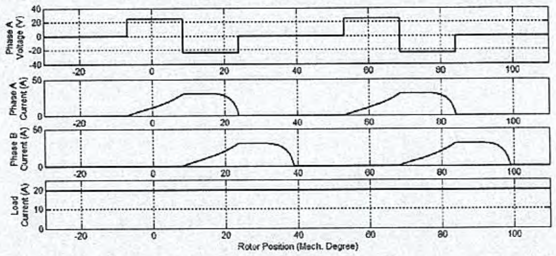
Table 6: Control variables using the proposed model

Case	θ_p (°)	u (V)	i_{max} (A)	ω (rad/s)	θ_{on} (°)	θ_{off} (°)	I_L (A)
i	23.25	24	30	547	-7.2	8.8	19.59
ii	23.25	36	40	586	-7.8	9	27.8
iii	23.25	48	50	628	-8.4	9.2	39.76

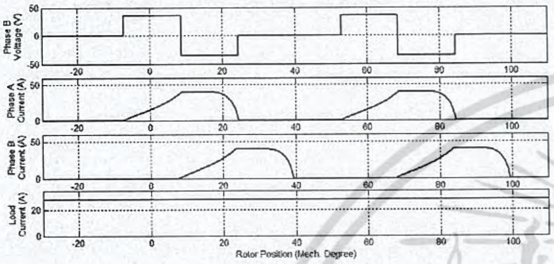
The analytical results for the three cases, the shapes of the phase A voltage, phase A current, phase B current, and the load current obtained from analytical model are shown in Fig. 20. The shape of the phase current in all cases is flat-topped because the SRG is controlled using the optimal variable controls.

The experimental results in Fig. 21 show the waveforms of the phase A voltage, phase A current, Phase B current, and load current. The 3 cases of output power are: case i = 454.9 W, case ii = 967.5 W, and case iii = 1841.2 W.

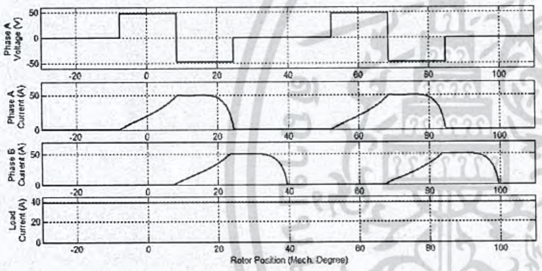
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Case i: θ_{on} = -7.2°, θ_{off} = 8.8°, and I_L = 19.59 A

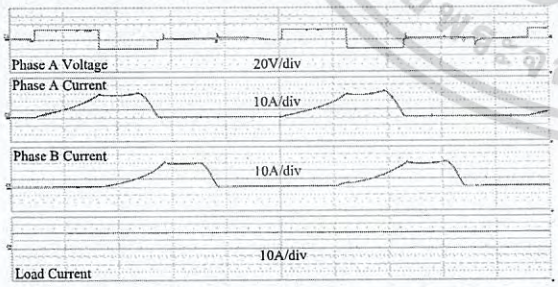


(b) Case ii: θ_{on} = -7.8°, θ_{off} = 9°, and I_L = 27.8 A

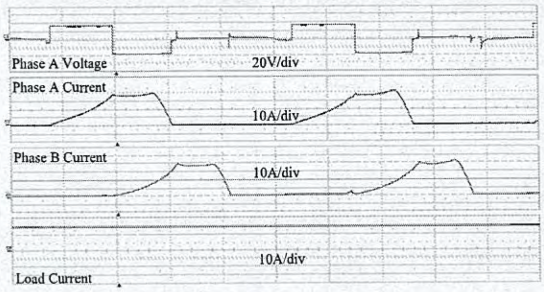


(c) Case iii: θ_{on} = -8.4°, θ_{off} = 9.2°, and I_L = 39.76 A

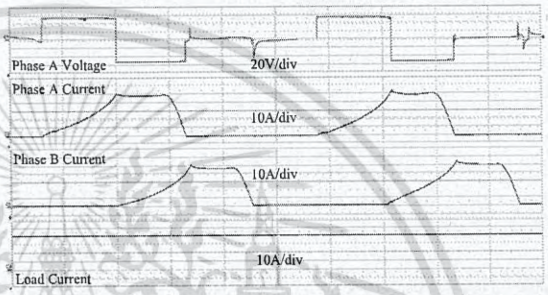
Fig. 20. Three cases for waveforms of the phase current, when the SRG is controlled with the control variables obtained from the analytical model.



(a) Case i: i_{max} = 30 A, θ_{on} = -7.2°, θ_{off} = 8.8°, and I_L = 18.8 A, and u = 24.2 V



(b) Case ii: i_{max} = 40 A, θ_{on} = -7.8°, θ_{off} = 9°, and I_L = 26.8 A, and u = 36.1 V



(c) Case iii: i_{max} = 50 A, θ_{on} = -8.4°, θ_{off} = 9.2°, and I_L = 38.2 A, and u = 48.2 V

Fig. 21. Three cases of waveform of phase current, when the SRG is controlled using the control variables obtained by measurement.

The phase current shape in all cases is flat-topped and the maximum output power is produced because the SRG is controlled using the optimal control variables. These results confirm the validity of the proposed analytical model.

The values of the dc bus voltage, load current, and output power for all three cases are summarized in Table 7. The output power obtained from the analytical model is different from the measurements by an average of 3.49%.

Table 7: Output power obtained from analytical model and by measurement

Case	Mathematical Model			Measurement		
	u (V)	I_L (A)	P_{out} (W)	u (V)	I_L (A)	P_{out} (W)
i	24	19.59	470.2	24.2	18.8	454.9
ii	36	27.8	1000.8	36.1	26.8	967.5
iii	48	39.76	1908.5	48.2	38.2	1841.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The value of the current obtained from the analytical model is more than the value of the current obtained from the measurement. Since the resistance of the phase windings in the analytical model is neglected. Considering the output power based on (6), the key factor used to calculate is the current. Consequently, the output power obtained from the measurement is slightly less than the output power obtained from the analytical model. The efficiency of the system depends on the system's losses. The main losses of the system are copper loss and iron loss. The copper loss based on (7), the significant factor used to calculate is the current. The iron loss based on (9) depending on the flux linkage, the key factor used to calculate the flux linkage is the current. Therefore, the result obtained from the analytical model is different from the measurements.

VI. CONCLUSION

In this paper, the proposed inductance model applied from the flux linkage function is divided into three regions depending on the phase current and rotor position. It requires the geometrical parameters of an SRG at aligned and unaligned rotor positions. The parameters are easily quantified using the FEM. The characteristics of the inductance curve obtained using the proposed model compared with the FEM are closely matched. This result confirms the validity of the proposed model. The phase current model proposed in this paper is derived from the phase voltage equation in combination with the proposed inductance model. The shape of phase current obtained from the analytical model is also corresponding with the measurements. The optimal shape of phase current is investigated. Finally, a method to obtain the optimal control variables to maximize the output power for SRGs in single pulse mode operation is proposed. The optimal shape of the phase current is used to determine the optimal control variables. An 8/6 SRG experimental setup is used to verify the proposed method. Regarding to the results, the SRG can generate the maximum output power when the proposed optimal control variables are applied. The output power obtained from the analytical model is slightly different from the measurements. Therefore, the proposed method is accurate and reliable.

REFERENCES

[1] B. Fahimi, A. Emadi, and R. B. Sepe, "A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 1, pp. 116-124, Mar. 2004.

[2] N. Schofield and S. Long, "Generator operation of a switched reluctance starter/generator at extended speeds," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 48-56, Jan. 2009.

[3] S. R. Macminn and W. D. Jones, "A very high speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications," *in Proc. Conf. Aerospace and Electronics*, pp. 1758-1764, 1989.

[4] C. A. Ferreira, S. R. Jones, W. S. Heglund, and W. D. Jones, "Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generators system for a gas turbine engine application," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 553-561, May 1995.

[5] R. Cardenas, W. F. Ray, and G. M. Asher, "Switched reluctance generators for wind energy applications," *in Proc. Conf. Power Electronics Specialists*, pp. 559-564, 1995.

[6] M. Ziapour, E. Afjei, and M. Yousefi, "Optimum commutation angles for voltage regulation of a high speed switched reluctance generator," *in Proc. Conf. Power Electronics, Drive Systems and Technology*, pp. 271-276, 2013.

[7] P. Asadi and B. Fahimi, "Design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power," *in Proc. Conf. Applied Power Electronics*, pp. 1639-1644, 2006.

[8] P. Kerdtuad and S. Kittiratsatcha "Modeling of a switched reluctance generator using cubic spline coefficients on the phase flux linkage, inductance and torque equations," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 41-48, 2015.

[9] D. W. Choi, S. I. Byun, and Y. H. Cho, "A study on the maximum power control method of switched reluctance generator for wind turbine," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 50, no. 1, article: 4003004, Jan. 2014.

[10] H. Chen and Z. Shao, "Turn-on angle control for switched reluctance wind power generator system," *in Proc. Conf. Industrial Electronics Society*, pp. 2367-2370, 2004.

[11] S. Yilmaz and D. A. Torrey, "Closed loop control of excitation parameters for high speed switched-reluctance generators," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 335-362, Mar. 2004.

[12] I. Kioskeridis and C. Mademlis, "Optimal efficiency control of switched reluctance generators," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1062-1072, July 2006.

[13] S. Yu, F. Zhang, D. H. Lee, and J. W. Ahn, "High efficiency operation of a switched reluctance generator over a wide speed range," *Journal of Power Electronics*, vol. 15, no. 1, pp. 123-130, 2015.

[14] S. Wongguokoon and S. Kittiratsatcha, "Analysis of a switched-reluctance generator for maximum energy conversion," *in Proc. Conf. Sustainable Energy Technologies*, pp. 125-129, 2008.

[15] P. Thongprasri and S. Kittitratsatcha, "Optimal excitation angles of a switched reluctance generator for maximum output power," *Journal of Electrical*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Engineering and Technology, vol. 9, no. 5, pp. 1527-1536, 2014.

[16] K. N. Srinivas and R. Arumugam, "Dynamic characterization of switched reluctance motor by computer-aided design and electromagnetic transient simulation," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 39, no. 3, pp. 1806-1812, May 2003.

[17] S. A. Hossain and I. Husain, "A geometry based simplified analytical model of switched reluctance machines for real-time controller implementation," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1384-1389, Nov. 2003.

[18] C. Roux and M. M. Morcos, "On the use of a simplified model for switched reluctance motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 17, no. 3, pp. 400-405, Sep. 2002.

[19] H. P. Chi, R. L. Lin, and J. F. Chen, "Simplified flux-linkage model for switched-reluctance motors," *in Proc. Electric Power Applications*, pp. 577-583, 2005.

[20] M. Stiebler and K. Liu, "An analytical model of switched reluctance machines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1100-1107, Dec. 1999.

[21] D. A. Torrey, "Switched reluctance generators and their control," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 3-14, Feb. 2002.

[22] P. N. Materu and R. Krishan, "Estimation of switched reluctance motor loses," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 28, no. 3, pp. 668-679, June 1992.

[23] P. Rafajdus, V. Hrabovcova, and P. Hudak, "Investigation of losses and efficiency in switched reluctance motor," *in Proc. Conf. Power Electronics and Motion Control*, pp. 296-301, 2006.

[24] S. Yu, D. H. Lee, and J. W. Ahn, "Efficiency analysis of switched reluctance generator according to current shape under rated speed," *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 491-497, Nov. 2013.

[25] R. L. Lin, J. F. Chen, and H. P. Chi, "Spice-based flux-linkage model for switched reluctance motors," *in Proc. Conf. Electric Power Applications*, pp. 1468-1476, 2005.

[26] M. Krishnamurthy, B. Fahimi, and C. S. Edrington, "On the measurement of mutual Inductance for a switched reluctance machine," *in Proc. Conf. Power Electronics Specialists*, pp. 1-7, 2006.

[27] H. K. Bae and R. Krishnan, "A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance," *in Proc. Conf. Industrial Electronics Society*, pp. 369-374, 2000.

Pairote Thongprasri He received his M.Eng. degree in Electrical Engineering from KMITL. He is studying in D.Eng. program (Electrical Engineering) at KMITL. His research interests are switched reluctance machine and power electronics.

Supat Kittiratsatcha received his M.S. and Ph.D. degrees in Electric Power Engineering from Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. He is an Associate Professor with the Department of Electrical Engineering at KMITL. His research interests include switched reluctance machine design and solid state lighting.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายไพโรจน์ ทองประศรี
วันเดือนปีเกิด	19 มิถุนายน พ.ศ. 2514
สถานที่เกิด	จังหวัดสุพรรณบุรี

ประวัติการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2538

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2549

ประวัติการทำงาน

2535-2536	อาจารย์พิเศษ แผนกอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยกรุงเทพเทคนิคนนท์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
2536-2537	อาจารย์พิเศษ แผนกไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก (อีเทค) จังหวัดชลบุรี
2537-2539	วิศวกร แผนก R&D บริษัทไทยเคเบิ้ลทีวี จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร
2539-2540	อาจารย์พิเศษ แผนกไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยอักษรเทคโนโลยี พัทยา จังหวัดชลบุรี
2540-2544	วิศวกรอาวุโส และหัวหน้าแผนก Material บริษัท PT. (Pet-Toy) จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร
2544-2545	ผู้จัดการ และอาจารย์พิเศษ แผนกไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยวิศวกรรมเทคโนโลยีบริหารธุรกิจ จังหวัดชลบุรี
2545-2547	ฝ่ายวิชาการประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ และพัสดุแผนก ฝ่ายระบบสารสนเทศประกันคุณภาพการศึกษา วิทยาลัยไออาร์พีซี จังหวัดระยอง และเป็นอาจารย์พิเศษแผนกไฟฟ้าอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ศูนย์สัตหีบ
2547-2549	ผู้จัดการฝ่ายซ่อมบำรุง บริษัท TPS จำกัด จังหวัดชลบุรี
2550-ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จังหวัดชลบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้