การควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

DIRECT TORQUE CONTROL FOR LINEAR INDUCTION MOTOR

อรรนนท์ บัวศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

อรรนนท์ บัวศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น
	Direct Torque Control for Linear Induction Motor
ชื่อ - นามสกุล	นายอรรนนท์ บัวศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(อาจารย์สุรินทร์ แหงมงาม, Ph.D.)

.... กรรมการ

(อาจารย์ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์, Ph.D.)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์, Ph.D.)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 20 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น
ชื่อ-นามสกุล	นายอรรนนท์ บัวศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นและระบบควบคุมมอเตอร์ โดยใช้ค่าความผิดพร่องของแรงบิดและความผิดพร่องของเส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้เชิงปฏิบัติมาเป็นคำสั่งในการสร้างแรงดันและความถี่อ้างอิงในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นดังกล่าว ทั้งนี้จะไม่ใช้ค่าของมุมเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ในการคำนวณและไม่มีการชี้ตาราง อย่างไรก็ตามเทคนิคการสร้างสัญญาณควบคุมสำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ในระบบควบคุมเป็นแบบสเปซเวกเตอร์

ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นที่นำเสนอนี้ ได้ทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นชนิดสเตเตอร์เดี่ยว ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ ขนาดพิกัดแรงดัน 250 โวลท์ และมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้ว วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบควบคุมใช้เทคนิคสร้างสัญญาณแบบสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น ที่ความถี่สวิตซ์ 10 กิโลเฮิรตซ์ โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเบอร์ TMS320F240 ในการสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์พร้อมทั้งประยุกต์ใช้การ์ดอินเตอร์เฟสสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง DSPACE รุ่น DS1104 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบควบคุมดังกล่าว ในการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรง

จากผลการทดสอบที่ได้จากแบบจำลอง โดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และจากการทดสอบเชิงปฏิบัติ แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนี้สามารถตอบสนองต่อแรงบิดได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ ทั้งนี้ในการทดสอบเชิงปฏิบัติขณะค่าแรงบิดคำสั่งที่ 5 นิวตันเมตร มอเตอร์สามารถให้ผลตอบสนองแรงบิดได้ภายในเวลา 50 มิลลิวินาที จากสภาวะเริ่มต้นทำงานจนถึงสภาวะคงตัวของแรงบิด

คำสำคัญ : มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น สเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น การควบคุมแบบเวลาจริง

Thesis Title	Direct Torque Control for Linear Induction Motor
Name - Surname	Mr. Aunnon Buasre
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
Academic Year	2013

ABSTRACT

This thesis presents a construction of a three phase linear induction motor together with its drive control. The drive control of such motor is analyzed and then also built. The direct torque control in this thesis generate a voltage and reference frequency by using a motor torque and its magnetic flux error in order to control such linear motor. However the space vector modulation method are utilized in this work instead of using a stator flux and look-up table technique.

A 1kW, 16 pole of three phase single-sided linear induction motor is constructed and built in this work. The motor drive is also built within a 10 kHz switching frequency. However the controller is composed of by using a TMS320F240 DSP board in order to generate a control signal for a inverter circuit, and using a DSPACE 1104 real time interfacing card in order to implement for a direct torque control method.

Simulations results of the three phase linear induction motor was done by using MATLAB/SIMULINK and experimental results of such linear induction motor was also analyzed in this work. It shows that the proposed system provides a fast response of torque control comparing with a traditional V/F control. In practice, a transition time of motor torque is about 50 ms, while such controller of the linear induction motor has a command torque at 5 Nm.

Keywords : linear induction motor model, space vector modulation, real-time control

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ดร.สุรินทร์ แหงมงาม กรรมการสอบ และ ดร.ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและห้องปฏิบัติการทดลอง รวมถึงคณาจารย์ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดีตลอดมาจนวิทยานิพนธ์นี้แล้วเสร็จ

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและอบรมสั่งสอนให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์นี้ มีความอดทนต่อสู้กับอุปสรรคที่เกิดขึ้น ตลอดจนได้ให้ความเมตตาสนับสนุนช่วยเหลือด้านค่าใช้จ่ายในการเรียนทั้งหมด ตั้งแต่เริ่มสมัครเข้าเรียนจนสำเร็จการศึกษา ซึ่งถือเป็นผู้ที่ให้โอกาสทางการศึกษาที่ดีที่สุดในชีวิต

ประโยชน์อันใดก็ตามที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบเป็นความดีให้กับทุกท่านที่กล่าวมาแล้วข้างต้นขอให้ท่านทั้งหลายจงมีแต่ ความสุข ความเจริญ สืบเนื่องตลอดไป

อรรนนท์ บัวศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย (3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (4)

กิตติกรรมประกาศ (5)

สารบัญ (6)

สารบัญตาราง (8)

สารบัญรูป (9)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (12)

บทที่ 1 บทนำ 13

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 13

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 14

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย 14

1.4 ขอบเขตของการศึกษา 15

1.5 วิธีการดำเนินโครงการวิจัย 15

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 16

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น 18

2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ 20

2.4 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส 23

2.5 สเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น 24

2.6 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น 40

2.7 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล 43

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 46

3.1 ส่วนประกอบของระบบ 46

3.2 ต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น 47

3.3 การออกแบบและสร้างโรเตอร์ 50

3.4 ส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์ 52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การออกแบบจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น 56
3.6 ผลการทดสอบจากแบบจำลอง 60
บทที่ 4 ผลการทดสอบ 66
4.1 ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบ 66
4.2 สรุปผลการทดสอบ 75
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ 76
5.1 สรุปผลการทดสอบ 76
5.2 ข้อเสนอแนะ 77
รายการอ้างอิง 78
ภาคผนวก 80
ภาคผนวก ก ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นเครื่องต้นแบบ 81
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 83
ประวัติผู้เขียน 93

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบตามลักษณะโครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำ และมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น 19
ตารางที่ 2.2 รูปแบบการสวิตช์และค่าแรงดันเทียบจุดนิวตรอล (n) ของมอเตอร์ 26
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการต่อใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับกระแส รุ่น LTS 25-NP 55
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 60

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างการประยุกต์ เครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหมุนเป็นแบบเชิงเส้น 18
รูปที่ 2.2 ขดปฐมภูมิข้างเดียวและขดปฐมภูมิ 2 ข้าง 19
รูปที่ 2.3 ทิศทางของแรงที่เกิดขึ้น 20
รูปที่ 2.4 วงจรการทดสอบความต้านทานโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 21
รูปที่ 2.5 วงจรการทดสอบมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด 22
รูปที่ 2.6 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น 23
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 24
รูปที่ 2.8 วงจรเทียบเท่าของการสวิตช์ที่ตำแหน่งสเปซเวกเตอร์ V_1 25
รูปที่ 2.9 สเปซเวกเตอร์ของแรงดัน 27
รูปที่ 2.10 สเปซเวกเตอร์ของแรงดันอ้างอิงเมื่อตกในเซกเตอร์ 1 28
รูปที่ 2.11 สเปซเวกเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเวลาที่เซกเตอร์ใด ๆ 29
รูปที่ 2.12 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ 1 31
รูปที่ 2.13 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ 2 35
รูปที่ 2.14 รูปคลื่นของแรงดัน v_{A0} , v_{An} และ v_{n0} 40
รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น 41
รูปที่ 2.16 การแปลงจาก 3 เฟสเป็น 2 เฟส บนแกนบนแกนอ้างอิง ds และ qs 42
รูปที่ 2.17 การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE รุ่น DS1104 45
รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 45
รูปที่ 3.1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล 46
รูปที่ 3.2 ขนาดของแผ่นเหล็กลามิเนทรูปตัวอี 48
รูปที่ 3.3 การเรียงแผ่นเหล็กลามิเนท 48
รูปที่ 3.4 โครงสร้างส่วนรับน้ำหนักและประครองสเตเตอร์ 49
รูปที่ 3.5 การลงขดลวดในร่องสล๊อตระยะโพล – พิช เท่ากับ 99 มิลลิเมตร 49
รูปที่ 3.6 การลงขดลวดทั้ง 3 เฟส 49
รูปที่ 3.7 โครงสร้างด้านหน้าของโรเตอร์ 50
รูปที่ 3.8 โครงสร้างด้านบนของโรเตอร์ 51
รูปที่ 3.9 โครงสร้างของโรเตอร์ 51

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.10 วงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟตรง 52

รูปที่ 3.11 วงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ 53

รูปที่ 3.12 วงจรภาคกำลังไอจีบีทีโมดูล 53

รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ตรวจจับกระแส 54

รูปที่ 3.14 วงจรการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับกระแส 54

รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน 55

รูปที่ 3.16 วงจรการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน 55

รูปที่ 3.17 แบบจำลองของระบบควบคุม 56

รูปที่ 3.18 แบบจำลองการคำนวณค่าแรงดันสเตเตอร์ 56

รูปที่ 3.19 แบบจำลองการคำนวณค่ากระแสสเตเตอร์ 57

รูปที่ 3.20 แบบจำลองส่วนการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิด 57

รูปที่ 3.21 แบบจำลองภายในส่วนการคำนวณ Estimator Model 1 58

รูปที่ 3.22 แบบจำลองส่วนการคำนวณแรงบิด 58

รูปที่ 3.23 แบบจำลองส่วนการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็ก 59

รูปที่ 3.24 แบบจำลองส่วนการหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน 59

รูปที่ 3.25 รูปสัญญาณแรงดันจากแบบจำลองสเปซเวกเตกร์ 60

รูปที่ 3.26 รูปสัญญาณกระแสสเตเตอร์ขณะเริ่มเดิน 61

รูปที่ 3.27 รูปสัญญาณความเร็วมอเตอร์และรูปสัญญาณแรงบิดมอเตอร์ 61

รูปที่ 3.28 รูปสัญญาณแรงดัน V_{As}, V_{Bs} และ V_{Cs} กับรูปสัญญาณแรงดัน V_{Sd} และ V_{Sq} 62

รูปที่ 3.29 รูปสัญญาณกระแส I_{As} และ I_{Bs} กับรูปสัญญาณกระแส I_{Sd} และ I_{Sq} 62

รูปที่ 3.30 รูปสัญญาณเส้นแรงแม่เหล็ก φ_{sd} และ φ_{sq} กับสัญญาณขนาดเส้นแรงแม่เหล็ก 63

รูปที่ 3.31 รูปสัญญาณขนาดเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดมอเตอร์ 63

รูปที่ 3.32 รูปสัญญาณแรงบิดจากแบบจำลองมอเตอร์ และรูปสัญญาณแรงบิด 64
จากแบบจำลองส่วนการคำนวณ

รูปที่ 3.33 รูปสัญญาณเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก 64

รูปที่ 3.34 รูปสัญญาณผลตอบสนองของแรงบิด 65

รูปที่ 4.1 สัญญาณสเปซเวกเตกร์ของแรงดันอ้างอิงเฟส 66

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.2 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} ,V_{An} 67

รูปที่ 4.3 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0}, V_{An} และ V_{no} 67

รูปที่ 4.4 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} และสัญญาณขับนำสวิตซ์ PWM1H 68

รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} และแรงดัน V_{AB} 68

รูปที่ 4.6 รูปเวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหน้าขนาด 3 ไมโครวินาที 69

รูปที่ 4.7 รูปเวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหลังขนาด 3 ไมโครวินาที 69

รูปที่ 4.8 รูปสัญญาณกระแสเฟสของมอเตอร์ 70

รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณของกระแส I_{sd} และ I_{sq} ของมอเตอร์ 70

รูปที่ 4.10 รูปสัญญาณแรงดันของมอเตอร์ 71

รูปที่ 4.11 รูปสัญญาณแรงดัน V_{sd} และ V_{sq} ของมอเตอร์ 71

รูปที่ 4.12 รูปสัญญาณเส้นแรงแม่เหล็ก φ_{sd} และ φ_{sq} ของมอเตอร์ 72

รูปที่ 4.13 รูปสัญญาณขนาดของเส้นแรงแม่เหล็ก 72

รูปที่ 4.14 ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก 73

รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 2.5 Nm ระบบควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ 73

รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 5 Nm ระบบควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ 74

รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 2.5 Nm ระบบที่นำเสนอ 74

รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 5 Nm ระบบที่นำเสนอ 75

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

i_{sd}	กระแสสเตเตอร์ในแนวแกน d
i_{sq}	กระแสสเตเตอร์ในแนวแกน q
R_1	ความต้านทานสเตเตอร์
R_2	ความต้านทานโรเตอร์
T_e	แรงบิดมอเตอร์
V_{A0}	แรงดันอ้างอิงสเปซเวกเตอร์ที่เฟส A
v_{An}	ค่าแรงดันเฟส A เทียบจุดนิวตรอล (n) ของมอเตอร์
V_{as}	แรงดันสเตเตอร์ที่เฟส A
V_{B0}	แรงดันอ้างอิงสเปซเวกเตอร์ที่เฟส B
v_{Bn}	ค่าแรงดันเฟส B เทียบจุดนิวตรอล (n) ของมอเตอร์
V_{bs}	แรงดันสเตเตอร์ที่เฟส B
V_{C0}	แรงดันอ้างอิงสเปซเวกเตอร์ที่เฟส C
v_{Cn}	ค่าแรงดันเฟส C เทียบจุดนิวตรอล (n) ของมอเตอร์
V_{cs}	แรงดันสเตเตอร์ที่เฟส C
V_{n0}	แรงดันลำดับศูนย์
V_{sd}	แรงดันสเตเตอร์ในแนวแกน d
V_{sq}	แรงดันสเตเตอร์ในแนวแกน q
X_1	รีแอกแตนซ์รั่วไหลที่สเตเตอร์
X_2	รีแอกแตนซ์รั่วไหลที่โรเตอร์
Xm	รีแอกแตนซ์เหนี่ยวนำร่วม
$\vec{V}$	สเปซเวกเตอร์ของแรงดัน
$\vec{V}^*$	สเปซเวกเตอร์ของแรงดันอ้างอิง
φ_{sd}	เส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ในแนวแกน d
φ_{sq}	เส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ในแนวแกน q
$\lvert\varphi_s\rvert$	ขนาดเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตเครื่องกลไฟฟ้ามีแต่ชนิดหมุนเป็นวงกลมเมื่อเวลาผ่านไปจึงได้มีแนวคิดที่ให้เครื่องกลไฟฟ้าเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการ เทคโนโลยีการเคลื่อนที่ของเครื่องกลไฟฟ้าแบบเส้นตรงนั้นจะเคลื่อนในแนวระนาบโดยจะไม่อาศัย เฟือง ลูกปืน หรือเพลา และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานและมลพิษทางเสียงแต่อย่างใด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าระบบเก่า การประยุกต์การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Induction Motor) ทำให้สามารถนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเช่น สายพานลำเลียง ประตูเลื่อนเปิดปิดอัตโนมัติ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่นๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ได้

มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น หรือที่รู้จักกันในชื่อ Linear Induction Motor (LIM) นั้น จัดอยู่ในกลุ่มของเครื่องจักรกลชนิดพิเศษ ที่ทำหน้าเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ซึ่งพัฒนามาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel-Cage Induction Motor) โดยทำการออกแบบโครงสร้างใหม่ทำให้เหมาะกับการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น และทำให้เกิดข้อดีหลายประการเช่น ลดการซ่อมบำรุงและบำรุงรักษา ทนทาน เป็นต้น ในปัจจุบันมีการนำมอเตอร์เหนี่ยวเชิงเส้นมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ระบบการขนส่ง (Transportation Systems) ในกระบวนการผลิต (Manufacturing Processes) และระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าทั้งที่เป็นแบบความเร็วต่ำและความเร็วสูง (MAGLEV)

เพื่อให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีของรถไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ จึงได้มีการวิจัยเกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Induction Motor) ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของรถไฟฟ้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน ทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเช่น สายพานลำเลียง ประตูเลื่อนเปิดปิดอัตโนมัติ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่นๆ อีกมากมายที่นำมาประยุกต์ใช้ได้ ด้วยข้อมูลที่กล่าวมาทั้งหมดพบว่าการศึกษาระบบการขับเคลื่อนขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นในประเทศไทยนั้นมีน้อย ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาการออกแบบและสร้างระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น โดยการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ในการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นในแบบจำลองรถไฟฟ้า เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาเกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

1.2.2 เพื่อศึกษาการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นด้วยหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง

1.2.3 เพื่อสร้างตัวควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นโดยการประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

เนื่องด้วยในปัจจุบันมอเตอร์เข้ามามีบทบาทต่อภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น ดังนั้นการควบคุมมอเตอร์เพื่อนำไปใช้งานจึงเป็นปัจจัยสำคัญ และการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในปัจจุบันนี้มีอยู่ด้วยกันหลายแบบหลากหลายวิธีจึงมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาพิจารณาและเลือกใช้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการสวิตช์ของอินเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิผลในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

การควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น ได้มีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การควบคุมแบบการเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ (Scalar Control : V/F) [1] ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ใน งานที่ไม่ต้องการ การตอบสนองของแรงบิดที่รวดเร็วมากนัก เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบปรับตามสนามแม่เหล็ก (Vector Control or Field Orientated Control : FOC) และแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง (Direct Torque Control : DTC) [2] ต่อมาคือการควบคุมแบบปรับตามสนามแม่เหล็กซึ่งจะให้การตอบสนองของแรงบิดได้ดีกว่าแบบการเปลี่ยนอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ เพราะระบบสามารถควบคุมค่าชั่วขณะของปริมาณแรงบิดและสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ส่วนอันดับสุดท้ายคือการควบคุมแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง ซึ่งจะให้การตอบสนองของแรงบิดได้เร็วกว่าแบบเวกเตอร์ เนื่องจากมีการคำนวณน้อยกว่าแบบเวกเตอร์

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นด้วยหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง จากหลักการของการควบคุมแรงบิดโดยตรงแบบดั้งเดิม (Classical Direct Torque Control) [3]-[5] นั้นคือการเลือกเวกเตอร์แรงดันโดยตรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างค่าคำสั่งกับค่าจริงทั้งแรงบิด (Torque) และเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ (Stator Flux) ซึ่งทำให้เกิดความถี่การสวิตช์ไม่คงที่และเกิดการกระเพื่อม (Ripple) ของแรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์มาก ส่งผลให้การควบคุมมอเตอร์ไม่ดีนัก

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเทคนิคการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Modulation : SVM) [6] มาแทนการเลือกเวกเตอร์แรงดันและตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) มาแทนตัวควบคุมแบบฮีสเตอรีซีส (Hysteresis Controller) มาปรับปรุงให้ความถี่การสวิตช์ให้คงที่และลดการกระเพื่อมของแรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ให้มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้การควบคุมมอเตอร์ดีขึ้น เนื่องจากวิธีการดังกล่าวการควบคุมแรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอซึ่งจะให้ผลการตอบสนองที่ดีและควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟสควบคุมแบบเวลาจริง DSPACE รุ่น DS1104 ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 สร้างวงจรแปลงผันกำลังอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นชนิด 3 เฟส ขนาดพิกัด 1 kW

1.4.2 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นใช้เทคนิคของหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง

1.4.3 ควบคุมการเคลื่อนที่และแรงบิดของมอเตอร์แบบทันเวลาด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

1.5 วิธีการดำเนินโครงการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยต้องมีการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลและต้องมีการวางแผนงานขั้นตอนการทำงานวิจัยและปฏิบัติงานตามแผนงานที่วางไว้เพื่อให้ได้งานออกมาตามที่กำหนดไว้และเสร็จตามระยะเวลา

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบและสร้างวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสและชุดป้องกันกระแสกระชาก

1.5.3 ออกแบบและสร้างชุดวงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์

1.5.4 ศึกษาและสร้างอินเวอร์เตอร์สามเฟส

1.5.5 ศึกษาและออกแบบการเขียนโปรแกรมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

1.5.6 ทดสอบการทำงานในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นด้วยหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง

1.5.7 สรุปผลจากการทดสอบ

1.5.8 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้วงจรแปลงผันกำลังสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นชนิด 3 เฟส ขนาดพิกัด 1 kW

1.6.2 สามารถควบคุมการเคลื่อนที่และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ตรงตามจุดประสงค์

1.6.3 สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมมอเตอร์ชนิดอื่นที่ใกล้เคียงกันได้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นและวิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ทฤษฎีของสเปสเวกเตอร์มอดูเลชั่น และโครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานสำคัญที่จะต้องศึกษาและทำความเข้าใจ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทความเรื่อง A New Quick - Response and High - Efficiency Control Strategy of an Induction Motor โดย Isao Takahashi และ Toshihiko Noguchi [3] ได้นำเสนอวิธีการเพื่อควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตอบสนองต่อแรงบิดได้อย่างรวดเร็ว เพื่อปรับปรุงหลักการของ Rotor Field-Oriented Control หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งคือ การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control) เพราะหลักการเดิมต้องมีการแปลงโคออร์ดิเนทตัวแปรของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทำให้มีผลต่อการออกแบบตัวควบคุมมากแต่ถ้าหลักการใหม่นี้ที่เรียกว่าการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรง การควบคุมทำได้ง่ายและควบคุมอยู่ในสเตเตอร์ ทำให้ไม่ต้องมีการแปลงโคออร์ดิเนท ผลการทดสอบเทียบกับแบบ Rotor Field-Oriented Control พบว่าการควบคุมแบบดังกล่าวมีการตอบสนองแรงบิดได้เร็วกว่ามาก

ต่อมา Chapis, Roye และ Davoine [7] ได้มีการนำเสนอบทความเรื่อง Principles and Implementation of Direct Torque Control by Stator Flux Orientation of an Induction Motor ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกับ Takahashi แต่นำเสนอให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นและมีความแม่นยำขึ้นโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processor : DSP) มาคำนวณหาเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิด ผลการทดสอบได้เช่นเดียวกับ Takahashi

Buja, Casadei และ Serra [8] ก็ได้นำเสนอบทความเรื่อง Direct Torque Control of Induction Motor Drives เป็นบทความที่แสดงวิธีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง ทั้งที่เป็นแบบวิธีการดั้งเดิมและแบบสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น และมีการเปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงกับวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์

ต่อจากนั้น Lascu, Boldea และ Blaabjerg [9] ได้นำเสนอบทความเรื่อง A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive ซึ่งเป็นการปรับปรุงการหาค่าสเตเตอร์และ

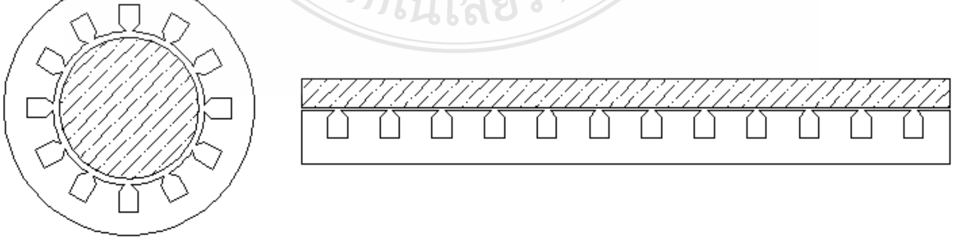
โรเตอร์ฟลักซ์ ซึ่งใช้ในการคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้ในการควบคุมแบบแรงบิด ซึ่งมีการควบคุม 2 รูปแบบทั้งที่เป็นแบบดั้งเดิมและสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น

หลังจากนั้น Lai และ Chen [10] ได้นำเสนอบทความเรื่อง A New Approach to Direct Torque Control of Induction Motor Drives for Constant Inverter Switching Frequency and Torque Ripple Reduction ซึ่งเป็นบทความที่แสดงวิธีการลดการกระเพื่อมของแรงบิดในการควบคุมแบบแรงบิดโดยตรงที่เป็นสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่นแบบใหม่ที่แตกต่างจากบทความที่ผ่านมาซึ่งได้นำค่าความผิดพลาดของแรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กมาใช้ในการควบคุมโดยตัวควบคุมแบบพีไอและนำไปคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงให้กับชุดสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่นไปสร้างสัญญาณการสวิทซ์ให้กับชุดอินเวอร์เตอร์

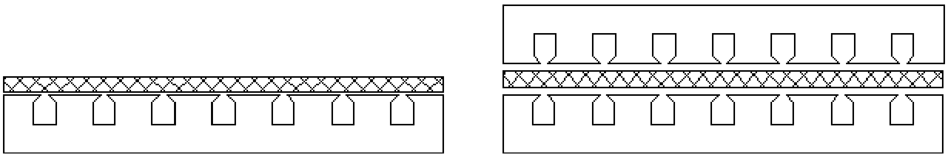
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Induction Motor)

แนวทางในการทำวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่ระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นซึ่งควบคุมด้วยหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรงและควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นหรือเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่าลิเนียร์อินดักชั่นมอเตอร์นั้นมีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก โดยจะเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่ในแนวเชิงมุมที่จะต้องมีอุปกรณ์อื่นๆ มาเพิ่มเติมในการเคลื่อนที่ เช่น เพลาและแบริ่งในการทำงานทำให้เกิดการสูญเสีย เกิดเสียงขณะทำงานและจะต้องมีการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง ดังนั้นจึงมีแนวคิดมาสร้างมอเตอร์ในการขับเคลื่อนในแนวเชิงเส้นโดยไม่มีอุปกรณ์อื่นๆ มาเพิ่มเติม จะกล่าวถึงหลักการของมอเตอร์ชนิดนี้ถือว่าไม่ใช่เทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่แต่อย่างใด แต่จะเป็นการออกแบบโครงสร้างและแนวการเคลื่อนที่ต่างกันออกไป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการประยุกต์ เครื่องจักรไฟฟ้าชนิดหมุนเป็นแบบเชิงเส้น



รูปที่ 2.2 ขดปฐมภูมิข้างเดียวและขดปฐมภูมิ 2 ข้าง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบตามลักษณะโครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

มอเตอร์เหนี่ยวนำ	**มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น**
1. โครงสร้าง มีลักษณะเป็นรูปวงกลม	1. โครงสร้าง มีลักษณะเป็นเชิงเส้น
2. สนามแม่เหล็ก เป็น แบบหมุนเป็นวงกลม	2. สนามแม่เหล็ก เป็น แบบเคลื่อนที่ไปข้างหน้า
3. สเตเตอร์ และ ขดลวด จะเป็นส่วนที่ อยู่กับที่	3. สเตเตอร์และ ขดลวด จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ หรืออาจเป็นส่วนที่เคลื่อนที่
4. โรเตอร์ จะเป็นแบบกรงกระรอกและเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ และเป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม	4. โรเตอร์ จะเป็น แผ่นตัวนำ ซึ่งอาจเรียกว่า แผ่นรีแอคชั่น และอาจจะเป็นโลหะชนิดใดก็ได้ เช่น อลูมิเนียม ทองแดง และเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ (ในกรณีที่ปฐมภูมิอยู่กับที่) แต่อาจเป็นส่วนที่อยู่กับที่ได้ (เมื่อปฐมภูมิเคลื่อนที่)
5. เคลื่อนที่โดยมีก้านฝังอยู่เป็นแกนกลางของโรเตอร์	5. เคลื่อนที่แบบรางและให้ปฐมภูมิหรือทุติยภูมิเป็นตัวเคลื่อนที่ก็ได้

ความเร็วเส้นตรงซิงโครนัสเมื่อพิจารณามอเตอร์แบบหมุน มีความเป็นไปได้ว่าการผ่าแล้วคลี่ด้านสเตเตอร์ออกแล้วแผ่ให้ราบนั้น จะทำให้รูปแบบของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่เปลี่ยนไปจากการเคลื่อนที่แบบหมุน (เป็นวงกลม) ไปเป็นการเคลื่อนที่ในแนวราบเป็นเส้นตรง เมื่อทำให้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในความเร็วคงที่ จะได้สมการความเร็วเส้นตรงซิงโครนัสดังนี้

$$V_S = 2pf \tag{2.1}$$

ความเร็วเส้นตรงนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก (โพล) แต่จะขึ้นอยู่กับความกว้างของโพล-พิช กล่าวคือเครื่องจักรกลแบบเส้นตรงที่มีขั้ว 2 ขั้ว นั้นจะมีความเร็วเส้นตรงซิงโครนัสเท่ากันกับเครื่องจักรกลแบบเส้นตรงที่มีจำนวน 6 ขั้ว ถ้าเครื่องจักรแบบเส้นตรงมีระยะความกว้างโพล-พิชเท่ากัน

ค่าสลิปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นกับเครื่องจักรแบบหมุนทั่วไปมีลักษณะเหมือนกัน ค่าสลิป คือ ความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัสกับความเร็วโรเตอร์แสดงสมการดังนี้

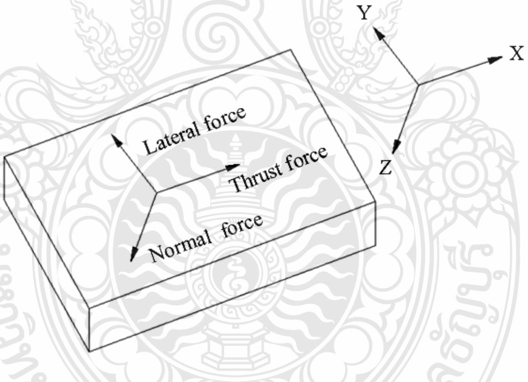
$$S = \frac{(V_s - V)}{V_s} \tag{2.2}$$

แรงที่เกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น มีอยู่ด้วยกัน 3 แรง ดังแสดงในรูปที่ 2.3

Thrust – แรงที่ใช้ผลักในแนวแกน X (ด้านหน้า – ด้านหลัง)

Normal – แรงที่ทำในแนวแกน Z (แนวดิ่ง)

Lateral – แรงที่ทำในแนวแกน Y (ด้านข้าง)



รูปที่ 2.3 ทิศทางของแรงที่เกิดขึ้น

2.3 การหาค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ภายในของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น ประกอบด้วยการทดสอบหาค่าต่างๆ เช่น R_1 , R_2 , X_1 , X_2 และ Xm ในการทดสอบนั้นจะใช้พื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบสามเฟส [11]

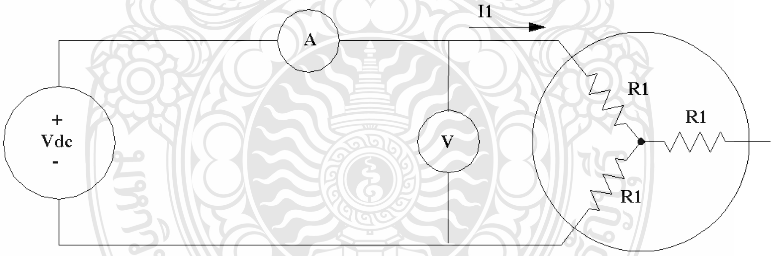
2.3.1 การทดสอบโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Test)

การทดสอบโดยให้ R_1 เป็นอิสระจาก R_2, X_1 และ X_2 การทดสอบแบบนี้เรียกว่าการทดสอบโดยใช้ไปฟ้ากระแสตรง (DC test) ซึ่งโดยทั่วไปไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถนำไปใช้ได้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เพราะว่าไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่มีแรงต้านทานการเหนี่ยวนำแรงดันในวงจรโรเตอร์และไม่มีผลกับการไหลของกระแสในโรเตอร์ โดยที่การเหนี่ยวนำของมอเตอร์นั้นเป็นศูนย์ในไฟฟ้ากระแสตรงดังนั้นคือการกำหนดค่าความต้านทานของสเตเตอร์

วงจรพื้นฐานของการทดสอบไฟฟ้ากระแสตรงนั้นแสดงได้จากรูปที่ 2.4 โดยรูปแบบของการทดสอบนั้นกระแสในขดลวดสเตเตอร์จะสามารถปรับสัดส่วน และแรงดันระหว่างจุดต่อเราก็จะนำมาวัดค่าได้ กระแสในขดลวด สเตเตอร์นั้นก็สามารถที่จะปรับสัดส่วนได้โดยพยายามให้ความร้อนในลดลวดให้อุณหภูมิเหมือนกับตอนที่มอเตอร์ทำงานปกติ

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \tag{2.3}$$

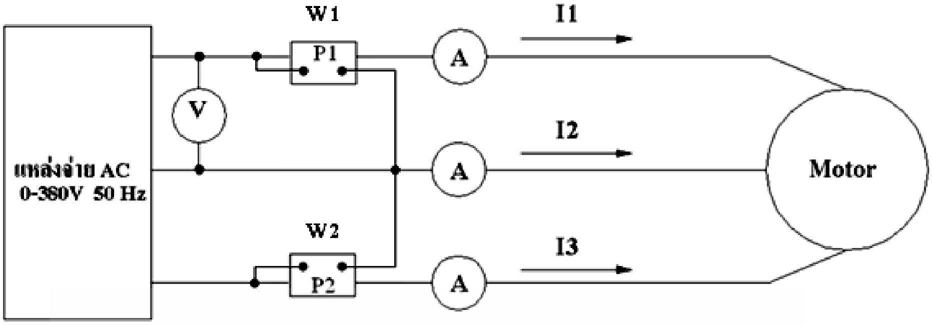
$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.4 วงจรการทดสอบความต้านทานโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง

2.3.2 การทดสอบขณะไม่มีโหลด (No – Load Test)

การทดสอบนี้เป็นการวัดการสูญเสียภายในของมอเตอร์และเป็นการวัดหารูปแบบของกระแสแม่เหล็ก วงจรที่ใช้ในการทดสอบจะแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีวัตมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์อีก 3 ตัวแล้ว จะต่อเข้ากับมอเตอร์ที่ต้องการทดสอบ



รูปที่ 2.5 วงจรการทดสอบมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด

ในการทดสอบนั้นจะให้มอเตอร์วิ่งไปตามปกติโดยไม่ต่อกับโหลด โดยที่โหลดเพียงอย่างเดียวของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นคือ การเสียดสี และการสูญเสียของช่องว่างอากาศที่มอเตอร์ตัดผ่าน

$$IL = \frac{I1 + I2 + I3}{3} \tag{2.5}$$

$$\left|Z_{nl}\right| = \frac{V_\phi}{I_L} \approx X_1 + X_m \tag{2.6}$$

2.3.3 การทดสอบแบบล็อคโรเตอร์ (Lock – Rotor Test)

ในการทดสอบนี้ คือการทำให้โรเตอร์หยุดหมุนหรือไม่สามารถเคลื่อนตัวได้แล้วจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์จากการทำแบบนี้นั้นแสดงถึงการต่อของการทดสอบแบบล็อคโรเตอร์โดยจะทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปที่สเตเตอร์และการไหลของกระแสนั้นจะประมาณใกล้เคียงกันกับตอนที่มอเตอร์ที่มอเตอร์โหลดเต็มพิกัด เมื่อปริมาณกระแสเต็มพิกัดการไหลของ แรงดัน กระแส และกำลังนั้นเกิดขึ้นที่มอเตอร์และสามารถวัดได้ วงจรของการทดลองนี้จะแสดงในรูปที่ 2.5 เช่นกัน โดยข้อสังเกตตั้งแต่โรเตอร์ไม่หมุนค่าสลิป S=1 ในการทดสอบจะลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ให้มีค่าประมาณ 15-25 % หรือน้อยกว่า ของแรงดันที่ใช้ปกติ ผลที่ได้นั้นจะทำให้เห็นความต้านทานของโรเตอร์ โดยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของการทดสอบแบบล๊อกโลเตอร์หาได้จาก ดังสมการที่ 2.7

$$PF = \cos\phi = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_T} \tag{2.7}$$

$$\left|Z_{LR}\right| = \frac{V_{\phi}}{I_L} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \tag{2.8}$$

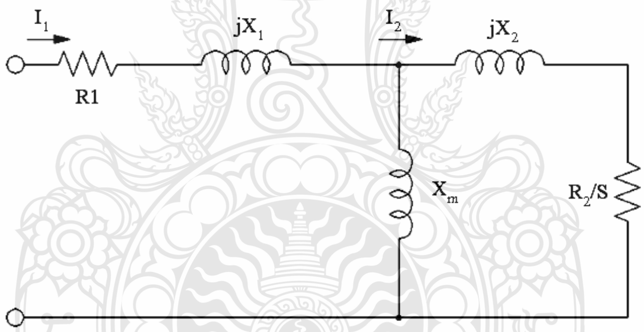
ค่าความต้านทานการทดสอบล๊อคโรเตอร์จะมีค่าดังสมการที่ 2.9

$$R_{LR} = \left|Z_{LR}\right|\cos\phi = R_1 + R_2 \tag{2.9}$$

$$X'_{LR} = \left|Z_{LR}\right|\sin\phi \tag{2.10}$$

$$X_{LR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}}X'_{LR} = X_1 + R_2 \tag{2.11}$$

$$X_M = \left|Z_{nl}\right| - X_1 \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.6 วงจรเสมือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

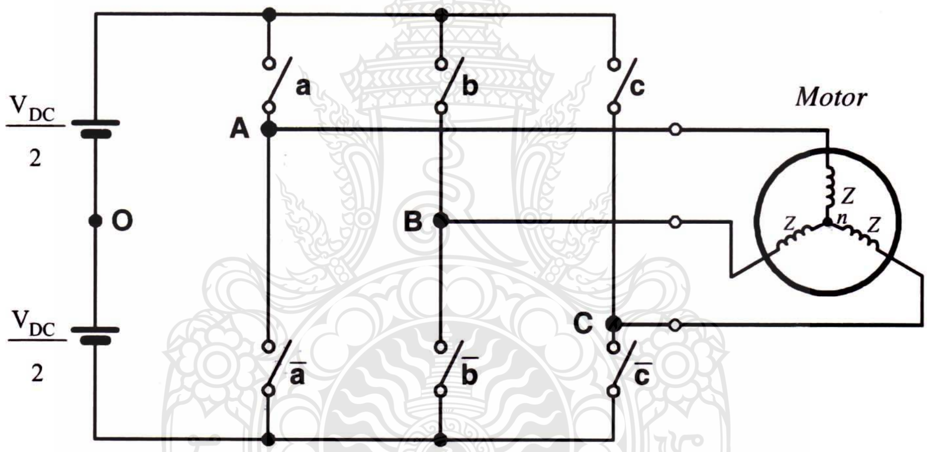
2.4 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์ที่กล่าวถึงเป็นชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter) โดยการกำหนดแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในแต่ละเฟส ทำได้โดยการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไอจีบีทีเป็นต้น ดังนั้นรูปแบบการสวิตช์อินเวอร์เตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าที่คำนวณเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น (SVM) [12]

2.4.1 ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) ซึ่งได้มาจากวงจรเรียงกระแส (Rectifier) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ประกอบด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัว ทำหน้าที่เปิดและปิดวงจรดังรูปที่ 2.7 เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสวิตช์ตัวที่อยู่ในกิ่งเดียวกันต้องทำการออกแบบระบบควบคุมป้องกันไม่ให้สวิตซ์ในกิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกัน

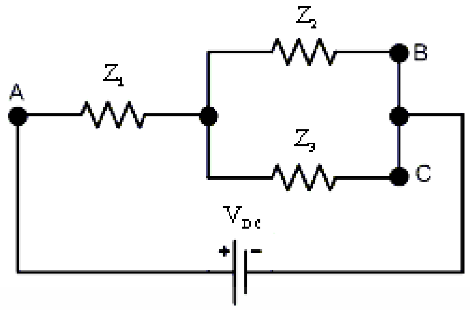
ดังนั้นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 2 ตัวในกิ่งเดียวกันจะทำให้เกิดสองสถานะคือ สถานะ “0” เมื่อสวิตช์ตัวบนเปิดวงจร ตัวล่างปิดวงจร และสถานะ “1” เมื่อสวิตช์ตัวบนปิดวงจร ตัวล่างเปิดวงจร การเปิดปิดสวิตช์ทั้ง 6 ตัว ทำให้เกิดสถานะแตกต่างกัน 8 สถานะ ซึ่งอาจเรียกชื่อได้เป็น V0 ถึง V7 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [13]-[14]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส

2.5 สเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น (Space Vector Modulation)

สเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่นเป็นการนำสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากตัวควบคุมมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่ต้องการจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อทำการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ซึ่งจะได้สัญญาณไปขับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 6 ตัวเพื่อสั่งจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากรูปที่ 2.7 เป็นรูปแบบของการสวิตช์ของแรงดันเทียบจุดนิวตรอลที่รูปแบบการสวิตช์ V_1 จะได้ [15]



รูปที่ 2.8 วงจรเทียบเท่าของการสวิตช์ที่ตำแหน่งสเปซเวกเตอร์ V_1

จากรูปที่ 2.8 จะได้อิมพีแดนซ์รวมของวงจรดังสมการที่ 2.15

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z \qquad (2.13)$$

$$Z_t = Z + \frac{1}{2}Z \qquad (2.14)$$

$$Z_t = \frac{3}{2}Z \qquad (2.15)$$

จากกฎการแบ่งแรงดันจะได้แรงดันตกคร่อม

$$Z_1 = v_{An} \qquad (2.16)$$

$$v_{An} = \frac{Z\,V_{DC}}{\frac{3}{2}Z} \qquad (2.17)$$

$$v_{An} = \frac{2}{3}V_{DC} \qquad (2.18)$$

ดังนั้น

$$v_{Bn} = \frac{-\frac{Z}{2}V_{DC}}{\frac{3}{2}Z} \tag{2.19}$$

$$v_{Bn} = -\frac{V_{DC}}{3} \tag{2.20}$$

เพราะฉะนั้น

$$v_{Bn} = v_{Cn} \tag{2.21}$$

$$v_{Cn} = -\frac{V_{DC}}{3} \tag{2.22}$$

จากการกระทำข้างต้นแล้วจะได้รูปแบบการสวิตช์และค่าแรงดันเทียบจุดนิวตรอลของมอเตอร์ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รูปแบบการสวิตช์และค่าแรงดันเทียบจุดนิวตรอล (n) ของมอเตอร์

Name	a	b	c	v_{An}	v_{Bn}	v_{Cn}
V_0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$
V_2	1	1	0	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$
V_3	0	1	0	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$
V_4	0	1	1	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_5	0	0	1	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$
V_6	1	0	1	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_7	1	1	1	0	0	0

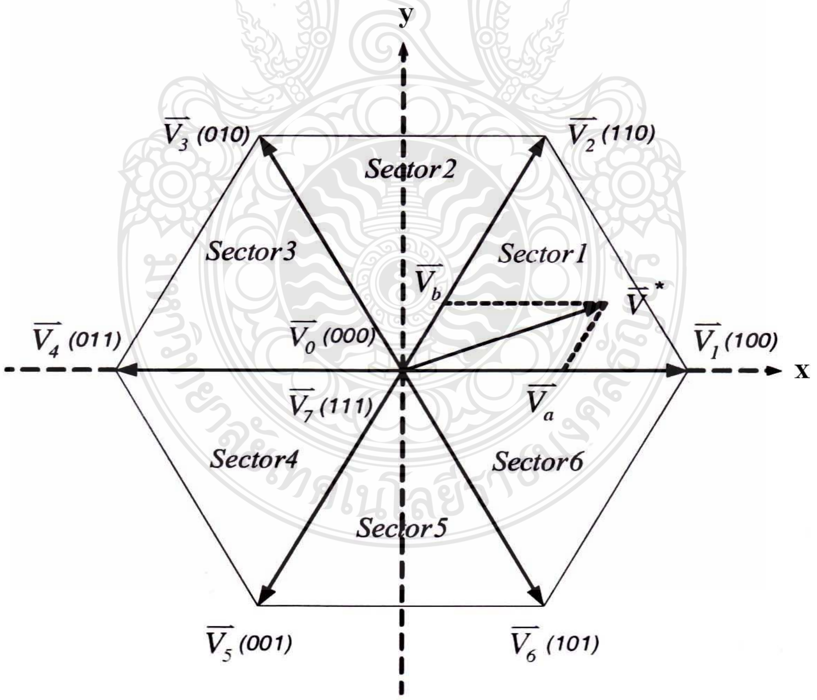
จากตารางที่ 2.2 สามารถคำนวณหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่รูปแบบการสวิตช์ต่าง ๆ โดยใช้สมการที่ 2.23 โดยกำหนดให้ a คือ มุมทางไฟฟ้าเท่ากับ $e^{j\theta}$

$$\vec{V} = \frac{2}{3}\left[v_{An} + av_{Bn} + a^2 v_{Cn}\right] \tag{2.23}$$

ตัวอย่างเช่น ที่รูปแบบการสวิตช์ V_2 จะคำนวณหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดันได้ดังนี้

$$\vec{V}_2 = \frac{2}{3}\left[\frac{V_{DC}}{3} + a\frac{V_{DC}}{3} - a^2\frac{2V_{DC}}{3}\right] = \frac{2}{3}V_{DC}e^{j\frac{\pi}{3}} \tag{2.24}$$

จะเห็นได้ว่าสเปซเวกเตอร์ของแรงดันมี 8 สถานะ ซึ่งประกอบไปด้วยเวกเตอร์ที่ทำให้เกิดแอคทีฟเวกเตอร์ (Active Vector) 6 เวกเตอร์และเวกเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันสเตเตอร์ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ (Zero Vector) 2 เวกเตอร์โดยสเปซเวกเตอร์แรงดันที่รูปแบบการสวิตช์ต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.9

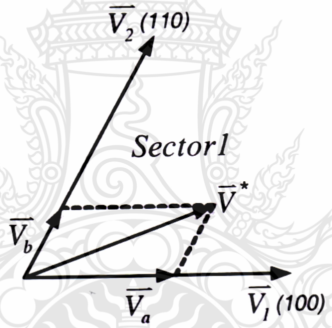


รูปที่ 2.9 สเปซเวกเตอร์ของแรงดัน

2.5.1 ขั้นตอนในการหาสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น

เมื่อทราบแรงดัน v_{An}, v_{Bn} และ v_{Cn} ที่ต้องการจากส่วนของการควบคุมซึ่งจะอยู่ในสเปซเวกเตอร์ของแรงดันอ้างอิง $\vec{V}^*$ แล้วเลือกรูปแบบการใช้ $\vec{V}_0$ ถึง $\vec{V}_7$ ภายในคาบของการสวิตช์ (Switching Time Period) โดยการเลือกเวกเตอร์ที่จะใช้พิจารณาว่า $\vec{V}^*$ ตกอยู่ในเซกเตอร์ใดก็จะเลือกเวกเตอร์ที่ประกอบเป็นเซกเตอร์นั้น และรวมเซกเตอร์ $\vec{V}_0, \vec{V}_7$ เข้าไปด้วย เช่น ถ้า $\vec{V}^*$ ตกอยู่ในเซกเตอร์ 1 เวกเตอร์ที่ถูกเลือกมาใช้ก็จะเป็น $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_0$ และ $\vec{V}_7$ เป็นต้น

เมื่อได้เวกเตอร์ที่ต้องการแล้วจะต้องคำนวณหาคาบเวลาของการสวิตช์ที่เวกเตอร์นั้นว่าจะใช้เวลาเท่าใด แต่เวลารวมทั้งหมดในการสวิตช์จะเท่ากับคาบเวลาของการสวิตช์ เช่น ถ้า $\vec{V}^*$ ตกอยู่ในเซกเตอร์ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะสามารถคำนวณเวลาได้ดังสมการ 2.15 เมื่อได้เวลาในการสวิตช์แล้ว ก็จะคำนวณหาแรงดันอ้างอิง นำแรงดันอ้างอิงที่คำนวณได้ไปเปรียบกับสัญญาณสามเฟสเพื่อทำการมอดูเลตแบบกว้างพัลส์ ก็จะได้สัญญาณการสวิตช์ไปควบคุมอินเวอร์เตอร์เพื่อขับมอเตอร์ต่อไป



รูปที่ 2.10 สเปซเวกเตอร์ของแรงดันอ้างอิงเมื่อตกในเซกเตอร์ 1

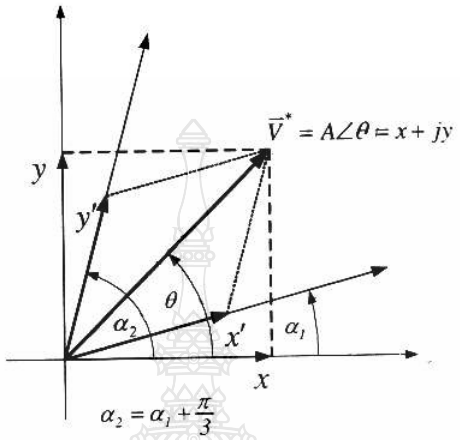
$$t_a = \frac{\left|\vec{V}_a\right|}{\left|\vec{V}_1\right|} \times T_s , t_b = \frac{\left|\vec{V}_b\right|}{\left|\vec{V}_1\right|} \times T_s \qquad (2.25)$$

โดยที่ $\vec{V}^* = \vec{V}_a + \vec{V}_b \; ; \; t_a, t_b \le T_s$

$$t_0 + t_7 = T_s - t_a - t_b \ge 0$$

2.5.2 การคำนวณหาค่าเวลาในการสวิตช์ (t_a, t_b)

กำหนดให้ $\vec{V}^* = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = x + jy$ โดยที่ $x = A\cos\theta, y = A\sin\theta$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สเปซเวกเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเวลาที่เซกเตอร์ใด ๆ

จากรูปที่ 2.11 จะได้

$$x = x'\cos\alpha_1 + y'\cos\alpha_2 \tag{2.26}$$

$$y = x'\sin\alpha_1 + y'\cos\alpha_2 \tag{2.27}$$

จากสมการที่ 2.26 และ 2.27 นำมาเขียนสมการเมตริกซ์ จะได้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 \\ \sin\alpha_1 & \sin\alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

จากสมการที่ 2.28 แก้สมการด้วยวิธีเมตริกซ์ผกผัน จะได้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin\alpha_2\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\sin\alpha_1} \begin{bmatrix} \sin\alpha_2 & -\cos\alpha_2 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \begin{bmatrix} \sin\alpha_2 & -\cos\alpha_2 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

เมื่อ $\alpha_2 - \alpha_1 = \pi/3$ จะได้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin\alpha_2 & -\cos\alpha_2 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

แทนค่า $x = A\cos\theta, y = \sin\theta$ จะได้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin\alpha_2 & -\cos\alpha_2 \\ -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A\cos\theta \\ A\sin\theta \end{bmatrix}$$

$$= \frac{2A}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin\alpha_2\cos\theta - \cos\alpha_2\sin\theta \\ -\sin\alpha_1\cos\theta + \cos\alpha_1\sin\theta \end{bmatrix}$$

$$= \frac{2A}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin\alpha_2\cos\theta - \cos\alpha_2\sin\theta \\ \sin\theta\cos\alpha_1 - \cos\theta\sin\alpha_1 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{2A}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin(\alpha_2 - \theta) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{bmatrix}$$

$$= \frac{2A}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

นำสมการหารด้วยเวลาในการสวิตช์ทั้งหมด

$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T_s} \\ \frac{t_b}{T_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x'}{2V_{DC}/3} \\ \frac{y'}{2V_{DC}/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin(\theta - \alpha_1) \end{bmatrix}$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \begin{bmatrix} \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin\left(\theta - \alpha_1\right) \end{bmatrix} \qquad (2.32)$$

เมื่อ $\bar{V}^*$ ตกอยู่เซกเตอร์ 1 จะได้ $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \frac{\pi}{3}$ และ $0 \le \theta \le \frac{\pi}{3}$ ดังนั้นจึงต้องใช้สเปซเวกเตอร์ของแรงดันนี้คือ $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_0, \vec{V}_7$ จากนั้นใช้สมการ 2.32 เพื่อคำนวณหาเวลาในการสวิตช์จะได้ดังสมการ 2.33

$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T_s} \\ \frac{t_b}{T_s} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin\theta \end{bmatrix} \qquad (2.33)$$

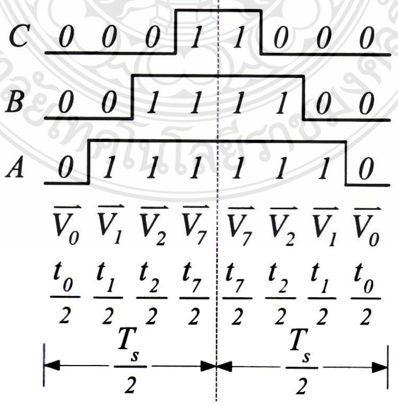
โดยที่ $t_1 = t_a ; t_2 = t_b$

$T_s = t_1 + t_2 + t_0 + t_7$

$t_0 = t_7$

2.5.3 การคำนวณหาแรงดันอ้างอิง v_{A0}, v_{B0} และ v_{C0}

จากหัวข้อ 2.5.2 สามารถเขียนรูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ 1 ได้ดังในรูปที่ 2.12 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิง เมื่อ $\bar{V}^*$ ตกอยู่ในเซกเตอร์ 1



รูปที่ 2.12 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ 1

จากรูปสามารถคำนวณหาแรงดันอ้างอิงได้ดังนี้

$$v_{A0} = \frac{(t_1 + t_2 + t_7)\frac{V_{DC}}{2} + t_0\left(\frac{-V_{DC}}{2}\right)}{T_s} = \frac{t_1 + t_2}{T_s} \times \frac{V_{DC}}{2}; t_0 = t_7 \qquad (2.34)$$

จากสมการ 2.33 $t_1 = t_a, t_2 = t_b$ โดยที่ จะได้

$$\frac{t_1}{T_s} + \frac{t_2}{T_s} = \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}}\left(\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \sin\theta\right)$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}}\left(\sin\frac{\pi}{3}\cos\theta - \cos\frac{\pi}{3}\sin\theta + \sin\theta\right)$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta + \frac{\sin\theta}{2}\right)$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}}\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}}\frac{V_{DC}}{2}\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \qquad (2.35)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$v_{B0} = \frac{(t_2 + t_7)\frac{V_{DC}}{2} + (t_0 + t_1)\left(\frac{-V_{DC}}{2}\right)}{T_s} = \frac{t_2 - t_1}{T_s} \times \frac{V_{DC}}{2}; t_0 = t_7$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \times \frac{V_{DC}}{2}\left[\sin\theta - \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\sin\theta - \sin\frac{\pi}{3}\cos\ \theta + \cos\ \frac{\pi}{3}\sin\theta\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\ \theta + \frac{1}{2}\sin\theta\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\left[-\frac{1}{2}\cos\ \theta + \frac{\sqrt{3}}{3}\sin\theta\right]$$

$$= \frac{3A}{2}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{2.36}$$

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$v_{C0} = \frac{t_7\frac{V_{DC}}{2} + (t_0 + t_1 + t_2)\left(\frac{-V_{DC}}{2}\right)}{T_s} = \frac{t_1 + t_2}{T_s} \times \frac{V_{DC}}{2}; t_0 = t_7$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \times \frac{-V_{DC}}{2}\left[\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \sin\theta\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \sin\theta\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\sin\frac{\pi}{3}\cos\ \theta - \cos\ \frac{\pi}{3}\sin\theta + \sin\theta\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\ \theta - \frac{1}{2}\sin\theta + \sin\theta\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\,\theta + \frac{1}{2}\sin\theta\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\cos\,\theta\cos\,\frac{\pi}{6} + \sin\theta\sin\,\frac{\pi}{6}\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) = -v_{A0} \qquad (2.37)$$

จะเห็นว่าตอนนี้ได้ v_{A0}, v_{B0} และ v_{C0} มาแล้วซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อทำการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณไปขับนำสวิตช์อินเวอร์เตอร์ แต่จากสมการ 2.35, 2.36 และ 2.37 เป็นสมการที่ใช้ในเซกเตอร์ 1 เท่านั้น ดังนั้นต้องหาสมการสำหรับใช้คำนวณหาแรงดันอ้างอิงของเซกเตอร์อื่นๆ ด้วย โดยที่วิธีการหาข้างต้นนี้ค่อนข้างยุ่งยากมาก และต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก จึงมีวิธีที่ง่ายและเร็วกว่าดังนี้

$$\bar{V}^* = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A\cos\,\theta \\ A\sin\theta \end{bmatrix} = Ae^{j\theta} \qquad (2.38)$$

$$v_{An} = A\cos\,\theta \qquad (2.39)$$

$$v_{Bn} = A\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \qquad (2.40)$$

$$v_{Cn} = A\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \qquad (2.41)$$

เมื่อพิจารณาแรงดันลำดับศูนย์ (Zero Sequence Voltage) ของเซกเตอร์ที่ 1 จะได้ว่า

$$v_{n0} = \frac{1}{3}\left(v_{A0} + v_{B0} + v_{C0}\right) = \frac{A}{2}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}v_{Bn} \qquad (2.42)$$

จากสมการ 2.39, 2.40 และ 2.41 จะเห็นว่า v_{B0} เป็นแรงดันค่ากลางดังนั้น v_{Bn} เป็นแรงดันค่ากลางเมื่อเทียบกับ v_{An} และ v_{Cn} ด้วย

พิจารณาเมื่อ $\bar{V}^*$ ตกอยู่ในเซกเตอร์ 2 จะได้ว่า $\alpha_1 = \frac{\pi}{3}, \alpha_2 = \frac{2\pi}{3}$ และ $\frac{\pi}{3} \le \theta \le \frac{2\pi}{3}$ ดังนั้นจึงใช้สเปซเวกเตอร์ของแรงดันนี้คือ $\bar{V}_2, \bar{V}_3, \bar{V}_0, \bar{V}_7$ เพื่อคำนวณหาเวลาในการสวิตช์จะได้

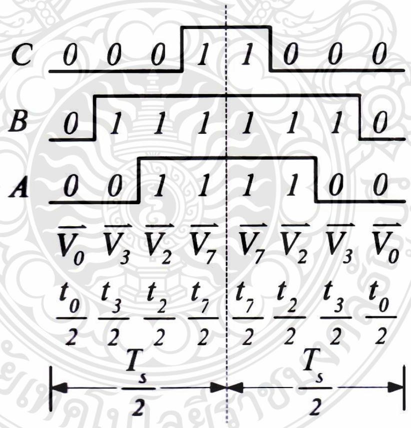
$$\begin{bmatrix} \frac{t_a}{T_s} \\ \frac{t_b}{T_s} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

โดยที่ $t_2 = t_a ; t_3 = t_b$

$T_s = t_2 + t_3 + t_0 + t_7$

$t_0 = t_7$

เขียนรูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ 2 ได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์ 2

คำนวณหา v_{A0}, v_{B0} และ v_{C0} โดยใช้หลักการเช่นเดียวกับการคำนวณหาของเซกเตอร์ 1 จะได้สมการดังนี้

$$v_{A0} = \frac{(t_0 + t_3)\left(\frac{-V_{DC}}{2}\right) + (t_2 + t_7)\left(\frac{V_{DC}}{2}\right)}{T_s} = \frac{t_2 - t_3}{T_s} \times \frac{V_{DC}}{2}; t_0 = t_7$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \times \frac{V_{DC}}{2}\left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) - \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\left(\sin\frac{2\pi}{3}\cos\theta - \cos\frac{2\pi}{3}\sin\theta\right) - \left(\sin\theta\cos\frac{\pi}{3} - \cos\theta\sin\frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta - \frac{1}{2}\sin\theta\right) - \left(\frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta\right)\right]$$

$$= \frac{3A}{2}\left[\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{1}{2}\cos\theta\right]$$

$$= \frac{3A}{2}\cos\theta \qquad (2.44)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$v_{B0} = \frac{t_0\frac{(-V_{DC})}{2} + (t_3 + t_2 + t_7)\left(\frac{V_{DC}}{2}\right)}{T_s} = \frac{t_2 + t_3}{T_s} \times \frac{V_{DC}}{2}; t_0 = t_7$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \times \frac{V_{DC}}{2}\left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) + \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\left(\sin\frac{2\pi}{3}\cos\theta - \cos\frac{2\pi}{3}\sin\theta\right) + \left(\sin\theta\cos\frac{\pi}{3} - \cos\theta\sin\frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta + \frac{1}{2}\sin\theta\right) + \left(\frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta\right)\right]$$

$$= \frac{3A}{2}\left[\frac{1}{2}\sin\theta + \frac{1}{2}\sin\theta\right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{2}\sin\theta \qquad (2.45)$$

ในทำนองเดียวกันนั้นจะได้

$$v_{C0} = \frac{(t_0 + t_3 + t_2)\frac{(-V_{DC})}{2} + (t_7)\left(\frac{V_{DC}}{2}\right)}{T_s} = \frac{t_3 + t_2}{T_s} \times \frac{V_{DC}}{2}; t_0 = t_7$$

$$= \frac{\sqrt{3}A}{V_{DC}} \times \frac{-V_{DC}}{2}\left[\sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right)\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\left(\sin\theta\cos\frac{\pi}{3} - \cos\theta\sin\frac{\pi}{3}\right) + \left(\sin\frac{2\pi}{3}\cos\theta - \cos\frac{2\pi}{3}\sin\theta\right)\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\left(\frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta - \frac{1}{2}\sin\theta\right)\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\left[\frac{1}{2}\sin\theta + \frac{1}{2}\sin\theta\right]$$

$$= -\frac{\sqrt{3}A}{2}\sin\theta = -v_{B0} \qquad (2.46)$$

หาแรงดันลำดับศูนย์จะได้

$$v_{n0} = \frac{1}{3}\left(v_{A0} + v_{B0} + v_{C0}\right) = \frac{A}{2}\cos\theta = \frac{1}{2}v_{An} \tag{2.47}$$

ในเซกเตอร์ 2 จะเห็นว่า v_{A0} เป็นแรงดันค่ากลาง ดังนั้น v_{An} เป็นแรงดันค่ากลาง เมื่อเทียบกับ v_{Bn} และ v_{Cn} สำหรับเซกเตอร์ที่เหลือใช้หลักการเดียวกัน จะได้

ในเซกเตอร์ที่ 3 จะได้ $$V_{A0} = \frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \tag{2.48}$$

$$V_{B0} = -\frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) = -V_{A0} \tag{2.49}$$

$$V_{C0} = \frac{3A}{2}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{2.50}$$

$$V_{n0} = \frac{A}{2}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}V_{Cn} \tag{2.51}$$

ในเซกเตอร์ที่ 4 จะได้ $$V_{A0} = \frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \tag{2.52}$$

$$V_{B0} = \frac{3A}{2}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{2.53}$$

$$V_{C0} = -\frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) = -V_{A0} \tag{2.54}$$

$$V_{n0} = \frac{A}{2}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}V_{Bn} \tag{2.55}$$

ในเซกเตอร์ที่ 5 จะได้ $$V_{A0} = \frac{3A}{2}\cos\theta \tag{2.56}$$

$$V_{B0} = \frac{\sqrt{3}A}{2}\sin\theta \tag{2.57}$$

$$V_{C0} = -\frac{\sqrt{3}A}{2}\sin\theta = -V_{B0} \tag{2.58}$$

$$V_{n0} = \frac{A}{2}\cos\theta = \frac{1}{2}V_{An} \tag{2.59}$$

ในเซกเตอร์ที่ 6 จะได้ $$V_{A0} = \frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \tag{2.60}$$

$$V_{B0} = -\frac{\sqrt{3}A}{2}\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) = -V_{A0} \tag{2.61}$$

$$V_{C0} = \frac{3A}{2}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{2.62}$$

$$V_{n0} = \frac{A}{2}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}V_{Cn} \tag{2.63}$$

ดังนั้นจึงสรุปวิธีการหาแรงดันลำดับศูนย์ได้ดังนี้

$$v_{n0} = \frac{1}{2}median\left(v_{An}, v_{Bn}, v_{Cn}\right) \tag{2.64}$$

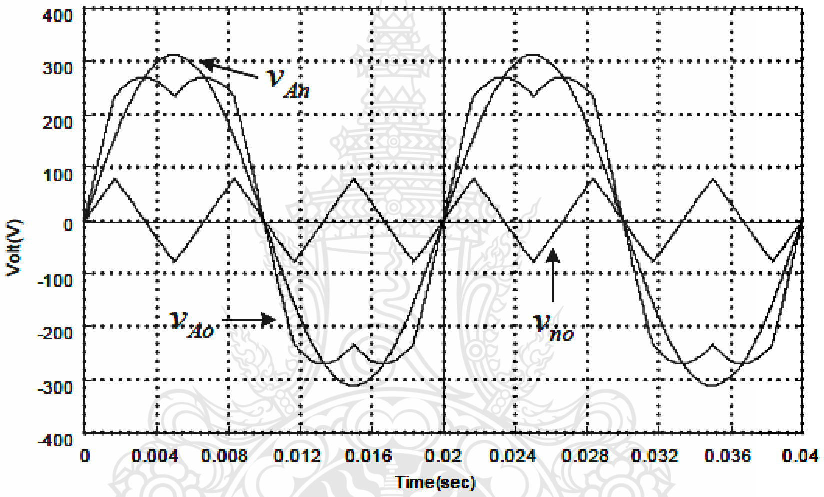
จากการทำสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่นแบบการมอดูเลชั่นทั้งสองข้าง (Double Edge Modulation) แรงดันอ้างอิง v_{A0}, v_{B0} และ v_{C0} จะมีค่าเท่ากับค่าแรงดัน v_{n0} รวมเข้าไปกับแรงดันในทุกเฟส ของ v_{An}, v_{Bn} และ v_{Cn} ดังสมการต่อไปนี้

$$v_{A0} = v_{An} + v_{n0} \tag{2.65}$$

$$v_{B0} = v_{Bn} + v_{n0} \tag{2.66}$$

$$v_{C0} = v_{Cn} + v_{n0} \tag{2.67}$$

จากนั้นนำแรงดัน v_{A0}, v_{B0} และ v_{C0} ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมก็จะได้สัญญาณไปขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.14 รูปคลื่นของแรงดัน v_{A0}, v_{An} และ v_{n0}

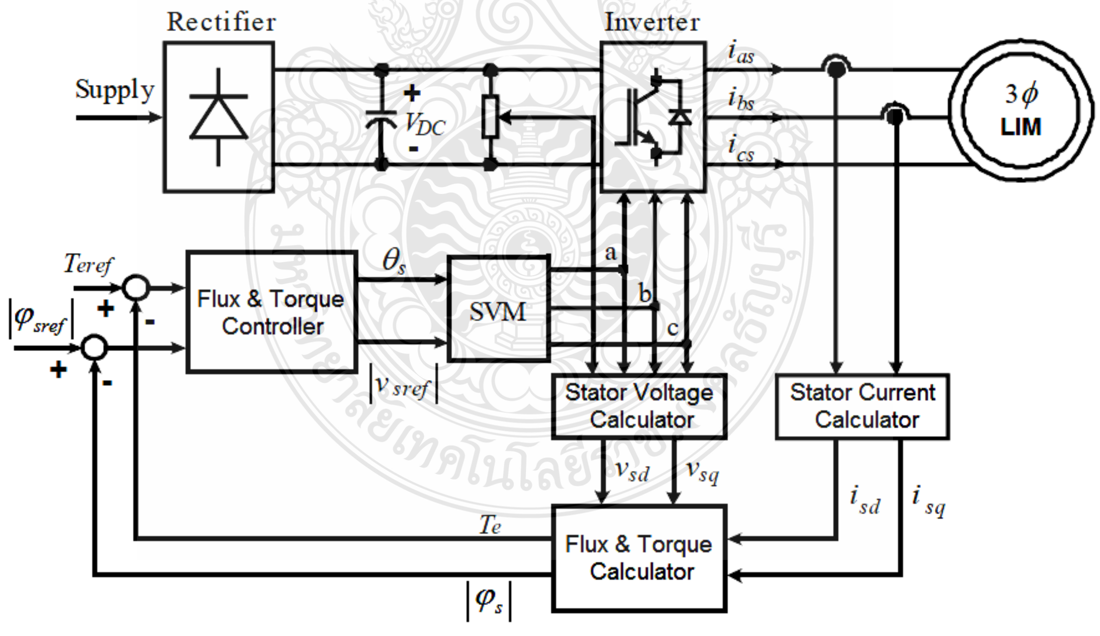
2.6 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น

การควบคุมวิธีนี้จะอาศัยหลักการที่ แรงบิดและขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กจะแปรผันตามอัตราส่วนของขนาดแรงดันต่อความถี่ โดยที่อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่สูงจะให้ผลตอบสนองที่เร็ว ความสัมพันธ์ของแรงบิดและเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ต่อแรงดันและความถี่จะแสดงดังสมการที่ 2.68 และ 2.69

$$|\varphi_s| \approx \frac{|V_S|}{2\pi.f} \tag{2.68}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{V_S^{\,2}}{\pi f} \cdot \frac{R_r / s}{\left(R_S + R_r / s\right)^2 + \left(X_{ls} + X_{lr}\right)^2} \tag{2.69}$$

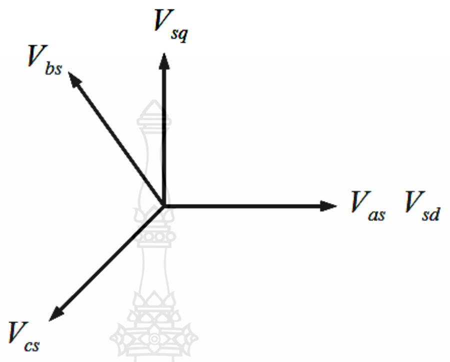
ระบบนี้สามารถควบคุมทั้งเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดได้ โดยในการควบคุมแรงบิดนั้นจะทำการควบคุมเปรียบเทียบแรงบิดอ้างอิง (T_{eref}) กับแรงบิดที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.79 เข้ามาเปรียบเทียบ เป็นค่าความผิดพลาดของแรงบิดให้กับตัวควบคุมแรงบิดซึ่งให้เอาต์พุตเป็นขนาดของแรงดันอ้างอิง ($|V_{eref}|$) ในส่วนของการควบคุมเส้นแรงแม่เหล็กจะทำการเปรียบเทียบระหว่างขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กอ้างอิง ($|\varphi_{sref}|$)กับขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้ จากสมการที่ 2.78 เป็นค่าความผิดพลาดของขนาดเส้นแรงแม่เหล็กให้กับตัวควบคุมขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กเอาต์พุตที่ได้จะเป็นอัตราส่วนความถี่ต่อแรงดัน เมื่อได้ค่าแรงดันอ้างอิงและอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ก็สามารถหามุมของแรงดันอ้างอิง (θ_s) โดยการนำความถี่ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอัตราส่วนของความถี่ต่อแรงดันไปอินทิเกรต จากนั้นเมื่อได้แรงดันอ้างอิงกับมุมแล้ว ก็นำไปหาแรงดันอ้างอิงสามเฟสที่สเตเตอร์ เพื่อสร้างสัญญาณการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์ให้กับชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าต่อไป [16]



รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น

2.6.1 การแปลงแกนอ้างอิงเทียบกับสเตเตอร์ (Clark's Transformation)

เป็นการแปลงแรงดันที่จ่ายให้แก่สเตเตอร์ (Stator Supply Voltage) จากเฟส a, b และ c ไปเป็น sd และ sq ซึ่งอ้างอิงบนแกนนิ่ง



รูปที่ 2.16 การแปลงจาก 3 เฟสเป็น 2 เฟส บนแกนอ้างอิง sd และ sq

เมื่อทำการแตกแนวแรงจากแกน sd และ sq ไปอยู่บนแกน a, b และ c จะได้สูตรการแปลงจากสองเฟสเป็นสามเฟสและในทางกลับกันยังสามารถแปลงจาก a, b และ c เป็น sd และ sq ก็จะได้การแปลงจากสามเฟสเป็นสองเฟส ดังนี้คือ

$$V_{sd} = V_{as} \tag{2.70}$$

$$V_{sq} = (V_{bs} - V_{cs}) / \sqrt{3} \tag{2.71}$$

ดังนั้นแปลงกลับจากสองเฟสเป็นสามเฟสจะได้

$$V_{as} = V_{sd} \tag{2.72}$$

$$V_{bs} = \left(-V_{sd} + \sqrt{3}V_{sq}\right) / 2 \tag{2.73}$$

$$V_{cs} = \left(-V_{sd} - \sqrt{3}V_{sq}\right) / 2 \tag{2.74}$$

โดยที่ระบบจะต้องเป็นสามเฟสสมดุล

$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0 \tag{2.75}$$

2.6.2 การประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์ (Stator Flux Estimation)

ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณ โดยอาศัยค่าเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ประมาณโดยการอินทิเกรตซึ่งหาได้ดังสมการที่ 2.76 และ 2.77 และสมการในการคำนวณหาขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ดังสมการที่ 2.78 [17]

$$\varphi_{sd} = \int (V_{sd} - R_S i_{sd})dt \tag{2.76}$$

$$\varphi_{sq} = \int (V_{sq} - R_S i_{sq})dt \tag{2.77}$$

$$|\varphi_s| = \sqrt{(\varphi_{sd}{}^2 + \varphi_{sq}{}^2)} \tag{2.78}$$

2.6.3 การประมาณค่าแรงบิด (Torque Estimation)

โดยสมการที่ใช้ในการหาค่าแรงบิดเป็นดังสมการที่ 2.79

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\varphi_{sd} . i_{sq} - \varphi_{sq} . i_{sd}) \tag{2.79}$$

2.7 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

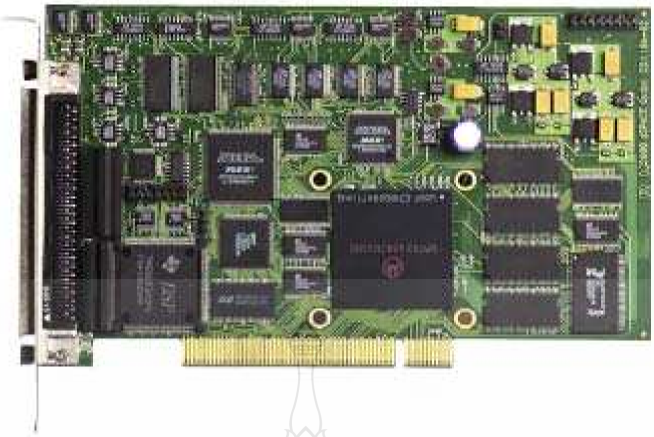
การ์ดควบคุมแบบเวลาจริงของบริษัท dSPACE เป็นการ์ดอินเตอร์เฟสที่ออกแบบสำหรับใช้กับงานพัฒนาต้นแบบ (Prototype) และงานวิจัยในอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automobile Industrial) เป็นหลักในช่วงแรกๆ ยกตัวอย่างเช่น BMW และ BENZ เป็นต้น แต่ในเวลาต่อมาสถานศึกษาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับมหาวิทยาลัยที่ต้องการพัฒนาห้องทดลองให้ทันสมัยและพัฒนางานวิจัยต้นแบบได้รวดเร็วมากขึ้น ด้วยจึงได้นำการ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE มาใช้งานมากขึ้น ข้อได้เปรียบของการใช้การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE สำหรับมหาวิทยาลัยที่มีการสอนทางวิศวกรรมศาสตร์ เมื่อมีการจำลองการทำงานระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เรียบร้อยแล้วสามารถ

เชื่อมต่อเข้ากับกระบวนการจริงได้ทันทีโดยผ่าน Blocksets สำหรับการอินเตอร์เฟสโดยเฉพาะ และสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ออกแบบด้วยเวลาจริง [18]

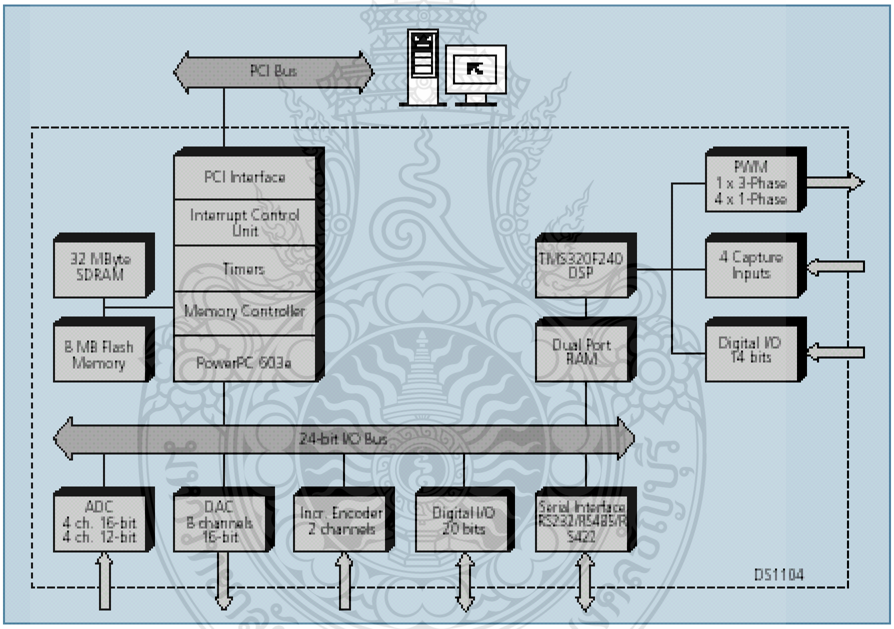
การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE ประกอบด้วยจำนวนช่อง A/D, D/A PWM, Digital I/O, Encoder ที่มากเพียงพอสำหรับระบบควบคุมทุกประเภท ยกตัวอย่างเช่น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเวกเตอร์ (AC Motor Vector Control) การควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ การควบคุมแขนกล การควบคุมกระบวนการแบบไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อน เป็นต้น

การติดตั้งและใช้งานการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104 สำหรับงานระบบควบคุมและงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก ลักษณะสมบัติของการ์ดสามารถกล่าวโดยสรุปดังนี้

- เป็นการ์ดอินเตอร์เฟสสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง (Real time) ผ่านสล็อต PCI 32 บิต ในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC/AT) ใช้โพรเซสเซอร์หลัก PPC603e 250 MHz และตัวประมวลผลเชิงดิจิตอลรอง (Slave Digital Signal Processor) เบอร์ TMS320F240
- ช่องสัญญาณ A/D 8 ช่องความละเอียด 12และ16 บิต แรงดันอินพุต $\pm 10V$
- ช่องสัญญาณ D/A 8 ช่องความละเอียด 16 บิต บิต แรงดันเอาต์พุต $\pm 10V$
- สัญญาณ PWM 10 ช่อง แบบอิสระจาก DSP TMS320F240
- ดิจิตอล I/O 20 ช่องแบบขนาน
- ช่องสัญญาณสำหรับเอนโคดเดอร์จำนวน 2 ช่อง
- ช่องสัญญาณอินเตอร์เฟสแบบอนุกรม RS232, RS485
- อินเตอร์รัพท์ฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์
- แผงเชื่อมต่อสัญญาณ (Panel) สำหรับควบคุมกระบวนการ
- Microtec C Compiler
- ซอฟแวร์จัดการระบบฮาร์ดแวร์ (Experiment and Platform Manager for Hardware Management)
- ไดรเวอร์ซอฟแวร์สำหรับ MATLAB/SIMULINK และ Control Desk Standard



รูปที่ 2.17 การ์ดอินเตอร์เฟส dSPACE รุ่น DS1104



รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์ของการ์ดอินเตอร์เฟส DS1104

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

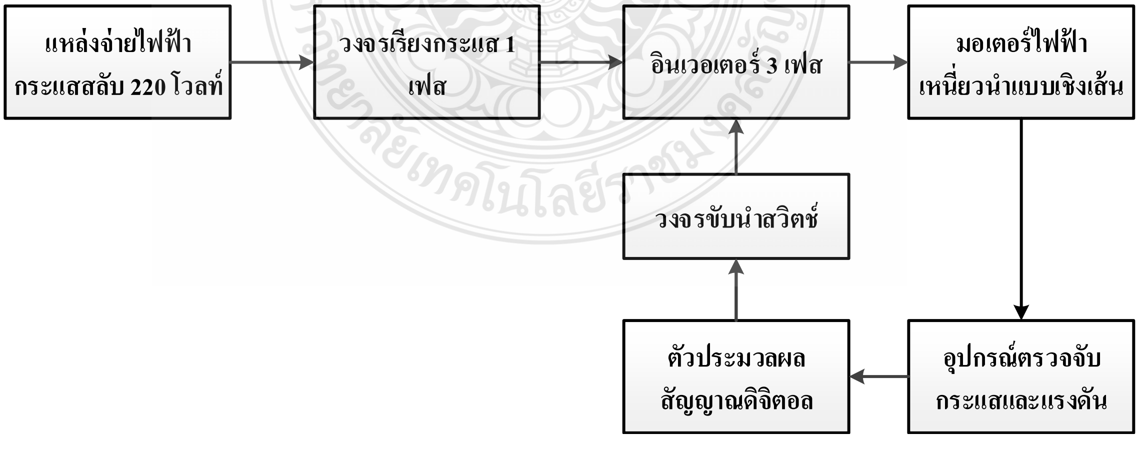
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นด้วยหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรง ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในการควบคุม ดังนั้นจึงต้องเริ่มจากการศึกษาข้อมูลแล้วนำความรู้นั้นมาใช้ในการออกแบบเพื่อสร้างชิ้นงานและการออกแบบโปรแกรมควบคุมของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink จำลองการทำงาน เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางพลวัตของระบบควบคุม

การออกแบบของงานวิจัยสามารถแบ่งการออกแบบได้เป็น 3 ส่วนคือ

- ต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น
- ส่วนฮาร์ดแวร์ในการควบคุม
- ซอฟแวร์ในการควบคุม

3.1 ส่วนประกอบของระบบ

ในการดำเนินการนั้นจะทำการออกแบบและสร้างในส่วนต่างๆ โดยแบ่งส่วนประกอบต่างๆ ออกแสดงดังรูปที่ 3.1 นี้



รูปที่ 3.1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

3.2 ต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น

การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทดลองและประยุกต์ โดยใช้หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสมาเป็นหลักการอ้างอิง การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนั้น มีความรู้ความเข้าใจถึงในหลักการทำงานรวมไปถึงหลักการออกแบบ ซึ่งการออกแบบจะอธิบายได้ในบทนี้และมีการออกแบบตามขั้นตอนและการดำเนินการสร้างมอเตอร์ตามขั้นตอนดังนี้

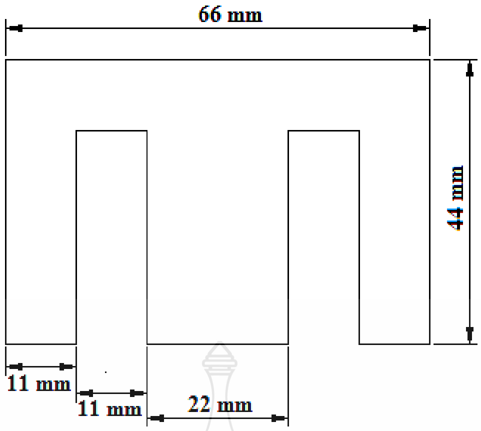
- การออกแบบและสร้างสเตเตอร์ (ปฐมภูมิ)
- การออกแบบและสร้างโรเตอร์ (ทุติยภูมิ)

3.2.1 การออกแบบและสร้างสเตเตอร์

ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนั้นมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยมีวิธีการออกแบบได้อยู่ 2 วิธีคือ แบบแรกที่ให้สเตเตอร์อยู่กับที่ โดยให้โรเตอร์เป็นส่วนเคลื่อนที่และแบบที่สองให้สเตเตอร์เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ โดยให้โรเตอร์อยู่กับที่ และเมื่อพิจารณาทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าหากต้องการให้สเตเตอร์เคลื่อนที่ในระยะไกลๆ นั้น จะต้องเลือกใช้แบบวิธีที่สอง เพราะเป็นการประหยัดในการพันขดลวดที่สเตเตอร์ โดยจะพันเฉพาะตัวที่เคลื่อนที่เท่านั้น แต่แบบแรกจะต้องพันขดลวดสเตเตอร์ทั้งความยาวระยะเคลื่อนที่ทั้งหมด

การออกแบบตัวสเตเตอร์จะต้องเลือกแกนเหล็กที่เหมาะสมกับการออกแบบ ต้องทราบขนาดความยาว ความกว้าง ความสูง และลักษณะของร่องสล๊อต ขนาดของความกว้าง ความลึกของร่องสล๊อตและจำนวนของขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ ซึ่งใช้ในการวัดค่าต่างๆ ของสเตเตอร์ต้นแบบ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำสเตเตอร์นั้น เลือกใช้แผ่นเหล็กลามิเนทบางๆ ที่ใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้านั้น มาอัดซ้อนกันเพื่อลดการสูญเสียในแกนเหล็ก

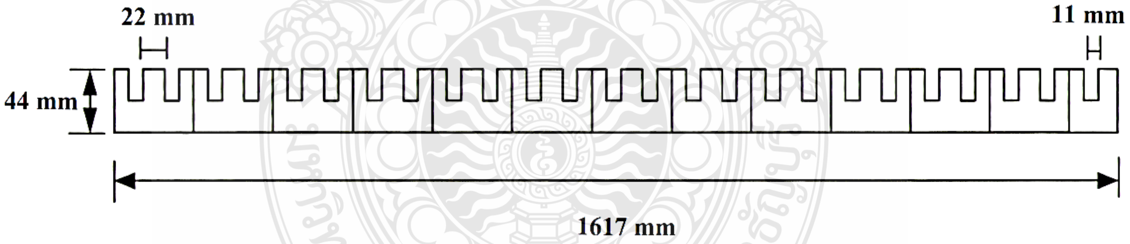
ลักษณะของร่องสล๊อต แบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ แบบกึ่งเปิด และแบบกึ่งปิดจะไม่แตกต่างกันมากนักโดยจะเลือกใช้แบบกึ่งเปิดและเพราะง่ายต่อการลงขดลวดทองแดงและต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแบบกึ่งปิด การออกแบบสเตเตอร์ใช้ขนาดของแผ่นลามิเนทขนาดดังรูปที่ 3.2 แสดงขนาดแผ่นเหล็กรูปตัวอี (E)



รูปที่ 3.2 ขนาดของแผ่นเหล็กลามิเนทรูปตัวอี

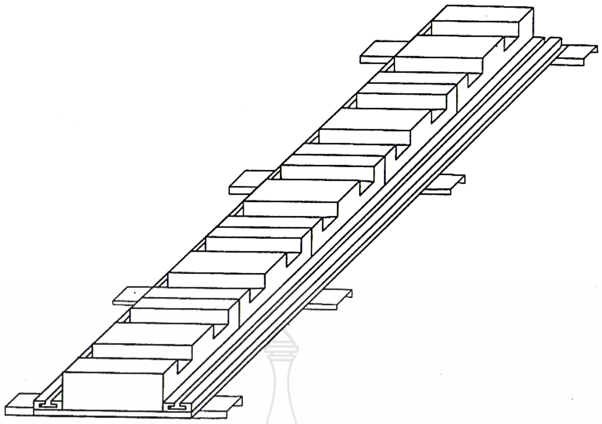
3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างส่วนสเตเตอร์

ขั้นตอนแรกนำแผ่นเหล็กลามิเนทรูปตัวอี มาอัดซ้อนกันแต่ละชั้นโดยเรียงกัน 12 แผ่นครึ่ง โดยนำมาเรียงกันจะได้ความยาวเท่ากับ 1,617 มิลลิเมตร ลักษณะการเรียงเป็นไปตามรูปที่ 3.3 ในการสร้างโครงสร้างจะต้องเรียงและต่อแผ่นเหล็กให้ตรงและเหมาะสมให้เป็นระเบียบเพื่อที่จะให้ง่ายต่อการลงขดลวดทองแดง

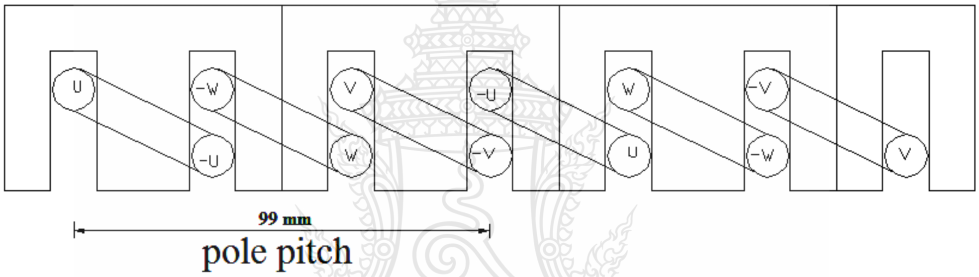


รูปที่ 3.3 การเรียงแผ่นเหล็กลามิเนท

ทำการอัดแผ่นเหล็กลามิเนทโดยให้ซ้อนอัดกันเท่ากับ 100 มิลลิเมตร โดยในการประสานระหว่างแผ่นเหล็กลามิเนทโดยจะใช้สเปร์กาว เพื่อความแข็งแรงในการจัดเรียง เมื่อได้ขนาดแล้วนำแกนเหล็กที่อัดเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้น อาบชโลมน้ำยาวานิชเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทนต่อความร้อนจากการทำงานได้ แล้วทิ้งไว้จนแห้ง

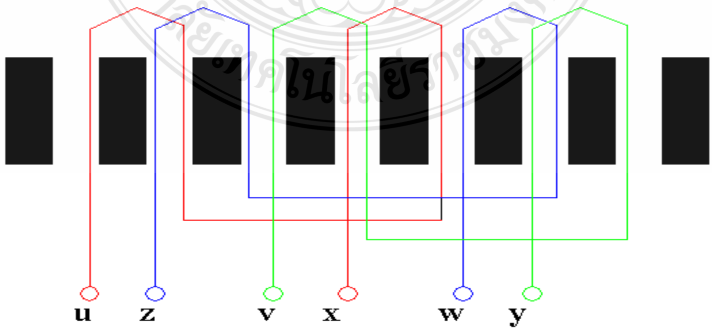


รูปที่ 3.4 โครงสร้างส่วนรับน้ำหนักและประคองสเตเตอร์



รูปที่ 3.5 การลงขดลวดในร่องสล๊อตระยะโพล – พิช เท่ากับ 99 มิลลิเมตร

การลงขดลวดทั้ง 3 เฟสนั้นจะมารวมกันได้การพันที่สมบูรณ์ โดยจะมีสล๊อตที่มีเพียงชั้นเดียวทั้งหมด 2 สล๊อต จะอยู่นอกสุดของทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.6 การลงขดลวดทั้ง 3 เฟส

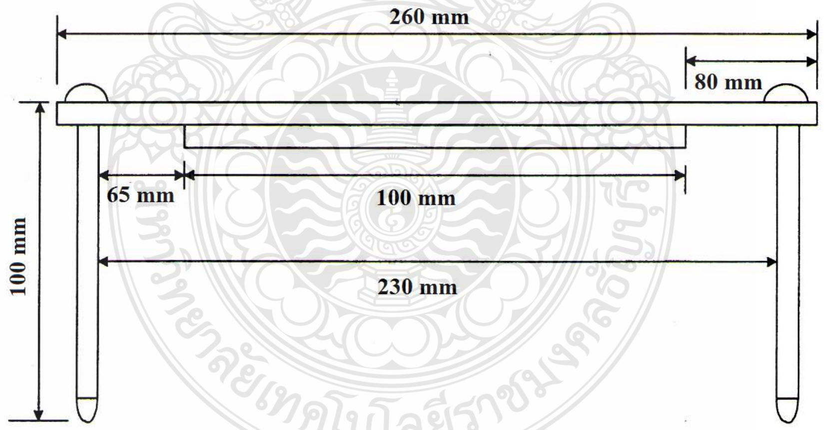
การคำนวณจำนวนรอบการพันขดลวดทองแดง

$$N = \frac{E_L}{4.44(f)(Bm)A} \tag{3.1}$$

3.3 การออกแบบและสร้างโรเตอร์

การทำงานของระบบนั้นจะอาศัยการควบคุมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อจะเป็นแรงที่ทำให้ตัวโรเตอร์เคลื่อนที่ไปด้วยแรงผลักและแรงดูดของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากส่วนสเตเตอร์ เหนี่ยวนำผ่านโรเตอร์ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กครบวงจร จึงมีผลทำให้เกิดแรงลัพธ์ขึ้นมาทำให้เกิดแรงเคลื่อนที่ ดังนั้นโรเตอร์ที่ทำด้วยเหล็กและอะลูมิเนียมจึงเปรียบเสมือนเป็นส่วนหนึ่งของวงจรแม่เหล็ก

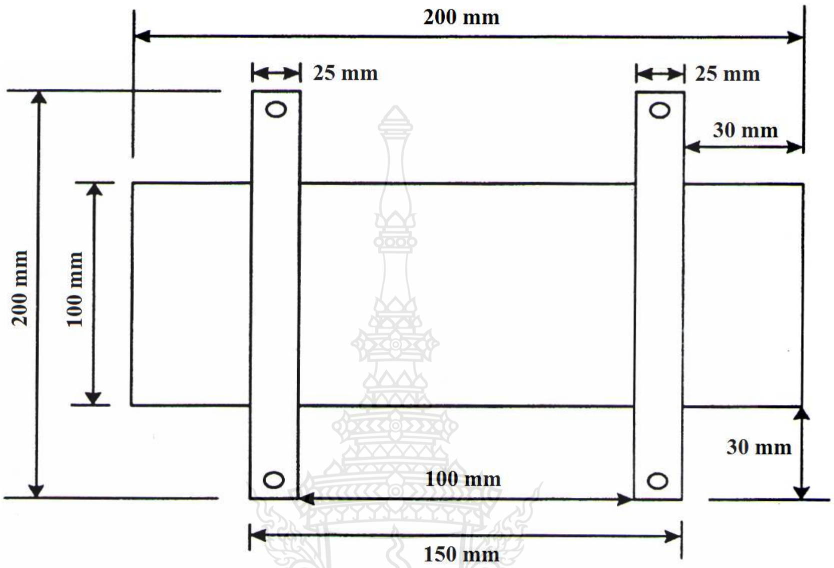
จากหลักการดังกล่าวของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น แรงที่เกิดขึ้นจะเกิดทั้งแรงผลักและแรงดูด แต่เมื่อแรงดูดนั้นจะทำให้สเตเตอร์เคลื่อนที่ไปได้โดยยาก ดังนั้นจึงต้องการเฉพาะแรงผลัก โดยกำจัดแรงดูดให้น้อยลง โดยใช้วัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเลือกใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการเพื่อที่จะลดแรงดูดให้ได้มากที่สุดในขณะเคลื่อนที่



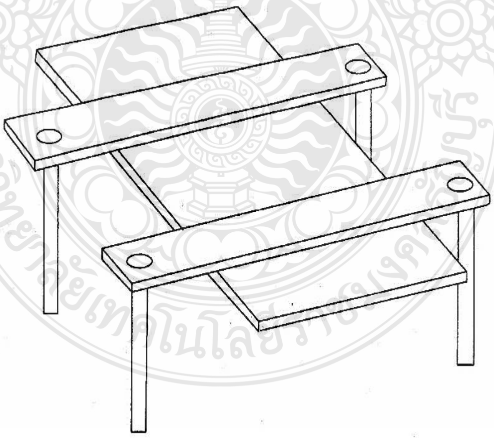
รูปที่ 3.7 โครงสร้างด้านหน้าของโรเตอร์

จากรูปที่ 3.7 แสดงขนาดโครงสร้างของโรเตอร์ที่ประกอบทำจากวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม จากรูปเป็นการแสดงภาพด้านหน้าของตัวโรเตอร์ที่เป็นส่วนที่เคลื่อนที่

โครงสร้างของโรเตอร์ด้านบนจะมีขนาดขายึดแผ่นอลูมีเนียมยาว 200 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร ขายึดแผ่นอลูมิเนียมห่าง 100 มิลลิเมตร แสดงดังรูป 3.8 และรูปที่ 3.9 จะเป็นการแสดงโครงสร้างของโรเตอร์



รูปที่ 3.8 โครงสร้างด้านบนของโรเตอร์



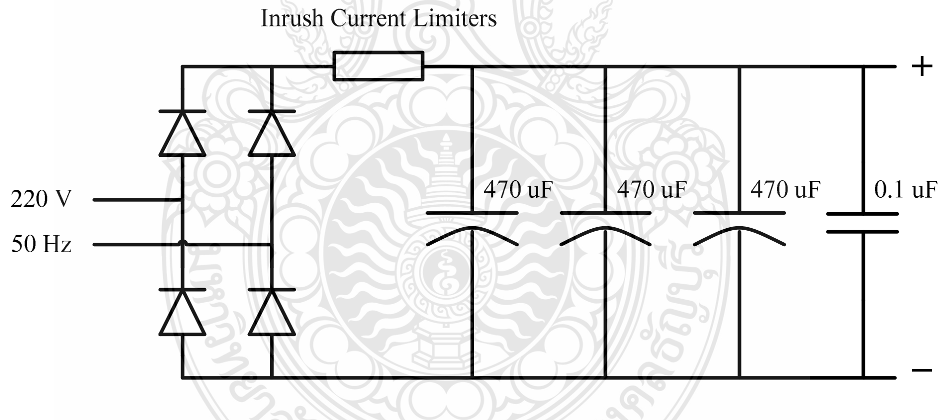
รูปที่ 3.9 โครงสร้างของโรเตอร์

3.4 ส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์

จะประกอบไปด้วย ชุดวงจรเรียงกระแสหรือชุดวงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ชุดวงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ ชุดวงจรภาคกำลังหรือชุดวงจรอินเวอร์เตอร์และชุดอุปกรณ์ตรวจจับกระแสและแรงดัน

3.4.1 ชุดวงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟตรง

อินพุตของแหล่งกำเนิดกำลังคือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิรซต์ ถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระดับ 311 โวลต์ ด้วยวงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) เบอร์ GSIB2560 จากนั้นผ่านอุปกรณ์ป้องกันกระแสกระชาก (Inrush Current Limiters) เบอร์ SL325R020 จะทำงานโดยเมื่ออุณหภูมิต่ำจะมีค่าความต้านทานสูงจากนั้นเมื่อตัวอุปกรณ์มีความร้อนเกิดขึ้นอุปกรณ์จะมีค่าความต้านทานลดต่ำลง ตัวเก็บประจุในวงจรนี้จะทำหน้าที่กรองแรงดันขาออกของวงจรเรียงกระแสเพื่อให้การกระเพื่อมของแรงดันมีค่าน้อยที่สุดจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 μF ขนานกัน 3 ตัว และจะมีตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μF ต่อกับดีซีบัสเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนบนดีซีบัสดังแสดงในรูปที่ 3.10

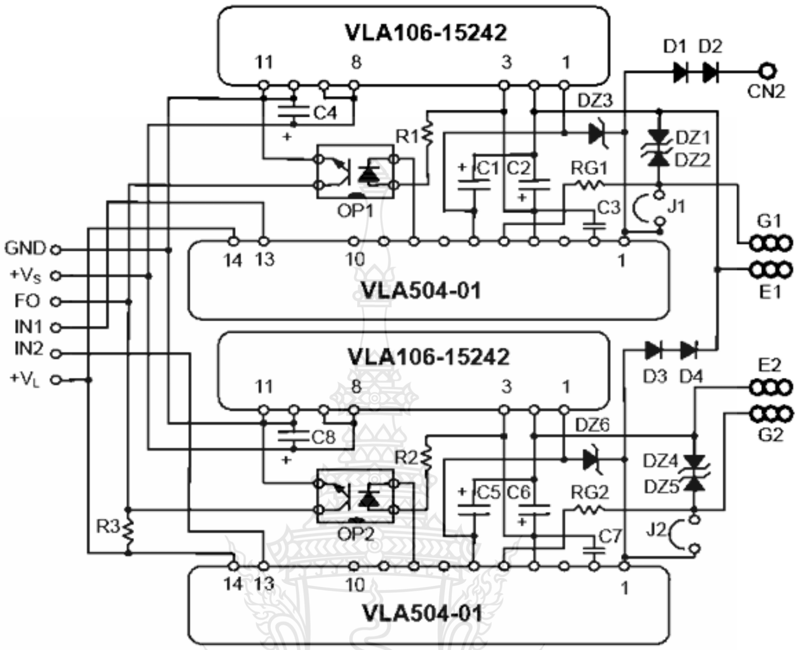


รูปที่ 3.10 วงจรแหล่งกำเนิดกำลังไฟตรง

3.4.2 วงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์

จากรูปที่ 3.11 จะเป็นวงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของ Powerex สามารถขับนำสวิตช์ได้ทีละ 2 กิ่ง ที่ประกอบไปด้วยตัวไอซี IGBT Gate Driver เบอร์ VLA504-01 เป็นตัวขับนำสวิตช์ โดยมีภาคจ่ายไฟแบบ Isolated DC/DC Converter โดยใช้ไอซีเบอร์ VLA106-15242 ซึ่งที่ชุดวงจรสร้าง

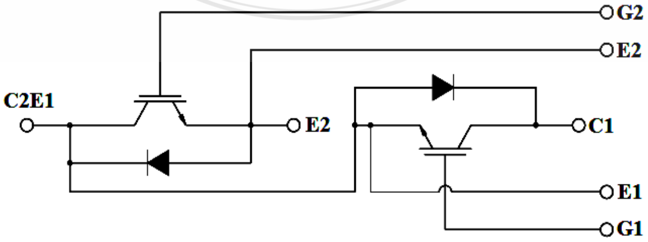
สัญญาณขับนำสวิตช์ที่ขา 13 จะรับสัญญาณจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลทำงานแบบแอคทีฟโลว์ เพื่อไปขับสัญญาณที่ขาเกตของไอจีบีทีโมดูลเบอร์ CM50DY-12H



รูปที่ 3.11 วงจรสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์

3.4.3 ชุดวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์

สร้างขึ้นจากไอจีบีทีโมดูล เพราะสามารถทนแรงดันและกระแสได้พิกัดสูง โดยในรูปที่ 3.12 จะประกอบด้วยไอจีบีทีโมดูล เบอร์ CM50DY-12H (Dual IGBT) จะใช้จำนวน 3 ชุด และมีขนาดพิกัด 50 แอมแปร์ 600 โวลต์ ความถี่การสวิตช์ที่ 10 ถึง 25 กิโลเฮิรตซ์ โดยไอจีบีทีเบอร์นี้จะมีไดโอดความเร็วสูง (Fast Recovery-Diode) ร่วมอยู่ภายใน และมีการระบายความร้อนแบบ Isolated Baseplate

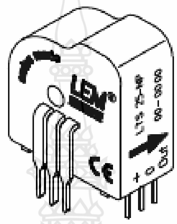


รูปที่ 3.12 วงจรภาคกำลังไอจีบีทีโมดูล

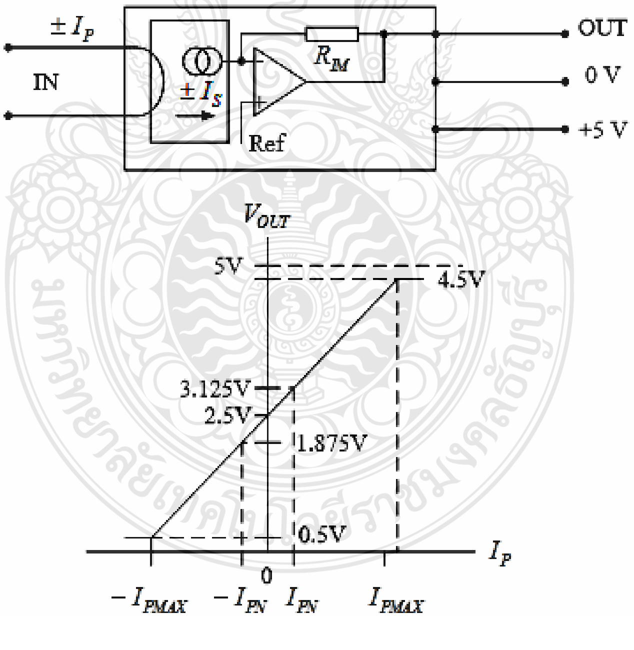
3.4.4 ชุดส่งสัญญาณตรวจจับ

ชุดส่งสัญญาณตรวจจับจะประกอบด้วยชุดตรวจจับสัญญาณป้อนกลับ จำนวน 3 ชุด ได้แก่ชุดตรวจจับกระแสเฟส 2 ชุด และชุดตรวจจับแรงดันดีซีบัส 1 ชุด

- ชุดตรวจจับกระแส จะใช้ LEM รุ่น LTS 25-NP ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และวงจรการต่อใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับกระแสได้แสดงในรูปที่ 3.14 โดยสามารถเลือกระดับของการวัดกระแสได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

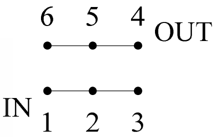
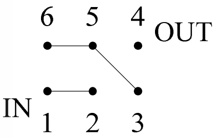
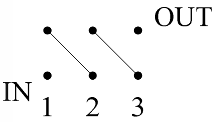


รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ตรวจจับกระแส

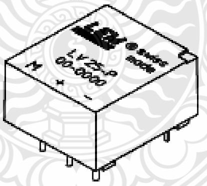


รูปที่ 3.14 วงจรการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับกระแส

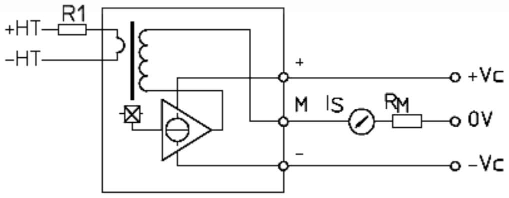
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการต่อใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับกระแส รุ่น LTS 25-NP

จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ	กระแสปฐมภูมิ (r.m.s.)	แรงดันด้านออก	ค่าความต้านทานปฐมภูมิ	ค่าความเหนี่ยวนำปฐมภูมิ	การต่อขาอุปกรณ์
1	± 25	2.5 ± 0.600	0.18	0.013	
2	± 12	2.5 ± 0.600	0.81	0.05	
3	± 8	2.5 ± 0.600	1.62	0.12	

- ชุดตรวจจับแรงดัน จะใช้ LEM รุ่น LV 25-P ดังแสดงในรูปที่ 3.15 สามารถตรวจจับแรงดันได้ตั้งแต่ 10 ถึง 500 โวลต์ ในวงจรการใช้งานจะใช้อัตราการลดทอนแรงดัน 100 ต่อ 1 โวลต์ โดยค่าความต้านทานด้านปฐมภูมิ (R1) เท่ากับ 25 กิโลโอห์ม และความต้านทางด้านทุติยภูมิ (R_M) เท่ากับ 100 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.16



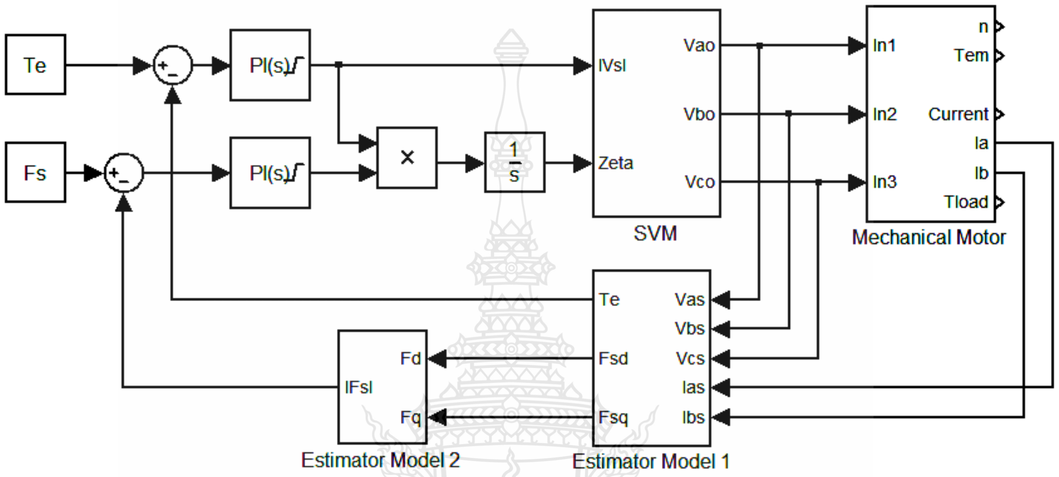
รูปที่ 3.15 อุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน



รูปที่ 3.16 วงจรการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับแรงดัน

3.5 การออกแบบจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

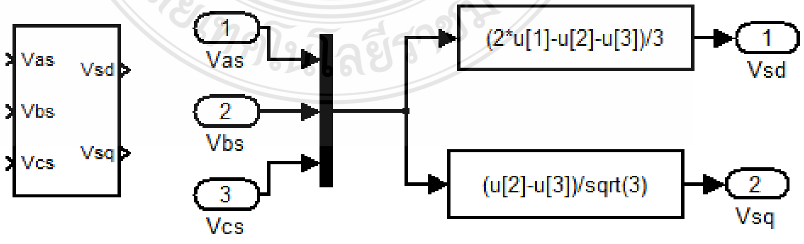
การจำลองระบบควบคุมจะใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อพิสูจน์ทางทฤษฎีว่าการควบคุมที่ได้ออกแบบไปนั้นสามารถควบคุมได้หรือไม่ ตั้งแต่ส่วนการคำนวณ ส่วนการควบคุมและส่วนประกอบอื่นๆ ทั้งหมด



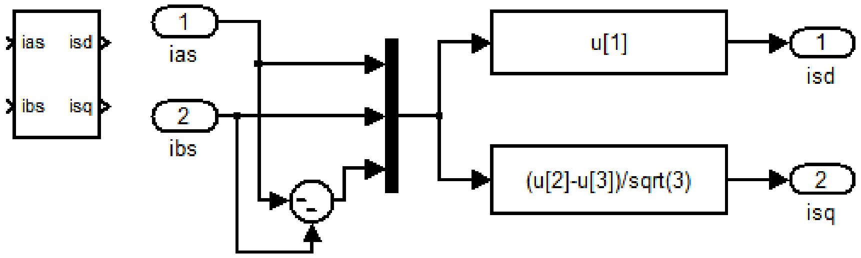
รูปที่ 3.17 แบบจำลองของระบบควบคุม

3.5.1 แบบจำลองส่วนการคำนวณ

แบบจำลองส่วนการคำนวณแรงดันสเตเตอร์และกระแสสเตเตอร์ โดยจะทำการแปลงจากระบบสามเฟสมาเป็นระบบสองเฟสที่อยู่ในแกนอ้างอิง sd และ sq ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19

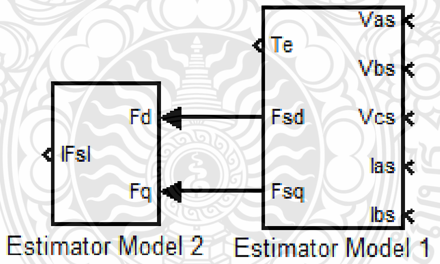


รูปที่ 3.18 แบบจำลองการคำนวณค่าแรงดันสเตเตอร์

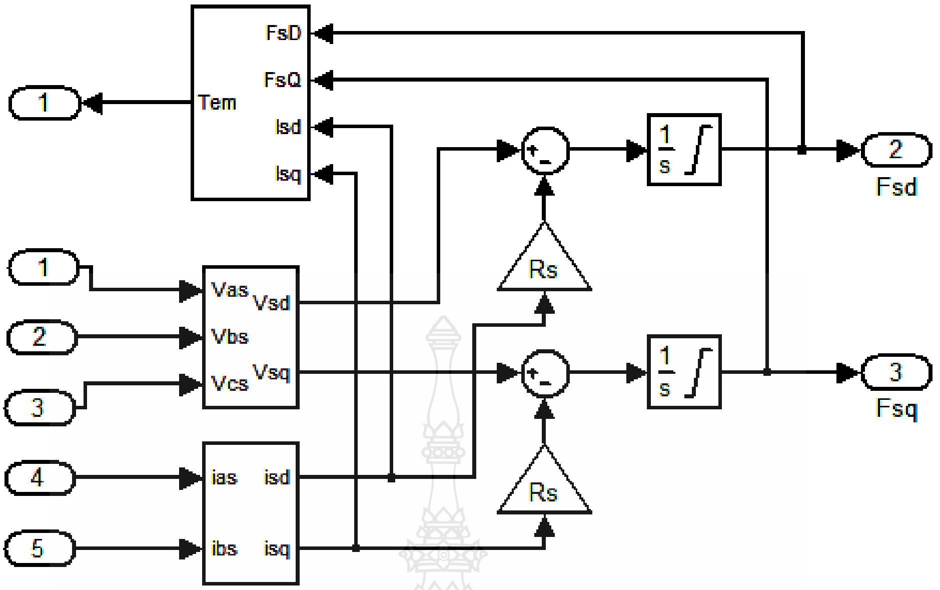


รูปที่ 3.19 แบบจำลองการคำนวณค่ากระแสสเตเตอร์

แบบจำลองในส่วนของการคำนวณจะมีการคำนวณเพื่อประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดของมอเตอร์จะอยู่ในแบบจำลองภายในส่วนการคำนวณ Estimator Model 1 และในส่วนของการคำนวณค่าขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนั้นจะอยู่ในแบบจำลองภายในส่วนการคำนวณ Estimator Model 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.20 โดยการตรวจวัดกระแสและแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นแล้วทำการแปลงจากระบบสามเฟสมาเป็นระบบสองเฟสที่อยู่ในแกนอ้างอิง sd และแกนอ้างอิง sq ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยจะใช้ข้อมูลของความต้านทานสเตเตอร์ (Rs) ของตัวมอเตอร์นั้นๆ ด้วย

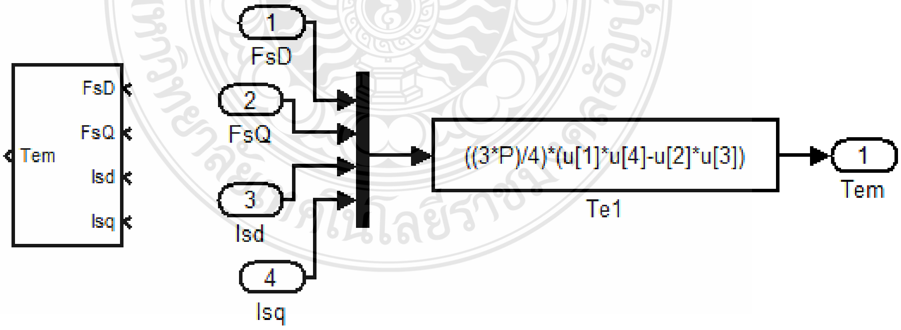


รูปที่ 3.20 แบบจำลองส่วนการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิด



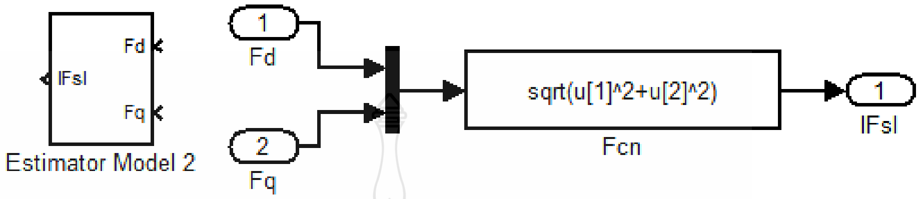
รูปที่ 3.21 แบบจำลองภายในส่วนการคำนวณ Estimator Model 1

ในการคำนวณหาค่าแรงบิดนี้ จะใช้กระแสสเตเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ที่อยู่ในรูปของแกนอ้างอิง sd และ sq โดยแบบจำลองการคำนวณหาค่าแรงบิดจะแสดงโดยรูปที่ 3.22 โดยการคำนวณหาค่าแรงบิดนี้ จะต้องใช้ข้อมูลขั้วแม่เหล็ก (P) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนี้ด้วย



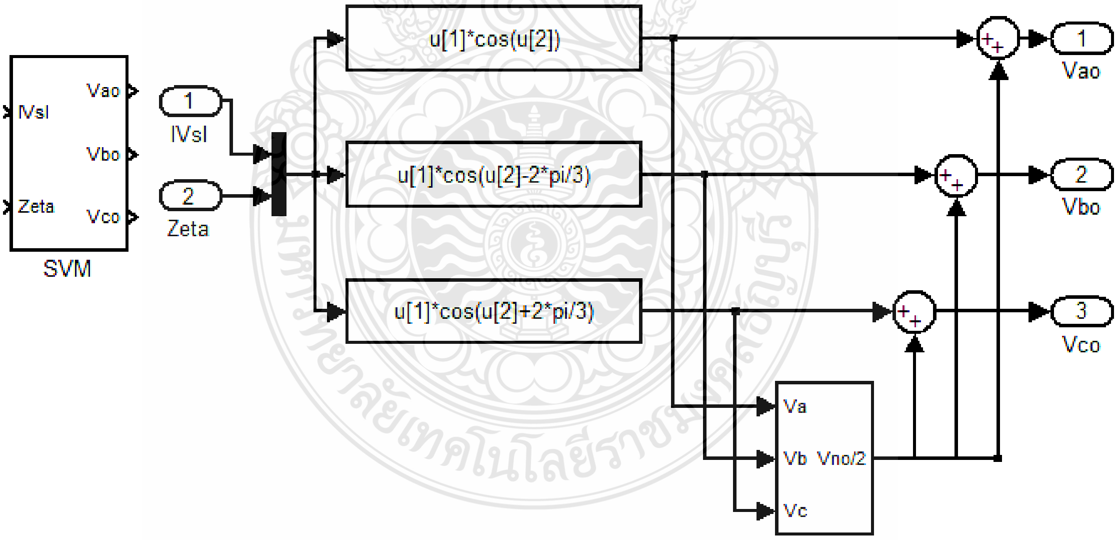
รูปที่ 3.22 แบบจำลองส่วนการคำนวณแรงบิด

ในส่วนของแบบจำลองการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กนั้น จะทำการรับค่าเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ที่อยู่ในรูปแกนอ้างอิง sd และ sq จากแบบจำลองในส่วนการคำนวณ Estimator Model 1 และนำมาคำนวณเพื่อหาขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กของมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แบบจำลองส่วนการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็ก

แบบจำลองส่วนการหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดันนั้น จะทำการรับค่าของขนาดและมุมของแรงดันอ้างอิงมาคำนวณนั้น แล้วจะได้เป็นค่าของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนี้ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แบบจำลองส่วนการหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน

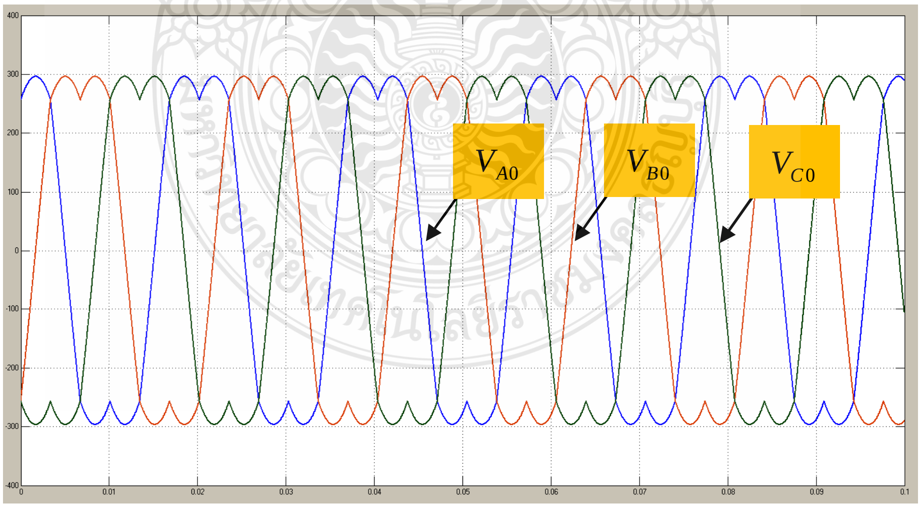
3.6 ผลการทดสอบจากแบบจำลอง

ในการทดสอบจากแบบจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จะใช้ขนาดพิกัดและพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น ดังนี้

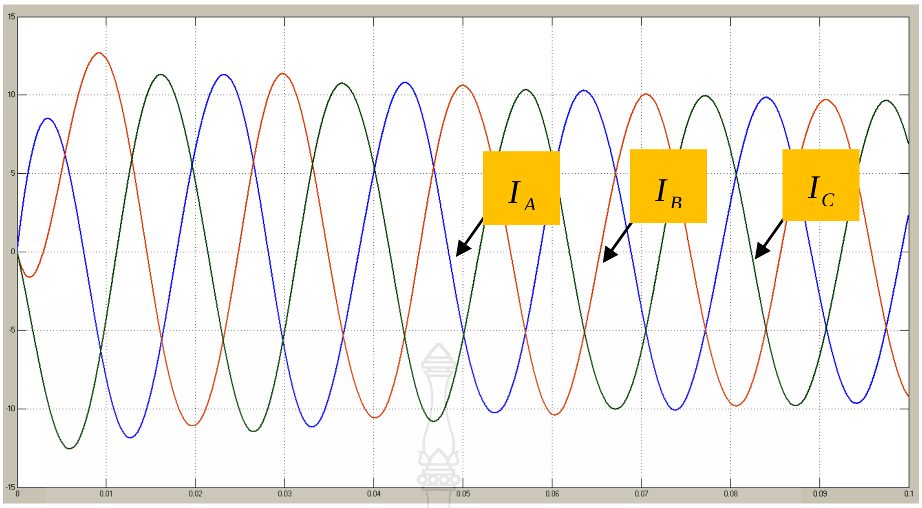
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ R_S	18.811 โอห์ม
ความต้านทานของโรเตอร์ R_R	1.198 โอห์ม
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์ L_{ls}	42.840e-3 เฮนรี่
ความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดโรเตอร์ L_{lr}	42.840e-3 เฮนรี่
ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ L_m	67.767e-3 เฮนรี่
จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ P	16 โพล
โมเมนต์ความเฉื่อย J	0.001

รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสจากแบบจำลองสเปซเวกเตกร์ประกอบด้วย V_{A0}, V_{B0} และ V_{C0} ทำมุม 120 องศาทางไฟฟ้า ที่ความถี่ 50 Hz ดังรูปที่ 3.25 และ 3.26

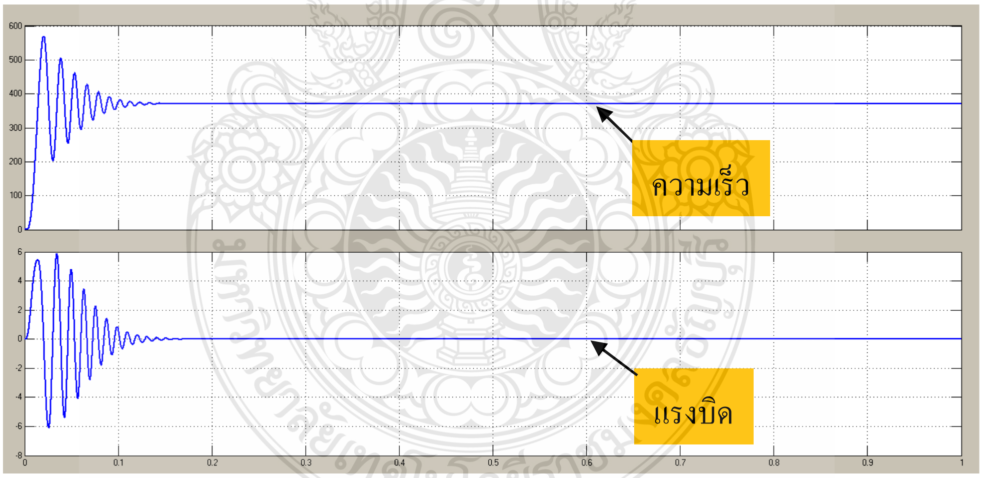


รูปที่ 3.25 รูปสัญญาณแรงดันจากแบบจำลองสเปซเวกเตอร์



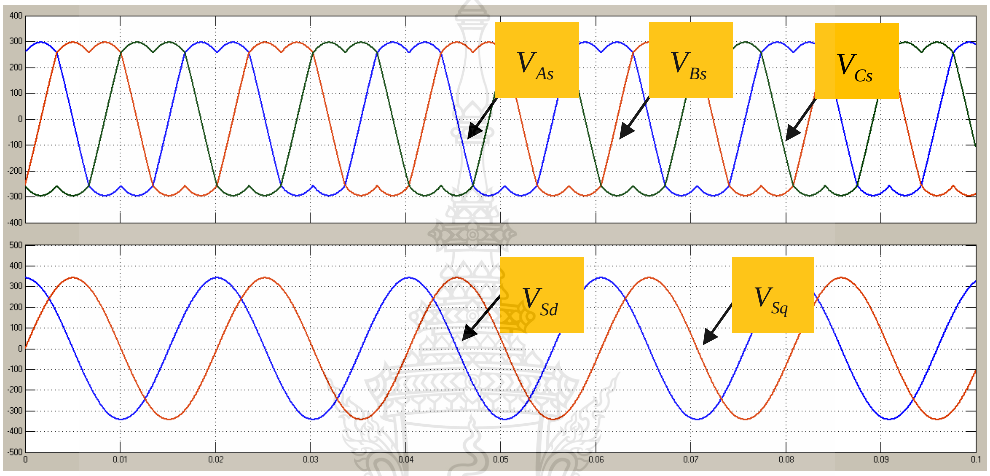
รูปที่ 3.26 รูปสัญญาณกระแสสเตเตอร์ขณะเริ่มเดิน

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ขณะเริ่มเดินจนถึงความเร็วพิกัดที่ 371 rpm จากแบบจำลองระบบควบคุมแสดงดังในรูปที่ 3.27

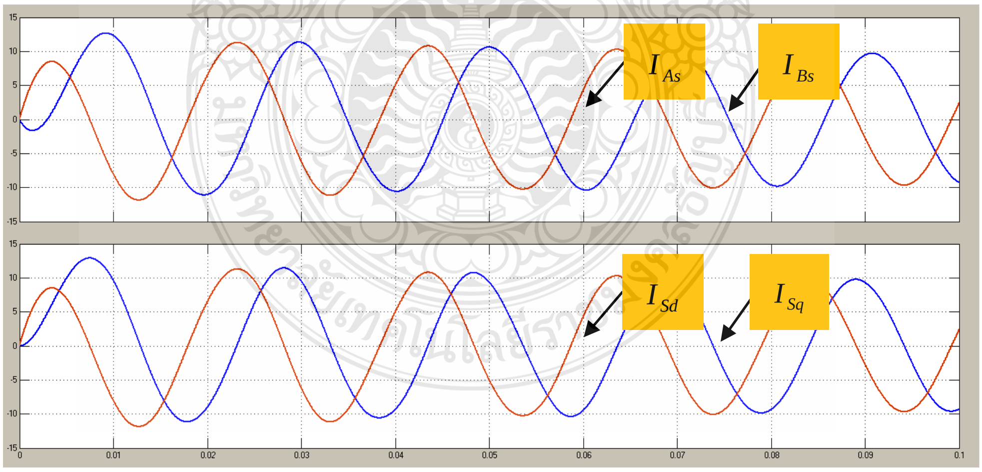


รูปที่ 3.27 รูปสัญญาณความเร็วมอเตอร์และรูปสัญญาณแรงบิดมอเตอร์

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปสัญญาณแรงดัน V_{As} , V_{Bs} และ V_{Cs} กับรูปสัญญาณแรงดัน V_{Sd} และ V_{Sq} ที่ได้จากแบบจำลองการคำนวณค่าแรงดันสเตเตอร์ โดยจะทำการแปลงจากระบบสามเฟสมาเป็นระบบสองเฟสที่อยู่ในแกนอ้างอิง sd และ sq แสดงดังในรูปที่ 3.28 และแสดงรูปสัญญาณกระแสสเตเตอร์ I_{As} และ I_{Bs} กับรูปสัญญาณกระแส I_{Sd} และ I_{Sq} จากแบบจำลองการคำนวณค่ากระแสสเตเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.29

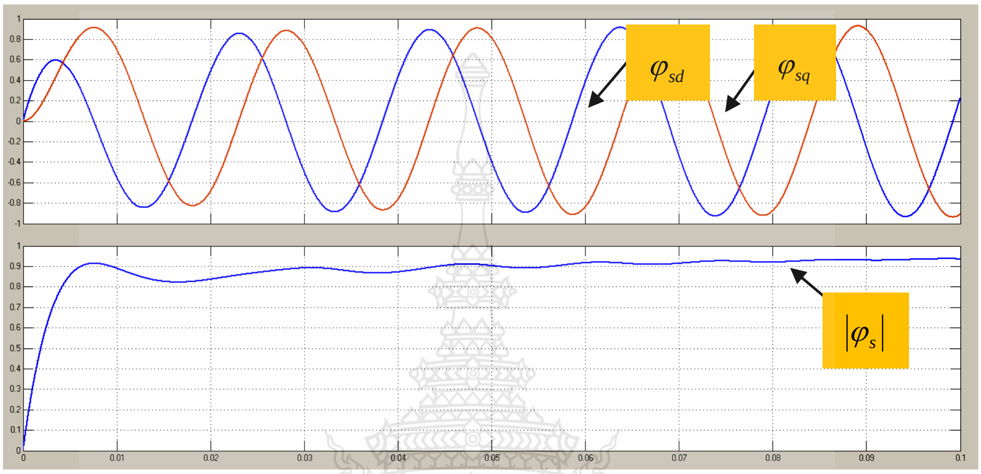


รูปที่ 3.28 รูปสัญญาณแรงดัน V_{As} , V_{Bs} และ V_{Cs} กับรูปสัญญาณแรงดัน V_{Sd} และ V_{Sq}

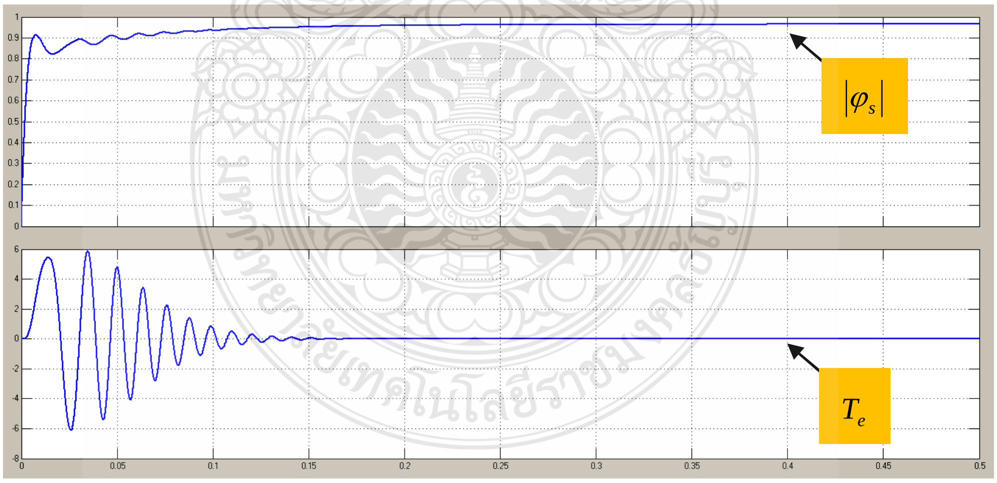


รูปที่ 3.29 รูปสัญญาณกระแส I_{As} และ I_{Bs} กับรูปสัญญาณกระแส I_{Sd} และ I_{Sq}

ความสัมพันธ์ระหว่างรูปคลื่นของเส้นแรงแม่เหล็ก φ_{sd} และ φ_{sq} กับค่าขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จากแบบจำลองส่วนการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็ก ($|\varphi_s|$) ดังแสดงในรูปที่ 3.30 และจากรูปที่ 3.31 จะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กกับแรงบิดที่ได้จากแบบจำลองส่วนการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กและแบบจำลองส่วนการคำนวณแรงบิด

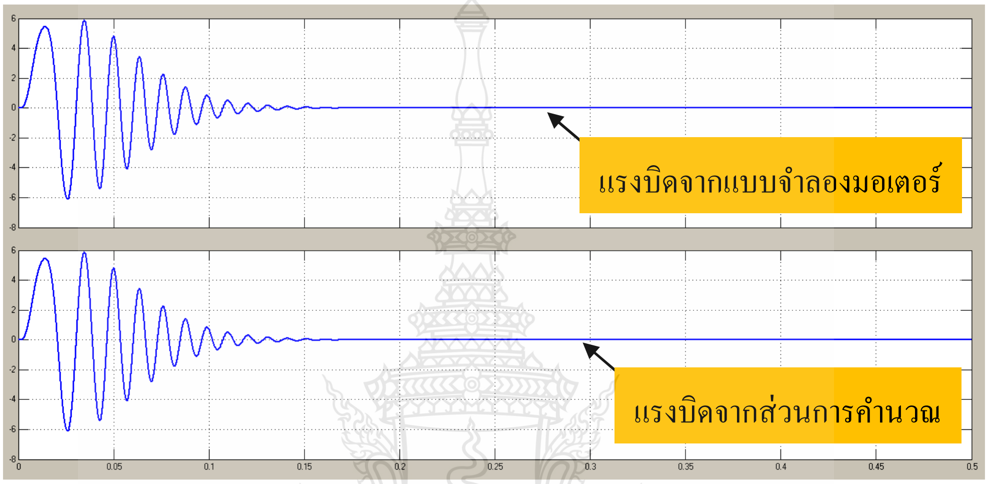


รูปที่ 3.30 รูปสัญญาณเส้นแรงแม่เหล็ก φ_{sd} และ φ_{sq} กับสัญญาณขนาดเส้นแรงแม่เหล็ก

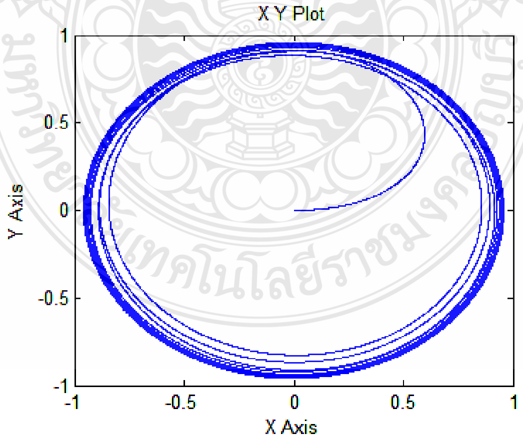


รูปที่ 3.31 รูปสัญญาณขนาดเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดมอเตอร์

ในรูปที่ 3.32 จะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดที่ได้จากการวัดจากส่วนของแบบจำลองที่มอเตอร์สร้างขึ้นจริงเทียบกับแรงบิดที่ได้จากส่วนของแบบจำลองการคำนวณ โดยการคำนวณมาจากค่าป้อนกลับแรงดันและกระแสกับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น และในรูปที่ 3.33 จะเป็นการแสดงสัญญาณเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น

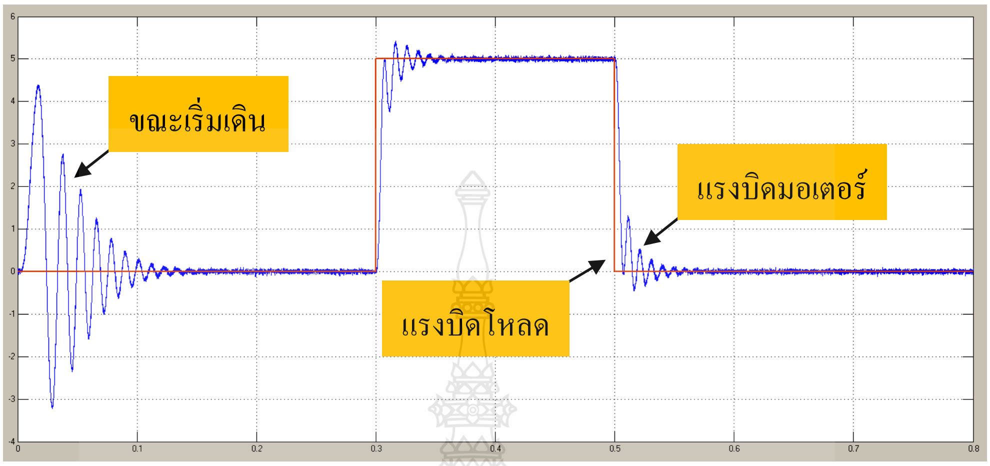


รูปที่ 3.32 รูปสัญญาณแรงบิดจากแบบจำลองมอเตอร์ และรูปสัญญาณแรงบิดจากแบบจำลองส่วนการคำนวณ



รูปที่ 3.33 รูปสัญญาณเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก

แสดงความสัมพันธ์ของผลตอบสนองของแรงบิดเมื่อมีการสเต๊ปโหลด ขนาด 5 นิวตันเมตร จากแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 รูปสัญญาณผลตอบสนองของแรงบิด

จากการทดสอบจากแบบจำลองระบบสามารถควบคุมแรงบิดและตอบสนองต่อแรงบิดโหลดได้ และแรงบิดที่ได้จากแบบจำลองของการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกับแรงบิดที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ ดังนั้นระบบนี้สามารถประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดของมอเตอร์ได้จากการตรวจจับกระแสและแรงดันของมอเตอร์ เพื่อนำระบบประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดนี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับ DSPACE ในชุดต้นแบบ

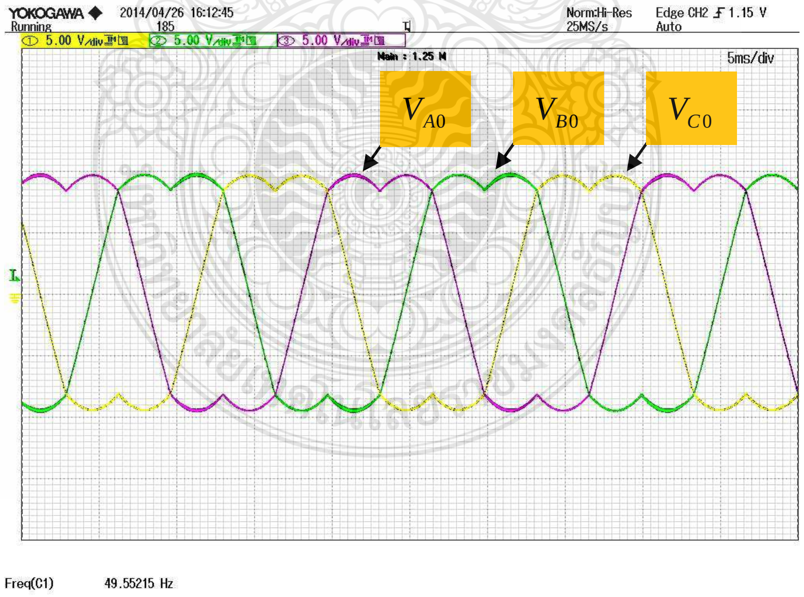
บทที่ 4

ผลการทดสอบ

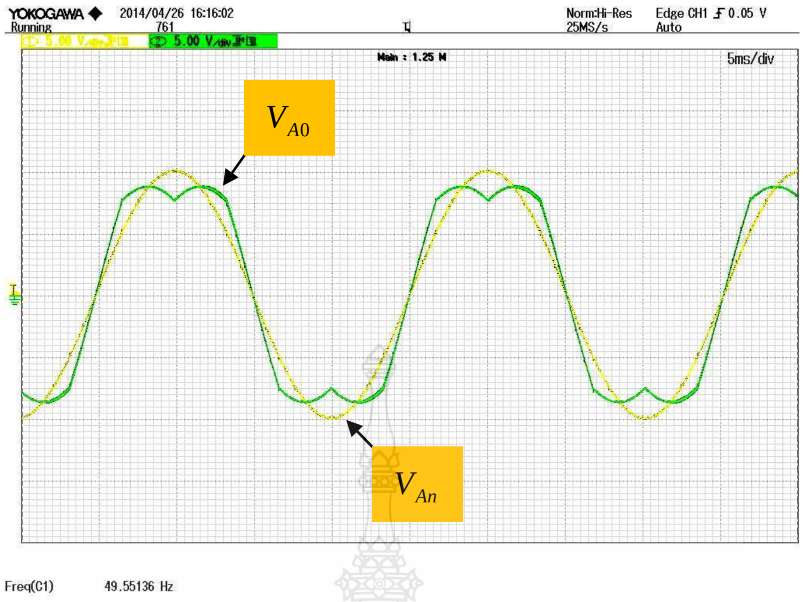
ในบทนี้กล่าวถึงผล ที่ได้ทำการทดสอบระบบควบคุมกับชุดต้นแบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นด้วยวิธีการแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง จากนั้นจะเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบสัญญาณสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่จะนำไปทำการมอดูเลชั่นแล้วทำการขับมอเตอร์เพื่อวัดตรวจสอบค่าต่างๆ ก่อนทำการป้อนกลับและควบคุมต่อไป เมื่อตรวจสอบเรียบร้อยแล้วก็จะเริ่มการทดสอบที่เป็นการควบคุมจริง

4.1 ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบ

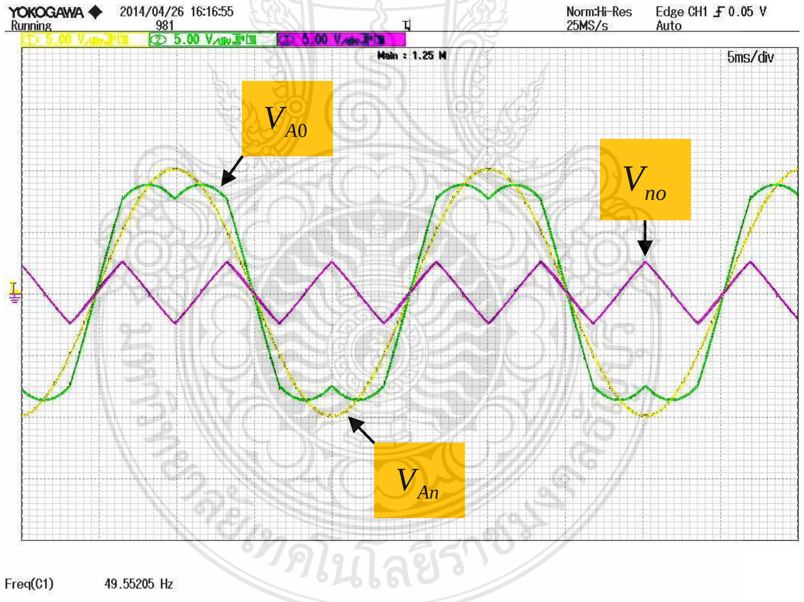
จากรูปที่ 4.1 เป็นสัญญาณสเปซเวกเตอร์ของแรงดันอ้างอิงเฟส ที่สร้างออกจากตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเบอร์ TMS320F240 ผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟสสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง DSPACE รุ่น DS1104 โดยทำการแปลงจากสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาล็อกแล้วที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ ส่วนในรูปที่ 4.2 จะเป็นการแสดงรูปสัญญาณของแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} ,V_{An}



รูปที่ 4.1 สัญญาณสเปซเวกเตกร์ของแรงดันอ้างอิงเฟส

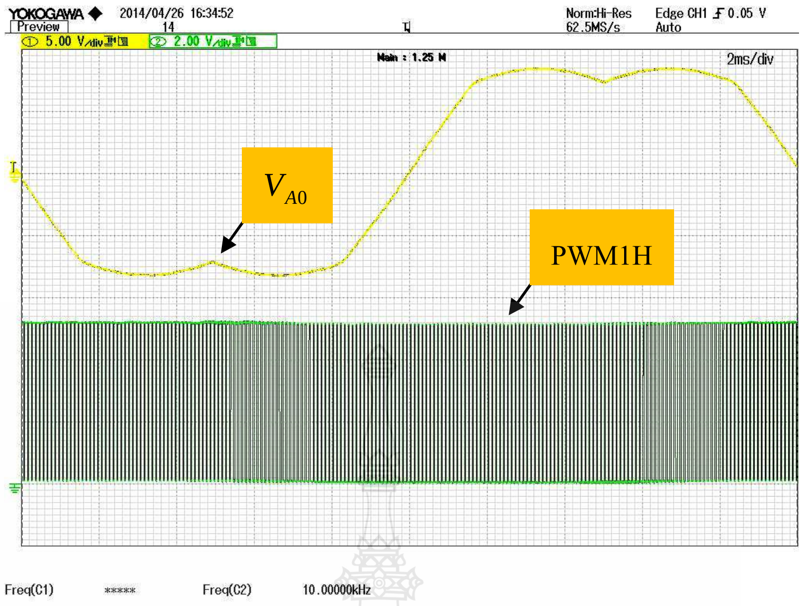


รูปที่ 4.2 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} , V_{An}

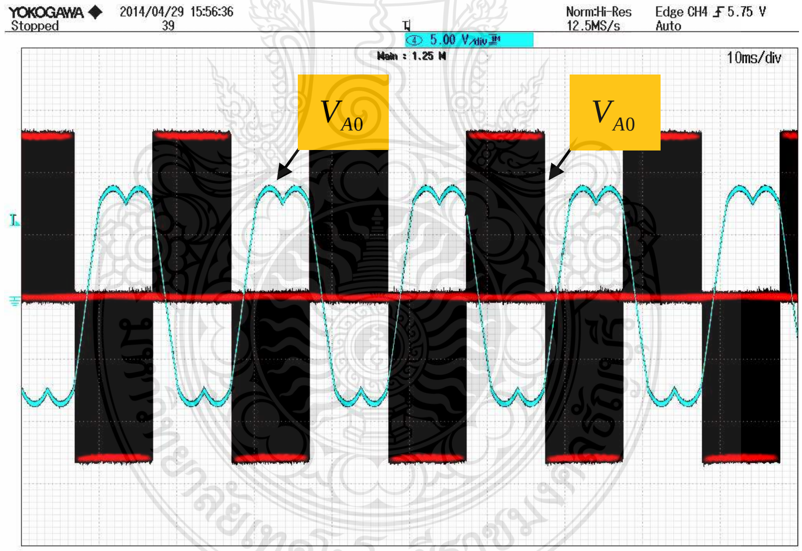


รูปที่ 4.3 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} , V_{An} และ V_{no}

จากรูปที่ 4.3 จะเป็นการแสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} , V_{An} และ V_{no} ที่ทำการเปรียบเทียบที่ได้จากแบบจำลองการหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน จากระบบควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเบอร์ TMS320F240

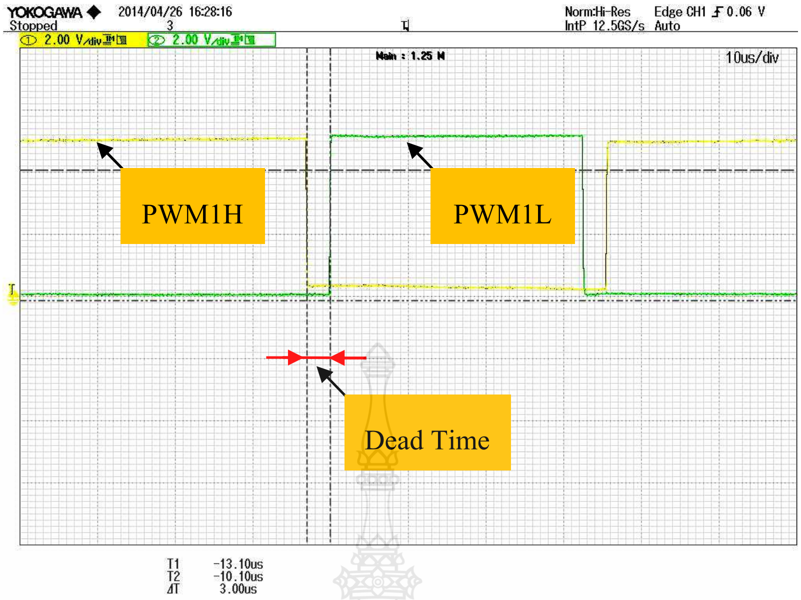


รูปที่ 4.4 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} และสัญญาณขับนำสวิตซ์ PWM1H

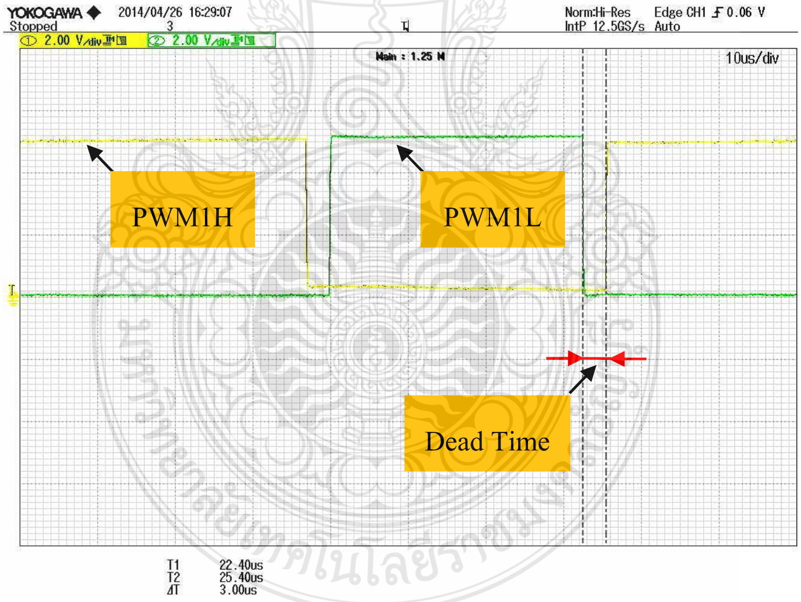


รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} และแรงดัน V_{AB}

จากรูปที่ 4.4 จะเป็นรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ เทียบกับสัญญาณขับนำสวิตซ์ S1 ที่ความถี่สวิตซ์ 10 กิโลเฮิรตซ์ และในรูปที่ 4.5 นั้นจะเป็นการเปรียบเทียบรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิงเฟส V_{A0} และแรงดันเฟส V_{AB}

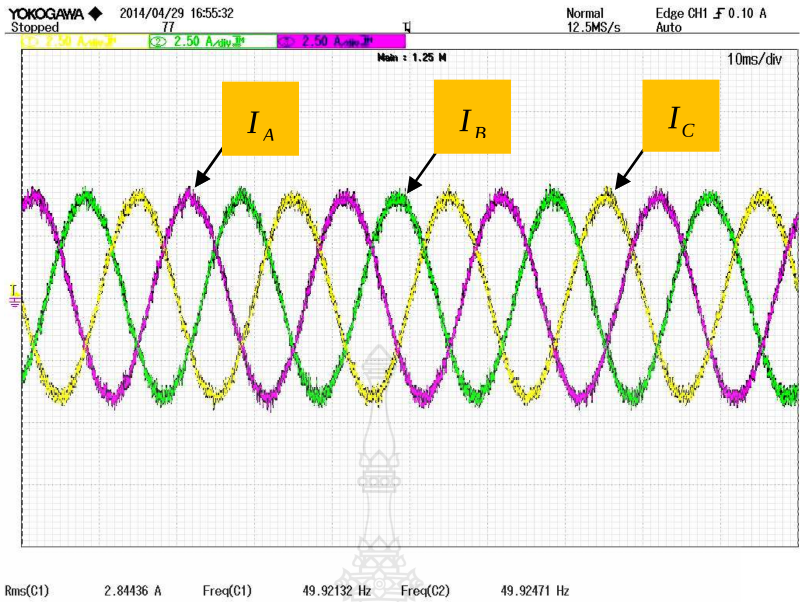


รูปที่ 4.6 รูปเวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหน้าขนาด 3 ไมโครวินาที

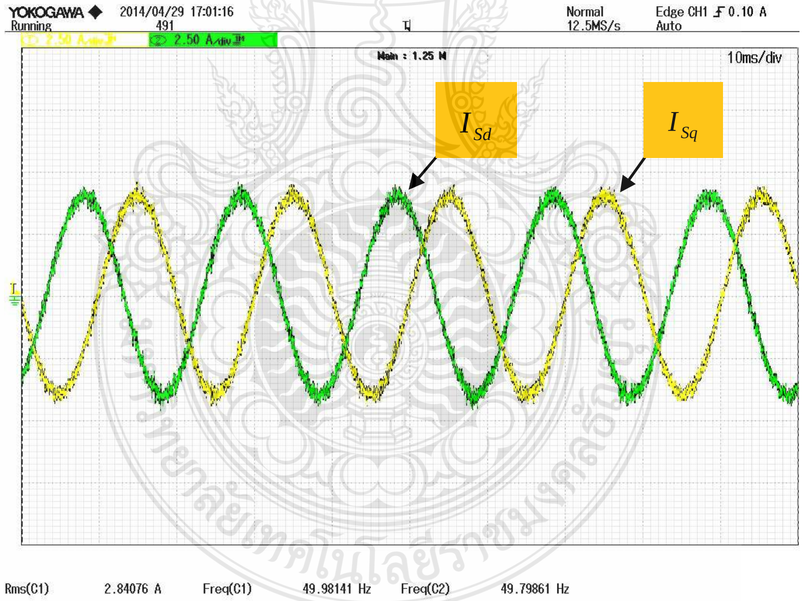


รูปที่ 4.7 รูปเวลาวิกฤต (Dead Time) ด้านหลังขนาด 3 ไมโครวินาที

ในรูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นการวัดค่าเวลาวิกฤต (Dead Time) เนื่องจากการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวนั้น สวิตช์จะต้อง ON และ OFF สนิท ฉะนั้นจะเกิดค่าสูญเสียในการสวิตช์ ดังนั้นจะต้องมีช่วงเวลาที่เผื่อไว้ให้สวิตช์ ON และ OFF สนิท เรียกช่วงเวลานี้ว่า Dead Time

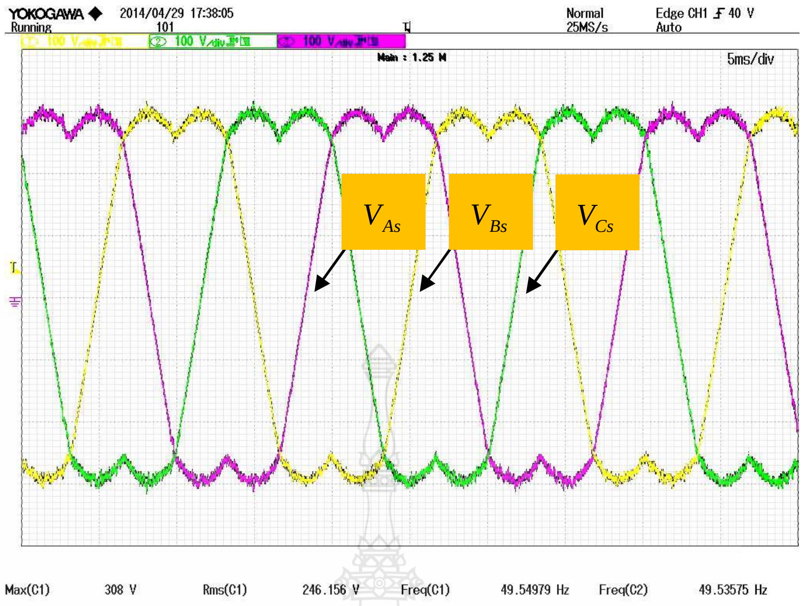


รูปที่ 4.8 รูปสัญญาณกระแสเฟสของมอเตอร์

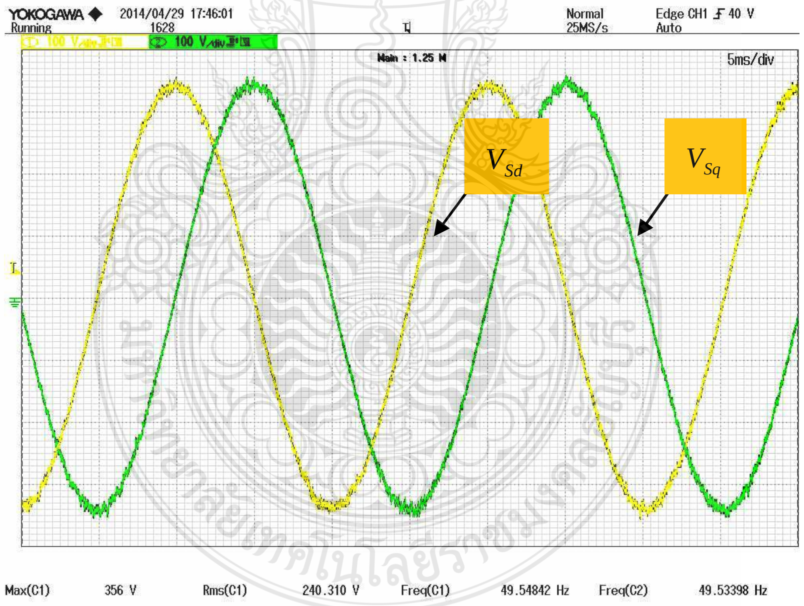


รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณของกระแส I_{sd} และ I_{sq} ของมอเตอร์

จากรูป 4.8 แสดงสัญญาณกระแสเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นนั้นจะได้กระแส 2.84 แอมแปร์(RMS) ความถี่ 50 เฮิรตซ์ จากนั้นรูปที่ 4.9 เป็นการแสดงรูปสัญญาณของกระแสจากระบบที่มีการแปลงให้อยู่ในรูป I_{sd} และ I_{sq} ในกรอบอ้างอิงที่สเตเตอร์

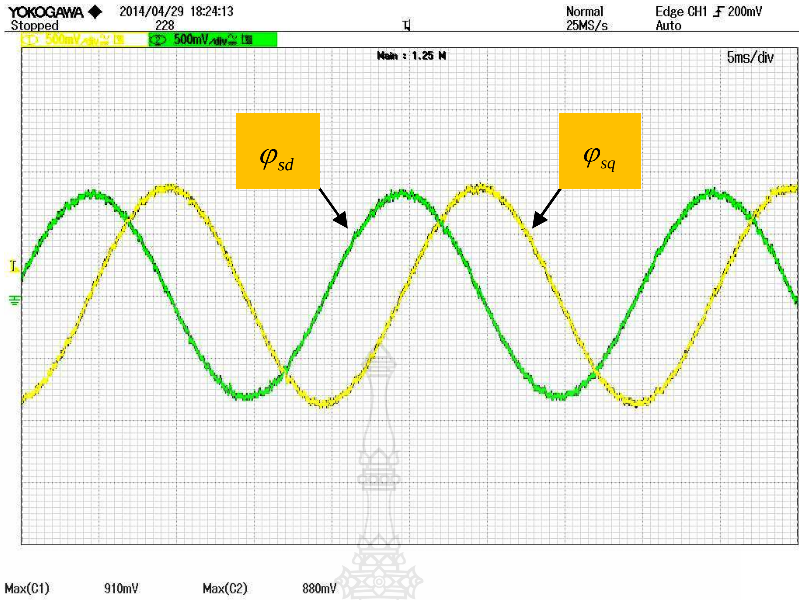


รูปที่ 4.10 รูปสัญญาณแรงดันของมอเตอร์

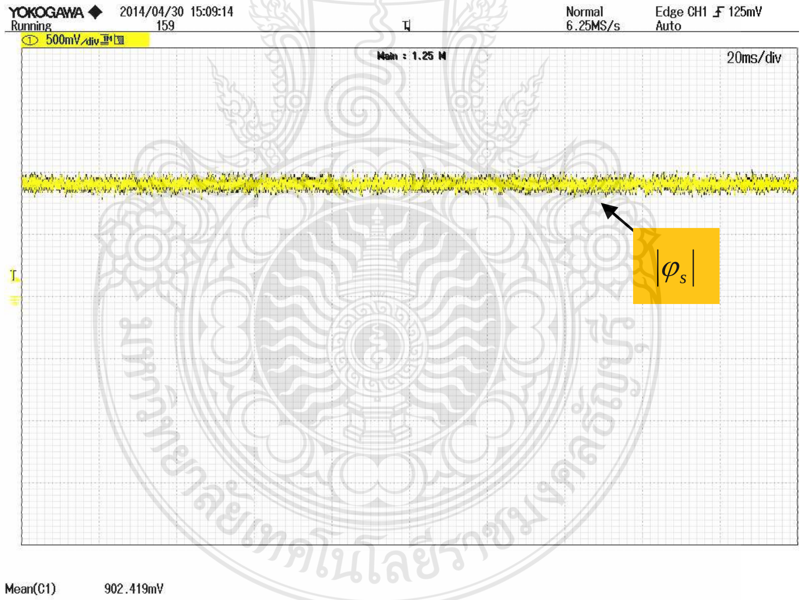


รูปที่ 4.11 รูปสัญญาณแรงดัน V_{sd} และ V_{sq} ของมอเตอร์

จากรูปที่ 4.10 แสดงรูปสัญญาณแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นที่แรงดัน 246 โวลต์(RMS) หลังจากนั้นระบบควบคุมจะทำการแปลงจากระบบสามเฟสให้มาอยู่ในระบบสองเฟสจะได้เป็นรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน V_{Sd} และ V_{Sq} ดังแสดงในรูปที่ 4.11

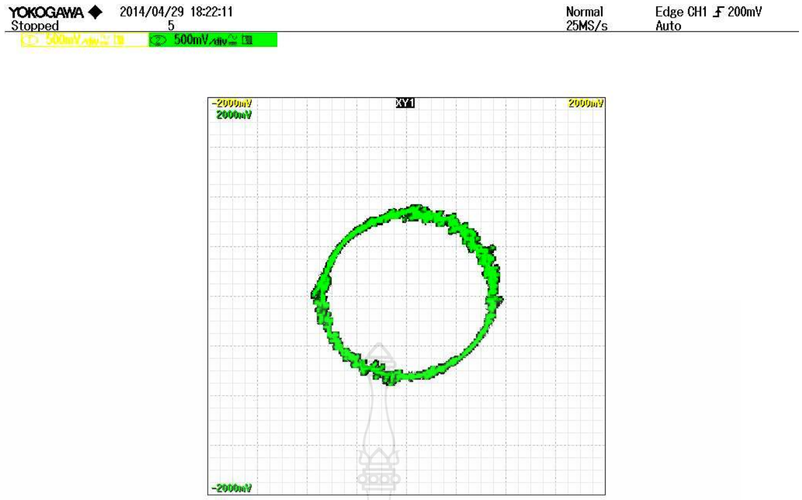


รูปที่ 4.12 รูปสัญญาณเส้นแรงแม่เหล็ก φ_{sd} และ φ_{sq} ของมอเตอร์



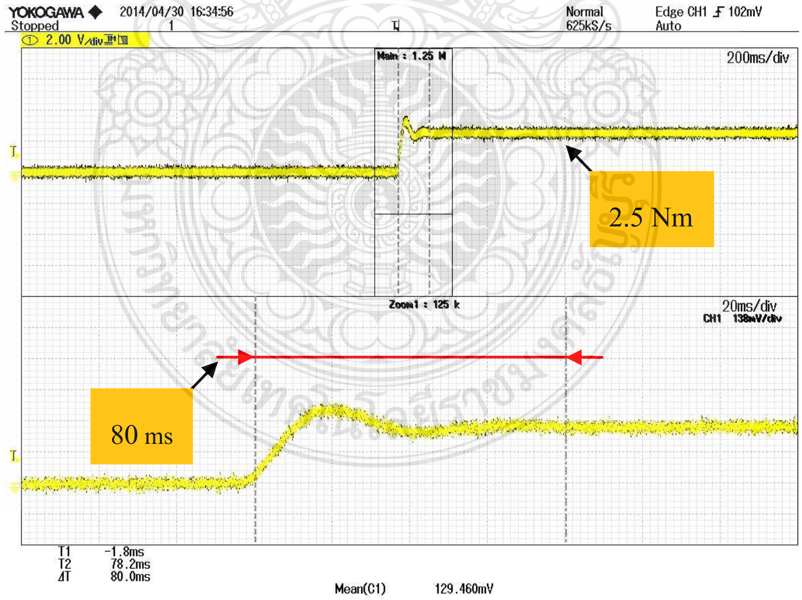
รูปที่ 4.13 รูปสัญญาณขนาดของเส้นแรงแม่เหล็ก

จากรูปที่ 4.12 เป็นการแสดงรูปสัญญาณเส้นแรงแม่เหล็ก φ_{sd} และ φ_{sq} ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นที่ได้จากการคำนวณเส้นแรงแม่เหล็กของระบบควบคุมและรูปที่ 4.13 เป็นการแสดงรูปสัญญาณขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ระบบคำนวณได้เท่ากับ 0.9 เวเบอร์

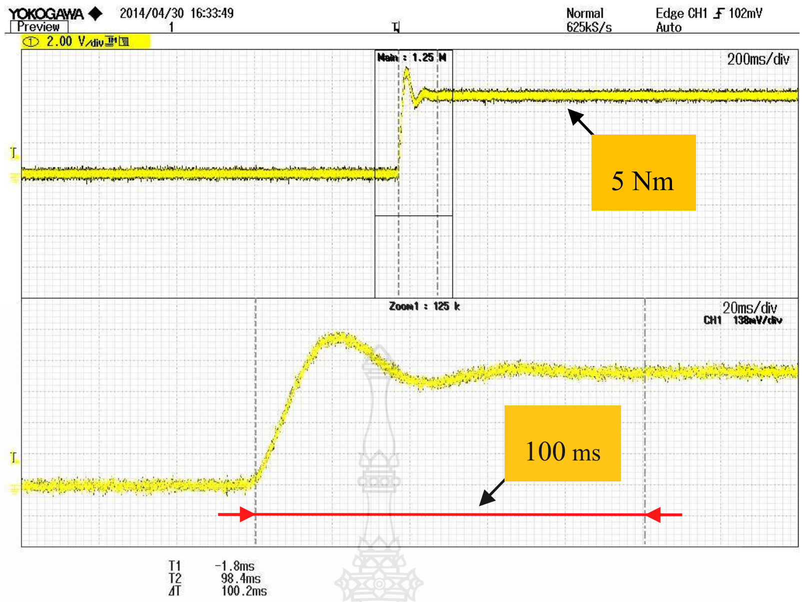


รูปที่ 4.14 ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก

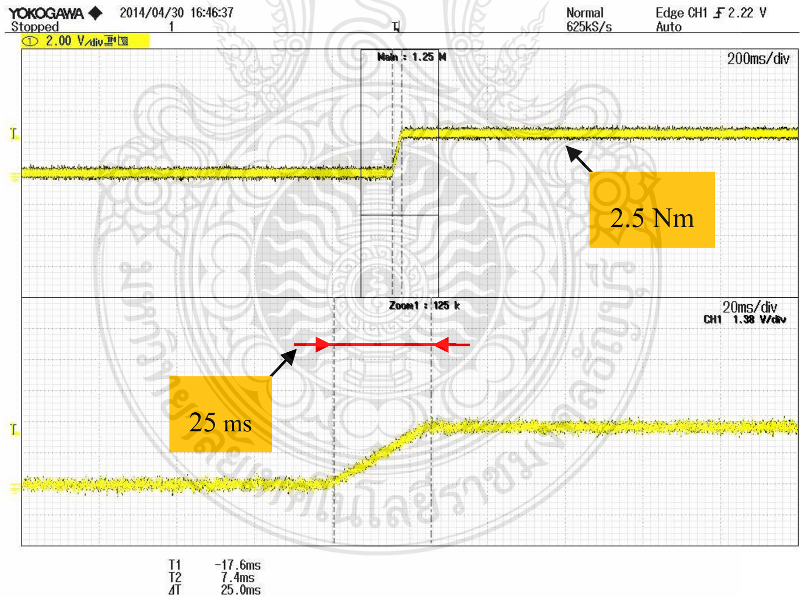
จากรูปที่ 4.14 จะเป็นการแสดงสัญญาณเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กหมุนที่ตรวจจับและประมาณค่าจากมอเตอร์ด้วยระบบควบคุม ส่วนรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะเป็นการแสดงสัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 2.5 Nm และ 5 Nm ของระบบควบคุม วิธีอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่



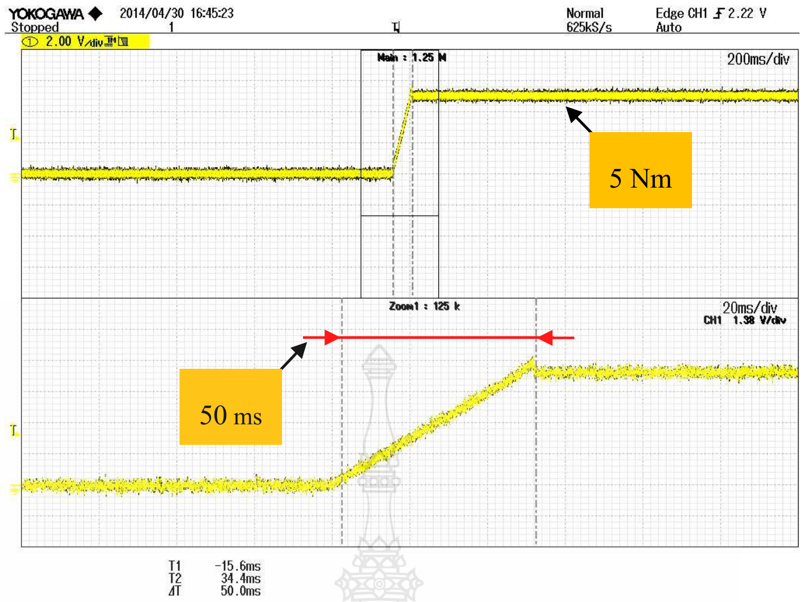
รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 2.5 Nm ระบบควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่



รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 5 Nm ระบบควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่



รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 2.5 Nm ระบบที่นำเสนอ



รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 5 Nm ระบบที่นำเสนอ

ส่วนในรูปที่ 4.17 และ 4.18 จะเป็นการแสดงสัญญาณแรงบิดเมื่อให้ค่าแรงบิดคำสั่งที่ 2.5 Nm และ 5 Nm ของระบบควบคุมที่นำเสนอ

4.2 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในการควบคุมเส้นแรงแม่เหล็กและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น ซึ่งให้ผลที่คล้ายคลึงกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของรูปแบบสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ และสามารถควบคุมแรงบิดได้ ส่วนผลการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นที่สร้างขึ้นนี้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นได้ ชุดควบคุมสามารถจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นและสร้างสัญญาณแบบสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น ที่ความถี่สวิตซ์ 10 กิโลเฮิรตซ์ และยังแสดงให้เห็นถึงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นที่สามารถตอบสนองต่อแรงบิดได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ ทั้งนี้ในการทดสอบเชิงปฏิบัติขณะค่าแรงบิดคำสั่งที่ 2.5 Nm มอเตอร์สามารถให้ผลตอบสนองแรงบิดได้ ภายในเวลา 25 มิลลิวินาที และขณะค่าแรงบิดคำสั่งที่ 5 Nm มอเตอร์สามารถให้ผลตอบสนองแรงบิดได้ ภายในเวลา 50 มิลลิวินาที จากสภาวะเริ่มต้นจนถึงสภาวะคงตัวของแรงบิด

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น และระบบควบคุมมอเตอร์ โดยการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ในการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นในแบบจำลองรถไฟฟ้า โดยใช้ค่าความผิดพร่องของแรงบิดและความผิดพร่องของเส้นแรงแม่เหล็กที่คำนวณได้เชิงปฏิบัติมาเป็นคำสั่งในการสร้างแรงดันและความถี่อ้างอิงในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น

5.1 สรุปผลการทดสอบ

กระบวนการในการปฏิบัตินั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การออกแบบและการสร้างระบบควบคุม โดยในกระบวนการออกแบบนั้น นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมด้วยหลักการควบคุมแรงบิดโดยตรงสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น ด้วยการใช้กลยุทธ์ในการประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์และประมาณค่าแรงบิด ส่วนระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นที่นำเสนอนี้ ได้ใช้ทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นชนิดสเตเตอร์เดี่ยว ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ ขนาดพิกัดแรงดัน 250 โวลท์ และมีจำนวนขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้ว

ผลการทดสอบแบบจำลองการทำงาน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการทดสอบจริงโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเป็นตัวควบคุม และคำนวณค่าต่าง ๆ รวมทั้งส่งสัญญาณไปขับสวิตซ์อินเวอร์เตอร์ โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแบบ 3 เฟส ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และใช้ไอจีบีที (IGBT) เป็นสวิตช์ของวงจร ออกแบบให้สวิตช์ทำงานที่ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบควบคุมใช้เทคนิคการสร้างสัญญาณแบบสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเบอร์ TMS320F240 ในการสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งประยุกต์ใช้การ์ดอินเตอร์เฟสสำหรับควบคุมแบบเวลาจริง DSPACE รุ่น DS1104 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบควบคุม แสดงให้เห็นว่าแนวคิดที่นำเสนอถูกต้อง และระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับดังกล่าวให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี และสามารถควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ชุดต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้นที่ทำการทดสอบนั้น ควรออกแบบให้มีลักษณะที่มีความยาวพอสมควรเพื่อง่ายต่อการเก็บผลและทดสอบ เนื่องจากระยะทางของรางวิ่งนั้นมีระยะที่จำกัด การทดลองจึงมีข้อจำกัด และการวัดสัญญาณนั้นกระทำได้ค่อนข้างยาก โดยในการทดสอบเรื่องผลการตอบสนองของความเร็วนั้นไม่ได้ดำเนินการ เนื่องจากข้อจำกัดกล่าว

5.2.2 ควรมีตัวตรวจจับความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบเชิงเส้น เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของความเร็วและค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วร่วมกับค่าของแรงบิดที่ระบบคำนวณได้

5.2.3 ในระบบควบคุมที่ทำการทดสอบนั้นยังมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก เพื่อลดสัญญาณรบกวน ควรออกแบบวงจรควบคุมให้มีลักษณะการรับสัญญาณรบกวนได้น้อยคือการลดการเชื่อมโยงสายที่ยาวและมากจนเกินไป หรือวงจรภาคอินเวอร์เตอร์และวงจรขับนำสวิตซ์ควรเป็นโมดูลหรือจัดวางอุปกรณ์ให้อยู่ใกล้กันมากที่สุด

รายการอ้างอิง

[1] Trzynadlowski, A.M., 2001, **Control of Induction Motors**, Academic Press, USA, pp. 93-182.

[2] Vas, P., 1998, **Sensorless Vector and Direct Torque Control**, Oxford Science Publications, pp. 470-550.

[3] Takahashi, I. and Noguchi, T., 1986, "**A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor**", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. IA-22, No. 5, pp. 495-502.

[4] I Lüdtke and Dr M G Jayne, 1995, "**Direct Torque Control of Induction Motors**", IEE Colloquium on, pp. 6/1-6/6.

[5] Emre Ozkop, A. Sefa Akpinar and Halil I. Okumus, 2008, "**Direct Torque Control for Linear Induction Motor**", IEEE International Middle-East Power System Conference, pp. 373-376.

[6] Lixin Tang and M. F. Rahman, 2001, "**A New Direct Torque Control Strategy for Flux and Torque Ripple Reduction for Induction Motor Drive by Using Space Vector Modulation**", IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol. 3, pp. 1440-1445.

[7] Chapis, Y.A., Roye, D. and Davoine, J., 1995, "**Principles and Implementation of Direct Torque Control by Stator Flux Orientation of an Induction Motor**", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '95. Conference Proceedings 1995, 10th Annual 1, Vol. 1, pp. 185-191.

[8] Buja, Casadei, and Serra, G., 1997, "**Direct Torque Control of Induction Motor Drives**", Industrial Electronics ISIE '97 Proceedings of the IEEE International Symposium on Volume: 1, pp. TU2 -TU8.

[9] Cristian Lascu, Ion Boldea and Frede Blaabjerg, 2000, "**A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive**", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 36, No. 1, pp. 122-130.

[10] Lai and Chen, 2001, "**A New Approach to Direct Torque Control of Induction Motor Drives for Constant Inverter Switching Frequency and Torque Ripple Reduction**", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 16, No 3, pp. 220-227.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

[11] มงคล ทองสงคราม. 2549. **เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ**. สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พริ้นติ้ง, กรุงเทพฯ, หน้า 154-160.

[12] ปฏิพัทธ์ ทวนทอง, พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล และ สมชาย ฉัตรรัตนา, 2545, "**หลักการและการทำให้เกิดผลของการควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบควบคุมแรงบิดโดยตรง**", วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 17-27.

[13] ปฏิพัทธ์ ทวนทอง, พนาฤทธิ์ เศรษฐกุลและสมชาย ฉัตรรัตนา, 2544, "**การควบคุมทอร์กโดยตรงของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร**", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24), หน้า 357-362.

[14] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2550. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. สำนักพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พริ้นติ้ง, กรุงเทพฯ, หน้า 423-480.

[15] Wanchai Subsingha. 2008. **Power Electronics.** Academic Book, Faculty of Engineering, RMUTT, Thailand, 2008.

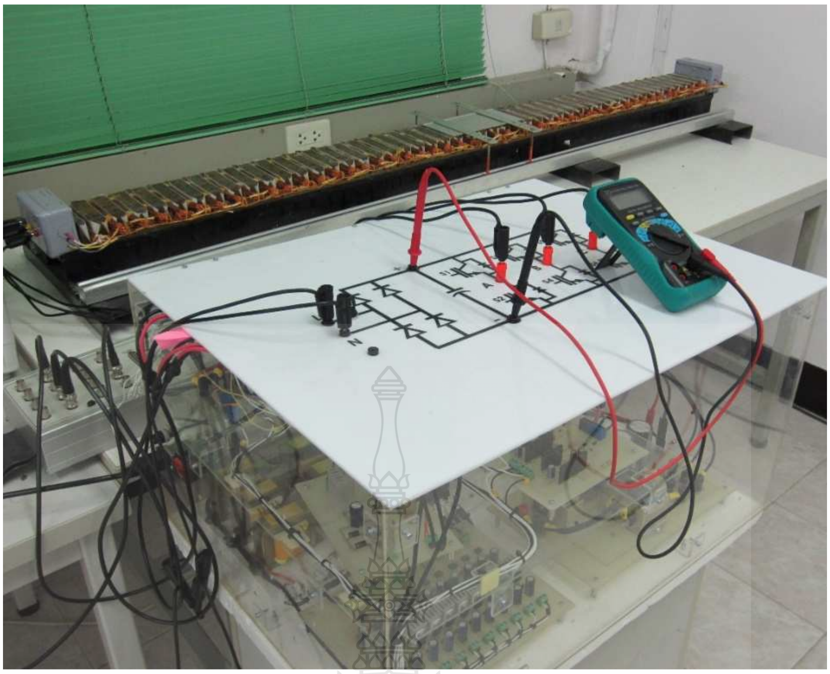
[16] ณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์, 2551, "**การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบควบคุมแรงบิดโดยตรงบนพื้นฐานอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่**", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 565-568.

[17] ธีระศักดิ์ เสภากล่อม, อุดมศักดิ์ ยั่งยืน และ วีระพล โมนยะกุล, 2545, "**การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการควบคุมแรงดันและความถี่แบบใหม่**", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 (EECON-25), หน้า 127-131.

[18] สมพงษ์ ศิลป์สมบูรณ์. **คู่มือการติดตั้งและใช้งานการ์ด dSPACE (DS1104).** บริษัท เวิลด์วาย เทรดดิ้ง แอนด์ ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นเครื่องต้นแบบ

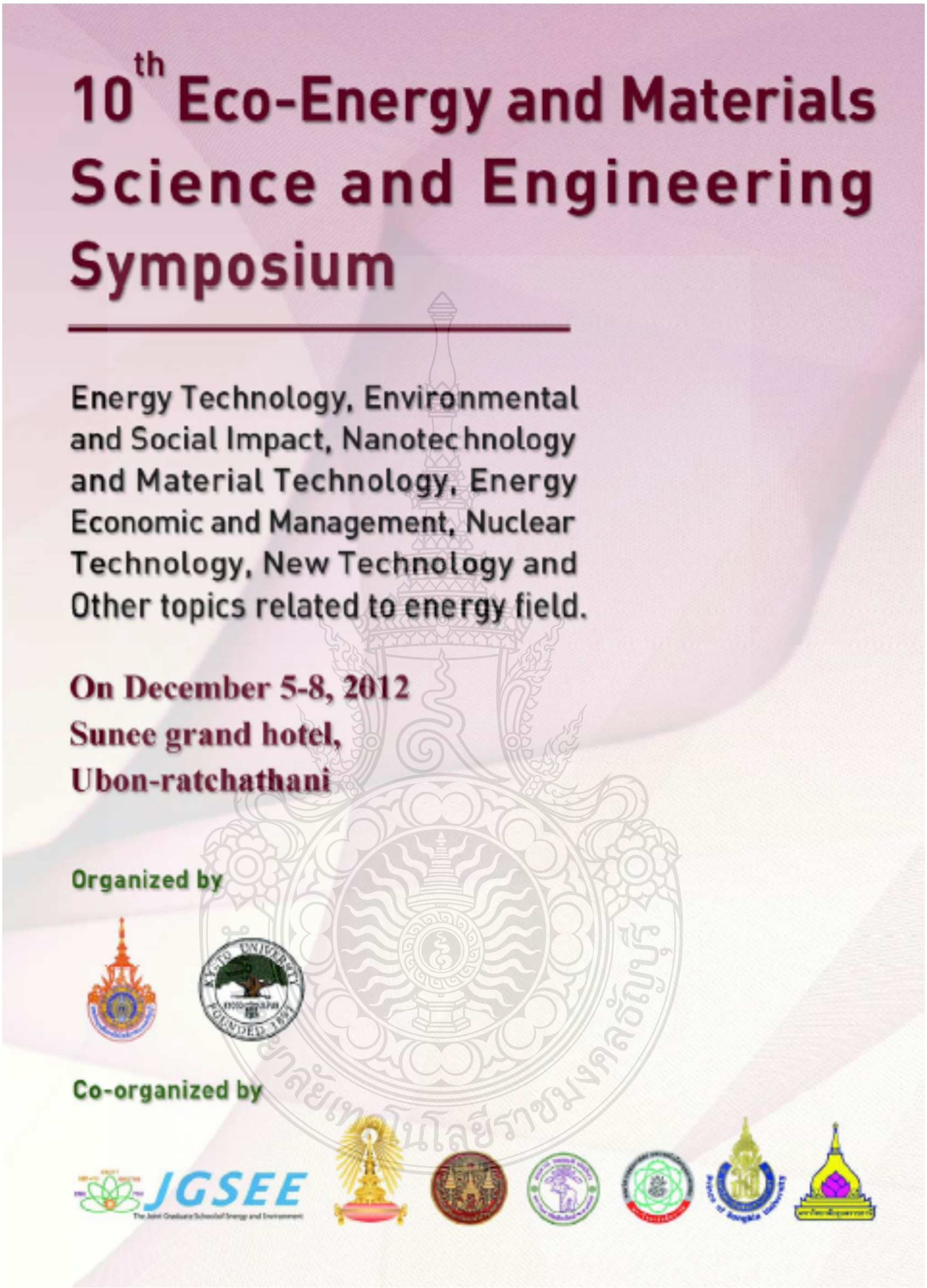


รูปที่ ก.1 ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นเครื่องต้นแบบ

รูปที่ ก.2 ต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นชนิดสเตเตอร์เดี่ยว

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่


10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium
Energy Technology, Environmental and Social Impact, Nanotechnology and Material Technology, Energy Economic and Management, Nuclear Technology, New Technology and Other topics related to energy field.
On December 5-8, 2012
Sunee grand hotel,
Ubon-ratchathani
Organized by
Co-organized by
JGSEE
The Joint Graduate School of Energy and Environment

International Scientific Advisory Committee:

General Chair:	
Assoc.Prof.Dr. Namyoot SONGTHANAPITAK	RMUTT, Thailand
General Co-Chair:	
Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA	Kyoto Uni., Japan
Asst. Prof. Dr. Panpetch CHININTORN	RMUTT, Thailand
Organizing Chair:	
Asst. Prof. Dr. Sommai PIVSA-ART	RMUTT, Thailand
Prof. Dr. Takeshi YAO	Kyoto Uni., Japan
Organizing Co-Chair:	
Prof. Dr. Hideaki OHGAKI	Kyoto Uni., Japan
International Scientific Committees:	
Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA	Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO	TU, Thailand
Prof. Dr. Shiro SAKA	Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Hitomi OHARA	Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo STADLER	FH Koeln, Germany
Prof. Dr. Young S. CHAI	Korea
Prof. Dr. Nipon TANGTHAM	KU, Thailand
Prof. Dr. Masayoshi OKUBO	Osaka Uni, Japan
Prof. Dr. Somchai WONGWISES	KMITL, Thailand
Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN	UQ, Australia
Prof. Dr. Yukio OGATA	Kyoto Uni., Japan
Prof. Dr. Yuichi ANADA	Hokkaido Info. Uni., Japan
Prof. Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP	KMUTT, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Bandit FUNGTAMMASAN	KMUTT, Thailand
Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY	IIT-Madras, India
Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN	IUPUI, USA
Assoc. Prof. Dr. Per B ZETTERLUND	Australia
Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES	KMITL, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI	Japan
Assoc. Prof. Dr. Thawatch KERDCHEUN	RMUTI, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT	SWU, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA	Nakaoga Uni., Japan
Assoc.Prof.Dr. Kawee SRIKULKIT	CU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPITAK	KU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Supakit SUTTIRUENGWONG	SU, Thailand
Asst. Prof. Dr. Vallop PHUPA	RMUTP, Thailand
Asst. Prof. Dr. Pramook UNAHALEKHAKA	RMUTSB, Thailand

Dr. Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
ASEAN Committee:	
Prof. Dr. Yoyok Wahyu Subroto	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Wega TRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
General Secretary:	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
Technical Program Chair:	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Area: Energy Technology (ET)	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
Area: Environmental and Social Impact (ES)	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
Area: Nanotechnology and Materials Science (NM)	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
Area: Energy Economic and Management (EM)	
Assoc. Prof. Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
Area: New Energy Technology (NT)	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
Area: Nuclear Technology (NU)	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

Exhibition Chair:	
Dr. Amnoiy REUNGWAREE	RMUTT, Thailand
Dr. Winai CHANPENG	RMUTT, Thailand
Local Arrangement Chair	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Dr. Natee SRISAWAT	RMUTT, Thailand
Registration and Finance Chair	
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
Dr. Supaporn THOMSORN	RMUTT, Thailand
Weeraporn PIVSA-ART	RMUTT, Thailand
Publicity Chair	
Asst. Prof. Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
Dr. Montip LASURIYONTA	RMUTT, Thailand
Somchai BIANSOONGNERN	RMUTT, Thailand
Publication Chair:	
Prof. Dr. Preecha P.YUPAPIN	KMITL, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Takashi SAGAWA	Kyoto Uni., Japan
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO	Kyoto Uni., Japan
Website and Information System Chair:	
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
Phongsuk AMPHA	RMUTT, Thailand
Deachrat JAITHAWIN	RMUTT, Thailand

CONTENT

ET13	Numerical Simulation of a Solar-biomass Hybrid Cooling System: Model Validation *Boonrit Prasartkaew*	32
ET14	Mathematic Model and Experiment of Temperature Effect on Discharge of Lead-Acid Battery for PV Systems *Pornchai Pornharuthai Boonyang Plangklang and Sompol kohsri*	33
ET15	Recycling CO_2 in Bio-gas by Green Microalgae for Lipid Production *Wassa Tongprawhan and Benjamas Cheirsilp*	34
ET16	Double-Sided Linear Induction Motor Control Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique *Aunnon Bua-sre and Wanchai Subsingha*	35
ET17	Performance Evaluation of the Desiccant Bed Solar Dryer *Wisut Chramsa-ard, Sirinuch Jindaruksa, Chatchai Sirisumpunwong, Sorawit Sonsaree*	36
ET18	Performance Evaluation of 35 kW LiBr – H_2O Solar Absorption Cooling Systemin Thailand *Nipon Ketjoy Rawipa yongphayoon and Kongrit Mansiri*	37
ET19	Study to the Voltage Stability of 22kv Pea Bus Connected by Lamtakong Wind Turbine *J.Chanasith and K. Bhumkittipich*	38
ET20	Modeling of PEM Fuel Cell with DC/DC Buck Converter by MATLAB/Simulink *P. Prommin and W. Subsingha*	39
ET21	Applicability of Pressure Retarded Osmosis Power Generation Technology in Sri Lanka *H.D.S.S.Karunarathne and S.Walpolage*	40
ET22	Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance and Emission of a Dual Producer Gas – Diesel Engine *Pisarn Sombatwong, Prachasanti Thaiyasuit and Kulachate Pianthong*	41

Double-Sided Linear Induction Motor Control Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique

Aunnon Bua-sre and Wanchai Subsingha
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110
E-mail: bua_aunnon@hotmail.com**,** wanchai.s@en.rmutt.ac.th

Abstract— *This paper presents a design and build of a double sided Linear Induction Motor (DSLIM) which is 500 W., 300 Vmax. 50 Hz. power rating. The control Technique of the averaging Space Vector Pulse Width Modulation is applied into a 3 Phase Voltage Source Inverter using a real time control interfacing board (DS1104) from dSPACE GmbH Germany and utilize by MATLAB/SIMULINK program. The experimental results show that the prototype model of DSLIM together with 3 phase voltage source Inverter are operated successfully and effectively. It can control the DSLIM correctly both in motor speed and rotational control.*

Keywords— **Double Side Linear Induction Motor, Space Vector Pulse Width Modulation.**

1. INTRODUCTION

Nowadays, the Linear Induction Motor is widely use in industrial applications. Therefore, there are many kinds of such machine in its construction together with various control schemes, which is become interesting. In this paper, a Double Side Linear Induction Motor is chosen in order to build as a prototype of a laboratory scale of locomotive model. This will be operated with a proper control scheme in order to control effectively.

Normally, Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Inverter is generally use in industrial. It has an advantage on a simply V/F control technique and a predictable harmonics contents that generated on output line voltage of the inverter. However, it also has some disadvantage on the amplitude of the rms value of the output voltage, which is only 61.25% of the input DC Voltage source.

Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) Technique is a novel method for generating PWM control signals that suitable for 3 Phase Voltage Source Inverter in order to produce smoother output torque of motor load. Furthermore, SVPWM has an advantage over the SPWM due to a 15% addition of an output rms voltage at the same DC bus voltage. In general, SVPWM has mainly two forms in generating such PWM control signals. Firstly, it called as a carrier based SVPWM model, secondly, it called as a real-time calculation model. In this paper, a carrier based SVPWM applied with 3 phase VSI to control a laboratory scale DSLIM locomotive model has been carried out.

2. THEORY AND THE COMPOSITION OF THE SYSTEM

Three Phase Voltage Source Inverter

The 3 phase Voltage Source Inverter that presented in this paper is to produce a suitable voltage and current to 3 stator coil of the DSLIM motor. The circuit of such 3 phase VSI comprise of 6 of IGBT, which acts as power switches. These power switches must be controlled by an appropriate PWM patterns from an electronic controller board, such as SVPWM control signals as mentioned above.

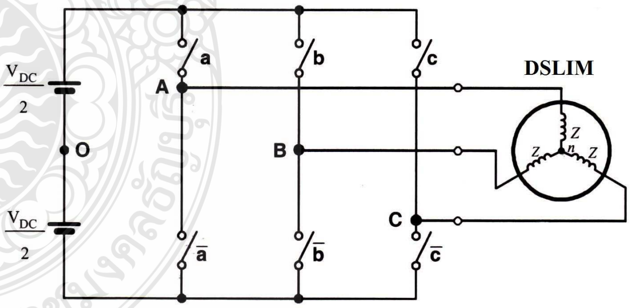


Fig.1. Circuit diagram of 3 phase VSI

As shown in Table 1, SVPWM control signals will controls the VSI in 8 switching states (V0-V7). However, only six switching states (V1-V6) can produce an output phase voltage. A B and C in such table are stand for 3 phase output voltage. The status “1” means that the upper switch on that phase is ON, and the lower switch on such phase is OFF. Contrary, status “0” means that the upper switch on that phase is OFF, and the lower switch on such phase is ON.

Table 1 Switching patterns and output phase voltage

Name	A	B	C	V_{An}	V_{Bn}	V_{Cn}
V_0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$
V_2	1	1	0	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$
V_3	0	1	0	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$
V_4	0	1	1	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_5	0	0	1	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$
V_6	1	0	1	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_7	1	1	1	0	0	0

From Table 1, the space vector of arbitrary voltage referred to the three phase voltage can be drawn as

a is an arbitrary vector that referred to electrical angle, which is $e^{j\theta}$

$$\vec{V} = \frac{2}{3}\left[v_{An} + a v_{Bn} + a^2 v_{Cn}\right] \quad (1)$$

It can be seen that there are 8 space vectors, but, there are only 6 of active vectors and there are 2 of zero vectors of output voltage. The diagram of the space vector of output voltage that produced from such VSI is shown in Figure 2.

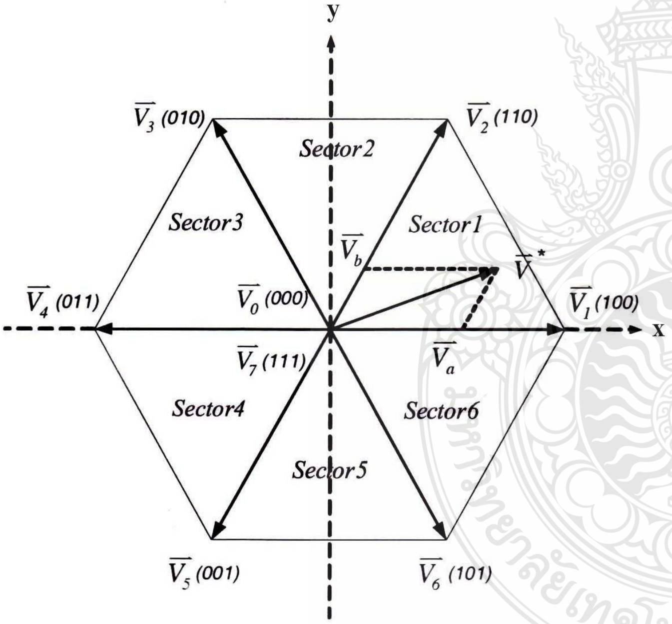


Fig 2. Space Vector diagram of the output voltage

Space Vector Modulation

Voltage reference signals v_{A0}, v_{B0} and v_{C0} for space vector modulation can be calculated from a summation of Zero Sequence Voltage v_{n0} and phase voltage v_{An}, v_{Bn} and v_{Cn} . The detailed are express as follow:

$$v_{An} = A\cos\theta \quad (2)$$

$$v_{Bn} = A\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

$$v_{Cn} = A\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4)$$

Zero Sequence Voltage v_{n0} is calculated from:

$$v_{n0} = \frac{1}{3}\left(v_{A0} + v_{B0} + v_{C0}\right) \quad (5)$$

$$v_{n0} = \frac{1}{2} median\left(v_{An}, v_{Bn}, v_{Cn}\right) \quad (6)$$

Voltage reference signals v_{A0}, v_{B0} and v_{C0} are calculated from:

$$v_{A0} = v_{An} + v_{n0} \quad (7)$$

$$v_{B0} = v_{Bn} + v_{n0} \quad (8)$$

$$v_{C0} = v_{Cn} + v_{n0} \quad (9)$$

Inverter gate driving signal are obtained by Comparing v_{An}, v_{Bn} and v_{Cn} with saw tooth voltage signal.

Linear Induction Motor Controller

The dSPACE control board has built in digital signal process (DSP) for computing numerical program. The programs are write base on MATLAB / SIMULINK platform Instead of programming in complicated languages. Furthermore, it can instantaneous changed the value of the control system variable in Real Time via Control Desk. It not required stopping the operation of the device or circuit.

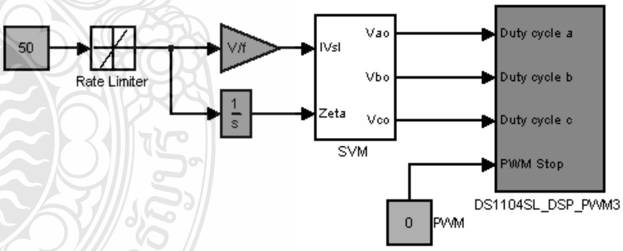


Fig.3. Diagram of System Controlling Program

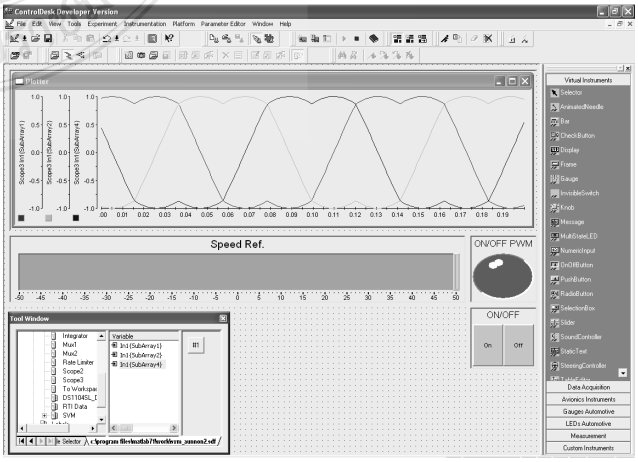


Fig.4. Control Desk programming Panel

Fig 5. The components of propose prototype system

3. EXPERIMENTAL RESULTS

This experimental is applying for double sided Linear Induction Motor (DSLIM) which is 500 W., 300 V_{max}. 50 Hz.

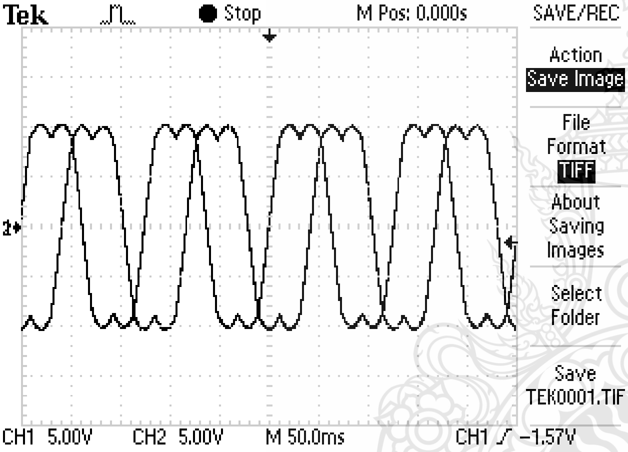


Fig.6. Phase reference voltage Waveforms V_{A0} and V_{B0}

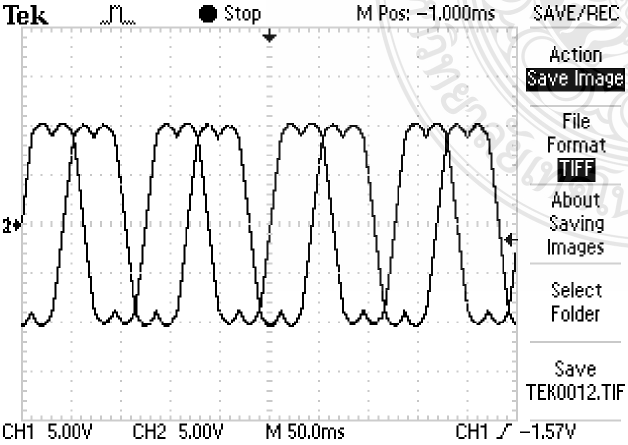


Fig 7. Phase reference voltage Waveforms V_{B0} and V_{C0}

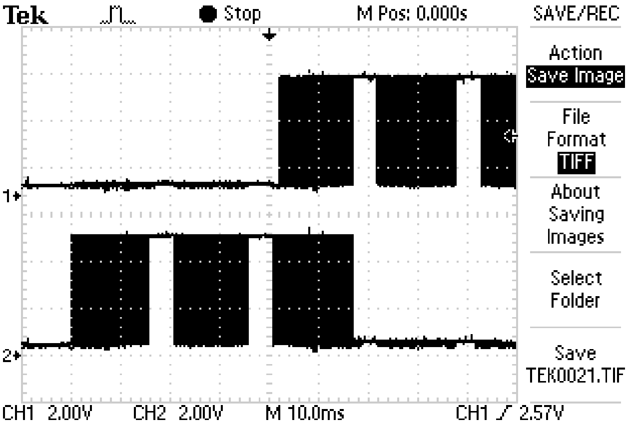


Fig 8. Gate driving signal for Inverter

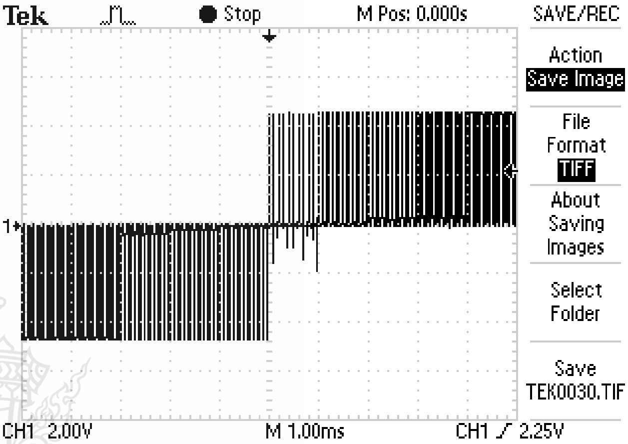


Fig.9. Output Voltage Waveforms of the Inverter

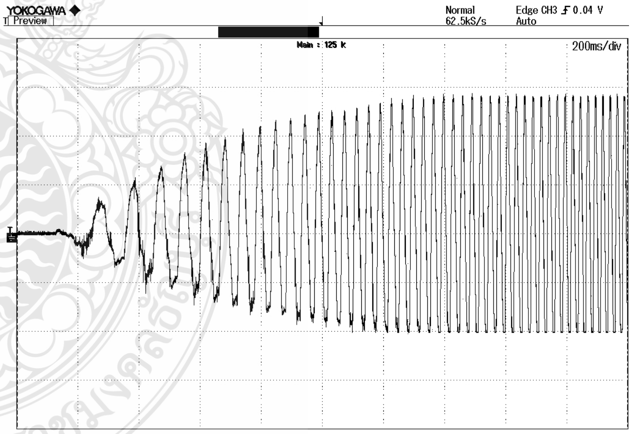


Fig.10. Stator current Waveform of DSLIM

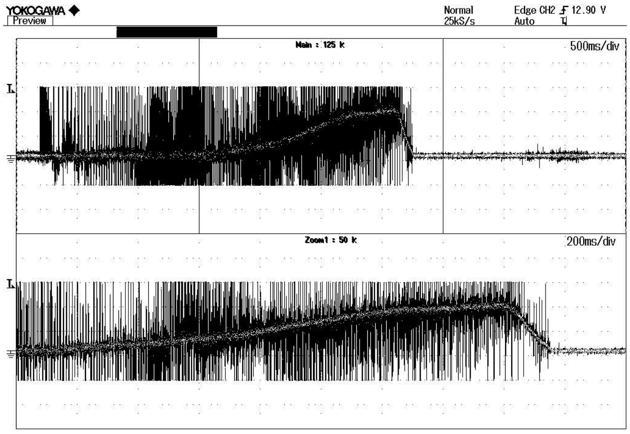


Fig.11. Rotor Speed of DSLIM

4. CONCLUSION

This paper presents a double sided Linear Induction Motor control. The control Technique in this paper is using an averaging Space Vector Pulse Width Modulation. The experimental results show that the prototype system using the dSPACE DS1104 along with MATLAB / SIMULINK, and Control Desk program will allows to generating SVPWM signals by varying the frequency and amplitude of the reference voltage. The SVPWM signal is applied to three phase inverter for controlling the movement direction of DSLIM.

REFERENCES

[1] Amir Zare Bazghaleh, Mohammad Reza Naghashan and Mohammad Reza Meshkatoddini, 2010. Optimum Design of Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Motor Performance. In *Proceedings of the IEEE Transactions on Magnetics* , Vol.46, No.11, pp. 3939-3947.

[2] J.R. Wells, P.L. Chapman and P.T. Krein, 2002. Development and Application of a Linear Induction Machine for Instructional Laboratory Use, In *Proceedings of the IEEE,* pp. 479-482.

[3] J.R. Wells, P.L. Chapman P.T. Krein and T. Walls, 2001. Linear Induction Machine Design for Instructional Laboratory Development, In *Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference,* pp. 319-322.

[4] Ned Mohan, 2001. Electric drive an integrative approach. Twin Cities Minnesota.

[5] R. Ancuti, I. Boldea and G.-D. Andreescu, 2010. Sensorless V/f control of high-speed surface permanent magnet synchronous motor drives with two novel stabilising loops for fast dynamics and robustness. *Proceedings of the Institution of Engineers and Technology Electric Power Application,* Vol.4, Iss.3, pp. 149-157.

[6] R. Linga Swamy and P. Satish Kumar, 2008. Speed Control of Space Vector Modulated Inverter Driven Induction Motor. In *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and computer Scientists,* Hong Kong, 19-21 March.

[7] Wanchai Subsingha, 2008. Power Electronics, *Academic Book Faculcy of Engineering RMUTT,* Thailand.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายอรรนนท์ บัวศรี
วัน เดือน ปีเกิด	14 พฤศจิกายน 2526
ที่อยู่	25/14 ถนนราษฎร์อำนวย ตำบลในเวียง อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน 55000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ปีการศึกษา 2548
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2549 – ปัจจุบัน เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน
เบอร์โทรศัพท์	088-258-3390
อีเมล์	Bua_aunnon@hotmail.com