

การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อน

มอเตอร์รีเลย์คอนเวอร์เตอร์

DESIGN AND BUILD A CONVERTER USING FOR
A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

โดย

ชัชวาล

เขื่อนเหล็กกุล

วิมลพงษ์

ชานนชญ

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์
DESIGN AND BUILD A CONVERTER USING FOR A SWITCHED RELUCTANCE
MOTOR

โดย

ธีร์ธวัช เขาวนัลลิตกุล

ธีร์พงษ์ ชำนาญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

DESIGN AND BUILD A CONVERTER USING FOR A SWITCHED RELUCTANCE
MOTOR

TEETHAWAT CHAOLILITKUL
TEERAPONG CHAMNAN

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

ปีการศึกษา 2556

การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์
DESIGN AND BUILD A CONVERTER USING FOR A SWITCHED RELUCTANCE
MOTOR

โดย

นายธีรวัช เชาวน์ลิลิตกุล

นายธีรพงษ์ ชำนาญ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างคอนเวอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นายธีรวัช เซวาน์ลิตกุล
2. นายธีรพงษ์ ชำนาญ

.......... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา)

การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์

นายธีรวัช เขาวนลิลิตกุล 53010748
นายธีรพงษ์ ชำนาญ 53010751
รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ switch (n+1) สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ 4 เฟส แบบ 8/6 โดยมีการออกแบบที่ลดจำนวนสวิตช์ลงในวงจรขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรขับเคลื่อน อีกทั้งยังเป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างสองวงจร โดยในการทดลองจะต้องควบคุมมุมจุดชนวนให้อยู่ในช่วงการทำงานที่เป็นมอเตอร์หรือในช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวก

ในงานวิจัยนี้ใช้ DSP รุ่น TMS320F2812 ควบคุมวงจรขับเคลื่อนเพื่อสั่งการสับสวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ที่ DC Bus ระดับแรงดัน 48 โวลต์ เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานในทิศทางตามที่ต้องการและมีประสิทธิภาพ

DESIGN AND BUILD A CONVERTER USING FOR A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Mr. Teethawat	Chaolitkul	53010748
Mr. Teerapong	Chamnan	53010751
Assoc.Prof.Dr.Supat	Kittiratsatcha	Supervisor

2013

Abstract

This thesis presents design and build a $(n+1)$ switch converter using for a 4 phases 8/6 switched reluctance motor. Comparing with two switchers per phase converter it is designed to reduce the number of switches in the converter in order to save expense in building converter and also indicated advantages and disadvantages for both converters. The turning off-on angle must be controlled at range of motoring mode or when the slope of the inductance is positive which will run the motoring mode.

This research uses DSP no.TMS320F2812 to control gate drive switching converter in the DC-Bus at 48 volts. It causes the motor to run effectively in the desired direction.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการขอบคุณและรู้สึกซาบซึ้งต่อความกรุณาที่ รศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์ สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆเพื่อให้โครงการมีความก้าวหน้าเรื่อยมา ตลอดจน อาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้จัดทำในครั้ง นี้ ถ้าปราศจากท่านเหล่านี้ โครงการนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณพี่ไพวรรณ เกิดตรวจ และพี่ที่ห้อง PEARL LAB และคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนๆร่วมห้องปฏิบัติการ (PEARL LAB) ที่คอยเอาใจใส่และคอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆมาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนๆห้องโครงการอื่นๆที่คอยสอบถามถึงความก้าวหน้าของโครงการ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่อุปการะ เลี้ยงดูและคอยให้กำลังใจให้ในยามที่เหนื่อยล้า และท้อแท้

คุณประโยชน์ประการใดที่พึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบคุณประโยชน์ประการนั้นให้แก่ผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	5
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์	5
2.2 กราฟ Magnetizing	6
2.3 ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position)	7
2.4 ตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position)	9
2.5 ตำแหน่ง Intermediate	10
2.6 แรงบิด	10
2.7 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตซ์ต่อเฟส	13
2.8 วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม	15
2.9 การทำงานเชิงพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ SRM	17
2.9.1 โหมดควบคุมกระแส	17
2.9.2 โหมดกระแสพัลส์	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์	20
3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์	20
3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์	21
3.3 อุปกรณ์และวงจรสำหรับควบคุมสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์	22
3.3.1 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส	22
3.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟสที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม	22
3.3.3 วงจรขับเคลื่อนและวงจรป้องกันกระแสเกินสำหรับไอจีบีทีกำลัง	23
3.3.4 ชุดวงจรวัดกระแส	24
3.3.5 ชุดวงจรวัดแรงดัน	24
3.3.6 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing , DSP)	26
3.3.7 ชุดวงจรเรียงกระแส (Rectifier)	26
3.3.8 วงจรวัดความเร็ว (Speed Sensor Circuit)	27
3.3.9 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ (Incremental Encoder)	28
3.3.10 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแทนซ์	29
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	30
4.1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมการทำงาน	31
4.1.1 สัญญาณขั้วนำเกตจาก DSP	31
4.1.2 ผลการทดสอบสัญญาณจากตัว Encoder	32
4.2 เปรียบเทียบระหว่างวงจร switch (n+1) และวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส	34
4.2.1 การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์	34
4.2.2 การเปรียบเทียบเชิงวิศวกรรม	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	39
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก ก โปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้ DSP ด้วยภาษาซี (C-Language)	41
ภาคผนวก ข ชุดทดลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์	78
ภาคผนวก ค บทความวิชาการ	83
ประวัติผู้เขียน	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6	5
2.2 กราฟ Magnetizing	6
2.3 มอเตอร์แบบ 8/6 ที่ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) เฟส A	7
2.4 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่งตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) และตำแหน่ง อื่นอะไลน์ (Unaligned position)	8
2.5 มอเตอร์แบบ 8/6 ที่ตำแหน่งอื่นอะไลน์ (Unaligned position) เฟส A	9
2.6 แสดงกราฟค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส	10
2.7 แสดงค่าพลังงานสะสมและ Co-energy	11
2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy	12
2.9 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟส	13
2.10 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะเพิ่มพลังงาน	14
2.11 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะฟรีวิลลิง (free wheeling)	14
2.12 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน	15
2.13 วงจรขับเคลื่อนแบบใช้ส่วนจ่ายพลังงานร่วมกัน	16
2.14 วงจรขับเคลื่อนแบบใช้กระแสไหลวนร่วมกัน	16
2.15 การควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping	17
2.16 การควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping	18
2.17 การควบคุมโหมดกระแสพัลส์	19
3.1 วงจรขับเคลื่อนแบบ (switch n+1)	20
3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์	21
3.3 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส	22
3.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟสที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม	22
3.5 วงจรขับนำเกตและวงจรป้องกันกระแสเกินสำหรับ IGBT Module	23
3.6 ตัววัดกระแสเบอร์ L08P150D15	24
3.7 ตัววัดแรงดันเบอร์ ISO124	25
3.8 วงจรวัดแรงดันตีซีบัส	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812	26
3.10 วงจรเรียงกระแสไฟตรงคิซี	27
3.11 วงจรวัดความเร็ว	27
3.12 เอ็นโค้ดเดอร์ เบอร์ R137 ของบริษัท Gurley Precision Instrument	28
3.13 สัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์	28
3.14 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 รุ่น RA165187	29
4.1 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน	30
4.2 สัญญาณขับเคลื่อนของ IGBT ตัวล่างที่ได้จากช่อง PWM ของตัว DSP	31
4.3 สัญญาณ QEPI, QEP1 และ QEP2 ที่ได้จากตัว Encoder	32
4.4 แสดงมุมทางกล, มุมทางไฟฟ้าของเฟส A และมุมทางไฟฟ้าของเฟส B	33
4.5 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1)	34
4.6 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส	34
4.7 สัญญาณขับเคลื่อน กระแส และแรงดันในโหมต Single Pulse ของ Switch (n+1)	36
4.8 สัญญาณขับเคลื่อน กระแส และแรงดันในโหมต Single Pulse ของคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส	36
4.9 สัญญาณขับเคลื่อน กระแส และแรงดันในโหมตควบคุมกระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ของ Switch (n+1)	37
4.10 สัญญาณขับเคลื่อน กระแส และแรงดันในโหมตควบคุมกระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส	38
ข.1 ภาพรวมของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์	79
ข.2 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DSP320F2812	79
ข.3 ชุดวงจร IGBT Gate Drives (ล่าง) , วงจรไฟเลี้ยง Gate Drives +20 โวลต์ (บน)	80
ข.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1)	80
ข.5 ชุดวงจรวัดกระแสทั้ง 4 เฟส	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.6 ชุดวงจรวัดแรงดันที่ DC bus	81
ข.7 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแทนซ์	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน (ภาคเรียนที่1)	3
1.2 แผนการดำเนินงาน (ภาคเรียนที่2)	4
2.1 พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแทนซ์ที่ใช้ศึกษา	6
4.1 พารามิเตอร์ของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	30
4.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการสร้างคอนเวอร์เตอร์	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น นำมาใช้เป็นปั๊มในรถยนต์รุ่นใหม่ ๆ มอเตอร์ต่างๆ ในอากาศยานรุ่นใหม่ รถยนต์ไฮบริดจ์ เป็นต้น สาเหตุที่มีการนำมาใช้งานกันมาก เนื่องจากข้อดีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการออกแบบโครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อน มีน้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีขดลวดที่โรเตอร์ ทำให้ราคาถูก ไม่ต้องมีการบำรุงรักษามาก แต่ตรงกันข้ามกับการควบคุมซึ่งจะมีความซับซ้อน ทั้งการควบคุมให้ทำงานในโหมดของมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมของการนำกระแสให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละเฟส จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากและมีคุณสมบัติในการทำงานที่สูง แต่ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้นอีกทั้งการแข่งขันทางการตลาดของผู้ผลิตมีจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้ราคาถูกลง และขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เล็กลง แต่ประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์ได้รับการค้นคว้าและพัฒนาเรื่อยๆ ซึ่งในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมได้เริ่มมีความสนใจเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์เป็นอย่างมาก

โครงการนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์ switch (n+1) สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ โดยเริ่มต้นจากการศึกษาและออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้จำนวนตัวขับเคลื่อนสวิตช์ที่ลดลง เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและการควบคุมกระแสและแรงดันในแต่ละเฟสของมอเตอร์ รวมไปถึงข้อดีและข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบเมื่อเทียบกับวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส หลังจากนั้นได้ทำการสร้างระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 พิกัดกำลัง 2.32 กิโลวัตต์ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์
2. เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ switch (n+1) และสองสวิตช์ต่อเฟส

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

ศึกษาหลักการการทำงานของสวิตช์รีเลย์แบบอัตโนมัติและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการลดจำนวนสวิตช์ลงจากวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส และสามารถควบคุมให้ทำงานในโหมดมอเตอร์ได้ โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1.4.1 ศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีเลย์แบบอัตโนมัติเบื้องต้น

ทำการศึกษาโดยการสร้างโมเดลจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีเลย์แบบ 4 เฟส(8/6) และศึกษาลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งของโรเตอร์ในลักษณะต่างๆ จากโมเดลที่จำลองขึ้น

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแบบสวิตช์รีเลย์

ทำการศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีเลย์จากตำราต่างๆ เพื่อให้เกิดความเข้าใจ และสามารถนำไปวางแผนการดำเนินงาน

1.4.3 ศึกษาลักษณะรูปแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ของสวิตช์รีเลย์แบบอัตโนมัติ

ทำการศึกษารูปแบบและหลักการการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ จากปริยญาณิพนธ์ ต่างๆ เพื่อหาวิธีการในการสร้างและปรับปรุงคอนเวอร์เตอร์ในรูปแบบอื่นๆ ที่ยังสามารถขับเคลื่อนสวิตช์รีเลย์แบบอัตโนมัติได้ตามเดิม

1.4.4 ศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานในสวิตช์รีเลย์แบบอัตโนมัติ

ทำการเขียนโปรแกรมในตัวประมวลผลสัญญาณ (DSP) ตามวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้ ที่มีการลดจำนวนสวิตช์ พร้อมกับทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมให้สอดคล้องกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าว

1.4.5 ทำการสร้างคอนเวอร์เตอร์ และตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ทำการสร้างคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการทดสอบวงจรคอนเวอร์เตอร์ในส่วนต่างๆที่สร้างขึ้น แล้วนำไปทดลองขับกับสวิตช์รีเลย์แบบอัตโนมัติ พร้อมกับทำการปรับปรุงแก้ไขในส่วนที่เหลือ

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ

แผนการดำเนินงานในการทำโครงการนี้ ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1.1 และ 1.2
 ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน (ภาคเรียนที่1)

หัวข้อ(ภาคเรียนที่1)	พ.ศ.2556																			
	มิถุนายน				กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ศึกษาทฤษฎีของ เครื่องจักรกลไฟฟ้า หมุนแบบสวิตซ์รีลัก แตนซ์	←→																			
ศึกษาวงจร ขับเคลื่อนและโหมด การควบคุมกระแส ในแต่ละช่วงการ ทำงาน					←→															
ศึกษาวิธีการควบคุม ตัวประมวลผล สัญญาณ (DSP)							←→													
ศึกษาแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของ คอนเวอร์เตอร์ สำหรับสวิตซ์รีลัก แตนซ์โหมดเตอร์									←→											
การออกแบบและ สร้างวงจรคอนเวอร์ เตอร์สำหรับสวิตซ์รี ลักแตนซ์โหมดเตอร์													←→							

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงาน (ภาคเรียนที่2)

หัวข้อ(ภาคเรียนที่2)	พ.ศ.2556								พ.ศ.2557											
	พฤศจิกายน				ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ประกอบชิ้นงาน ตามที่ได้ออกแบบไว้ และเขียนโปรแกรม การควบคุม DSP																				
ทดสอบการใช้งาน จริงในการควบคุม การทำงานของสวิตซ์ รีลักแตนซ์มอเตอร์																				
บันทึกค่าจากผลการ ทดลองและปรับปรุง แก้ไขผลงานและ โปรแกรมที่ควบคุม																				
สรุปผลโครงการงาน และจัดทำรูปเล่ม ปฏิญานิพนธ์																				

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.6.1 เข้าใจทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

1.6.2 เข้าใจทฤษฎีและหลักการควบคุมกระแสในสวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์

1.6.3 สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของสวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์ ในตัว

ประมวลผล สัญญาณดิจิทัล (DSP) ตามรูปแบบของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้

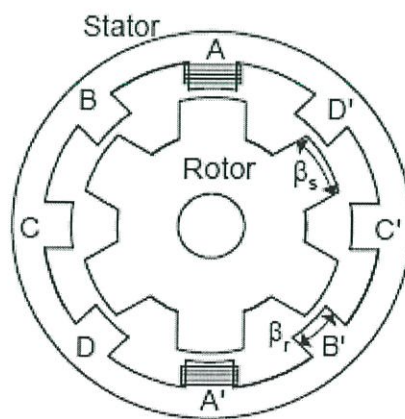
1.6.4 ฝึกทักษะการทำงานเป็นหมู่คณะและการรับฟังความคิดเห็นของผู้อื่น เป็นคนตรงต่อเวลาและมีความรับผิดชอบมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้จะมีโครงสร้างแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่สเตเตอร์ แต่จะไม่มีขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้การสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้นั้นทำได้ง่ายและราคาถูกกว่าแบบอื่นๆ โดยทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles) เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แรงบิดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ส่วนที่เคลื่อนที่ได้เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุด และสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดที่ตำแหน่งอื่นได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้ากระตุ้นให้กับขดลวดที่อยู่ในเฟสถัดไป ในช่วงการทำงานเป็นมอเตอร์จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าต้องการให้ทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าลดลง เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์จะมีกระแสไหลเข้าในแต่ละเฟสเพียงทิศทางเดียวและแต่ละเฟสยังเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพมากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่นซึ่งทำให้ยากต่อการลัดวงจร เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาคือเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 ซึ่งมีจำนวนขั้วที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์เท่ากับ 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และพิกัดที่ใช้แสดงในตารางที่ 2.1



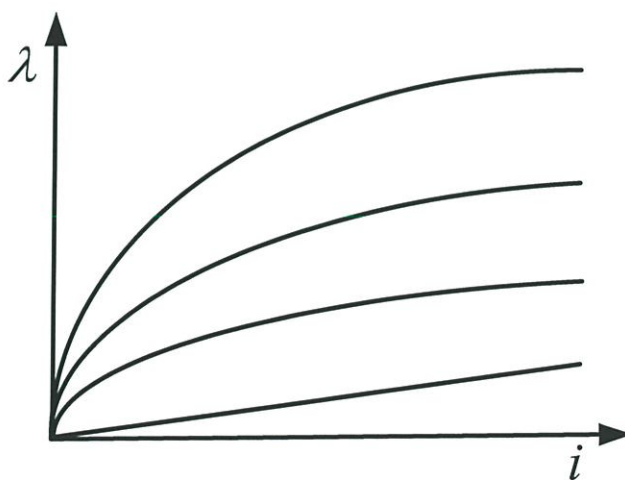
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6

ตารางที่ 2.1 พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแทนซ์ที่ใช้ศึกษา

Model	RA 165187-15T
Rated output	2.32 kW
Rated speed/Max speed	6,000/12,000 rpm
Torque/Max torque	3.69/4.20 N-m
Rated voltage	48 VDC
Dimension	130x130x160 mm
Number of stator/rotor phase	4 phase , 8/6

2.2 กราฟ Magnetizing

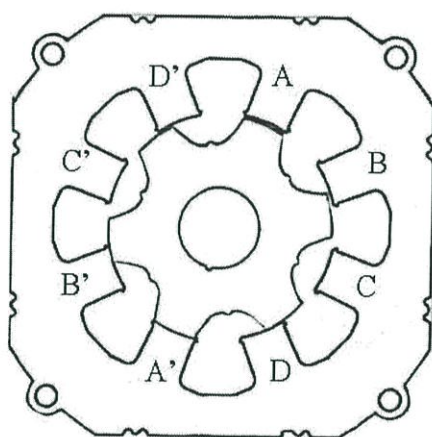
คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวกับ (λ) ในแนวตั้งฉาก และกระแสในขดลวดเฟส (i) ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ ดังแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟเหล่านี้สามารถมีได้หลายเส้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ด้วย ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้อ จึงเป็นทั้งฟังก์ชันของกระแสเฟสและตำแหน่งของโรเตอร์



รูปที่ 2.2 กราฟ Magnetizing

2.3 ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position)

ณ ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) นี้คือตำแหน่งที่แกนของขั้วโรเตอร์คู่ใดๆ วางอยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแกนของขั้วสเตเตอร์ของเฟสใดเฟสหนึ่ง ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.3 แสดงถึงมอเตอร์สามเฟสชนิด 8/6 จะเห็นได้ว่าขั้วโรเตอร์อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟส A ณ ตำแหน่งนี้เมื่อมีกระแสไหลเข้าไปยังเฟส A แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูงที่สุด เนื่องจากมีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance, R) ค่าน้อยที่สุด ถ้าลองขยับโรเตอร์ไปในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาเล็กน้อยจะพบว่าโรเตอร์จะถูกดึงกลับมายังที่ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) นี้ แสดงว่าจุดนี้เป็นจุดสมดุลแบบมีเสถียรภาพ (Stable Equilibrium)



รูปที่ 2.3 มอเตอร์แบบ 8/6 ที่ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) เฟส A

จากสมการที่ 2.1 พบว่า ถ้าความกว้างของช่องอากาศระหว่างขั้วของโรเตอร์กับขั้วของสเตเตอร์มีค่าน้อยที่สุดจะทำให้ค่ารีลัคแตนซ์ \mathfrak{H} มีค่าต่ำที่สุดด้วย

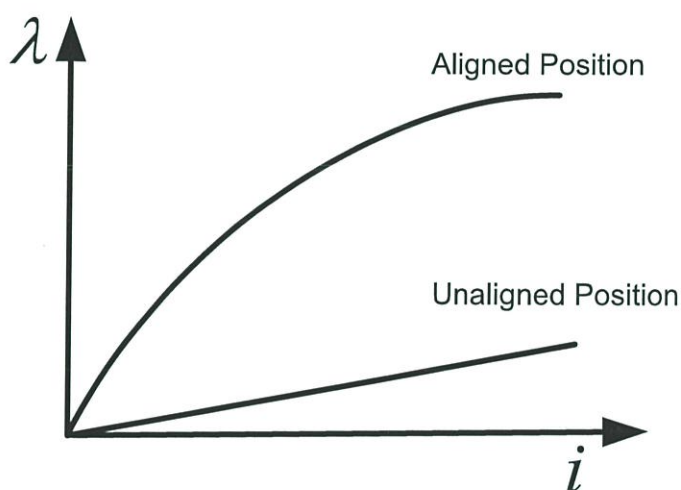
$$\mathfrak{H} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.1)$$

โดยที่ l คือความกว้างของช่องอากาศ ค่า μ คือค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และ A คือค่าพื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านแบบตั้งฉาก ถ้ากำหนดให้แกนเหล็กที่ใช้ทำมอเตอร์มีความซึมซาบแม่เหล็กที่สูงมาก ดังนั้นจึงสามารถละเลยค่ารีลัคแตนซ์ของแกนเหล็กได้ เมื่อค่ารีลัคแตนซ์รวมของวงจรมีค่าต่ำสุด ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมีค่าสูงสุดตามสมการที่ 2.2

$$L = \frac{N^2}{\mu_{total}} \quad (2.2)$$

เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำของวงจร N คือจำนวนรอบขดลวดของเฟส และ μ_{total} คือค่ารีลักแตนซ์รวมของวงจร

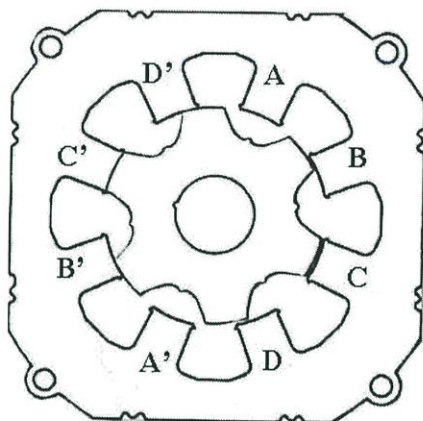
โดยปกติแล้วแล้ววัสดุที่นำมาใช้ทำแกนของมอเตอร์จะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์อิ่มตัวเกิดขึ้น ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟ magnetizing ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งตำแหน่งของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) จะอยู่ตำแหน่งเส้นบนสุด



รูปที่ 2.4 กราฟ Magnetizing แสดงตำแหน่งตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) และตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned position)

2.4 ตำแหน่งอันอะไลน์ (unaligned position)

ณ ตำแหน่งนี้แกนตรงกลางระหว่างขั้วของโรเตอร์ (Interpolar Axis) อยู่ตรงกับขั้วของสเตเตอร์ของเฟส A ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 มอเตอร์แบบ 8/6 ที่ตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned position) เฟส A

เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟส A แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้ามืดลองขยับโรเตอร์เพียงเล็กน้อยพบว่าโรเตอร์จะเคลื่อนที่หมุนออกจากตำแหน่งนี้ และไปหยุดที่ตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) ดังนั้น ณ จุดอันอะไลน์ (Unaligned) จะเป็นจุดสมดุลแบบไม่มีเสถียรภาพ (Unstable Equilibrium)

จากรูปที่ 2.5 พบว่า ค่าความกว้างของช่องอากาศมีค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงทำให้ค่ารีลัคแตนซ์มีค่าสูงสุด และทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรถั่วที่สุดด้วย ส่วนเส้นกราฟ magnetizing จะอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่งนี้เส้นกราฟ magnetizing จะเป็นเส้นตรงและไม่ปรากฏการอิ่มตัวเกิดขึ้น เนื่องจากค่ารีลัคแตนซ์ของช่องอากาศมีค่ามากกว่าของแกนมอเตอร์มาก ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$L = N^2 \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_{core} + \mathfrak{R}_{gap}} \right) \quad (2.3)$$

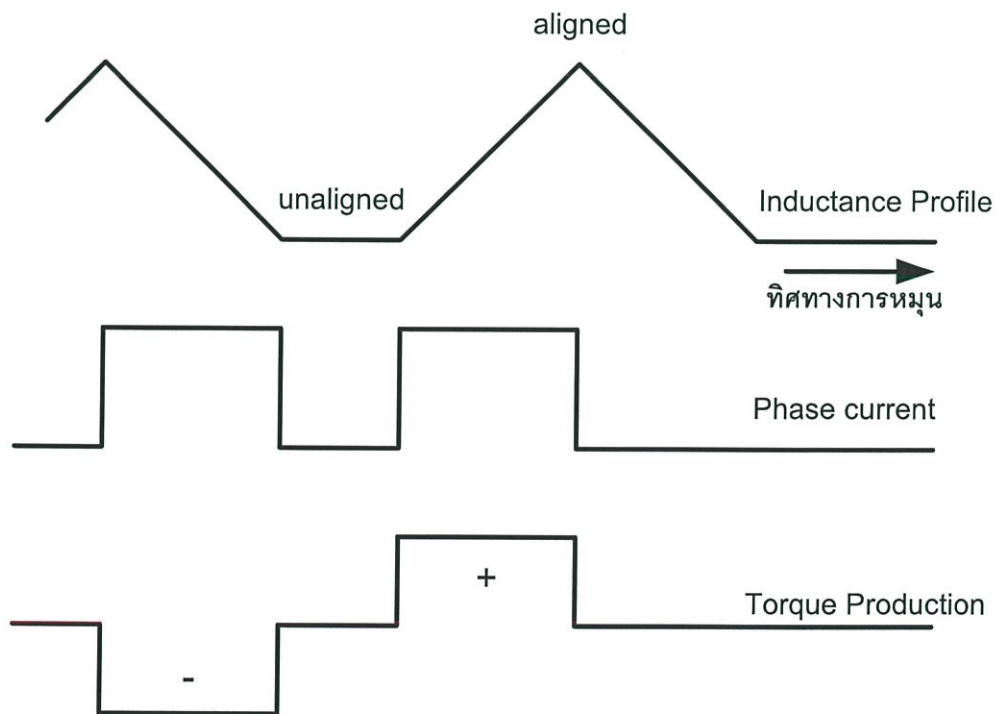
2.5 ตำแหน่ง Intermediate

คือตำแหน่งของโรเตอร์ที่อยู่ระหว่างตำแหน่งอะไลน์ (Aligned Position) และตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned Position) พบว่าเส้นกราฟ magnetizing จะเริ่มปรากฏให้เห็นปรากฏการณ์อิมิตัว ณ ตำแหน่งเมื่อขั้วของโรเตอร์เริ่มซ้อนทับกับขั้วของโรเตอร์

2.6 แรงบิด

เมื่อป้อนกระแสเข้าไปในขดลวดของเฟสใดเฟสหนึ่ง จะเกิดแรงบิดทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางที่ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุด โดยที่แรงบิดที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลเข้าขดลวด

แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวก (Positive Torque) ถ้ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวดอยู่ในช่วงความชันของค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นค่าบวกตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า แรงบิดนี้เรียกว่าเป็นแรงบิดแบบมอเตอร์ (Motoring Torque) แต่ถ้าป้อนกระแสเข้าในช่วงที่ค่าความเหนี่ยวนำเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ เป็นค่าลบตามทิศทางการหมุนไปข้างหน้า แรงบิดนี้จะถูกเรียกว่าแรงบิดแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating torque) และมีค่าเป็นลบ (Negative torque)



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟค่าความเหนี่ยวนำและแรงบิดเมื่อป้อนกระแสเข้าขดลวดเฟส

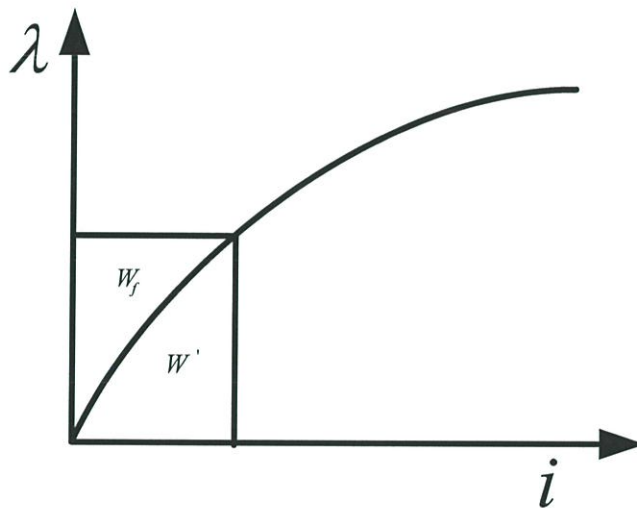
สมการที่ 2.4 แสดงถึงแรงบิดที่เกิดขึ้นของเฟสไดเฟสหนึ่ง ณ ตำแหน่งของโรเตอร์ใดๆ

$$T = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=\text{constant}} \quad (2.4)$$

เมื่อ W คือ coenergy ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ magnetizing ณ ตำแหน่งโรเตอร์ใดๆดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$W' = \int_0^i \lambda di \quad (2.5)$$

โดยพื้นที่เหนือกราฟนั้นคือก็คือ stored field energy , W ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.7 แสดงค่าพลังงานสะสมและ Co-energy

จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 เราสามารถอธิบายว่า instantaneous torque ได้โดยการใช้รูปที่ 2.8 กำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง θ_1 ไปยังตำแหน่ง θ_2 โดยที่กระแสที่ไหลในเฟสยังมีค่าคงที่ ในขณะที่นั้นมอเตอร์จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกับแหล่งจ่ายและมีการเปลี่ยนแปลงของทั้ง stored field energy และ coenergy และ instantaneous torque สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของ coenergy ΔW_m และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตำแหน่งของโรเตอร์ $\Delta \theta$ พลังงานที่เปลี่ยนถ่ายกับแหล่งจ่ายคือ

$$\Delta W_e = ABCD \quad (2.6)$$

การเปลี่ยนแปลงของ coenergy สามารถที่อธิบายได้ดังนี้

$$\Delta W_f = OBC - OAD \quad (2.7)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ coenergy ซึ่งเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล คือ

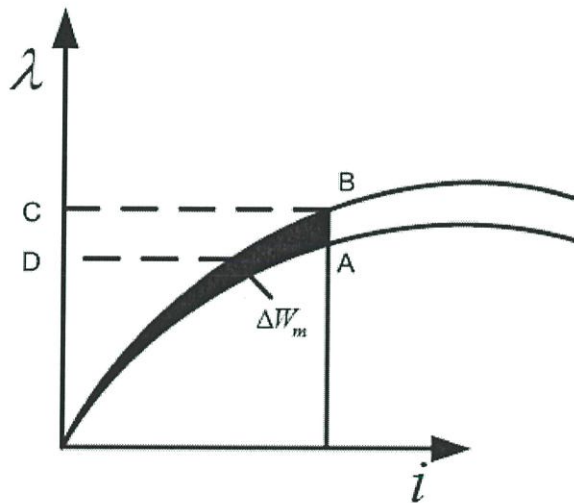
$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_f \quad (2.8)$$

$$= ABCD - (OBC - OAD)$$

$$= (ABCD + OAD) - OBC$$

$$= OAB$$

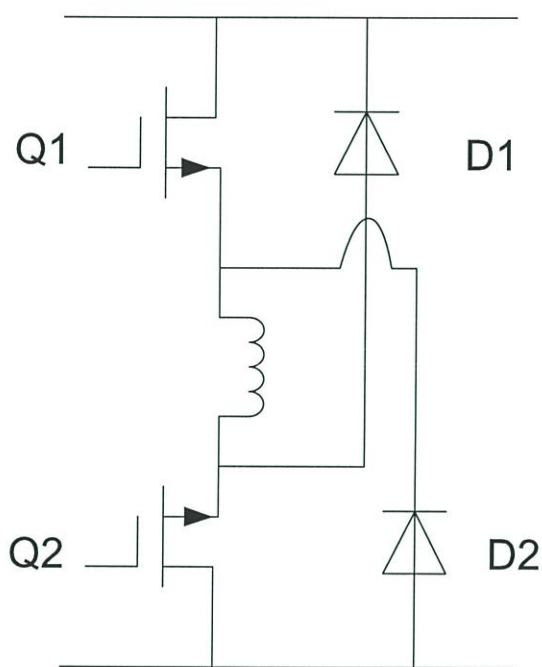
จะเห็นได้ว่าพลังงานทั้งหมดที่ได้รับจากแหล่งจ่าย ไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลทั้งหมด บางส่วนถูกเก็บไว้ในรูปของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Co-energy

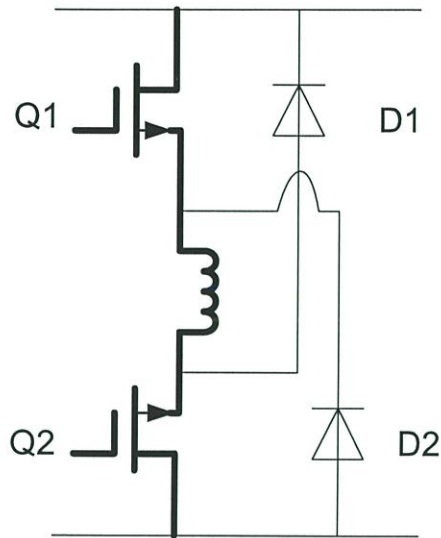
2.7 วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส

วงจรชนิดนี้เป็นวงจรที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากสามารถที่จะควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟสให้เป็นได้ทั้งค่าบวก ค่าศูนย์ หรือค่าลบ นั้นหมายถึงมีความสามารถที่จะควบคุมรูปร่างของกระแสเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



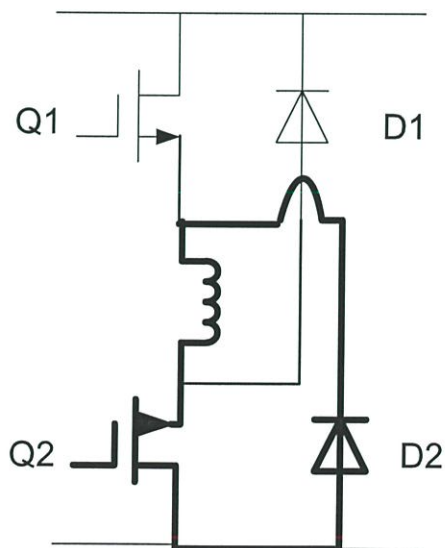
รูปที่ 2.9 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟส

ในการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวด การทำงานของวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือกรณีที่ 1 เมื่อ สวิตช์ Q1 และ Q2 ทั้งคู่ ON แรงดันตกคร่อมขดลวดจะมีค่าเท่ากับแรงดันดีซีลิงค์ กระแสและเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10



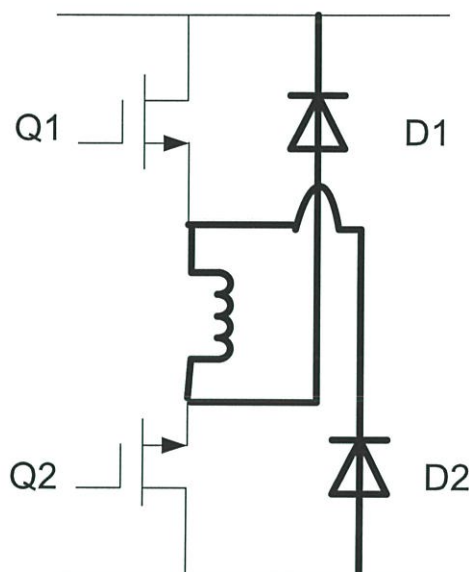
รูปที่ 2.10 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะเพิ่มพลังงาน

กรณีที่ 2 ถ้าสวิตช์ Q1 OFF ในขณะที่สวิตช์ Q2 ON กระแสจะไหลวนผ่านไดโอด D2 แรงดันตกคร่อมขดลวดในขณะนั้นจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมไดโอดรวมกับแรงดันตกคร่อมสวิตช์ขณะ ON ซึ่งมีค่าน้อยมาก ในทำนองเดียวกันถ้าสวิตช์ Q1 ON ในขณะที่ Q2 OFF ดังรูปที่ 2.10 กระแสจะไหลวนผ่านไดโอด D1 แรงดันตกคร่อมขดลวดก็มีค่าใกล้เคียงศูนย์



รูปที่ 2.11 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะฟรีวิลลิง (free wheeling)

กรณีนี้ 3 ถ้าต้องการสร้างแรงดันค่าลบคร่อมขดลวดเพื่อลดกระแส หรือเส้นแรงแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการ OFF สวิตช์ Q1 และ Q2 กระแสจะไหลผ่านไดโอดทั้งคู่และคืนพลังงานสู่แหล่งจ่ายดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าวงจรขับเคลื่อนแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมรูปร่างของกระแสได้ดี นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์ของเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหาย เฟสที่เหลือยังสามารถทำงานต่อไปได้

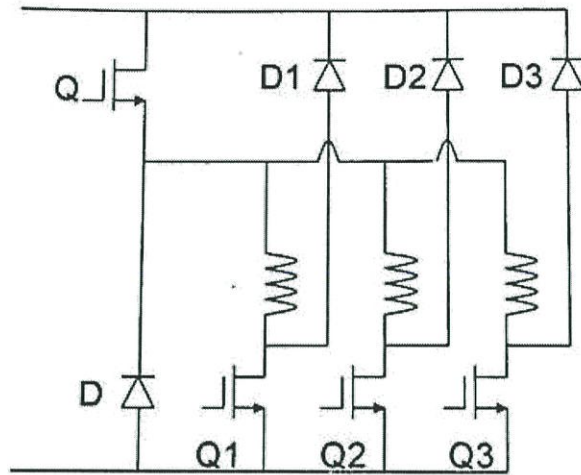


รูปที่ 2.12 วงจรขับเคลื่อนสองสวิตช์ต่อเฟสขณะลดพลังงาน

2.8 วงจรขับเคลื่อนแบบที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม

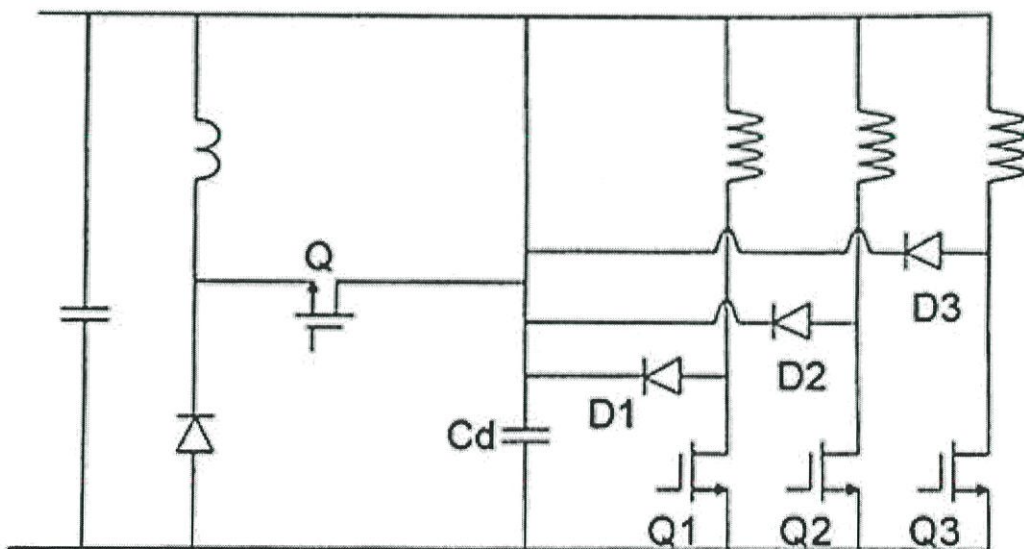
เนื่องจากว่าสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้นราคาของตัวมอเตอร์เองจึงมีราคาถูกเมื่อเทียบกับราคาของวงจรขับเคลื่อน จากที่ได้กล่าวมาแล้ววงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟส ถึงแม้จะมีความยืดหยุ่นในการควบคุมที่สูง แต่ต้องใช้อุปกรณ์ในการสวิตช์ถึง 4 ตัว นั่นคือสวิตช์ที่ควบคุมได้ 2 ตัว และไดโอดอีก 2 ตัว ดังนั้นจึงเกิดความคิดที่จะใช้อุปกรณ์ร่วมกันของทุกเฟส สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ การใช้สวิตช์ควบคุมร่วมกัน และการใช้ส่วนกระแสไหลวนร่วมกัน

รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์แบบสามเฟส ซึ่งทั้งสามเฟสนั้นใช้สวิตช์ Q ร่วมกันในการควบคุมกระแส ในขณะเดียวกัน สวิตช์ของแต่ละเฟสคือ Q1 Q2 และ Q3 ทำหน้าที่ในการควบคุมการเลือกเฟส ตัวอย่างเช่น ในขณะที่เฟสที่ 1 ทำงาน ถ้าต้องการสร้างกระแสในขดลวดของเฟสที่ 1 สวิตช์ Q และสวิตช์ Q1 ต้อง ON พร้อมกัน แต่ถ้าสวิตช์ Q OFF ไดโอด D และ D1 จะนำกระแสและแรงดันตกคร่อมขดลวดจะเท่ากับค่าลบของดีซีลิงค์ นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์ของเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดความเสียหายหรือทำงานผิดพลาด ก็จะส่งผลไปถึงเฟสอื่นๆที่เหลือด้วย



รูปที่ 2.13 วงจรขับเคลื่อนแบบใช้ส่วนจ่ายพลังงานร่วมกัน

สำหรับวงจรที่ใช้ส่วนกระแสไหลวนนั้นแสดงในรูปที่ 2.14 จะเห็นว่ามี การต่อไดโอดสำหรับคืนพลังงานกลับไปสู่ตัวเก็บประจุ Cd ซึ่งวงจรนี้เรียกว่า C-dump ซึ่งแรงดันของตัวเก็บประจุ Cd นี้จะถูกควบคุมให้อยู่ที่ประมาณสองเท่าของแรงดันดีซีลิงค์ โดยที่มีวงจรลดทอนแรงดันต่ออยู่ด้านหน้าเพื่อควบคุมแรงดันของ Cd โดยการควบคุมพลังงานคืนกลับไปยังแหล่งจ่าย เช่นเดียวกับวงจรที่มีอุปกรณ์ร่วมประเภทแรก ถ้าเกิดความเสียหายกับวงจรลดทอนแรงดัน อาจจะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ Cd เพิ่มขึ้นสูงจนเกิดความเสียหายกับวงจรได้



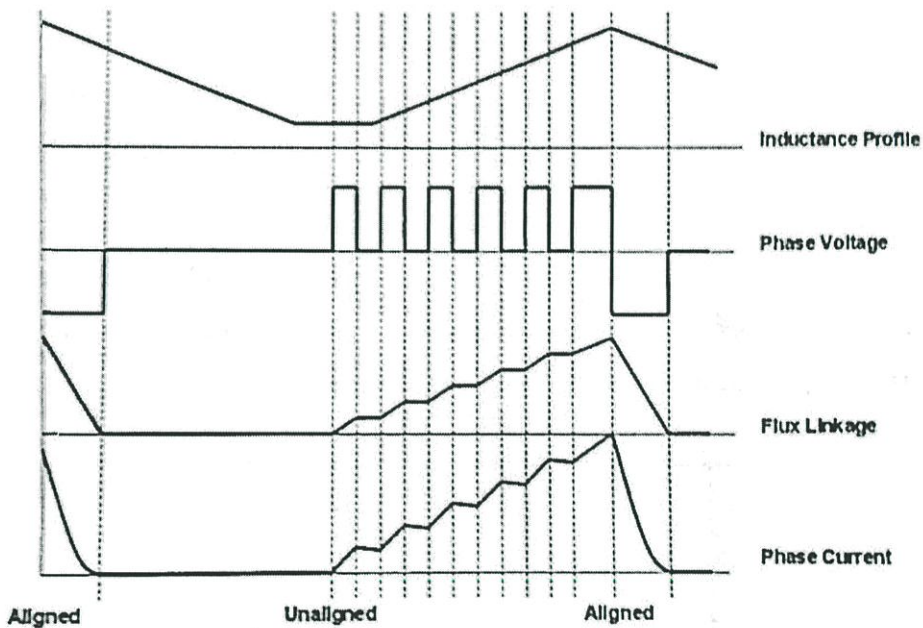
รูปที่ 2.14 วงจรขับเคลื่อนแบบใช้กระแสไหลวนร่วมกัน

2.9 การทำงานเชิงพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ SRM

การทำงานของมอเตอร์เชิงพลวัตจะอธิบายโดยการใช้วงจรขับสวิตซ์ต่อเฟสดังรูปที่ 2.8 สำหรับการอธิบายการทำงานของมอเตอร์และโหมดต่างๆในวงจรขับ นอกจากนี้โหมดการทำงานต่างๆเหล่านี้ยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของมอเตอร์อีกด้วย

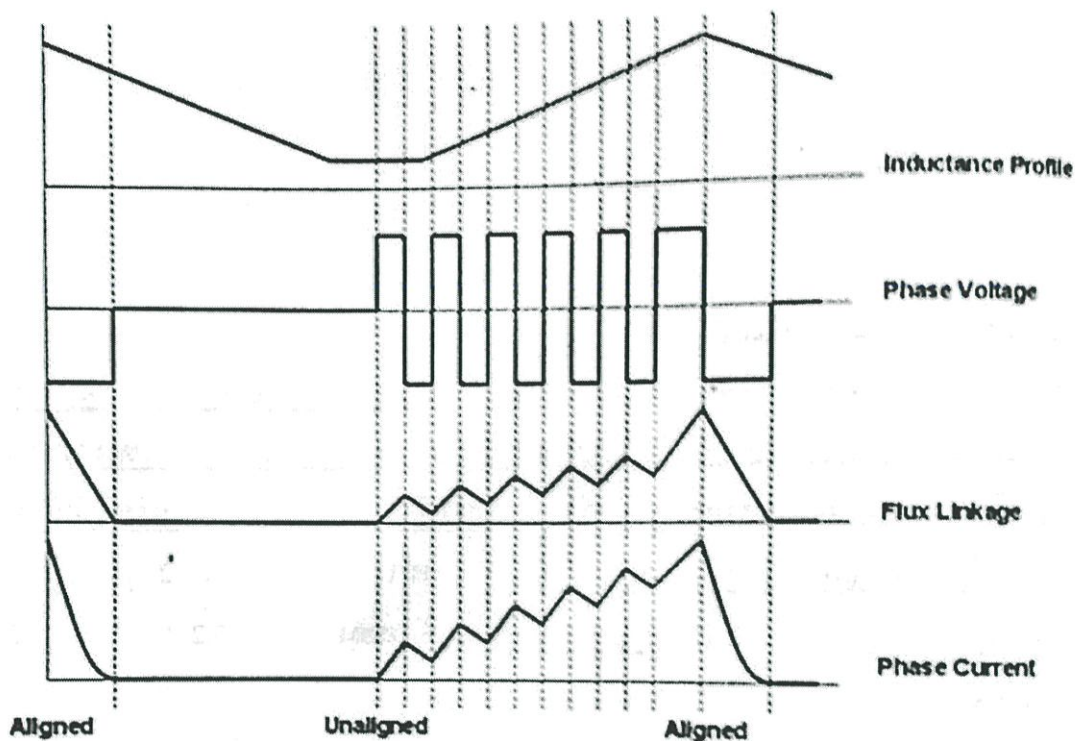
2.9.1 โหมดควบคุมกระแส

การทำงานในโหมดนี้มีความสำคัญมากในช่วงความเร็วต่ำกว่า Base Speed เนื่องจากว่าการทำงานต่ำกว่า Base Speed นี้จำเป็นต้องมีการควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวด ถ้าไม่ได้มีการควบคุมกระแสในขดลวดแล้ว กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นมากและส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์และรับขับเคลื่อนได้ การทำงานในโหมดนี้มี 2 รูปแบบคือแบบ Soft Chopping และ Hard Chopping ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 การควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping

เราจะเรียก Q_1 ว่า “Chopping Transistor” และเรียก D_2 ว่า “Chopping Diode” โดยที่ Q_2 เรียกว่า “Commutating Transistor” และ D_1 เรียกว่า “Commutating Diode” ในขณะที่โหมดการทำงานแบบ Hard Chopping นั้น ทั้ง Q_1 และ Q_2 จะสวิตซ์พร้อมกันซึ่งในขณะที่สวิตซ์ทั้งสองตัว OFF นั้น ขดลวดเฟสจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันค่าลบของดีซีลิงค์



รูปที่ 2.16 การควบคุมกระแสแบบ Hard Chopping

เมื่อเปรียบเทียบการทำงานของสองโหมดที่ความถี่ในการสวิตช์เดียวกันแล้ว พบว่าแบบ Hard Chopping นั้นจะมีกระแสกระเพื่อมที่สูงกว่าแบบ Soft Chopping มาก ดังนั้นการทำงานในโหมด Soft Chopping จะเหมาะสมกับการควบคุมกระแสในช่วงต่ำกว่า Base Speed หรือในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ นอกจากนี้การทำงานในโหมด Soft Chopping ยังทำให้มอเตอร์ทำงานโดยมีเสียง (Acoustic Noise) ที่น้อยกว่าและเนื่องมาจากว่ากระแสกระเพื่อมมีค่าต่ำทำให้ตัวเก็บประจุที่ตีซิปยังมีค่าต่ำอีกด้วย

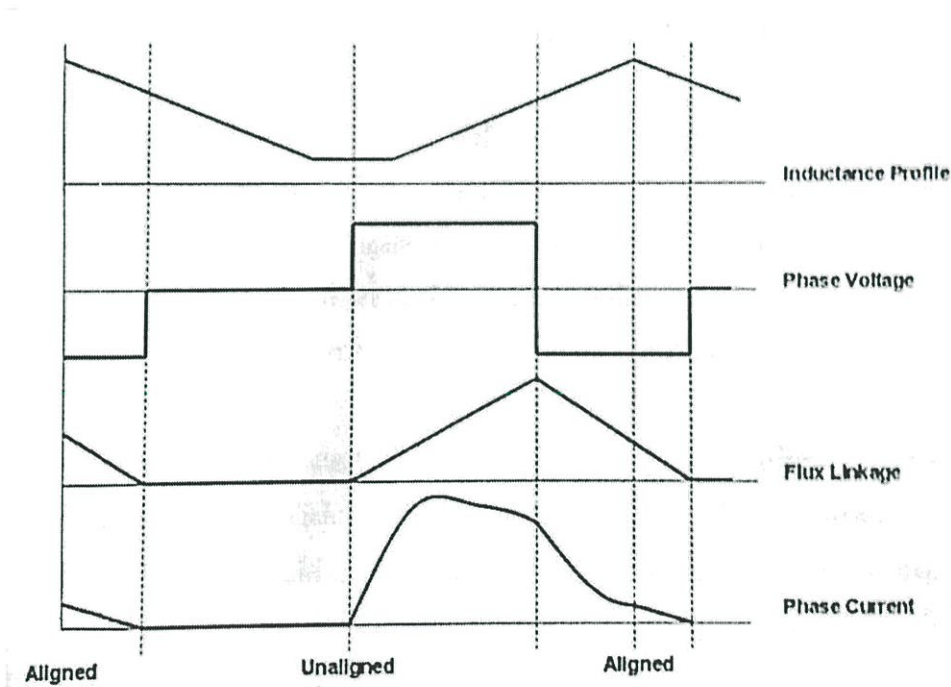
2.9.2 โหมดกระแสพัลส์

จากรูปที่ 2.17 กำหนดให้มุม turn-on อยู่ที่ตำแหน่งอันอะไลน์ (Unaligned Position) พบว่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งชั่วของโรเตอร์และชั่วของสเตเตอร์เริ่มทับซ้อนกัน ในขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนี่ยวนำในขณะที่โรเตอร์เปลี่ยนตำแหน่งจะทำให้ค่าแรงดันต้านกลับหรือ back emf เพิ่มขึ้นด้วยจนกระทั่งมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย ณ จุดนี้กระแสจะเพิ่มขึ้นสูงสุดและเมื่อค่าของแรงดันต้านกลับสูงกว่าแรงดันของแหล่งจ่าย จะทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมขดลวดมีค่าเป็นลบและอัตราการเพิ่มของกระแสมีค่าเป็นลบทำให้กระแสค่อยๆ ลดลง แต่ในขณะเดียวกันค่าเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องยังคงเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น

เมื่อถึงจุด commutation กระแสในขดลวดจะไหลผ่านไดโอดแทนในทรานซิสเตอร์ หรือมอสเฟต ทำให้ขดลวดต่อเข้ากับค่าลบของแรงดันจากแหล่งจ่าย กระแสจะตกลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อโรเตอร์หมุนมาถึงจุดอะไลน์ (Aligned) พบว่าแรงดันต้านกลับมีค่าเป็นลบอันเนื่องมาจากความชันของค่าความเหนี่ยวนำเป็นลบ ดังนั้นค่าแรงดันกลับจะไปหักล้างกับแรงดันค่าลบจากแหล่งจ่ายทำให้อัตราการลดลงของกระแสลดลงและรูปร่างของกระแสมีลักษณะเป็นหางยาวออกไป

ณ จุดอะไลน์ (Aligned) นี้ถ้ามีการออกแบบมอเตอร์ไม่ดี อาจเกิดเหตุการณ์ที่ค่า back emf มีค่าสูงกว่าแรงดันค่าลบจากแหล่งจ่ายก็ได้ ผลที่ตามมาคือ กระแสจะเพิ่มขึ้นแทนที่จะลดลง เพื่อแก้ไขปัญหานี้เวลายามอเตอร์ทำงานใน Single Pulse Mode จะต้อง turn-off ก่อนตำแหน่งอะไลน์ (Aligned position) และเมื่อทำงานในความเร็วสูงขึ้น ก็จำเป็นต้องมีการ turn-off ให้เร็วเพิ่มขึ้นด้วย เพราะค่า back emf ขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์ด้วย

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการ turn-on นั้นจะทำให้ช่วงอันอะไลน์ (Unaligned) ก่อนที่ขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์จะเริ่มทับซ้อนกัน เพราะค่าความเหนี่ยวนำยังมีค่าต่ำอยู่ ดังนั้นกระแสจะยังสามารถเพิ่มขึ้นถึงระดับที่สามารถสร้างแรงบิดที่ต้องการได้ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นก็ต้องมีการปรับมุม turn-on นี้เพื่อให้กระแสสามารถเพิ่มสูงขึ้นได้



รูปที่ 2.17 การควบคุมโหมดกระแสพัลส์

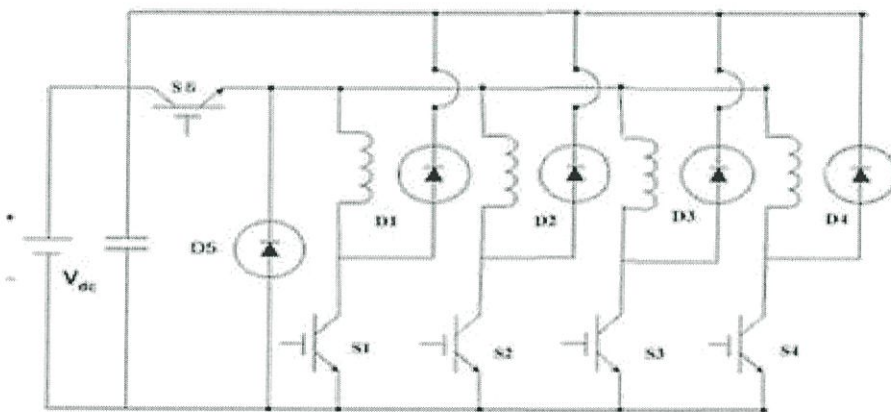
บทที่ 3

การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์

3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางในการออกแบบวงจรขับเคลื่อนของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ชนิด 4 เฟส (8/6) ซึ่งจากสมการของแรงบิดของมอเตอร์พบว่า แรงบิดที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลอยู่ในเฟสนั้นๆ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดกระแสและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำกับตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งก็หมายความว่าไม่จำเป็นที่จะต้องมีแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ใช้เพียงแค่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีข้อดีคือ ความสูญเสียที่เกิดในแกนเหล็กจะต่ำ และทำให้การออกแบบวงจรกำลังง่ายขึ้น ดังนั้นวงจรกำลังสำหรับการขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์จะต้องมีความสามารถในการจ่ายกระแสตรงและควบคุมขนาดของกระแสที่ไหลในขดลวดในแต่ละเฟสด้วย

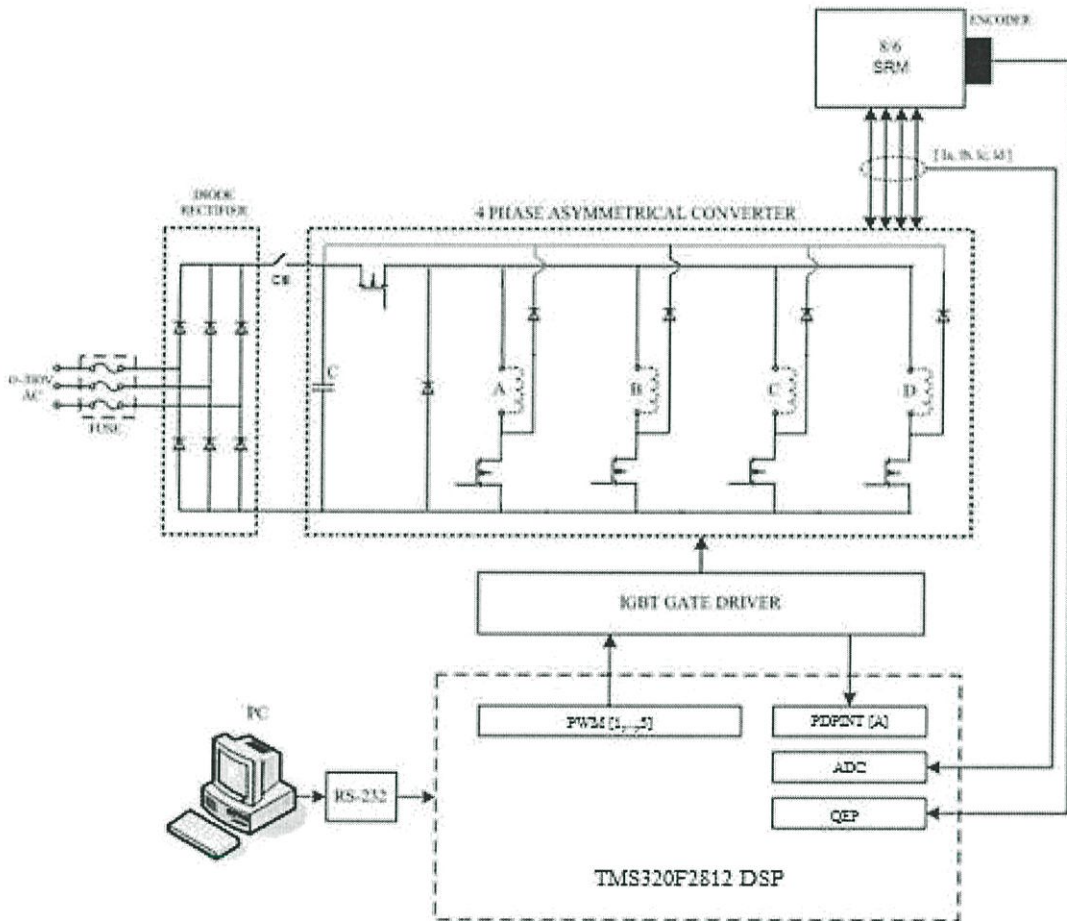
ซึ่งในโครงการนี้จะใช้วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วมเนื่องจากราคาของวงจรขับเคลื่อนค่อนข้างสูง ซึ่งในวงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตช์ต่อเฟสโดยทั่วไปจะใช้จำนวนสวิตช์(IGBT module) 8 ตัว สำหรับมอเตอร์ 4 เฟส แต่ถ้าใช้วงจรขับเคลื่อนที่มีการใช้อุปกรณ์ส่วนจ่ายพลังงานร่วมกัน ก็จะสามารถลดจำนวนสวิตช์(IGBT module) ลงเหลือแค่จำนวน 5 ตัว ซึ่งทำให้ประหยัดงบประมาณในการสร้างวงจรขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ได้มากขึ้น



รูปที่ 3.1 วงจรขับเคลื่อนแบบ (switch n+1)

3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์

ระบบควบคุมสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์จะประกอบไปด้วย ชุดวงจรเรียงกระแส ชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Converter) ชุดขับนำเกต และตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) รวมอยู่ในระบบควบคุม โครงสร้างโดยรวมดังแสดงในรูปที่ 3.2

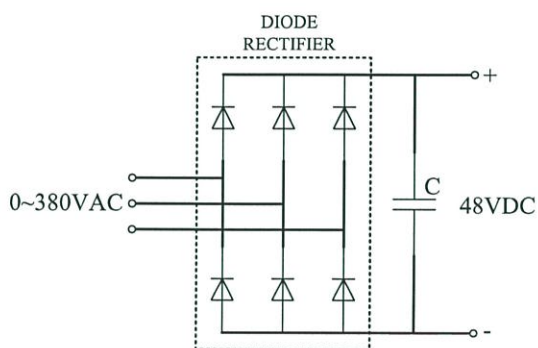


รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์

3.3 อุปกรณ์และวงจรสำหรับควบคุมสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์

3.3.1 วงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส

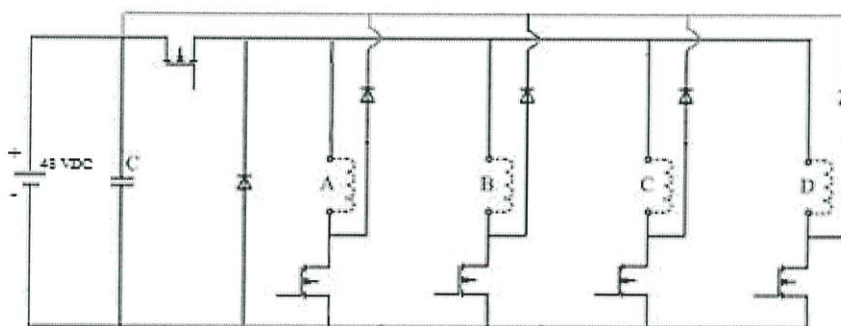
เนื่องจากพิกัดแรงดันของสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ตัวนี้นั้นมีค่าเท่ากับ 48 โวลต์ดีซี ดังนั้นจึงได้สร้างวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบ 3 เฟสโดยใช้ไดโอดกำลังเบอร์ DF40AA120 เป็นตัวเรียงกระแสแบบ 3 เฟส โดยทำการปรับแรงดันเอซีด้านอินพุทไว้ที่ 34.8 โวลต์ เพื่อที่จะได้แรงดันกระแสตรงเท่ากับ 48 โวลต์ วงจรเรียงกระแส 3 เฟสนี้แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส

3.3.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟสที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม

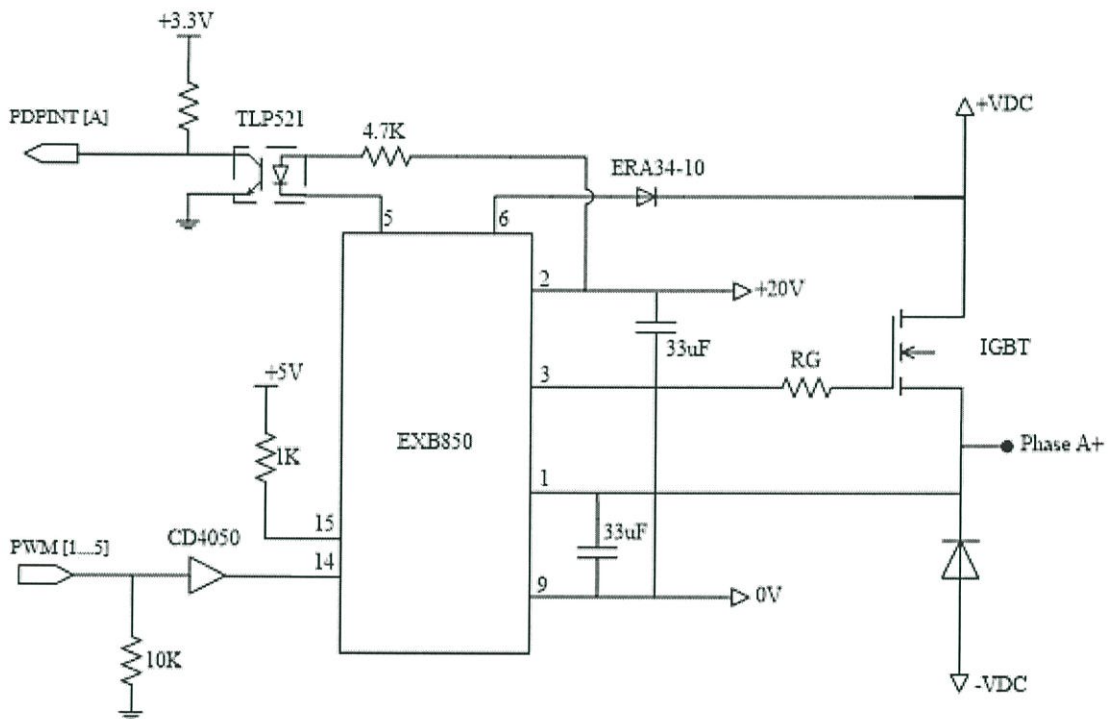
วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังสำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ แบบ 8/6 ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ที่พิกัดแรงดัน 48 โวลต์ นั้นได้เลือกใช้ IGBT Module ที่มีพิกัดกระแสประมาณ 100 แอมป์ และแรงดันพิกัดที่ 1200 โวลต์ เนื่องจากว่าในขณะที่เริ่มสตาร์ทมอเตอร์จะมีกระแสที่สูง ฉะนั้น IGBT ที่ใช้จะต้องทนต่อกระแสในช่วงนี้ได้ ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 5 ตัว โดยมี 4 ตัวใช้ควบคุมในแต่ละเฟส และอีก 1 ตัวสำหรับใช้ร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟสที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม

3.3.3 วงจรขับเกทและวงจรป้องกันกระแสเกินสำหรับไอจีบีทีกำลัง

สำหรับวงจรขับนำเกทนั้นเลือกใช้ตัวขับเกท ซึ่งจะต้องสามารถขับ IGBT Module ตามที่เลือกใช้งานได้ ขณะที่กระแสไหลได้สูงสุด 100 แอมป์ที่แรงดันพิกัด 1200 โวลต์ และนอกจากนี้ควรมีวงจรป้องกันกระแสเกิน(Over Current Detection) อยู่ภายในตัวโดยที่สัญญาณป้องกันนี้จะถูกส่งไปที่ขา PDPINTA สำหรับ PWM1-5 ซึ่ง PDPINTA นี้จะเป็นอินเทอร์ลอร์ดับสูงสุดของ DSP เบอร์ TMS320F2812 เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับ IGBT Module

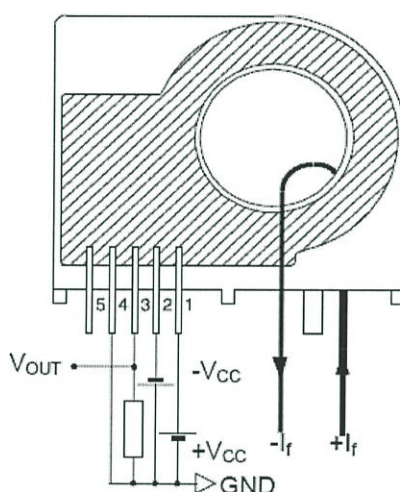


รูปที่ 3.5 วงจรขับนำเกทและวงจรป้องกันกระแสเกินสำหรับ IGBT Module

3.3.4 ชุดวงจรวัดกระแส

วงจรวัดกระแสใช้นี้ได้ใช้ตัววัดกระแสแบบ Hall Effect Current Sensor ของบริษัท Tamura เบอร์ L08P150D15 ขนาดพิกัด 150 แอมป์ ซึ่งจะสามารถวัดกระแสในช่วงที่เริ่มสตาร์ทมอเตอร์ได้ และในการทำงานต้องใช้แหล่งจ่ายขนาด ± 15 โวลต์ และแรงดันเอาต์พุทขณะที่ไม่มีกระแสไหลตลจะอยู่ที่ 0 โวลต์ เนื่องจากว่าแรงดันที่ช่อง ADC ของตัว DSP นั้นรับแรงดันได้ในช่วง 0-3 โวลต์ที่ซีดีดังนั้นเราจึงจำกัดแรงดันไม่ให้เกิน 3 โวลต์ที่ช่อง ADC นั้นได้ใช้ซีเนอร์ไดโอด เบอร์ 1N5225B

วงจรรการใช้งานของตัววัดกระแสแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 ตัววัดกระแสเบอร์ L08P150D15

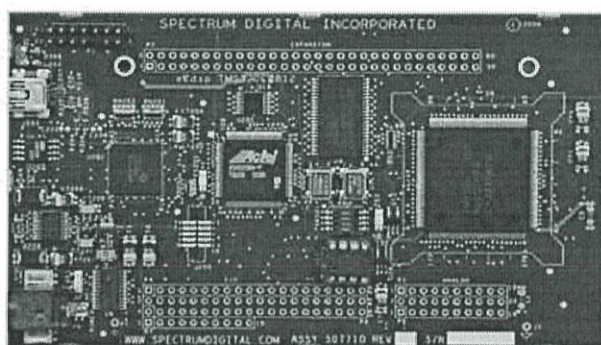
3.3.5 ชุดวงจรวัดแรงดัน

วงจรวัดแรงดันใช้นี้ได้ใช้ตัววัดแรงดันของบริษัท BURR-BROWN เบอร์ ISO124 ซึ่งในการทำงานต้องใช้แหล่งจ่ายขนาด ± 15 โวลต์ 2 ชุดแบบแยกกราวด์ สำหรับภาคอินพุทและภาคเอาต์พุท ซึ่ง ISO124 นี้สามารถทนแรงดันสูงสุดระหว่าง 2 ภาคได้ 1500 โวลต์ มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1 พิกัดแรงดันอินพุทและเอาต์พุทเท่ากับ ± 10 โวลต์ ซึ่งรายละเอียดของ ISO124 ดังแสดงในรูปที่ 3.6

3.3.6 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing , DSP)

โครงการนี้ได้เลือกใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812 ของบริษัท Texas Instruments ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้คือ

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



รูปที่ 3.9 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F2812

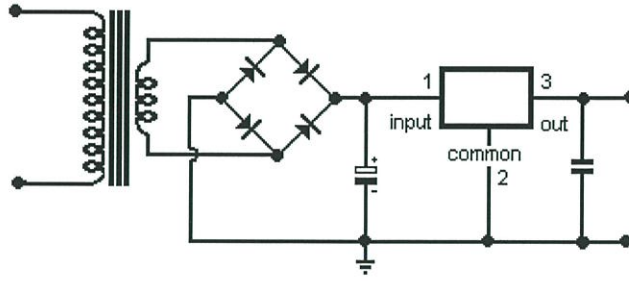
3.3.7 ชุดวงจรเรียงกระแส (Rectifier)

การสร้างวงจรเรียงกระแสไฟดีซีสำหรับภาคการควบคุมนั้นจะประกอบดังนี้คือ

1. วงจรเรียงกระแสไฟดีซีสำหรับไอซีขับเกทของ IGBT จำนวน 5 ชุด
2. วงจรเรียงกระแสไฟดีซีสำหรับวงจรวัดกระแส, วัดแรงดัน, วงจรวัดความเร็ว, วงจรไอซีบัฟเฟอร์แรงดัน และวงจรพัลลวมระบายความร้อน

โดยในวงจรแต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

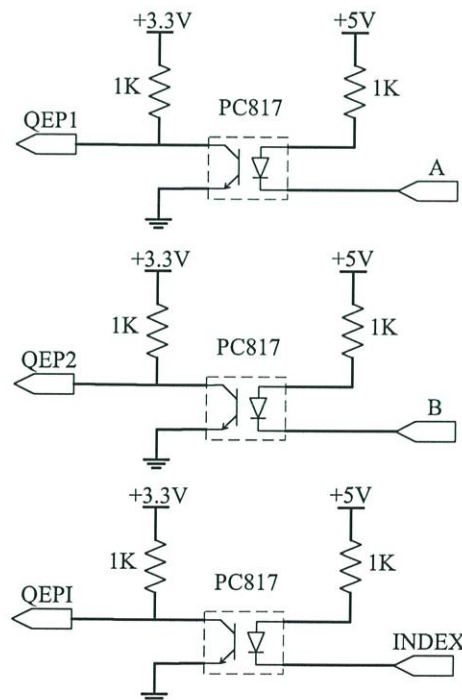
- 1.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบลดแรงดัน
- 1.2 ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์
- 1.3 คาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์แบบอิเล็กโทรไลต์
- 1.4 ไอซีเรกกูเรเตอร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่
- 1.5 คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise filter)



รูปที่ 3.10 วงจรเรียงกระแสไฟตรงดีซี

3.3.8 วงจรวัดความเร็ว (Speed Sensor Circuit)

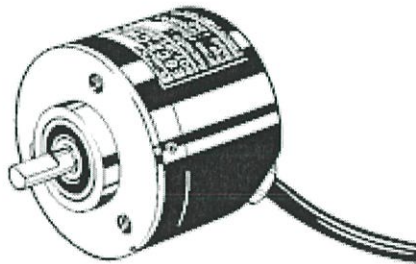
วงจรวัดความเร็วรอบนี้ใช้ไอซี Opto-coupler เบอร์ PC817 ในการแยกกราวด์และลดระดับแรงดันให้เท่ากับ 3.3 โวลต์ ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่ในการแยกราวระหว่างตัวเอ็นโค้ดเดอร์กับพอร์ต QEP ของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ซึ่งรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.10



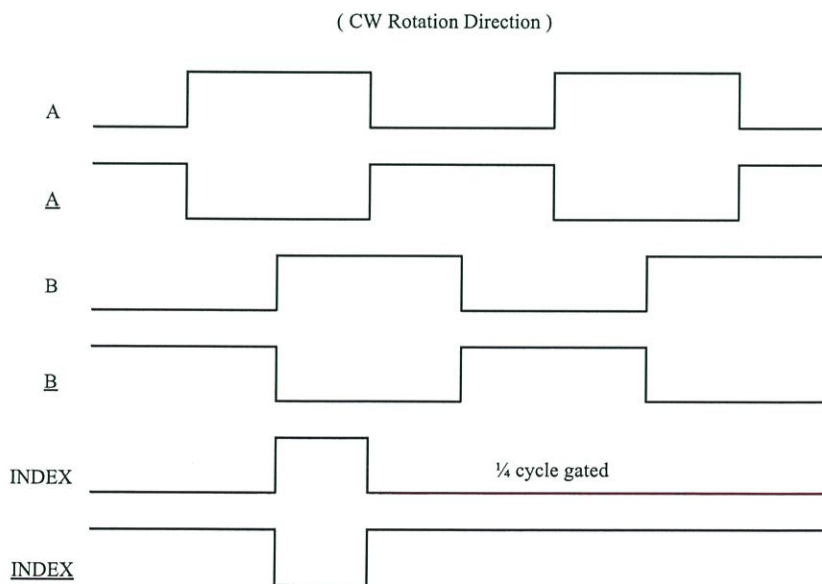
รูปที่ 3.11 วงจรวัดความเร็ว

3.3.9 ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ (Incremental Encoder)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งแบบ Incremental Encoder เบอร์ R137S ของบริษัท Gurley Precision Instruments ลักษณะทั่วไปของเอ็นโค้ดเดอร์นี้แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งขณะทำงานเมื่อหมุน 1 รอบจะมีเอาต์พุตออกมา 2 เฟสคือ เฟส A และ B โดยแต่ละเฟสจะมีพัลส์เอาต์พุต 3600 พัลส์ และทุกๆรอบของการหมุนจะมีสัญญาณอ้างอิง (INDEX) 1 พัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งในการทำงานต้องการแหล่งจ่าย +5 โวลต์เป็นไฟเลี้ยง รูปร่างของสัญญาณจะมีสองเฟสคือ A และ B จะต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า



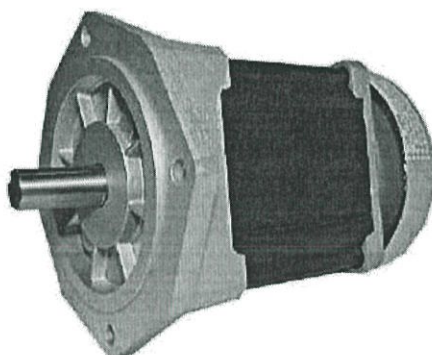
รูปที่ 3.12 เอ็นโค้ดเดอร์ เบอร์ R137 ของบริษัท Gurley Precision Instrument



รูปที่ 3.13 สัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์

3.3.10 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์

สำหรับโครงการนี้ได้เลือกเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 รุ่น RA165187 ของบริษัท Motion System Technology จากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีพิกัดต่างๆ ดังนี้คือแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 48 โวลต์, กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2.2 กิโลวัตต์, ความเร็วพิกัดเท่ากับ 6,000 รอบต่อนาที, ความเร็วสูงสุดที่ 12,000 รอบต่อนาที, แรงบิดพิกัดและแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 3.69 และ 4.20 นิวตัน-เมตร ตามลำดับ ลักษณะโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.14 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 รุ่น RA165187

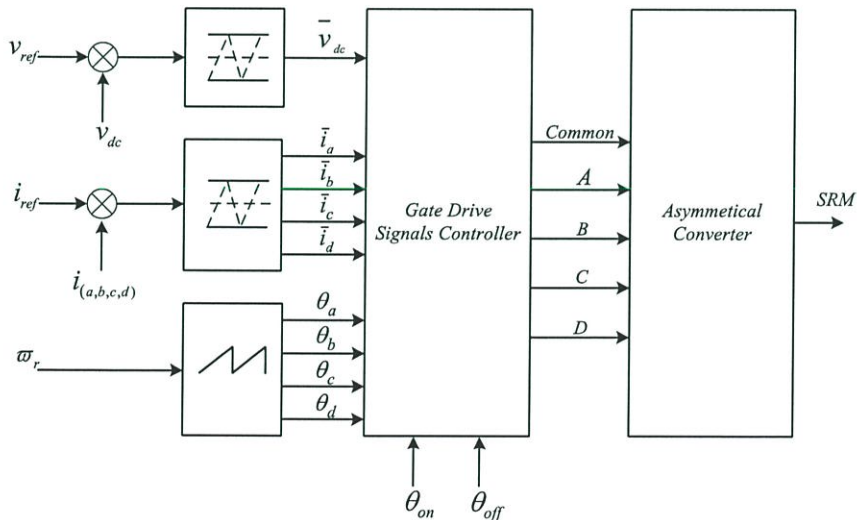
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและผลการเปรียบเทียบระหว่างวงจร switch (n+1) กับ วงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส ซึ่งได้มาจากการทดสอบระบบควบคุม (Experimental Results) การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแทนซ์โดยมีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของสวิตซ์รีลักแทนซ์มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

Number of Phase	: 4	Rated Power	: 2.2 kW / 3 Hp
Rated Voltage	: 48 V	Phase Resistance	: 15 m Ω
Base Speed	: 6,000 rpm	La	: 340 μ H
Pole Configuration	: 8/6	Lu	: 62 μ H

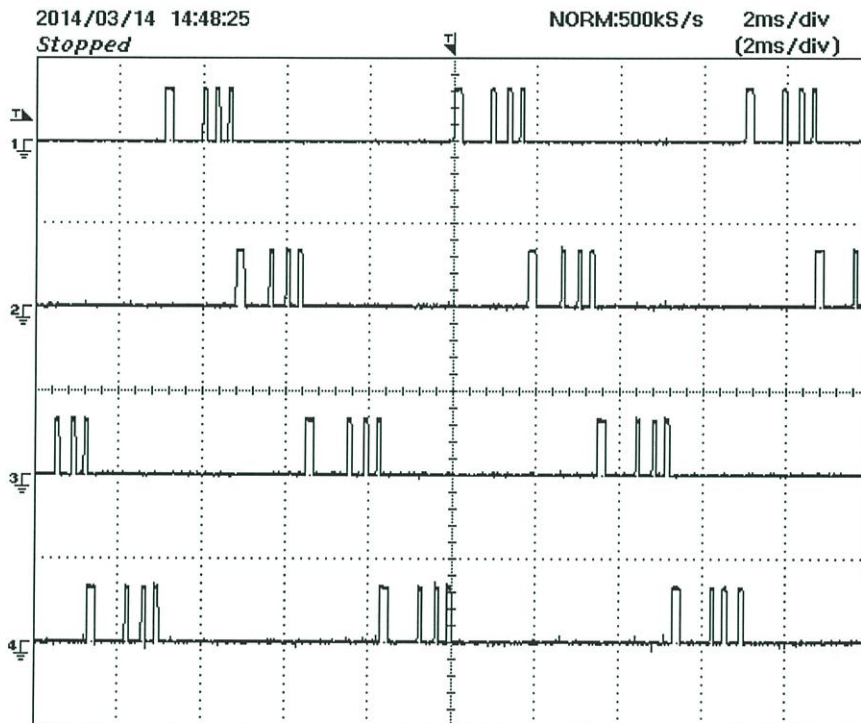


รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน

4.1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมการทำงาน

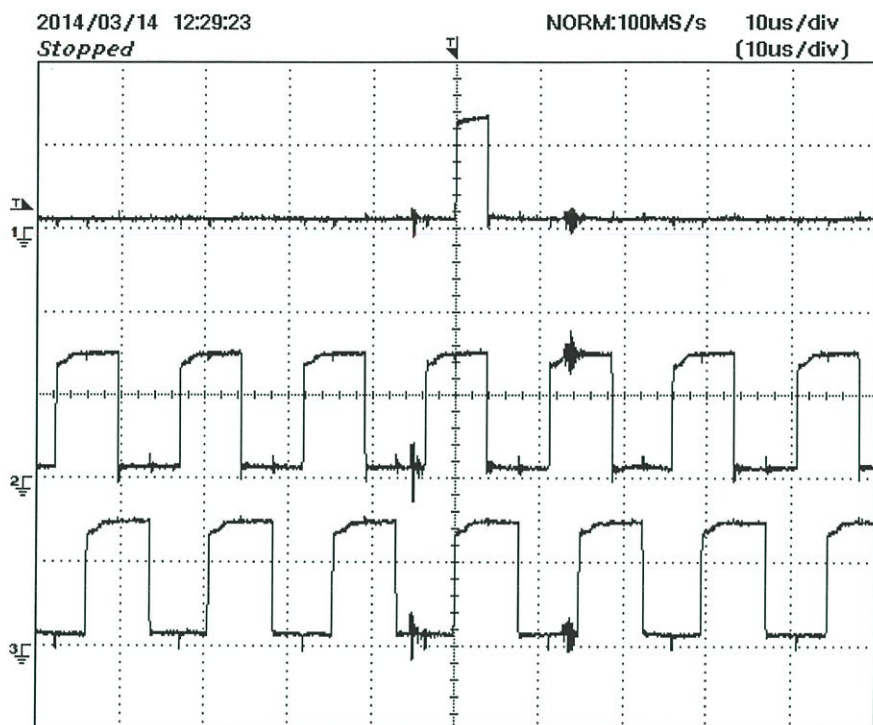
4.1.1 สัญญาณขับนำเกตจาก DSP

ในการทดสอบการทำงานของสัญญาณขับนำเกตที่ได้จากตัว DSP นั้นได้ทำการวัดที่ช่อง PWM [1-5] ซึ่งแรงดันขับเกตที่ออกมาจะอยู่ที่ 3.3 V ดังรูปที่ 4.2 เป็นสัญญาณขับเกตของ IGBTs ตัวล่าง ทั้ง 4 เฟส , เฟส A, เฟส B, เฟส C และ เฟส D ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 สัญญาณขับเกตของ IGBT ตัวล่างที่ได้จากช่อง PWM ของตัว DSP

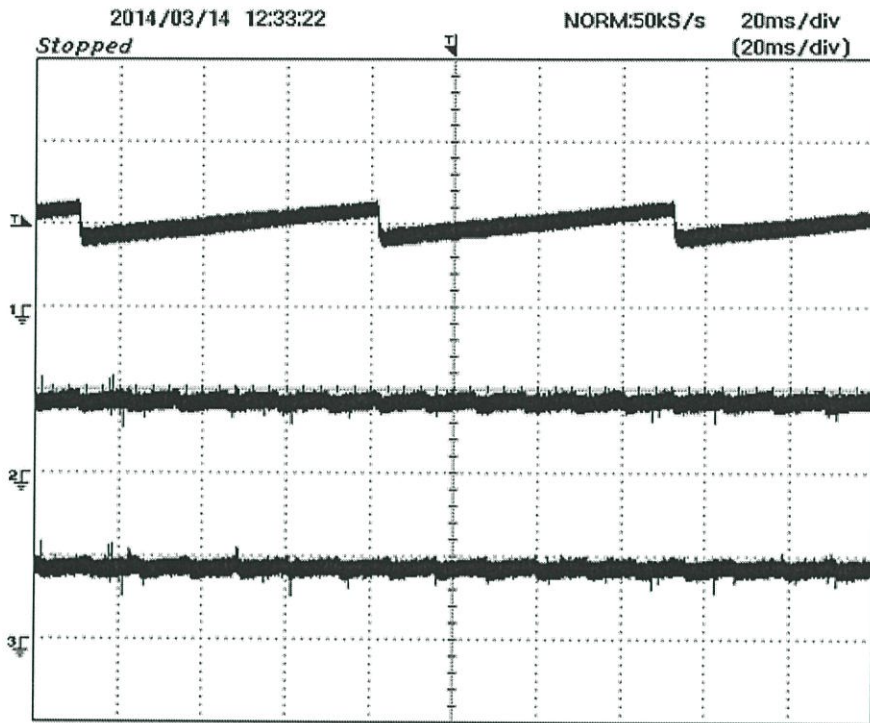
4.1.2 ผลการทดสอบสัญญาณจากตัว Encoder



รูปที่ 4.3 สัญญาณ QEPI, QEP1 และ QEP2 ที่ได้จากตัว Encoder

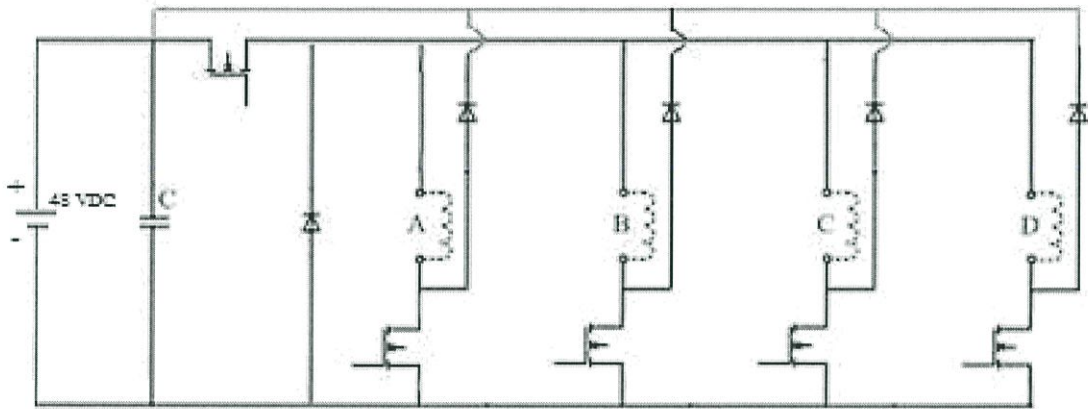
4.1.3 ผลการวัดตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

ในการคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์นั้นทำได้โดยการวัดสัญญาณจากตัว Encoder ซึ่งประกอบด้วย QEP1, QEP2 และสัญญาณ Index (QEPI) เข้ามาที่ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) แล้วนับจำนวนพัลส์ทั้งหมดใน 1 รอบทางกลจะนับได้ 14400 พัลส์ จากนั้นจึงแปลงเป็นมุมทางไฟฟ้าของแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.4

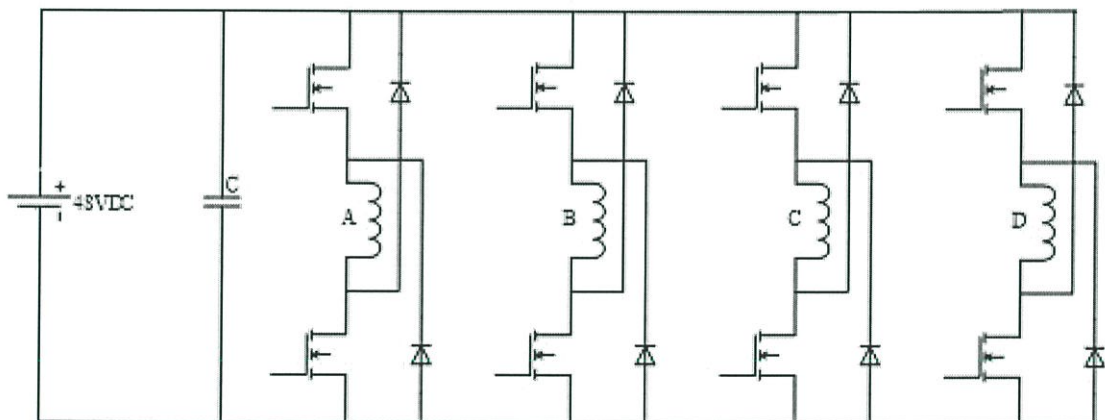


รูปที่ 4.4 แสดงมุมทางกล, มุมทางไฟฟ้าของเฟส A และมุมทางไฟฟ้าของเฟส B

4.2 เปรียบเทียบระหว่างวงจร switch (n+1) และวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส



รูปที่ 4.5 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1)



รูปที่ 4.6 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส

4.2.1 การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์

จากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ switch (n+1) ในรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่ามีการใช้จำนวนสวิตช์ลดลงจากวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟสในรูปที่ 4.6 อยู่ 3 ตัว ซึ่งทำให้อุปกรณ์ในส่วนของวงจรควบคุมที่เกี่ยวข้องกับตัวสวิตช์ที่ใช้งาน เช่น ชุด Gate drives, ชุดไฟเลี้ยงของ Gate drives ซึ่งสามารถทำให้ประหยัดงบประมาณในการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการสร้างคอนเวอร์เตอร์

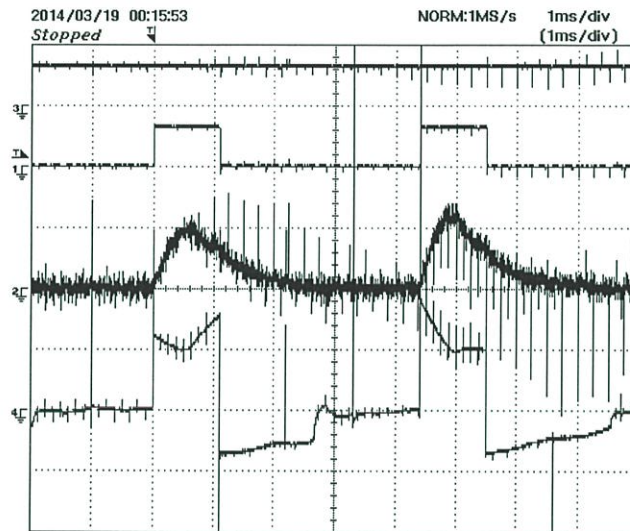
ชนิดคอนเวอร์เตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้	สองสวิตช์ต่อเฟส (ราคา × จำนวน = บาท)	Switch (n+1) (ราคา × จำนวน = บาท)
IGBT Module (รุ่น DM2G100SH12AE)	$1326 \times 8 = 10,608$	$1326 \times 5 = 6,630$
ชุดวงจร Gate drives และสัญญาณขับ	$374 \times 8 = 2,992$ $13 \times 4 = 52$	$374 \times 5 = 1,870$ $13 \times 3 = 39$
วงจรไฟเลี้ยงสำหรับ Gate drives	$224 \times 8 = 1,792$	$224 \times 5 = 1,120$
รวมราคา	15,444	9,659
ผลต่างราคา	5,785	
ผลต่างราคา (%)	37.46	

หมายเหตุ : อ้างอิงจากราคาตามท้องตลาดในช่วงเดือนตุลาคม 2556 ถึง กุมภาพันธ์ 2557

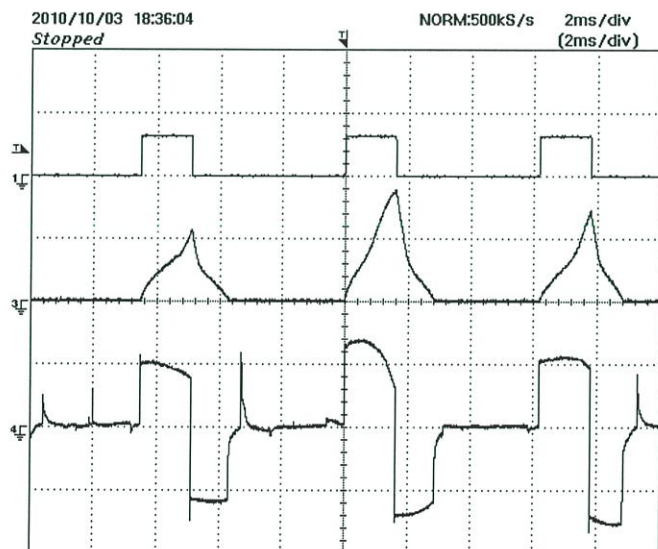
จากตารางเปรียบเทียบราคาของ switch (n+1) กับสองสวิตช์ต่อเฟส โดยลดจำนวนสวิตช์ลงจาก 8 ตัว เหลือ 5 ตัว สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นเงิน 5,785 บาท ซึ่งคิดราคาของ switch (n+1) เป็น 37.46 % เมื่อเทียบกับราคาของสองสวิตช์ต่อเฟส

4.2.2 การเปรียบเทียบเชิงวิศวกรรม

ในการควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็วสูง จะใช้การควบคุมกระแสแบบ Single Pulse เนื่องจากในขณะที่มอเตอร์มีความเร็วรอบสูงจะทำให้แรงดันต้านกลับ (back emf) ส่งผลให้ค่ายอดกระแสในแต่ละเฟสมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสที่ตั้งไว้ รูปคลื่นของกระแสจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8



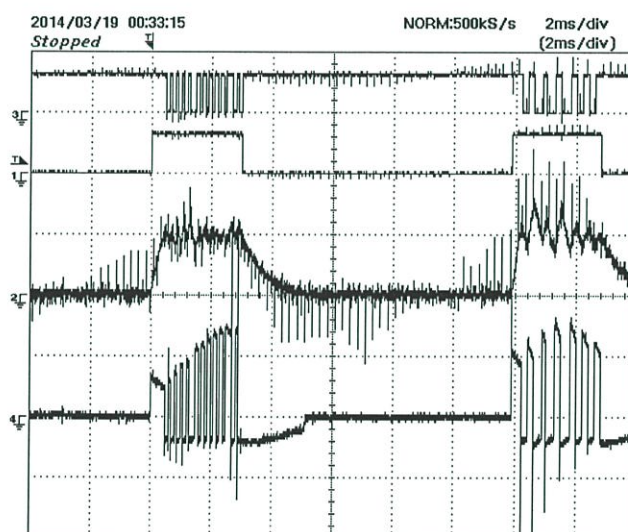
รูปที่ 4.7 สัญญาณขั้วเกท กระแส และแรงดันในโหมด Single Pulse ของ Switch (n+1)



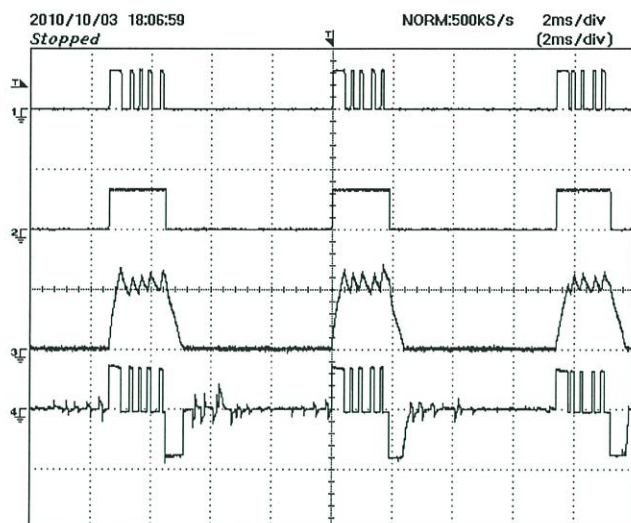
รูปที่ 4.8 สัญญาณขั้วเกท กระแส และแรงดันในโหมด Single Pulse ของคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบจะพบว่า รูปลักษณ์ของกระแสและแรงดันของทั้งสองวงจรมีความคล้ายคลึงกันในช่วงที่มอเตอร์ทำงานย่านความเร็วสูง แต่สำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1) มีหางของกระแสที่ยาว ซึ่งเกิดจากในขณะสวิตช์ร่วม turn on (Magnetization) ให้กับเฟสถัดไป จะมีการรบกวนจากช่วง Demagnetization จากเฟสก่อนหน้า เนื่องจากมีการ off-going phase ไม่ไวพอ ทำให้เกิดแรงบิดต้านกลับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำลง เมื่อเทียบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส

และในส่วนการควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำ จะพบว่าในช่วงที่ทำการสตาร์ทมอเตอร์กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องทำการควบคุมกระแส (Current Regulation) เพื่อคงค่ากระแสในแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สัญญาณซบเกท กระแส และแรงดันในโหมดควบคุมกระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ ของ Switch (n+1)



รูปที่ 4.10 สัญญาณขั้วเกท กระแส และแรงดันในโหมดควบคุมกระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ ของ
คอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1) เมื่อเทียบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส พบว่ามีข้อดีในเรื่องของสวิตช์ที่ใช้ในวงจรขั้วมีจำนวนที่ลดลง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์และขนาดของวงจรเล็กกลง แต่ยังมีข้อด้อยในช่วงที่มอเตอร์ทำงานย่านความเร็วสูง ซึ่งในขณะที่สวิตช์ร่วม turn on (Magnetization) ให้กับเฟสถัดไป จะมีการรบกวนจากช่วง Demagnetization จากเฟสก่อนหน้า เนื่องจากมีการ off-going phase ไม่ไวพอ ทำให้เกิดแรงบิดต้านกลับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำลง อีกทั้งในส่วนของการที่สวิตช์ร่วมเกิดความเสียหาย ก็จะส่งผลกระทบต่อการทำงานในเฟสอื่นๆที่เหลือ

ในการทดลองจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ได้จากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1) มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีการกรองสัญญาณรบกวนที่ดี และการควบคุมกระแสที่ยากกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการควบคุมมอเตอร์ต่ำลง เมื่อเทียบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์ จำเป็นต้องทราบในเรื่องของลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ที่ใช้ เช่น พิกัดกำลัง แรงดัน และกระแสที่ใช้ เพื่อที่จะนำมาเลือกอุปกรณ์ในส่วนของการควบคุมให้เหมาะสม และในส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ สามารถเลือกประเภทตามลักษณะการควบคุมการสับสวิตช์ จำนวนเฟสของมอเตอร์ รวมไปถึงงบประมาณที่ใช้ในการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา, “มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์: ทฤษฎี และการออกแบบ”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [2] วรารักษ์ ศรีสุวรรณ, สิทธิชัยแก้วไทย, สุนทรี น้อยทัพ, “การขับเคลื่อนสวิตซ์รีลักแตนซ์ มอเตอร์”, ปริญญาานิพนธ์ (วศ.บ.วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
- [3] P. Chanchoensook and M. F. Rahman, “Control of a Four-Phase Switched Reluctance Generator: Experimental Investigations”, in Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, (IEMDC’03.), Madison, WI, USA, June 2003, Vol.7, pp.842-848.
- [4] T.J.E Miller, “Switched Reluctance Motors and Their Control”, NewYork; Oxford University Press, 1993
- [5] T.J.E Miller., Ed., “Electronic Control of Switched Reluctance Machines”, Power Engineering Series, Newnes, Oxford, 2001

ภาคผนวก ก

โปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้ DSP ด้วยภาษาซี (C-Language)

```

//#####
#
//
// FILE:  MainProgram.c
//
// TITLE:  A Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Machine Drive
//
// SPECIFICATION :
//     SRM => 48V, 2.32Kw, 6000 rpm.
//
//#####
#
// $Release Date: Mar 14, 2014: Switched Reluctance Motor Drive
//#####
#

#include "DSP281x_Device.h" // DSP281x Headerfile Include File
#include "DSP281x_Examples.h" // DSP281x Examples Include File
#include "DSP281x_Gpio.h"
#include "f281xqep.h"
#include "f281xpwm dac.h"
#include "DSP281x_Spi.h"
#include "DSP281x_Adc.h"

// Local Viable decalation

int16 check=0;
int16 CheckA=0;
int16 CheckB=0;
int16 CheckC=0;
int16 CheckD=0;
int16 CheckVdc=0;

```

```
int16 ElecTheta;  
int16 MechTheta;  
int16 LineEncoder;  
int16 PolePairs;  
int16 RawTheta;  
int16 QepPpr = 3600;      // QEP pulse per revolution
```

```
int16 i;  
int16 j;
```

```
int16 A;  
int16 B;  
int16 C;  
int16 D;
```

```
int16 ThetaA ;  
int16 ThetaB ;  
int16 ThetaC ;  
int16 ThetaD ;
```

```
int16 ElecThetaA;  
int16 ElecThetaB;  
int16 ElecThetaC;  
int16 ElecThetaD;
```

```
int16 ComA;  
int16 ComB;  
int16 ComC;  
int16 ComD;
```

```
int16 Ia=0;
int16 Ib=0;
int16 Ic=0;
int16 Id=0;
int16 Iref;
int16 Imax;
int16 Imin;
int16 Ihys;
float Iref_actual;
float Ihys_actual;
```

```
int16 Va;
int16 Vb;
int16 Vc;
int16 Vd;
int16 Vdc;
int16 Vref;
int16 Vmax;
int16 Vmin;
int16 Vhys;
float Vref_actual;
float Vhys_actual;
```

```
int16 Gate_Drive_A;
int16 Gate_Drive_B;
int16 Gate_Drive_C;
int16 Gate_Drive_D;
```

```
int16 Gate_Drives;
int16 Gate_Drive_Lo;
```

```
int16 Gate_Drive_Com;
int16 Gate_DriveA;
int16 Gate_DriveB;
int16 Gate_DriveC;
int16 Gate_DriveD;

int16 PwmDacCh1 = 0;
int16 PwmDacCh2 = 0;
int16 PwmDacCh3 = 0;
Uint32 DAC_Ch_A;
Uint32 DAC_Ch_B;
Uint32 DAC_Ch_C;
Uint32 DAC_Ch_D;
Uint32 DAC_Ch_E;
Uint32 DAC_Ch_F;
Uint32 DAC_Ch_G;
Uint32 DAC_Ch_H;
/*
*/
int16 CheckSpeed = 0;
int16 Speed1;
int16 Speed2;
int16 Speed3;
float Speed;
int16 Speedmax = 0;

int16 Tune;
int16 y;

int16 s=0;
```



```
PWMDAC pwmdac1 = PWMDAC_DEFAULTS;
```

```
// Prototype statements for functions found within this file.
```

```
void delay_loop(void);
```

```
interrupt void adc_isr(void);
```

```
interrupt void EvaTimer2(void);
```

```
interrupt void cpu_timer0_isr(void);
```

```
interrupt void PDPINTA_ISR(void);
```

```
interrupt void PDPINTB_ISR(void);
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
    InitSysCtrl();
```

```
    EALLOW;
```

```
    GpioMuxRegs.GPAMUX.all = 0x0700;    // Set GPIOA pin to primary function ( 0 = SET I/O  
port)
```

```
    GpioMuxRegs.GPADIR.all = 0x0FFF;    // Set GPIOA pin as output function ( 1 = Output , 0  
= Input )
```

```
    SysCtrlRegs.HISPCP.all = 0x3;      // HSPCLK = SYSCLKOUT/6 (ADC Module)
```

```
    GpioMuxRegs.GPDMUX.bit.T1CTRIP_PDPA_GPIOD0 = 0; // Set GPIOD0 to GPIO function
```

```
    GpioMuxRegs.GPDDIR.bit.GPIOD0 = 1;    // Set GPIOD0 to output pin
```

```
    GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.TDIRA_GPIOA11 = 0; // Set GPIOA11 to GPIO function ( check  
Main ISR )
```

```
    GpioMuxRegs.GPADIR.bit.GPIOA11 = 1;    // Set GPIOA11 to output pin
```

```
GpioMuxRegs.GPFMUX.bit.SPISOMIA_GPIOF1 = 0; // Set GPIOF1 to GPIO function ( check  
ADC ISR )
```

```
GpioMuxRegs.GPFDIR.bit.GPIOF1 = 1; // Set GPIOF1 to output pin
```

```
//GpioMuxRegs.GPBMUX.bit.CAP4Q1_GPIOB8 = 0; // Set GPIOB8 to GPIO function
```

```
// GpioMuxRegs.GPBDIR.bit.GPIOB8 = 0; // Set GPIOB8 to output pin
```

```
EDIS;
```

```
DINT;
```

```
InitPieCtrl();
```

```
// -----
```

```
// Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
```

```
// -----
```

```
IER = 0x0000;
```

```
IFR = 0x0000;
```

```
InitPieVectTable();
```

```
// -----
```

```
// ISR functions found within this file.
```

```
// -----
```

```
EALLOW;
```

```
PieVectTable.TINT0 = &cpu_timer0_isr;
```

```
PieVectTable.CAPINT3 = &EvaTimer2;
```

```
PieVectTable.ADCINT = &adc_isr;
```

```
EDIS;
```

```
InitCpuTimers(); // For this example, only initialize the Cpu Timers
```

```
// -----  
// Configure CPU-Timer 0 to interrupt every 0.1 mSec:  
// 150MHz CPU Freq, 0.1mSec. Period (in uSeconds)  
// -----  
    ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 150, 100); // Switching Frequency = 10 kHz.  
    StartCpuTimer0();  
  
// -----  
// Enable CAP3 interrupt bits for GP Timer2  
// -----  
  
    EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP3INT = 1;  
    EvaRegs.EVAIFRC.bit.CAP3INT = 1;  
  
// -----  
// Set up the capture pins to primary functions  
// -----  
    EALLOW;  
    GpioMuxRegs.GPAMUX.all |= 0x0700;  
    EDIS;  
  
// -----  
// Initialize ADC Module  
// -----  
  
    InitAdc();  
  
// -----  
// Initialize PWMDAC Module  
// -----
```

```
    pwmdac1.PeriodMax = 2500;
    pwmdac1.PwmDaclnPointer0 = &PwmDacCh1;
    pwmdac1.PwmDaclnPointer1 = &PwmDacCh2;
    pwmdac1.PwmDaclnPointer2 = &PwmDacCh3;
    pwmdac1.init(&pwmdac1);

// -----
// Initialize QEP module
// -----

    qep1.LineEncoder = QepPpr;
    qep1.init(&qep1);

// -----
// Enable ADCINT in the PIE; Group 1 interrupt 6
// -----

    PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6 = 1;

// -----
// Enable TINT0 in the PIE: Group 1 interrupt 7
// -----

    PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx7 = 1;

// -----
// Enable PIE group 3 interrupt 7 for CAP3INT
// -----

    PieCtrlRegs.PIEIER3.all = M_INT7;
```

```

// -----
// Enable CPU INT1 which is connected to CPU-Timer 0 and INT3 for CAP3INT:
// -----

IER |= (M_INT1 | M_INT3 | M_INT7);

// -----
// Enable global Interrupts and higher priority real-time debug events:
// -----

EINT; // Enable Global interrupt INTM
ERTM; // Enable Global realtime interrupt DBGM

// -----
// Configuration of ADC Module
// -----

AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x0006; // Setup 2 conv's on SEQ1 // edit 0x0004 to
0x0005

AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; // Setup ADCINA0 as 1st SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; // Setup ADCINA1 as 2nd SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; // Setup ADCINA2 as 3rd SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV03 = 0x3; // Setup ADCINA3 as 4th SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV04 = 0x4; // Setup ADCINA4 as 4th SEQ1 conv.
AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV05 = 0x5; // Setup ADCINA5 as 5th SEQ1 conv. // edit
new line

// AdcRegs.ADCCHSELSEQ2.bit.CONV06 = 0x6; // Setup ADCINA6 as 6th SEQ1 conv. // edit
new line tan

AdcRegs.ADCTRL2.bit.EVA_SOC_SEQ1 = 1; // Enable EVASOC to start SEQ1
AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 1; // Enable SEQ1 interrupt (every EOS)

```

```

// -----
// Assumes EVA Clock is already enabled in InitSysCtrl();
// -----

EvaRegs.T1CMPR = 750;          // Setup T1 compare value
EvaRegs.T1PR = 1250;          // Setup period register
EvaRegs.GPTCONA.bit.T1TOADC = 1; // Enable EVASOC in EVA
EvaRegs.T1CON.all = 0x1042;    // Enable timer 1 compare (upcount mode)

// To reset QEP counter

// EvaRegs.T2CNT = 0;
// Step 6. IDLE loop. Just sit and loop forever

for(;;);

}

void delay_loop()
{
    short i;
    for (i = 1; i < 2500; i++){
}

interrupt void adc_isr(void)
{
// -----
// GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF1 = 1;
// To check actual value of Current and DC-Bus voltage
// -----

```

```

while (AdcRegs.ADCST.bit.SEQ1_BSY == 1);
{};
Ia = AdcRegs.ADCRESULT0 >>4; // Changed to 12 bits value. // edit ADCRESULT0 to
ADCRESULT5
Ib = AdcRegs.ADCRESULT1 >>4; // Changed to 12 bits value.
Ic = AdcRegs.ADCRESULT2 >>4; // Changed to 12 bits value.
Id = AdcRegs.ADCRESULT3 >>4; // Changed to 12 bits value.
Vdc= AdcRegs.ADCRESULT4 >>4; // Changed to 12 bits value.
// Ia = AdcRegs.ADCRESULT5 >>4;
// Tune = AdcRegs.ADCRESULT6 >>4; //tan
// -----
// Reinitialize for next ADC sequence
// -----

AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reset SEQ1
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1; // Clear INT SEQ1 bit
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; // Acknowledge interrupt to PIE

// GpioDataRegs.GPFDAT.bit.GPIOF1 = 0;
}

interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{

//=====
// To check maximum range of the ISR program //

// GpioDataRegs.GPDDAT.bit.GPIOD0 = 1;
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA11 = 1;
x = GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA12;
// x = 0;

```

```

//=====

//-----
// To find maximum and minimum value of phase current
//-----
//    Iref_actual = 10;
//    Iref = (((Iref_actual*4)/150)*4095)/3;    // Reference current at 1.0V [ 1365 =
4095*(1.0V/3.0V) ]
//    Ihys_actual = 0.1;                        // Hysteresis band
//    Ihys = (((Ihys_actual*4)/150)*4095)/3;

Ihys = 1;
    Iref = 1365;
    Imax = Iref + Ihys; // Maximum current
    Imin = Iref - Ihys; // Minimum current

//-----
// To find maximum and minimum value of DC-Bus voltage
//-----

//    Vref_actual = 47;                        // Reference voltage at 20V
//    Vref    = (Vref_actual*0.04166*4095)/3; // Compute for DSP
//    Vhys_actual = 2;                        // Hysteresis band = 2V
//    Vhys    = (Vhys_actual*0.04166*4095)/3; // Compute for DSP
//    Vmax    = Vref + Vhys;                    // Maximum voltage  at 22V
//    Vmin    = Vref - Vhys;                    // Minimum voltage  at 18V

//-----
// Check Pulse Counts from QEP Encoder ( 4*3600 = 14400 Pulse / Rev. )
//-----

```

```
qep1.calc(&qep1);

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

RawTheta = MechTheta;

// -----
// Find Commutation
// -----

ComputeCommutation(); // See Commutaion.c

// -----
// To find the Speed of SRM
// -----

ComputeSpeed(); // See Speed.c

// -----
// Connect to DC-Bus voltage regulation module
// -----

VoltageRegulator(); // See Vregulator.c

// -----
// Speed Max
// -----

// if (x==1)
// SpeedRegulator();
```

```

    if (Speedmax < Speed)
        Speedmax = Speed ;

// -----
// For SRM control
// -----

    if(x ==0 && Speed>100)
        Generator(ModeGenerator); // See SRG.c
    else if (x==1)
        Motor(ModeMotor);

// -----
// Connected to Gate Drive Module
// -----

// Phase A
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA0 = Gate_Drive_Com; // For (N+1) Converter
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA1 = Gate_DriveA;

// Phase B
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA0 = Gate_Drive_Com; // For (N+1) Converter
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA2 = Gate_DriveB;

// Phase C
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA0 = Gate_Drive_Com; // For (N+1) Converter
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA3 = Gate_DriveC;

// Phase D
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA0 = Gate_Drive_Com; // For (N+1) Converter
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA4 = Gate_DriveD;

```

```
// -----  
// Connected input of the PWMDAC Module  
// -----  
  
    PwmDacCh1 = MechTheta;  
    PwmDacCh2 = ThetaA;  
    PwmDacCh3 = ThetaB;  
  
// -----  
// Call the PWMDAC update function  
// -----  
  
    pwmdac1.update(&pwmdac1);  
  
// -----  
// Acknowledge this interrupt to receive more interrupts from group 1  
// -----  
  
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;  
  
// -----  
// End of programe lenght check  
// -----  
  
    GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIOA11 = 0;  
  
}  
  
interrupt void EvaTimer2(void)  
  
{
```

```
//-----  
// Connect to QEP driver to update with next ISR  
//-----  
  
    qep1.isr(&qep1);  
  
//-----  
// Enable more interrupts from this timer  
//-----  
  
        EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP3INT = 1;  
        EvaRegs.EVAIFRC.all = BIT2;  
  
//-----  
// Acknowledge interrupt to receive more interrupts from PIE group 3  
//-----  
  
        PieCtrlRegs.PIEACK.all |= PIEACK_GROUP3;  
  
}  
  
//=====  
=  
// No more.  
//=====  
=
```

```
//#####  
//FILE: Commutaion.c  
//#####  
  
#include "DSP281x_Device.h"  
  
extern int16 MechTheta;  
extern int16 RawTheta;  
extern int16 ElecTheta;  
  
extern int16 A;  
extern int16 B;  
extern int16 C;  
extern int16 D;  
  
extern int16 ThetaA;  
extern int16 ThetaB;  
extern int16 ThetaC;  
extern int16 ThetaD;  
  
extern int16 ComA;  
extern int16 ComB;  
extern int16 ComC;  
extern int16 ComD;  
  
// To find ElecTheta of Phase A  
  
void ComputeCommutation()  
{
```

```

        if ( MechTheta >=0 & MechTheta <=2399 )           // Angle = 60 degree
=> 2400 Pulse
            RawTheta = MechTheta;

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

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

        else if ( MechTheta > 7199 & MechTheta <=9599 ) // Angle = 240 degree
=> 9600 pulse
            RawTheta = MechTheta - 7199;

        else if ( MechTheta > 9599 & MechTheta <=11999) // Angle = 300 degree
=> 12000 pulse
            RawTheta = MechTheta - 9599;

        else if ( MechTheta >11999 & MechTheta <=14399) // Angle = 360 degree
=> 14400 pulse
            RawTheta = MechTheta - 11999;

        ElecTheta = RawTheta;

// To find ElecTheta of Phase A
        A = ElecTheta+261;
        if (A>2399)
            ThetaA = A-2399;
        else
            ThetaA = A;

```

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

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

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

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

// To find the Commutation of Phase B
    ComB = ThetaB;

// To find the Commutation of Phase C
```

```
ComC = ThetaC;

// To find the Commutation of Phase D
    ComD = ThetaD;

}
//-----
// No more for Commutaion.c
//-----
```

```
////////////////////////////////////  
//  
//    Control in mode Motor  
//  
//    FILE: SRM.c  
////////////////////////////////////  
#include "DSP281x_Device.h"  
void Motor(int Mode)  
{  
    extern int16 ThetaOn_SRM;  
    extern int16 ThetaOff_SRM;  
    extern int16 Ia;  
    extern int16 Ib;  
    extern int16 Ic;  
    extern int16 Id;  
    extern int16 Imax;  
    extern int16 Imin;  
    extern int16 CheckA;  
    extern int16 CheckB;  
    extern int16 CheckC;  
    extern int16 CheckD;  
    extern int16 ThetaOn;  
    extern int16 ThetaOff;  
    extern int16 ComA;  
    extern int16 ComB;  
    extern int16 ComC;  
    extern int16 ComD;  
    extern int16 Gate_Drive_Com;  
    extern int16 Gate_DriveA;  
    extern int16 Gate_DriveB;  
    extern int16 Gate_DriveC;
```

```
extern int16 Gate_Drived;

// Increase Speed by On&Off

extern float Speed;

if ( 3000 < Speed && Speed <= 3800 )
{
    ThetaOn_SRM = 899 ;
    ThetaOff_SRM = 1889 ;
}
/*if ( 4000 < Speed && Speed <= 4800 )
{
    ThetaOn_SRM = 790 ;
    ThetaOff_SRM = 1863 ;
}
if ( 5000 < Speed && Speed <= 5800 )
{
    ThetaOn_SRM = 690 ;
    ThetaOff_SRM = 1830 ;
}
if ( 6000 < Speed && Speed <= 6800 )
{
    ThetaOn_SRM = 600 ;
    ThetaOff_SRM = 1800 ;
}
if ( 4400 < Speed && Speed <= 4600 )
{
    ThetaOn_SRM = 1100 ;
    ThetaOff_SRM = 2100 ;
}*/
```

```

// Motor

if(Mode==1)
{
// ==> For SRM control [ Soft Chopping Mode ]

if (ComA >= ThetaOn_SRM & ComA <= ThetaOff_SRM)
    {
        if ( Ia <= Imin )          // Current Regulation of Phase A
            {
                Gate_Drive_Com = 1;    // For (N+1) Converter
                Gate_DriveA = 1;
            }
        else if( Ia >= Imax )
            {
                Gate_Drive_Com = 0;    //For (N+1) Converter
                Gate_DriveA = 1;
            }
    }
else
    {
        Gate_Drive_Com = 1;    //For (N+1) Converter
        Gate_DriveA = 0;
    }
// ==> For SRM control [ Soft Chopping Mode ]
if (ComB >= ThetaOn_SRM & ComB <= ThetaOff_SRM)
    {
        if ( Ib <= Imin )
            {
                Gate_Drive_Com = 1;    //For (N+1) Converter
                Gate_DriveB = 1;
            }
    }

```

```

    }
else if( lb >= lmax )
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveB = 1;
    }
}
else
    {
        Gate_Drive_Com = 1; // For (N+1) Converter
        Gate_DriveB = 0;
    }

```

// ==> For SRM control [Soft Chopping Mode]

```

if (ComC >= ThetaOn_SRM & ComC <= ThetaOff_SRM)
    {
        if ( lc <= lmin )
            {
                Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
                Gate_DriveC = 1;
            }
        else if( lc >= lmax )
            {
                Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
                Gate_DriveC = 1;
            }
    }
else
    {

```

```

        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveC = 0;
    }

// ==> For SRM control [ Soft Chopping Mode ]

    if (ComD >= ThetaOn_SRM & ComD <= ThetaOff_SRM)
    {
        if ( Id <= Imin )
        {
            Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
            Gate_DriveD = 1;
        }
        else if( Id >= Imax )
        {
            Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
            Gate_DriveD = 1;
        }
    }
else
    {
        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveD = 0;
    }
}

else if (Mode==2)
{

// ==> For SRM control [ Hard Chopping Mode ]

```

```

if (ComA >= ThetaOn_SRM & ComA <= ThetaOff_SRM)

{
    if ( Ia <= Imin )      // Current Regulation of Phase A
    {
        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveA = 1;
    }
    else if( Ia >= Imax )
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveA = 0;
    }
}

else
{
    Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
    Gate_DriveA = 0;
}

```

// ==> For SRM control [Hard Chopping Mode]

```

if (ComB >= ThetaOn_SRM & ComB <= ThetaOff_SRM)
{
    if ( Ib <= Imin )
    {
        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveB = 1;
    }
    else if( Ib >= Imax )

```

```

        {
            Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
            Gate_DriveB = 0;
        }
    }
else
    {
        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveB = 0;
    }

```

// ==> For SRM control [Hard Chopping Mode]

```

if (ComC >= ThetaOn_SRM & ComC <= ThetaOff_SRM)
{
    if ( Ic <= Imin )
    {
        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveC = 1;
    }
    else if( Ic >= Imax )
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveC = 0;
    }
}
else
{
    Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
    Gate_DriveC = 0;
}

```

```
// ==> For SRM control [ Hard Chopping Mode ]
```

```

if (ComD >= ThetaOn_SRM & ComD <= ThetaOff_SRM)
{
    if ( Id <= Imin )
    {
        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveD = 1;
    }
    else if( Id >= Imax )
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveD = 0;
    }
}
else
{
    Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
    Gate_DriveD = 0;
}
}

else if (Mode==3)

{
// ==> For SRM control [ Single Pulse ]

if (ComA >= ThetaOn_SRM & ComA <= ThetaOff_SRM) // Phase-A

{
    Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter

```

```
        Gate_DriveA = 1;
    }

    else
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveA = 0;
    }

// ==> For SRM control [ Single Pulse ]
    if (ComB >= ThetaOn_SRM & ComB <= ThetaOff_SRM) // Phase-B

        {
            Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
            Gate_DriveB = 1;
        }

    else
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveB = 0;
    }

// ==> For SRM control [ Single Pulse ]

    if (ComC >= ThetaOn_SRM & ComC <= ThetaOff_SRM) // Phase-C

        {
            Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
```

```
        Gate_DriveC = 1;
    }

    else
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveC = 0;
    }

// ==> For SRM control [ Single Pulse ]

    if (ComD >= ThetaOn_SRM & ComD <= ThetaOff_SRM) // Phase-D
    {
        Gate_Drive_Com = 1; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveD = 1;
    }

    else
    {
        Gate_Drive_Com = 0; //For (N+1) Converter
        Gate_DriveD = 0;
    }
}
}
```

```
//#####  
//FILE: Vregulator.c  
//#####  
  
#include "DSP281x_Device.h"  
  
extern int16 CheckVdc;  
extern int16 Vdc;  
extern int16 Vmax;  
extern int16 Vmin;  
extern int16 ThetaOff;  
extern int16 ThetaOff_Reg;  
extern int16 ThetaOn_Reg;  
extern int16 ThetaOn;  
  
void VoltageRegulator()  
{  
if (CheckVdc == 0)  
    {  
        if (Vdc <= Vmin)  
            ThetaOn = ThetaOn_Reg;  
        else if (Vdc >= Vmax)  
            {  
                ThetaOn = ThetaOn + 5;  
                CheckVdc = 1;  
            }  
        else  
            ThetaOn = ThetaOn;  
    }  
else if (CheckVdc == 1)  
    {
```

```
        if (Vdc >= Vmax)
        {
            if (ThetaOn >=1800 && ThetaOn <= 2400)
                ThetaOn = ThetaOn+5;

            if (ThetaOn > 2400)
// If ThetaOff is more than 100.It will not be reduced.
                ThetaOn = (ThetaOn+5)-2400;

            if (ThetaOn >=0 && ThetaOn <= 500)
                ThetaOn = ThetaOn+5;
        }
        else if (Vdc <= Vmin)
        {
            if (ThetaOn >=0 && ThetaOn <= 500)
                ThetaOn = ThetaOn-5;

            if (ThetaOn <= 0)
                ThetaOn = 2400+ThetaOn;

            if (ThetaOn <= 2400 && ThetaOn >=1800)
                ThetaOn = 2400-5;
        }
        else
            ThetaOn = ThetaOn;

        if (Vdc < 100)
            CheckVdc = 0;

    }
}
```

```

void VoltageRegulator()
{
    if (CheckVdc == 0)
        {
            if (Vdc <= Vmin)
                ThetaOff = ThetaOff_Reg;
            else if (Vdc >= Vmax)
                {
                    ThetaOff = ThetaOff - 5;
                    CheckVdc = 1;
                }
            else
                ThetaOff = ThetaOff;
        }

    else if (CheckVdc == 1)
        {
            if (Vdc >= Vmax)
                {
                    if (ThetaOff >= 100)
// If ThetaOff is more than 100.It will not be reduced.
                    ThetaOff = ThetaOff-5;
                }
            else
                ThetaOff = ThetaOff;
        }
        else if (Vdc <= Vmin)
            {
                if (ThetaOff <= 1000)
// If ThetaOff is less than 1000.It will not be added.
                ThetaOff = ThetaOff+5;
            }
        else

```

```
        ThetaOff = ThetaOff;
    }
else
    ThetaOff = ThetaOff;

    if (Vdc < 100)
        CheckVdc = 0;

    }
}
//-----
// No more for Vregulator.c
//-----
```

```

#####
//FILE: Speed.c
#####
#include "DSP281x_Device.h"

float ComputeSpeed()
{
    extern int16 MechTheta;
    extern float Speed;
    extern int Speed1;
    extern int Speed2;
    extern int Speed3;
    extern int CheckSpeed;

    if(CheckSpeed == 0 )
    {
        Speed1 = MechTheta;
        CheckSpeed = 1;
    }

    else if(CheckSpeed ==1)
    {
        Speed2 = MechTheta;
        Speed3 = Speed2-Speed1;
        Speed = (Speed3*600000)/14400;
        CheckSpeed = 0;
    }

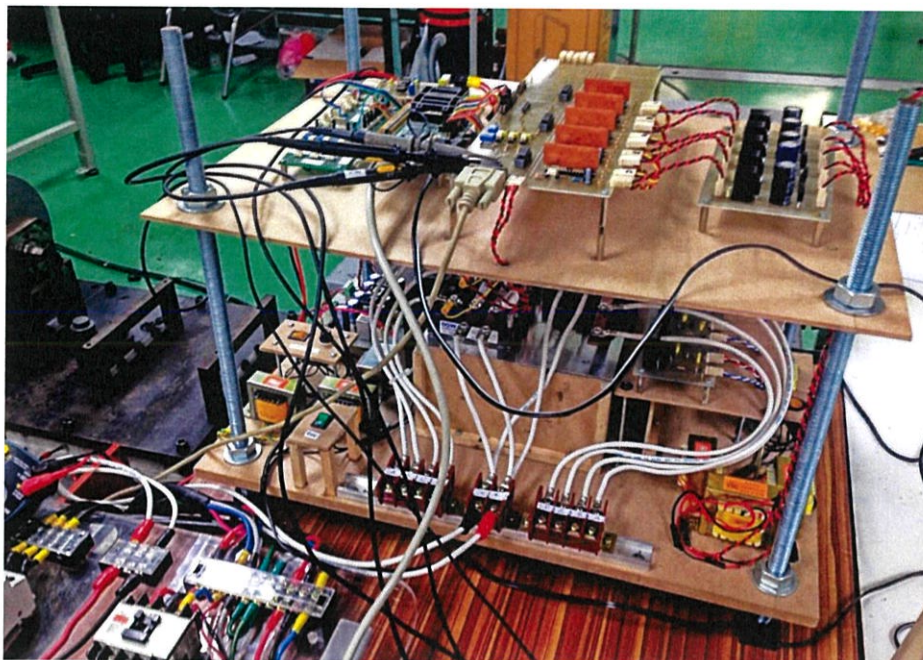
    return Speed;
}

//-----
// No more for Speed.c
//-----

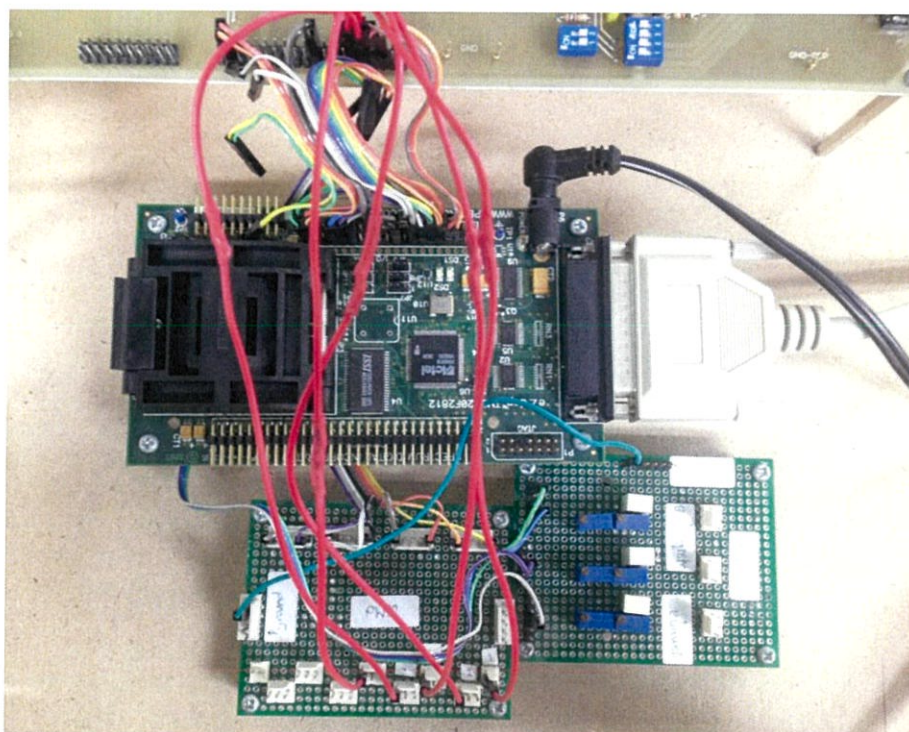
```

ภาคผนวก ข

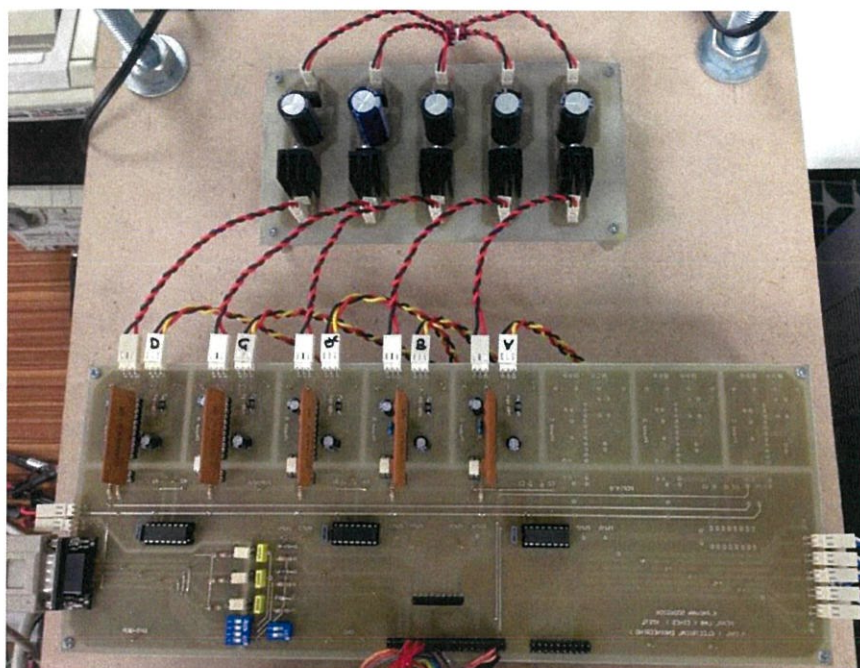
ชุดทดลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแทนซ์มอเตอร์



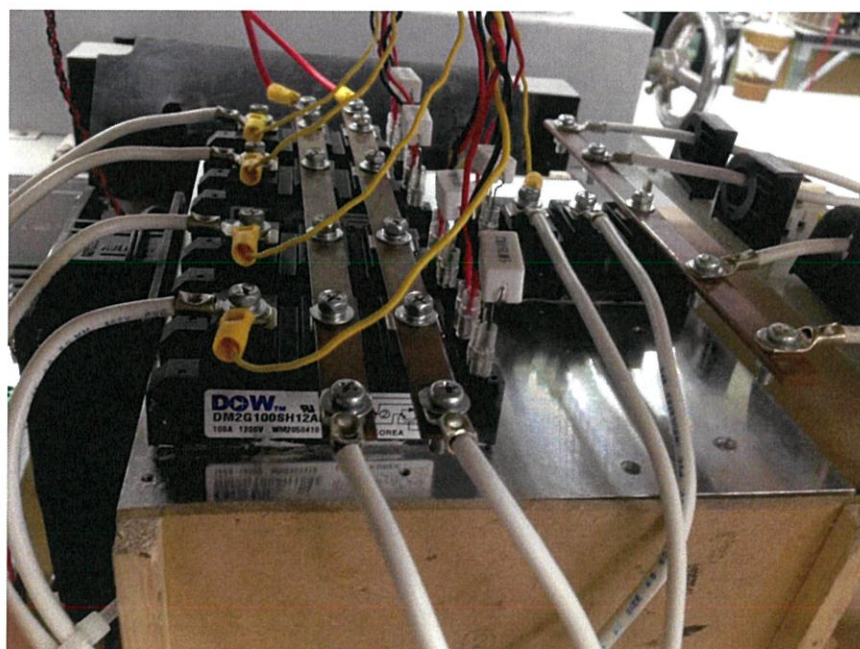
ภาพที่ ข.1 ภาพรวมของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแทนซ์



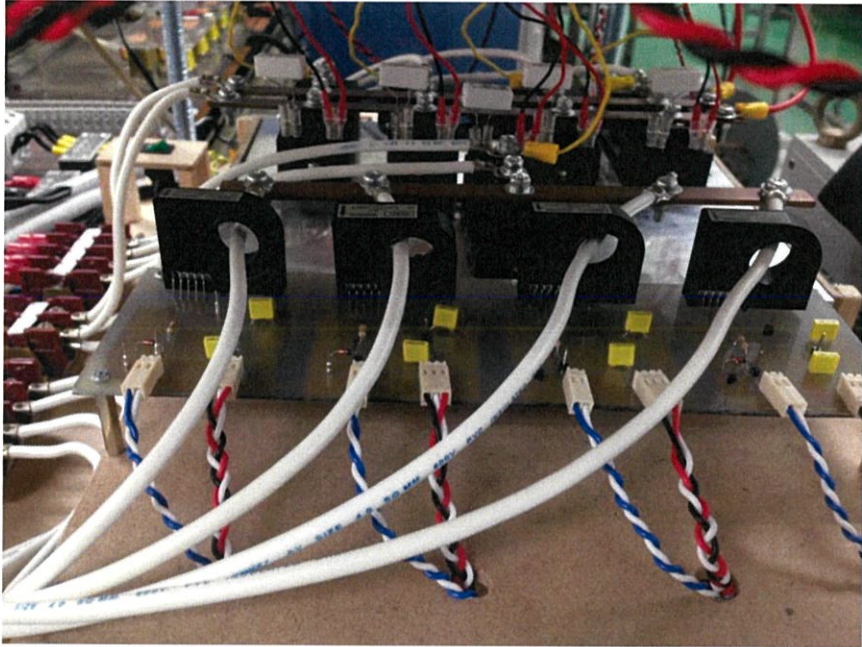
ภาพที่ ข.2 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DSP320F2812



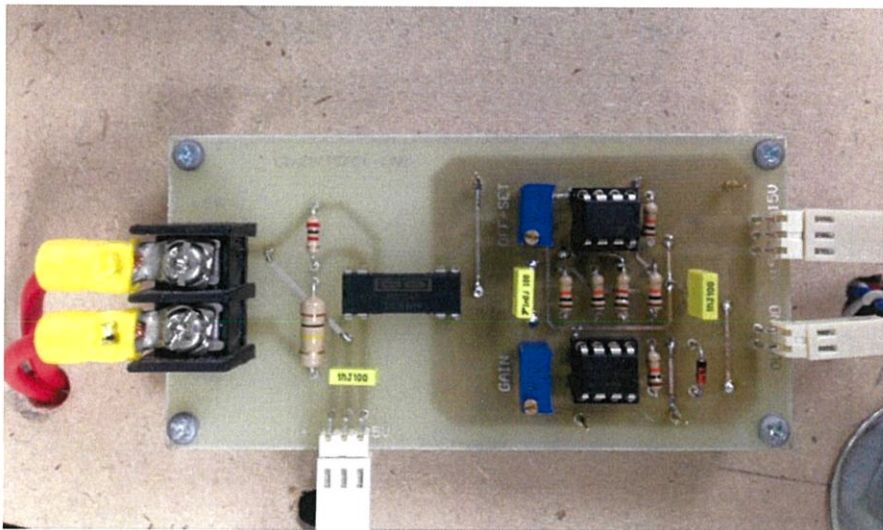
ภาพที่ ข.3 ชุดวงจร IGBT Gate Drives (ล่าง) , วงจรไฟเลี้ยง Gate Drives +20 โวลต์ (บน)



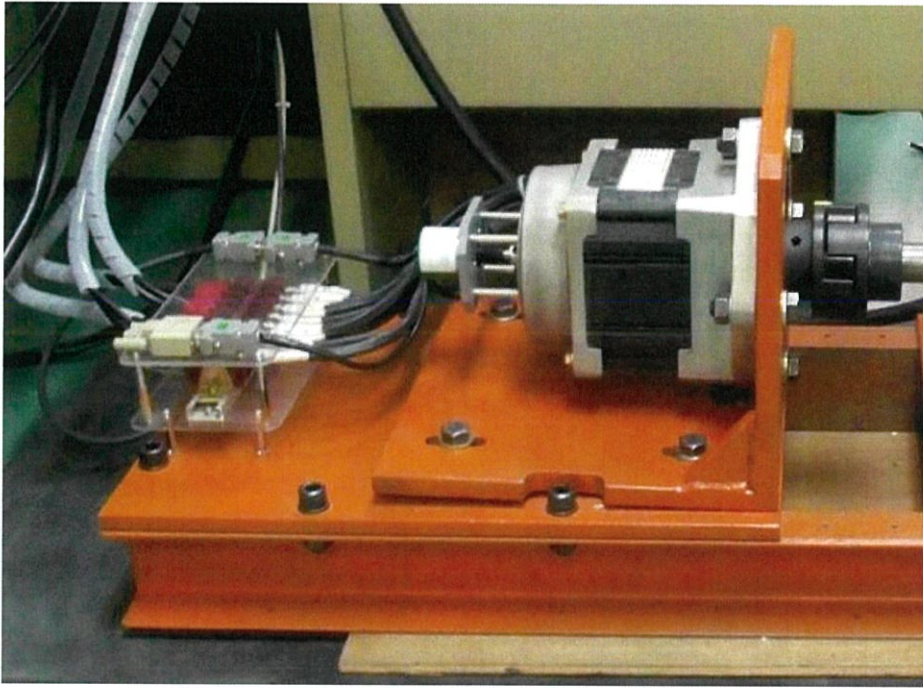
ภาพที่ ข.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1)



ภาพที่ ข.5 ชุดวงจรวัดกระแสทั้ง 4 เฟส



ภาพที่ ข.6 ชุดวงจรวัดแรงดันที่ DC bus



ภาพที่ ข.7 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์

ภาคผนวก ค
บทความวิชาการ

การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์

Design and build a converter using for a switched reluctance motor

ธีรวัช เซวาน์ลิลิตกุล และธีรพงษ์ ชำนาญ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 0-2739-2478

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ switch (n+1) สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 4 เฟส แบบ 8/6 โดยมีการออกแบบที่ลดจำนวนสวิตช์ลงในวงจรขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรขับเคลื่อน อีกทั้งยังเป็นการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างสองวงจร โดยในการทดลองจะต้องควบคุมมุมจุดชนวนให้อยู่ในช่วงการทำงานที่เป็นมอเตอร์หรือในช่วงที่ความชันของค่าความเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวก

ในงานวิจัยนี้ใช้ DSP รุ่น TMS320F2812 ควบคุมวงจรขับเคลื่อนเพื่อสั่งการสับสวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ที่ DC Bus ระดับแรงดัน 48 โวลต์ เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานในทิศทางตามที่ต้องการและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: สวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ 4 เฟส แบบ 8/6

Abstract

This thesis presents design and build a (n+1) switch converter using for a 4 phases 8/6 switched reluctance motor. Comparing with two switchers per phase converter it is designed to reduce the number of switches in the converter in order to save expense in building converter and also indicated advantages and disadvantages for both converters. The turning off-on angle must be controlled at range of motoring mode or when the slope of the inductance is positive which will run the motoring mode.

This research uses DSP no.TMS320F2812 to control gate drive switching converter in the DC-Bus at 48 volts. It causes the motor to run effectively in the desired direction.

Keyword: 4 phases 8/6 switched reluctance motor

1. บทนำ

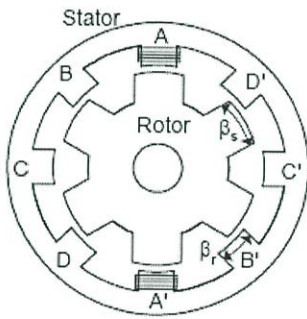
ปัจจุบันเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น นำมาใช้เป็นปั๊มในรถยนต์รุ่นใหม่ ๆ มอเตอร์ในอากาศยานรุ่นใหม่ รถยนต์ไฮบริดจ์ เป็นต้น เนื่องจากข้อดีตรงที่มีการออกแบบโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบาเนื่องจากไม่มีขดลวดที่โรเตอร์ ทำให้ราคาถูก ไม่ต้องมีการบำรุงรักษามาก แต่ตรงกันข้ามกับการควบคุมซึ่งมีความซับซ้อน ทั้งการควบคุมให้ทำงานในโหมดมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงมุมการนำกระแสให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละเฟส จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากและมีคุณสมบัติในการทำงานที่สูง แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น อีกทั้งการแข่งขันทางการตลาดของผู้ผลิตมีจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้ราคาลดลง และขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เล็กลง แต่ประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์ได้รับการค้นคว้าและพัฒนาเรื่อยๆ ซึ่งในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมได้เริ่มมีความสนใจเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตช์รีลักแตนซ์เป็นอย่างมาก

โครงงานนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์ switch (n+1) สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ โดยเริ่มต้นจากการศึกษาและออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้จำนวนตัวสับสวิตช์ที่ลดลง เพื่อศึกษาหลักการทำงานและการควบคุมกระแสและแรงดันในแต่ละเฟสของมอเตอร์ รวมไปถึงข้อดีและข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบเมื่อเทียบกับวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส หลังจากนั้นได้ทำการสร้างระบบควบคุมการทำงานแบบมอเตอร์ของสวิตช์รีลักแตนซ์ 4 เฟส แบบ 8/6 ที่กัดกำลัง 2.32 กิโลวัตต์ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

2. เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตช์รีลักแตนซ์ (SRM)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้มีโครงสร้างแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยจะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่

สเตเตอร์ แต่จะไม่มีขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ซึ่งจะทำให้การสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้นั้นทำได้ง่ายและราคาถูกกว่าแบบอื่นๆ โดยทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นแบบขั้วยื่น (Salient Poles) เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แรงบิดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ส่วนที่เคลื่อนที่ได้เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุด และสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีค่าอินดักแตนซ์สูงสุดที่ตำแหน่งอื่นได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้ากระตุ้นให้กับขดลวดที่อยู่ในเฟสถัดไป ในช่วงการทำงานเป็นมอเตอร์จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าต้องการให้ทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ จะกระตุ้นขดลวดเฟสเมื่อค่าอินดักแตนซ์มีค่าลดลง เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์จะมีกระแสไหลเข้าในแต่ละเฟสเพียงทิศทางเดียวและแต่ละเฟสยังเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพมากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่นซึ่งทำให้ยากต่อการลัดวงจร เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาคือเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6 ซึ่งมีจำนวนขั้วที่สเตเตอร์และที่โรเตอร์เท่ากับ 8 ขั้วและ 6 ขั้วตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 และพิกัดที่ใช้แสดงในตารางที่ 1



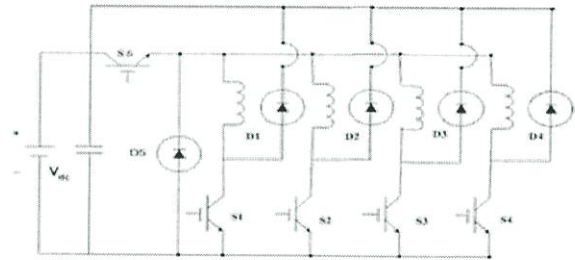
รูปที่ 1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบสวิตซ์รีลักแตนซ์ แบบ 4 เฟส 8/6

ตารางที่ 1 พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ใช้ศึกษา

Model	RA 165187-15T
Rated output	2.32 kW
Rated speed/Max speed	6,000/12,000 rpm
Torque/Max torque	3.69/4.20 N-m
Rated voltage	48 VDC
Dimension	130x130x160 mm
Number of stator/rotor phase	4 phase , 8/6

3. การออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนสวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์

ในโครงการนี้จะใช้วงจรขับเคลื่อนแบบสองสวิตซ์ต่อเฟสที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม เนื่องจากราคาของขั้วเคลื่อนก่อนข้างสูง จึงทำให้ประหยัดงบประมาณ ในการสร้างวงจรขับเคลื่อนสวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์ได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรขับเคลื่อนแบบ (switch n+1)

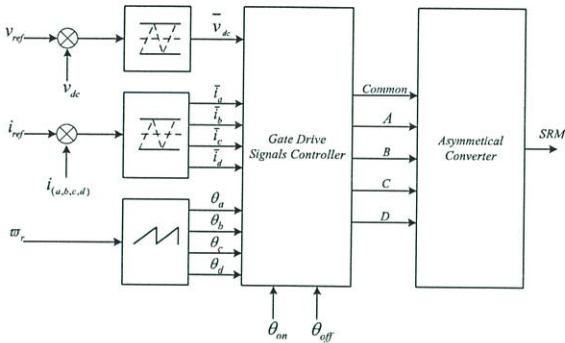
โดยที่วงจรคอนเวอร์เตอร์จะเป็นตัวควบคุมแรงดันที่ตีซิปัส 48 โวลต์ โดยการควบคุมของวงจรขับเคลื่อน และมีอุปกรณ์ควบคุมที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2 พิกัดของอุปกรณ์และวงจรควบคุมสวิตซ์รีลักแตนซ์มอเตอร์

อุปกรณ์	ขนาดพิกัด
3 phase rectifier bridge diode	Input Voltage : 34.8 v. (AC) Output Voltage : 48 v. (AC)
4 phase asymmetrical power converter (IGBT Module)	Rated Voltage : 1200 v. Rated Current : 100 A.
Hall Effect Current Sensor	DC Current Max = 150 A. Output Voltage = 4 V. Vcc = ±15 V.
Voltage Sensor	Voltage Max = 1500 v.
Digital Signal Processing ,DSP (TMS320F2812)	150 MHz. (6.67 nS – cycle Time)
Speed Sensor - IC Opto-coupler no. PC817	Rated Voltage : 3.3 v.
Encoder R137	Rate Voltage : 5 VDC Output waveform : Square wave Resolution : 3,600 pulse/Rev.
SRM 4 phase 8/6 (RA165187)	Rated Voltage = 48 V. Rated Power = 3 Hp. Rated Speed = 6,000 rpm. Max Speed = 12,000 rpm.

4. การทดลองและผลการทดลอง

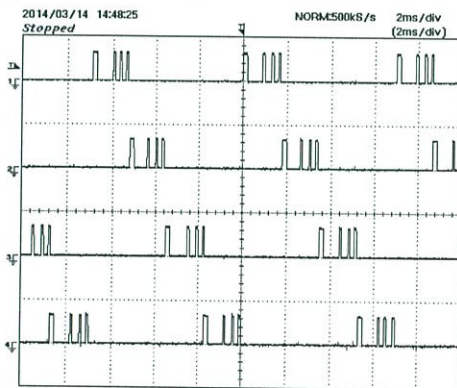
ในการทดลองวงจรคอนเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยตัวนำยิ่งยวด (Superconducting) มอเตอร์ภายใต้การควบคุมตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน

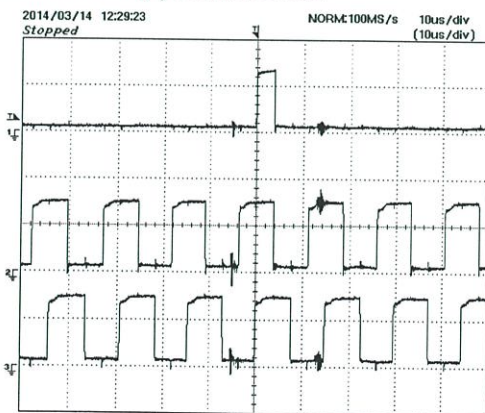
4.1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมการทำงาน

4.1.1 สัญญาณขั้วนำเกตจาก DSP



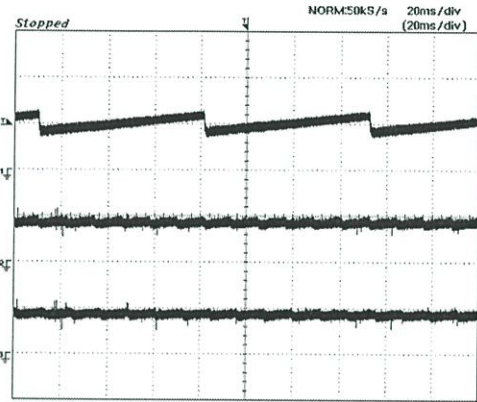
รูปที่ 4 สัญญาณขั้วนำเกตของ IGBT ตัวล่างที่ได้จากช่อง PWM ของตัว DSP ขณะทำงานในโหมดควบคุมกระแสแบบ Soft Chopping

4.1.2 ผลการทดสอบสัญญาณจากตัว Encoder



รูปที่ 5 สัญญาณ QEPI, QEP1 และ QEP2 ที่ได้จากตัว Encoder

4.1.3 ผลการวัดตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)



รูปที่ 6 แสดงมุมทางกล, มุมทางไฟฟ้าของเฟส A และเฟส B

4.2 เปรียบเทียบระหว่างวงจร switch (n+1) และวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส

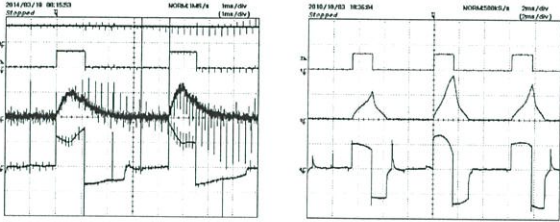
4.2.1 การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์

จากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ switch (n+1) ในรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่ามีการใช้จำนวนสวิตช์ลดลงจากวงจรแบบสองสวิตช์ต่อเฟส ในรูปที่ 4.6 อยู่ 3 ตัว ซึ่งทำให้อุปกรณ์ในส่วนของวงจรควบคุมที่เกี่ยวข้องกับตัวสวิตช์ที่ใช้งาน เช่น ชุด Gate drives, ชุดไฟเลี้ยงของ Gate drives ซึ่งสามารถทำให้ประหยัดงบประมาณในการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ตามตารางที่ 3

ชนิดคอนเวอร์เตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้	สองสวิตช์ต่อเฟส (ราคา x จำนวน = บาท)	Switch (n+1) (ราคา x จำนวน = บาท)
IGBT Module (รุ่น DM2G100SH12AE)	1326 x 8 = 10,608	1326 x 5 = 6,630
ชุดวงจร Gate drives และสัญญาณขับ	374 x 8 = 2,992	374 x 5 = 1,870
วงจรไฟเลี้ยงสำหรับ Gate drives	13 x 4 = 52	13 x 3 = 39
	224 x 8 = 1,792	224 x 5 = 1,120
รวมราคา	15,444	9,659
ผลต่างราคา	5,785	
ผลต่างราคา (%)	37.46	

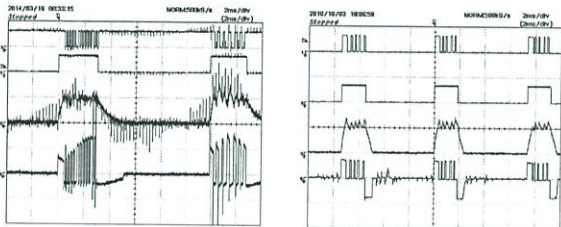
4.2.2 การเปรียบเทียบเชิงวิศวกรรม

ในการควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็วสูง จะใช้การควบคุมกระแสแบบ Single Pulse เนื่องจากในขณะที่มอเตอร์มีความเร็วรอบสูงจะทำให้แรงดันต้านกลับ (back emf) ส่งผลให้ค่ายอดกระแสในแต่ละเฟสมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสที่ตั้งไว้ รูปคลื่นของกระแสจึงลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 7 สัญญาณขั้วเกท กระแส และแรงดันในโหมด Single Pulse ของคอนเวอร์เตอร์ Switch (n+1) (ซ้าย) ,แบบสองสวิตช์ต่อเฟส(ขวา)

การควบคุมมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำ จะพบว่าในช่วงที่ทำการสตาร์ทมอเตอร์กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องทำการควบคุมกระแส (Current Regulation) เพื่อคงค่ากระแสในแต่ละเฟส ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 สัญญาณขั้วเกท กระแส และแรงดันในโหมดควบคุมกระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ ของคอนเวอร์เตอร์ Switch (n+1) (ซ้าย) ,แบบสองสวิตช์ต่อเฟส(ขวา)

5. สรุป

จากการออกแบบและสร้างวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1) เมื่อเทียบกับวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส พบว่ามีข้อดีในเรื่องของสวิตช์ที่ใช้ในวงจรขั้วมีจำนวนที่ลดลง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรถอนเวอร์เตอร์และขนาดของวงจรเล็กลง แต่ยังมีข้อด้อยในช่วงที่มอเตอร์ทำงานย่านความเร็วสูง ซึ่งในขณะที่สวิตช์ร่วม turn on (Magnetization) ให้กับเฟสถัดไป จะมีการรบกวนจากช่วง Demagnetization จากเฟสก่อนหน้า เนื่องจากมีการ off-going phase ไม่ไวพอ ทำให้เกิดแรงดันต้านกลับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำลง อีก

ทั้งในส่วนองกรรณที่สวิตช์ร่วมเกิดความเสี่ยง ก็จะมีผลกระทบต่อการทำงานในเฟสอื่นๆที่เหลือ

ในการทดลองจะพบว่ารูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ได้จากวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบ Switch (n+1) มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น เนื่องจากไม่มีการกรองสัญญาณรบกวนที่ดี และการควบคุมกระแสที่ยากกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการควบคุมมอเตอร์ต่ำลง เมื่อเทียบกับวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ต่อเฟส

6. ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบและสร้างวงจรถอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์ จำเป็นต้องทราบในเรื่องของลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ที่ใช้ เช่น พิกัดกำลัง แรงดัน และกระแสที่ใช้ เพื่อที่จะนำมาเลือกอุปกรณ์ในส่วนของการควบคุมให้เหมาะสม และในส่วนองวงจรถอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ สามารถเลือกประเภทตามลักษณะการควบคุมการสับสวิตช์ จำนวนเฟสของมอเตอร์ รวมไปถึงงบประมาณที่ใช้ในการสร้างวงจรถอนเวอร์เตอร์ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุพัฒน์ กิตติรัตน์สังจา, “มอเตอร์สวิตช์รีลักแตนซ์: ทฤษฎี และการออกแบบ”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [2] วรารักษ์ ศรีสุวรรณ, สิทธิชัยแก้วไทย, สุนทร น้อยทัพ, “การขับเคลื่อนสวิตช์รีลักแตนซ์มอเตอร์”, ปรินูญานิพนธ์ (วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า)สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [3] P. Chanchaensook and M. F. Rahman, “Control of a Four-Phase Switched Reluctance Generator: Experimental Investigations”, in Proceedings of the **IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, (IEMDC'03.), Madison, WI, USA, June 2003, Vol.7, pp.842-848.
- [4] T.J.E Miller, “Switched Reluctance Motors and Their Control”, New York; **Oxford University Press**, 1993
- [5] T.J.E Miller., Ed., “Electronic Control of Switched Reluctance Machines”, **Power Engineering Series**, Newnes, Oxford, 2001

nuscript Preparation Guideline for Papers Submitted to Proj

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล : นายธีรวัช เขาวนลิตกุล
 วัน/เดือน/ปี เกิด : 17 มีนาคม 2534
 ที่อยู่ : 267/9 ถ.ราษฎร์พัฒนา ต.สะพานสูง อ.สะพานสูง
 จ.กรุงเทพมหานคร 10240

ประวัติการศึกษา :

ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า

ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

E-mail : cg_superbolt@hotmail.com



ชื่อ-สกุล : นายธีรพงษ์ ชำนาญ
 วัน/เดือน/ปี เกิด : 26 ตุลาคม 2534
 ที่อยู่ : 298 หมู่ 3 ต.วาริชภูมิ อ.วาริชภูมิ
 จ.สกลนคร 47150

ประวัติการศึกษา :

ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล

ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

E-mail : nouvo10@hotmail.com