

เทคนิคการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลักแตนซ์
ในขณะหยุดนิ่ง

A ROTOR POSITION ESTIMATION TECHNIQUE OF
A SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR AT STANDSTILL



T110288



ฉพ.
ก 674 ๗
๒๕๕๓

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...110288
วัน,เดือน,ปี...-1 พ.ย. 2553

b. 12263436
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553
KMITL-2010-EN-M-020-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A ROTOR POSITION ESTIMATION TECHNIQUE OF
A SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR AT STANDSTILL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010
KMITL-2010-EN-M-020-088**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เทคนิคการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ของ
มอเตอร์แบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ในขณะหยุดนิ่ง

นักศึกษา

นาย กิตติรัตน์ ตระการเจริญสุข

รหัสประจำตัว

48060223

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

บทคัดย่อ

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเทคนิคการประมาณตำแหน่งของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ (SRM) ในสภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ขดลวดเฟสของมอเตอร์จะถูกกระตุ้นด้วยพัลส์แรงดันที่มีช่วงแคบพร้อมกันทุกเฟสจากนั้นทำการตรวจวัดค่ากระแสในแต่ละเฟส แล้วนำค่าแอมพลิจูดของกระแสที่ได้มาเปรียบเทียบกับ โดยที่ เฟสที่มีค่าแอมพลิจูดเหมาะสมที่สุดจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้เทคนิคคิวบิกสไปไลน์ (cubic spline) และใช้เป็นเฟสที่ต้องจ่ายพลังงานเป็นเฟสแรกในช่วงเริ่มหมุน ผลที่ได้ คือ เฟสที่เหมาะสมในการเริ่มหมุนมอเตอร์ในทิศทางที่ต้องการ และตำแหน่งของโรเตอร์ที่ถูกต้อง ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ได้กับทั้งระบบที่มีตัวตรวจจับตำแหน่งแบบ incremental หรือแบบปราศจากตัวตรวจจับตำแหน่ง

Thesis Title A Rotor Position Estimation Technique of a Switched-Reluctance Motor at Standstill

Student Mr. Kittirat Trakancharoensook

Student ID. 48060223

Degree Master of Engineering

Program Electrical of Engineering

Year 2010

Thesis Advisor Assoc.Prof. Dr. Supat Kittiratsatcha

ABSTRACT

This thesis proposes the rotor-position estimation technique for a switched-reluctance machine (SRM). The phase winding is energized by narrow voltage pulse then phase currents are detected and calculated to find the rotor position by using the cubic spline interpolation technique. The proper phase is chosen for a starting phase. The results are the proper starting phase and exact starting rotor position. This technique can be implemented with a system with the incremental encoder or sensorless system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาเกี่ยวกับแนวทางการศึกษา และวิจัยจาก รศ.ดร. สุวัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และเป็นผู้ให้คำแนะนำในการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ในทุกด้านจากท่าน และ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณ สิทธิชัย แก้วไทย ที่ให้ข้อมูล และ คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย ความปรารถนาดี กำลังใจเวลาที่เผชิญกับปัญหา ขอขอบคุณอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ ท้าวศรีสวาด โคตรปัญญา ที่ให้ข้อมูล และคำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังแต่ข้าพเจ้าเสมอ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ที่ร่วมทำงานกันในห้อง Power Electronic Application and Energy Conversion Research Laboratory (PEARL) Room ECC 407 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำ และ กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา และบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กิตติรัตน์ ตรีการเจริญสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 อธิบายถึงปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย.....	1
1.2 เพราะเหตุใดปัญหานี้จึงน่าสนใจ.....	1
1.3 งานวิจัยระบบขับเคลื่อน SRM โดยปราศจากเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง และ.....	3
เทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งที่ได้เคยมีการคิดค้นขึ้น	
1.3.1 เทคนิคการประมาณตำแหน่ง โรเตอร์โดยใช้เฟสฟลักซ์เชื่อมโยง.....	6
(Phase flux linkage based method)	
1.3.2 เทคนิคการประมาณตำแหน่ง โรเตอร์โดยใช้บัลคอินดักแตนซ์.....	8
(Bulk inductance based method)	
1.3.3 เทคนิคที่ใช้ตัวสังเกต (Observer Method).....	9
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	10
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	11
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษางานวิจัย.....	11
1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	11
1.8 ขั้นตอนการศึกษาค้นคว้า.....	13
บทที่ 2 หลักการทำงานเบื้องต้นของ SRM.....	14
2.1 บทนำ.....	14
2.1.1 ประวัติความเป็นมา.....	14
2.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของ SRM.....	16
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์ และ ตำแหน่งโรเตอร์.....	20
2.4..แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ วงจรสมมูล.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 หลักการทำงานระบบขับเคลื่อน SRM และ เทคนิคการเริ่มหมุนของ SRM.....	26
3.1 บทนำ.....	26
3.2 โครงสร้างทางกลของ SRM (Mechanical Structure of the SRM)	26
3.3 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของ SRM (Magnetic Characteristic of the SRM)	27
3.4 การสร้างแรงบิดทางกลของSRM (Torque Production Mechanism in SRM)	28
3.5 คอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อน SRM (SRM Converter)	30
3.5.1 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อน SRM.....	31
3.5.1.1 คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟส.....	32
3.5.1.2 คอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-chopping.....	34
3.5.1.3 คอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม (Converter with Shared Component).....	34
3.5.1.4 คอนเวอร์เตอร์แบบซอฟท์สวิตชิงสำหรับ SRM Soft-Switching Converter for SRM).....	35
3.5.2 การควบคุมกระแสของ SRM.....	36
3.5.2.1 การควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Control).....	38
3.6 โหมดการทำงานของ การขับเคลื่อน SRM.....	39
3.7 การควบคุม SRM ขณะเริ่มหมุน (Control of the SRM drive at standstill).....	41
3.7.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการควบคุม SRM ขณะเริ่มหมุนที่นำเสนอ (Fundamental principle of the proposed method).....	43
3.7.2 การเลือกพัลส์กระแสสำหรับการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง (Selection the phase for rotor position estimation).....	44
3.7.3 การเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน (Selection the Phase to Excitation).....	47
3.7.4 การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง โดยใช้ฟังก์ชันคิวบิกสไปไลน์ (Rotor Position Estimation Using Cubic Spline Function).....	50
3.7.5 เทคนิคการตรวจจับแอมพลิจูดพัลส์กระแสเพื่อใช้ประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง.....	51
3.8 สรุป.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การจำลองเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง และ การเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนด้วยโปรแกรม(Matlab/Simulink).....	55
4.1 บทนำ.....	55
4.2 การจำลองหาค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแส โดยการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบ.....	55
4.3 การจำลองเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง.....	59
4.4 เทคนิคการเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน (Selection Technique the Phase to Excitation).....	63
4.5 สรุป.....	69
บทที่ 5 การทดลองเทคนิคการเริ่มหมุนของมอเตอร์ SRM.....	70
5.1 บทนำ.....	70
5.2 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	70
5.2.1 DSP Board.....	70
5.2.1.1 Analog-to-digital Conversion (ADC) unit	71
5.2.1.2 PWM Controller.....	74
5.2.1.3 Encoder Interface Unit (EIU).....	75
5.2.1.4 เซนเซอร์ตรวจจับกระแส Current Sensor.....	77
5.2.1.5 เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง Position Sensor.....	78
5.2.1.6 ชุดวงจรขับเคลื่อน (Gate Drive).....	79
5.3 โครงสร้างโปรแกรม (Software Layout).....	80
5.3.1 จุดเริ่มต้นโปรแกรม(Start).....	81
5.3.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรม (Initializing).....	81
5.3.3 เริ่มขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม(Starting Process).....	83
5.3.4 การทำงานของโปรแกรมขั้นจังหวะ(Interrupt Service Routine).....	83
5.4 ผลการทดลอง.....	84
5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	91
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ.....	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก บอร์ดควบคุมแบบ DSP (ADMC 401 DSP CONTROLLER BOARD)	97
ภาคผนวก ข DC-DC Converter.....	99
ภาคผนวก ค เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง และ เซนเซอร์ตรวจจับกระแส.....	101
ภาคผนวก ง พาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์.....	103
ภาคผนวก จ มอเตอร์ SRM 12/8.....	105
ภาคผนวก ฉ เครื่องมือวัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	108
ภาคผนวก ช ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งที่ได้อาจจากการประมาณพัลส์กระแสทั้ง 3 เฟส.....	45
3.2 เงื่อนไขการเลือกพัลส์กระแสสำหรับประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง.....	46
3.3 เงื่อนไขสำหรับการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในลำดับเฟส C-B-A.....	48
3.4 เงื่อนไขสำหรับการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในลำดับเฟส A-B-C.....	49
3.5 สัมประสิทธิ์คิวบิกสไปลน์.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของ SRM แบบ 8/6.....	3
1.2 การเปลี่ยนแปลงของเฟสอินดักแตนซ์ ตำแหน่งโรเตอร์ และกระแสเฟส.....	4
1.3 การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงค้ำเกี่ยว ค่ากระแสเฟส และ มุมของตำแหน่ง โรเตอร์ในSRM ชนิด 8/6.....	6
1.4 การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้ข้อมูลของเส้นแรงค้ำเกี่ยว.....	7
1.5 โพลซาร์ทของแบบจำลองสังเคราะห์ของเฟสบัลคอินดักแตนซ์.....	9
1.6 บล็อกโคอะแกรมของเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ด้วยวิธีตัวสังเกต.....	10
1.7 ผังงาน (Flow chart) ขั้นตอนการศึกษาวិทยานิพนธ์.....	13
2.1 โครงสร้าง SRM	
(ก) 1 ขั้วต่อ 1 โพล	
(ข) ขั้วแบบฟัน 2 ขั้วต่อ 1 โพล.....	15
2.2 การทำงานของ SRM	
(ก) เฟส อยู่ที่ตำแหน่งออนไลน์เมนต์	
(ข) เฟส อยู่ที่ตำแหน่งออฟไลน์เมนต์.....	16
2.3 โซลินอยด์ และ กราฟคุณลักษณะของโซลินอยด์	
(ก) โซลินอยด์	
(ข) กราฟเส้นของ แรงค้ำเกี่ยวเทียบกับ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าMMF.....	17
2.4 (ก) พื้นฐานของนิยามตำแหน่งโรเตอร์แบบ 2 ขั้วใน SRM	
(ข) ค่าอินดักแตนซ์โพร์ ไฟล์ทั้ง 4 พื้นที่.....	21
2.5 วงจรสมมูลเฟสเดียวของ SRM.....	24
โครงสร้างของ SRM แบบ 12	
3.1 โครงสร้างของ SRM แบบ 8/12.....	26
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงค้ำเกี่ยว ณ ตำแหน่งโรเตอร์ และ กระแสเฟส.....	27
3.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอินดักแตนซ์ ณ ตำแหน่งโรเตอร์ และ ค่ากระแสเฟส.....	28
3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stored field energy และ Co-energy.....	29
3.5 ค่าอินดักแตนซ์ในอุดมคติ ค่ากระแส และ โพร์ ไฟล์ของแรงบิด.....	30
3.6 โครงสร้างการจำแนกประเภทของคอนเวอร์เตอร์ชนิดต่างๆสำหรับ SRM.....	32
3.7 (ก) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 1	
(ข) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 2.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 (ค) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 3 (ง) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 4.....	33
3.8 โครงสร้างของพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-chopping.....	34
3.9 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม.....	35
3.10 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบซอฟท์สวิตชิง.....	36
3.11 อินดักแตนซ์โพสไฟล์ของ SRM 12/8 แบบ 3เฟส.....	37
3.12 มุมจุดชนวนที่เปลี่ยนแปลงตามย่านความเร็วโรเตอร์.....	38
3.13 รูปคลื่นของอินดักแตนซ์โพสไฟล์ แรงดันเฟส เส้นแรงค้ำเกี่ยว และ กระแสเฟส ขณะที่มีการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส.....	38
3.14 รูปคลื่นของค่าอินดักแตนซ์ แรงดัน และ ค่ากระแส ขณะ SRM ทำงานที่ย่านความเร็วต่ำ...	39
3.15 รูปคลื่นของค่ากระแส แรงดัน อินดักแตนซ์ในช่วงที่มอเตอร์ทำงานที่ย่านความเร็วสูง (ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีบัส).....	40
3.16 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วของ SRM.....	41
3.17 กราฟคุณลักษณะเส้นแรงค้ำเกี่ยว-ค่ากระแส-ตำแหน่ง โรเตอร์ของSRM12/8.....	42
3.18 พัลส์กระแสที่ได้จากการทดสอบ ณ ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ.....	44
3.19 แอมพลิจูดของพัลส์กระแสเฟส A B และ C.....	45
3.20 บล็อกไดอะแกรมของการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง.....	47
3.21 ฟังก์ชันคิวบิคสไปล์นของแอมพลิจูดพัลส์กระแส กับ ตำแหน่งโรเตอร์.....	50
3.22 พัลส์แรงดันที่มีความกว้างเท่ากับ 0.5msec และ แอมพลิจูดพัลส์กระแส.....	52
3.23 พัลส์แรงดันที่มีความกว้างเท่ากับ 0.75msec และ แอมพลิจูดพัลส์กระแส.....	52
3.24 พัลส์แรงดันที่มีความกว้างเท่ากับ 1.0msec และ แอมพลิจูดพัลส์กระแส.....	53
3.25 การตรวจจับกระแสในบริเวณที่เป็นเชิงเส้น.....	53
4.1 ไดอะแกรม Matlab/Simulink ของแบบจำลองการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบ.....	56
4.2 ไดอะแกรมของขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A (Phase Stator A).....	57
4.3 กระแสของเฟส A B และ C ในช่วงที่ทดสอบพัลส์แรงดันที่ $\theta_A \cong 13^\circ$	58
4.4 กระแสของเฟส A B และ C ในช่วงที่ทดสอบพัลส์แรงดันที่ $\theta_A \cong 27^\circ$	58
4.5 กระแสของเฟส A B และ C ในช่วงที่ทดสอบพัลส์แรงดันที่ $\theta_A \cong 43^\circ$	59
4.6 ข้อมูลของแอมพลิจูดพัลส์กระแสที่ $\theta_A \cong 0^\circ$ ถึง $\theta_A \cong 45^\circ$	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X๕ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ตัวอย่าง โปรแกรมฟังก์ชันคิวบิกสไปลน์.....	60
5.1 โครงสร้างของบอร์ด DSP รุ่น ADMC401.....	71
5.2 โครงสร้างของ A/D conversion.....	72
5.3 ขั้นตอนการทำงานใน Sequential sampling mode.....	73
5.4 โครงสร้างของฟังก์ชันทำงานใน ADMC401 PWM controller.....	74
5.5 โครงสร้างของเอ็น โคเดเดอร์.....	75
5.6 ความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตของเอ็น โคเดเดอร์ อินคักแคนซ์โพรไฟล์ และ สัญญาณเกท.....	76
5.7 โครงสร้างการอินเตอร์เฟสของ EIU สำหรับ ADMC401.....	77
5.8 วงจรของเซนเซอร์ตรวจจับกระแส.....	78
5.9 สัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง.....	78
5.10 สัญญาณพัลส์ที่ถูกประมวลใน DSP ขณะโรเตอร์หมุนไปทางขวา.....	79
5.11 สัญญาณพัลส์ที่ถูกประมวลใน DSP ขณะโรเตอร์หมุนไปทางซ้าย.....	79
5.12 แสดงวงจรที่ใช้ในการขับมอเตอร์.....	80
5.13 Flowchart โปรแกรม.....	80
5.14 Flowchart ของการกำหนดค่าเริ่มต้น.....	81
5.15 Flowchart ของ Starting Process	83
5.16 Flowchart ของ Interrupt Service Routine	84
5.17 พัลส์แรงดันตรวจสอบ และ ค่าแอมพลิจูดกระแสทั้ง 3 เฟสที่ $\theta_A \cong 13^\circ$	85
5.18 พัลส์แรงดันตรวจสอบ และ ค่าแอมพลิจูดกระแสทั้ง 3 เฟสที่ $\theta_A \cong 27^\circ$	85
5.19 พัลส์แรงดันตรวจสอบ และ ค่าแอมพลิจูดกระแสทั้ง 3 เฟสที่ $\theta_A \cong 43^\circ$	86
5.20 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 2.5^\circ$ เฟส C ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3	86
5.21 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 2.5^\circ$ เฟส B ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4.....	87
5.22 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 15^\circ$ เฟส A ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4.....	87
5.23 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 15^\circ$ เฟส B ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3.....	88
5.24 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 30^\circ$ เฟส C ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4.....	88
5.25 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 30^\circ$ เฟส A ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3.....	89
5.26 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 43.5^\circ$ เฟส A ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3.....	89
5.27 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 43.5^\circ$ เฟส B ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.28 เฟส C ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 15^\circ$ ในลำดับ C-B-A..... 90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 อธิบายถึงปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย

เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนของมอเตอร์แบบสวิตซ์รีลัคแตนซ์ (Switched Reluctance-Motor, SRM) และ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน SRM มีความน่าเชื่อถือสูงรวมไปถึงต้นทุนของอุปกรณ์ต่างๆ และ SRM ก็มีราคาไม่สูงมาก SRM สามารถให้ประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีทุกย่านความเร็ว และ ง่ายต่อการควบคุม ระบบขับเคลื่อน SRM จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในงานที่ต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งระบบขับเคลื่อน SRM นั้นได้ถูกนำไปใช้ในอากาศยาน (Aircraft) รถยนต์ และในอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิด

ขดลวดของ SRM นั้นต่ออนุกรมกับสวิตซ์ทางด้านบนและสวิตซ์ทางด้านล่างของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งลักษณะการต่อวงจรดังกล่าวสามารถป้องกันการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในตัวอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet Motor) และ ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor) ระบบขับเคลื่อน SRM จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งขณะที่โรเตอร์อยู่นิ่ง และ โรเตอร์กำลังหมุนอยู่นั้น ข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากในการควบคุมทั้งค่ากระแส และ มุมของสวิตซ์ออน (Turned-on angle) ซึ่งข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์สามารถตรวจจับได้โดยใช้เซนเซอร์ตรวจตำแหน่ง โดยในการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งนั้นจะต้องติดตั้งอยู่ที่เพลลาของโรเตอร์ส่งผลทำให้ในขนาด และ ราคาของระบบขับเคลื่อน SRM ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้แล้วสัญญาณตำแหน่งที่ได้จากเซนเซอร์ที่เป็นแบบอินครีเมนทัล (Incremental) จะมีลักษณะเป็นพัลส์แรงดันจึงทำให้ขณะที่โรเตอร์อยู่นิ่งจะไม่สามารถบอกได้ว่าขณะนั้น โพลของโรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งใด ส่วนปัญหาอื่นๆที่เกิดขึ้นขณะเริ่มหมุนของโรเตอร์ก็คือ การแกว่งของทิศทางการหมุนของโรเตอร์อันเนื่องมาจากไม่ทราบตำแหน่งโรเตอร์ที่ถูกต้อง และ การเลือกจ่ายพลังงานให้กับเฟสที่ไม่เหมาะสมต่อทิศทางการเริ่มหมุน

1.2 เพราะเหตุใดปัญหานี้จึงน่าสนใจ

เนื่องจากระบบขับเคลื่อน SRM เริ่มได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั้งในวงการอุตสาหกรรม และในงานวิจัยเนื่องจาก โครงสร้างไม่ซับซ้อนทั้งตัว SRM และ คอนเวอร์เตอร์ นอกจากนี้สมรรถนะในการทำงานของตัว SRM เองที่สามารถทำงานได้ทุกย่านความเร็ว โดยเฉพาะที่ย่านความเร็วสูงจึงเป็นจุดที่น่าสนใจในงานระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าที่ต้องการปรับเปลี่ยนความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

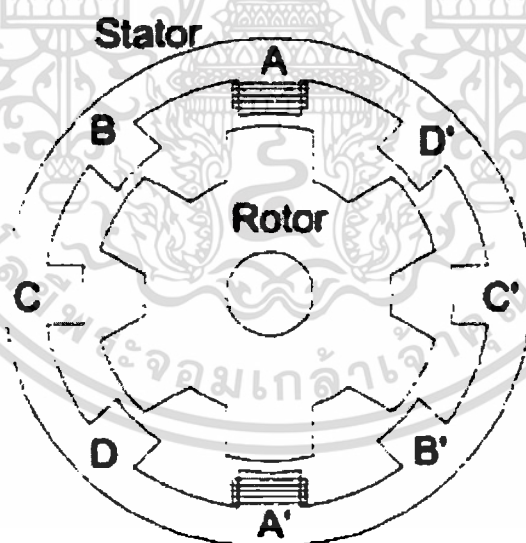
อย่างไรก็ตามระบบขับเคลื่อน SRM ก็ยังจำเป็นต้องการข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็ว และ ทิศทาง ซึ่งข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ก็สามารถตรวจจับได้โดยเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง (Position sensor) เพื่อต้องการสร้างแรงบิดในSRM และ ทิศทางที่ถูกต้องนั้นจะต้องมีการจ่ายพลังให้กับขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสที่เหมาะสมกับตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งหลักการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการทำงานพื้นฐานของ SRM ต้องใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งที่มีความแม่นยำ โดยทั่วไปเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแบบทางกล(Mechanical Sensor) เช่นออปติคัลเซนเซอร์ (Optical Sensor) และ Hall Effect Sensor ก็จะถูกใช้เพื่อหาข้อมูลทางตำแหน่งโรเตอร์ให้กับระบบขับเคลื่อน SRM อย่างไรก็ตามเซนเซอร์เหล่านี้ก็ได้สร้างปัญหาต่างๆเมื่อนำระบบขับเคลื่อนของ SRM ไปใช้งานจริง เช่น :

1. ปัญหาที่เกิดจากเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแบบทางกล คือ ทำให้ระบบโดยรวมมีเสถียรภาพลดลง ตัวอย่างเช่น ถ้า SRM ถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณที่สภาพแวดล้อมมีฝุ่นละอองมาก ออปติคัลเซนเซอร์ (Optical Sensor) ก็อาจจะทำงานผิดพลาดได้ และข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากออปติคัลเซนเซอร์(Optical Sensor) อาจจะผิดพลาดไปด้วย ถ้า Hall Effect Sensor ถูกใช้ในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ความร้อนจากตัวหรือจากบริเวณรอบข้างก็อาจทำให้เซนเซอร์เกิดความเสียหายได้ด้วยเช่นกัน โดยปกติ SRM จะถูกติดตั้งอยู่ไกลจากตัวควบคุมจึงจำเป็นที่จะต้องใส่สายเคเบิลในการเชื่อมต่อระหว่างตัวเซนเซอร์กับตัวควบคุม SRM ที่มีความยาวสูง และเมื่อบริเวณที่สายเคเบิลนั้นลากผ่านมีการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กมากอาจทำให้สัญญาณของข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ที่จากเซนเซอร์จะผิดพลาดซึ่งเกิดจากการลากเคเบิลที่มีระยะทางไกล
2. ปัญหาของตัวเซนเซอร์แบบทางกลก็คือมีราคาที่สูง ซึ่งในงานบางอย่างราคาของตัวเซนเซอร์มีผลอย่างมากต่อค่าติดตั้งระบบขับเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวSRM เอง หรือ คอนเวอร์เตอร์เป็นผลทำให้ราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือ ผลิตภัณฑ์บางชนิดก็มีราคาแพงไปด้วย
3. ปัญหาที่เกิดจากตัวเซนเซอร์แบบทางกล คือ จำเป็นต้องมีพื้นที่ในการติดตั้งตัวเซนเซอร์ ซึ่งในงานบางประเภท เช่น ในเครื่องบิน หรือ อากาศยาน บริเวณที่ใช้ในการติดตั้งระบบขับเคลื่อน SRM นั้นมีค่อนข้างจำกัด ซึ่งการติดตั้งตัวเซนเซอร์คร่อมอยู่ที่เพลาของ SRM ก็จะเป็นการเพิ่มขนาดให้กับระบบขับเคลื่อน SRM และ ทำให้การใช้งานของระบบขับเคลื่อน SRM จะมีข้อจำกัดมาก
4. ปัญหาที่เกิดจากการเริ่มหมุนด้วยทิศทางที่ไม่แน่นอนเนื่องจากข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากเซนเซอร์มีความผิดพลาด
5. เพื่อหลีกเลี่ยงขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้นให้กับระบบขับเคลื่อน SRM ทุกครั้งก่อนเริ่มหมุน หรือที่เรียกว่า Rotor Position Initialization (หรือ alignment)
6. ปัญหาที่เกิดจากโรเตอร์ถูกเตะให้หมุนกลับทิศทางทันทีขณะเริ่มหมุน (Rotor kick back) และ ปัญหาการสั่นของโรเตอร์ขณะเริ่มหมุน (Oscillation)

ด้วยเหตุนี้ถ้าเราสามารถคิดค้นหรือพัฒนาเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง และเทคนิคการเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุนได้ เราก็จะสามารถกำจัดปัญหาที่เกิดจากข้อมูลของ ตำแหน่งโรเตอร์ที่ผิดพลาดขณะเริ่มหมุน และการจ่ายพลังงานให้กับเฟสที่ไม่เหมาะสมขณะเริ่มหมุน ซึ่งเป็นผลทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนผิดทิศทาง นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพูดถึงการ แก้ปัญหาของSRM ขณะเริ่มหมุนน้อยมากและ วิธีการที่ได้นำเสนอมานั้นก็ยังมีขั้นตอนที่ซับซ้อน และการคำนวณที่ยุ่งยาก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจในการคิดค้นเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ และ เทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนในการแก้ปัญหาดังกล่าว เพื่อลด ขั้นตอนที่ซับซ้อน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง

1.3 งานวิจัยระบบขับเคลื่อน SRM โดยปราศจากเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง และ เทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งที่ได้เคยมีการคิดค้นขึ้น

ระบบขับเคลื่อน SRM โดยปราศจากเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง และ เทคนิคการประมาณค่า ตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งที่เคยมีการคิดค้นขึ้นตลอดช่วงเวลา 20 ปีที่ผ่านมา โดยมากแล้วจะอาศัย หลักการใช้คุณสมบัติแม่เหล็กของ SRM ที่เป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งโครงสร้างของ SRM แบบ 8/6 แสดงอยู่ในรูปที่ 1

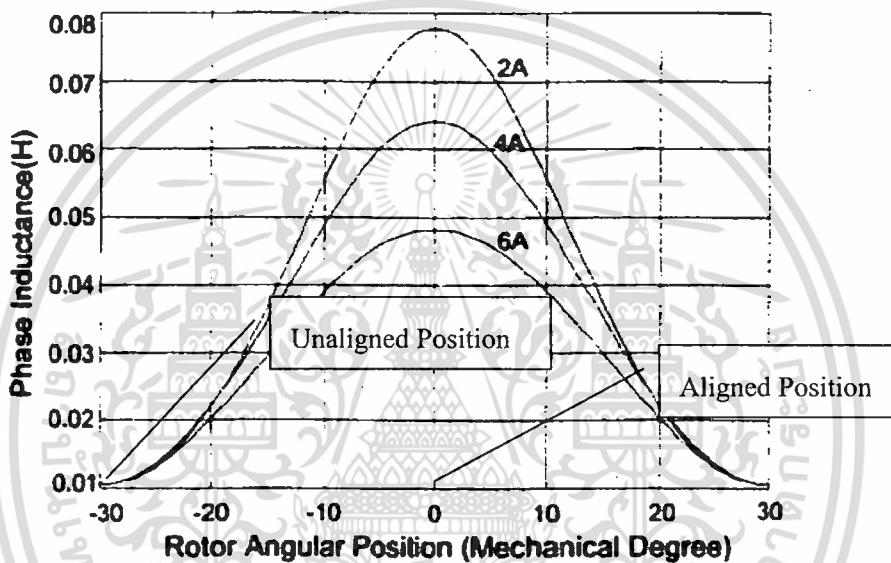


รูปที่ 1.1 โครงสร้างของ SRM แบบ 8/6

เนื่องจาก โครงสร้างที่เป็นแบบขั้วยื่นทั้งสองฝั่งของ SRM ทำให้เฟสอินดักแตนซ์ เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งโรเตอร์ ตัวอย่างเช่น ขณะจ่ายกระแสเฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ ค่าเฟส อินดักแตนซ์จะมีค่าต่ำสุด เมื่อ โรเตอร์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งอะไลนด์(Unaligned Position)เนื่องจากเส้นทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดินของแม่เหล็กมีค่าความต้านทานแม่เหล็ก(Reluctance)สูงสุดที่จุดนี้เป็นเนื่องจากช่องว่างอากาศระหว่างขั้วโรเตอร์กับ ขั้วสเตเตอร์มีระยะมากที่สุด ณ ตำแหน่งอะไลน์(Aligned Position)เส้นทางเดินแม่เหล็กมีค่าความต้านทานแม่เหล็กต่ำสุดเนื่องจากช่องว่างอากาศระหว่างขั้วสเตเตอร์กับขั้วโรเตอร์มีระยะน้อยสุด ดังนั้นค่าเฟสอินดักแตนซ์จึงมีค่ามากที่สุด ณ ตำแหน่งนี้ เมื่อโรเตอร์เคลื่อนตัวจากตำแหน่งที่ไม่อะไลน์ไปถึงตำแหน่งอะไลน์เฟสอินดักแตนซ์จะเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำสุดไปจนมีค่าสูงสุดเนื่องจากช่องว่างอากาศ และ ค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าลดลง ตัวอย่างเช่น ของค่าเฟสอินดักแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่ากระแส และ ตำแหน่งโรเตอร์ของ SRM แบบ 8/6 ที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของเฟสอินดักแตนซ์ ตำแหน่งโรเตอร์ และกระแสเฟส

เมื่อ $\theta = -30^\circ$ และ $\theta = 0^\circ$ แสดงตำแหน่งที่ไม่อะไลน์ และ ตำแหน่งอะไลน์ของขั้วโรเตอร์ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าเมื่อค่าของเฟสอินดักแตนซ์สามารถวัดได้ และ ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฟสอินดักแตนซ์กับตำแหน่งโรเตอร์จึงทำให้ตำแหน่งโรเตอร์สามารถประมาณหาค่าได้

ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแม่เหล็กขณะโรเตอร์เคลื่อนตัว คือ เฟสเส้นแรงคัลล์องเกี่ยว เฟสอินดักแตนซ์ และ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟสซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้ เฟสเส้นแรงคัลล์องเกี่ยว เฟสอินดักแตนซ์ และ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟสจึงสามารถถูกใช้ในการประมาณหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้เมื่อค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถวัดค่าได้ และ ทราบความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ดังกล่าวเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์โดยปกติค่าเฟสเส้นแรงคัลล์องเกี่ยว ปริมาณเฟสอินดักแตนซ์ และ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมสามารถประมาณได้จากสมการแรงดันเฟสของ SRM ซึ่งแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_j = Ri_j + \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^m \psi_{kj} \quad (1.1)$$

เมื่อ m คือ จำนวนเฟสทั้งหมด V_j คือ แรงดันที่จ่ายให้กับเฟส j i_j คือ ค่ากระแสที่เฟส j R คือ ค่าความต้านทานในขดลวดต่อเฟส ψ_{kj} คือ เส้นแรงค้ำเกี่ยวเฟส j ซึ่งเกิดจากค่ากระแสของเฟส k และ t คือ เวลา เฟสเส้นแรงค้ำเกี่ยว ψ_{kj} หาได้จาก

$$\psi_{kj} = L_{kj}(i_k, \theta) i_k \quad (1.2)$$

เมื่อ L_{kj} คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส k และ เฟส j

แทนสมการที่ (1.2) ลงไปที่ (1.1) ทำให้ได้

$$\begin{aligned} V_j &= Ri_j + \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^m \psi_{kj} \\ &= Ri_j + \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{\partial \psi_{kj}}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \psi_{kj}}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \right\} \\ &= Ri_j + \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{\partial (L_{kj} i_k)}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial (L_{kj} i_k)}{\partial \theta} \omega \right\} \\ &= Ri_j + \sum_{k=1}^m \left\{ (L_{kj} + i_k \frac{\partial L_{kj}}{\partial i_k}) \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{\partial L_{kj}}{\partial \theta} \omega \right\} \end{aligned} \quad (1.3)$$

ในสมการที่ (1.3) เฟสอินคริเมนทัลอินดักแตนซ์ คือ

$$L_{ij} = \frac{\partial \psi_{ij}}{\partial i_j} = L_{ij} + i_j \frac{\partial L_{ij}}{\partial i_j} \quad (1.4)$$

ในสมการที่(1.3) เทอมของเฟสเส้นแรงค้ำเกี่ยว ψ_{kj} , เทอมของเฟสอินดักแตนซ์ L_{ij} , เทอมของเฟสอินคริเมนทัลอินดักแตนซ์ L_{ij} และ เทอมของเฟสค่าความเหนี่ยวนำร่วม L_{kj} เทอมเหล่านี้มีข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ประกอบอยู่ด้วย ถ้าเทอมที่ได้กล่าวมานี้สามารถหาได้จากสมการแรงดันเฟส ดังนั้นก็จะทำให้ทราบค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้ด้วยเช่นกัน ค่าที่หาได้จากสมการแรงดันเฟสและถูกใช้เพื่อประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ ซึ่งทำให้เทคนิคการควบคุมแบบปราศจากเซนเซอร์สามารถจำแนกได้ดังนี้

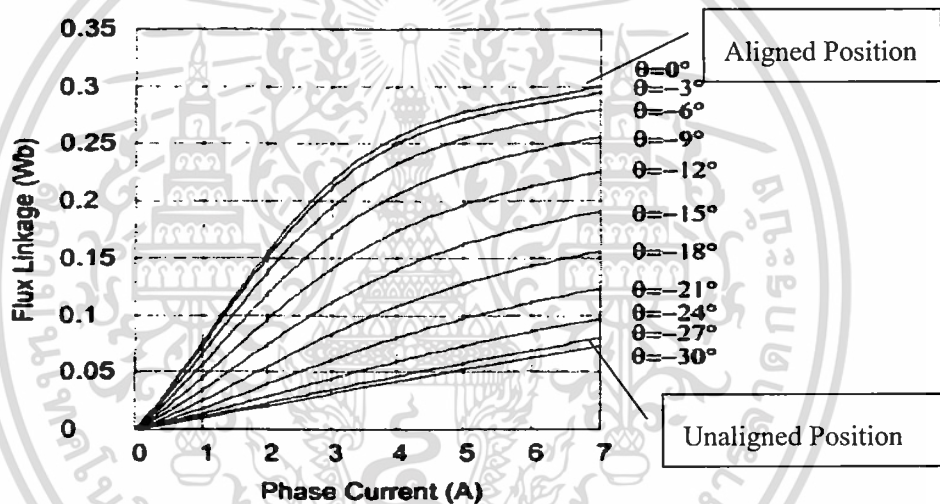
1. เทคนิคการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้เฟสเส้นแรงค้ำเกี่ยว(Phase flux-linkage based method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เทคนิคการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้บัลคอินดักแตนซ์(Bulk inductance based method)
 3. เทคนิคที่ใช้ตัวสังเกต(Observer method)
- เทคนิคที่เหล่านี้จะได้อธิบายตามลำดับ

1.3.1 เทคนิคการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้เฟสฟลักซ์เชื่อมโยง(Phase flux-linkage based method)

เทคนิคนี้เป็นการใช้ข้อมูลของค่าแรงดันไฟฟ้า และ ค่ากระแสของขดลวดสเตเตอร์ขณะที่ถูกจ่ายพลังงานมาทำการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ ซึ่งหลักการเบื้องต้นของเทคนิคดังกล่าวนี้เป็นการใช้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงค้ำเกี่ยว ค่ากระแส และ ตำแหน่งโรเตอร์ในการหาตำแหน่งโรเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงค้ำเกี่ยว ค่ากระแสเฟส และ มุมของตำแหน่งโรเตอร์ใน SRM ชนิด 8/6 อธิบายได้ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงค้ำเกี่ยว ค่ากระแสเฟส และ มุมของตำแหน่งโรเตอร์ใน SRM ชนิด 8/6

จากรูป $\theta = -30^\circ$ และ $\theta = 0^\circ$ คือ มุม ณ ตำแหน่งอไลน์เมนต์ และ ตำแหน่งที่โมลไลน์เมนต์ของ SRM ชนิดนี้ตามลำดับ จากรูปที่ 1.3 สังเกตได้ว่าถ้าทราบค่าของเส้นแรงค้ำเกี่ยว และ ค่ากระแสเฟส ก็จะทำให้สามารถหาค่าของตำแหน่งโรเตอร์ได้โดยตรง เพื่อต้องการประมาณค่าเส้นแรงค้ำเกี่ยว ก็สามารถหาได้จากสมการแรงดันเฟสที่(1.1) จึงถูกจัดให้อยู่ในรูปของสมการที่ (1.5)

$$\frac{d}{dt} \sum_{k=1}^m \psi_{kj} = V_j - R_i j \quad (1.5)$$

ถ้าไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟสสมการที่ (1.5) สามารถจัดรูปใหม่ดังนี้

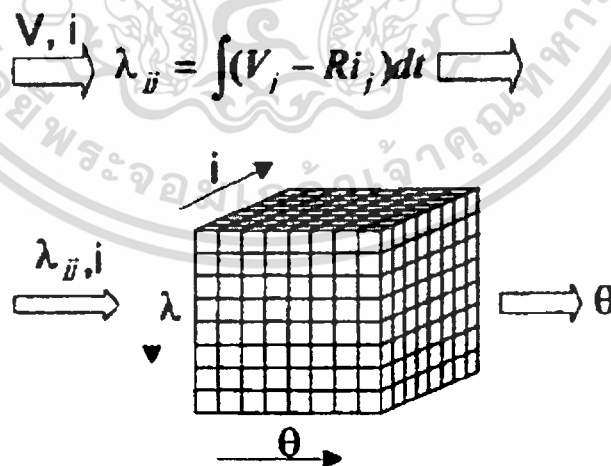
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dt}\psi_{ij} = V_j - Ri_j \quad (1.6)$$

เมื่อ ψ_{ij} คือ เส้นแรงค้ำเกี่ยวของเฟส j ทำการอินทิเกรตทั้ง 2 ข้างของสมการที่ (1.6) ทำให้ได้สมการที่ (1.7)

$$\psi_{ij} = \int (V_j - Ri_j) dt \quad (1.7)$$

ในสมการที่ (1.7) ถ้าทราบค่าแรงดัน DC บัส ก็จะสามารถหาค่าแรงดันเฟส V_j ได้จากขดลวดสเตเตอร์ที่ได้รับพลังงาน เมื่อเฟสที่ได้รับพลังงาน V_j เท่ากับแรงดัน DC บัสค่าบวก $+V_BUS$ และ เฟสที่ไม่ได้รับพลังงาน V_j เท่ากับแรงดัน DC บัสค่าลบ $-V_BUS$ โดยที่การควบคุมกระแสเฟสเป็นแบบ Hard chopping หรือ แรงดัน V_j มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อการควบคุมกระแสเป็น Soft chopping นอกจากนี้ค่ากระแสของเฟส i_j สามารถวัดได้โดยใช้เซนเซอร์ตัวจับกระแส หลังจากหาค่าแรงดัน และ ค่ากระแสเฟสหาได้จากการวัดก็ทำให้เส้นแรงค้ำเกี่ยวสามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (1.7) เส้นแรงค้ำเกี่ยวที่ได้จากการประมาณ และ ค่ากระแสที่ได้จากการวัดจะถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ในตารางที่เก็บความสัมพันธ์ของค่าเส้นแรงค้ำเกี่ยว ค่ากระแส และ ตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งตารางดังกล่าวสามารถหาได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม Finite Element Analysis ซึ่งอัลกอริทึมที่ใช้ประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์นี้อธิบายได้ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้ข้อมูลของเส้นแรงค้ำเกี่ยว

จุดด้อยของเทคนิคนี้คือ ต้องทำการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับค่าเส้นแรงค้ำเกี่ยว ค่ากระแส และตำแหน่งโรเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในตาราง Look-up table

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง นอกจากนี้การคำนวณที่มีความซับซ้อนก็ยังคงมีความจำเป็นต่อเทคนิคนี้

1.3.2 เทคนิคการประมาณตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้บัลคอินดักแตนซ์

(Bulk inductance based method)

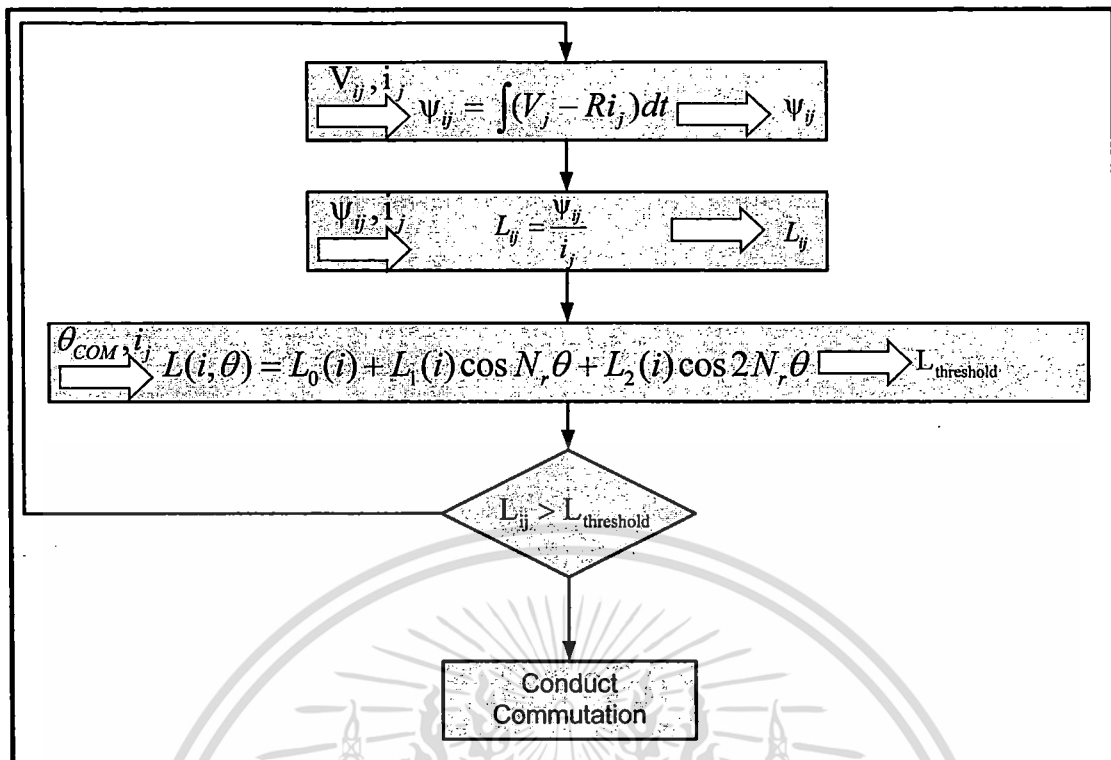
เนื่องจากบัลคอินดักแตนซ์ของ SRM เป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งโรเตอร์ และ ค่ากระแส ดังนั้นการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้ค่าบัลคอินดักแตนซ์ก็สามารถทำได้เช่นกัน ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของบัลคอินดักแตนซ์เมื่อเทียบกับค่ากระแสเฟส และ ตำแหน่ง โรเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 1.2 ในรูปที่ 1.3 $\theta = -30^\circ$ และ $\theta = 30^\circ$ คือ มุม ณ ตำแหน่งโวลต์เมนท์ และ ตำแหน่งที่ไม่โวลต์เมนท์ของ SRM ชนิดนี้ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 1.3 จะพบว่าเมื่อทราบค่ากระแสเฟส หรือ ค่าบัลคอินดักแตนซ์ก็จะสามารถตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ได้ ในการประมาณค่าบัลคอินดักแตนซ์จะต้องทำการประมาณค่าเส้นแรงลึงก์ก่อนโดยใช้สมการที่ (1.7) จากนั้นสมการที่ใช้หาค่าเฟสบัลคอินดักแตนซ์ คือ

$$L_{ij} = \frac{\psi_{ij}}{i_j} \quad (1.8)$$

บัลคอินดักแตนซ์จากการประมาณ และ ค่ากระแสเฟสที่ได้จากการวัดจะถูกใช้เป็นอินพุตของ Look-up table ที่ใช้เก็บความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าบัลคอินดักแตนซ์ ค่ากระแสเฟส และ ตำแหน่งโรเตอร์เพื่อใช้หาค่าตำแหน่งโรเตอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ลักษณะการใช้งาน Look-up table เราสามารถใช้แบบจำลองที่ได้จากการสังเคราะห์เพื่อใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าบัลคอินดักแตนซ์ ค่ากระแสเฟส และ ตำแหน่งโรเตอร์

ตำแหน่งโรเตอร์สำหรับคอมพิวเตอร์ และ ค่ากระแสที่วัดได้จะถูกใช้ในการคำนวณค่าเริ่มต้นของบัลคอินดักแตนซ์ เมื่อบัลคอินดักแตนซ์สามารถถูกประมาณค่าได้จากสมการที่ (1.8)

โพลซาร์ทของอัลกอริทึมเทคนิคนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1.5



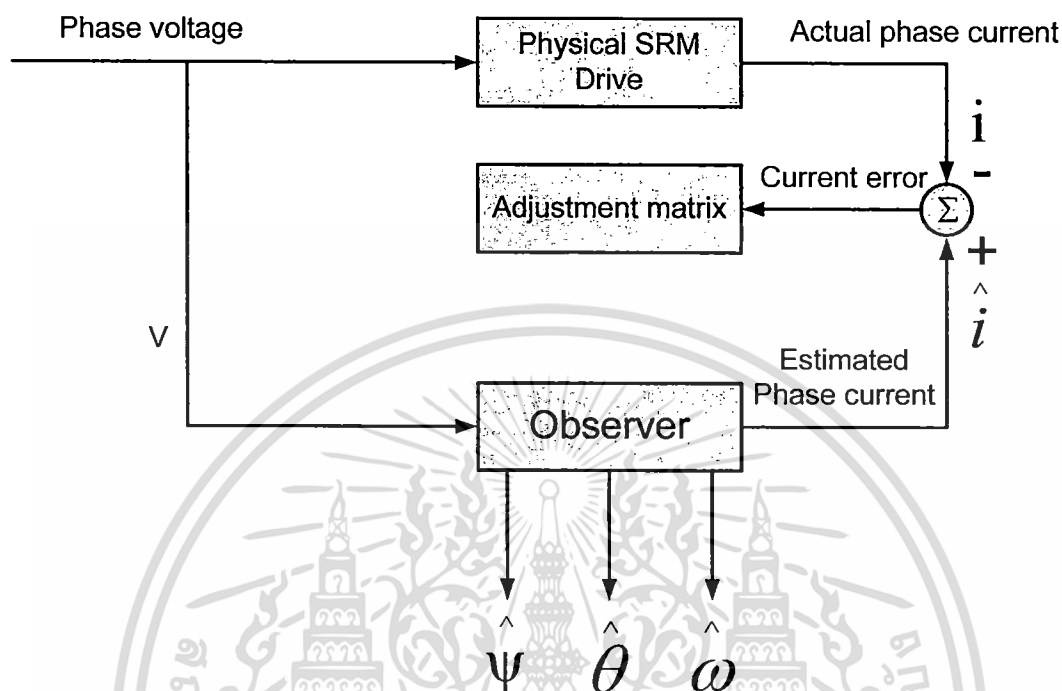
รูปที่ 1.5 โพลซาร์ทของแบบจำลองสังเคราะห์ของเฟสบลคอินดักแตนซ์

การประมาณตำแหน่งโรเตอร์ด้วยเทคนิคนี้สามารถทำงานในช่วงที่โรเตอร์หยุดอยู่หนึ่ง หรือ ที่ย่านความเร็วต่ำได้ เช่น การควบคุมแบบลูปเปิดที่ได้ถูกใช้ในการเริ่มหมุน โรเตอร์ และ ทำให้ โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่คงที่ได้ด้วยเช่นกัน ข้อด้อยของเทคนิคนี้คือสมการที่นำมาใช้ในการ คำนวณค่อนข้างซับซ้อน

1.3.3 เทคนิคที่ใช้ตัวสังเกต (Observer Method)

วิธีนี้เป็นการใช้สมการสถานะเพื่อใช้พิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบขับเคลื่อน SRM ซึ่งตัวสังเกตนี้ก็ได้ถูกพัฒนาจากสมการสถานะเช่นกันเพื่อใช้ในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ ค่าอินพุต และ เอาท์พุตของตัวสังเกตนี้ คือ ค่ากระแส และ แรงดันเฟสตามลำดับ โดยที่ ตัวแปร สถานะของตัวสังเกตนี้ คือ เส้นแรงค้ำเกี่ยวที่สเตเตอร์ ความเร็วโรเตอร์ และ ตำแหน่ง- โรเตอร์ ดังนั้น ค่ากระแส ความเร็วโรเตอร์ เส้นแรงค้ำเกี่ยวที่สเตเตอร์ และ ตำแหน่งโรเตอร์ ก็สามารถ ประมาณค่าได้โดยใช้ตัวสังเกตนี้ เมื่อค่ากระแสที่ได้จากการประมาณจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ ค่ากระแสจริงของ SRM ทำให้เกิดผลต่าง หรือ ค่าความผิดพลาด ซึ่งผลต่างนี้ก็จะถูกนำมาใช้ในการ ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกต เมื่อค่ากระแสที่ได้จากการประมาณมีค่าเท่ากับค่ากระแส จริง ดังนั้นตัวสังเกตนี้สามารถถูกใช้พิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของ SRM ได้ และ ค่าความเร็วโร

เตอร์ที่ได้จากการประมาณก็สามารถเทียบได้กับค่าความเร็วจริงของ SRM ได้ด้วยเช่นกัน บล็อกไดอะแกรมของเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ด้วยวิธีการใช้ตัวสังเกตนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 บล็อกไดอะแกรมของเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ด้วยวิธีตัวสังเกต

ข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิคตัวสังเกตนี้จะมีความแม่นยำสูงและยังสามารถประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้ทุกย่านความเร็ว แต่จุดด้อยของเทคนิคนี้คือ การคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อน และเทคนิคนี้ยังต้องการระบบควบคุมแบบ DSP ที่มีความเร็วสูงในการประมวลผล

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจาก ณ ตำแหน่งโรเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆค่ากระแสที่ขดลวดสเตเตอร์จะมีขนาดที่แตกต่างกัน และความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแส เส้นแรงค้ำเกี่ยว และ ตำแหน่งโรเตอร์ยังเป็นฟังก์ชันของกันและกัน ด้วยเหตุนี้เมื่อเราทราบค่ากระแสค่าใดค่าหนึ่งก็จะสามารถทราบตำแหน่งโรเตอร์ ณ ค่ากระแสนั้นด้วย ในงานวิจัยจึงได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ คือ ให้ทำการบันทึกค่าแอมพลิจูด กระแสของ SRM ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโรเตอร์ โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 2.5° โดยค่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแสหาได้จากการส่งพัลส์แรงดันที่มีช่วงแคบเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์พร้อมกัน

ทุกเฟสเพื่อป้องกันไม่ให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนตัวขณะตรวจสอบค่ากระแส เมื่อทำการบันทึกผลของแอมพลิจูดกระแสได้ครบทุกตำแหน่งแล้ว จึงนำเทคนิคคิวบิคสไปล์นำมาใช้ในการประมาณค่าระหว่างของค่ากระแส 2 จุดเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอเทคนิคการเลือกเฟสในการจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน โดยทำการพิจารณาความแตกต่างของระดับแอมพลิจูดกระแสเพื่อสังเกตแนวโน้มของค่าอินดักแตนซ์โพรไฟล์ว่ามีค่าความชันเป็นบวก หรือ ลบ ณ ค่ากระแสขณะนั้น จากหลักการดังกล่าวเมื่อพิจารณาค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสจากตำแหน่งอโวลต์เมนต์ที่มุม 0° จนถึงตำแหน่งอโวลต์เมนต์ที่มุม 45° ก็สามารถเลือกเฟสที่เหมาะสมสำหรับจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนเพื่อให้โรเตอร์เริ่มหมุนไปในตามทิศทางที่ต้องการ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในขั้นตอนการศึกษานี้จะเริ่มจากการศึกษารวบรวมทฤษฎีและหลักการที่มีการใช้งานกันอยู่ทั่วไปและยังได้ศึกษาจากข้อมูลในบทความต่างประเทศที่ได้มีการทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นจะทำการสร้างเครื่องต้นแบบและปรับปรุงพร้อมทั้งทดสอบและเก็บข้อมูล โดยจะจำลองและเรียนแบบพฤติกรรมด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เป็นอย่างแรก หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การทำงานของระบบที่ถูกสร้างขึ้นโดยอัลกอริธึม และ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากนั้นทำการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง จากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องกับเทคนิคหรือแนวความคิดที่ได้พัฒนาขึ้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษางานวิจัย

1. สามารถทำให้ SRM เริ่มหมุนไปในทิศทางที่ต้องการ
2. มีความรู้ความเข้าใจถึงหลักการการทำงานของ SRM
3. เข้าใจถึงปัญหาและ สามารถแก้ไขปัญหของ SRM ขณะเริ่มหมุน
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานขณะที่ SRM กำลังหมุนได้

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง และเทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุนสำหรับระบบขับเคลื่อน SRM เพื่อให้ทำให้ทำให้ระบบขับเคลื่อน SRM สามารถเริ่มหมุนได้ในทิศทางที่ต้องการ โดยที่เทคนิคที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น ไม่มี ความซับซ้อนในการคำนวณ และไม่จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลจำนวนมาก โดยรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ได้แบ่งออกเป็น 6 บทดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ทฤษฎี หรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการดำเนินงานเบื้องต้นของ SRM ประวัติความเป็นมาของ SRM รวมไปถึงถึงกราฟคุณลักษณะต่างๆของ SRM

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการทํางานระบบขับเคลื่อน SRM และเทคนิคการเริ่มหมุนของ SRM ลักษณะคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน SRM ชนิดต่างๆ และ เทคนิคการควบคุมค่ากระแส สำหรับระบบขับเคลื่อน SRM

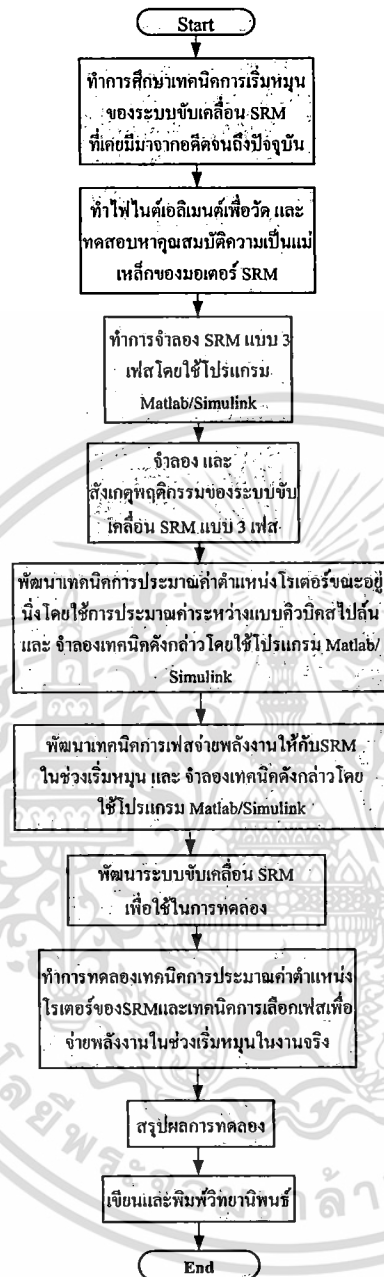
บทที่ 4 กล่าวถึงการจำลองเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง และการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Matlab/Simulink) และผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

บทที่ 5 แสดงถึงผลการทดลองของเทคนิคการเริ่มหมุนของ SRM และ ระบบควบคุมที่นำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย และ ข้อเสนอแนะ



1.8 ขั้นตอนการศึกษา



รูปที่ 1.7 ผังงาน (Flow chart) ขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการงานเบื้องต้นของSRM

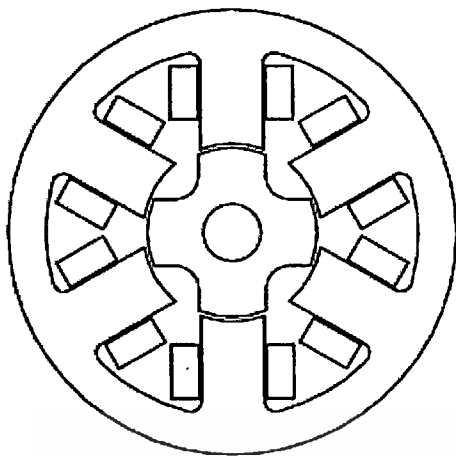
2.1 บทนำ

ระบบขับเคลื่อน SRM เริ่มนำมาใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมได้เมื่อไม่นาน ซึ่งในบทที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึงหลักการงานเบื้องต้นของ SRM อย่างโดยสรุป เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจทฤษฎีของการสร้างแรงบิดของ SRM เนื่องจากลักษณะการทำงานต่างๆของ SRM และ พฤติกรรมที่โดดเด่นของ SRM สามารถสังเกตได้จากค่าแรงบิดที่ถูกสร้างขึ้น โดยที่ค่าแรงบิดเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงค้ำเกี่ยว หรือ ค่าอินดักแตนซ์ของ SRM กับ ตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อสรุปทฤษฎีการสร้างแรงบิดใน SRM และ ทฤษฎีพื้นฐานของ SRM อย่างกระชับจึงจะพิจารณา SRM ในกรณีที่เส้นแรงค้ำเกี่ยวไม่เกิดการอิ่มตัวเท่านั้น

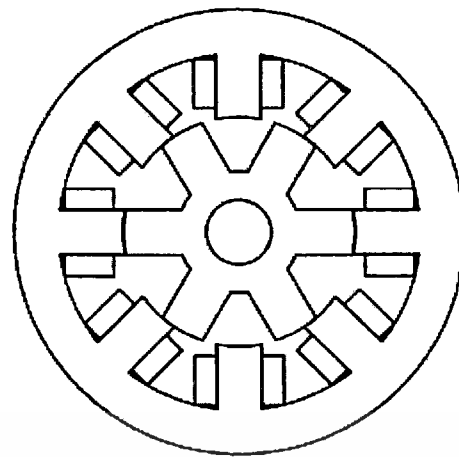
การทำงานของ SRM ทั้ง 4 ควอดแรนต์ของค่าแรงบิดต่อความเร็วซึ่งพิจารณาได้จากคุณสมบัติของค่าอินดักแตนซ์เทียบกับตำแหน่ง โรเตอร์ของ SRM ได้ถูกจัดให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลทางพลวัตของ SRM ซึ่งประโยชน์ของวงจรสมมูลดังกล่าวอาจมีข้อจำกัดบ้างในการออกแบบ SRM แต่ก็มีประโยชน์อย่างมากต่อการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบขับเคลื่อน SRM ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.1.1 ประวัติความเป็นมา

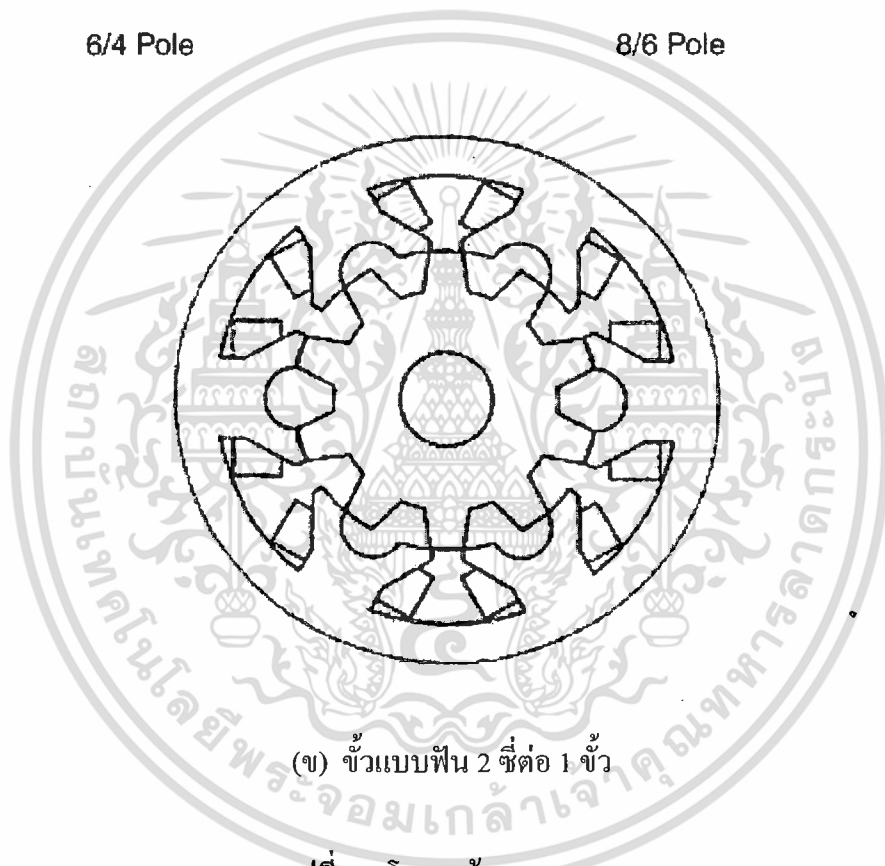
ในปี ค.ศ 1696 มอเตอร์แบบเปลี่ยนค่าความต้านทานแม่เหล็ก(Variable Reluctance Motor VR Motor) ได้ถูกนำเสนอในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการควบคุมความเร็วเครื่องจักร แต่ ณ ปัจจุบันนี้มอเตอร์ดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานได้ เนื่องจากอุปสรรคสวิทช์ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำได้ง่าย และมีราคาถูก ในความเป็นจริงแล้วมอเตอร์ชนิดนี้อยู่ในตระกูลของซิงโครนัสมอเตอร์ แต่ VR มอเตอร์ก็ยังมีลักษณะที่แตกต่างอยู่บ้าง คือ มีขดลวดพันอยู่ที่ส่วนของขั้วของสเตเตอร์ และไม่มีขดลวด และแม่เหล็กถาวรอยู่ที่ส่วนของขั้วของโรเตอร์ เนื่องจากทั้งสเตเตอร์ และ โรเตอร์มีลักษณะเป็นแบบขั้วยื่นด้วยเหตุนี้จึงถูกจัดให้อยู่ในจำพวกมอเตอร์แบบขั้วยื่นซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ได้แสดงรูปโครงสร้างของมอเตอร์ไว้ในรูปแบบที่ 2.1 (ก) และ โครงสร้างที่ได้ถูกพัฒนาให้มีลักษณะเป็นฟัน 2 ซี่ต่อ 1 ขั้วถูกแสดงในรูปแบบที่ 2.1 (ข)



6/4 Pole



8/6 Pole



(ข) ขั้วแบบฟัน 2 ซี่ต่อ 1 ขั้ว

รูปที่ 2.1 โครงสร้าง SRM

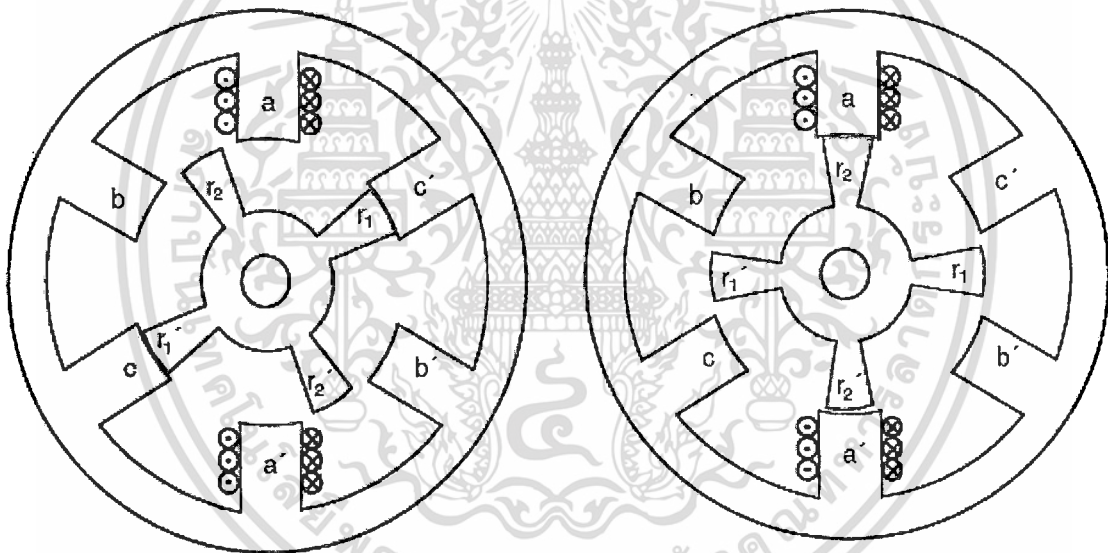
ขั้วของโรเตอร์จะเคลื่อนตัวมาอยู่ในตำแหน่งอไลน์เมนต์กับขั้วของสเตเตอร์ก็ต่อเมื่อที่ขั้วของสเตเตอร์นั้นได้ถูกจ่ายพลังงานให้ ในวงจรแม่เหล็กส่วนเคลื่อนที่จะเคลื่อนตัวเข้าหาบริเวณที่มีค่าอินดักแตนซ์ต่ำสุด ซึ่งเป็นสาเหตุจากการป้อนพลังงานให้กับขดลวดสเตเตอร์ ในขณะที่ขั้วของโรเตอร์ทั้ง 2 อยู่ในตำแหน่งอไลน์เมนต์กับขั้วของสเตเตอร์โดยที่เซตของขั้วของโรเตอร์และขั้วของสเตเตอร์ที่เหลือจะไม่อยู่ในตำแหน่งอไลน์เมนต์ หลังจากเซตของขั้วของสเตเตอร์นี้ได้รับพลังงานก็จะทำให้ขั้วของโรเตอร์เคลื่อนตัวเข้ามาอยู่ในตำแหน่งอไลน์เมนต์ ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตช์ค่ากระแสเข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับก็จะส่งผลทำให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์นั้นก็ทำให้เกิดแรงบิด และ กำลังเอาต์พุตขึ้น รวมถึงการสวิตช์ค่ากระแสเข้าสู่ขดลวดสเตเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแม่เหล็ก ดังนั้นการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนความเร็วแบบนี้จึงเรียกว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเปลี่ยนค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Switched-Reluctance Motor Drive) นั่นเอง

2.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของSRM

พิจารณาขั้วของโรเตอร์ r_1 และ r_1' และ ขั้วของสเตเตอร์ c และ c' อยู่ที่ตำแหน่งอไลน์เมนต์ เมื่อจ่ายค่ากระแสเข้าไปที่ขดลวดเฟส a ตามทิศทางที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 (ก) ค่าเส้นแรงแม่เหล็กก็就会被สร้างผ่านขั้วของสเตเตอร์ a และ a' และ ขั้วของโรเตอร์ r_2 และ r_2' ซึ่งแรงดึงจะดูดเอาตำแหน่งของ r_2 และ r_2' เข้าหาขั้วของสเตเตอร์ a และ a' ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 (ก)

รูปที่ 2.2 (ข)

รูปที่ 2.2 การทำงานของ SRM

(ก) เฟส c อยู่ที่ตำแหน่งอไลน์เมนต์

(ข) เฟส a อยู่ที่ตำแหน่งอไลน์เมนต์

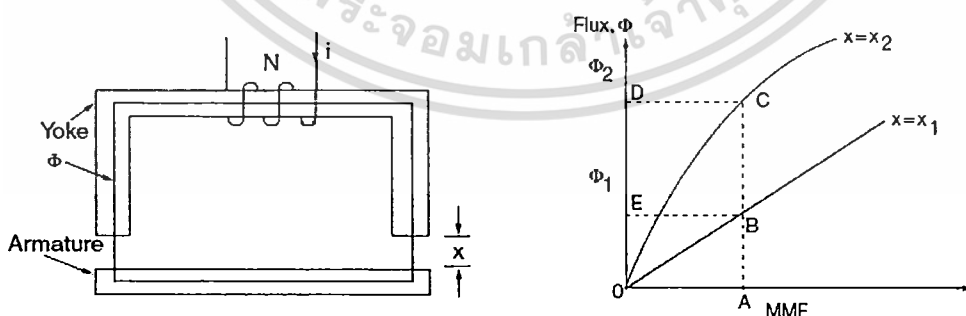
เมื่อขั้วของสเตเตอร์ a และ a' กับขั้วของโรเตอร์ r_2 และ r_2' อยู่ที่ตำแหน่งอไลน์เมนต์แล้วค่ากระแสเฟส a ถูกเทิร์นออฟ ซึ่งตรงกับรูปที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2 (ข) ตอนนี้อยู่ขดลวดสเตเตอร์ b จะได้รับกระแสเข้ามาส่งผลทำให้โรเตอร์ r_1 และ r_1' ก็จะเคลื่อนตัวเข้าหาขั้วของสเตเตอร์ b เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ b' ตามลำดับในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ในทำนองเดียวกันการจ่ายพลังงานในกับเฟส c ส่งผลทำให้ขั้วของโรเตอร์ r_2 และ r_2' เคลื่อนตัวไปอยู่ที่ตำแหน่งอไลน์เมนต์กับ c และ c' ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้เมื่อมีการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสอย่างเป็นทางการลำดับเพื่อทำให้โรเตอร์เคลื่อนตัวด้วยมุม 90° และ 1 รอบการกล (1mech.rev) ของการเคลื่อนตัวของโรเตอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากการจ่ายค่ากระแสให้กับขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งการจ่ายค่ากระแสในลำดับ A-C-B จะส่งผลทำให้โรเตอร์หมุนกลับทาง ซึ่งอธิบายได้จากรูปที่ 2.2(ก) และ 2.2(ข)

การสร้างแรงบิดใน SRM อธิบายได้ด้วยทฤษฎีพื้นฐานการแปรสภาพพลังงานในโซลินอยด์ ดังรูปที่ 2.3(ก) โซลินอยด์มีขดลวดพันจำนวน N รอบ และเมื่อขดลวดได้รับค่ากระแส i ก็จะทำให้เกิดค่าแรงเส้นแม่เหล็ก Φ ขณะที่ค่ากระแสมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้อาร์เมเจอร์ (Armature) เริ่มเคลื่อนตัวเข้าหาโยค (Yoke) ซึ่งถูกยึดอยู่นิ่ง จากการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเส้นแม่เหล็กกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ช่องว่างอากาศมีค่าต่างกัน 2 ค่า คือ x_1, x_2 เมื่อ $x_1 > x_2$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเส้นแม่เหล็กเทียบกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่า x_1 มีความเป็นเชิงเส้นเนื่องจากผลของค่าความต้านทานแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ค่าแรงเส้นแม่เหล็กในช่องว่างอากาศมีค่าน้อยกว่าเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรมแม่เหล็ก ค่าพลังงานไฟฟ้าทางด้านอินพุต (W_e) แสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$W_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int N i d\Phi = \int F d\Phi \quad (2.1)$$

เมื่อ e คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และ F คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานทางไฟฟ้าอินพุตนี้ (W_e) มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ถูกสะสมในคอยล์ (W_f) และ พลังงานที่ถูกแปลงไปเป็นพลังงานทางกล (W_m)



รูปที่ 2.3 โซลินอยด์ และ กราฟคุณลักษณะของ โซลินอยด์

(ก) โซลินอยด์

(ข) กราฟของเส้นแรงคล้องเกี่ยวข้องกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อผลรวมดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.2)$$

เมื่องานทางกลมีค่าเท่ากับศูนย์ คือ กรณีที่อาร์เมเจอร์อยู่ ณ ตำแหน่ง x_1 พลังงานที่ถูกสะสมในคอยล์จะมีค่าเท่ากับพลังงานทางไฟฟ้าอินพุตซึ่งแสดงได้จากสมการที่(2.1)และพื้นที่ OBEO ในรูปที่ 2.3 (ข) ส่วนของที่เพิ่มขึ้นของพลังงานสนามสามารถเรียกได้ว่า *Coenergy* คือ พื้นที่ OBAO ในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งอยู่ในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ คือ $\int \Phi dF$ ในทำนองเดียวกัน ณ ตำแหน่ง x_2 ของอาร์เมเจอร์พลังงานสนามจะอยู่ในพื้นที่ OCDO และ *Coenergy* แสดงได้ด้วยพื้นที่ OCAO สำหรับบริเวณพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นนั้นแสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta m \quad (2.3)$$

ในกรณีที่จ่ายพลังงานในระดับคงที่ F_1 ณ จุดทำงาน A ดังรูปที่ 2.3(ข) พลังงานต่างๆ สามารถหาได้โดย

$$\delta W = e \int_{\phi_1}^{\phi_2} F_1 d\phi = F_1(\phi_2 - \phi_1) = BCDEB \quad (2.4)$$

$$\delta W_f = \delta W_{\int_{x=x_2}} - \delta W_{\int_{x=x_1}} = \text{area(OCDO)} - \text{area(OBEO)} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.3) และ (2.5) สามารถหาพลังงานทางกลที่เพิ่มขึ้นได้ คือ

$$\delta W_m = \delta W_e - \delta W_f = \text{area(OBCO)} \quad (2.6)$$

และนั่นก็คือพื้นที่ระหว่างเส้นโค้ง 2 เส้นสำหรับทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีของเครื่องจักรแบบหมุน พลังงานทางกลที่เพิ่มขึ้นจะอยู่ในรูปของแรงบิดทางแม่เหล็กเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของโรเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (2.7)

$$\delta W_m = T_e \delta \theta \quad (2.7)$$

เมื่อ T_e คือ แรงบิดทางแม่เหล็ก และ $\delta \theta$ ตำแหน่งของโรเตอร์ที่เปลี่ยนไป ดังนั้นแรงบิดทางแม่เหล็กจึงแสดงได้สมการที่ (2.8)

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} \quad (2.8)$$

ในกรณีที่จ่ายพลังงานให้กับคอยล์ในระดับคงที่(เช่น ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าคงที่) ส่วนเพิ่มขึ้นของงานทางกลมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน *Coenergy* W_f' ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของโซลินอยด์ แต่จะทำให้พลังงานสนามมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้พลังงานทางกลที่เกิดขึ้นจึงแสดง ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\delta W_m = \delta W_f' \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$W_f' = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int (N\Phi) di = \int \lambda(\theta, i) di = \int L(\theta, i) idi \quad (2.10)$$

เมื่อค่าอินดักแตนซ์ L และ เส้นแรงคล่องเกี่ยว λ เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ และ ค่ากระแส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของ *Coenergy* นี้เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งโรเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่ง คือ θ_2 และ θ_1 ด้วยเหตุนี้แรงบิดในช่องว่างอากาศถูกแสดงอยู่ในรูปของ *Coenergy* ซึ่งแทนด้วยฟังก์ชันของตำแหน่งโรเตอร์ และ ค่ากระแสจึงแสดง ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} = \frac{\delta W_f'}{\delta \theta} = \frac{\delta W_f'(\theta, i)}{\delta \theta} \quad (2.11)$$

ถ้าค่าอินดักแตนซ์เป็นเชิงเส้น และเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งโรเตอร์เพื่อทำให้เกิดค่ากระแส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไม่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ ดังนั้นค่าแรงบิดจึงหาได้จากสมการ

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \left. \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \right|_{i=\text{constant}} \quad (2.13)$$

เมื่อผลต่างของค่าอินดักแตนซ์นี้สามารถพิจารณาค่าแรงบิดคงที่ในรูปของ $N \cdot m/A^2$ ซึ่งทำให้เห็นว่าค่าอินดักแตนซ์จะไม่คงที่ และยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้ SRM นั้นไม่สามารถเขียนวงจรสมมูลในสถานะคงตัวได้เหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์และตำแหน่งโรเตอร์

เมื่อคุณลักษณะแรงบิดขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของเส้นแรงคล่องเกี่ยว และ ตำแหน่ง โรเตอร์ เป็นฟังก์ชันของค่ากระแส สำหรับตัวอย่างลักษณะเฟสอินดักแตนซ์ เทียบกับ ตำแหน่ง โรเตอร์แสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่กระแสมีค่าคงที่ ค่าอินดักแตนซ์ที่ตำแหน่งของขดลวดสเตเตอร์ของ SRM จะไม่พิจารณาผลของการอิมิตัวทางแม่เหล็ก ค่าอินดักแตนซ์โพสไฟล์ที่เปลี่ยนแปลงไปถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของขอบขั้วของสเตเตอร์ ขั้วของโรเตอร์ และ จำนวนของขั้วของโรเตอร์ โดยทั่วไปในการอธิบายจะสมมติให้ขอบของขั้วของโรเตอร์มีค่ามากกว่าขอบของขั้วของสเตเตอร์ จากรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) ค่ามุม θ ต่างๆนี้จะสามารถหาได้จาก

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{P_r} - (\beta_s + \beta_r) \right] \quad (2.14)$$

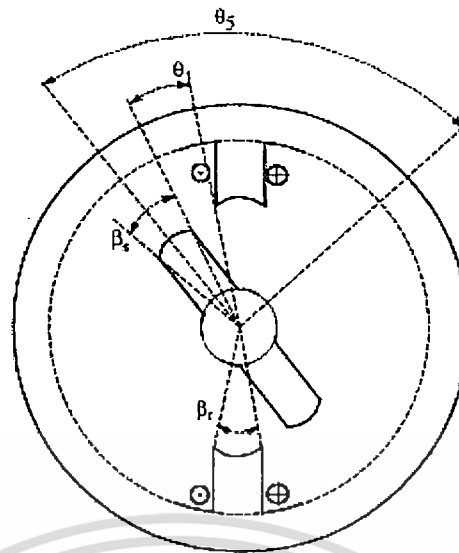
$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (2.15)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \quad (2.16)$$

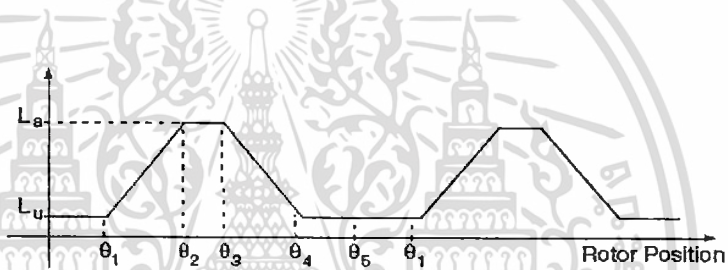
$$\theta_4 = \theta_3 + \beta_s \quad (2.17)$$

$$\theta_5 = \theta_4 + \theta_1 = \frac{2\pi}{P_r} \quad (2.18)$$

เมื่อ β_s และ β_r คือ ขอบของขั้วของสเตเตอร์ และ ขั้วของโรเตอร์ตามลำดับ, P_r คือ จำนวนขั้วของโรเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) พื้นฐานของนิยามตำแหน่งโรเตอร์แบบ 2 ขั้วใน SRM

(ข) ค่าอินดักแตนซ์โพสไฟล์ทั้ง 4 พื้นที่

1. บริเวณ $0 - \theta_1$ และ $\theta_4 - \theta_5$ ขั้วของสเตเตอร์ และ ขั้วของโรเตอร์ไม่ได้อยู่ตำแหน่งที่เหลื่อมกัน (Overlapping) ในบริเวณนี้ ค่าเส้นแรงแม่เหล็กจะเคลื่อนตัวในช่องว่างอากาศ ดังนั้นจึงทำให้ค่าอินดักแตนซ์มีค่าต่ำสุดและเกือบจะมีค่าคงที่ ดังนั้นที่บริเวณดังกล่าวจึงไม่ทำให้เกิดค่าแรงบิดขึ้น นอกจากนี้ค่าอินดักแตนซ์ในบริเวณนี้จึงถูกเรียกว่า (Unaligned Inductance) L_u
2. บริเวณ $\theta_1 - \theta_2$ ขั้วทั้ง 2 เริ่มมีการเหลื่อมกัน ด้วยเหตุนี้เส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่จะเคลื่อนตัวผ่านขั้วของสเตเตอร์ และ ขั้วของ โรเตอร์ ซึ่งจะทำให้ค่าอินดักแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามตำแหน่งโรเตอร์ทำให้ค่าความชันของอินดักแตนซ์มีค่าเป็นบวก (Positive Slope) ค่ากระแสที่ถูกส่งเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์จะไปสร้างแรงบิดที่เรียกว่าแรงบิดมอเตอร์ (Motoring Torque) ขึ้นในบริเวณนี้ ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อขั้วของ โรเตอร์เคลื่อนตัวทับกับขั้วของสเตเตอร์พอดี

3. บริเวณ $\theta_2 - \theta_3$ ที่ช่วงเวลานี้การเคลื่อนตัวของขั้วของโรเตอร์จะอยู่ ณ ตำแหน่งโวลต์เมนส์ทำให้เส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้ค่าอินดักแตนซ์โพรวไฟล์ ณ ขณะนั้นมีค่ามากที่สุด และ คงที่ ซึ่งอินดักแตนซ์ที่บริเวณนี้ถูกเรียกว่าโวลต์เมนส์อินดักแตนซ์ L_a เมื่อค่าอินดักแตนซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ไม่เกิดการสร้างแรงบิด เมื่อมีการส่งค่ากระแสไฟฟ้ามาที่ขดลวดสเตเตอร์ในช่วงบริเวณนี้ แม้ว่าในความเป็นแล้วจริง ณ ที่บริเวณนี้ก็ยังมิประโยชน์ที่จะทำให้ค่ากระแสที่ขดลวดสเตเตอร์มีค่าลดลง หรือ อยู่ในระดับต่ำสุดในการทำคอมมุเตชัน เพื่อป้องกันการเกิดแรงบิดทางด้านลบเนื่องจากค่ากระแสกำลังลดลงในช่วงที่ความชันอินดักแตนซ์มีค่าเป็นลบ

4. $\theta_3 - \theta_4$ คือบริเวณที่ขั้วของ โรเตอร์กำลังเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งโวลต์เมนส์กับขั้วของสเตเตอร์ ซึ่งคล้ายกันกับที่บริเวณ $\theta_1 - \theta_2$ มากแต่ต่างกันที่ค่าอินดักแตนซ์นั้นมีค่าลดลง และ ตำแหน่งโรเตอร์ที่เปลี่ยนไปทำให้ค่าความชันของค่าอินดักแตนซ์มีค่าเป็นลบ ซึ่งการทำงานของเคลื่อนจักรกลในบริเวณนี้เป็นผลทำให้เกิดแรงบิดทางด้านลบ (การกำเนิดพลังงาน ไฟฟ้าจากงานทางกลด้านอินพุตที่ SRM) ในความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถที่จะสร้างอินดักแตนซ์โพรวไฟล์ได้อย่างค่าอินดักแตนซ์ในรูปที่ 2.4 (ข) เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วจะมีผลของการอิมตัวของแม่เหล็กเกิดขึ้น ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้ความราบเรียบของแรงบิดจึงมีค่าลดลงสำหรับลักษณะพัลส์กระแส และยังสังเกตได้ว่าแรงบิดมอเตอร์จะถูกสร้างด้วยช่วงเวลาอันสั้น ในรูปของค่ากระแสซึ่งเป็นการกระเพื่อมของแรงบิดมีค่าสูงไปด้วย ดังนั้นขณะมอเตอร์ทำงานอยู่จึงมีเสียงค่อนข้างดัง และ สัญญาณความเร็วของโรเตอร์จะเกิดการแกว่ง การกระเพื่อมของแรงบิดสามารถทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบ SRM ให้มีค่าอินดักแตนซ์โพรวไฟล์ที่มีการเหลื่อมกันและกันระหว่างเฟสพอดี ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการเลือกจำนวนขั้วของสเตเตอร์ ขั้วของโรเตอร์ และ ขอบของขั้วทั้งโรเตอร์ และ สเตเตอร์ในการออกแบบ SRM นอกจากนี้การกระเพื่อมของแรงบิดสามารถทำให้ลดลงได้โดยการใช้เทคนิคการจัดรูปร่างค่ากระแส (Current Shaping)

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ วงจรสมมูล

วงจรสมมูลพื้นฐานของ SRM และ สมการแรงดันเฟสเมื่อไม่พิจารณาผลของค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส โดยที่แรงดันที่ขั้ว (v) มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานที่ขดลวด (R_s) และ อัตราการเปลี่ยนของเส้นแรงค้ำงเกี่ยว ถูกแสดงไว้ดังสมการที่ (2.19)

$$v = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.19)$$

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ต่อเฟส และ λ เส้นแรงคล็องเกี่ยวต่อเฟสซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.20)

$$\lambda = L(\theta, i) \cdot i \quad (2.20)$$

เมื่อ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งโรเตอร์ และ ค่ากระแส ซึ่งสมการแรงดันเฟสแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v &= R_s i + \frac{d\{L(\theta, i)i\}}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \\ &= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \end{aligned} \quad (2.21)$$

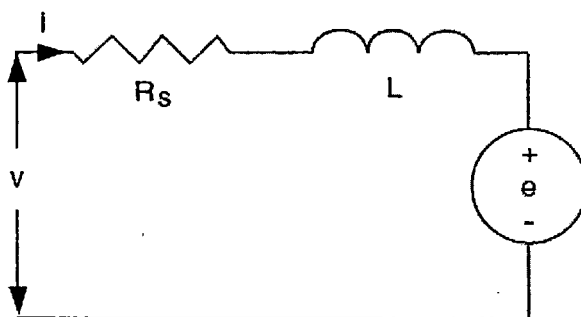
ในสมการนี้ทั้งสามเทอมทางด้านขวามือ ประกอบด้วย แรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานขดลวด แรงดันตกคร่อมที่อินดักเตอร์ และ แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ ตามลำดับ ซึ่งจากสมการดังกล่าวคล้ายกับกรณีของสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดอนุกรม เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับหาได้จาก

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i = K_b \omega_m i \quad (2.22)$$

เมื่อ K_b สมมติเป็นค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับซึ่งคล้ายกับกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดอนุกรมโดยที่ K_b คือ

$$K_b = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.23)$$

สังเกตได้ว่าค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับนี้ขึ้นอยู่กับจุดทำงาน และจุดทำงานนี้หาได้จากค่ากระแสคงที่ ณ จุดทำงานต่าง ๆ จากสมการแรงดัน และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับสามารถทำให้เขียนวงจรสมมูลของ SRM ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลเฟสเดียวของ SRM

การแทนค่าเส้นแรงค้ำเกี่ยวในสมการแรงดัน และแทนค่าสมการแรงดันด้วยค่ากระแสชั่วขณะทำให้ได้ค่ากำลังทางดำนอินพุต

$$p_i = vi = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} \quad (2.24)$$

ในสองเทอมสุดท้ายของสมการที่ (2.24) นั้นไม่สามารถอธิบายในทางกายภาพได้ เพื่อถ่ายต่อความเข้าใจจึงเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการ (2.25)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.25)$$

แทนสมการที่ (2.25) ในสมการที่ (2.24) จะได้

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.26)$$

เมื่อ p_i คือ ค่ากำลังชั่วขณะทางดำนอินพุต ซึ่งสมการนี้จะมีฟอร์มคล้ายกันกับในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์แมคคานิกส์โดยชี้ให้เห็นว่าค่ากำลังชั่วขณะทางดำนอินพุตเท่ากับผลรวมของกำลังสูญเสียในขดลวด $R_s i^2$ กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสนาม $p[L(\theta, i) \cdot i^2 / 2]$ และ กำลังในช่องว่างอากาศซึ่งก็คือ $[i^2 pL(\theta, i)] / 2$ เมื่อ p คือ ตัวดำเนินการดิฟเฟอเรนเชียล d/dt เมื่อแทนค่าของเวลาให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของตำแหน่งโรเตอร์กับความเร็วโรเตอร์ดังสมการที่ (2.27)

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (2.27)$$

และกำลังสูญเสียในช่องอากาศที่สามารถแสดงได้ตามสมการที่(2.28)

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (2.28)$$

กำลังสูญเสียในช่องอากาศเกิดจากแรงบิดทางแม่เหล็ก และ ความเร็วโรเตอร์

$$p_a = \omega_m T \quad (2.29)$$

โดยที่ค่าแรงบิดทางแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ (2.30)

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.30)$$

ที่ได้กล่าวมาจากข้างต้นนี้ คือ การพัฒนาวงจรสมมูล และ สมการการคำนวณค่าแรงบิดทางแม่เหล็ก กำลังสูญเสียในช่องอากาศ และ กำลังทางค่านอินท์พุทที่ SRM ทั้งทางพลวัต และ ในสภาวะคงตัว

บทที่ 3

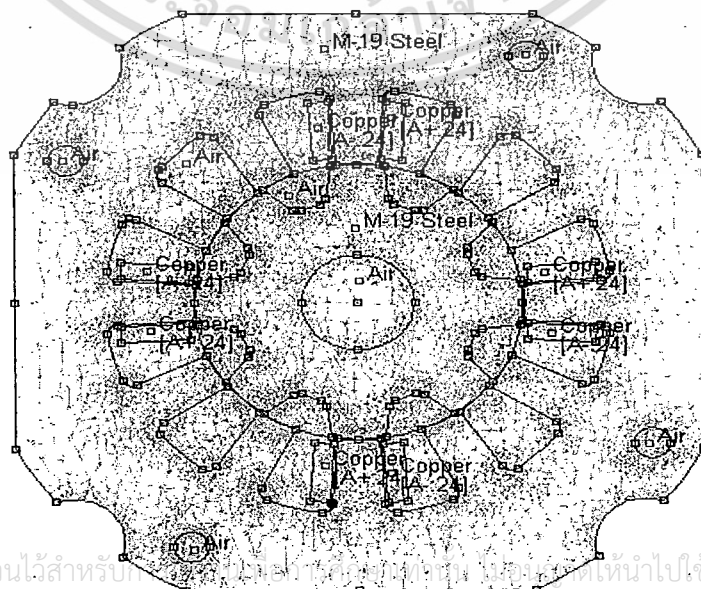
หลักการทํางานระบบขับเคลื่อน SRM และ เทคนิคการเริ่มหมุนของ SRM

3.1 บทนำ

ระบบขับเคลื่อน SRM โดยทั่วไปประกอบด้วย SRM พาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ (Power Converter) อุปกรณ์ตรวจวัด เช่น เซนเซอร์ตรวจจํากระแส หรือ เซนเซอร์ตรวจจําแรงดัน เซนเซอร์ตรวจจําตำแหน่ง และ วงจรควบคุม (เช่น ตัวควบคุมแบบ DSP) เมื่อระบบควบคุมมีความสามารถในการประมวลผลได้แม่นยำก็ทำให้ระบบขับเคลื่อน SRM มีประสิทธิภาพสูงไปด้วย คอนเวอร์เตอร์ของระบบขับเคลื่อน SRM ถูกต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง โดยที่ขดลวดสเตเตอร์ของ SRM จะถูกต่ออยู่กับพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวงจรถูกควบคุมจะมีหน้าที่สร้างสัญญาณเกตเพื่อใช้ควบคุมการทำงานสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ และทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถทํางานตามเทคนิคที่ระบบควบคุมการขับเคลื่อน SRM อย่างที่ต้องการได้ หลักการเบื้องต้น และ การทํางานของระบบขับเคลื่อน SRM จะได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2 โครงสร้างทางกลของ SRM (Mechanical Structure of the SRM)

SRM มีโครงสร้างเป็นแบบซี่นํ้าที่โรเตอร์และสเตเตอร์โดยที่ซี่ของสเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่ แต่ที่ซี่ของโรเตอร์นั้นไม่มีขดลวดคอยล์ และแม่เหล็กถาวรติดอยู่ ซึ่งโครงสร้างของ SRM แบบ 12/8 ที่ถูกจําลองด้วยโปรแกรม (Finite Element Analysis, FEA) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



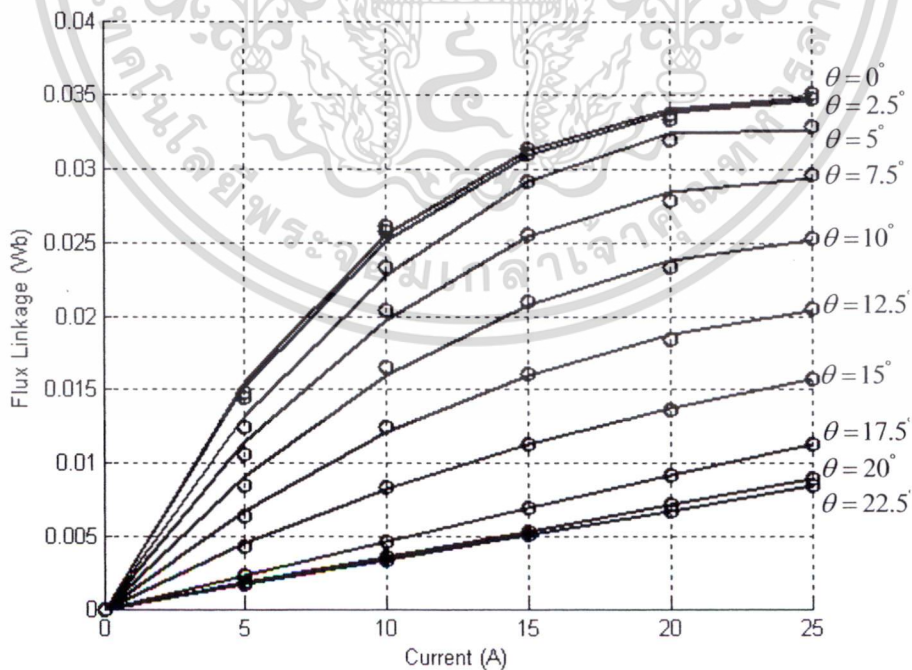
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... มิฉะนั้นกรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้... กสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของ SRM แบบ 12/8

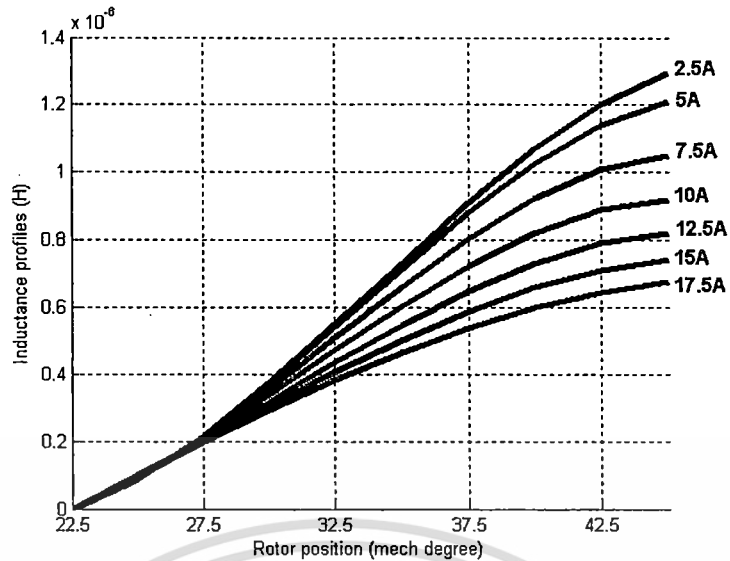
3.3 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของ SRM (Magnetic Characteristic of the SRM)

เนื่องจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบขั้วยื่นทั้งด้านโรเตอร์ และ สเตเตอร์ของ SRM จึงทำให้ความต้านทานแม่เหล็กของเส้นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งโรเตอร์ เมื่อ SRM ถูกออกแบบให้มีค่าความเป็นแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวที่ค่ากระแสสูง ดังนั้นค่าความต้านทานแม่เหล็กจึงเป็นฟังก์ชันกับค่ากระแสเฟส ด้วยเหตุนี้เส้นแรงค้ำของขดลวดสเตเตอร์ เฟสอินดักแตนซ์ และ เฟสอินคริเมนทัลอินดักแตนซ์ก็จะเป็นฟังก์ชันกับค่าตำแหน่งโรเตอร์ และค่ากระแสเฟสด้วยเช่นกัน เมื่อกำหนดให้ค่ากระแสมีค่าคงที่โดยที่ขั้วของโรเตอร์เริ่มเคลื่อนตัวจากตำแหน่งที่ไม่โอไลน์เมนต์ไปอยู่ ณ ตำแหน่งโอไลน์เมนต์สิ่งที่เกิดขึ้น คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กของเส้นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลงเนื่องจากการลดลงของช่องอากาศที่เป็นผลทำให้ค่าเฟสอินดักแตนซ์ และ เส้นแรงค้ำของขดลวดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเคลื่อนที่ของตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อทำการล็อกโรเตอร์ให้หยุดอยู่นิ่งแล้วทำการเพิ่มค่ากระแสให้สูงขึ้นโดยที่เส้นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก ผลที่ตามมา คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กของเส้นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กก็มีค่าลดลง เมื่อค่ากระแสมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้อินดักแตนซ์ลดลงในขณะที่ค่ากระแสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าเส้นแรงค้ำของขดลวดที่สเตเตอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแส ผลจากพลังงานที่มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงค้ำของขดลวด และค่ากระแสเฟสที่เปลี่ยนไปตามค่าตำแหน่งโรเตอร์จึงสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงค้ำของขดลวด ณ ตำแหน่งโรเตอร์ และ กระแสเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอินดักแตนซ์ ณ ตำแหน่งโรเตอร์ และ ค่ากระแสเฟส

เมื่อค่าอินดักแตนซ์สามารถนิยามได้จากอนุพันธ์ของเส้นแรงค้ำเกี่ยวเทียบกับค่ากระแสเฟส ถ้า SRM ถูกออกแบบให้วงจรแม่เหล็กมีคุณสมบัติไม่เกิดการอิ่มตัว ดังนั้นค่าเส้นแรงค้ำเกี่ยวก็จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่ากระแสเฟส การเปลี่ยนแปลงของค่าอินดักแตนซ์ก็จะแปรผันตามค่ากระแสเฟส และ ตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงค้ำเกี่ยวที่แปรผันตามค่ากระแส และ ตำแหน่งโรเตอร์ การเปลี่ยนแปลงของค่าอินดักแตนซ์ที่แปรผันตามกระแสเฟส และตำแหน่งโรเตอร์ก็สามารถแสดงไว้ดังรูปที่ 3.3

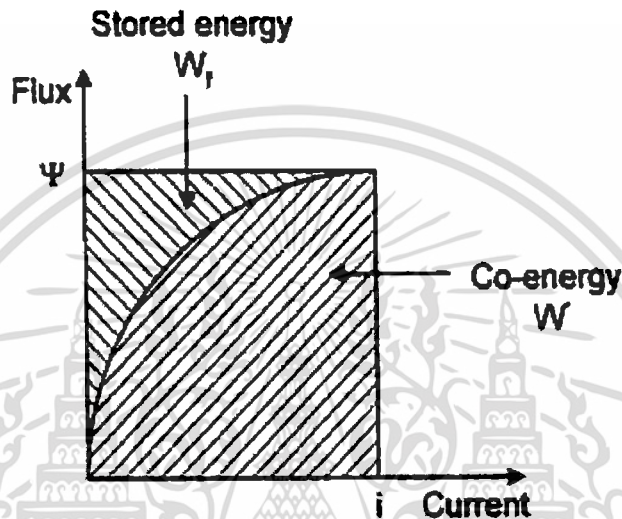
3.4 การสร้างแรงบิดทางกลของSRM (Torque Production Mechanism in SRM)

เมื่อแรงบิดใน SRM เกิดขึ้นจากแรงดึงโน้มเอียงของโรเตอร์ที่ต้องการเคลื่อนตัวไปหาตำแหน่งโวลต์แมกเน็ตที่ขั้วของสเตเตอร์ที่ถูกจ่ายพลังงานให้ ซึ่งการวิเคราะห์รายละเอียดของแรงบิดสามารถทำได้โดยใช้อนุพันธ์ของ Co-energy ที่ได้รับพลังงานจากค่ากระแสเทียบกับตำแหน่งโรเตอร์ ในรูปที่ 3.4 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงค้ำเกี่ยวที่แปรผันตามกับค่ากระแสเฟส ในขณะที่โรเตอร์มีการเคลื่อนที่ สำหรับขดลวดสเตเตอร์ที่มีกระแส i ไหลอยู่ก็จะมีค่าเส้นแรงค้ำเกี่ยว ψ อยู่ ซึ่ง Stored field energy W_f และ W' ก็คือ บริเวณที่มีการแรงงา ดังนั้น Co-energy จึงสามารถหาได้จากนิยามของอินทิกรัล

$$W' = \int_0^i \psi di \quad (3.1)$$

แรงบิดที่สร้างจากขดลวดที่สเตเตอร์ 1 ขด ณ ทุกๆตำแหน่งโรเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$T = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=Constant} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stored field energy และ Co-energy

ถ้าไม่พิจารณาผลของการอิ่มตัวในวงจรแม่เหล็ก เส้นโค้งการสร้างแม่เหล็กในรูปที่ 3.4 จะเป็นเส้นตรงจึงทำให้ Co-energy ก็จะมีค่าเท่ากับ Stored field energy ซึ่งค่าแรงบิดชั่วขณะสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (3.3)

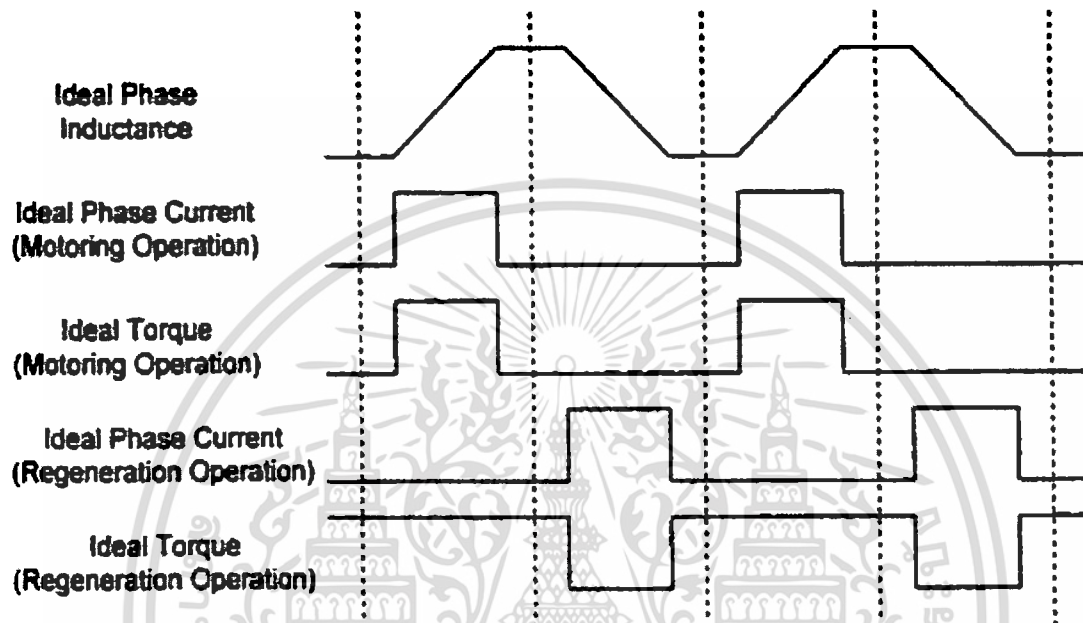
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3.3)$$

เมื่อ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ขณะที่วงจรแม่เหล็กไม่เกิดการอิ่มตัว (Unsaturated)

จากสมการที่ (3.3) สามารถพบว่าถ้าต้องการสร้างบิดทางด้านบวก (Motoring Torque) ใน SRM จะต้องจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าในกับขดลวดสเตเตอร์ในช่วงที่ความชันของค่าอินดักแตนซ์มีค่าเป็นบวก นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าในสมการที่ (3.3) นั้นค่ากระแสเฟสมีลักษณะเป็นแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) คือ ค่ากระแสจะมีค่าเป็นบวกเท่านั้นสำหรับการสร้างแรงบิดทางด้านบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้คอนเวอร์เตอร์จึงมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และที่มีราคาที่ไม่สูงมากก็สามารถถูกนำมาใช้ในการขับเคลื่อน SRM ได้ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป ในรูปที่ (3.5) แสดงถึงค่าอินดักแตนซ์ ค่ากระแสเฟส และ ค่าแรงบิดของ SRM ในเชิงอุดมคติ ในทางกลับกันแล้วแรงบิดทางด้านลบ (Negative Torque) สามารถถูกสร้างได้เมื่อขดลวดสเตเตอร์ที่ถูกจ่ายพลังงานให้ในช่วงที่ค่าความชันของค่าอินดักแตนซ์มีค่าเป็นลบ



รูปที่ 3.5 ค่าอินดักแตนซ์ในอุดมคติ ค่ากระแส และ โพรไฟล์ของแรงบิด

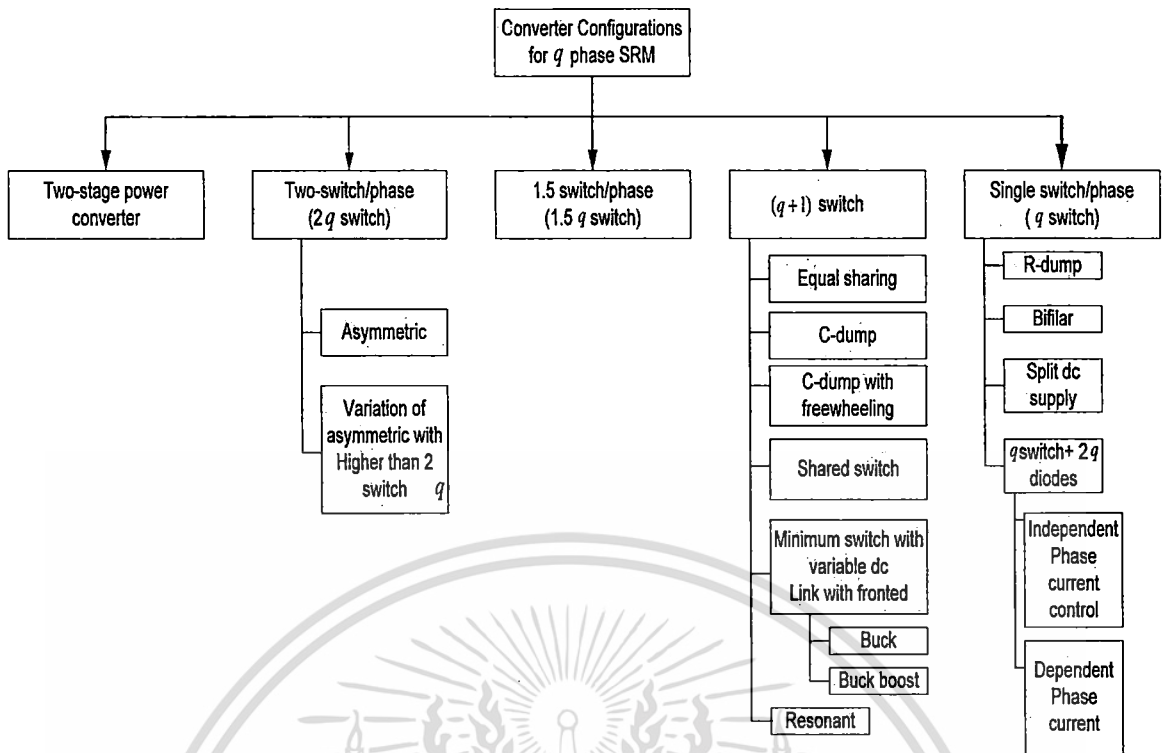
3.5 คอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อน SRM (SRM Converter)

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายถึงพฤติกรรมทางแม่เหล็กของ SRM และ การสร้างแรงบิดทางกล ซึ่งในหัวข้อนี้จะขอกกล่าวถึงโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน SRM คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน SRM ต้องสามารถที่จะสร้างสัญญาณพัลส์ของกระแสไฟฟ้าแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณตำแหน่งโรเตอร์ โดยที่ค่าแอมพลิจูด และ รูปร่างของสัญญาณกระแสไฟฟ้าต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้เพื่อให้ได้ค่าแรงบิด และ ความเร็วที่ต้องการ นอกจากนี้แล้ววงจรคอนเวอร์เตอร์ก็ต้องสามารถสร้างสัญญาณแรงดันแบบรีเวอร์สซึ่งสำหรับการทำงานในโหมดของ De-fluxing เนื่องจากในระบบขับเคลื่อน SRM ต้องการแค่สัญญาณพัลส์ของกระแสไฟฟ้าในรูปแบบยูนิไดเรกชันเท่านั้น ดังนั้นคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน SRM จึงมีข้อดีดังต่อไปนี้

1. คอนเวอร์เตอร์ใช้สวิตช์เพียงแค่ 1 ตัวต่อเฟสเท่านั้น เว้นแต่ในกรณีที่เราต้องการสมรรถนะ และประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจึงต้องมีการเพิ่มจำนวนสวิตช์ให้กับคอนเวอร์เตอร์
2. ขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสเป็นอิสระจากกัน ซึ่งหมายความว่า เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของ SRM ไม่สามารถใช้งาน ได้ก็ยังคงมีเฟสอื่นที่เหลือสามารถทำให้ SRM ยังสามารถทำงานได้อยู่
3. ในวงจรของระบบขับเคลื่อน SRM ทุกเฟสขดลวดสเตเตอร์กับอุปกรณ์ไทรสเตอร์จะต่อกันแบบอนุกรมเสมอ ดังนั้นจึงไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรในกรณีที่อุปกรณ์ไทรสเตอร์ตัวบนกับตัวล่างในวงจรเฟสเดียวกันทำงานพร้อมกัน ดังนั้นมีคอนเวอร์เตอร์อีกหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้กับ SRM ในงานอุตสาหกรรม ซึ่งในแต่ละชนิดก็ขึ้นอยู่กับราคาของอุปกรณ์ เทคนิคการออกแบบ และสมรรถนะของตัวคอนเวอร์เตอร์นั้นด้วย ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะขอกกล่าวถึงคอนเวอร์เตอร์บางชนิดที่นิยมนำมาใช้กับ SRM

3.5.1 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อน SRM

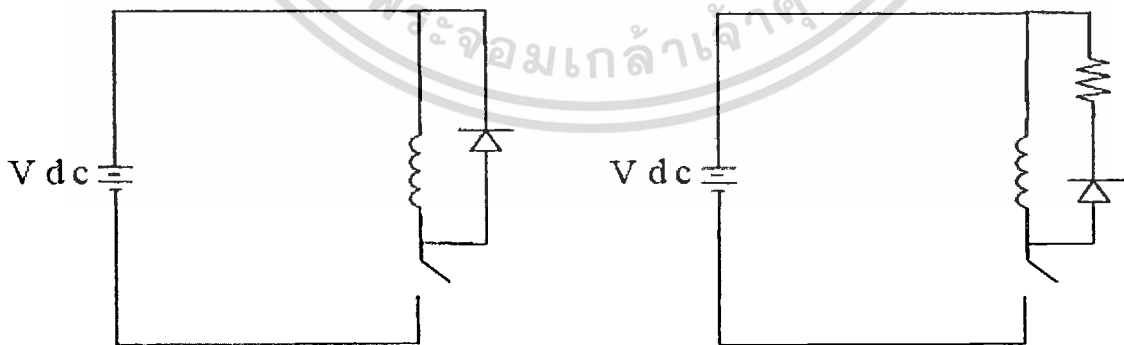
เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ของ SRM ถูกแยกจากกันอย่างอิสระ (ไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส(Mutual Coupling) จึงทำให้การควบคุมการสร้างความบิดของ SRM ในแต่ละเฟสก็เป็นอิสระจากกันด้วยเช่นกัน ขณะที่ความเป็นอิสระจากกันระหว่างเฟสเป็นข้อได้เปรียบของ SRM แต่การขาดค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟสก็อาจจะมีผลต่อพลังงานสนามแม่เหล็กที่ถูกเก็บในขดลวดสเตเตอร์ได้ด้วยเช่นกัน พลังงานของสนามแม่เหล็กจะถูกสร้างในช่วงการทำคอมมูเตชันของเฟส มิฉะนั้นผลที่ตามมา คือค่าแรงดันระหว่างเฟสจะมีค่าสูงมากจึงเป็นผลทำให้การทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเกิดการความผิดพลาดระหว่างทำงานได้ ในรูปที่ 3.6 เป็นโครงสร้างของการจำแนกประเภทของคอนเวอร์เตอร์ในแบบต่างๆ



รูปที่ 3.6 โครงสร้างการจำแนกประเภทของคอนเวอร์เตอร์ชนิดต่างๆสำหรับ SRM

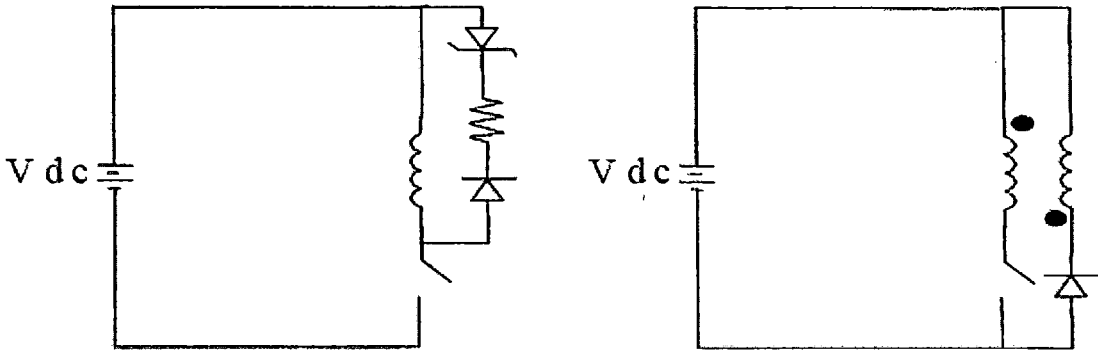
3.5.1.1 คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟส

แค่เพียงสวิตช์ 1 ตัวก็สามารถสร้างสัญญาณพัลส์ของกระแสไฟฟ้าแบบยูนิโตนเรคชั่นให้กับ SRM ซึ่งรูปที่ 3.7 ได้แสดงรูปของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสไว้ทั้ง 4 แบบ ซึ่งความแตกต่างของแต่ละชนิด คือ ลักษณะการจ่ายแรงดันให้กับขดลวดสเตเตอร์ของ SRM เนื่องจากโครงสร้างของเส้นทางของการฟรีวีลิ่ง (Freewheeling path structure)



รูปที่ 3.7 (ก) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 1

(ข) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 2



รูปที่ 3.7 (ค) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 3
(ง) คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์ 1 ตัวต่อ 1 เฟสแบบที่ 4

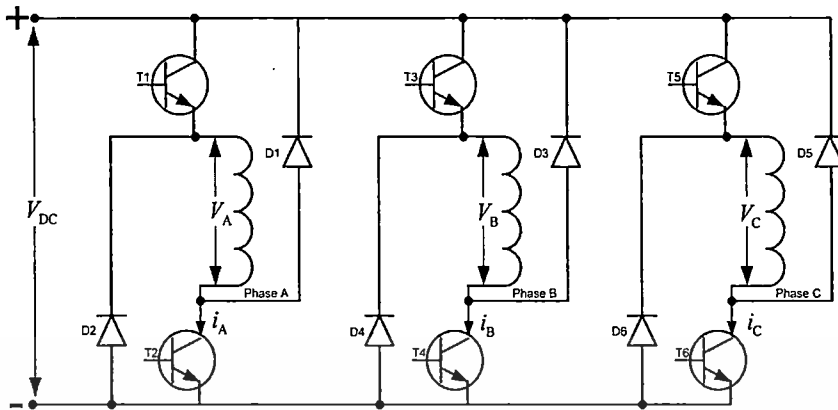
ในรูปที่ 3.7(ก) ในแต่ละกิ่งประกอบด้วยสวิทช์ 1 ตัวต่ออนุกรมกับขดลวดสเตเตอร์ และฟรีวิลลิ่งไดโอด ซึ่งฟรีวิลลิ่งไดโอดถูกต่อแบบขนานกับขดลวดสเตเตอร์ เมื่อสวิทช์ ON ค่าของเส้นแรงค้ำงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ได้แรงดันค่าบวก เมื่อสวิทช์ OFF ค่ากระแสก็จะไหลวนผ่านไดโอดเป็นผลทำให้แรงดันค่าลบซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมที่ไดโอด (Forward voltage drop) ถูกบวกกับค่าแรงดันตกคร่อมที่ขดลวดสเตเตอร์สำหรับการทำ De-fluxing เนื่องจากแรงดันตกคร่อมที่ฟรีวิลลิ่งไดโอดมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการ De-fluxing จึงใช้เวลาค่อนข้างนาน ซึ่งจะทำให้มุมนำกระแส (Conduction angle) มีค่าลดลงไปด้วย นอกจากนี้โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และราคาที่ย่อมเยาค่าจึงเป็นจุดที่น่าสนใจของคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อวงจรแบบรูปที่ 3.7(ก)

วงจรในรูปที่ 3.7 (ข) จะแตกต่างจากวงจรในรูปที่ 3.7 (ก) เนื่องจากตัวต้านทานที่ถูกต่อเพิ่มเข้ามาในวงจรซึ่งต่ออนุกรมกับไดโอด จุดประสงค์คือ เพื่อเพิ่มแรงดันค่าลบให้ขดลวดสเตเตอร์สำหรับการลดคาบเวลาขณะ De-fluxing ถึงแม้ว่าวงจรมีจะสามารถลดคาบเวลาขณะ De-fluxing ได้แต่ก็ไม่มากนักเพราะว่าค่าแรงดันย้อนกลับก็จะมีค่าลดลงเนื่องจากค่ากระแส นอกจากนี้ค่าพลังงานสูญเสียในตัวต้านทานก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบนี้ลดลงด้วย

วงจรในรูปที่ 3.7 (ค) มีการต่อซีเนอร์ไดโอดเพิ่มเข้ามาอนุกรมกับตัวต้านทานในวงจรเพื่อที่จะทำให้แรงดันค่าลบที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และ รักษาระดับแรงดันให้คงที่

วงจรในรูปที่ 3.7(ง) ได้มีการใช้ Bifilar-wound motor เข้ามาในวงจร เมื่อสวิทช์ OFF ค่ากระแสที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิก็จะถูกย้ายไปยังขดลวดทุติยภูมิ และไหลวนผ่านไดโอด ดังนั้นจะทำให้มีแรงดันค่าลบที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ เพื่อใช้สำหรับการ De-fluxing ซึ่งวงจรมีสามารถทำให้คาบเวลาขณะ De-fluxing มีค่าลดลงได้ และยังช่วยลดต้นทุนสำหรับค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามวงจรมีก็ยังต้องการระดับแรงดันของการสวิทช์ที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการจ่ายค่าแรงดันเป็นสองเท่าให้กับขดลวดสเตเตอร์ในขณะที่สวิทช์ OFF

3.5.1.2 คอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-chopping



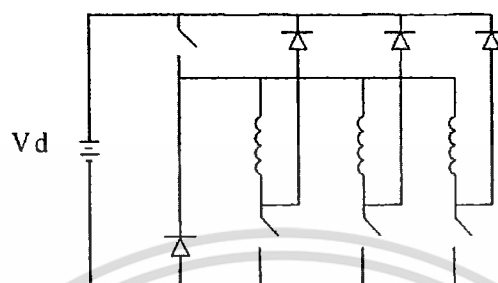
รูปที่ 3.8 โครงสร้างของพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-chopping

ในรูปที่ 3.8 แสดงถึงคอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-chopping สำหรับ SRM ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้น เพื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ และ สมรรถนะของระบบขับเคลื่อน SRM สวิตช์ที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์ต้องมีมากกว่า 1 สวิตช์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างคล้ายกับ DC-to-AC คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป แต่ต่างกันตรงที่ขดลวดสเตเตอร์ถูกต่อแบบอนุกรมกับสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถให้ประสิทธิภาพ สมรรถนะ และ ความยืดหยุ่นในการควบคุม SRM เป็นอย่างดี เนื่องจากสวิตช์ด้านบน และ ตัวล่างสามารถถูกควบคุมได้อย่างอิสระจากกันเพื่อทำให้เทคนิคของการควบคุมระบบขับเคลื่อน SRM ด้วยเทคนิคต่างๆสามารถกระทำได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อสวิตช์ด้านบน และ ตัวล่างถูกสวิตช์พร้อมกัน ไดโอดทั้ง 2 ตัวในแต่ละกึ่งก็จะมีฟรีวีลเพื่อทำการ De-fluxing ซึ่งการควบคุมแบบนี้เราเรียกว่าการควบคุมแบบ Hard chopping เพราะว่าแรงดันค่าลบของ V_{dc} จะถูกสร้างในช่วงที่เกิดการ De-fluxing แต่ถ้าสวิตช์ตัวล่าง ON ค้างไว้ตลอดเวลาจะทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมในขณะที่ De-fluxing ซึ่งการควบคุมแบบนี้เราเรียกว่า Soft chopping เมื่อสวิตช์ด้านบน OFF ก็ทำให้สวิตช์ตัวบน และ ไดโอดตัวบนสร้างเส้นทางไหลวนของกระแสสำหรับ De-fluxing นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้ยังสามารถสร้างโมเมนต์การเวียนคืนพลังงานสูงสุดได้ และ ไม่มีความจำเป็นที่ต้องหาวงจรมีการป้องกันการผิดพลาดของระบบเนื่องจากสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้พร้อมๆกัน ซึ่งข้อได้เปรียบทั้งหมดที่กล่าวมาจึงให้คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมในการนำไปใช้กับระบบขับเคลื่อน SRM

3.5.1.3 คอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม (Converter with Shared Component)

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้พิจารณาถึงคอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-chopping ซึ่งในแต่ละเฟสจะต้องมีอุปกรณ์ หรือ องค์ประกอบที่ใช้เฉพาะเฟสเท่านั้นไม่สามารถใช้ร่วมกับเฟสอื่นได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้า SRM เป็นมอเตอร์แบบ 3 เฟส ดังนั้นคอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-chopping ก็จะใช้ อุปกรณ์สวิตช์ 6 ตัว และ ไดโอด 6 ตัว ซึ่งเราสามารถลดจำนวนของสวิตช์ และ ไดโอดของวงจรได้ โดยการใช้สวิตช์ร่วมกันดังรูปที่ 3.9 ถ้าวงจรนี้ใช้กับ SRM แบบ 3 เฟสวงจรชนิดนี้จะใช้สวิตช์ 4 ตัว และ ไดโอด 4 ตัวเท่านั้น



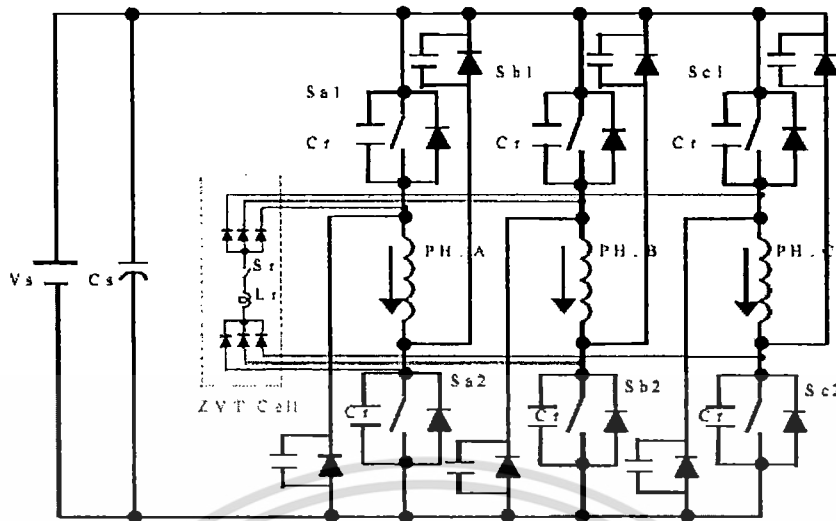
รูปที่ 3.9 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้อุปกรณ์ร่วม

สำหรับหลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรชนิดนี้เมื่อ Q1 และ D1 ON ค้างตลอดระยะเวลาที่ สวิตช์ตัวอื่นจะสลับกันทำงาน โดยที่สวิตช์หลัก Q1 จะถูก ON ค้างตลอดเวลาเพื่อส่งค่า กระแสไฟฟ้าเข้าทุกเฟสในวงจร ซึ่งวงจรดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับกระแส แต่ 1 ตัวเท่านั้นสำหรับการป้อนกลับค่ากระแสทั้ง 3 เฟส นอกจากนี้วงจรชนิดนี้ยังสามารถช่วย ประหยัดอุปกรณ์ไทรสเตอร์ได้ อย่างไรก็ตามวงจรชนิดนี้ก็ยังคงมีข้อจำกัดอยู่บ้างสำหรับการ นำไปใช้ขับเคลื่อน SRM เช่น ขดลวดแต่ละเฟสของคอนเวอร์เตอร์จะไม่สามารถแยกอิสระจากกัน ได้ ดังนั้นเมื่อเกิดการลัดวงจรเฟสใดเฟสหนึ่งในวงจรคอนเวอร์เตอร์ หรือ ในตัว SRM แล้วก็อาจจะ ทำให้เฟสอื่นได้รับความเสียหายไปด้วย

3.5.1.4 คอนเวอร์เตอร์แบบซอฟท์สวิตชิงสำหรับ SRM (Soft-Switching Converter for SRM)

เมื่อเทคนิคการควบคุมแบบ PWM ได้ถูกนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อน SRM ที่มีพิกัดสูง สิ่ง ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เสียงที่เกิดจากการสวิตชิงของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ และ การกระเพื่อมของค่า กระแสไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นความถี่สูงของการสวิตชิงยังส่งผลให้เกิดปัญหาของการรบกวนของ สนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Interference, EMI) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้การทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกิดความผิดพลาด และ ความร้อนในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพิ่มสูงขึ้น ได้ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ เทคนิคของการซอฟท์สวิตชิง(Soft-Switching) จึงได้ถูกนำมาพัฒนา ใช้กับคอนเวอร์เตอร์เพื่อใช้ขับเคลื่อน SRM ในรูปที่ 3.10 แสดงถึงวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ ริโซแนนซ์ที่ใช้สำหรับ SRM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

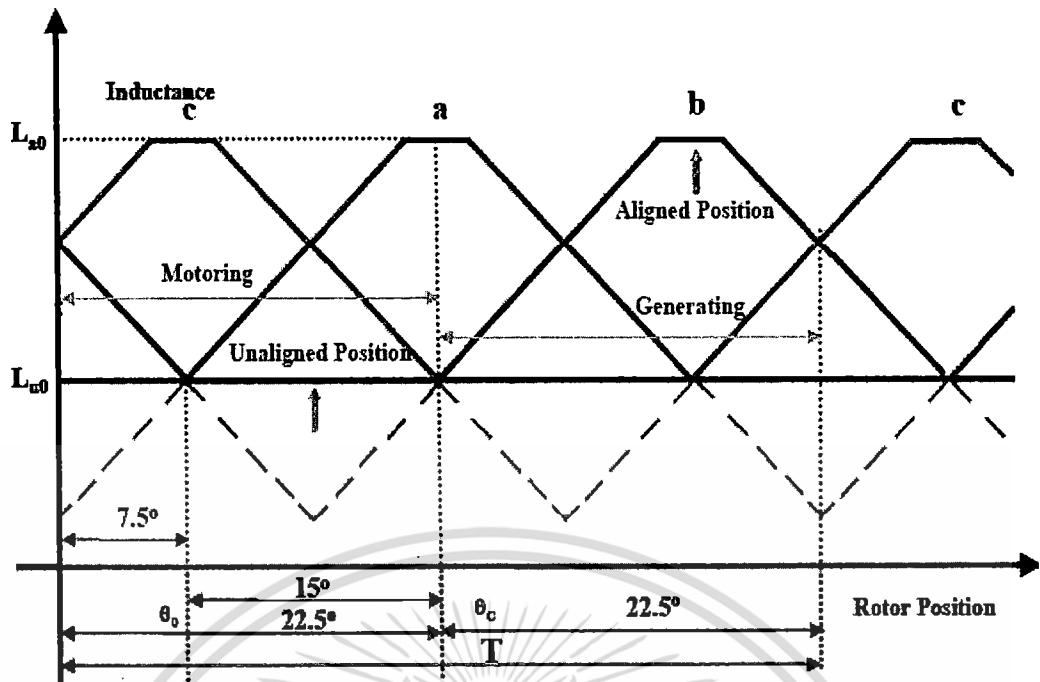


รูปที่ 3.10 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบซอฟท์สวิตชิง

จากรูปที่ 3.10 เป็นวงจรที่ใช้สำหรับ SRM แบบ 3 เฟส ความแตกต่างระหว่างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบซอฟท์สวิตชิง กับ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant chopping คือ มีการต่อ Resonant Tank เพิ่มเข้ามาในวงจร ซึ่งประกอบด้วย Auxiliary switch resonant inductor ไดโอด 2 ตัว และ Resonant Capacitor อีก 4 ตัว ในส่วนของวงจรรีโซแนนซ์ถูกต่อคร่อมกับขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสโดยที่ ZVT (Zero voltage turn-on) สามารถทำได้โดยการสับค่ากระแสจาก Auxiliary switch ดังนั้นหลักการดังกล่าวสามารถทำ ZVT ได้ที่สวิตช์หลัก และ Zero Current-turn-off ที่อุปกรณ์ช่วย (Auxiliary device) เนื่องจากสวิตช์เพียง 1 ตัวเท่านั้นที่เพิ่มเข้ามาในวงจรก็สามารถทำการ soft-switching ได้หลายเฟส ซึ่งวงจรมีช่วยประหยัดต้นทุนได้อีกเช่นกัน

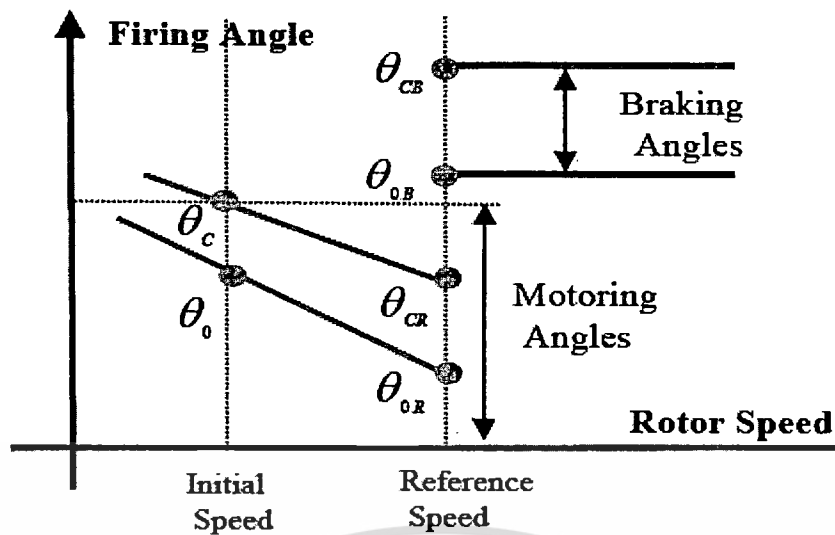
3.5.2 การควบคุมกระแสของ SRM

เพื่อต้องการสร้างแรงบิดให้เหมาะกับโหลดที่พิกัดต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมค่ากระแสให้เหมาะสมกับโหลดเช่นกัน ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีเฟลคเตอร์หลักๆเพียง 2 ตัวเท่านั้นที่มีผลต่อการควบคุมค่ากระแสใน SRM คือ มุมจุดชนวนสวิตช์ และ โหมดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในแบบต่างๆ สำหรับ SRM นั้น ค่ากระแสในแต่ละเฟสจะถูกสร้างจากศูนย์ นอกจากนี้ในโหมดการทำงานแบบมอเตอร์รีซิงขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสของ SRM จะถูกจ่ายพลังงานให้ ณ ตำแหน่งที่ไม่โอไลน์แมนท์ระหว่างขั้วโรเตอร์กับขั้วสเตเตอร์จนถึงตำแหน่งโอไลน์แมนท์ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อินдукแตนซ์โพรไฟล์ของ SRM 12/8 แบบ 3 เฟส

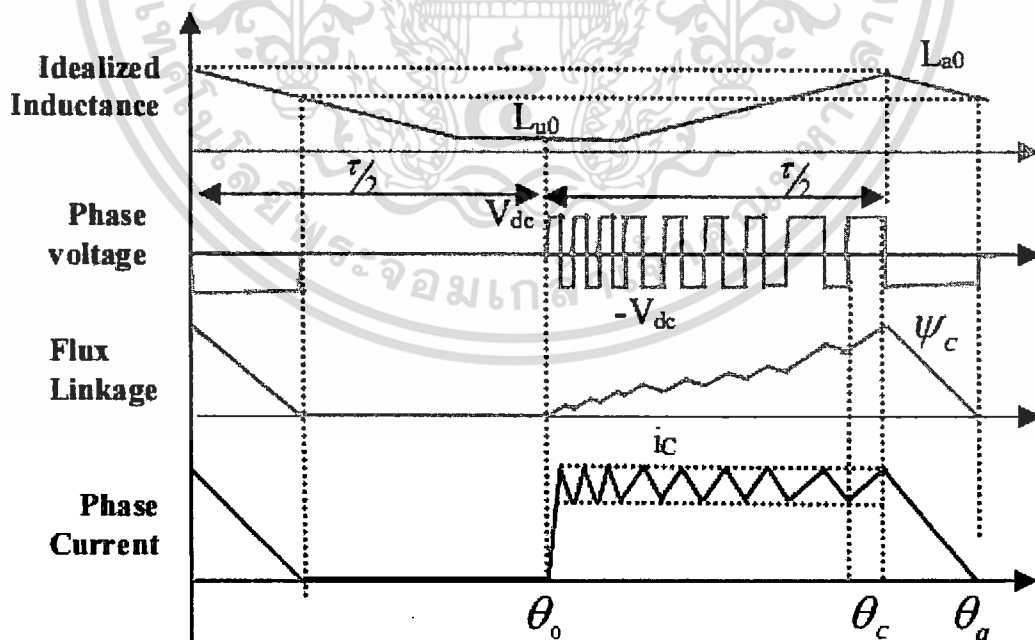
เมื่อมุม Dwell ถูกกำหนดเป็น $\theta_c - \theta_0$ เมื่อ θ_c คือ มุมของการคอมมูเตชัน และ θ_0 คือ มุมจุดจนวน ซึ่งโดยปกติแล้ว คือ θ_0 และ θ_c จะถูกเลือกเพื่อหลีกเลี่ยงการเหลื่อมกันของกระแสเฟส อย่างไรก็ตามเพื่อต้องการลดการกระเพื่อมของค่าแรงบิด และการเหลื่อมกันของค่ากระแสเฟสก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าของมุม Dwell การปรับค่า θ_c และ θ_0 จะต้องสอดคล้องกับค่าความเร็วของโรเตอร์เพื่อรักษารูปร่างของค่ากระแสเฟสให้เป็นไปตามต้องการ เนื่องจากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ Back-emf จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วโรเตอร์ดังนั้นมุม θ_0 ก็ควรถูกปรับให้ไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่ไม่โอไลน์เมนต์ ที่ค่าความเร็วโรเตอร์มีค่าสูงสุด มุมของ θ_0 จะตกอยู่ในช่วงที่ค่าอินдукแตนซ์กำลังลดลง ซึ่งเป็นผลให้ค่ากระแสเฟสสามารถเพิ่มขึ้นไปในระดับที่ต้องการได้



รูปที่ 3.12 มุมจุดชนวนที่เปลี่ยนแปลงตามย่านความเร็วโรเตอร์

3.5.2.1 การควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Control)

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิคการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิสมาใช้ใ้การควบคุม SRM ซึ่งการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิสเป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมแบบการควบคุมรูปร่างกระแสด้วยความถี่สูง ซึ่งสวิตช์หลักในแต่ละเฟสจะทำการ ON และ OFF พร้อมกันเพื่อรักษาระดับกระแสเฟสให้อยู่ในขอบเขตที่เรากำหนดไว้ด้วยการปรับเปลี่ยนความถี่การสวิตช์ของสวิตช์หลักทั้ง 2 ตัว



รูปที่ 3.13 รูปคลื่นของอินดิคแตนต์ไฟฟส์ แรงดันเฟส เส้นแรงค้ล้องเกี้ยว และ กระแส

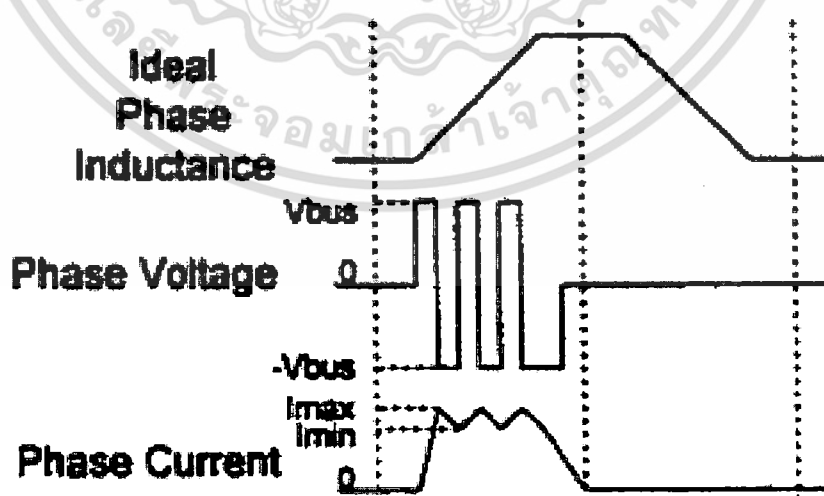
เฟส ขณะที่มีการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.13 แสดงถึงอินดักแตนซ์ในอุดมคติ ค่าแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ เส้นแรงคลื่นเกี่ยว และ กระแสเฟส สำหรับการควบคุมฮิสเตอร์รีซิสที่มีการสับค่ากระแสแบบ Hard - shopping ซึ่งการควบคุมชนิดนี้เป็นที่นิยมในการควบคุม SRM

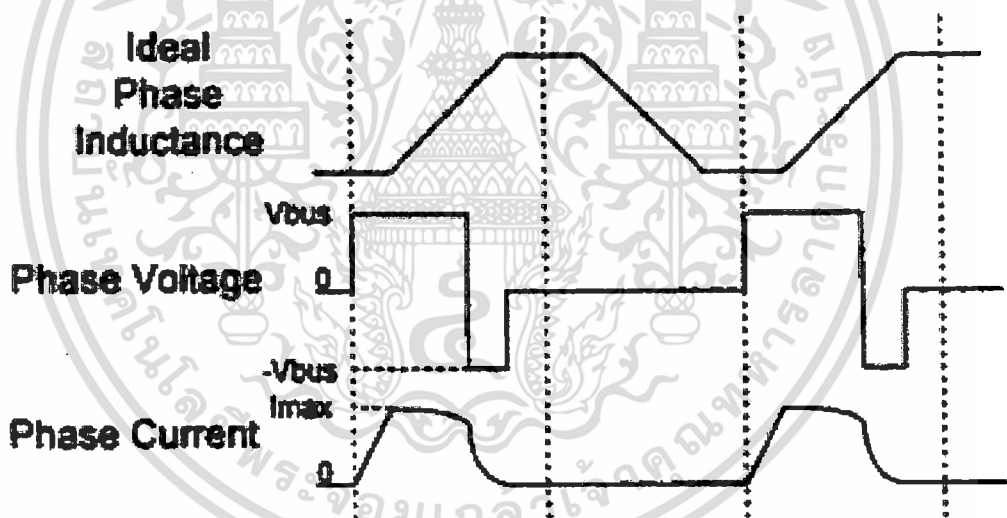
3.6 โหมดการทำงานของการทำงานขับเคลื่อน SRM

จากสมการที่ (3.12) จะพบว่าเมื่อต้องการสร้างแรงบิดทางด้านขด SRM ก็ควรได้รับพลังงานในช่วงที่ค่าอินดักแตนซ์กำลังเพิ่มขึ้นขณะที่โรเตอร์เคลื่อนตัว ในสมการที่ (3.13) และ ใน (2.20) พบว่ามีตัวแปรทั้ง 3 ตัว คือ แอมพลิจูดค่ากระแส ตำแหน่งสวิตช์ ON และ ตำแหน่งสวิตช์ OFF ที่สามารถใช้สำหรับการควบคุมค่าแรงบิดของ SRM ได้ สำหรับ SRM เริ่มทำงานที่ย่านความเร็วที่ทำให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับ (Back- e_{mf}) มีค่าเท่ากับแรงดันดีซีบัส ย่านความเร็วนี้จะถูกเรียกว่าย่านความเร็วฐาน (Base speed) ย่านความเร็วที่มีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วหลักนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านกลับจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันดีซีบัส จากสมการที่ (2.21) พบว่าเมื่อสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ถูก ON และ OFF เพื่อจ่ายพลังงาน และดูดคืนพลังงานให้กับขดลวดสเตเตอร์ตามลำดับ ก็จะทำให้ค่ากระแสมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับไปด้วย แอมพลิจูดกระแสเฟสสามารถถูกปรับค่าจาก 0 แอมป์จนถึงค่าพิกัดได้โดยการ ON สวิตช์ หรือ OFF สวิตช์ นอกจากนี้การควบคุมกระแสที่ค่าพิกัดสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส หรือ การควบคุมแบบ PWM ซึ่งลักษณะรูปคลื่นของกระแสเฟส แรงดัน และ เส้นแรงคลื่นเกี่ยวของ SRM ขณะที่ความเร็วโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วฐานถูกแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นของค่าอินดักแตนซ์ แรงดัน และ ค่ากระแส ขณะ SRM ทำงานที่ย่านความเร็วต่ำ

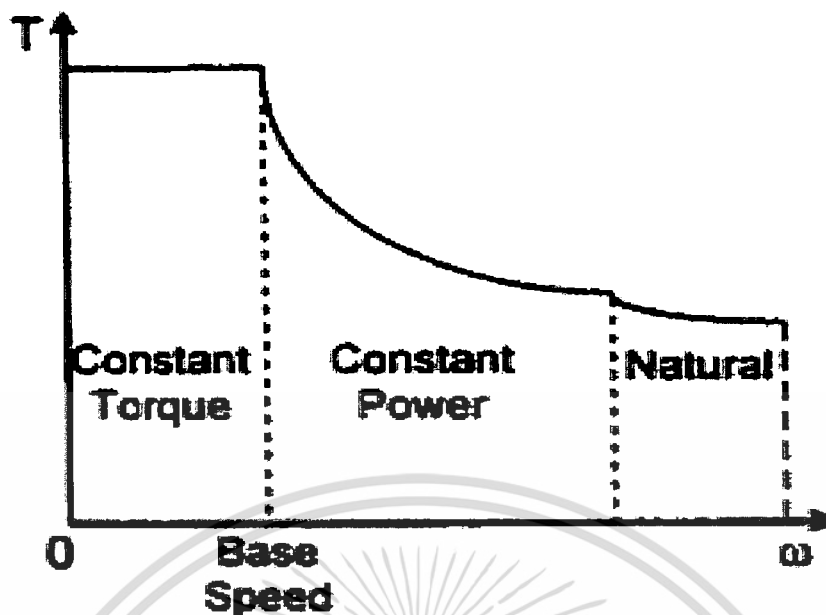
เมื่อความเร็วของโรเตอร์มีค่ามากกว่าค่าความเร็วฐานสิ่งที่เกิดขึ้น คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ(Back-emf) จะมีค่าสูงกว่าแรงดันดีซีบัส ดังนั้นขณะที่ตำแหน่งโรเตอร์อยู่ในช่วงที่ความชันของอินดักแตนซ์มีค่าเป็นบวก ค่ากระแสเฟสก็อาจจะมีค่าลดลงได้ถึงแม้ว่าสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์กำลัง ON อยู่ก็ตาม และขณะที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่าสูงกว่าแรงดันดีซีบัสนั้นค่ากระแสเฟสจะถูกจำกัดค่าไว้โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ดังนั้นถ้าต้องการทำให้ค่ากระแสเพิ่มขึ้นเพื่อให้ค่าแรงบิดมีค่ามากขึ้นด้วยนั้นโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยเริ่มจ่ายพลังงานให้กับ ขดลวดสเตเตอร์ก่อนที่โรเตอร์จะเคลื่อนตัวมาอยู่ ณ ตำแหน่งที่ไม่โอไลน์เมนต์ และตำแหน่งการ ON สวิตช์ก็จะค่อยๆเปลี่ยนไปตามค่าความเร็วโรเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับแปรผันตามความเร็วโรเตอร์ก็จะส่งผลทำให้ค่ากระแสเฟส และ ค่าแรงบิดก็จะแปรผกผันกับค่าความเร็วโรเตอร์ไปด้วย ถ้าตำแหน่งการ ON มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อสร้างค่ากระแสเฟสในขดลวด สเตเตอร์ให้มีค่าสูงขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุดก็จะลดลงเกือบเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นค่ากำลังสูงสุด (Maximum power) ของการขับเคลื่อน SRM มีค่าเกือบจะคงที่ รูปคลื่นในช่วงที่มอเตอร์ทำงานที่ย่านความเร็วสูงแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นของค่ากระแส แรงดัน อินดักแตนซ์ในช่วงที่มอเตอร์ทำงานที่ย่านความเร็วสูง (ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีบัส)

ตำแหน่งการ ON สวิตช์จะถูกจำกัดโดยบริเวณที่ค่าอินดักแตนซ์โพรไฟล์ที่มีความชันเป็นลบ ซึ่งแปรผันตามกับตำแหน่งโรเตอร์ ถ้าความเร็วโรเตอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถหาตำแหน่งการ ON สวิตช์ที่ทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นได้อีก ดังนั้นค่าแรงบิดจะลดลงจนทำให้ SRM เปลี่ยนโหมดการทำงานไปอยู่ใน Natural mode operation ซึ่งกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว ของ SRM แสดงได้ดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

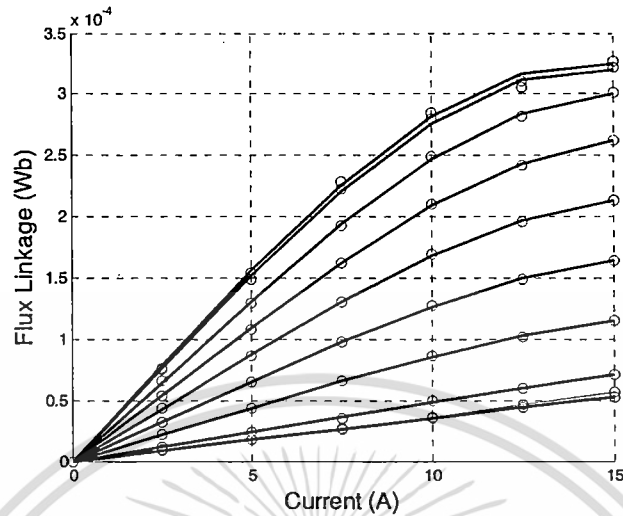


รูปที่ 3.16 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วของ SRM

3.7 การควบคุม SRM ขณะเริ่มหมุน (Control of the SRM drive at standstill)

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการควบคุม SRM ขณะเริ่มหมุนซึ่งประกอบด้วยหลักการเบื้องต้น และ ทฤษฎีของเทคนิคดังกล่าว วัตถุประสงค์ของเทคนิคการควบคุม SRM ขณะเริ่มหมุนนี้ คือ สามารถทำให้ SRM เริ่มหมุนไปในทิศทางที่ถูกต้อง โดยทั่วไปก่อนที่ SRM จะเริ่มหมุนนั้นต้องมีการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้น (Initial rotor position) โดยทำให้ขั้วของโรเตอร์ และ ขั้วของสเตเตอร์อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันก่อน (Alignment) จากนั้นขดลวดสเตเตอร์ที่สามารถสร้างแรงบิดค่าบวกได้จะถูกจ่ายพลังงานให้เพื่อทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนได้ถูกทิศทาง แต่ปัญหาที่เกิดจากโรเตอร์เริ่มหมุนผิดทิศทาง (Rotor kicking-back) หรือ การแกว่งของสัญญาณทิศทางเริ่มหมุน (Oscillation) ยังคงเกิดขึ้นได้ในช่วงที่ทำให้ขั้วของโรเตอร์ และ ขั้วของสเตเตอร์อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน นอกจากนี้การจ่ายพลังงานให้กับขดลวดสเตเตอร์อย่างเป็นลำดับตามทิศทางเริ่มหมุนที่ต้องการก็ยังเป็นอีกวิธีที่นิยมใช้กันเพื่อทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนได้ถูกทิศทางแต่ค่าแรงบิดค่าลบก็ยังคงเกิดขึ้นได้ในช่วงที่มีการจ่ายพลังงานส่งผลทำให้บางครั้งโรเตอร์เริ่มหมุนผิดทิศทาง หรือ ถูกล็อกอยู่กับที่ เพื่อให้โรเตอร์เริ่มหมุนโดยปราศจากการแกว่งของทิศทางเริ่มหมุน ซึ่ง J.Bu และ L.Xu ได้นำเสนอการกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์พร้อมกันทุกเฟสที่มีคาบเวลาน้อยมาก และทำการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้นโดยอ้างอิงจากกราฟคุณลักษณะเส้นแรงคล่องเกี่ยว ค่ากระแสตำแหน่งโรเตอร์ ของ SRM ซึ่งกราฟคุณลักษณะเส้นแรงคล่องเกี่ยว-ค่ากระแส-ตำแหน่งโรเตอร์ของ SRM แบบ 12/8 แสดงในรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 กราฟคุณสมบัติขณะเส้นแรงค้ำเกี่ยว-ค่ากระแส-ตำแหน่งโรเตอร์ของSRM12/8

ซึ่งจุดด้อยของเทคนิคดังกล่าวนี้ คือ ค่ากระแสที่ได้จากการทดสอบนั้นต้องมีค่าสูง จากรูปที่ 3.18 ที่ค่ากระแสต่ำกว่า 1A เส้นกราฟจะมีลักษณะชิดกันมากดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดเนื่องจากการวัดค่ากระแส หรือ การประมาณค่าเส้นแรงค้ำเกี่ยวจะส่งผลทำให้ค่าตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณมีความผิดพลาดมาก สำหรับค่ากระแสที่สามารถนำไปประมาณตำแหน่งโรเตอร์ได้ถูกต่อนั้นควรอยู่ 15%ของค่ากระแสพิกัดขณะที่ทำการทดสอบส่งพัลส์แรงดันไปที่ขดลวดสเตเตอร์ นอกจากนี้ค่ากระแสที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดแรงบิด (Motoring Torque) ที่เฟลาของ SRM ส่งผลให้โรเตอร์อาจเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นเดิมได้ขณะทดสอบด้วยพัลส์แรงดัน ด้วยเหตุนี้เทคนิคนี้จึงไม่การันตีเสถียรภาพการเริ่มหมุนของ SRM แต่สำหรับเทคนิคการควบคุม SRM ขณะเริ่มหมุนที่ได้พัฒนาขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดเด่น คือ

1. พัลส์แรงดันที่ส่งเข้าไปในขดลวดสเตเตอร์มีช่วงแคบ (Short-duration, t_0) จึงทำให้ค่ากระแสที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ
2. ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ไม่มีความซับซ้อนมากเนื่องจากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์คิวของบิคสไปลน์เพื่อประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์
3. ไม่จำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลกราฟคุณสมบัติเส้นแรงค้ำเกี่ยว-ค่ากระแส-ตำแหน่งโรเตอร์จำนวนมาก เนื่องจากการใช้สัมประสิทธิ์คิวบิคสไปลน์ที่มีจำนวนน้อยที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่ยั้ง

3.7.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการควบคุม SRM ขณะเริ่มหมุนที่นำเสนอ (Fundamental principle of the proposed method)

เทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ของ SRM ในขณะที่อยู่หนึ่งสามารถกระทำได้ดังต่อไปนี้

1. ส่งพัลส์แรงดันที่มีช่วงแคบ เข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์พร้อมกันทุกเฟส
2. เลือกพัลส์กระแสที่เหมาะสมไปใช้ในการประมาณค่าเริ่มต้นของตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง
3. เลือกเฟสที่สามารถสร้างแรงบิดทางบวกในทิศทางที่ต้องการขณะเริ่มหมุนตามตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ สมการแรงดันต่อเฟสของ SRM แสดงได้ คือ

$$v = iR + L \frac{di}{dt} + \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \quad (3.4)$$

เมื่อขดลวดสเตเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยพัลส์แรงดันพร้อมกันทุกเฟสส่งผลทำให้เกิดพัลส์กระแสที่มีระดับต่ำในแต่ละเฟสขึ้น ดังนั้นค่าแรงดันตกคร่อมที่ตัวต้านทานในสมการที่ (3.4) จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากไม่พิจารณาการอิ่มตัวของแม่เหล็กในกรณีที่พัลส์กระแสจากการทดสอบมีค่าต่ำมาก ในขณะที่เทอมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (Back-emf) มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากขณะทำการทดสอบนั้น โรเตอร์หยุดอยู่หนึ่งค่า ω_m มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการแรงดันเฟสที่นำมาพิจารณาขณะทีโรเตอร์อยู่หนึ่งคือ

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (3.5)$$

เมื่อ L คือ ค่าอินดักแตนซ์ที่ยังไม่เกิดการอิ่มตัว (Unsaturated phase inductance) จากสมการที่ (3.5) เมื่อกำหนดเงื่อนไขในการพิจารณา SRM ขณะอยู่หนึ่ง

1. ไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส เนื่องจากค่ากระแสที่ได้จากการตรวจสอบมีค่าต่ำมาก
2. ไม่พิจารณาผลของกระแสไหลวนในแกนเหล็ก เนื่องจากค่ากระแสที่ได้จากการตรวจสอบมีค่าต่ำมาก
3. โรเตอร์หยุดอยู่หนึ่งในขณะที่ทำการทดสอบ โดยส่งพัลส์แรงดันเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์
4. วงจรแม่เหล็กไม่เกิดการอิ่มตัว เนื่องจากค่ากระแสที่ได้จากการตรวจสอบมีค่าต่ำมาก
5. ไม่พิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานขดลวดสเตเตอร์ เนื่องจากความกว้างของพัลส์แรงดันตรวจสอบที่ใช้มีขนาดแคบมาก

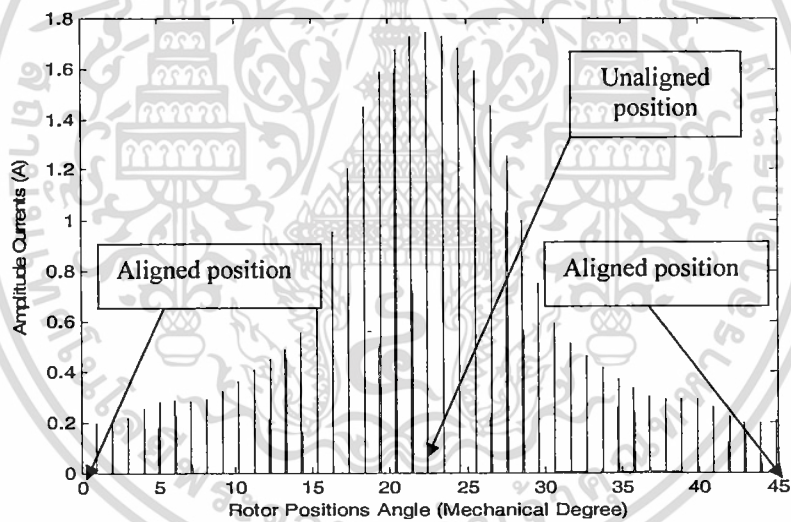
เมื่อต้องการพิจารณาค่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแสจากสมการที่ (3.6) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$i_{\text{peak}} = \frac{VT}{L(\theta)} \quad T \in [0, t_0] \quad (3.6)$$

เมื่อ T คือ ช่วงเวลาในการทดสอบพัลส์แรงดัน V คือ พัลส์แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ $L(\theta)$ คือ อินครีเมนทัลอินดักแตนซ์ ณ ตำแหน่งโรเตอร์

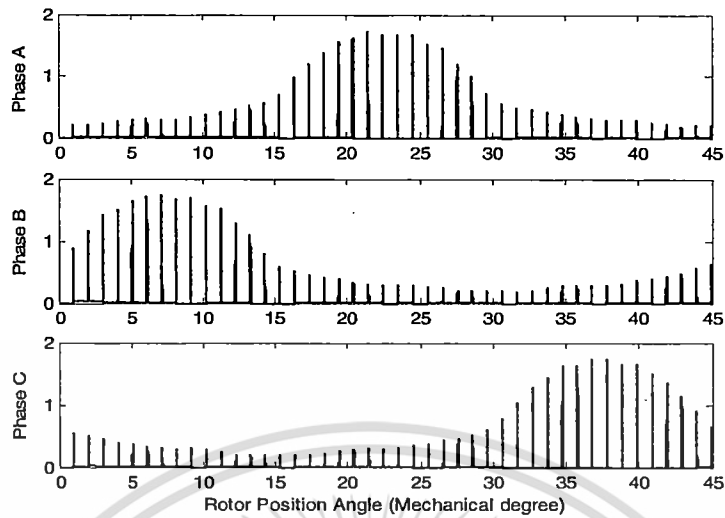
3.7.2 การเลือกพัลส์กระแสสำหรับการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง (Selection the phase for rotor position estimation)

เมื่อทำการจำลองเทคนิคที่นำเสนอนี้ด้วยการส่งพัลส์แรงดัน เพื่อสังเกตค่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแส ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยเริ่มที่มุม $\theta_A = 0^\circ$ จนถึง $\theta_A = 45^\circ$ โดยแต่ละมุมห่างกัน 2.5° ซึ่งพัลส์กระแสของเฟส A แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 พัลส์กระแสที่ได้จากการทดสอบ ณ ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ

จากรูปที่ 3.18 สังเกตได้ว่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแสมีค่าที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้ขณะที่โรเตอร์อยู่หนึ่งเราก็ยังสามารถระบุตำแหน่งโรเตอร์ ณ มุมต่างๆได้



รูปที่ 3.19 แอมพลิจูดของพัลส์กระแสเฟส A B และ C

เมื่อทดสอบพัลส์แรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์พร้อมกันทุกเฟส ดังนั้นพัลส์กระแสจึงมีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 3.19 ซึ่งอาจทำให้สงสัยว่าพัลส์กระแสเฟสใดที่เหมาะสมนำไปใช้ประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง ซึ่งเมื่อทำการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งด้วยเทคนิคควิบิตสไปล์โดยใช้ค่าพัลส์กระแสทั้ง 3 เฟส โดยทำการแบ่งช่วงในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ช่วงละ 2.5° (เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส กับ ตำแหน่ง โรเตอร์มีจุดเปลี่ยนเว้า น้อย และ เป็นฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเก็บค่ากระแสทุกตำแหน่งโรเตอร์) จากมุม $\theta = 0^\circ$ ถึง $\theta = 45^\circ$ จึงสามารถทราบได้ว่าพัลส์กระแสเฟสใดที่ประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้แม่นยำที่สุด ณ ค่ามุม θ ต่างๆ ซึ่งการประมาณค่าดังกล่าว ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งที่ได้จากการประมาณพัลส์กระแสทั้ง 3 เฟส

θ_{Actual}	$\hat{\theta}_A$	$\hat{\theta}_B$	$\hat{\theta}_C$
$\theta_A = 0^\circ$	0.06°	0.00°	0.00°
$\theta_A = 2.5^\circ$	0.10°	2.5°	2.49°
$\theta_A = 5^\circ$	5.40°	4.99°	4.99°
$\theta_A = 7.5^\circ$	5.52°	7.50°	9.47°
$\theta_A = 10^\circ$	10.00°	10.00°	9.59°
$\theta_A = 12.5^\circ$	12.50°	12.49°	15.01°
$\theta_A = 15^\circ$	14.99°	15°	15.10°
$\theta_A = 17.5^\circ$	17.5°	17.49°	15.10°

$\theta_A = 20^\circ$	19.99°	19.99°	20.40°
$\theta_A = 22.5^\circ$	22.50°	24.47°	20.92°
$\theta_A = 25^\circ$	25°	24.95°	25.00°
$\theta_A = 27.5^\circ$	27.49°	30.10°	27.50°
$\theta_A = 30^\circ$	30.00°	30.06°	29.99°
$\theta_A = 32.5^\circ$	32.49°	30.10°	32.50°
$\theta_A = 35^\circ$	34.99°	35.40°	34.99°
$\theta_A = 37.5^\circ$	39.47°	35.52°	37.50°
$\theta_A = 40^\circ$	39.59°	40.00°	40.00°
$\theta_A = 42.5^\circ$	45.01°	42.50°	42.49°
$\theta_A = 45^\circ$	45.06°	44.49°	44.99°

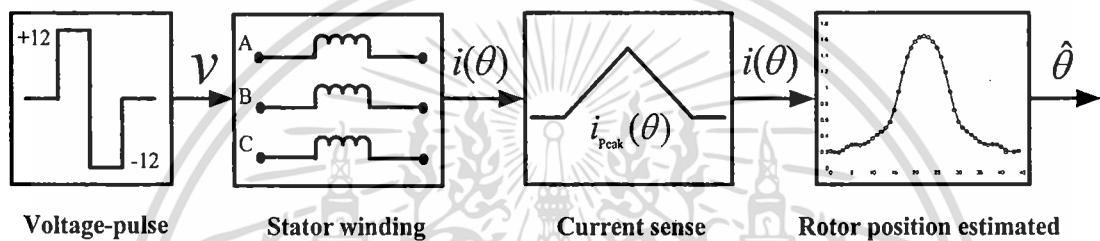
จากตารางที่ 3.1 นี้จึงสามารถสรุปเงื่อนไขเพื่อสร้างอัลกอริทึมในการเลือกพัลส์กระแสที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการเลือกพัลส์กระแสสำหรับประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง

Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Estimation
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	B or C
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 7.5^\circ$	B or C
$I_b > I_c = I_a$	$\theta = 7.5^\circ$	B
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ < \theta < 15^\circ$	A or B
$I_b = I_a > I_c$	$\theta = 15^\circ$	A or B
$I_a > I_b > I_c$	$15^\circ < \theta < 22.5^\circ$	A or B
$I_a > I_c = I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	A
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 30^\circ$	A or C
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	A or C
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 37.5^\circ$	A or C
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	C
$I_c > I_a > I_b$	$37.5^\circ < \theta < 45^\circ$	B or C
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	B or C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวอย่างถ้า $I_b > I_c > I_a$ ดังนั้นค่าพัลส์กระแสเฟส B หรือ เฟส C จะถูกเลือกนำไปประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง ซึ่งผลที่ได้นั้นจากตารางที่ 3.1 สังเกตได้ว่าพัลส์กระแสของทั้ง 2 เฟสนั้นเมื่อนำไปคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์แล้ว สามารถประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำ แต่ขณะที่พัลส์กระแสของเฟส A ถู้นำไปประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งแล้วผลที่เกิดขึ้นคือ ปรากฏว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ เนื่องจากแอมพลิจูดของพัลส์กระแสเฟส A นั้นมีค่าต่ำมาก และ ค่ายอดของพัลส์กระแสเฟส A ยังมีแนวโน้มของการลดระดับลงด้วย ดังนั้นพัลส์กระแสเฟส A จึงไม่เหมาะนำมาพิจารณาในช่วงเงื่อนไข $0^\circ < \theta < 7.5^\circ$ จากหลักการข้างต้นจึงสามารถสร้างไดอะแกรมของอัลกอริทึมในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมของการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง

3.7.3 การเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน (Selection the Phase to Excitation)

จากการจำลองโครงสร้าง SRM ด้วยโปรแกรม Finite Element Analysis เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของ SRM ดังรูปที่ 3.1 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์โพสไฟล์ ค่ากระแส และ ตำแหน่งโรเตอร์ในรูปที่ 3.2 ทำให้สังเกตได้ว่าเมื่อค่ากระแสกำลังลดลงปรากฏว่าอินดักแตนซ์โพสไฟล์จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสัดส่วนที่ผกผันกัน ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (3.6) ดังนั้นเมื่อสังเกตแนวโน้มของพัลส์กระแสทั้ง 3 เฟสในรูปที่ 3.19 ในแต่ละช่วงตำแหน่งโรเตอร์จากมุม $\theta = 0^\circ$ จนถึง $\theta = 45^\circ$ ที่ตำแหน่งโรเตอร์ต่างๆ จะปรากฏพัลส์กระแสที่มีแอมพลิจูดต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้สามารถนำไปใช้หาขดลวดสเตเตอร์ที่สามารถทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนไปในทิศทางที่ต้องการได้ เมื่อมีการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดสเตเตอร์จากหลักการดังกล่าวในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้สร้างอัลกอริทึมสำหรับการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนของลำดับเฟส C-B-A และ A-B-C ไว้ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขสำหรับการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในลำดับเฟส C-B-A

Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Excitation
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 2.5^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$2.5^\circ \leq \theta < 5^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$5^\circ \leq \theta < 7.5^\circ$	C
$I_b > I_c = I_a$	$\theta = 7.5^\circ$	C
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ < \theta < 10^\circ$	B or C
$I_b > I_a > I_c$	$10^\circ \leq \theta < 12.5^\circ$	B or C
$I_b > I_a > I_c$	$12.5^\circ \leq \theta < 15^\circ$	B or C
$I_b = I_a > I_c$	$\theta = 15^\circ$	B
$I_a > I_b > I_c$	$15^\circ < \theta < 17.5^\circ$	B
$I_a > I_b > I_c$	$17.5^\circ \leq \theta < 20^\circ$	B
$I_a > I_b > I_c$	$20^\circ \leq \theta < 22.5^\circ$	B
$I_a > I_c = I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	B
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 25^\circ$	A or B
$I_a > I_c > I_b$	$25^\circ \leq \theta < 27.5^\circ$	A or B
$I_a > I_c > I_b$	$27.5^\circ \leq \theta < 30^\circ$	A or B
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 32.5^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$32.5^\circ \leq \theta < 35^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$35^\circ \leq \theta < 37.5^\circ$	A
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$37.5^\circ < \theta < 40^\circ$	A or C
$I_c > I_a > I_b$	$40^\circ \leq \theta < 42.5^\circ$	A or C
$I_c > I_a > I_b$	$42.5^\circ \leq \theta < 45^\circ$	A or C
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขสำหรับการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในลำดับเฟส A-B-C

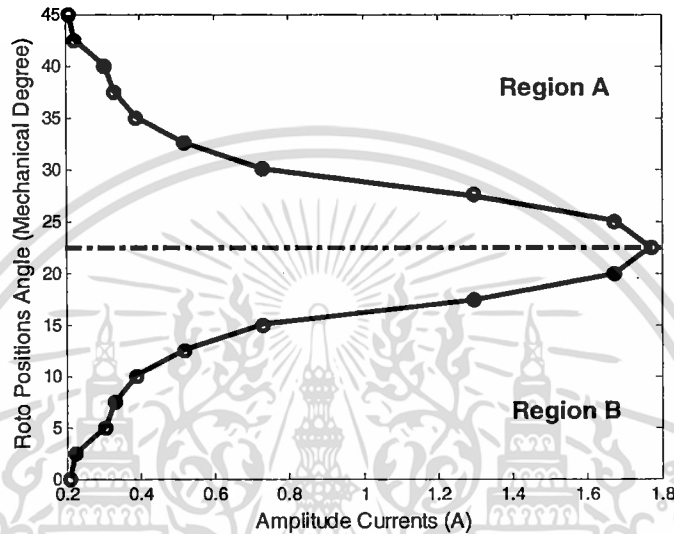
Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Excitation
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	B
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 2.5^\circ$	A or B
$I_b > I_c > I_a$	$2.5^\circ \leq \theta < 5^\circ$	A or B
$I_b > I_c > I_a$	$5^\circ \leq \theta < 7.5^\circ$	A or B
$I_b > I_c = I_a$	$\theta = 7.5^\circ$	A
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ < \theta < 10^\circ$	A
$I_b > I_a > I_c$	$10^\circ \leq \theta < 12.5^\circ$	A
$I_b > I_a > I_c$	$12.5^\circ \leq \theta < 15^\circ$	A
$I_b = I_a > I_c$	$\theta = 15^\circ$	A
$I_a > I_b > I_c$	$15^\circ < \theta < 17.5^\circ$	A or C
$I_a > I_b > I_c$	$17.5^\circ \leq \theta < 20^\circ$	A or C
$I_a > I_b > I_c$	$20^\circ \leq \theta < 22.5^\circ$	A or C
$I_a > I_c = I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	C
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 25^\circ$	C
$I_a > I_c > I_b$	$25^\circ \leq \theta < 27.5^\circ$	C
$I_a > I_c > I_b$	$27.5^\circ \leq \theta < 30^\circ$	C
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	C
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 32.5^\circ$	C or B
$I_c > I_a > I_b$	$32.5^\circ \leq \theta < 35^\circ$	C or B
$I_c > I_a > I_b$	$35^\circ \leq \theta < 37.5^\circ$	C or B
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	B
$I_c > I_a > I_b$	$37.5^\circ < \theta < 40^\circ$	B
$I_c > I_a > I_b$	$40^\circ \leq \theta < 42.5^\circ$	B
$I_c > I_a > I_b$	$42.5^\circ \leq \theta < 45^\circ$	B
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งโดยใช้ฟังก์ชันคิวบิกสไปไลน์

(Rotor Position Estimation Using Cubic Spline Function)

เมื่อเราทราบว่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแสเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งโรเตอร์ ดังนั้นฟังก์ชันคิวบิกสไปไลน์จึงสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งได้ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถถูกนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ฟังก์ชันคิวบิกสไปไลน์ของแอมพลิจูดพัลส์กระแส กับ ตำแหน่งโรเตอร์

เหตุผลที่ฟังก์ชันคิวบิกสไปไลน์เหมาะที่จะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ เนื่องจากค่าอินดักแตนซ์โพสไฟล์เป็นฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่อง และมีจุดเปลี่ยนเว้าไม่มากนัก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนมากในการคำนวณ เมื่อแอมพลิจูดของพัลส์กระแสมีระยะห่างกันช่วงละ $\theta = 2.5^\circ$ ซึ่งก็สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของพัลส์กระแส กับ ตำแหน่งโรเตอร์ได้โดยใช้สมการที่ (3.7)

$$y = S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (3.7)$$

เมื่อ x และ y คือ แอมพลิจูดของพัลส์กระแส และ ตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งตามลำดับ นอกจากนี้ a, b, c และ d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปไลน์ และ i คือ ช่วงบริเวณที่ใช้พิจารณา เมื่อทราบค่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแสก็จะสามารถทราบค่าตำแหน่งโรเตอร์ได้ด้วยเช่นกัน ในรูปที่ 3.22 เป็นการสร้างฟังก์ชันคิวบิกสไปไลน์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์คิวบิกสไปไลน์ที่ได้จากตารางที่ 3.5 มาคำนวณ

ตารางที่ 3.5 สัมประสิทธิ์คิวบิกสไปล์

Cubic spline coefficients			
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
-3.67e+005	31368	-554.02	2.5
-3.67e+005	23428	-159.48	0
1.07e+006	-21895	-96.48	7.5
-2.48e+005	17751	-147.47	5
32040	-5175.1	238.6	10
-3431.4	890.14	-31.78	12.5
260.35	-189.71	41.69	15
287.55	32.65	-3.02	17.5
287.55	194.92	-39.78	20
-287.55	-32.65	3.02	27.5
-260.35	189.71	-41.69	30
3431.4	-890.14	31.78	32.5
-32040	5175.1	-238.6	35
4892e+005	-17751	147.47	40
-1.07e+006	21895	96.48	37.5
3.67e+005	-23428	159.48	45
3.67e+005	-31368	554.02	42.5

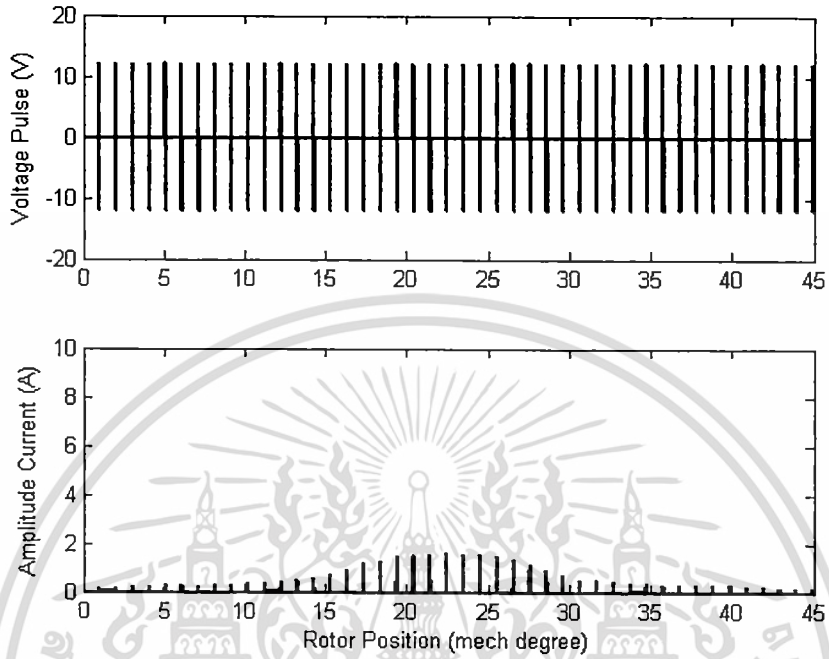
จากตารางที่ 3.5 พบว่าเป็นเมตริกซ์ขนาด 17×4 เท่านั้นที่ใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งจากรูปที่ 3.21 กราฟคิวบิกสไปล์ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ บริเวณ A และ B ซึ่งตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณควรต้องนำมาพิจารณาร่วมกับตารางที่ 3.1 ด้วยจึงจะทำให้ทราบว่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งที่ถูกต้อง

3.7.5 เทคนิคการตรวจจับแอมพลิจูดพัลส์กระแสเพื่อใช้ประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง

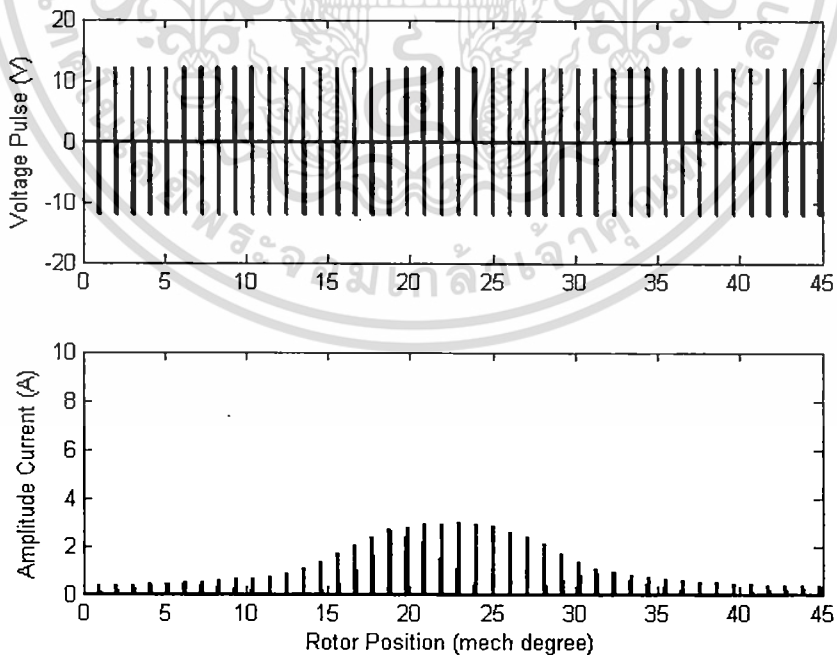
เนื่องจากขนาดของแอมพลิจูดพัลส์กระแสที่ใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งนั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์แรงดันตรวจสอบ ตัวอย่างเช่น ถ้าพัลส์แรงดันมีความกว้างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นส่งผลทำให้ค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสก็จะมียขนาดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อพัลส์แรงดันมีลักษณะแคบลงส่งผลทำให้แอมพลิจูดพัลส์กระแสมีขนาดลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.22 3.23 และ 3.24

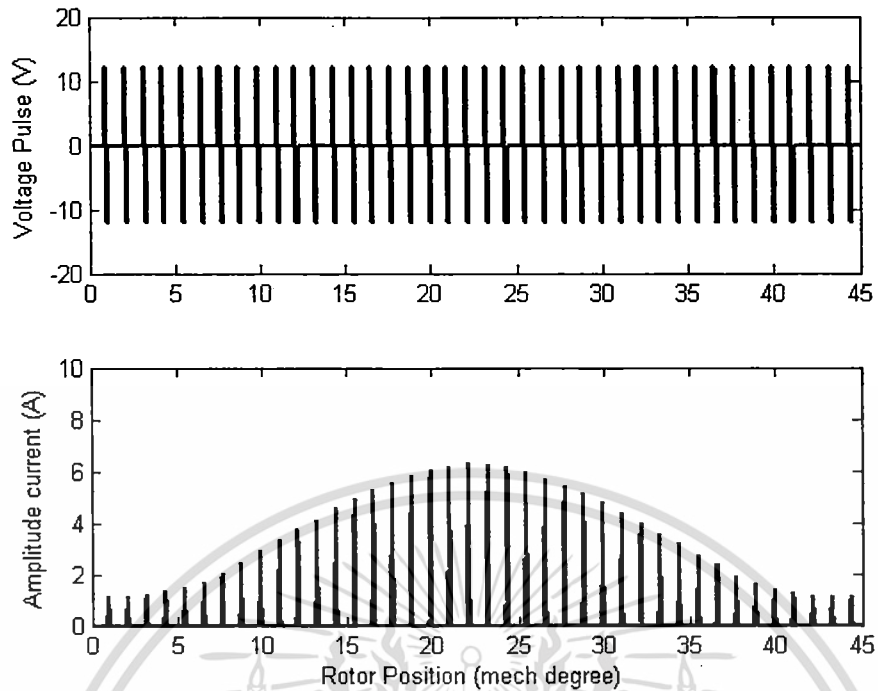


รูปที่ 3.22 พัลส์แรงดันที่มีความกว้างเท่ากับ 0.5msec และ แอมพลิจูดพัลส์กระแส



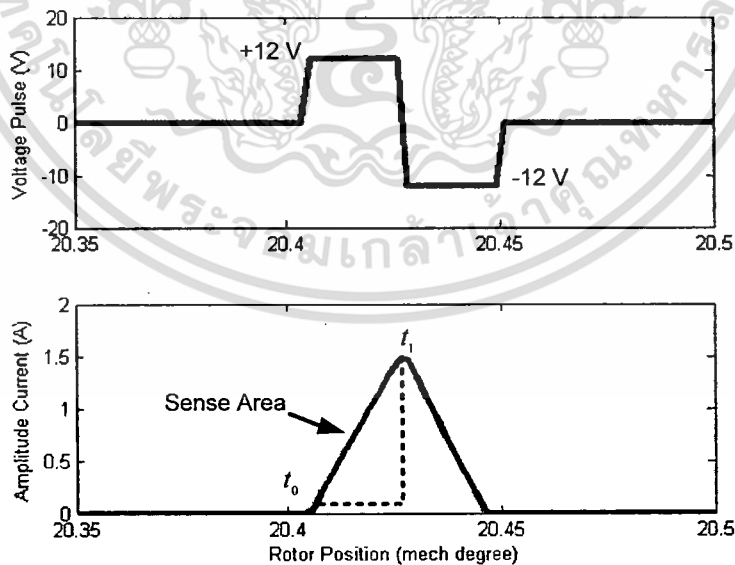
รูปที่ 3.23 พัลส์แรงดันที่มีความกว้างเท่ากับ 0.75msec และ แอมพลิจูดพัลส์กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 พัลส์แรงดันที่มีความกว้างเท่ากับ 1.0msec และ แอมพลิจูดพัลส์กระแส

แต่เนื่องจากการพิจารณาค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสขณะที่โรเตอร์อยู่นิ่งนั้นจะต้องพิจารณาเฉพาะในช่วงที่วงจรมอเตอร์ของ SRM ไม่เกิดการอิ่มตัว หรือในช่วงที่ค่ากระแสยังคงเป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การตรวจจับกระแสในบริเวณที่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้การตรวจจับกระแสของเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งที่ได้ นำเสนอนี้จึงสามารถตรวจจับค่ากระแสที่จุดใดก็ได้ในบริเวณที่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ในการ บันทึกข้อมูลแอมพลิจูดพัลส์กระแสเพื่อนำไปประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งด้วยเทคนิค วิศวกรรมไปล้นนั้นควรกระทำที่ค่าความกว้างพัลส์แรงดันตรวจสอบเดียวกันทุกข้อมูล ตัวอย่างเช่น ถ้า $t_0 = 0.5\text{ms}$ ก็ต้องใช้ค่า t_0 เดียวกันตั้งแต่ค่า $\theta_A = 0^\circ$ จนถึง $\theta_A = 45^\circ$ ในการเก็บข้อมูลใน ขั้นตอนเริ่มต้น และ ในช่วงที่มีการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบครั้งต่อไปในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง ซึ่งนี่จึงเป็นข้อควรระวังในการทดสอบเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงหลักการเบื้องต้นของการขับเคลื่อน SRM พฤติกรรมทางแม่เหล็กของ SRM พร้อมด้วยการสร้างแรงบิดทางกล และ ยัง ได้กล่าวถึงลักษณะและการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้กับ SRM รวมไปถึงโหมดการทำงานต่างๆของการขับเคลื่อน SRM จากที่ได้กล่าวแนะนำระบบขับเคลื่อน SRM ที่ได้ผ่านมาทำให้ทราบถึงข้อดีของระบบขับเคลื่อน SRM คือ

1. โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และ ราคาที่ไม่สูงของ SRM
2. ความสามารถในการทำงานที่ย่านความเร็วสูงของ SRM
3. การทำงานอย่างอิสระของคอนเวอร์เตอร์

บทที่ 4

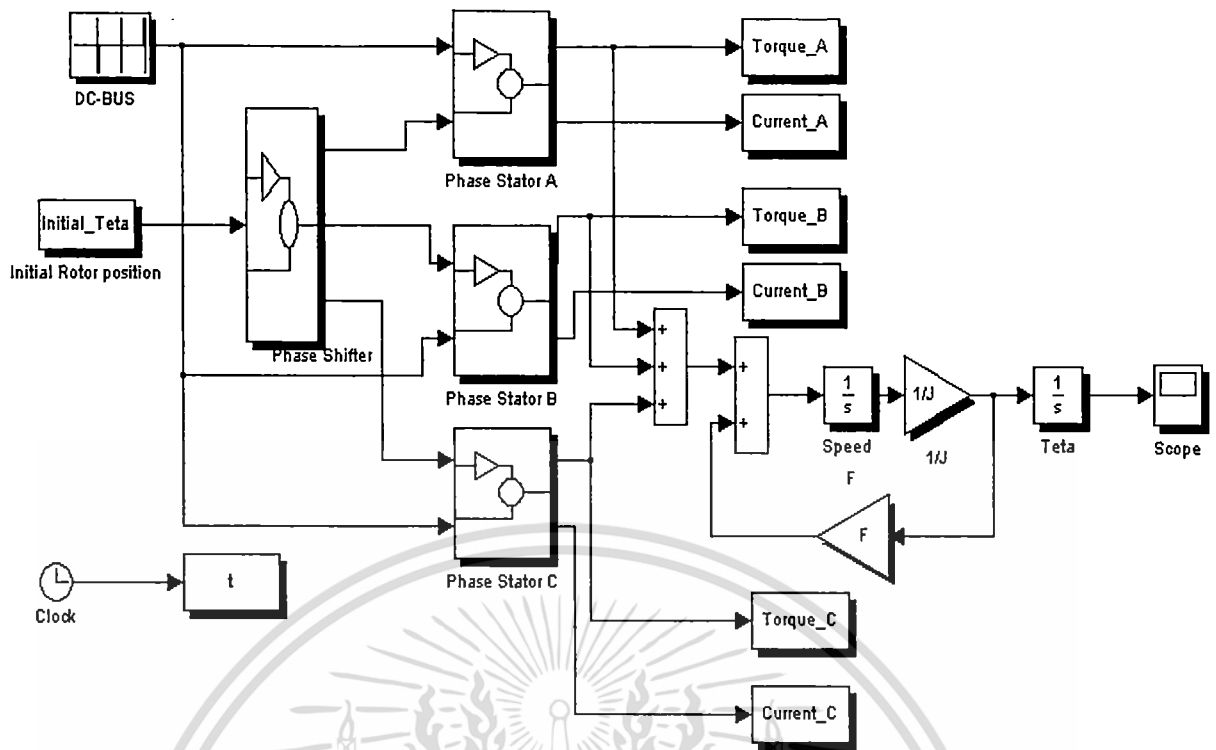
การจำลองเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง และ การเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนด้วยโปรแกรม (Matlab/Simulink)

4.1 บทนำ

เทคนิคการควบคุมระบบขับเคลื่อน SRM ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถนำไปพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อทำการทดลอง และ ใช้สังเกตพฤติกรรมการทำงานของเทคนิคดังกล่าว เพื่อนำค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสมาใช้ในการหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง จึงต้องทำการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์พร้อมกันทั้ง 3 เฟสในขั้นตอนแรก หลังจากนั้นให้ทำการเลือกค่ากระแสเฟสที่มีค่าเหมาะสมสำหรับการคำนวณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งไปคำนวณ โดยใช้ฟังก์ชันคิวบิกสไปล์เพื่อใช้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นสำหรับระบบขับเคลื่อน SRM นอกจากนี้เฟสที่สามารถทำให้ SRM เริ่มหมุนไปในทิศทางที่ต้องการก็จะถูกเลือกเพื่อใช้เป็นเฟสเริ่มต้นจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน ซึ่งขั้นตอนที่ได้กล่าวทั้งหมดนี้จะถูกนำมาจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

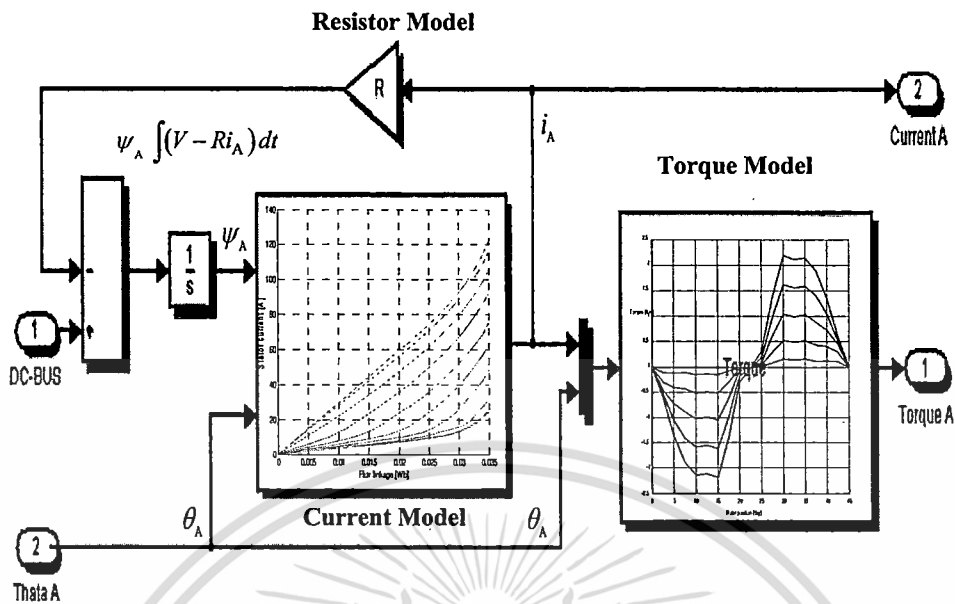
4.2 การจำลองหาค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสโดยการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบ

ในการศึกษาขั้นตอนการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้จะใช้แบบจำลองของ SRM ชนิด 12/8 แรงดัน DC-BUS = 12V โดยที่ $t_0 = 5\text{ms}$ $\theta_{on} = 22.5^\circ$ และ $\theta_{off} = 43.5^\circ$ เพื่อทำการสังเกตพฤติกรรมของพัลส์กระแสเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสได้รับค่าพัลส์แรงดันตรวจสอบขนาด 12 โวลต์ ดังนั้นจึงได้มีการสร้างแบบจำลองระบบขับเคลื่อน SRM เพื่อใช้ในการทดสอบ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



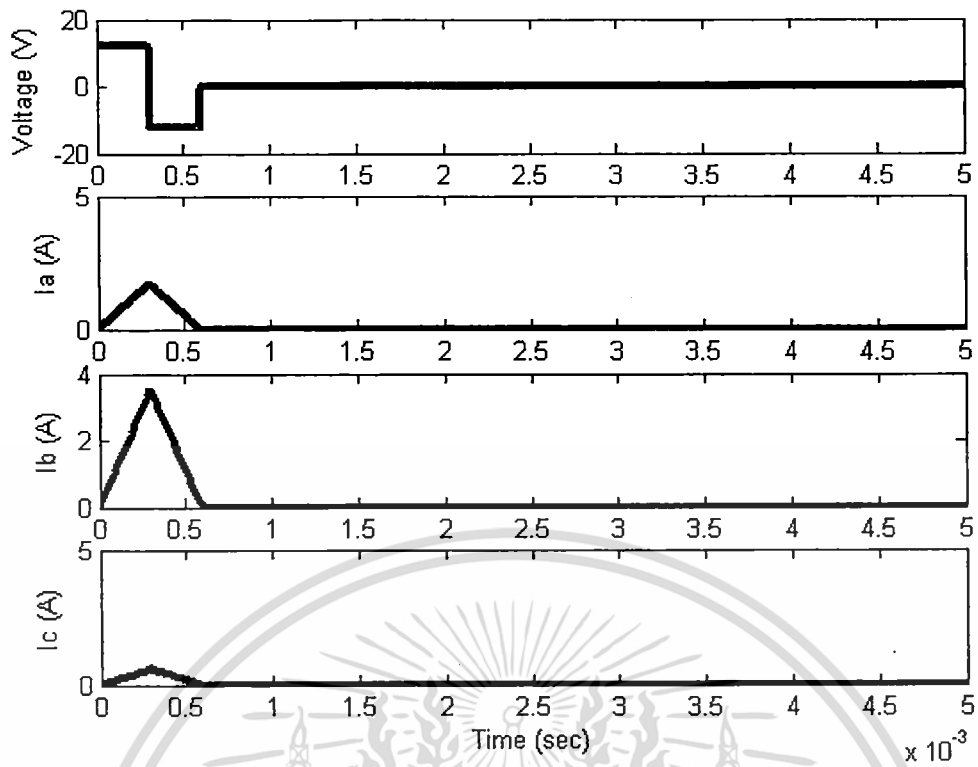
รูปที่ 4.1 ไดอะแกรม Matlab/Simulink ของแบบจำลองการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบ

จากรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วยส่วนหลักๆต่อไปนี้ คือ บล็อกแหล่งจ่ายแรงดัน DC-BUS ทำหน้าที่จ่ายพัลส์แรงดันให้กับขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส โดยมีบล็อกของตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้น (Initial Rotor Position) เป็นตัวกำหนดค่าเริ่มต้นของตำแหน่งโรเตอร์ให้กับระบบ ในส่วนของบล็อกตัวเลื่อนเฟส (Phase Shift) นั้นทำหน้าที่เลื่อนเฟสของตำแหน่งโรเตอร์เฟส A B และ เฟส C ให้ต่างกัน 15 องศาทางไฟฟ้า และ ในส่วนสุดท้าย คือ ส่วนของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส ถูกใช้เพื่อสังเกตพฤติกรรมของขดลวดสเตเตอร์เมื่อได้รับแรงดันตรวจสอบ ซึ่งโครงสร้างภายในของขดลวดสเตเตอร์เฟส A สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

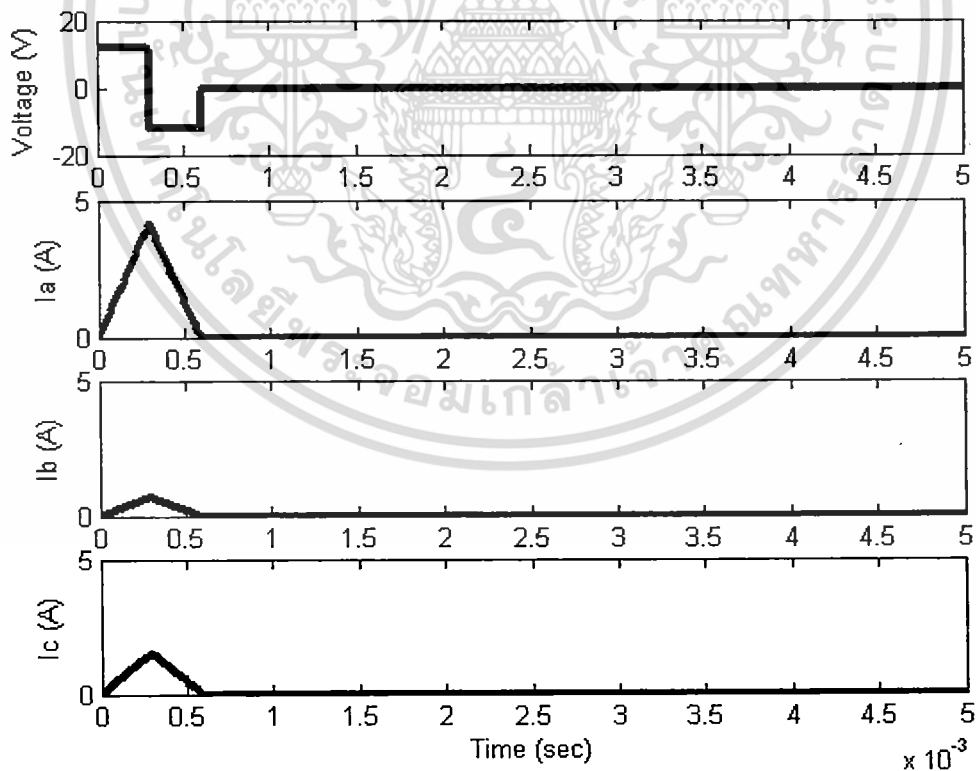


รูปที่ 4.2 โค้ดแกรมของขดลวดสเตเตอร์ของเฟส A (Phase Stator A)

จากรูปที่ 4.2 ประกอบด้วยบล็อกอินพุต 2 อินพุต คือ แรงดัน DC-BUS และ ตำแหน่งโรเตอร์ของเฟส A เพื่อต้องการหาค่ากระแสจึงต้องสร้างบล็อกแบบจำลองค่ากระแส โดยที่แบบจำลองกระแสนี้ถูกสร้างจากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งได้จากการจำลอง SRM ในส่วนของบล็อกแบบจำลองค่าแรงบิดนั้นก็สามารสรสร้างได้จากวิธีเดียวกับแบบจำลองกระแสแต่ในการทดลองนี้จะพิจารณาเพียงค่ากระแสเท่านั้นจึงจะไม่ขอกล่าวรายละเอียดของบล็อกแบบจำลองแรงบิด ณ ที่นี้ เมื่อทำการทดลองส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบเพื่อสังเกตค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสที่มุม $\theta_A \cong 13^\circ$ $\theta_A \cong 27^\circ$ และ $\theta_A \cong 43^\circ$ สามารถแสดงผลจากการจำลอง ได้ดังรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

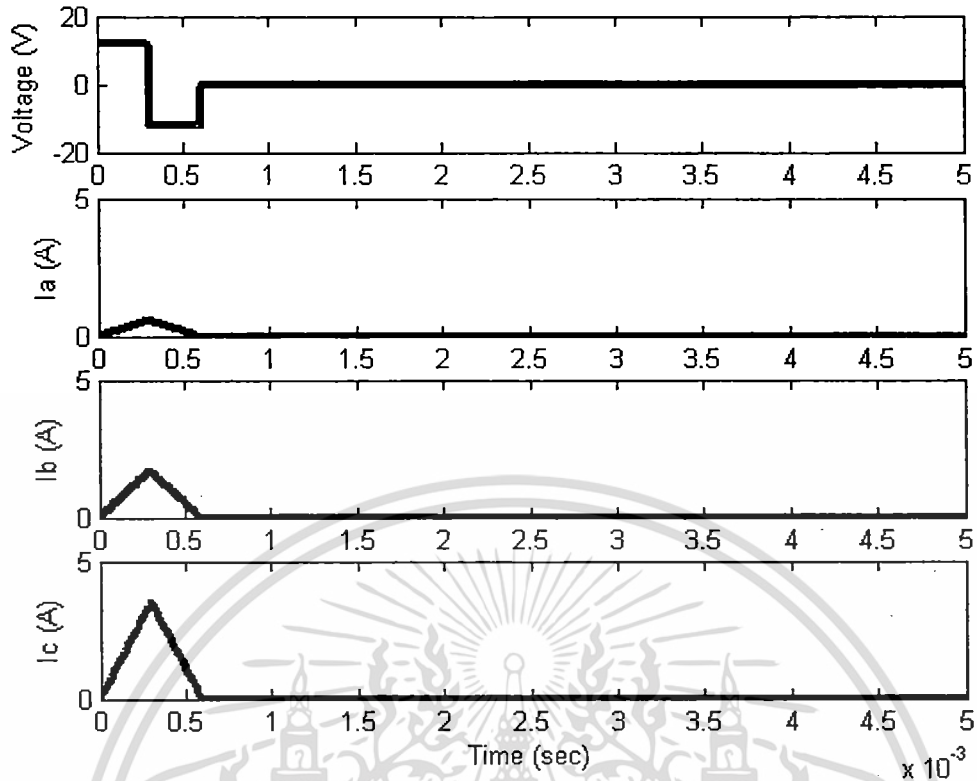


รูปที่ 4.3 กระแสของเฟส A B และ C ในช่วงที่ทดสอบพัลส์แรงดันที่ $\theta_A \cong 13^\circ$



รูปที่ 4.4 กระแสของเฟส A B และ C ในช่วงที่ทดสอบพัลส์แรงดันที่ $\theta_A \cong 27^\circ$

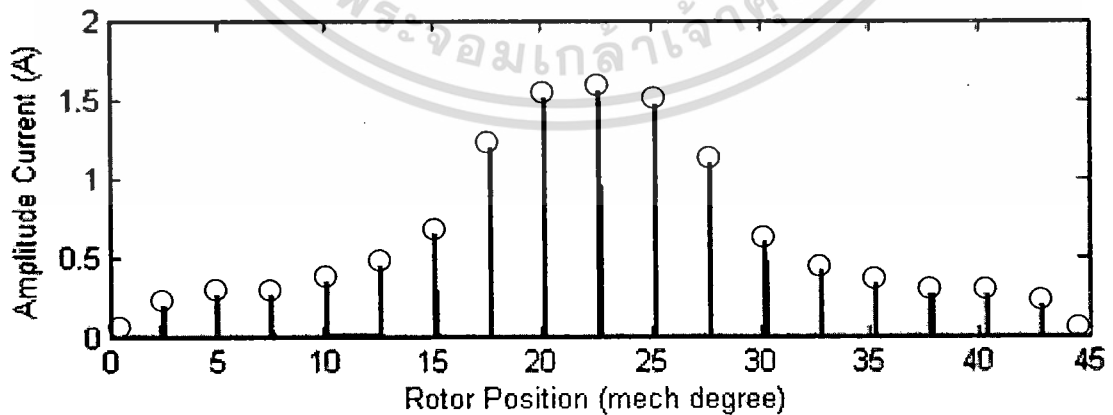
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กระแสของเฟส A B และ C ในช่วงที่ทดสอบพัลส์แรงดันที่ $\theta_A \cong 43^\circ$

4.3 การจำลองเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง

เมื่อทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแสตั้งแต่มุม $\theta_A \cong 0^\circ$ จนถึง $\theta_A \cong 45^\circ$ โดยที่แต่ละค่าของแอมพลิจูดพัลส์กระแสจะห่างกันด้วยมุม $\theta_A \cong 2.5^\circ$ จากสิ่งที่กล่าวมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ข้อมูลของแอมพลิจูดพัลส์กระแสที่ $\theta_A \cong 0^\circ$ ถึง $\theta_A \cong 45^\circ$

จากนั้นนำข้อมูลของพัลส์แอมพลิจูดกระแสในแต่ละค่าที่ได้ไปประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่
 หนึ่งโดยใช้เทคนิคการประมาณค่าระหว่างแบบคิวบิกสไปไลน์เพื่อให้ได้ค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง
 ทุกตำแหน่งตั้งแต่มุม $\theta_A \cong 0^\circ$ จนถึง $\theta_A \cong 45^\circ$ ซึ่งตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการประมาณค่าแบบ
 คิวบิกสไปไลน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

```
% Cubic_Spline.m
Clear,close

I_region_A = [Ia1 Ia2 Ia3 Ia4 Ia5 Ia6 Ia7 Ia8 Ia9 Ia10]; %ข้อมูลกระแสที่  $\theta_A = 0^\circ$  ถึง
 $\theta_A = 22.5^\circ$ 
Rotor_Position_region_A = [0:2.5:22.5]; % ตำแหน่งโรเตอร์ที่มุม  $\theta_A = 0^\circ$  ถึง  $\theta_A = 22.5^\circ$ 

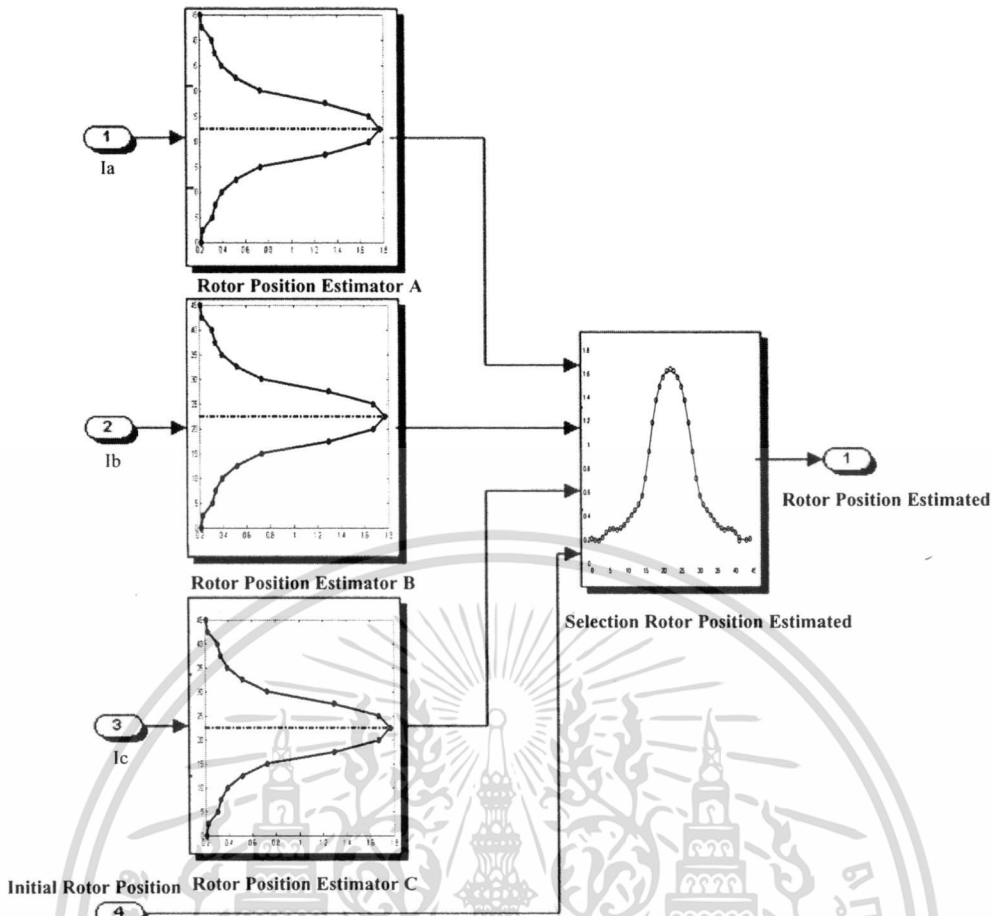
yy=spline(I_region_A,Rotor_Position_region_A);
[b,c,l,k,d]=unmkpp(yy); %ฟังก์ชัน คิวบิกสไปไลน์

I_region_B = [Ib10 Ib9 Ib8 Ib7 Ib6 Ib5 Ib4 Ib3 Ib2 Ib1]; %ข้อมูลกระแสที่  $\theta_A = 45^\circ$  ถึง
 $\theta_A = 22.5^\circ$ 
Rotor_Position_region_B = [45:-2.5:22.5]; % ตำแหน่งโรเตอร์ที่มุม  $\theta_A = 45^\circ$  ถึง  $\theta_A = 22.5^\circ$ 

mm=spline(I_region_B,Rotor_Position_region_B);
[b,c1,l,k,d]=unmkpp(mm); %ฟังก์ชัน คิวบิกสไปไลน์
```

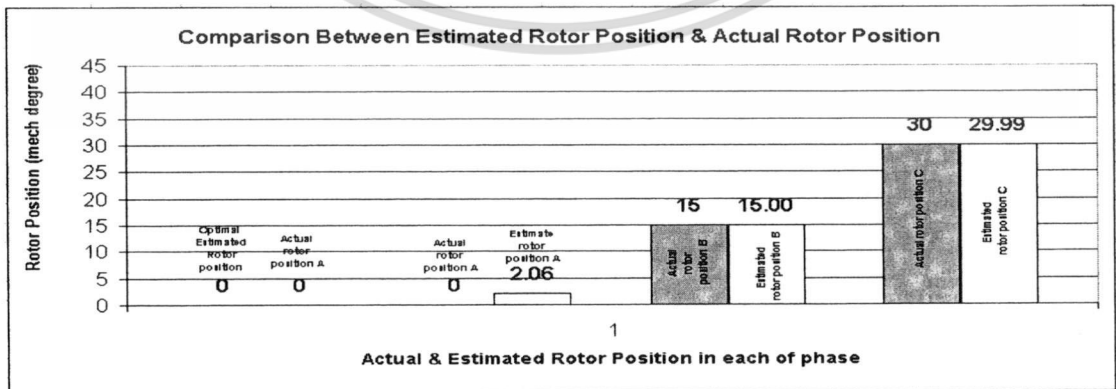
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างโปรแกรมฟังก์ชันคิวบิกสไปไลน์

แอมพลิจูดพัลส์กระแสที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะ
 อยู่หนึ่งพร้อมกันทั้ง 3 เฟส ซึ่งเฟสที่ประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งได้แม่นยำที่สุดจะถูกเลือก
 เพื่อนำมาใช้เป็นตำแหน่งโรเตอร์เริ่มต้นขณะอยู่หนึ่ง (Initial rotor position) ในระบบขับเคลื่อน SRM
 ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้อธิบายได้ดังรูปที่ 4.8



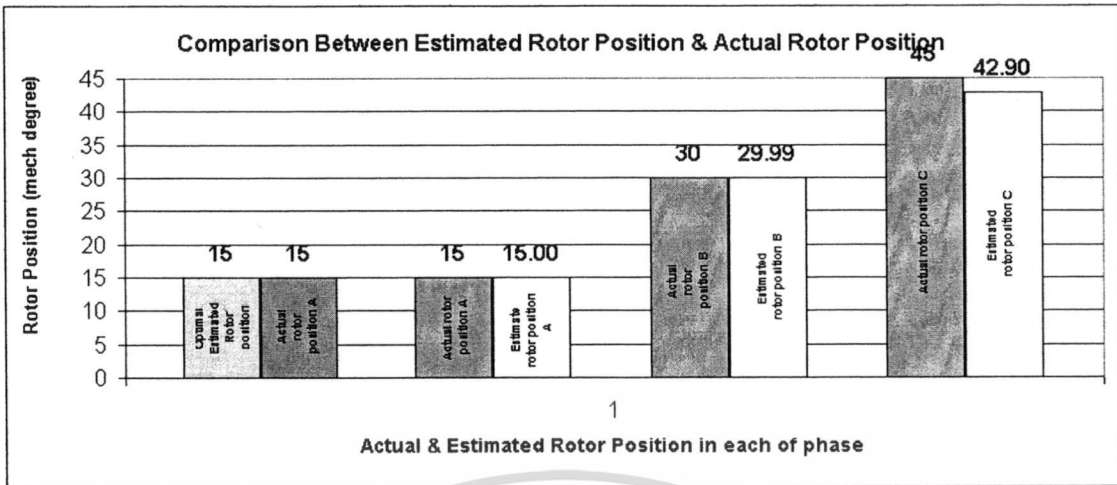
รูปที่ 4.8 โครงสร้างโปรแกรมของการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง

จากการทดสอบเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งด้วยโครงสร้างโปรแกรมในรูปที่ 4.8 ตั้งแต่มุม $\theta_A \cong 0^\circ$ จนถึง $\theta_A \cong 45^\circ$ ทำให้สามารถสร้างอัลกอริทึมในการเลือกเฟสที่เหมาะสมต่อการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งดังตารางที่ 3.2 เมื่อทำการจำลองเทคนิคการประมาณตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง ผลจากการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 จนถึงรูปที่ 4.11

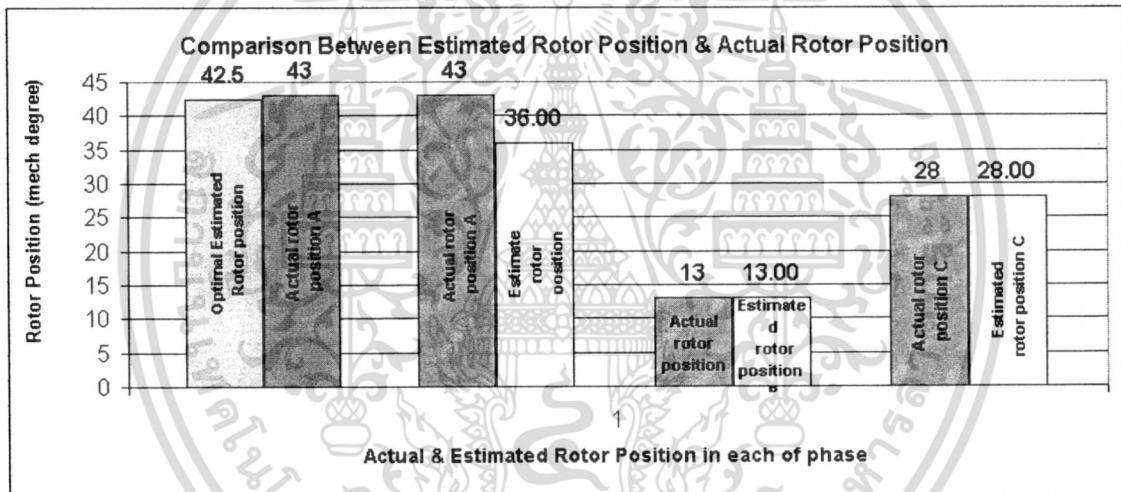


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณ ที่ $\theta_A \cong 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

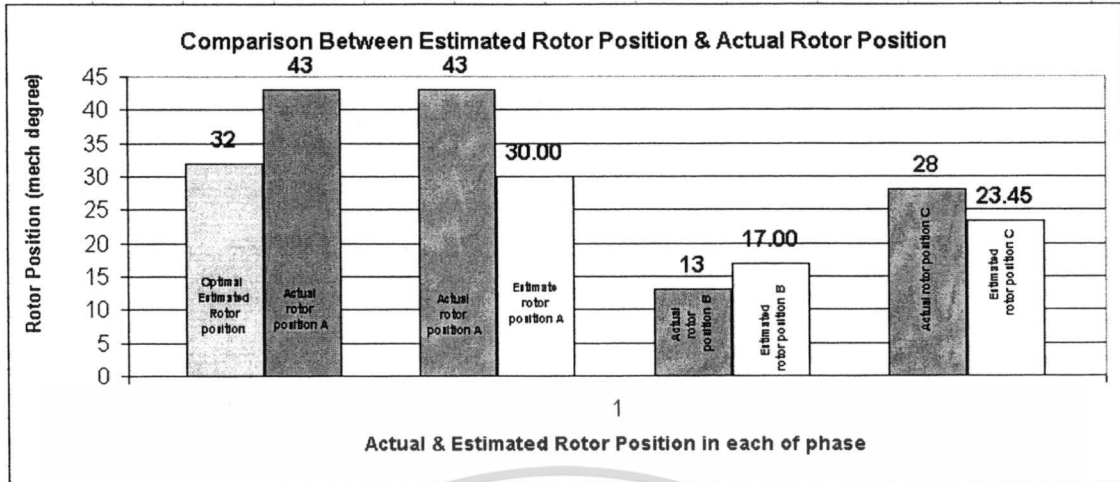


รูปที่ 4.10 ตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณที่ $\theta_A \cong 15^\circ$



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณที่ $\theta_A \cong 43^\circ$

ในกรณีที่ความกว้างของพัลส์แรงดันตรวจสอบมีค่ามากกว่าหรือ น้อยกว่า 0.5 msec จะส่งผลให้การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ เนื่องจากผลของค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสจะมีค่าแตกต่างไปจากค่าเดิมที่ได้ทำการบันทึกไว้เพื่อถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งในตอนต้น

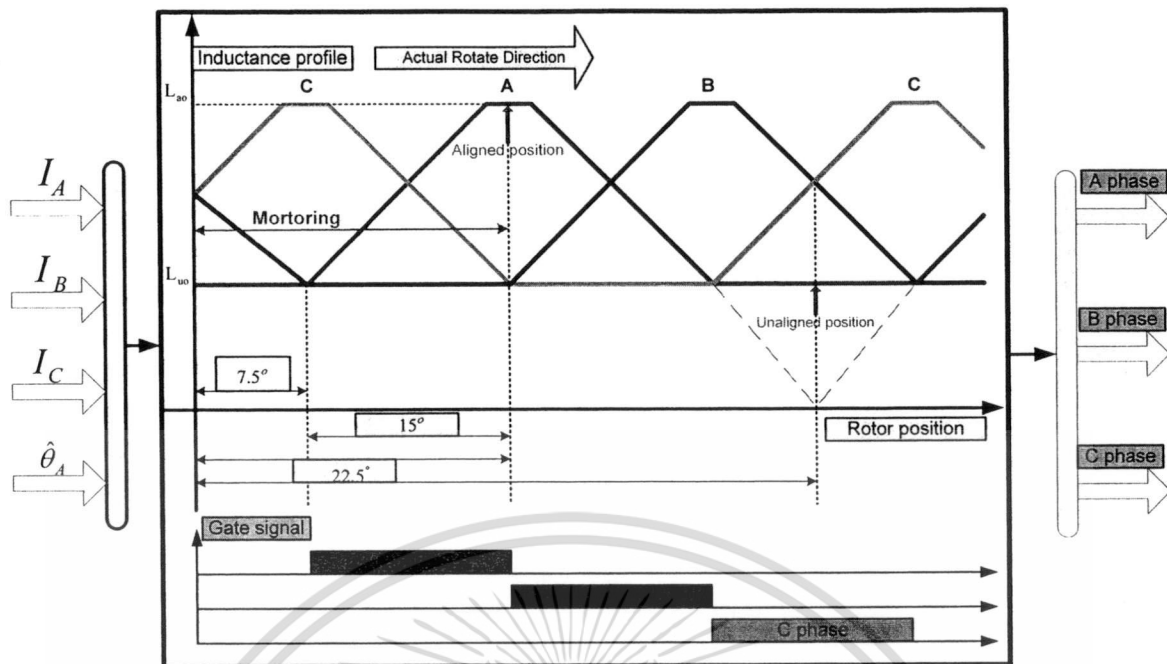


รูปที่ 4.12 ตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณ ที่ $\theta_A \cong 43^\circ$ โดยที่ $t_0 > 0.5\text{ms}$

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.12 สังเกตได้ว่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งที่ได้จากการประมาณมีความผิดพลาดค่อนข้างมากเมื่อค่า $t_0 > 0.5\text{ms}$ เนื่องจากค่าพัลส์แอมพลิจูดกระแสที่ได้การส่งพัลส์แรงดันมีค่าผิดไปจากค่าที่เคยมีการบันทึกไว้จึงเป็นผลทำให้การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งมีความผิดพลาด

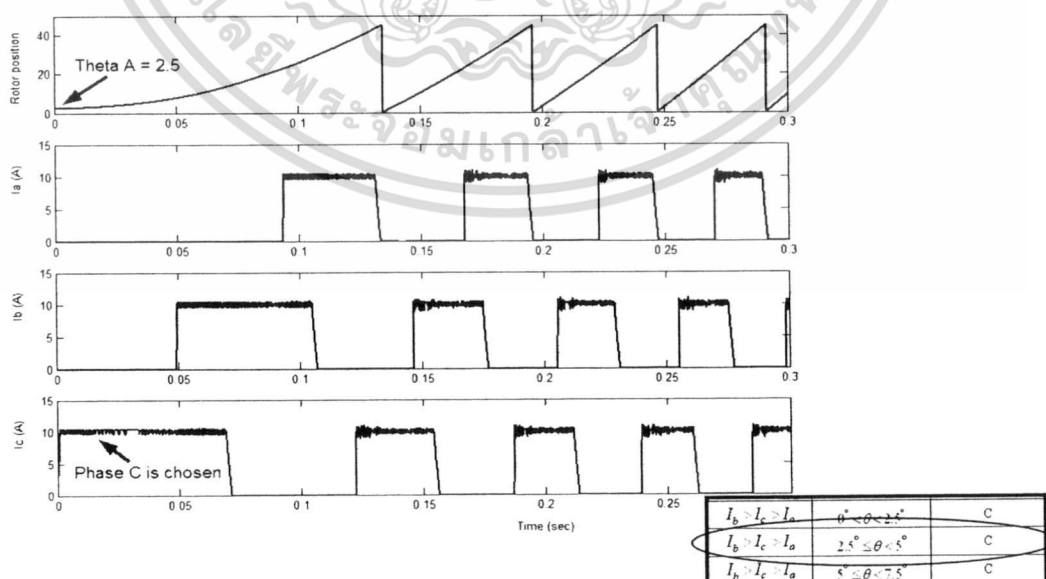
4.4 เทคนิคการเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน (Selection Technique the Phase to Excitation)

จากหลักการเบื้องต้นของเทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนในบทที่ 3 สามารถถูกนำไปจำลองการทำงานได้โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink โดยการนำค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสช่วงทั้ง 3 เฟสที่ได้จากการทดสอบโดยการส่งพัลส์แรงดันเข้าไปขดลวดสเตเตอร์ถูกนำมาพิจารณาร่วมกับค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งที่ได้จากการประมาณเพื่อใช้สำหรับการเลือกเฟสที่เหมาะสมในการจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน และเฟสที่ทำให้เกิดแรงบิดทางบวก (Positive torque) ขณะเริ่มหมุน จากรูปที่ 4.13 ในช่วงที่ค่าอินดักแตนซ์ของเฟส A กำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่ากระแสของเฟส A ในช่วงเวลานั้นก็กำลังลดค่าลง ดังนั้นเมื่อเราสามารถทราบช่วงใดที่ค่ากระแสมีค่าลดลงนั้นก็หมายถึงว่าค่าอินดักแตนซ์ช่วงนั้นก็กำลังมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นเราสามารถหาเฟสที่สามารถทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนไปในทิศทางที่ต้องการได้ด้วยการส่งให้คอนเวอร์เตอร์เริ่มจ่ายพลังงานให้กับขดลวดสเตเตอร์ที่ถูกเลือกได้รับพลังงานเป็นเฟสแรก



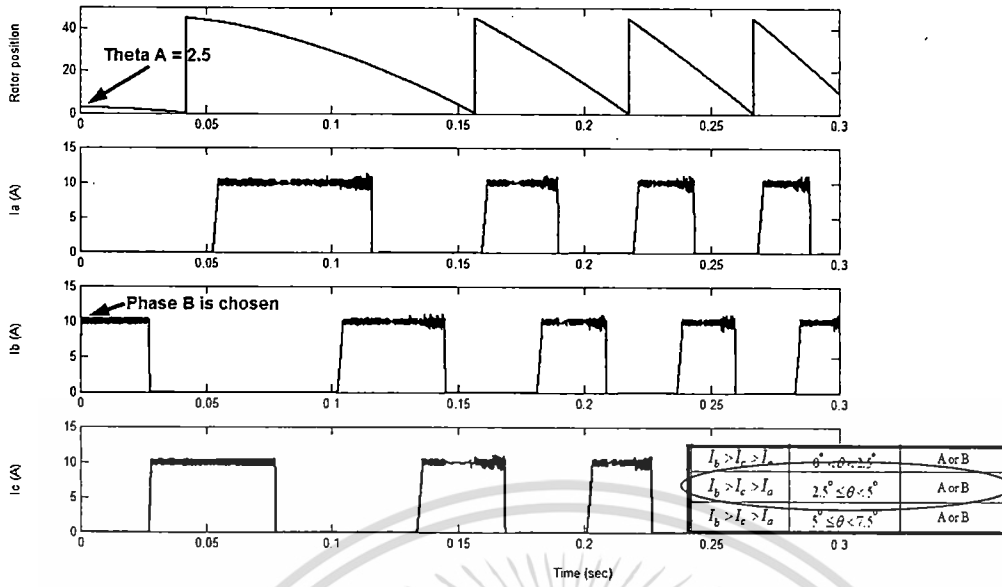
รูปที่ 4.13 โครงสร้างโปรแกรมส่วนของการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน

จากรูปที่ 4.13 เมื่อนำแอมพลิจูดพัลส์กระแสที่ได้จากการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบทั้ง 3 เฟสมาทำการทดลองขับเคลื่อน SRM ในช่วงเริ่มหมุนโดยใช้เงื่อนไขจากตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4 เพื่อเลือกเฟสที่เหมาะสมสำหรับจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนในลำดับ C-B-A และ A-B-C ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink สามารถแสดงได้รูป 4.13 จนถึง 4.22

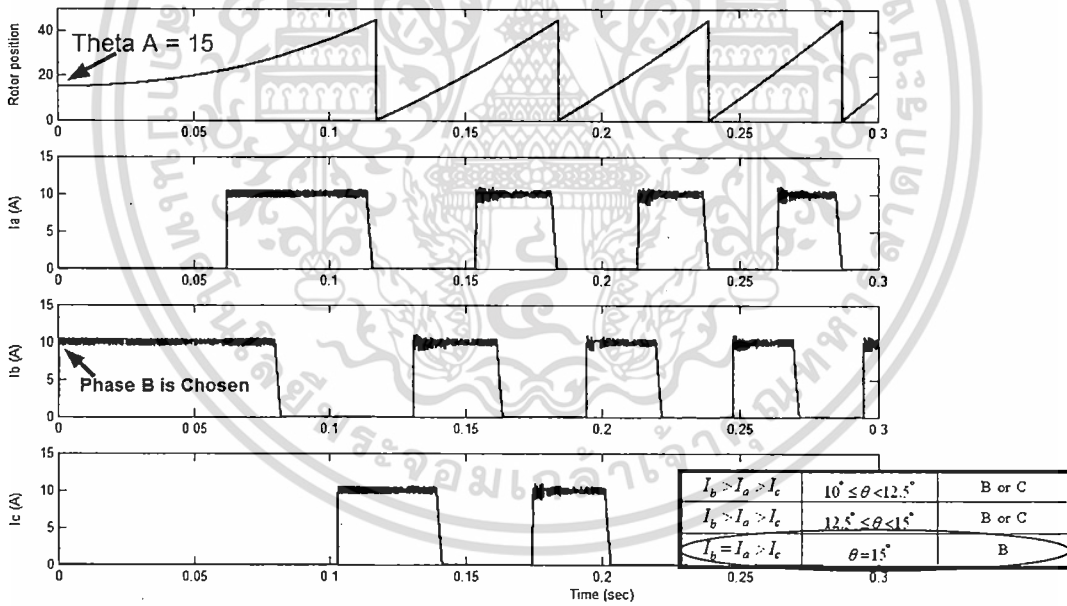


รูปที่ 4.14 เฟส C ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 2.5^\circ$ ในลำดับ C-B-A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

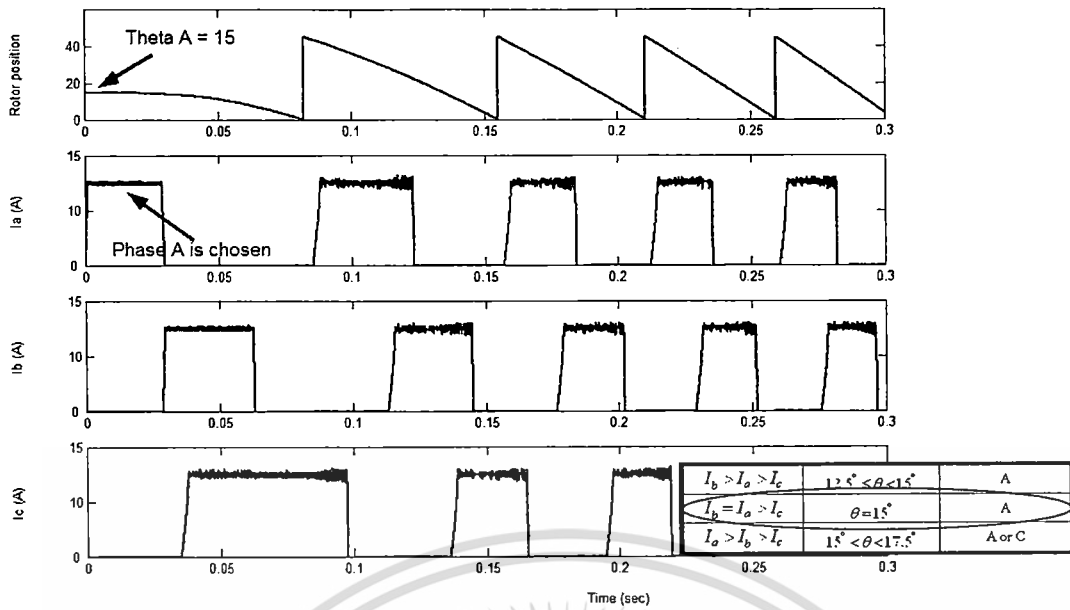


รูปที่ 4.15 เฟส B ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 2.5^\circ$ ในลำดับ A-B-C

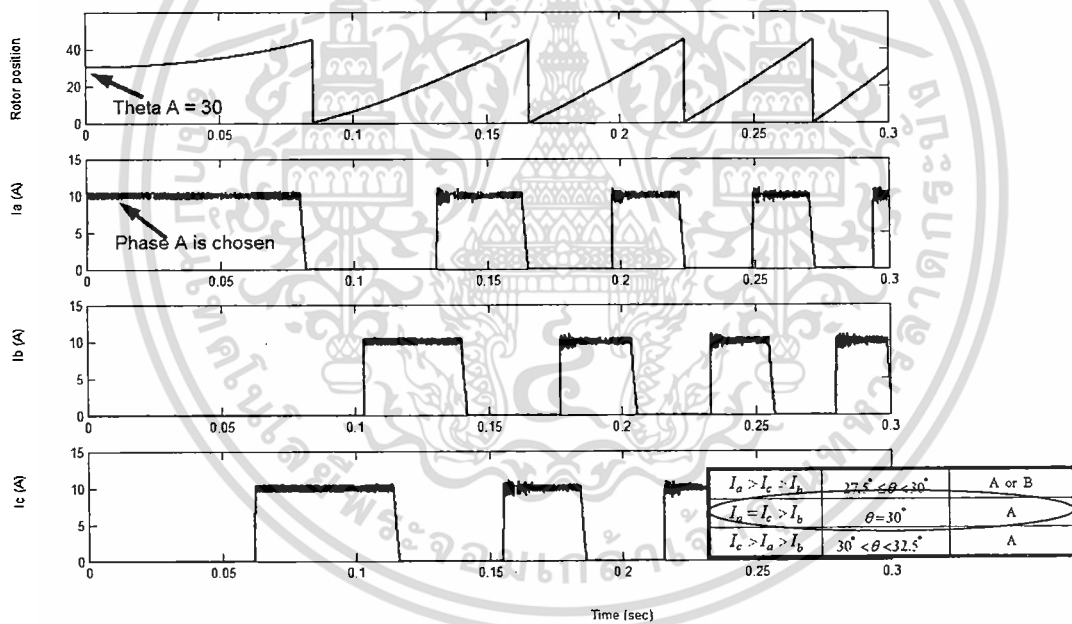


รูปที่ 4.16 เฟส B ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 15^\circ$ ในลำดับ C-B-A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



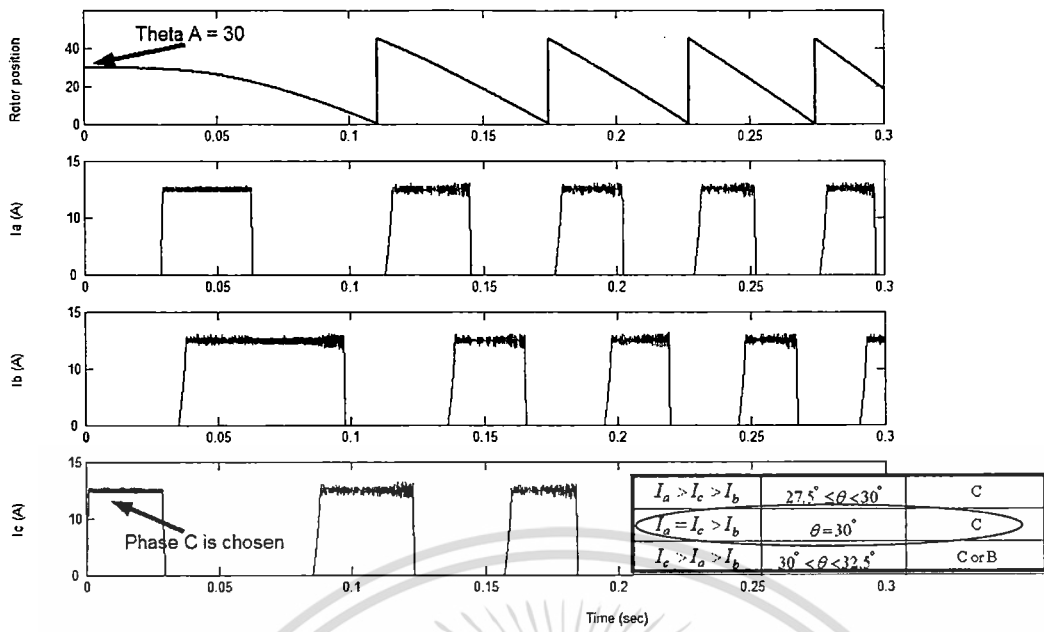
รูปที่ 4.17 เฟส A ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 15^\circ$ ในลำดับ A-B-C



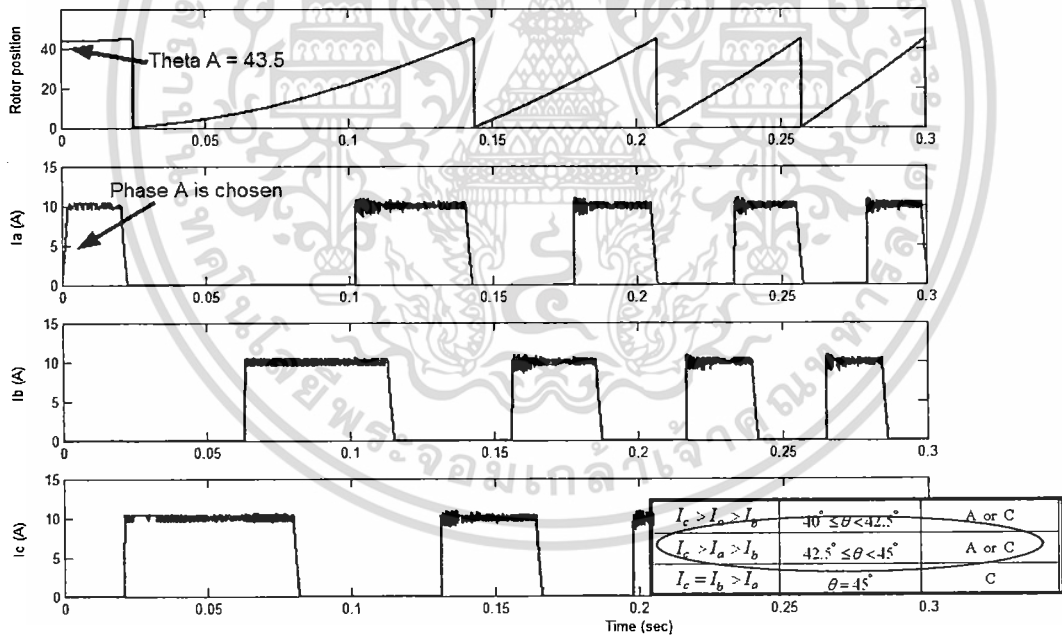
รูปที่ 4.18 เฟส A ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 30^\circ$ ในลำดับ C-B-A

๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

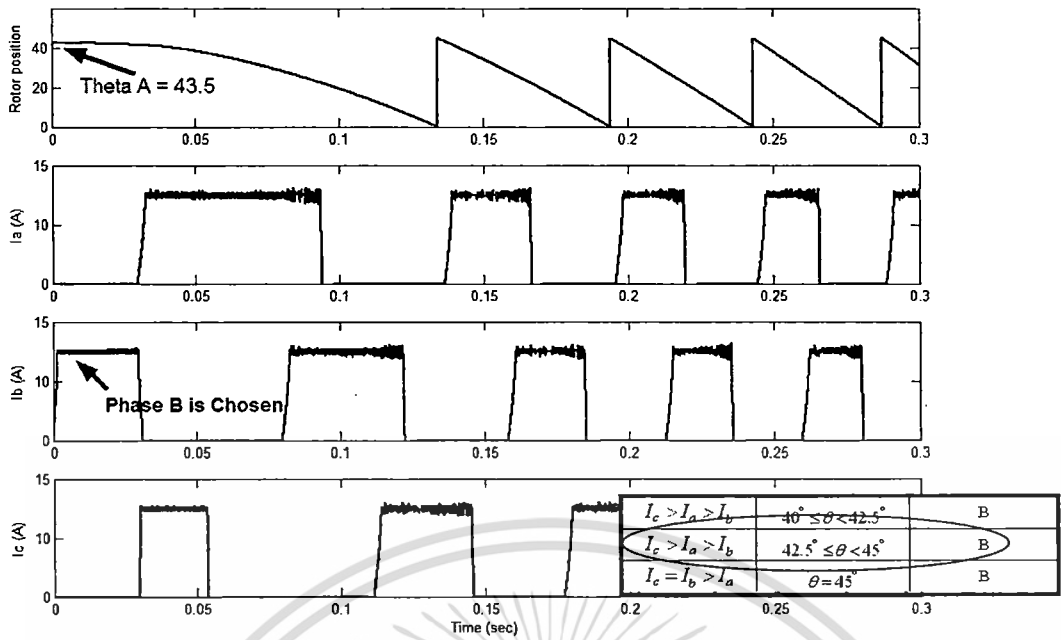


รูปที่ 4.19 เฟส C ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 30^\circ$ ในลำดับ A-B-C



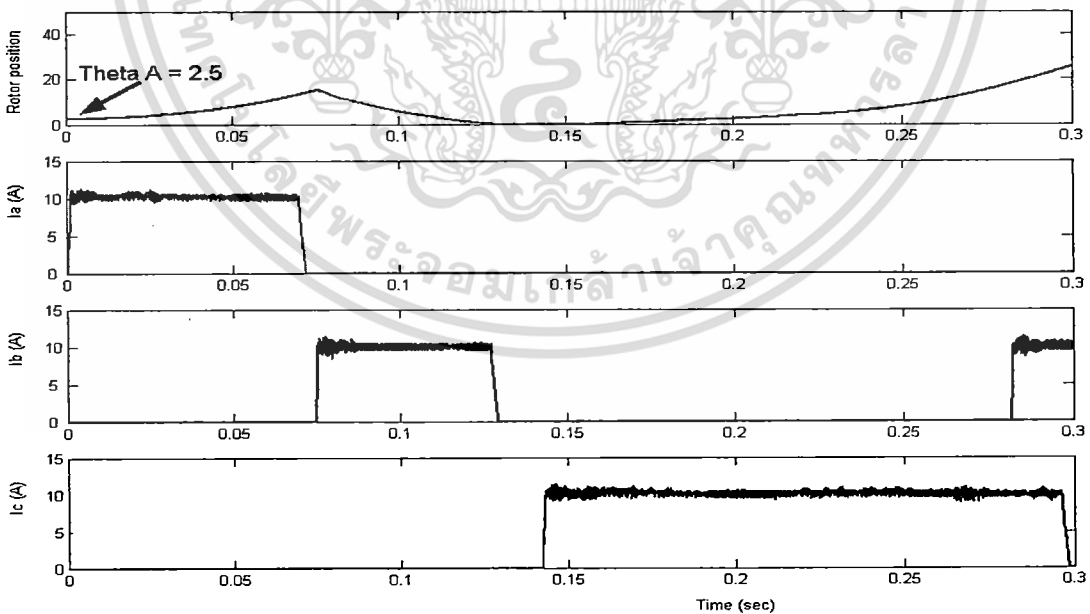
รูปที่ 4.20 เฟส A ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 43.5^\circ$ ในลำดับ C-B-A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 เฟส B ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 43.5^\circ$ ในลำดับ A-B-C

ในกรณีที่มีการเลือกเฟสที่ไม่เหมาะสมสำหรับจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน ผลที่เกิดขึ้นคือ โรเตอร์อาจจะเริ่มหมุนผิดทิศทาง หรือ ขณะที่โรเตอร์เริ่มหมุนอาจเกิดการหมุนตีกลับทางของโรเตอร์หมุนตีกลับทางทันที ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวแสดง ได้ดังรูป 4.22



รูปที่ 4.22 เฟส A ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 2.5^\circ$ ในลำดับ C-B-A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปสังเกตได้ว่าขณะที่โรเตอร์เริ่มหมุนอยู่ได้เกิดการที่โรเตอร์ถูกหมุนกลับทันทีหรือที่เรียกกันว่า(Kick-Back) เนื่องจากเฟส A ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะที่โรเตอร์เริ่มหมุน โดยที่มุมเริ่มต้นคือ $\theta_A \cong 2.5^\circ$ ซึ่งเฟสที่ควรถูกจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนนั้นควรจะเป็นเฟส C มากกว่า ถ้าต้องการให้มอเตอร์ทำงานด้วยลำดับการจ่ายพลังงาน C-B-A ดังนั้นเทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพ และ สมรรถนะของระบบขับเคลื่อน SRM ในช่วงเริ่มหมุน

4.5 สรุป

จากการทดลองเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง และ เทคนิคการเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุนด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink แสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถหาข้อมูล (ตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง และ เฟสที่ควรถูกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน) เพื่อให้ระบบขับเคลื่อนสามารถควบคุม SRM ให้เริ่มหมุนในทิศทางที่ต้องการ ได้อย่างแม่นยำ



บทที่ 5

การทดลองเทคนิคการเริ่มหมุนของ SRM

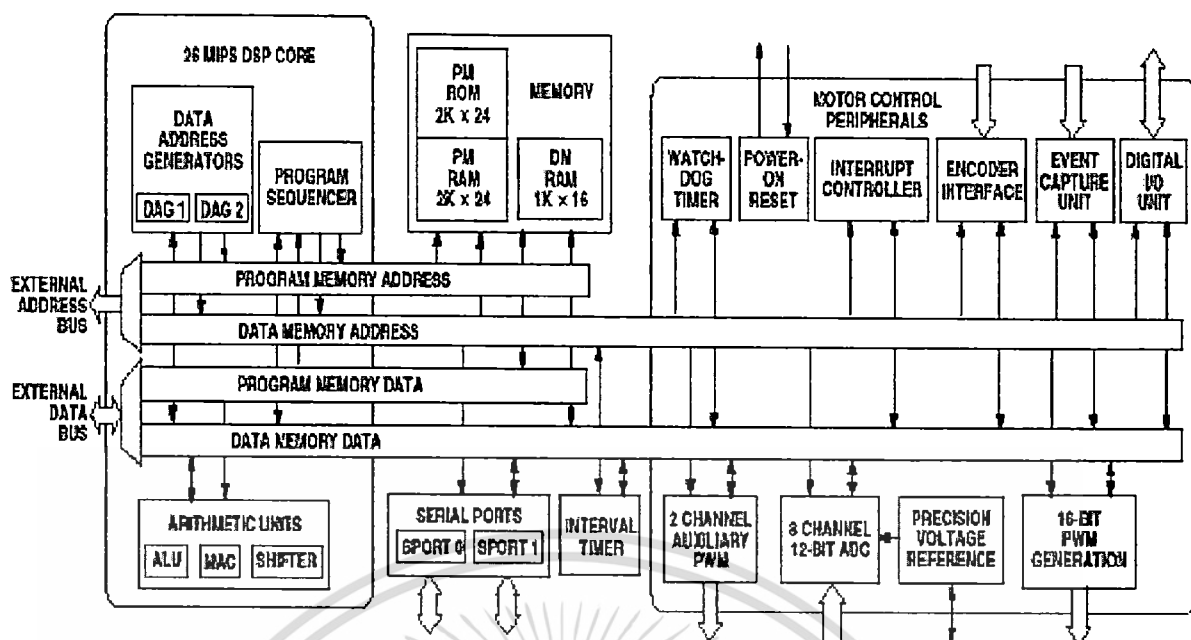
5.1 บทนำ

ฮาร์ดแวร์ที่นำมาใช้ในการทดลองเทคนิคการเริ่มหมุนของ SRM เป็นการนำเอาระบบประมวลผลแบบดิจิทัลมาใช้ในการควบคุมสัญญาณต่างๆในระบบขับเคลื่อน SRM เช่น สัญญาณเกท ไดรฟ์ ค่ากระแสเฟส ตำแหน่งโรเตอร์ และ ความเร็วโรเตอร์ เป็นต้น ส่วนสำคัญของระบบควบคุมอยู่ที่บอร์ด DSP ซึ่งจะเก็บอุปกรณ์รับค่ากระแสเฟสทั้ง 3 เฟส และ สัญญาณตำแหน่งโรเตอร์ มาทำการประมวลแล้วส่งสัญญาณเกททั้ง 6 สัญญาณไปยังเกทไดรฟ์บอร์ดเพื่อนำไปจุดขงวนสวิตซ์หลักในส่วนของวงจรกำลัง การควบคุมระบบขับเคลื่อน SRM ด้วยเทคนิคต่างๆสามารถทำได้โดยการออกแบบโปรแกรมลงใน DSP บอร์ด

5.2 อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง

5.2.1 DSP Board

ในการทดลองเทคนิคการเริ่มหมุนของ SRM ได้เลือกใช้ บอร์ด DSP ของค่าย Analog Device เนื่องจากบอร์ด DSP ในปัจจุบันเทคโนโลยีของ DSP ได้ถูกพัฒนาไปไกลมากทำให้ฟังก์ชันการทำงาน และ จุดเด่นของ โมดูลที่ใช้สำหรับการควบคุมระบบขับเคลื่อนก็มีความก้าวหน้า และ ง่ายต่อการใช้งานเป็นอย่างมากเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การประมวลผลด้วยความเร็ว 26 MIPS PWM module ADC module และ DAC module ซึ่งในวงการอุตสาหกรรมก็ได้นำเอาบอร์ด DSP มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (ACIM) มอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (PMSM) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BDCM) และ SRM ในรูปที่ 5.1 แสดงถึงโครงสร้างของ ADMC401 บอร์ด

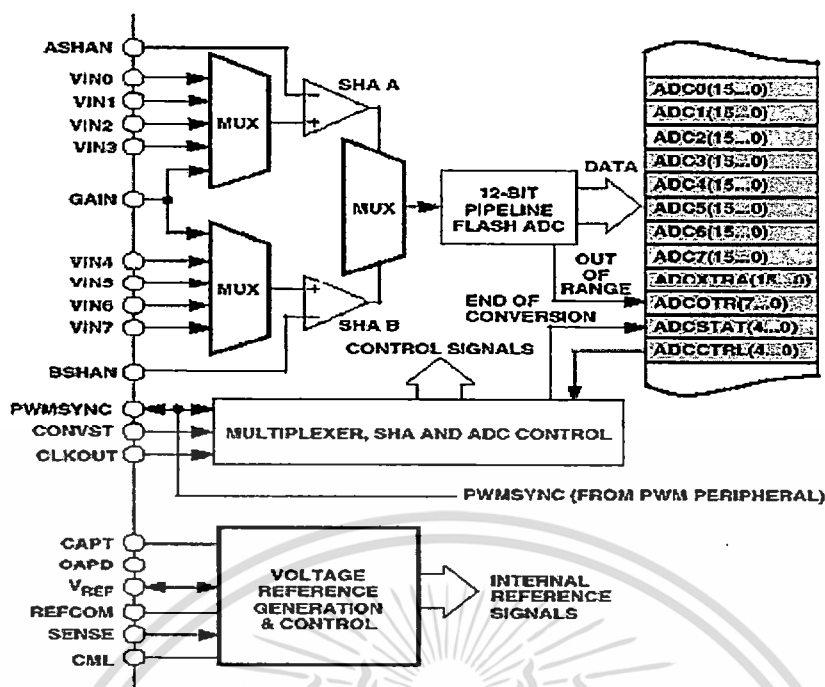


รูปที่ 5.1 โครงสร้างของบอร์ด DSP รุ่น ADMC401

DSP รุ่นADM401ถูกออกแบบให้ง่าย และ สะดวกต่อการใช้งานเนื่องจากในบอร์ด DSP ได้ถูกออกแบบให้ มีฟังก์ชัน ADC ขนาด 12 บิต ซึ่งสามารถแซมปลิงสัญญาณอนาล็อกในเวลาเดียวกันได้ถึงทั้ง 4 อินพุต ฟังก์ชันของตัวสร้างสัญญาณ PWM แบบ 3 เฟสขนาด 16 บิต และ ฟังก์ชันของการเชื่อมต่อสัญญาณจากอุปกรณ์จับตำแหน่งชนิดอินครีเมนทรัลเพื่อใช้สำหรับป้อนสัญญาณของตำแหน่งโรเตอร์ไปยังหน่วยประมวลผล ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

5.2.1.1 Analog-to-digital Conversion (ADC) unit

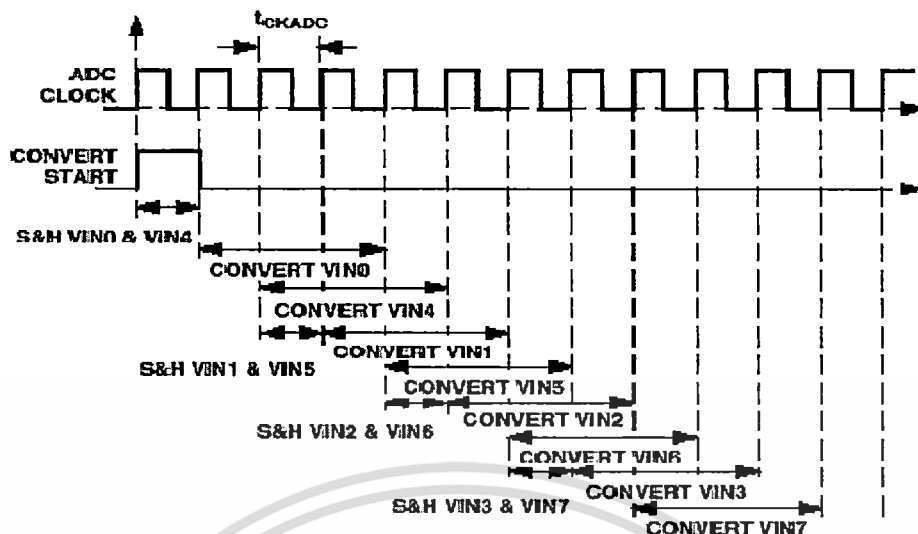
ระบบ A/D conversion ถูกนำมาใช้สำหรับแปลงสัญญาณค่ากระแส แรงดัน หรือ สัญญาณอื่นๆที่อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกให้มาอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล ซึ่งระบบทั้งหมดทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกา t_{ckADC} ซึ่งมีค่าเป็น 4 เท่าของอัตราความเร็วคำสั่งของDSP t_{ck} (38.5ns) โดยที่สัญญาณอนาล็อกจำนวน 8 สัญญาณสามารถถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยใช้เวลาเพียง 2 us เท่านั้น โครงสร้างของระบบ A/D conversion แสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของ A/D conversion

สัญญาณอินพุตทั้ง 8 สัญญาณสามารถถูกแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกประกอบด้วย VIN0 ถึง VIN3 ส่วนที่สอง ประกอบด้วย VIN4 ถึง VIN7 ซึ่งสัญญาณ VIN0 ถึง VIN3 ถูกใช้เพื่อแซมปลิงสัญญาณที่ช่องสัญญาณ A B และ C ตามลำดับ สำหรับระบบ A/D conversion มีโหมดการทำงานเป็น 2 โหมด โหมดที่ 1 คือ Simultaneous mode และ โหมดที่ 2 คือ Sequential sampling mode ซึ่งบิตที่ 3 และ 4 ของรีจิสเตอร์ ADCCTRL ถูกใช้เพื่อบิตเลือกโหมดการทำงาน Simultaneous mode ถูกเลือกใช้ได้โดยการเคลียร์บิตที่ 3 และ 4 ของรีจิสเตอร์ ADCCTRL ซึ่งทำให้สัญญาณอนาล็อกทั้งหมดจะถูกแซมปลิงแบบ Simultaneous โดยที่ VIN0 และ VIN4 จะเป็นคู่สัญญาณแรกที่จะถูกแซมปลิง หลังจากนั้นก็จะเป็น VIN1 และ VIN1 VIN2 VIN6 และ VIN3 VIN7 ที่ถูกแซมปลิงตามลำดับ ถ้าทำการเซตบิตที่ 3 และ เคลียร์บิตที่ 4 ของรีจิสเตอร์ ADCCTRL จะเป็นการทำงานแบบ Sequential sampling mode ในการทำงานโหมดนี้ VIN0 และ VIN7 จะถูกแซมปลิงอย่างเป็นลำดับด้วยค่าสัญญาณนาฬิกา t_{ckADC} ดังนั้นที่สัญญาณนาฬิกาคาบแรก VIN0 จะถูกแซมปลิงและเก็บค่าไว้ ในคาบสัญญาณนาฬิกาถัดมาจะค่า VIN0 ที่ถูกเก็บไว้จะถูกส่งไปแสดงแรกของระบบ A/D conversion จากนั้น VIN1 ถึงจะถูกแซมปลิง ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกกระทำจนครบคู่สัญญาณทั้ง 8 สัญญาณอินพุต และทำการแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณมีค่าเท่ากับ $3\frac{1}{2}$ ของคาบสัญญาณนาฬิกา ซึ่งมีเท่ากับการแซมปลิงแบบ Simultaneous mode ในรูปที่ 5.3 แสดงถึงกระบวนการทำงานแบบ Sequential sampling mode

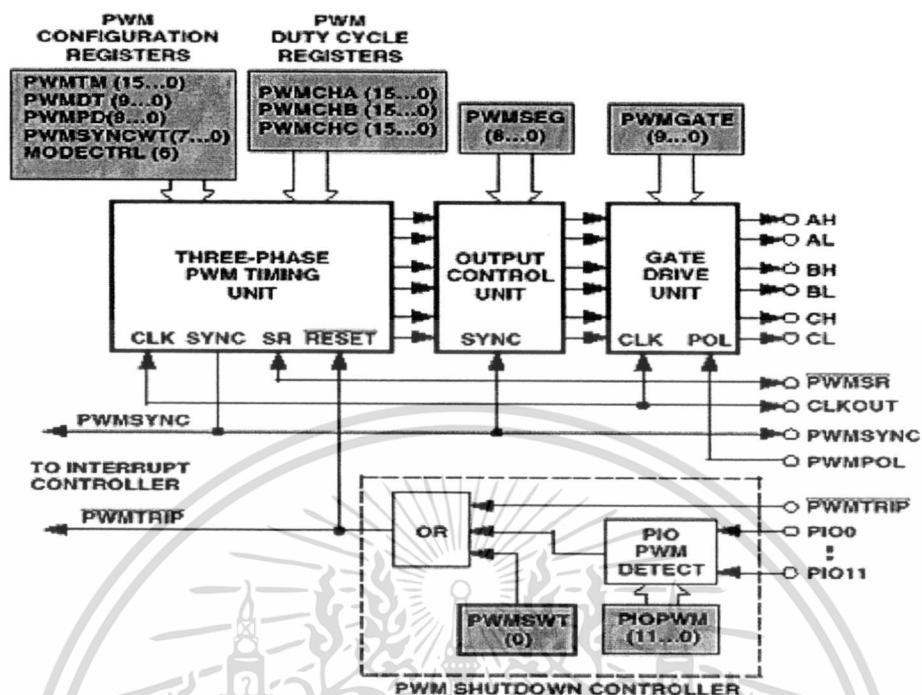
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการทำงานใน Sequential sampling mode

ใน A/D conversion มีวิธีการสั่งในระบบทำงานได้ 2 วิธี วิธีที่ 1 บิตที่ 0 ของรีจิสเตอร์ ADCCTRL จะถูกเซตด้วยสัญญาณ Internal signal วิธีที่ 2 บิตที่ 0 ของรีจิสเตอร์ ADCCTRL จะถูกเซตด้วยสัญญาณ External signal ซึ่งเป็นผลทำให้กระบวนการของ A/D conversion เริ่มทำงานด้วยสัญญาณขอบขาขึ้นของสัญญาณ PWMSYNC ที่ถูกสร้างด้วยคาบสัญญาณเริ่มต้นของสัญญาณ PWM ในงานวิจัยนี้ความถี่ของ PWM ถูกใช้เพื่อจุดชนวนสวิทช์หลักของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 20 kHz ดังนั้นความเร็วในการแปลงสัญญาณของระบบ ADC นี้มีความสามารถเพียงพอที่จะใช้แฉมปลั่งสัญญาณกระแสในระบบขับเคลื่อน SRM ช่วงของค่าแรงดันสำหรับ A/D conversion มีค่าอยู่ในช่วง $4.0V_{p-p}$ โดยที่ค่า $\pm V_{ref}$ เป็นตัวกำหนดค่าสูงสุด และ ค่าต่ำสุดของแรงดันอินพุตตามลำดับ ค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} ก็ยังสามารถถูกสร้างได้ทั้งแบบ internal หรือ External

5.2.1.2 PWM Controller



รูปที่ 5.4 โครงสร้างของฟังก์ชันทำงานใน ADCM401 PWM controller

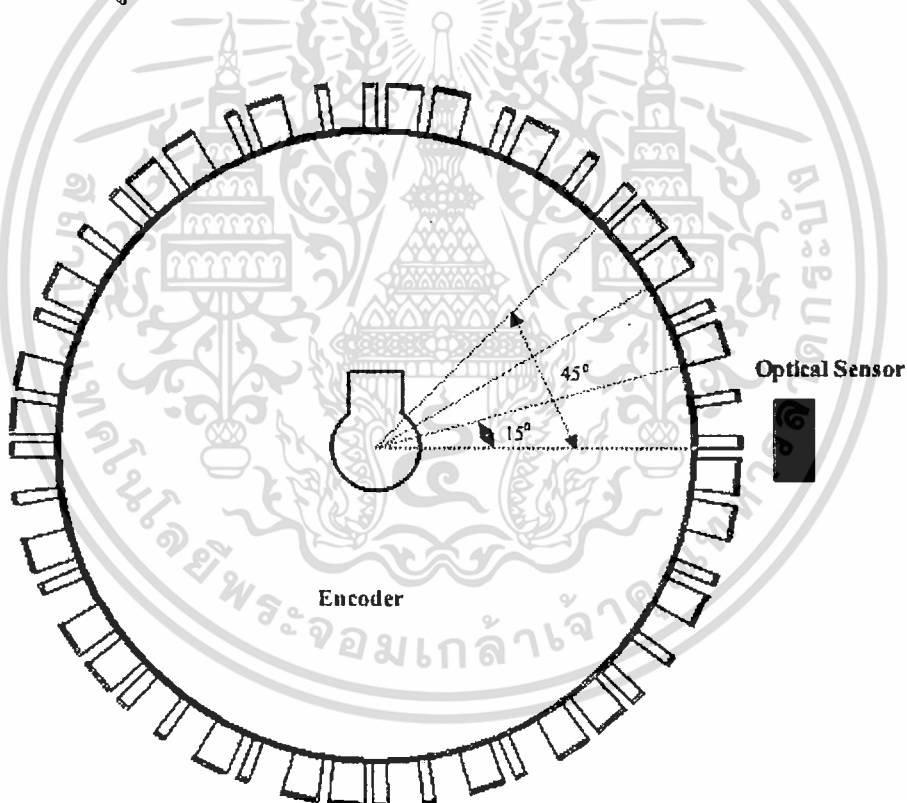
ตัวควบคุม PWM ในบอร์ด DSP รุ่น ADCM401 สามารถถูกโปรแกรมเพื่อสร้างสัญญาณ PWM แบบ 3 เฟสได้ ซึ่งระดับของสัญญาณเอาต์พุต และ แหล่งจ่ายกระแสมีค่าเท่ากับ 10mA AH BH และ CH ประกอบด้วยสัญญาณขับเคลื่อนด้านแรงดันสูง และ AL BL และ CL ประกอบด้วยสัญญาณขับเคลื่อนด้านแรงดันต่ำ สัญญาณ PWM สามารถถูกโปรแกรมได้ทั้งแบบ Active High และ Active Low ด้วย PWMPOL pin นอกจากนี้ความถี่การสวิตช์ และ ดิวตี้ไซเคิลของเฟส A B และ C ก็ยังสามารถถูกควบคุมได้โดยตรงด้วยรีจิสเตอร์ของ PWMTM PWMCHA PWMCHB และ PWMCHC ตามลำดับ ในรูปที่ 5.4 แสดงถึงฟังก์ชันบล็อกของตัวควบคุม PWM ของบอร์ด DSP รุ่น ADCM401 ในการใช้งานนั้นวัตถุประสงค์ของตัวควบคุม PWM ของบอร์ด DSP รุ่น ADCM401 คือ ใช้เพื่อสร้างสัญญาณขับเคลื่อนขนาด 6 สัญญาณเพื่อใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ Two-Quadrant เพื่อต้องการให้ SRM 12/8 ทำงานในโหมดมอเตอร์รีจ โดยที่แต่ละเฟสควรถูกจ่ายพลังในช่วงที่ค่าอินดักแตนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการนำสัญญาณแบบดิจิทัลของ ADCM401 มาใช้ควบคุม SRM ค่ากระแสย้อนกลับจะถูกแซมปลิงที่ค่าความถี่เดียวกับความถี่การสวิตช์ f_s เนื่องจากโหมดการทำงานของ PWM controller ได้ถูกเลือกให้เป็นแบบ Single update โหมดทำให้ค่าที่สัญญาณที่ถูกแซมปลิงจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อค่าดิวตี้ไซเคิลของสัญญาณ PWM ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโหมดการทำงานแบบ Single update สัญญาณอินเทอร์รัพต์จะถูกสร้างทุกหนึ่งครั้งของแต่ละคาบสัญญาณ PWM โดยที่ในแต่ละไซเคิลของ PWMSYNC อินเทอร์รัพต์เซอร์วิส นั้น DSP จะทำการคำนวณค่าตัวชี้ไซเคิลค่าใหม่เพื่อส่งไปที่รีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตซึ่งประกอบด้วย PWMCHA PWMCHB PWMCHC ในขั้นตอนการคำนวณค่าตัวชี้ไซเคิลนั้นค่าแรงดันเอาต์พุต $V_c(t)$ จะถูกแสดงในฟอร์มของ (1.15 format) และ ค่าสูงสุดของรูปคลื่น Triangle อยู่ในฟอร์ม 1.0 ดังนั้น 100% ของค่าตัวชี้ไซเคิลจึงมีค่าเท่ากับ $V_c(t)$ ซึ่งเท่ากับ 1.0 เช่นกัน

5.2.1.3 Encoder Interface Unit (EIU)

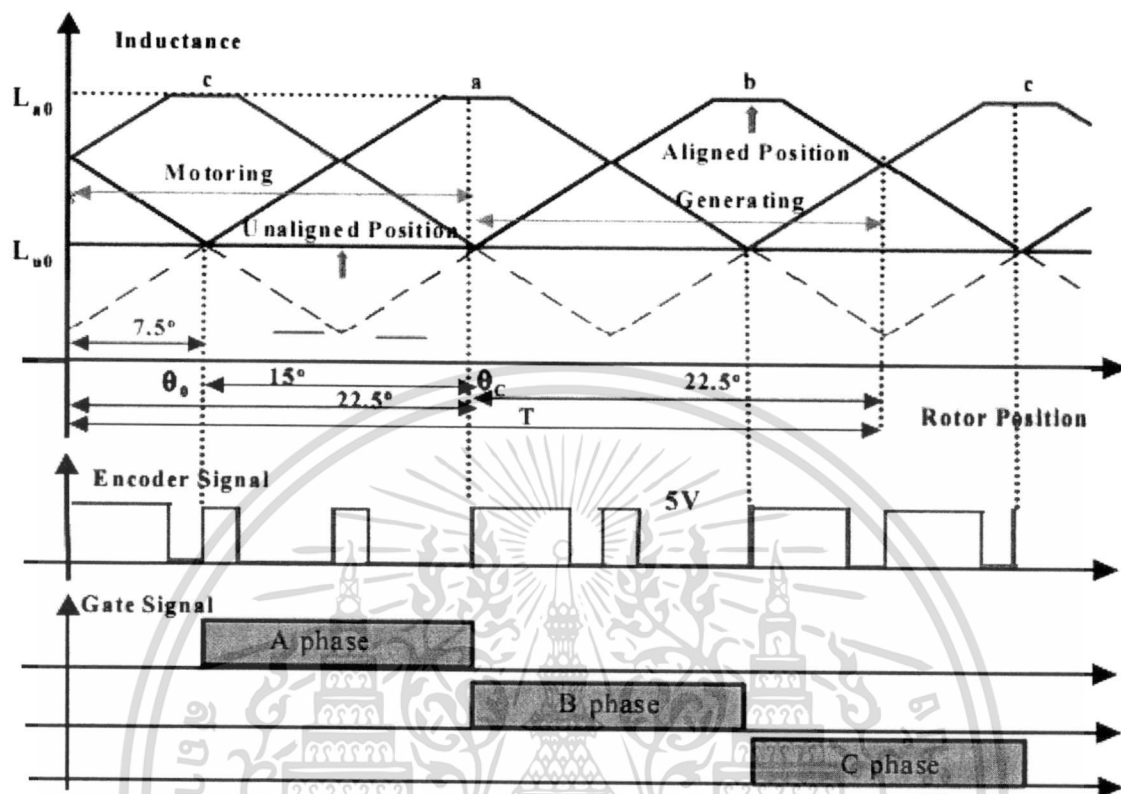
เอ็นโคดเดอร์อินเทอร์เฟซได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาจุดเริ่มต้น และ มุมการคอมมูเตชันในแต่ละเฟส ซึ่งเอ็นโคดเดอร์อินเทอร์เฟซจะรับสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ สัญญาณพัลส์ที่ออกจากเอาต์พุตของเอ็นโคดเดอร์จะเป็นตัวระบุตำแหน่งโรเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับไซเคิลของค่าอินดักแทนซ์ ในรูปที่ 5.5 แสดงถึงโครงสร้างของเอ็นโคดเดอร์



รูปที่ 5.5 โครงสร้างของเอ็นโคดเดอร์

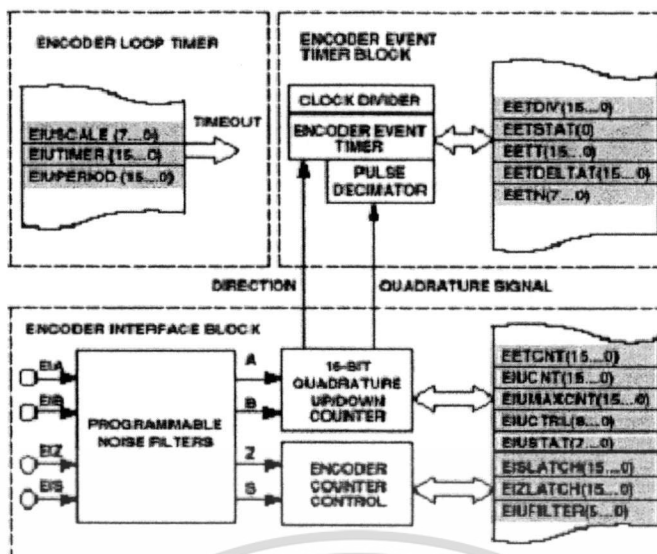
เมื่อโรเตอร์กำลังหมุนวงจรภายในเอ็นโคดเดอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ของมา ซึ่งแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์มีขนาดเท่ากับ 5 V โดยที่ระยะห่างของขอบขาขึ้นของสัญญาณมีค่าเท่า 7.5 องศา

ทางกล ในรูปที่ 5.6 แสดงไดอะแกรมสัญญาณเอาต์พุตของเอ็นโคดเดอร์ อินดิคเตนซ์ และสัญญาณเกท



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตของเอ็นโคดเดอร์ อินดิคเตนซ์ โพลไฟล์ และสัญญาณเกท

วงจรภายในของเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งจะรับแรงดัน DC ขนาด 12V จากแหล่งจ่าย และจ่ายสัญญาณพัลส์ที่มีขนาด 5V ซึ่งสามารถป้อนโดยตรงไปยัง EIU เข้าที่ขั้วของ EIA ในรูปที่ 5.7 แสดงถึงโครงสร้างการอินเตอร์เฟสของ EIU สำหรับ ADMC401



รูปที่ 5.7 โครงสร้างการอินเทอร์เฟสของ EIU สำหรับ ADMC401

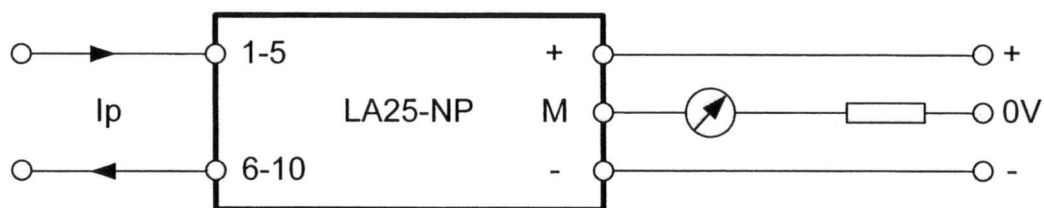
เอ็นโคเดอ์อินเทอร์เฟสสำหรับ ADMC401 มีส่วนประกอบหลักๆอยู่ 3 ส่วน คือ Encoder Loop Time, Encoder Event Timer และ Encoder Interface ในส่วนของ Encoder Interface ประกอบด้วยเคาต์เตอร์ขนาด 16 บิต โปรแกรมแมเบิลอินพุตพิวเคเตอร์ และ รีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต ในการใช้งานเอ็นโคเดอ์นั้น FD โหมดสามารถถูกใช้งานโดยการเซตบิตที่ 6 ของรีจิสเตอร์ EIUCTRL สำหรับโหมดการทำงานนี้ อินพุตของ EIA จะเป็นตัวรับสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคเดอ์ และ ขั้ว EIB จะถูกใช้ในการควบคุมทิศทางการหมุนของโรเตอร์ เคาต์เตอร์สามารถนับค่าขึ้นและลงได้โดยสัญญาณขอบขาขึ้น และ ขอบขาลงที่ป้อนเข้าสู่ขั้ว EIA เมื่อสัญญาณที่เข้าสู่ขั้ว EIB เป็น 1 เคาต์เตอร์จะทำการลดค่าในแต่ละขอบสัญญาณ และบิตที่ 1 ของรีจิสเตอร์ EIUSTAT ถูกเคลียร์ให้เป็นศูนย์ ดังนั้นถ้าควบคุมบิตที่ 1 ของรีจิสเตอร์ EIUSTAT ได้เราก็สามารถควบคุมลำดับการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดสเตเตอร์ หรือ ทิศทางการหมุนของโรเตอร์ได้

5.2.1.4 เซนเซอร์ตรวจจับกระแส Current Sensor

เซนเซอร์ตรวจจับกระแสที่ใช้เป็นของ LEM เบอร์ LA25-NP สามารถตรวจจับกระแสได้สูงถึง ± 25 A โดยที่ ± 25 A เทียบเป็นกระแสเอาต์พุตออกมาเท่ากับ 25 mA ซึ่งมีอัตราส่วนเท่ากับ 1/1000 เท่า ในการต่อใช้งานนั้นต้องมีการต่อตัวต้านทาน (R_m) 1 ตัวเพื่อทำการเปลี่ยนค่าจากค่ากระแสไปเป็นค่าแรงดัน โดยที่ $R_m = 100 \Omega$ ซึ่งจะทำได้แรงดันเท่ากับ 2.5 V ซึ่งเทียบเท่ากับค่ากระแส 25A แต่ในส่วนการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกนั้นสามารถรองรับสัญญาณได้ที่ ± 2 V ดังนั้นชุดตรวจจับกระแสต้องรับค่าแรงดันไม่เกิน ± 2 V ส่งผลทำให้ชุดตรวจจับกระแสสามารถตรวจจับได้ที่ค่า ± 20 A ซึ่งในการทดลองเป็นการตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

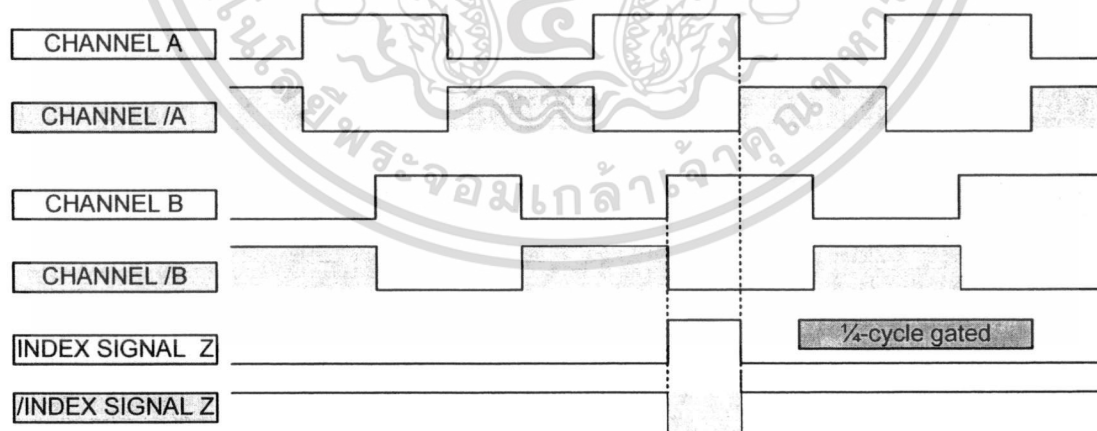
ค่ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวดสเตอโรในแต่ละเฟส และ SRM ที่ใช้ในการทดลองก็เป็นแบบ 3 เฟส ดังนั้นจึงต้องใช้เซนเซอร์ตรวจจับกระแสทั้งหมด 3 ตัว ในรูปที่ 5.8 แสดงการต่อเซนเซอร์ตรวจจับกระแส



รูปที่ 5.8 วงจรของเซนเซอร์ตรวจจับกระแส

5.2.1.5 เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง Position Sensor

เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งที่ใช้ในการทดลองนั้นจะเป็นชนิดที่มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ เมื่อเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งหมุน 1 รอบเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งก็จะส่งสัญญาณเอาต์พุตที่มีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมออกมา 3600 พัลส์ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณ A และ B โดยที่สัญญาณทั้ง 2 จะวางตัวห่างกัน 90° ทางไฟฟ้า ซึ่งถูกใช้ตรวจจับทิศทางการหมุนของเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง นอกจากนี้สัญญาณที่ถูกใช้เพื่อบ่งบอกว่าเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งได้หมุนครบ 1 รอบนั้นเรียกว่าสัญญาณดัชนี (Index signal) หรือสัญญาณ Z ในรูปที่ 5.9 แสดงถึงลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง

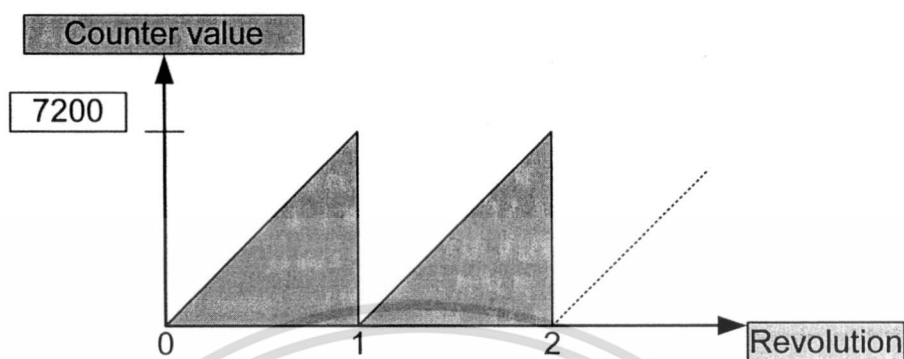


รูปที่ 5.9 สัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง

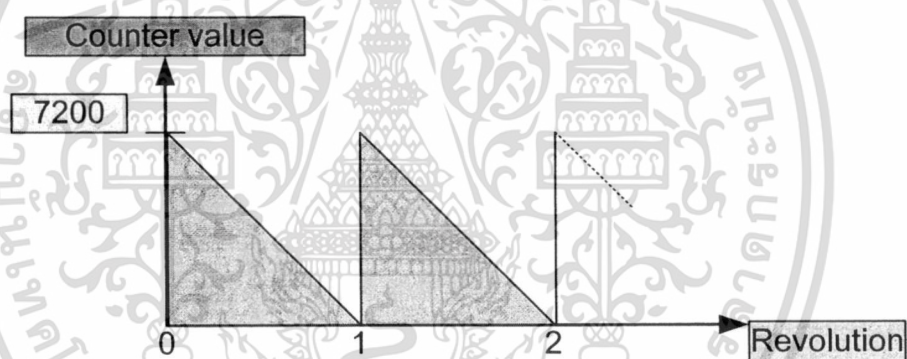
สัญญาณในรูปที่ 5.9 เมื่อนำไปประมวลผลใน DSP รุ่นADMC401 แล้ว ลักษณะของ

สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 ซึ่งแสดงถึงการนับค่าสัญญาณพัลส์ที่ได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งโดยที่จำนวนของพัลส์มีค่าเท่ากับ 3600 พัลส์ แต่เนื่องจากการนับค่าใน Encoder Interface Unit เป็นแบบนับทั้งขอบขาขึ้น และ ขอบขาลง ดังนั้นจำนวนของค่าที่นับได้จาก สัญญาณเอาต์พุตก็จะมีค่าเท่ากับ $3600 \times 2 = 7200$



รูปที่ 5.10 สัญญาณพัลส์ที่ถูกประมวลใน DSP ขณะโรเตอร์หมุนไปทางขวา

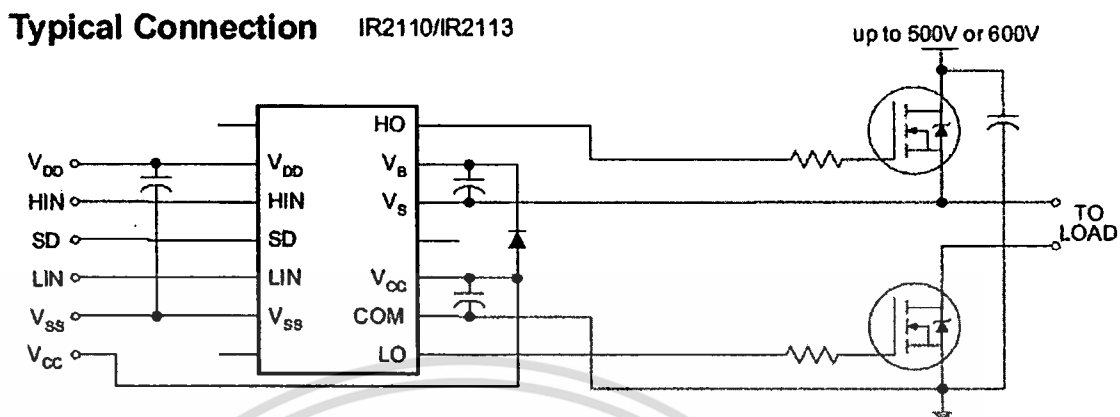


รูปที่ 5.11 สัญญาณพัลส์ที่ถูกประมวลใน DSP ขณะโรเตอร์หมุนไปทางซ้าย

5.2.1.6 ชุดวงจรขับเคลื่อน (Gate Drive)

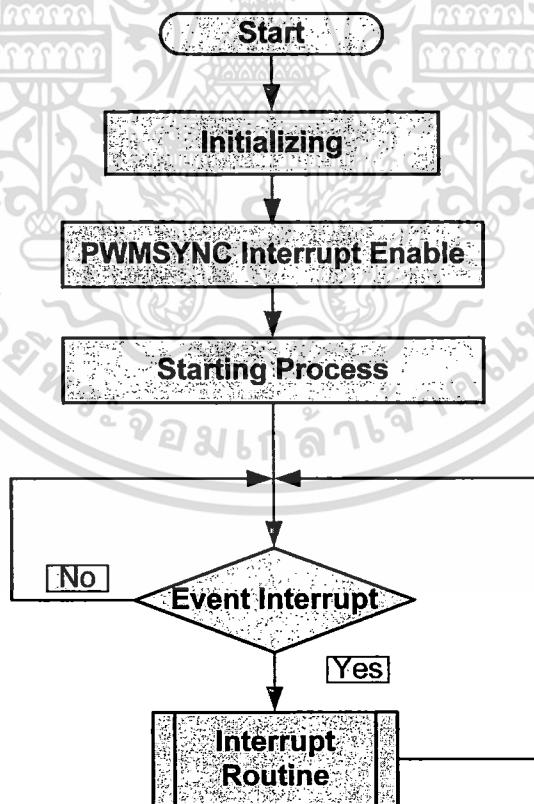
สัญญาณที่จะนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่ถูกสร้างโดย DSP รุ่น ADMC401 นั้นไม่สามารถถูกนำไปขับเคลื่อนคอนเวอร์เตอร์ได้โดยตรง เนื่องจากพิกัดของทั้งค่าแรงดันและค่ากระแสที่ส่งจาก DSP มีขนาดค่อนข้างต่ำมากไม่สามารถทำให้มอเตอร์ทำงานที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ นอกจากนี้วงจรควบคุม และ กำลังในระบบขับเคลื่อน SRM ก็ควรมีการแยกกราวด์ออกจากกัน เนื่องจากในกรณีที่ส่วนของวงจรกำลังเกิดความเสียหายขึ้นก็จะไม่ส่งผลถึงวงจรควบคุมเพราะได้มีการแยกกราวด์ไว้แล้ว ด้วยเหตุนี้วงจรขับเคลื่อนจึงถูกออกแบบให้สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงที่ทำงานเป็นสวิตช์ และสามารถแยกสัญญาณที่ออกจาก DSP ออกจากวงจรกำลังได้ด้วย

ในการทดลองได้ใช้ IC สำเร็จรูปเบอร์ IR2110 ซึ่งใช้ 1 ตัวต่อเฟส เนื่องจาก SRM เป็น 3 เฟสจึงต้องใช้ทั้งหมด 3 ซึ่งวงจรการใช้งานแสดงไว้ในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงวงจรที่ใช้ในการขับมอเตอร์

5.3 โครงสร้างโปรแกรม (Software Layout)



รูปที่ 5.13 Flowchart โปรแกรม

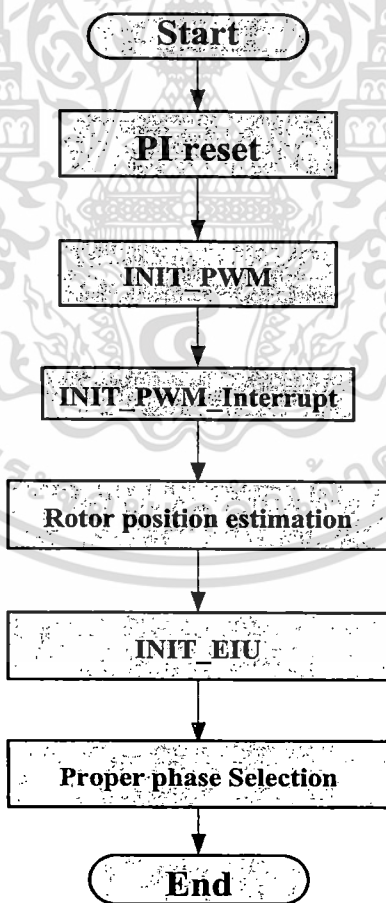
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 จุดเริ่มต้นโปรแกรม(Start)

ณ จุดเริ่มต้นของโปรแกรม คำสั่งของ MODULE จะทำการประกาศตำแหน่งเริ่มต้นของโปรแกรมในหน่วยความจำโปรแกรม (Program memory RAM) ซึ่งในตอนเริ่มต้นคำสั่งแรกของโปรแกรมสำหรับ ADMC401 จะอยู่ในตำแหน่งแอดเดรสที่ 0x60 ซึ่งในขั้นตอนนี้การใช้คำสั่ง “include files” คือ การกำหนดค่าคงที่ และ แมโคร (macro) ของ ADMC401 รวมถึงตัวแปรค่าคงที่ และ ตัวแปรพารามิเตอร์ซึ่งจะถูกกำหนดค่าคงที่ให้ด้วยเช่นกัน ตัวแปรพารามิเตอร์จะถูกกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรเอง ซึ่งลักษณะการเขียนโปรแกรมนั้นจะเป็นการเขียนโปรแกรมในลักษณะแชนเปลิ่งโดยใช้การขัดจังหวะของPWMSYNC Interruptในแต่ละไซเคิลการทำงาน

5.3.2 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรม (Initializing)

ในการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initializing) ของโปรแกรมนั้น PI controller PWM generator PWMSYNC interruption และ EIU ควรจะถูกกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับรีจิสเตอร์ในแต่ละฟังก์ชันก่อน ซึ่ง Flowchart ของการทำ Initializing แสดงไว้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 Flowchart ของการกำหนดค่าเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

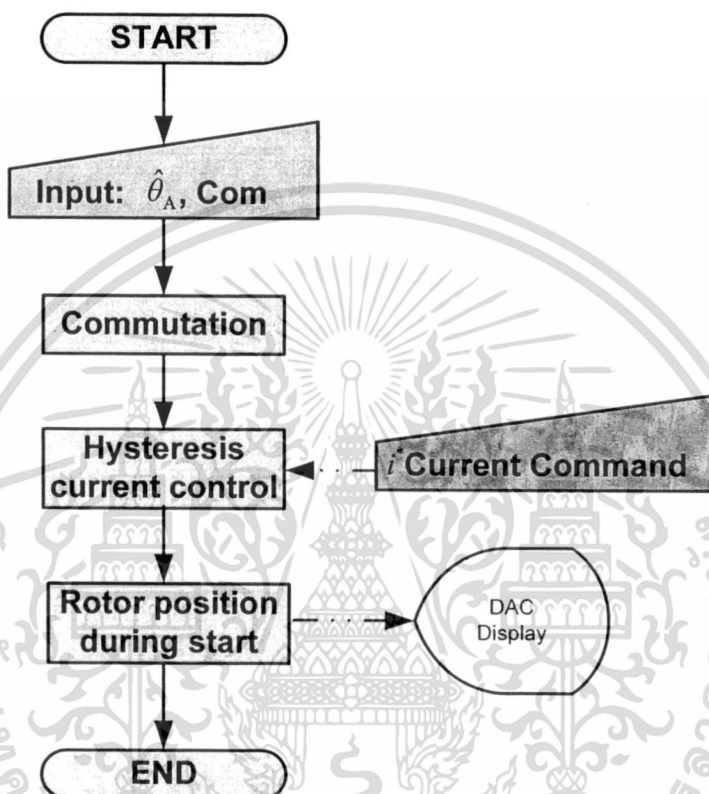
สำหรับ PI controller ที่จะนำมาประมวลผลด้วยระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (6.1)

$$U_{k+1} = A_1 \cdot I_{k+1} + A_0 \cdot I_k + U_k \quad (6.1)$$

ให้กำหนดค่าศูนย์ลงในหน่วยความจำข้อมูลโปรแกรม (data memory) ซึ่งจะถูกเก็บไว้ในค่าของ I_{k+1} และ U_{k+1} ซึ่งเป็นการทำ Initialize ของ PI controller ในกรณีของ PWM Generator ก็สามารถถูก Initialize ได้โดยการเรียก INIT_PWM subroutine โดยเราสามารถกำหนดความถี่ของการสวิตที่ 20 kHz และ การกำหนดค่าตัวดีไซเคิลให้มีค่าเท่ากับศูนย์ได้โดยการโปรแกรมค่า 0x28A 0x0 0x0 และ 0x0 ลงไปที่รีจิสเตอร์ PWMTM PWMCHA PWMCHB และ PWMCHC ตามลำดับ ขณะที่เริ่มต้นการทำงานในโหมดซิงเกิ้ลนั้นเป็นโหมดการทำงานที่ถูกเซตไว้ตั้งแต่แรกเริ่มต้นอยู่แล้ว นอกจากนี้การใช้ฟังก์ชันของ PUT_VECTOR ที่ถูกส่งค่าลงใน ROM-CODE ก็เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นของการกระโดดไปที่ PWMSYNC interruption นั้นเอง ขั้นตอนการทำงานของ INIT_PWM Interruption IRQ2 Interruption จะถูกสั่งให้ทำงานได้โดยการส่งค่า 0x80 และ 0x208 ลงไปที่รีจิสเตอร์ IFC และ IMASK ตามลำดับ นอกจากนี้การสั่งให้ PWMSYNC Interruption ทำได้โดยการส่งค่า 0x0020 ไปที่รีจิสเตอร์ PICMASK ในส่วนของการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ Rotor position estimation นั้นสามารถทำได้โดยการนำการค่าพัลส์กระแสทั้ง 3 เฟสที่ได้จากการทดสอบส่งพัลส์แรงดันไปเก็บไว้ในตัวแปรที่กำหนดไว้ 3 ตัวแปรซึ่งประกอบด้วย IA_TEST IB_TEST และ IC_TEST จากนั้นทำการเลือกตัวแปร 1 ใน 3 ที่สามารถประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งได้แม่นยำสุดตามอัลกอริธึมตารางที่ 1 ไปคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ด้วยฟังก์ชันคิวบิคสไปลน์ จากนั้นนำค่าตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณมาเก็บไว้ในตัวแปรที่มีชื่อว่า POS_EST สำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้นของ EIU สามารถทำได้โดยใช้โหมด FD โดยทำการส่งค่า 0x40 ไปที่รีจิสเตอร์ EIUCTRL ทำนองเดียวกัน EIUCNT EIUFILTER และ EIUMAXCNT จะถูกโปรแกรมโดยค่าของ 0x00 0xFFFF และ 0x000B ตามลำดับ ในส่วนของ Proper phase selection ก็มีลักษณะคล้ายกันกับ Rotor position estimation เพียงแต่ตัดในส่วนของการประมาณโดยใช้ฟังก์ชันคิวบิคสไปลน์ออก แล้วนำค่าตัวแปรที่มีชื่อ IA_TEST IB_TEST และ IC_TEST มาเปรียบเทียบโดยใช้อัลกอริธึมเพื่อใช้หาเฟสที่สามารถทำให้โรเตอร์เริ่มหมุนไปด้วยลำดับ C-B-A หรือ A-B-C ตามตารางที่ 3.3 และ ตารางที่ 3.4 ตามลำดับ

5.3.3 เริ่มขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม(Starting Process)

ขั้นตอนของ Starting Process เป็นการนำค่าของ $\hat{\theta}_A$ ที่ได้จากการประมาณ และ เฟสที่ถูกเลือกจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในช่วงเริ่มแรก เมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน โปรแกรมก็จะทำการกระโดดออกขั้นตอนการทำงานนี้เพื่อเข้าไปสู่ Interrupt Routine ซึ่ง Flowchart ของ Starting Process แสดงได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 Flowchart ของ Starting Process

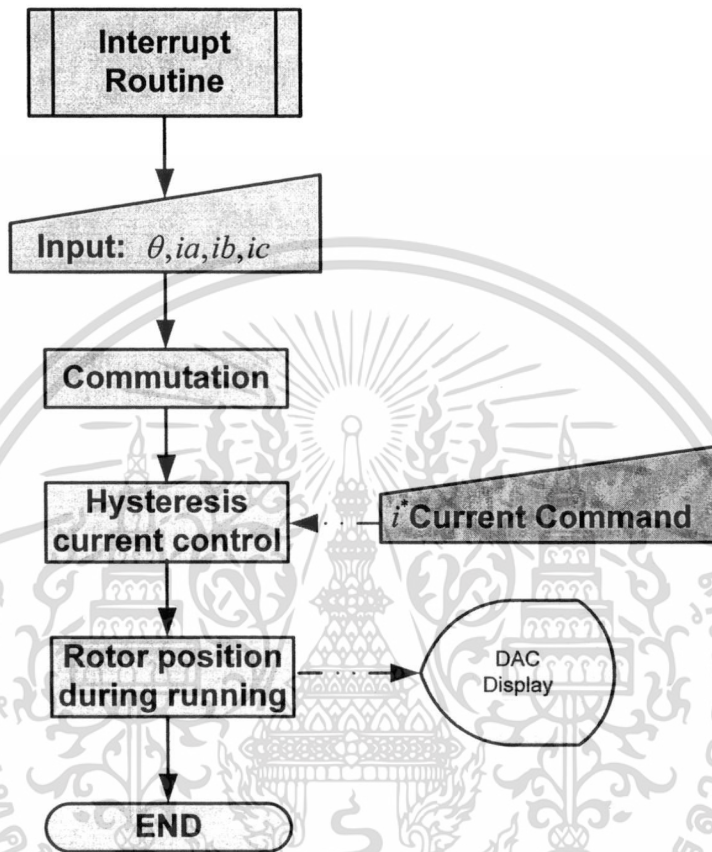
จาก Flowchart เมื่อเราได้ค่า $\hat{\theta}_A$ และ Com ในการจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนโดยใช้การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซิส เราต้องใช้สัญญาณกระแสอ้างอิง i^* ร่วมพิจารณาด้วย เพื่อต้องการแสดงผลของสัญญาณตำแหน่งโรเตอร์สามารถทำได้โดยอาศัยตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก

5.3.4 การทำงานของโปรแกรมขั้นจังหวะ(Interrupt Service Routine)

ในขั้นตอนนี้จะต้องรอให้ PWMSYNC Interruption เริ่มทำงานก่อน เนื่องจาก PWMSYNC จะถูกสร้างขึ้น 1 ครั้งในแต่ละคาบเวลาของสัญญาณ PWM ที่มีอัตราความถี่ที่ 20 kHz ช่วงเวลาในแต่ละ Interruption ซึ่ง 4 Bits ของรีจิสเตอร์ EIUSTAT จะทำการหาลำดับการจ่ายพลังงาน Firing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

sequence ให้กับ SRM ในช่วงมุมคเวด Dwell angle ของแต่ละเฟส Duty cycle จะถูกอัปเดต 1 ครั้ง ต่อ 1 Interruption Routine นอกจากนี้ในแต่ละ Sub-Routine ค่ากระแสเฟสที่ถูกจ่ายพลังงานให้ ขดลวดสเตเตอร์จะถูกแซมปลิ่งโดยระบบADC ในรูปที่ 5.16 แสดง Flowchart ของ Interrupt Routine



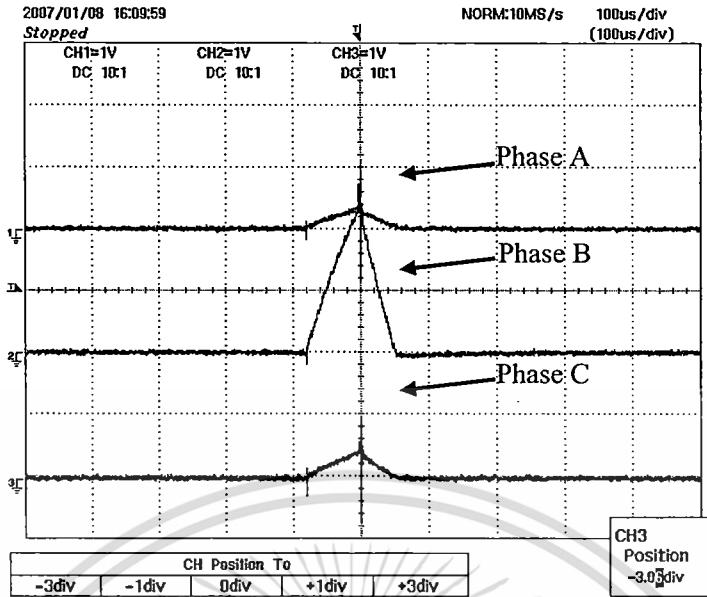
รูปที่ 5.16 Flowchart ของ Interrupt Service Routine

5.4 ผลการทดลอง

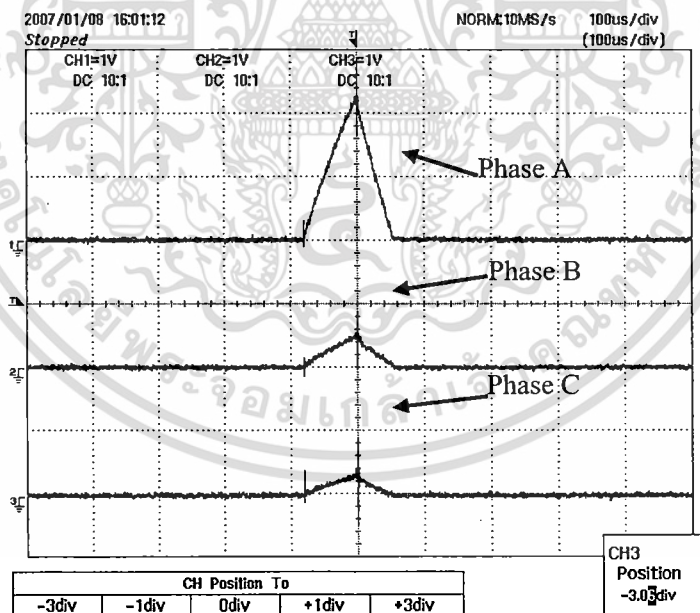
เทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง และ เทคนิคการเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ถูกนำมาทดสอบด้วยฮาร์ดแวร์ และ SRM 12/8 ซึ่งอยู่ในสภาวะไร้โหลด ในแรกขั้นตอนแรกระบบขับเคลื่อนจะส่งพัลส์แรงดันช่วงแคบขนาด 12 โวลต์เข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์พร้อมกันทั้ง 3 เฟส เพื่อนำแอมพลิจูดพัลส์กระแสไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง และนำไปใช้หาเฟสที่เหมาะสมสำหรับจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุน ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และ บทที่ 4 จากการทดสอบที่มุม $\theta_A \cong 13^\circ$ $\theta_A \cong 27^\circ$ และ $\theta_A \cong 43^\circ$ ค่าของแอมพลิจูดพัลส์กระแสทั้ง 3 เฟส และ พัลส์แรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่

5.17 5.18 และ 5.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

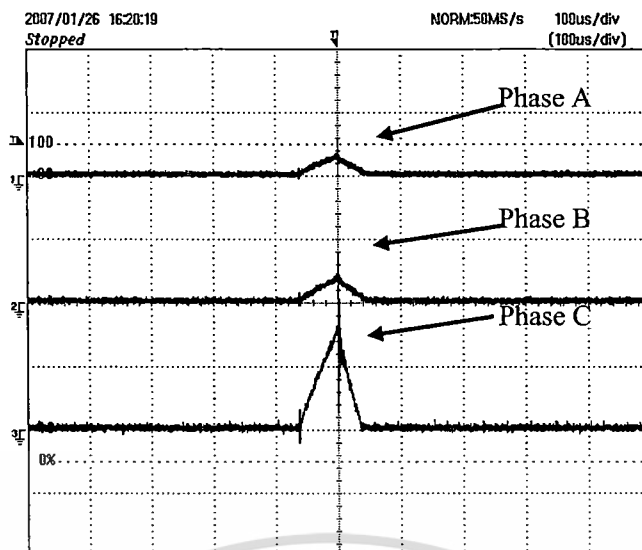


รูปที่ 5.17 พัลส์แรงดันตรวจสอบ และ ค่าแอมพลิจูดกระแสทั้ง 3 เฟสที่ $\theta_A \cong 13^\circ$



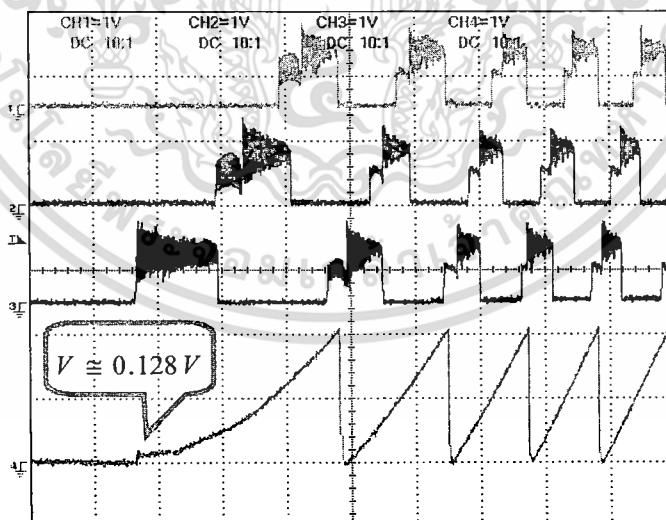
รูปที่ 5.18 พัลส์แรงดันตรวจสอบ และ ค่าแอมพลิจูดกระแสทั้ง 3 เฟสที่ $\theta_A \cong 27^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

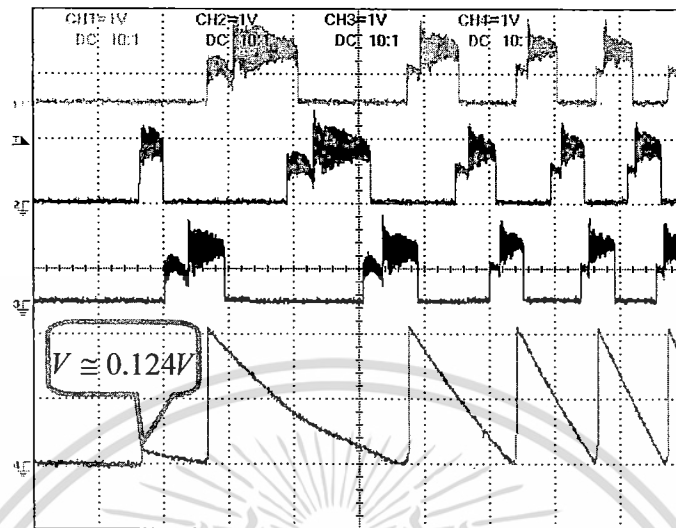


รูปที่ 5.19 พัลส์แรงดันตรวจสอบ และ ค่าแอมพลิจูดกระแสทั้ง 3 เฟสที่ $\theta_A \cong 43^\circ$

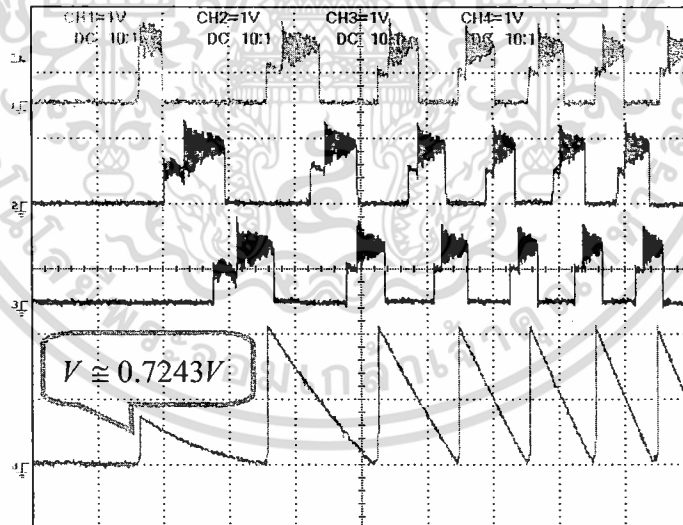
ผลการทดสอบส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสแสดงให้เห็นว่าค่าแอมพลิจูดกระแสที่เกิดขึ้นขณะที่โรเตอร์อยู่นิ่งสอดคล้องกับอัลกอริทึมในตารางที่ 1 เพื่อยืนยันแนวคิดของเทคนิคการเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนว่าตรงตามกับอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้น เราจึงได้ทำการทดสอบเทคนิคดังกล่าวโดยเริ่มที่ $\theta_A \cong 2.5^\circ$ $\theta_A \cong 15^\circ$ $\theta_A \cong 30^\circ$ และ $\theta_A \cong 43.5^\circ$ ซึ่งผลที่ได้สามารถแสดง ได้ดังรูปที่ 5.20 จนถึงรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.20 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 2.5^\circ$ เฟส C ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3

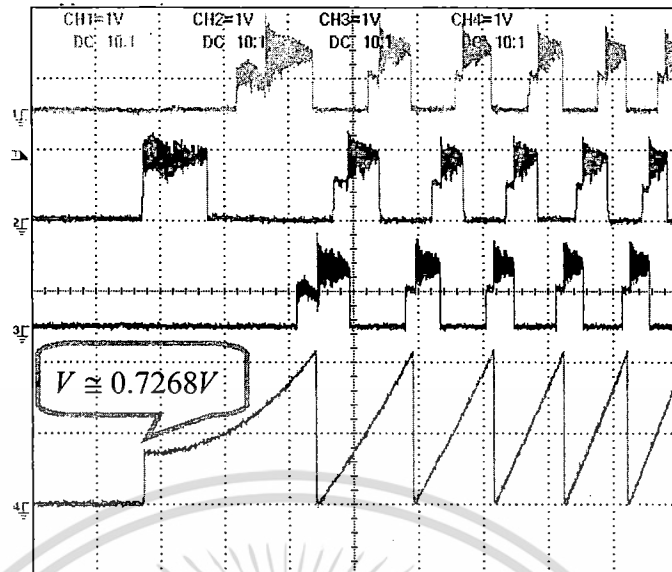


รูปที่ 5.21 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \approx 2.5^\circ$ เฟส B ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4

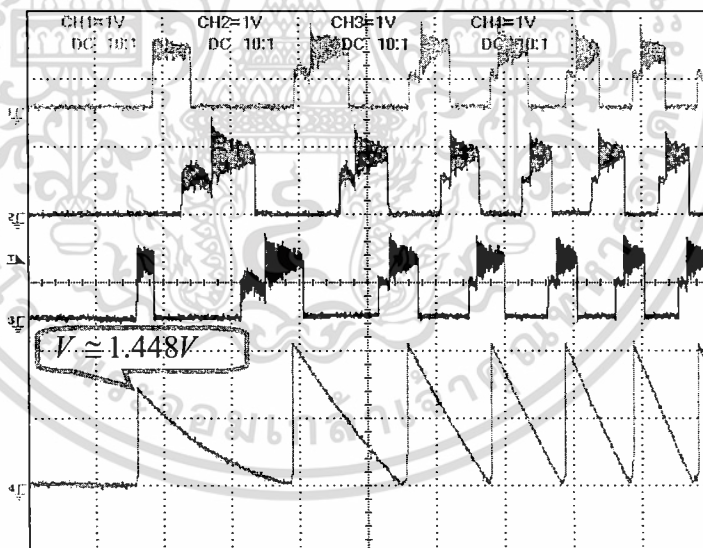


รูปที่ 5.22 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \approx 15^\circ$ เฟส A ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

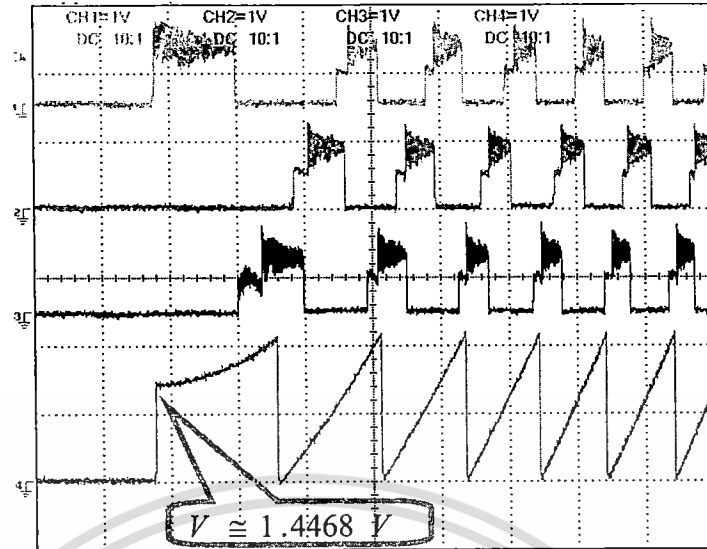


รูปที่ 5.23 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \approx 15^\circ$ เฟส B ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3

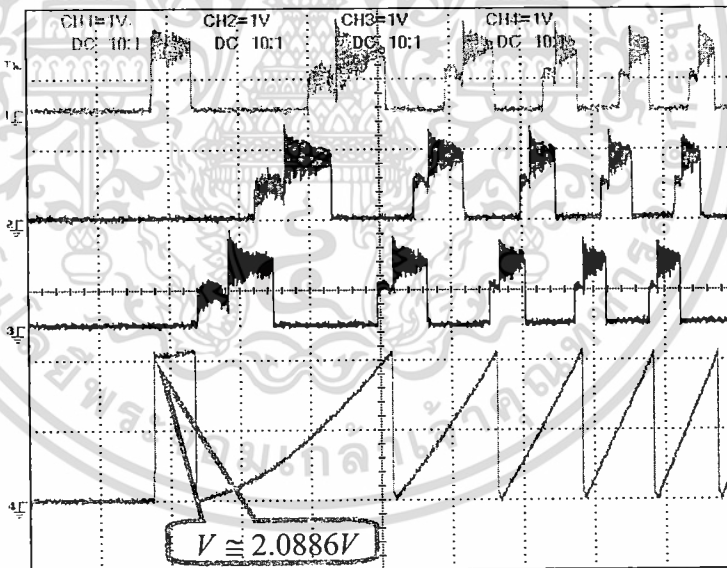


รูปที่ 5.24 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \approx 30^\circ$ เฟส C ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

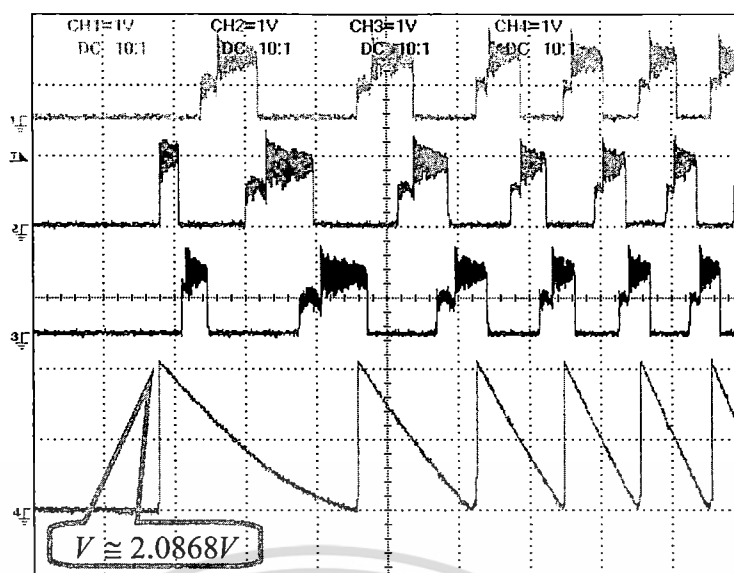


รูปที่ 5.25 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \approx 30^\circ$ เฟส A ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3



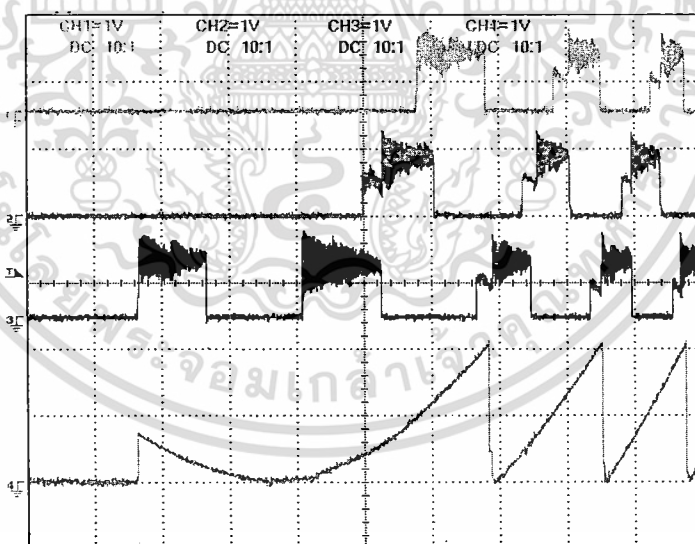
รูปที่ 5.26 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \approx 43.5^\circ$ เฟส A ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 ณ ตำแหน่ง $\theta_A \cong 43.5^\circ$ เฟส B ถูกเลือกเป็นเฟสเริ่มจ่ายพลังงานตามตารางที่ 3.4

ในกรณีที่มีการเลือกเฟสที่ไม่เหมาะสมสำหรับจ่ายพลังงาน ในช่วงเริ่มหมุน ผลที่เกิดขึ้น คือ โรเตอร์อาจจะเริ่มหมุนผิดทิศทาง หรือ ขณะที่โรเตอร์เริ่มหมุนอาจเกิดการหมุนติ๊กกลับทางของโรเตอร์หมุนติ๊กกลับทางทันที ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูป 5.28



รูปที่ 5.28 เฟส C ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุน เมื่อ $\theta_A \cong 15^\circ$ ในลำดับ C-B-A

จากรูปสังเกตได้ว่าขณะที่โรเตอร์เริ่มหมุนอยู่ได้เกิดการที่โรเตอร์ถูกหมุนกลับทันทีหรือที่เรียกกันว่า(Kick-Back) เนื่องจากเฟส C ถูกเลือกจ่ายพลังงานขณะที่โรเตอร์เริ่มหมุน โดยที่มุมเริ่มต้น คือ $\theta_A \cong 15^\circ$ ซึ่งเฟสที่ควรถูกจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนนั้นควรจะเป็นเฟส B ถ้าต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้SRM ทำงานด้วยลำดับการจ่ายพลังงาน C-B-A ดังนั้นเทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพ และ สมรรถนะของระบบขับเคลื่อน SRM ในช่วงเริ่มหมุน

5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งได้อย่างแม่นยำ และสามารถควบคุมให้ SRM เริ่มหมุนไปในทิศทางที่ต้องการได้ ซึ่งฟังก์ชันควาสไปลน์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่งเนื่องจากเป็นฟังก์ชันที่ไม่มีความซับซ้อนมากจึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ และสามารถนำมาใช้งานได้จริง



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้เป็นการสรุปผลงานได้ทำระหว่างการทำวิทยานิพนธ์นี้ และ ข้อเสนอแนะเพื่อในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงข้อดีของ SRM และ ระบบขับเคลื่อน SRM นอกจากนี้ความน่าสนใจของปัญหาของ SRM ขณะเริ่มหมุน ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัย และ โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ก็ได้ถูกแสดงไว้ในบทที่ 1 ด้วยเช่นกัน

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของ SRM และ พื้นฐานของระบบขับเคลื่อน SRM ตลอดจนการพิจารณาโครงสร้างทางกลของ SRM นอกจากนี้ก็ยังได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินดักแตนซ์และตำแหน่งโรเตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ วงจรสมมูลของ SRM

บทที่ 3 อธิบายถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ SRM และ กลไกการสร้างแรงบิดของ SRM หลักการทำงาน โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน SRM และ ชนิดของคอนเวอร์เตอร์ชนิดต่างๆ ก็ได้ถูกอธิบายไว้ด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง และ เทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังในช่วงเริ่มหมุนสำหรับ SRM โดยมีความต้องการที่จะพัฒนาเทคนิคการขับเคลื่อนของ SRM ให้มีประสิทธิภาพ และ สมรรถนะที่สูงขึ้น เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นในการใช้ระบบขับเคลื่อน SRM ในวงการอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในการศึกษาหรือใช้ในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อมูลของตำแหน่งโรเตอร์ขณะเริ่มหมุนเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากต่อการขับเคลื่อน SRM ดังนั้นการหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งจึงเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างมาก

สำหรับเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งในงานวิจัยนี้สามารถทำได้โดยการส่งพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่มีช่วงแคบเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์ของ SRM พร้อมกันทั้ง 3 เฟส ซึ่งจะได้ค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส จากนั้นนำค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกันเพื่อหาแอมพลิจูดพัลส์กระแสที่เหมาะสม เพื่อนำไปคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งโดยใช้ฟังก์ชันคิวกิบคัสไปลน์ เนื่องจากฟังก์ชันดังกล่าวเป็นสมการพื้นฐาน ซึ่งไม่มีความซับซ้อน และยังสามารถนำไปใช้งานได้จริง นอกจากนี้ข้อมูลของตำแหน่ง

โรเตอร์ ค่ากระแส และ คุณสมบัติทางแม่เหล็กที่นำมาใช้ในการคำนวณก็มีจำนวนน้อย ดังนั้นในการออกแบบโปรแกรมจึงไม่ต้องการพื้นที่หน่วยความจำที่มาก

เทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังในช่วงเริ่มหมุนสำหรับ SRM ในงานวิจัยนี้เป็นการนำค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ได้จากการทดสอบด้วยพัลส์แรงดันที่มีช่วงแคบในตอนต้นมาเปรียบเทียบกัน เนื่องจากแอมพลิจูดพัลส์กระแสนั้นแปรผกผันกับค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ ด้วยเหตุนี้เราสามารถเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดพัลส์กระแสเพื่อหาขดลวดสเตเตอร์ที่สามารถสร้างแรงบิดขณะที่โรเตอร์อยู่นิ่งได้ และยังสามารถกำหนดทิศทางการเริ่มหมุนของโรเตอร์ได้เช่นกัน

บทที่ 4 เพื่อพิสูจน์แนวคิดดังกล่าวจึงได้มีการสร้างแบบจำลองของระบบขับเคลื่อน SRM ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งได้แสดงถึงบล็อกต่างๆของแบบจำลอง ตลอดจนได้แสดงถึงการจำลองขณะส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส นอกจากนี้ผลการจำลองขณะ SRM เริ่มทำงานด้วยลำดับการจ่ายพลังงานแบบ C-B-A และ A-B-C

บทที่ 5 ได้แสดงถึงฮาร์ดแวร์ในส่วนต่างๆของระบบขับเคลื่อน SRM ที่ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อนำมาทดลอง เมื่อนำเทคนิคดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับระบบฮาร์ดแวร์ ผลที่ได้จากการทดลองได้ถูกแสดงไว้ตั้งแต่ช่วงที่มีการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบ จนกระทั่งโรเตอร์เริ่มหมุน โดยที่ค่าตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้จากการประมาณ ลำดับการจ่ายพลังงาน C-B-A และ A-B-C ก็ยังได้ถูกแสดงไว้ด้วยเช่นกัน ซึ่งผลจากการทดลองก็เป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการขับเคลื่อน SRM ในขณะเริ่มหมุน

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. เทคนิคการประมาณค่าตำแหน่ง โรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง และ เทคนิคการเลือกเฟสจ่ายพลังงานขณะเริ่มหมุนที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำไปพัฒนาร่วมกับเทคนิคการขับเคลื่อน SRM ที่มีการควบคุมแบบลูปปิดสำหรับการควบคุมความเร็ว หรือ แรงบิดของ SRM
2. เทคนิคดังกล่าวยังสามารถนำไปพัฒนาร่วมกับการทำควบคุม SRM แบบ Sensorless Control ที่สามารถขับเคลื่อน SRM ตั้งแต่โรเตอร์หยุดอยู่นิ่งจนถึงทำงานที่ย่านความเร็วสูง
3. เทคนิคดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาใช้กับ SRM ชนิดอื่นได้ เช่น 8/6 ทั้งที่มีพิกัดกำลังสูงกว่าหรือต่ำกว่า SRM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motions and Their Control, "Magna Physics Publishing and Clarendon Press Oxford, 1993.
- [2] T.J.E. Miller, " Electronic Control of Switched Reluctance Machines, " Newnes Power Engineering Series, Oxford: 2001.
- [3] S. Kittiratsatcha, D. A. Torrey, "A Design Method of a Two-phase Switched Reluctance Machine, "Power Electronic and Drive System, 2005. PEDS 2003. The Fifth International Conference on Volume 2, 17-20 Nov. 2003 .pp 1599-1604, 2003.
- [4] S. Kaewthai, S. Kittiratsatcha "A Torque Estimation Method for a Switched Reluctance Machine " Power Electronic and Drive System, 2005. PEDS 2005. The Sixth International Conference on Volume 2, 28 Nov-1 Dec. 2005 .pp 1135 – 1139, 2005.
- [5] S. Khotpanya, S. Kittiratsatcha " A Magnetic Model of Three-Phase Switched Reluctance Machine using Cubic Spline Interpolation Technique " Power Electronic and Drive System, 2005. PEDS 2005. The Sixth International Conference on Volume 2, 28 Nov-1 Dec. 2005 pp 1167 – 1170, 2005.
- [6] H. Goa, F.R. Salmasi, M. Ehsani "Sensorless Control of SRM at Standstill" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE vol.2, 04 Mar 2001-08 Mar 2001 pp.850 – 856, 2001.
- [7] S.K. Panda and G.A.J. Amaratunga, "Waveform Detection Technique for Indirect Rotor-Position Sensing of Switched-Reluctance Motor Drives", Part 1: Analysis," IEEE Proceeding B, vol. 140, No. 1. pp.80-88, 1993.
- [8] P.P. Acarnley. R. J. Hill and C. W. Hooper," Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Reluctance Motoring of Current Waveforms, "IEEE. Trans. On Industry Electronic, vol.32 No.3; pp.215-222, 1985.
- [9] W. F. Ray and I. H. Al-Bahadly. " Sensorless Method for Determining the Rotor Position of Switched Reluctance Motors,"Fifth European Conference on Power Electronic and Applications, vol. 6, pp. 7-13 1993.
- [10] J.P. Lyons, S.R. MacMinn, and M. A. Preston, "Flux/Current Methods for SRM Rotor Position Estimation," IEEE-IAS'91 Conf., vol.1.pp. 482-487, 1991.

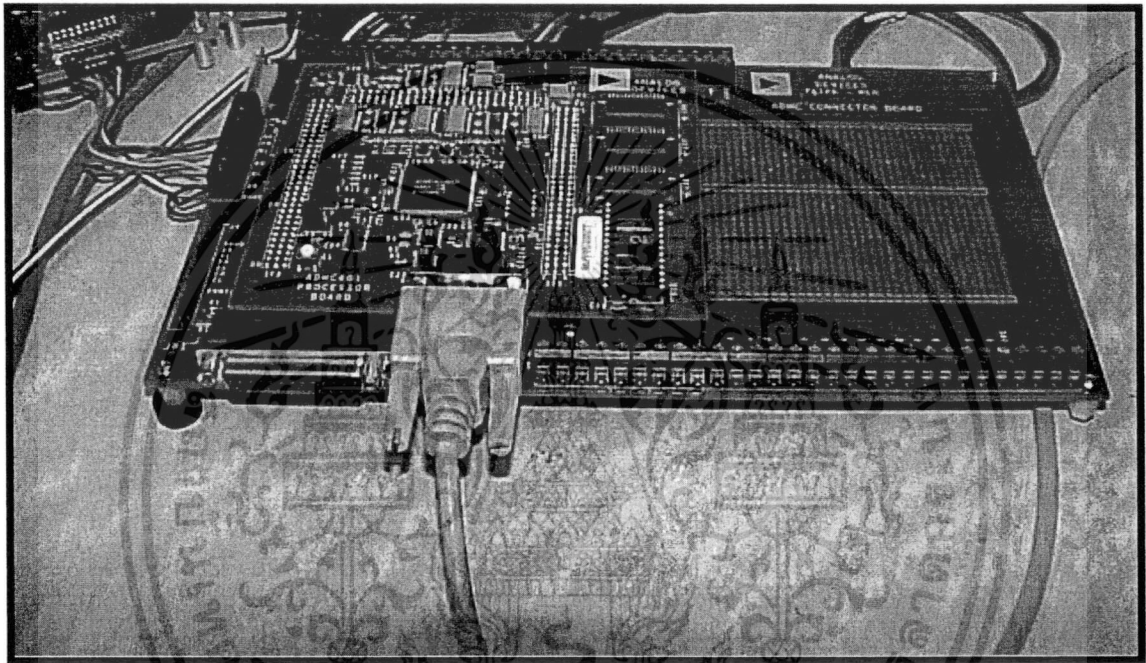
- [11] G. Suresh, B. Fahimi, K.M. Rahman. And M. Ehsani, “**Analysis of Amplitude Modulation Methods For Sensorless SRM Drives**, “IEEE-IECON’98 Conf., vol. 2, pp. 917-922, 1998.
- [12] J. Bu and L. Xu, “**Eliminating Starting Hesitation for Reliable Sensorless Control of Switched Reluctance Motors**,” IEEE-IAS’98 Conf., vol. 1, pp. 693-700, 1998.
- [13] M. Ehsani, I. Husain, and A. B. Kulkarni, “**Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives**,” IEEE Trans. on Industry Application, vol. 28, No.1 pp. 128-134. 1992.
- [14] M. Ehsani, I. Husain, S. Mahajan, and K. R. Ramani, “**New Modulation Encoding Techniques for Indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motors.**” IEEE Trans. On Industry Applications, vol.30, No 1, pp.85-91, 1994.
- [15] Cheok, A.D.; Ertugrul., “**Use of Fuzzy Logic for Modeling, Estimation, and Prediction in Switched Reluctance Motor Drive**, “ Proceedings of IEEE Transactions on Industrial Electronic, 1999, Vol.46, pp:1207-1224, 1999.
- [16] Chen, J.H.; Chau, K.T.; Jiang, Q.; Chan, C.C.; Jiang, S.Z., “**Modeling and Analysis of Chaotic Behavior in Switched Reluctance Motor Drives**, “Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, 2000, vol. 3, 2000, pp: 1551-1556,.2000.
- [17] X Wang and Jih-Sheng Lai , “ **Small-Signal Modeling and Control for PWM Control of Switched Reluctance Motor Drives**,” Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual , Volume: 2 ,pp 546 – 551, 2002.
- [18] Stiebler. M, Ke Liu, “**An Analytical model of switched reluctance machines**,” Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 14, Issue 4, Dec. 1999 Page(s):1100-1107. 1999.
- [19] F. Soares, P.J Costa Branco “ **Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment**, “Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol37 , pp. 989-1009, 2001.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

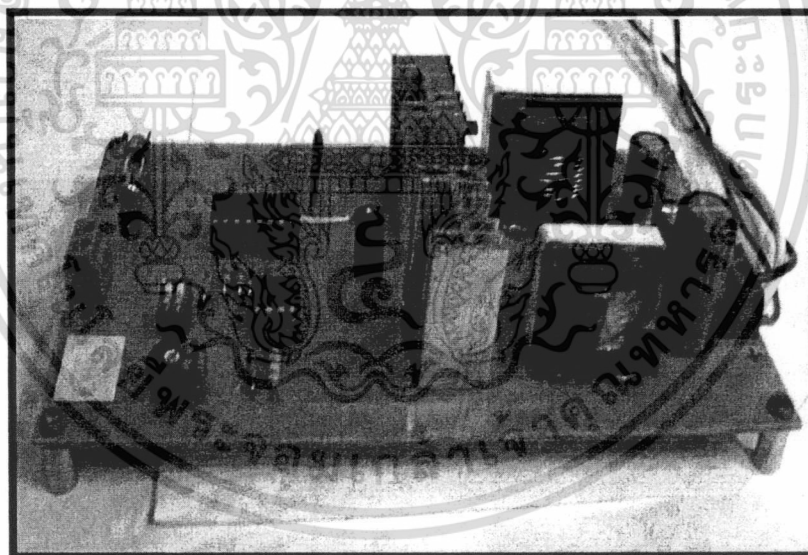
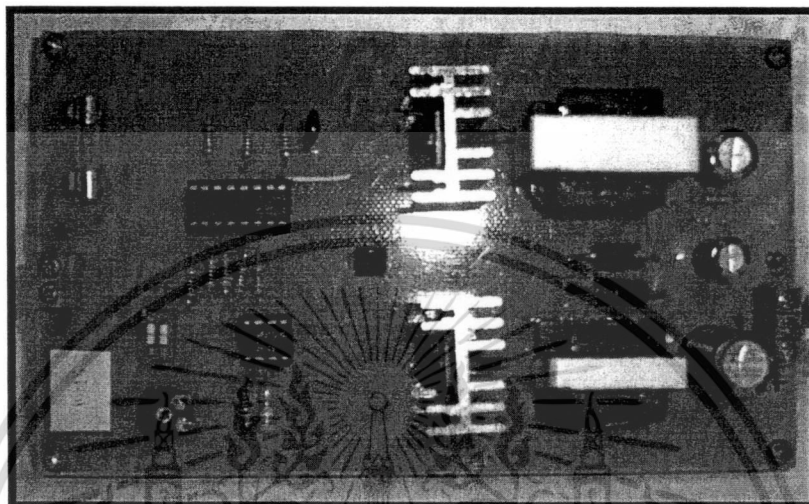


บอร์ดควบคุมแบบ DSP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บอร์ดคิซีทุติยคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้กับพาวเวอร์คอนเวอร์

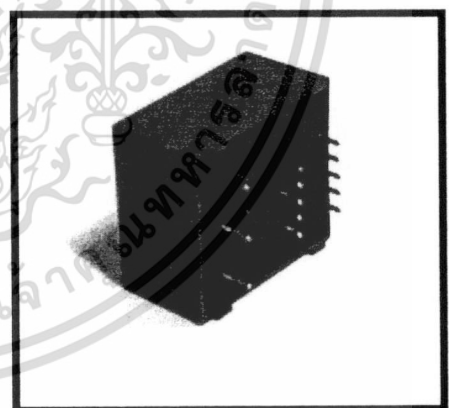
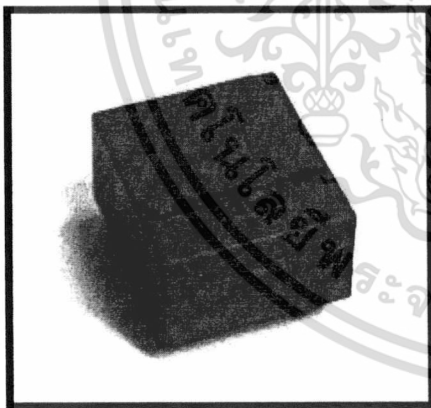
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งแบบ Incremental (Position sensor)

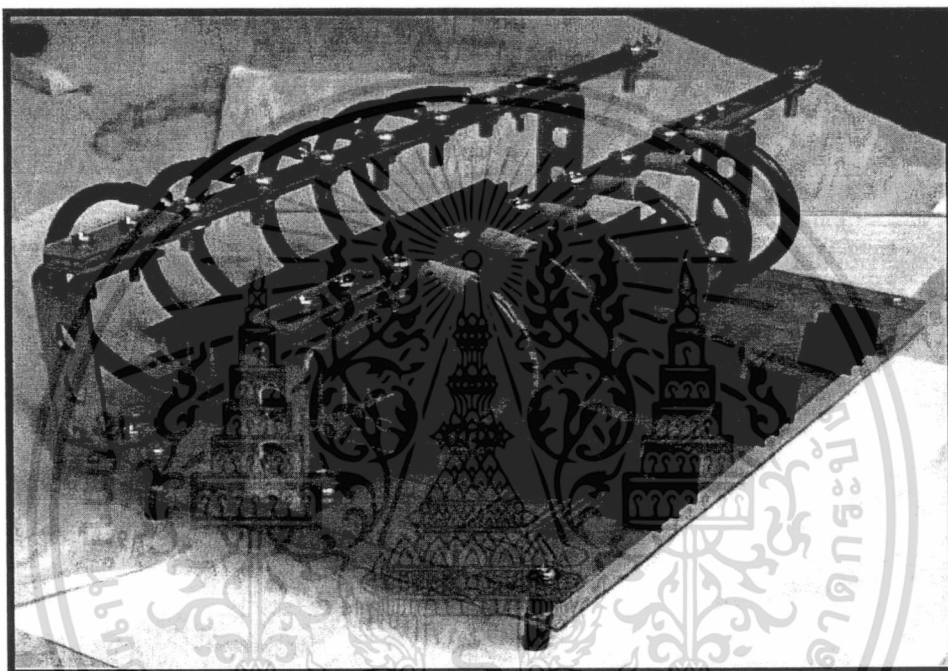


เซนเซอร์ตรวจจับกระแส (Current sensor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



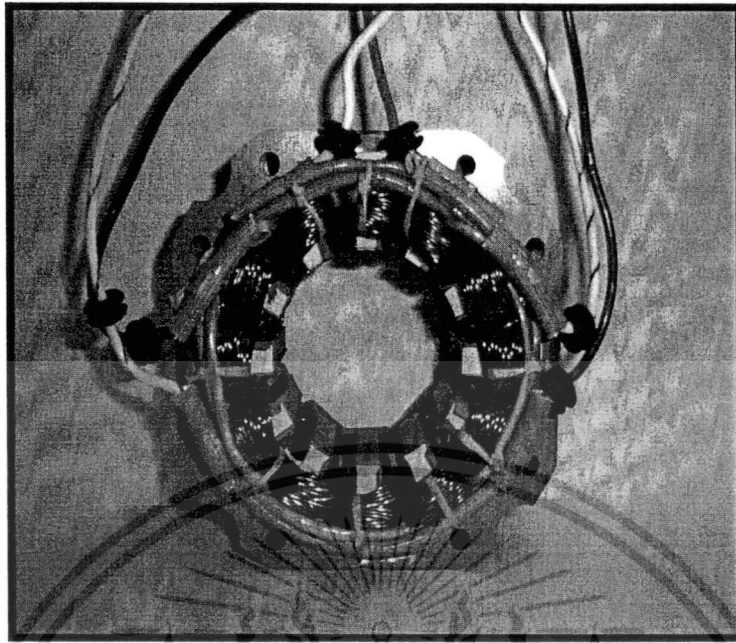
พาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์แบบ Two-quadrant-choppingที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน SRM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

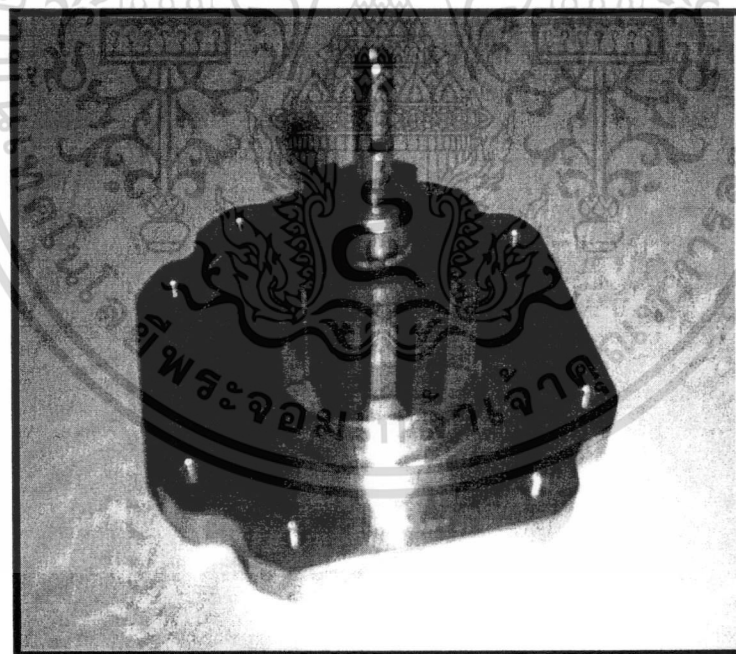


ภาคผนวก จ.
มอเตอร์ SRM 12/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

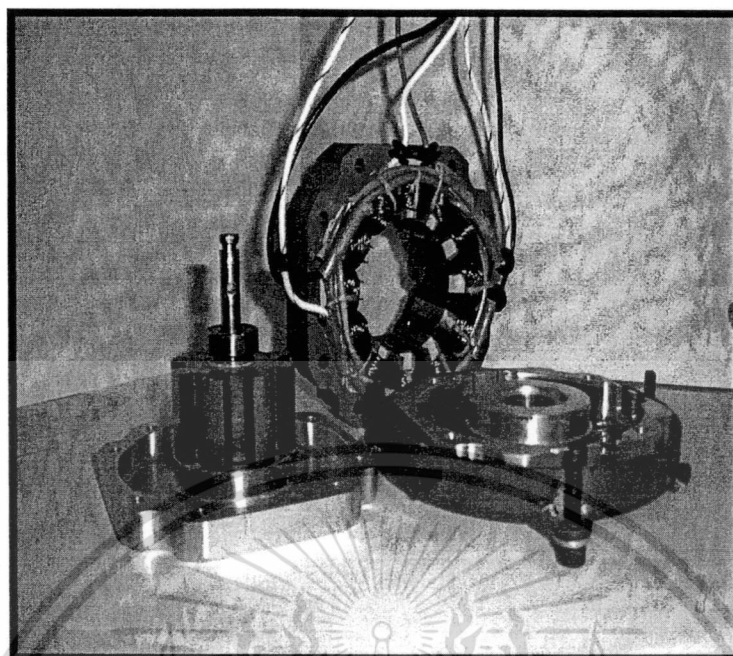


โครงสร้างสเตเตอร์ของ SRM แบบ 12/8

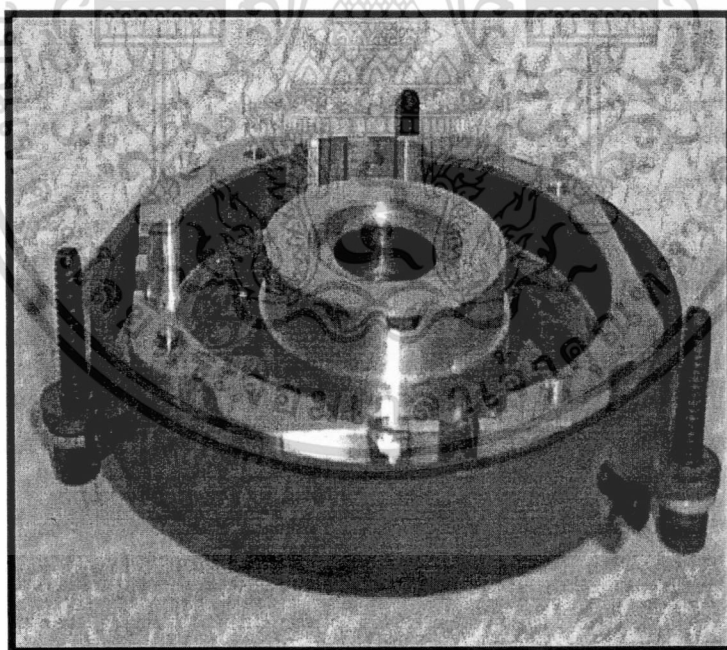


โครงสร้างโรเตอร์ของ SRM แบบ 12/8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โครงสร้างทั้งหมดของ SRM แบบ 12/8



Enclosure ของ SRM แบบ 12/8

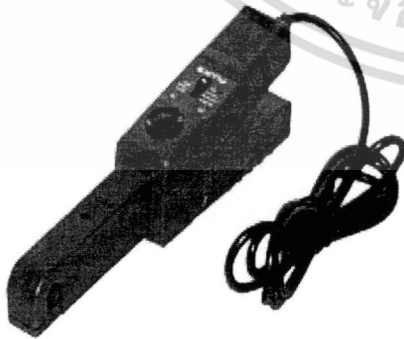
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) รุ่น DL1540 /DL (4 Channel) รายละเอียด 150 MHz Analog Bandwidth 120 MS/s on two channel 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V(DC+AC peak) 2% DC accuracy Internal low pass filter</p>
---	--

	<p>ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe รุ่น 700924 รายละเอียด 100MHz A probe lets you make wide-band Differential input measurements</p>
--	--

	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe(FLUKE) รุ่น 80i-110s รายละเอียด Current ranges: 0 to 10 A dc or ac peak 0 to 100 A dc or ac peak Frequency: DC to 100kHz .(@3 db) Output signals: 10 A range: 100 mV/A 100 A range: 10 mV/A</p>
---	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

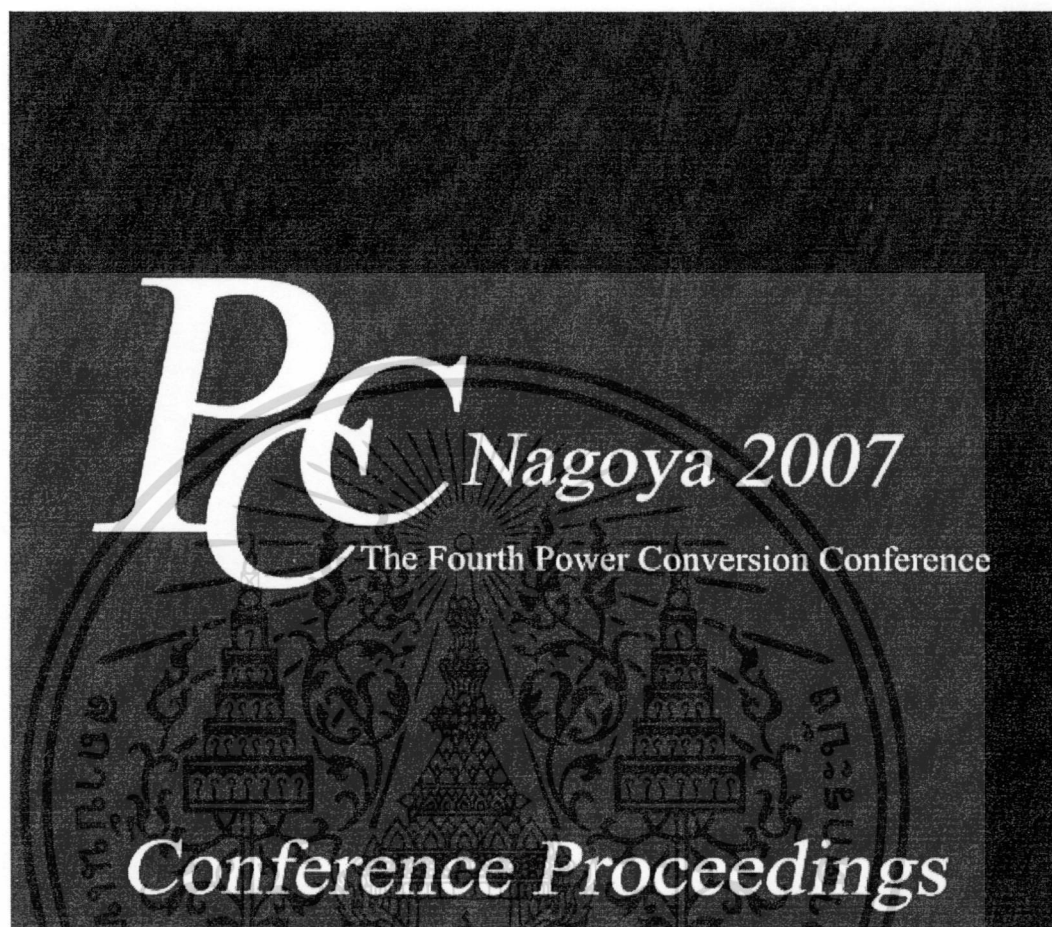
	<p>ผลิตภัณฑ์ Multi Meter(FLUKE)</p> <p>รุ่น 179</p> <p>รายละเอียด True RMS 1kHz</p> <p>Accuracy = 0.09%</p> <p>Vac or Vdc : 0.1mV to 1000V</p> <p>Iac to Idc : 0 to 10A</p>
---	---



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan

April 2-5, 2007



THE INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS OF JAPAN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Position Estimation Technique of a Switched Reluctance Motor at Standstill

K. Trakrancharoungsook, S. Kittiratsatcha
 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL)
 Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok THAILAND 10520

Abstract—This paper proposes the rotor-position estimation technique for a switched reluctance machine (SRM). This technique can be implemented with the system with an incremental encoder or sensorless system. The results are the proper starting phase and exact starting rotor position. The phase winding is energized by the narrow voltage pulse then phase currents are detected and calculated to find the rotor position by using the cubic spline interpolation technique. The proper phase is chosen for a starting phase. This proposed idea is done in the MATLAB/Simulink program.

Index Terms— Position estimation, Cubic spline

I. INTRODUCTION

The switched reluctance motor drive is increasingly gaining attention from both the industry and academy in recent year due to its simple construction and converter. Furthermore its high performance can be operated in wide speed range, thus the SRM drive could be an attracting alternative in variable speed drive [1].

The accurate rotor position is essentially significant for SRM drive, thus a position sensor is important apparatus in a drive system. Therefore mounting a rotor position sensor on the shaft adds to cost and size into SRM drive system. However many indirect rotor position estimation algorithms have been developed to solve a problem of starting hesitation associated with the uncertainty of initial rotor position [1-5]. To ensure that the SRM rotates in a desired direction, the initial rotor position must be known. In a conventional way, measuring initial rotor position is what done before. We called that the rotor position initialization (or alignment). Thereafter the optimal phase can be chosen, to excite is first phase in while rotor remain stand still. The rotor kick-back and oscillation problems that may happen during rotor alignment process from many applications.

The phase excitation of the SRM in sequence according to the desired rotate direction is other conventional way to start the SRM without rotor position sensor. But the negative torque produced during starting process may appear for kick-back the rotor or stop [1]. To ensure reliable in starting of a SRM drive, Reference [1] proposes solution by exciting all the SRM phases for short duration and estimate the initial rotor position base on the flux linkage-current-rotor position characteristic of the SRM.

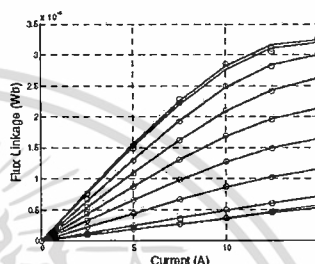


Fig. 1. Flux linkage-current-position characteristic of the 12/8 SRM.

From the Fig. 1, show the relationship between phase flux linkage, current, rotor positions of a 12/8 SRM. Due to using the currents at aligned and unaligned position in estimation rotor position can result in a large error. Because of adjacent curves are very close to each other. Moreover a low level current can result a large error for the rotor position estimation.

In this paper, a rotor position estimation algorithm at stand still is presented. This technique has the following features. First, only narrow pulse is injected into the SRM phases. Second, there is no complicated computation required by implementing the cubic spline. And the last, unlike the previous works, there is no massive magnetizing curve data stored in the memory. Only few cubic spline coefficients are needed. Therefore, this proposed technique is very simple to implement in real time computation.

II. PROPOSED CONTROL TECHNIQUE SCHEME AT STANDSTILL

Proposed control technique scheme at standstill is realized in the following three steps.

1. Excite all SRM phases for short duration.
2. Choose the optimal phase current to estimation rotor position by cubic spline technique.
3. Identify the phase capable of producing positive torque at standstill.

The voltage equation of SRM is shown below.

$$v = iR + L \frac{di}{dt} + \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

Since the rotor keeps stationary during excitation test, and the resistive voltage drop is neglected. The magnetic circuit not saturated. There is not mutual coupling between phases.

Therefore (1) becomes

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

From (2), it can be modified to describe a peak-value of current as in (3).

$$i_{\text{peak}} = \frac{VT}{L(\theta)} \quad (3)$$

where $L(\theta)$ is the inductance at the particular rotor position θ , V is the applied voltage, T is the duration of the voltage pulses. To observe the current amplitude at the different positions, the voltage pulse is applied to the stator winding while the rotor is located from $\theta = 0^\circ$ to $\theta = 45^\circ$ with 2.5° interval. The current at each rotor position of one phase is shown in fig. 2.

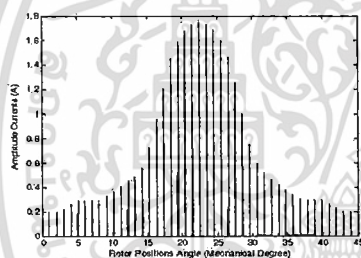


Fig. 2. Phase A current by applying the voltage pulse at the different rotor positions.

From Fig. 2, the magnitudes of the peak currents are different depend on the rotor positions. Therefore a unique rotor position at standstill can be identified. In addition, if all three-phase winding is applied by the voltage pulse simultaneously as in Fig.3. At each rotor position give different peak current of each phase. That difference can be used to identify the phase capable of producing rotor rotating in a desire direction, when it is excited.

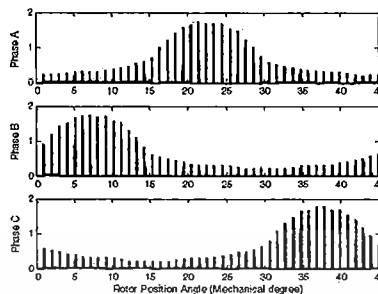


Fig. 3. The amplitude of the currents of phase A, B and C.

Since we apply a voltage pulse into all three phases, consequently the peak of all phase currents are different as shown in Fig.3. There is a question of which phase current is used for position estimation. So this paper proposes an algorithm as in Table I. For the example, if $I_b > I_c > I_a$ then either currents of phase B or phase C are used without significant error. Phase A current is ignored because it has small values and the peak values are flat during $0^\circ < \theta < 7.5^\circ$.

TABLE I
CONDITION FOR SELECTION THE PHASE FOR ROTOR POSITION ESTIMATION

Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Estimation
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	B or C
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 7.5^\circ$	B or C
$I_b > I_a = I_c$	$\theta = 7.5^\circ$	B
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ < \theta < 15^\circ$	A or B
$I_c = I_a > I_b$	$\theta = 15^\circ$	A or B
$I_a > I_b > I_c$	$15^\circ < \theta < 22.5^\circ$	A or B
$I_a > I_c = I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	A
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 30^\circ$	A or C
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	A or C
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 37.5^\circ$	A or C
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	C
$I_c > I_b > I_a$	$37.5^\circ < \theta < 45^\circ$	B or C
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	B or C

The suitable starting phase is determined by the desired direction of rotation and the slope of the inductance profile. The higher the peak current the lesser the phase inductance as described in equation (3). Supposing the rotor is in the region $0^\circ - 2.5^\circ$, if we want the rotor to rotate in the C-B-A sequence then Phase C is the starting phase. But if we want the motor to turn in A-B-C sequence, the starting phase must be phase B instead. Table II shows the proper starting phase at each particular rotor position in C-B-A sequence and A-B-C sequence is shown in Table III.

TABLE II
CONDITION FOR SELECTING THE PHASE TO EXCITATION IN SEQUENCE
C-B-A

Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Excitation
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 2.5^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$2.5^\circ \leq \theta < 5^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$5^\circ \leq \theta < 7.5^\circ$	C
$I_b > I_c = I_a$	$\theta = 7.5^\circ$	C
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ \leq \theta < 10^\circ$	B or C
$I_b > I_a > I_c$	$10^\circ \leq \theta < 12.5^\circ$	B or C
$I_b > I_a > I_c$	$12.5^\circ \leq \theta < 15^\circ$	B or C
$I_b = I_a > I_c$	$\theta = 15^\circ$	B
$I_b > I_b > I_c$	$15^\circ < \theta < 17.5^\circ$	B
$I_a > I_b > I_c$	$17.5^\circ \leq \theta < 20^\circ$	B
$I_a > I_b > I_c$	$20^\circ \leq \theta < 22.5^\circ$	B
$I_a > I_c > I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	B
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 25^\circ$	A or B
$I_a > I_c > I_b$	$25^\circ \leq \theta < 27.5^\circ$	A or B
$I_a > I_c > I_b$	$27.5^\circ \leq \theta < 30^\circ$	A or B
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 32.5^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$32.5^\circ \leq \theta < 35^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$35^\circ \leq \theta < 37.5^\circ$	A
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	A
$I_c > I_b > I_a$	$37.5^\circ \leq \theta < 40^\circ$	A or C
$I_c > I_b > I_a$	$40^\circ \leq \theta < 42.5^\circ$	A or C
$I_c > I_b > I_a$	$42.5^\circ \leq \theta < 45^\circ$	A or C
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	C

TABLE III
CONDITION FOR SELECTING THE PHASE TO EXCITATION IN SEQUENCE
A-B-C

Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Excitation
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	B
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 2.5^\circ$	A or B
$I_b > I_c > I_a$	$2.5^\circ \leq \theta < 5^\circ$	A or B
$I_b > I_c > I_a$	$5^\circ \leq \theta < 7.5^\circ$	A or B
$I_b > I_c = I_a$	$\theta = 7.5^\circ$	A
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ < \theta < 10^\circ$	A
$I_b > I_a > I_c$	$10^\circ \leq \theta < 12.5^\circ$	A
$I_b > I_a > I_c$	$12.5^\circ \leq \theta < 15^\circ$	A
$I_b = I_a > I_c$	$\theta = 15^\circ$	A
$I_a > I_b > I_c$	$15^\circ < \theta < 17.5^\circ$	A or C
$I_a > I_b > I_c$	$17.5^\circ \leq \theta < 20^\circ$	A or C
$I_a > I_b > I_c$	$20^\circ \leq \theta < 22.5^\circ$	A or C
$I_a > I_c > I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	C
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 25^\circ$	C

$I_a > I_c > I_b$	$25^\circ \leq \theta < 27.5^\circ$	C
$I_a > I_c > I_b$	$27.5^\circ \leq \theta < 30^\circ$	C
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	C
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 32.5^\circ$	C or B
$I_c > I_a > I_b$	$32.5^\circ \leq \theta < 35^\circ$	C or B
$I_c > I_a > I_b$	$35^\circ \leq \theta < 37.5^\circ$	C or B
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	B
$I_c > I_b > I_a$	$37.5^\circ < \theta < 40^\circ$	B
$I_c > I_b > I_a$	$40^\circ \leq \theta < 42.5^\circ$	B
$I_c > I_b > I_a$	$42.5^\circ \leq \theta < 45^\circ$	B
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	B

III. ROTOR POSITION ESTIMATION USING CUBIC SPLINE FUNCTION

Since we know that the peak current are the function of the rotor position, then the cubic spline function is implemented for a rotor position as shown in (4). The reason that cubic spline is suitable for this application because the inductance profile is smooth. So there is no need to use more complicated function or complex method. The amplitude of current are collected from $\theta_a = 0^\circ$ to $\theta_a = 45^\circ$ with 2.5° degree interval. The relationship between the peak currents and rotor positions are created using (4). Therefore when amplitude is known, thus the unique rotor position is known as well. Fig. 4 depicts the spline function generated from the spline coefficients in Table IV. We can see that only matrix size 17×4 is needed for position estimation.

$$y = S_i(x) = a_i + b_i(x-x_i) + c_i(x-x_i)^2 + d_i(x-x_i)^3 \quad (4)$$

where x and y are the amplitude of the phase current and the rotor position respectively. a, b, c and d are the cubic spline coefficients. i is the section number.

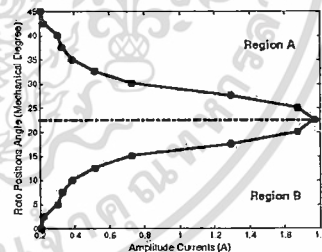


Fig. 4. Spline functions of the current and rotor positions.

From Fig. 4, there are two rotor positions which are in both region A and region B. The correct rotor position must be accordingly decided by the Table I.

TABLE IV
CUBIC SPLINE COEFFICIENTS

Cubic spline's coefficients			
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
-3.6759e+005	31368	-554.02	2.5
-3.6759e+005	23428	-159.48	0
1.0744e+006	-21895	-96.487	7.5
-2.4892e+005	17751	-147.47	5
32040	-5175.1	238.6	10
-3431.4	890.14	-31.785	12.5
260.35	-189.71	41.69	15
287.55	32.653	-3.0252	17.5
287.55	194.92	39.781	20
-287.55	-32.653	3.0252	27.5
-260.35	189.71	-41.69	30
3431.4	-890.14	31.785	32.5
-32040	5175.1	-238.6	35
4892e+005	-17751	147.47	40
-1.0744e+006	21895	96.487	37.5
3.6759e+005	-23428	159.48	45
3.6759e+005	-31368	554.02	42.5

Fig. 5 shows the diagram of proposed rotor position estimation algorithm. This is done in the MATLAB/Simulink program. More details of the diagram are shown in the Appendix.

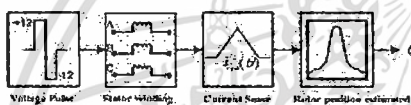


Fig. 5. Block diagram of the initial rotor position estimation technique.

IV. SIMULATION RESULTS

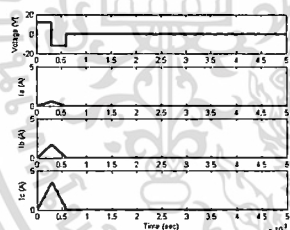


Fig. 6. Variation of currents during voltage pulse excitation at $\theta_A = 43^\circ$.

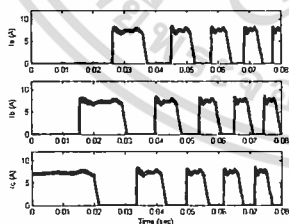


Fig. 7. At $\theta_A = 43^\circ$, phase C is chosen to be a starting phase according to Table II.

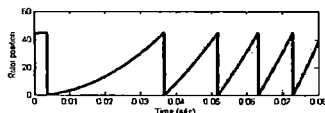


Fig. 8. The algorithm has chosen the starting rotor position at $\theta_A = 43^\circ$.

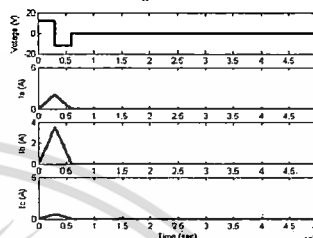


Fig. 9. Variation of currents during voltage pulse excitation at $\theta_A = 13^\circ$.

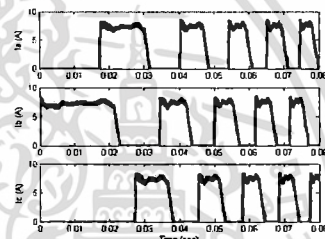


Fig. 10. At $\theta_A = 13^\circ$, phase B is chosen to be a starting phase according to Table II.

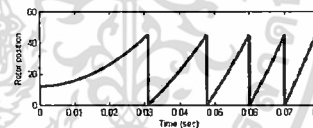


Fig. 11. The algorithm has chosen the starting rotor position at $\theta_A = 13^\circ$.

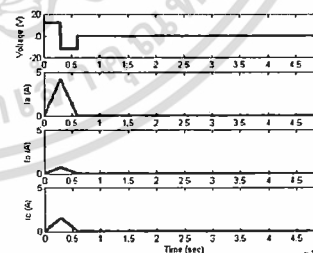


Fig. 12. Variation of currents during voltage pulse excitation at $\theta_A = 27^\circ$.

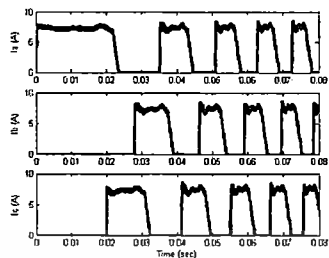


Fig. 13. At $\theta_A = 27^\circ$, phase A is chosen to be a starting phase according to Table II.

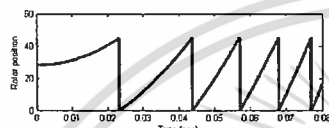


Fig. 14. The algorithm has chosen the starting rotor position at $\theta_A = 27^\circ$.

TABLE V
EXAMPLES OF THE ROTOR POSITION ESTIMATION

Actual rotor position	Calculation from phase A	Calculation from phase B	Calculation from phase C
$\theta = 43^\circ$	35°	42.99°	43°
$\theta = 13^\circ$	13.01°	12.99°	15.07°
$\theta = 27^\circ$	27.02°	23.57°	26.99°

The proposed algorithm has developed in the MATLAB/Simulink program. In the simulation program, we can set the initial rotor position to imitate the real event. Then the algorithm is used to estimate the rotor position. Fig. 6 - 14 show the results from the computer simulation. Supposing the initial position of the rotor is at $\theta_A = 43^\circ$. By using the proposed algorithm, each phase winding is energized by a narrow voltage pulse. The phase currents are detected as shown in Fig. 6 which is $I_c > I_b > I_a$. By using Table I, peak current of either phase B or phase C can be used for calculation. By applying the peak current values in the cubic spline function, the result give the standstill rotor position at $\theta_A = 43^\circ$ is shown in Fig. 8. Besides the proper starting phase is chosen using Table II by energized phase C at standstill. Fig. 8 shows the rotor position, there is no sign of starting hesitation. Table V shows the result examples from the proposed algorithm at various actual rotor positions. Fig 9-11 are tested at $\theta_A = 13^\circ$ and Fig 12-14 are tested at $\theta_A = 27^\circ$ respectively.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

To verify the proposed idea and to confirm the simulation results, the experimental setups are performed. The rotor position is observed by the DAC of a DSP. The

unaligned position is at $\theta_A = 0^\circ$ and represented by 0V from DAC. The fully aligned position is at $\theta_A = 22.5^\circ$ and represented by 1.08V from DAC. The adjacent unaligned position is at $\theta_A = 45^\circ$ and represented by 2.16V from DAC.

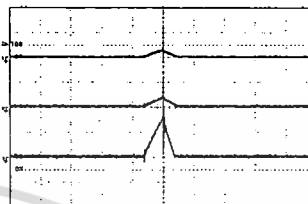


Fig. 15. Phase currents during voltage pulse injection at $\theta \approx 43^\circ$.

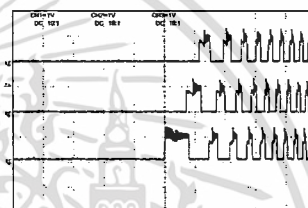


Fig. 16. At $\theta \approx 43^\circ$, phase C has chosen to be a starting phase according to Table II.

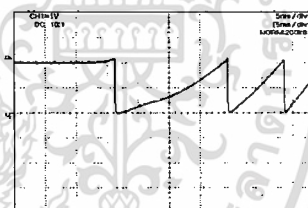


Fig. 17. The algorithm computes the starting angle close to $\theta_A = 43^\circ$.

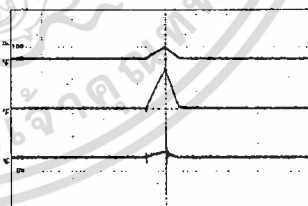


Fig. 18. Phase currents during voltage pulse injection at $\theta_A = 13^\circ$.

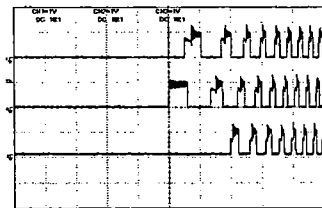


Fig. 19. At $\theta_A \cong 13^\circ$, phase B has chosen to be a starting phase according to Table II.

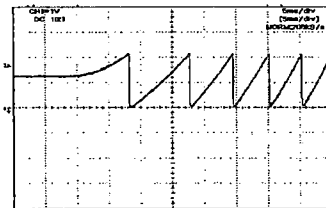


Fig. 23. The algorithm computes the starting angle close to $\theta_A = 27^\circ$.

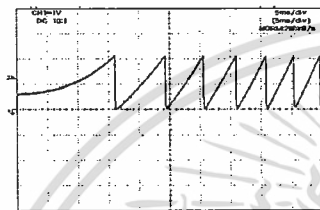


Fig. 20. The algorithm computes the starting angle close to $\theta_A = 13^\circ$.

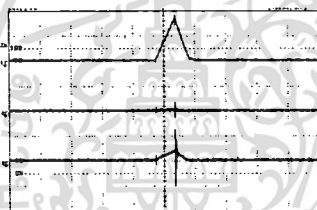


Fig. 21. Phase currents during voltage pulse injection at $\theta_A \cong 27^\circ$.

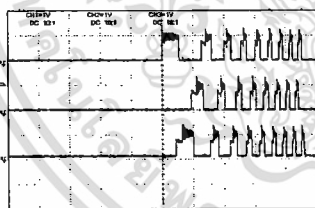
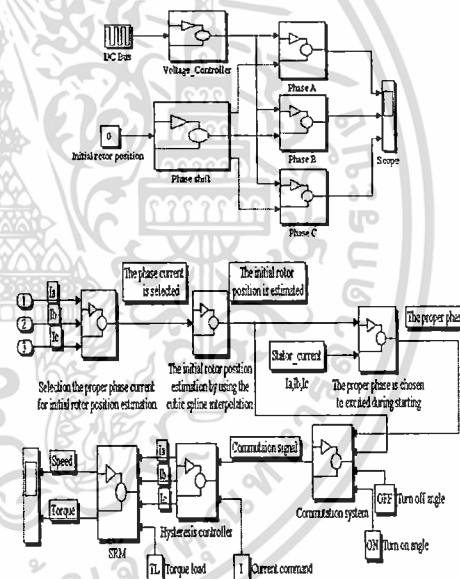


Fig. 22. At $\theta_A \cong 27^\circ$, phase A has chosen to be a starting phase according to Table II.

VI. CONCLUSIONS

An idea of the rotor position estimation algorithm at standstill has been presented in the paper. By injecting voltage pulse into the all stator phase simultaneously, the initial rotor position can be estimated by applying the cubic spline interpolation technique. The proper phase has been chosen to excite while starting. The proposed algorithm is verified by both the computer simulation and the implemented in the real-time computation.

APPENDIX



REFERENCES

- [1] J.Bu and L.Xu "Eliminating Starting Hesitation for Reliable Sensorless Control of Switched Reluctance Motors," *IEEE-IAS'98 Conf.*, vol.1 pp.693-700, 1998.
- [2] M.Ehsani, I. Husain, and A. BKulkarni, "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drive," *IEEE Trans. On Industry Application* vol.28, No 1 pp. 128-134.1992.
- [3] Gao, H.; Salmasi, F.R.; Ehsani, M.; Sensorless control of SRM at standstill. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. *Sixteenth Annual IEEE Volume 2*, 4-8 March 2001 Page(s):850 - 856 vol.2
- [4] Walter D. Harris and Jeffrey H. Lang, Member , IEEEA Simple Motion Estimator for Variable-Reluctance Motors. *IEEE Transaction on Industry Applicatio* , Vol.26, No.2 ,March - April 1990.
- [5] Khotpanya, S.; Kittiratsatcha, S.; Kazuhisa, A Magnetic Model of a Three - Phase Switched- Reluctance Machine using Cubic Spline Interpolation Technique. Power Electronics and Drives Systems, 2005. *PEDS2005.InternationalConferenceonVolume 2*, 28-01 Nov. 2005 Page(s):1167 - 1170.





การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29

29th Electrical Engineering Conference (EECON-29)

9 - 10 พฤศจิกายน 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



สาร

- นายกรัฐมนตรี
- รัฐมนตรีว่าการกระทรวงศึกษาธิการ
- อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- ประธานคณะกรรมการประชุม EECON-29

คณะกรรมการ

- สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย
- คณะกรรมการประชุม EECON-29
- คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิการประชุม EECON-29
- คณะกรรมการจัดงานการประชุม EECON-29
- ผู้พิจารณาบทความการประชุม EECON-29

บรรณาธิการ

- ผู้เขียนบทความ
- คำสำคัญ

บทความ

- บทความรับเชิญ
- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ตารางการประชุม

- วันที่ 9 พฤศจิกายน 2549
- วันที่ 10 พฤศจิกายน 2549



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการประมาณตำแหน่งของมอเตอร์แบบสวิตช์รีลัคแตนซ์ในขณะอยู่นิ่ง Position Estimation Technique of a Switched Reluctance Motor at Standstill

กิตติศักดิ์ ละครการเจริญสุข และสุวัฒน์ กิตติศรีมั่งงอย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ถ. ลาดกระบัง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการประมาณตำแหน่งของ SRM ในสถานะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ได้กับทั้งระบบที่มีตัวตรวจนับตำแหน่งแบบ incremental หรือแบบปราศจากตัวตรวจนับตำแหน่ง ผลที่ได้คือ เฟสที่เหมาะสมในการเริ่มหมุนมอเตอร์ในทิศทางที่ต้องการ และตำแหน่งของโรเตอร์ที่ถูกต้อง ขดลวดเฟสของมอเตอร์จะถูกกระตุ้นด้วยพัลส์แรงดันที่มีช่วงแคบหรือแคบทุกเฟส จากนั้นทำการตรวจวัดค่ากระแสในแต่ละเฟส แล้วนำค่าแอมพลิจูดของกระแสที่ได้มาเปรียบเทียบกับโดยที่เฟสที่มีค่าแอมพลิจูดเหมาะสมที่สุดจะถูกนำมาใช้ในการประมาณตำแหน่งโดยใช้เทคนิคคิวบิกสไปน์ และใช้เป็นเฟสที่ห้องจ่ายพลังงานเป็นเฟสในช่วงเริ่มหมุน โดยเทคนิคนี้ได้ให้นำเสนอในบทความนี้เป็นครั้งแรกจำลองโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

คำสำคัญ : การประมาณตำแหน่ง, คิวบิกสไปน์, มอเตอร์แบบสวิตช์รีลัคแตนซ์

Abstract

This paper proposes the rotor-position estimation technique for a switched reluctance machine (SRM). This technique can be implemented in the system using an incremental encoder or sensorless system. The results are the proper starting phase and exact starting rotor position. The phase winding is energized by the narrow voltage pulse then phase currents are detected and compared to find the position using cubic spline interpolation technique. The selected phase is used for a starting phase. This work is done by the MATLAB/Simulink program.

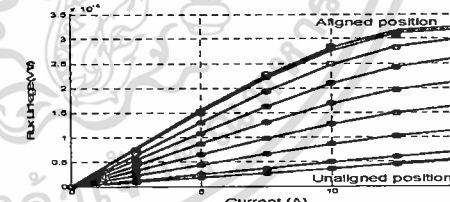
Keywords: Position estimation, Cubic spline, SRM

1. บทนำ

ระบบขับเคลื่อน SRM ได้รับความนิยมมากขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรม และ สถาบันวิจัยเทคโนโลยี ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนของมอเตอร์ และ คอนโทรลเลอร์ อีกทั้งระบบขับเคลื่อน SRM ยังให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงทุกสถานการณ์การทำงาน [1] จึงทำให้ระบบขับเคลื่อน SRM เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในงานที่ต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

เนื่องจากข้อผิดพลาดของโรเตอร์มีความจำเป็นต่อระบบขับเคลื่อน SRM ดังนั้นเซนเซอร์ตรวจนับตำแหน่งโรเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากในระบบขับเคลื่อน SRM อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์แบบได้อ่อนหลาย วิธีก็ได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการควบคุมแบบปราศจากตัวตรวจนับตำแหน่ง [1-5] ก่อนที่มอเตอร์จะเริ่มหมุนเราสามารถทำให้โรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ขั้วของโรเตอร์ และ สเตเตอร์ตรงกัน (Aligned position) เพื่อเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นของตำแหน่งโรเตอร์ให้กับระบบขับเคลื่อน SRM เฟสที่สามารถสร้างแรงบิดทางด้านบวกจะถูกจ่ายพลังงานให้เฟสแรกในช่วงเริ่มหมุน ซึ่งสามารถทราบจากที่ได้มีการกำหนดค่าเริ่มต้นในขั้นตอนแรก แต่ปัญหาการเริ่มหมุนที่ผิดปกติทาง และ การแกว่ง ของ โรเตอร์ก็ยังคงเกิดขึ้นได้ในบางครั้ง

การกระตุ้นขดลวดเฟสต้องเป็นลำดับก็เป็นอีกวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนในระบบขับเคลื่อน SRM ที่ปราศจากการใช้เซนเซอร์ตรวจนับตำแหน่ง การเกิดแรงบิดทางด้านลบในช่วงเริ่มหมุนอาจทำให้โรเตอร์หมุนทิศทาง หรือ โรเตอร์ถูกยึดอยู่นิ่ง [3] เพื่อให้แน่ใจว่าเสถียรภาพของการควบคุมระบบขับเคลื่อนแบบปราศจากตัวตรวจนับตำแหน่งเกิดขึ้นได้ในช่วงเริ่มหมุน ใน [1] ได้นำเสนอการค้น ขดลวดสเตเตอร์ทั้งหมดพร้อมกันในช่วงเวลาสั้นๆ และการประมาณค่าเริ่มต้นของตำแหน่งโรเตอร์โดยใช้คุณสมบัติเส้นแรงเชื่อมโยง-ค่ากระแส-ตำแหน่งโรเตอร์ ของ SRM [1] คุณลักษณะแรงเชื่อมโยง-ค่ากระแส-ตำแหน่งโรเตอร์ ของมอเตอร์แบบ 12/8 แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 คุณลักษณะ เส้นแรงเชื่อมโยง-ค่ากระแส-ตำแหน่งโรเตอร์ของ SRM แบบ 12/8

เนื่องจากความซิดกันของเส้นโค้ง ณ ตำแหน่ง Aligned position, unaligned position และ ค่ากระแสที่มีค่าเท่ากันจะทำให้ความ

PE20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดลดอันเล็กน้อยเนื่องจากการวัดค่ากระแส หรือ การประมาณค่าเส้นแรงเชื่อม โขงนั้นสามารถทำให้การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์เกิดความผิดพลาดได้มาก

2. เทคนิคการควบคุมระบบขับเคลื่อน SRM ขณะอยู่นิ่ง

เทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ของ SRM ในขณะที่อยู่นิ่งสามารถทำได้ดังต่อไปนี้ 1.) ส่งพัลส์แรงดันที่มีช่วงแคบเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์พร้อมกันทุกเฟส 2.) วัดขนาดแอมพลิจูดค่ากระแสทุกเฟส 3.) เลือกกระแสเฟสที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าเริ่มต้นของตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง และ เลือกเฟสที่สามารถสร้างแรงบิดทางค้ำบวกลงในทิศทางที่ต้องการขณะเริ่มหมุน ตามตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สมการแรงดันค้ำบวกลงของ SRM แสดงได้ คือ

$$v = iR + L \frac{di}{dt} + \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \tag{1}$$

ขณะที่โรเตอร์หยุดอยู่นิ่งค่า ω_m มีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อไม่พิจารณาค่าแรงดันที่ตกคร่อมที่ขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นสมการแรงดันเฟสที่นำมาพิจารณาขณะที่โรเตอร์อยู่นิ่งคือ

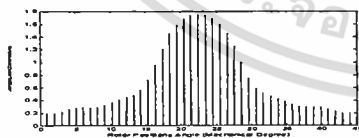
$$v = L \frac{di}{dt} \tag{2}$$

จากสมการที่ 2 เมื่อกำหนดให้ 1) ไม่พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส 2) ไม่พิจารณาผลของกระแสไหลวนในแกนเหล็ก 3) โรเตอร์หยุดอยู่ในขณะที่ทำการทดสอบ โดยส่งพัลส์แรงดันเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ 4) วงจรแม่เหล็กไม่เกิดการอิ่มตัว 5) ไม่พิจารณาแรงค้ำบวกลงคร่อมตัวค้ำบวกลงขดลวด เมื่อดำเนินการพิจารณาแอมพลิจูดของกระแส จากสมการที่ (2) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$i_{peak} = \frac{VT}{L(\theta)} \tag{3}$$

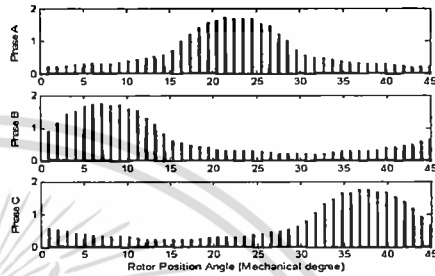
เมื่อ T คือ ช่วงเวลาของพัลส์แรงดัน, V คือ พัลส์แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ, $L(\theta)$ คือ ค่าอินดักแตนซ์ ณ ที่ตำแหน่งโรเตอร์ เมื่อทำการจำลองเทคนิคที่นำเสนอนี้ด้วยการส่งพัลส์แรงดันไปที่ขดลวดสเตเตอร์เพื่อสังเกตุค่าแอม-พลิจูดของกระแส ค่าแห่งค้ำบวกลง โดยเริ่มที่มุม $\theta = 0^\circ$ จนถึง $\theta = 45^\circ$ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2

ในบทความนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่ง ซึ่งมีความโดดเด่นดังนี้ 1.) ส่งพัลส์แรงดันที่มีช่วงแคบเข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์ 2.) ไม่จำเป็นต้องใช้คุณสมบัติเห็นแรงเชื่อมโยงค่ากระแส-ค่าแห่งโรเตอร์ ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ 3.) การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์จึงไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2 ค่ากระแสของเฟส A ณ ตำแหน่ง $\theta = 0^\circ - 45^\circ$

เมื่อทำการแบ่งช่วงของค่าแห่งโรเตอร์เพื่อพิจารณาแอมพลิจูดของกระแส โดยแต่ละช่วงห่างกัน 2.5° ซึ่งสังเกตได้ว่าค่ากระแสในแต่ละช่วงมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นเราสามารถหาตำแหน่งโรเตอร์ ณ มุมค่าแห่งโรเตอร์ได้ นอกจากนี้ถ้าค่ากระแสทั้ง 3 เฟสมาพิจารณาด้วยกันดังรูปที่ 3 ก็จะสังเกตเห็นถึงความแตกต่างของค่าแอมพลิจูดในแต่ละเฟสซึ่งสามารถใช้สำหรับเลือกเฟสที่เหมาะสมในการจ่ายพลังงานให้ขดลวดสเตเตอร์ ขณะเริ่มหมุนได้ตามทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 3 แอมพลิจูดกระแสของเฟส A, B และ C ณ ตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 3 พบว่าแอมพลิจูดที่ได้ ณ ตำแหน่งค่าแห่งโรเตอร์ที่แตกต่างกันซึ่งเฟสที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์จะถูกเลือก ซึ่งสามารถสรุปเงื่อนไขในการเลือกได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขสำหรับการเลือกเฟสเพื่อนำไปประมาณค่าตำแหน่งของโรเตอร์

Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Estimation
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	B or C
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 7.5^\circ$	B or C
$I_b > I_c = I_a$	$\theta = 7.5^\circ$	B
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ < \theta < 15^\circ$	A or B
$I_b = I_a > I_c$	$\theta = 15^\circ$	A or B
$I_a > I_b > I_c$	$15^\circ < \theta < 22.5^\circ$	A or B
$I_a > I_c = I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	A
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 30^\circ$	A or C
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	A or C
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 37.5^\circ$	A or C
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	C
$I_c > I_b > I_a$	$37.5^\circ < \theta < 45^\circ$	B or C
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	B or C

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงที่ช่วงมุมค่าแห่งโรเตอร์ค่ากระแสมีค่าความชันที่แตกต่างกัน เช่น ที่ช่วง $0^\circ - 2.5^\circ$ ค่าของ I_a และ I_b มีความชันที่เป็นบวกดังนั้นค่าอินดักแตนซ์ไฟฟ้ลัของเฟส L_a , L_b ที่ช่วงนั้นก็จะมีความชันที่เป็นลบด้วย ในทางกลับกันค่าของ I_c มีความชันเป็นลบซึ่งค่าของอินดักแตนซ์ไฟฟ้ลัของเฟส L_c ก็จะมีความ

PE20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นบวก ดังนั้นจำเป็นต้องทำให้โรเตอร์เริ่มคืบหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาที่ควรเลือกจ่ายพลังงานให้กับเฟส C เป็นเฟสแรก ด้วยเหตุนี้เพื่อต้องการให้ SRM เริ่มหมุนไปในทิศทางที่ต้องการจึงได้มีการสร้างอัลกอริทึมเพื่อใช้เลือกเฟสที่ควรจ่ายพลังงานในช่วงเริ่มหมุนตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการเลือกเฟสเพื่อจ่ายพลังงานให้จลนศาสตร์ของโรเตอร์เมื่อต้องการให้มอเตอร์เริ่มหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

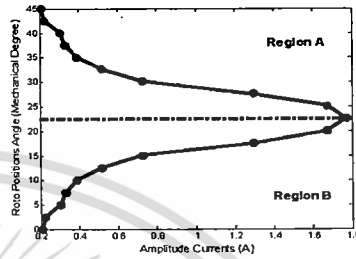
Current Order	Rotor Position	Chosen Phase For Excitation
$I_c > I_b > I_a$	$\theta = 0^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$0^\circ < \theta < 2.5^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$2.5^\circ \leq \theta < 5^\circ$	C
$I_b > I_c > I_a$	$5^\circ \leq \theta < 7.5^\circ$	C
$I_b > I_c = I_a$	$\theta = 7.5^\circ$	C
$I_b > I_a > I_c$	$7.5^\circ < \theta < 10^\circ$	B or C
$I_b > I_a > I_c$	$10^\circ \leq \theta < 12.5^\circ$	B or C
$I_b > I_a > I_c$	$12.5^\circ \leq \theta < 15^\circ$	B or C
$I_b = I_a > I_c$	$\theta = 15^\circ$	B
$I_a > I_c > I_b$	$15^\circ < \theta < 17.5^\circ$	B
$I_a > I_c > I_b$	$17.5^\circ \leq \theta < 20^\circ$	B
$I_a > I_c > I_b$	$20^\circ \leq \theta < 22.5^\circ$	B
$I_a > I_c = I_b$	$\theta = 22.5^\circ$	B
$I_a > I_c > I_b$	$22.5^\circ < \theta < 25^\circ$	A or B
$I_a > I_c > I_b$	$25^\circ \leq \theta < 27.5^\circ$	A or B
$I_a > I_c > I_b$	$27.5^\circ \leq \theta < 30^\circ$	A or B
$I_a = I_c > I_b$	$\theta = 30^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$30^\circ < \theta < 32.5^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$32.5^\circ \leq \theta < 35^\circ$	A
$I_c > I_a > I_b$	$35^\circ \leq \theta < 37.5^\circ$	A
$I_c > I_a = I_b$	$\theta = 37.5^\circ$	A
$I_c > I_b > I_a$	$37.5^\circ < \theta < 40^\circ$	A or C
$I_c > I_b > I_a$	$40^\circ \leq \theta < 42.5^\circ$	A or C
$I_c > I_b > I_a$	$42.5^\circ \leq \theta < 45^\circ$	A or C
$I_c = I_b > I_a$	$\theta = 45^\circ$	C

3. การประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะโรเตอร์อยู่นิ่ง

เมื่อทำการส่งพัลส์แรงดันตรวจสอบไปที่สเตเตอร์ที่ขดลวดของกระแสที่เกิดขึ้นขณะที่โรเตอร์หยุดอยู่นิ่ง ค่ากระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่ต่างกัน ๓ ค่าแห่งต่างๆ ซึ่งเมื่อทำการบันทึกค่าแอมพลิจูดของกระแส ๓ ชุดค่าต่างๆ ตั้งแต่ $0^\circ - 45^\circ$ และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าตำแหน่งโรเตอร์กับค่าแอมพลิจูดของกระแสดังรูปที่ 4 เราจะสามารถหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งได้ โดยเทคนิคที่นำมาใช้ในปัจจุบันก็คือเทคนิคการประมาณค่าระหว่างแบบคิวบิกสไปไลน์ (Cubic Spline Interpolation Method) ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งโรเตอร์คือ ฟังก์ชันพหุนามอันดับที่ 3

$$y = s_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (4)$$

เมื่อค่า x และ y คือ แอมพลิจูดของค่ากระแส และ ค่าแห่งของโรเตอร์ ตามลำดับ โดยที่ a, b, c, d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปไลน์ โดยที่ i คือ ช่วงที่ใช้พิจารณาซึ่งจากข้อมูลของค่ากระแส ๓ ค่าแห่งต่างๆ สามารถแสดงได้รูปที่ 4



รูปที่ 4 แอมพลิจูดของค่ากระแสที่สเตเตอร์กับตำแหน่งโรเตอร์

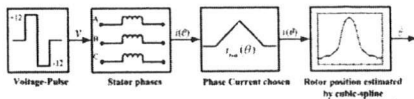
จากรูปที่ 4 ๓ ค่ากระแส ค่าหนึ่ง เราสามารถทราบตำแหน่งโรเตอร์ได้ทั้งของ 2 ค่าที่ regions A และ B ด้วยเหตุนี้ในการหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งจะต้องพิจารณาแอมพลิจูดของค่ากระแสควบคู่ไปกับ ตารางที่ 1 จึงจะรู้ค่าตำแหน่งโรเตอร์ที่ถูกต้อง

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของคิวบิกสไปไลน์

Cubic spline's coefficients			
a	b	c	d
-3.6759e+005	31368	-554.02	2.5
-3.6759e+005	23428	-159.48	0
-1.0744e+006	-21895	96.487	7.5
-2.4892e+005	17751	-147.47	5
32040	-5175.1	238.6	10
-3431.4	890.14	-31.785	12.5
260.35	-189.71	41.69	15
287.55	32.653	-3.0252	17.5
287.55	194.92	39.781	20
-287.55	-32.653	3.0252	27.5
-360.35	189.71	-41.69	30
3431.4	-890.14	31.785	32.5
-32040	5175.1	-238.6	35
-4892e+005	-17751	147.47	40
-1.0744e+006	21895	96.487	37.5
3.6759e+005	-23428	159.48	45
3.6759e+005	-31368	554.02	42.5

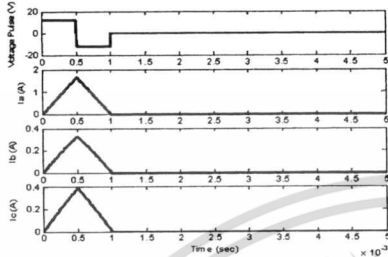
ในรูปที่ 5 แสดงถึงขั้นตอนในการหาค่าตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งเป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink program.



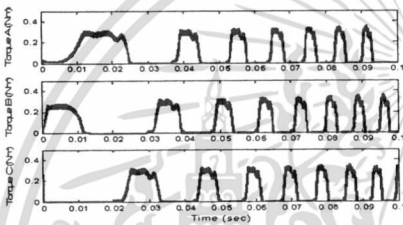


รูปที่ 5 บล็อกโคจระแกรนของการหาตำแหน่งโรเตอร์ขณะอยู่หนึ่ง

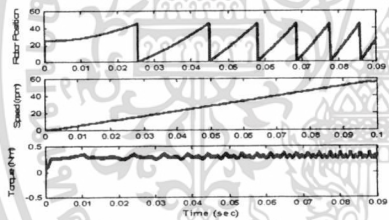
4.ผลการจำลอง



รูปที่ 6. พัลส์แรงดัน และ ค่ากระแส ในช่วงที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 7 เฟส A และ B ถูกเลือกให้จ่ายพลังในช่วงเริ่มหมุนที่ $\theta_r = 25^\circ$



รูปที่ 8. ตำแหน่งโรเตอร์, ความเร็ว, แรงบิดขณะ โรเตอร์เริ่มหมุนที่ $\theta_r = 25^\circ$

จากการจำลองเฟส A และ B ถูกเลือกให้จ่ายพลังในช่วงเริ่มหมุนที่ $\theta_r = 25^\circ$ ตามตารางที่ 2

5. สรุป

เทคนิคการประมาณตำแหน่งของ SRM ที่นำเสนอสามารถนำมาใช้ในกรหาตำแหน่งของโรเตอร์ ในขณะที่อยู่หนึ่งได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถหาเฟสที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มหมุนได้อย่างถูกต้องอีกด้วย เทคนิคที่ได้นำเสนอสามารถนำมาใช้กับระบบที่มีและไม่มี

เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในขณะที่มอเตอร์หมุนต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.Bu and L.Xu "Eliminating Starting Hesitation for Reliable Sensorless Control of Switched Reluctance Motors,"IEEE- IAS'98 Conf., vol.1 pp.693-700, 1998.
- [2] M.Ehsani, I. Husain, and A. BKulkarni, "Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drive," IEEE Trans. On Industry Application vol.28, No 1 pp .128 134.1992
- [3] Gao, H.; Salmasi, P.R.; Ehsani, M.; Sensorless control of SRM at standstill, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Volume 2, 4-8 March 2001 Page(s):850 - 856 vol.2
- [4] Walter D. Harris and Jeffrey H. Lang, Member, IEEEA Simple Motion Estimator for Variable-Reluctance Motors. IEEE Transaction on Industry Application , Vol.26, No. 2, March/April 1990
- [5] Khotpanya, S.; Kittraisatcha, S.; Kazuhisa. A Magnetic Model of a Three-Phase Switched-Reluctance Machine using Cubic Spline Interpolation Technique. Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS2005.International Conference on Volume 2, 28-01 Nov. 2005 Page(s):1167 --1170

ประวัติผู้จัดทำ

กิตติรัตน์ ตรีการเจริญสุข ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ผู้พัฒนา กิตติรัตน์ตั้งใจ ด้รับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ M.S. และ Ph.D. ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังจาก Rensselaer Polytechnic Institute มลรัฐนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา ด้รับการบรรจุเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี พ.ศ. 2545 และดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์เมื่อปี พ.ศ. 2548 งานวิจัยที่เกี่วข้องกับการออกแบบเครื่องจักรกลแบบสวิตซ์รีล็กเมนต์นซ์ และงานส่งต้งวางแบบ solid state

PE20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายกิตติรัตน์ ตระการเจริญสุข เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ.2524 ที่จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2547 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง :ซึ่งปัจจุบันได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบควบคุมฝ่ายบริการของบริษัทอินเวนซิสโปรดิวส์ (Invensys Process Systems Thailand Co., Ltd.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้