

การควบคุมแวกเตอร์แบบแยกอิสระสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส



นายสมโรจน์ เรืองรุ่งเรือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0456-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DECOUPLING VECTOR CONTROL FOR A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR**



**Mr. Somrote Remngrungruang**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering**

**Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University**


**Academic Year 2001**

**ISBN 974-03-0456-7**

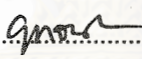
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การควบคุมแวกเตอร์แบบแยกอิสระสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส  
โดย                              นายสมโรจน์ เรืองรุ่งเรือง  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา              อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจ็ดกุล โสภวานิชย์)

สมโรจน์ เรืองรุ่งเรือง : การควบคุมเวกเตอร์แบบแยกอิสระสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส  
 ( DECOUPLING VECTOR CONTROL FOR A SINGLE-PHASE INCUCTION MOTOR )  
 อาจารย์ที่ปรึกษา: อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 58 หน้า. ISBN 974-03-0456-7

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกอิสระสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ด้วยวิธีการควบคุมแรงดันทั้งในขดลวดหลักและขดลวดช่วยของมอเตอร์ การควบคุมแบบแยกอิสระใช้แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ในการสร้างแรงดันคำสั่งที่เหมาะสมสอดคล้องกับแรงบิดและโรเตอร์ฟลักซ์คำสั่ง เพื่อให้ได้ความเร็วรอบมอเตอร์ตามต้องการ ผลการจำลองระบบในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Matlab และผลการทดลองจริงยืนยันถึงประสิทธิผลของวิธีควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....	วิศวกรรมไฟฟ้า.....	ลายมือชื่อนิสิต.....	สมโรจน์ เรืองรุ่งเรือง
สาขาวิชา.....	วิศวกรรมไฟฟ้า.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....	S. Jom
ปีการศึกษา.....	2544.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....	

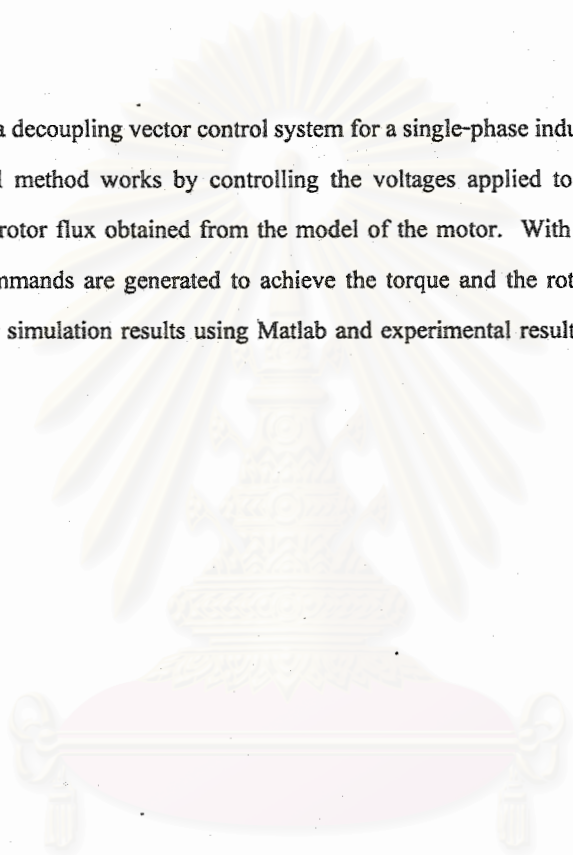
## 4070560721: MAJOR POWER ELECTRONICS

KEYWORD: SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR / DECOUPLING CONTROL / VECTOR CONTROL

SOMROTE RERNGRUNGRUANG : DECOUPLING VECTOR CONTROL FOR A SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR. THESIS ADVISOR : DR. SOMBOON SANGWONGWANICH

58 pp. ISBN 974-03-0456-7

In this thesis, a decoupling vector control system for a single-phase induction motor drive is proposed. The decoupling control method works by controlling the voltages applied to both the main and auxiliary windings based on the rotor flux obtained from the model of the motor. With the proposed control method, appropriate voltage commands are generated to achieve the torque and the rotor flux required by the speed control loop. Computer simulation results using Matlab and experimental results confirm the effectiveness of the developed method.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature นิโรจน์ เรืองเรือง  
 Field of study ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature S/om  
 Academic year 2001 Co-advisor's signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา รวมถึง บริษัท A.P.Y Engineering CO.,LTD. ที่ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลและอุปกรณ์ ของขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ตลอดจนเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้วิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้และที่สำคัญยิ่งข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญเรื่อง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
2 ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบเวกเตอร์.....	5
3 โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบและการสร้างแรงดัน PWM .....	20
4 ผลการทดสอบระบบ .....	31
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	48
รายการอ้างอิง .....	49
ภาคผนวก .....	50
ประวัติผู้เขียน .....	58

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการต่อตัวเก็บประจุเพื่อช่วยสร้างสนามแม่เหล็กหมุน.....	2
1.2 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ .....	3
1.3 ภาพรวมของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดัน.....	3
2.1 เวกเตอร์โรเตอร์ฟลักซ์ และเวกเตอร์กระแสเดเตอร์ .....	7
2.2 บล็อกการควบคุมแบบแยกอิสระ.....	13
2.3 ผลการจำลองการทำงานขณะเร่งความเร็ว 500 rpm -> 1500 rpm .....	14
2.5 ผลการจำลองการทำงานขณะลดความเร็ว 1500 rpm -> 500 rpm .....	16
2.6 ผลการจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็ว -1500 rpm ->1500 rpm .....	18
3.1 โครงสร้างโดยรวมของฮาร์ดแวร์ของระบบ .....	20
3.2 ส่วนตรวจจับแรงดันบัลไฟตรง .....	22
3.3 ส่วนตรวจจับความเร็วรอบโรเตอร์ .....	22
3.4 ไคอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล .....	25
3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับสร้างแรงดัน .....	25
3.6 การหาค่าสูงสุดและต่ำสุด เปรียบเทียบระหว่าง $v_{sd}$ , $v_{sq}$ และ 0 .....	26
3.7 การใช้ค่า $T_n$ , $T_v$ , $T_w$ ในการเปรียบเทียบกับตัวนับเวลา .....	28
3.8 แรงดันที่ต้องการสร้างในแต่ละเฟสจากการใช้เทคนิคการบวกแรงดันศูนย์ .....	30
4.1 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm .....	31
4.2 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm .....	32
4.3 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 1500 rpm .....	32
4.4 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 1000 rpm .....	33
4.5 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1000 rpm .....	33
4.6 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 1000 rpm .....	34
4.7 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 500 rpm .....	34
4.8 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 500 rpm .....	35
4.9 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 500 rpm .....	35



## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 200 rpm .....	36
4.11 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 200 rpm .....	36
4.12 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 200 rpm .....	37
4.13 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 100 rpm .....	37
4.14 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 100 rpm .....	38
4.15 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 200 rpm .....	38
4.16 ความเร็วและกระแสของขดลวดหลักขณะเร่ง ความเร็ว 500 rpm ->1500 rpm.....	39
4.17 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักขณะเร่งความเร็ว 500 rpm->1500 rpm.....	40
4.18 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยขณะเร่งความเร็ว 500 rpm->1500 rpm.....	40
4.19 ความเร็วและกระแสของขดลวดหลักขณะลด ความเร็ว 1500 rpm->500 rpm .....	41
4.20 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักขณะลดความเร็ว 1500 rpm->500rpm .....	42
4.21 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยขณะลดความเร็ว 500 rpm->1500.....	42
4.22 ความเร็วและกระแสขณะความเร็ว -1000rpm->1000rpm .....	43
4.23 กระแสจริงและกระแสคำสั่งของขดลวดหลักขณะเปลี่ยนความเร็ว -1000->1000rpm .....	44
4.24 กระแสจริงและกระแสคำสั่งของขดลวดช่วยขณะเปลี่ยนความเร็ว -1000->1000rpm .....	44
4.25 ความเร็วและกระแสขดลวดหลักขณะมีการป้อน โหลดพิกัดแบบขั้น .....	45
4.26 ความเร็วและกระแสขดลวดช่วยขณะมีการป้อน โหลดพิกัดแบบขั้น .....	46
4.27 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักขณะมีการป้อน โหลดพิกัดแบบขั้น.....	46
4.28 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยขณะมีการป้อน โหลดพิกัดแบบขั้น .....	47
ก.1 วงจรสมมูลของขดลวดหลัก .....	51
ก.2 วงจรสมมูลของขดลวดหลัก กรณีจ่ายไฟเข้าขดหลักเพียงขดเดียว .....	52
ก.3 วงจรสมมูลของขดลวดหลัก กรณีขดลวดช่วยเปิดวงจร .....	53
ก.4 วงจรสมมูลของขดลวดช่วย กรณีขดลวดหลักเปิดวงจร .....	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเบื้องต้น

ปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดและพิกัดกำลังไม่สูงมากนัก การใช้งานจึงพบเห็นอยู่ทั่วไปตามอาคารสำนักงาน ที่พักอาศัย โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยทั่วไปขดสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดสองชุดคือขดขดลวดหลักและขดขดลวดช่วย ในการใช้งานโดยปกติการที่จะทำให้มอเตอร์หมุนได้จำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุต่อเพิ่มที่ขดขดลวดช่วยเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่เนื่องจากการป้อนกำลังจากแหล่งจ่ายขดลวดทั้งสองใช้แหล่งจ่ายไฟสลับหนึ่งเฟสที่ใช้อยู่ตามบ้านเพียงชุดเดียวทำให้ไม่มีอิสระในการควบคุมและยากแก่การปรับความเร็วรอบมอเตอร์ จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดความต้องการในการหาวิธีการควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เพื่อให้ได้ค่าตามคำสั่งที่ตั้งไว้ โดยระบบควบคุมจะสร้างแรงดันและความถี่ที่เหมาะสมผ่านทางอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายแก่ขดขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยทั่วไปการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบ่งได้เป็น 2 แบบ ด้วยกันคือ

#### 1) การควบคุมแบบวงรอบเปิดแบบ V/F

เป็นการควบคุมโดยนำความเร็วคำสั่งมาคำนวณความถี่และขนาดของแรงดันที่ต้องการจ่ายแก่ขดขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองซึ่งเป็นอัตราส่วนกันตามจำนวนรอบ ระบบการควบคุมแบบนี้ง่ายต่อการออกแบบและสร้างเพราะ ไม่จำเป็นต้องมีตัวตรวจจับความเร็วรอบมอเตอร์และไม่ต้องการข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์ แม้จะมีข้อดีดังกล่าวแต่การควบคุมแบบ V/F ก็มีปัญหาดังนี้คือ

- ก) การควบคุมความเร็วยังไม่เที่ยงตรงเพียงพอ
- ข) คุณสมบัติการควบคุมแรงบิดทำได้ไม่ดีพอ
- ง) มีขีดจำกัดในด้านการตอบสนองของความเร็ว

จากปัญหาของระบบการควบคุมแบบ V/F จึงได้มีการพัฒนาการควบคุมแบบเวกเตอร์ซึ่งเป็นการควบคุมแบบวงรอบปิด

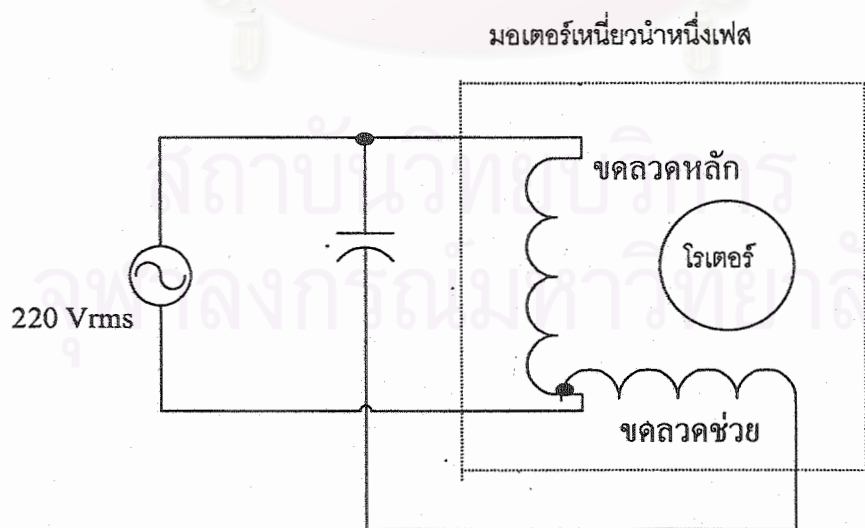
#### 2) การควบคุมแบบเวกเตอร์

อาศัยหลักการควบคุมแรงบิดและโรเตอร์ฟลักซ์อย่างมีอิสระต่อกันซึ่งก็คล้ายคลึงกับการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่ ในมอเตอร์กระแสตรงตำแหน่งเชิงมุมของกระแสสนามและกระแสอาร์เมเจอร์จะอยู่กับที่ด้วยโครงสร้างของมอเตอร์ ในขณะที่ในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์ และกระแสสเตเตอร์ต้องการ

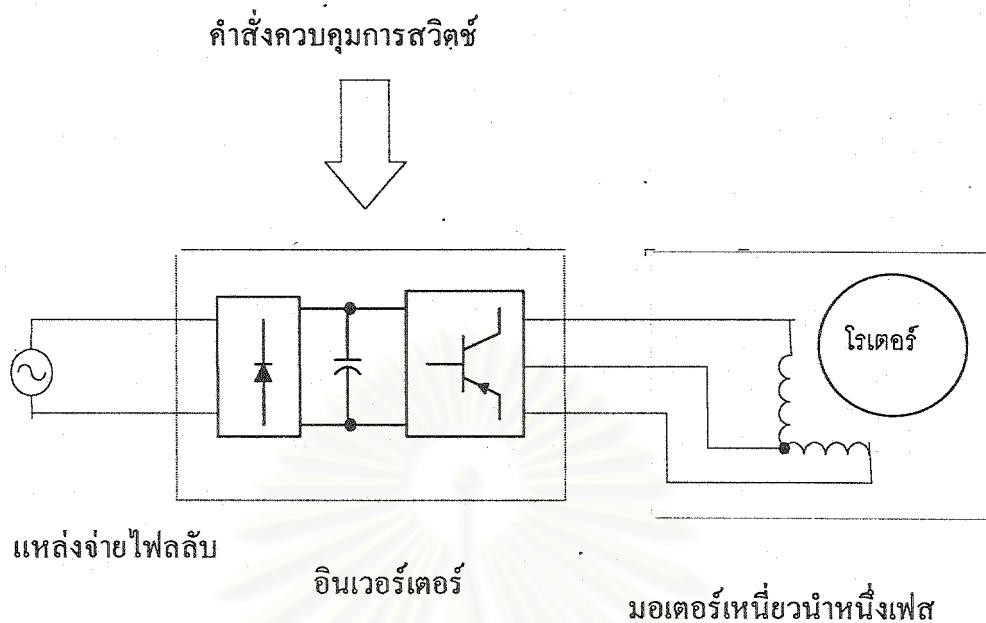
ขณะที่ในมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์ และกระแสเดเตอร์ต้องการการควบคุมจากภายนอก การควบคุมแบบเวกเตอร์แบ่งตามลักษณะการควบคุมได้ 2 แบบคือ แบบควบคุมกระแส (Current Control) และ แบบควบคุมแรงดัน (Voltage Control or Decoupling Control)

การควบคุมแบบเวกเตอร์โดยการควบคุมกระแส โดยทั่วไปจะเป็นการควบคุมแหล่งจ่ายแรงดัน โดยมีการป้อนกลับกระแสเพื่อควบคุมให้ได้กระแสตามต้องการ ถ้าความเร็วในการตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสไม่สูงพอจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างกระแสที่สร้างฟลักซ์และกระแสที่สร้างแรงบิด อาจจะแก้ไขได้โดยการเพิ่มอัตราขยายของวงรอบการป้อนกลับกระแสให้มากที่สุดที่จะทำได้ เพื่อให้ตัวแปลงผันพลังงาน (Power converter) จ่ายกระแสได้แบบอุดมคติ ดังนั้นตัวแปลงผันพลังงานจะต้องมีความถี่การสวิตช์ที่สูง และตัวประมวลผลที่ใช้ในการควบคุมจะต้องมีความเร็วสูงด้วย

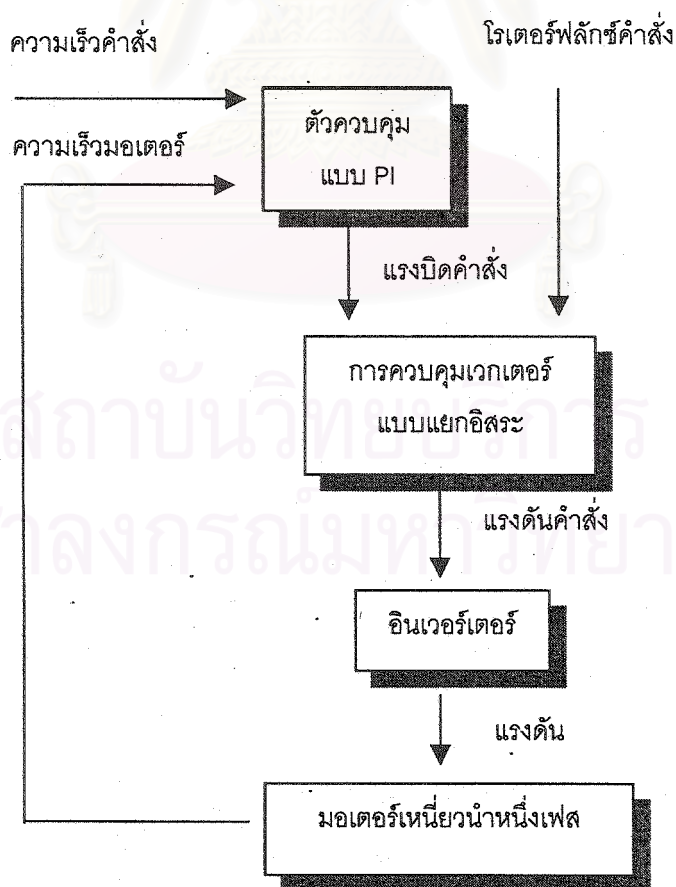
ในงานวิจัยนี้เราเลือกการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่ใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมแรงดันซึ่งใช้วิธีการควบคุมแบบแยกอิสระชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดทั้งสอง เพื่อสร้างแรงดันค่าสั่งที่เหมาะสมแก่อินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายแก่ขดลวดทั้งสองของมอเตอร์ ภาพรวมของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 การควบคุมแบบแยกอิสระที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อดีกว่าวิธีการควบคุมกระแสคือ ไม่ต้องมีวงรอบการป้อนกลับกระแส มีแต่เพียงการป้อนกลับความเร็วทำให้ระบบควบคุมมีความกระตือรือร้นและประหยัดอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส และในกรณีที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ช่วยในวงจรควบคุมก็จะทำให้ฮาร์ดแวร์ของระบบลดขนาดลงได้มาก



รูปที่ 1.1 การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยการต่อตัวเก็บประจุเพื่อช่วยสร้างสนามแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 1.2 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 1.3 ภาพรวมของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแรงดัน

## 1.2 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

ศึกษาและออกแบบสร้างระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมแรงดัน โดยใช้ไมโครคอนโทรล 32 บิต สำหรับมอเตอร์ขนาด 0.37 kW.

## 1.3 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาคุณสมบัติและทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส
2. ศึกษาและพัฒนาทฤษฎีการควบคุมเวกเตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส
3. จำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบแนวความคิด
4. ออกแบบระบบในส่วนซอฟต์แวร์ และฮาร์ดแวร์พร้อมทดสอบการทำงาน
5. ปรับปรุงแก้ไขระบบในส่วนซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ที่ได้พัฒนาขึ้น
6. เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล
7. เขียนและพิมพ์วิทยานิพนธ์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งสามารถควบคุมทั้งแรงบิดและความเร็วได้
2. เป็นแนวคิดในการวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีสมรรถนะสูง อาทิเช่น การควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ปราศจากตัวตรวจจับความเร็ว ได้ต่อไป
3. สามารถนำทฤษฎีและแนวคิดที่ได้พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้จริง
4. ช่วยในการเรียนรู้ฝึกหัดทักษะในขบวนการวิจัยและพัฒนา อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมแบบพึ่งพาตนเองในประเทศ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบเวกเตอร์

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบเวกเตอร์ โดยในเบื้องต้นจะแสดงแบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ซึ่งเป็นพื้นฐานของการควบคุมแบบเวกเตอร์ จากนั้นเราจะอธิบายถึงวิธีการควบคุมแรงดันที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์ตามหลักการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน (Decoupling control) ของกระแสกระตุ้นที่สร้างโรเตอร์ฟลักซ์ และ กระแสที่ทำให้เกิดแรงบิด

#### 2.1 แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

สมการลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยตัวแปรทุกตัวอ้างอิงบนแกนอ้างอิงนิ่ง d-q (Stationary reference frame) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}v_{sd} &= R_{sd}i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\v_{sq} &= R_{sq}i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt}\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} + P\omega_r \phi_{rq} \\0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - P\omega_r \phi_{rd}\end{aligned}\quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}\phi_{sd} &= L_{sd}i_{sd} + m_{srd}i_{rd} \\ \phi_{sq} &= L_{sq}i_{sq} + m_{srq}i_{rq}\end{aligned}\quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}\phi_{rd} &= L_r i_{rd} + m_{srd}i_{sd} \\ \phi_{rq} &= L_r i_{rq} + m_{srq}i_{sq}\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$T_e = P(m_{srq}i_{sq}i_{rd} - m_{srd}i_{sd}i_{rq})\quad (2.5)$$

โดยที่ แกน d คือ แกนในแนวขดลวดหลัก

แกน q คือ แกนในแนวขดลวดช่วย

$v_{sd}, v_{sq}$  คือ แรงดันสเตเตอร์ที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับ

$i_{sd}, i_{sq}$  คือ กระแสสเตเตอร์ที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับ

$i_{rd}, i_{rq}$  คือ กระแสโรเตอร์ของขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับ

$\phi_{sd}, \phi_{sq}$  คือ ฟลักซ์คัลลิ่งที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยของขดสเตเตอร์

$\phi_{rd}, \phi_{rq}$  คือ ฟลักซ์คัลลิ่งที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยของโรเตอร์

$P$  คือ จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก

$T_e$  คือ แรงบิดของมอเตอร์

สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์มีนิยามดังนี้

$R_{sd}, R_{sq}$  คือ ค่าความต้านทานของขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับ

$L_{sd}, L_{sq}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับ

$m_{srd}, m_{srq}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด โรเตอร์กับขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับ

$R_r, L_r$  คือ ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์ตามลำดับ

## 2.2 สมการแบบจำลองของโรเตอร์ฟลักซ์

เนื่องจากจำนวนรอบและขนาดเส้นลวดที่ไม่เท่ากันของขดลวดหลักและขดลวดช่วย ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองขดไม่เท่ากัน ดังนั้นผลของความไม่สมมาตรจะไปปรากฏผลในรูปคลื่นแรงบิด ในกรณีที่กระแสทั้งสองขดมีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกัน  $\pi/2$  เรเดียน ขนาดของฟลักซ์จะไม่คงที่ส่งผลให้แรงบิด ไม่คงที่จะเกิดการแกว่ง เพื่อแก้ปัญหาและให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เราจะทำการนิยามค่ากระแสและแรงดันในขดลวดช่วยขึ้นมาใหม่เพื่อให้สมการที่ใช้อยู่ในรูปที่สมมาตรจากสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5) เราสามารถเขียนสมการแรงบิดได้เป็น

$$T_e = \frac{P}{L_r} (m_{srq} i_{sq} \phi_{rd} - m_{srd} i_{sd} \phi_{rq}) \quad (2.6)$$

นิยาม กระแสในขดลวดช่วยใหม่เป็น

$$i_{sq1} = \frac{i_{sq}}{n} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$n$  คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหลักต่อจำนวนรอบของขดลวดช่วย เนื่องจากความสัมพันธ์ทางแม่เหล็กของค่าความเหนี่ยวนำร่วมของทั้งสองขด จะได้ว่า

$$n = \frac{m_{srd}}{m_{srq}} \quad (2.8)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการของแรงบิดได้ใหม่เป็น

$$T_e = \frac{P m_{srd}}{L_r} (i_{sq1} \phi_{rd} - i_{sd} \phi_{rq}) \quad (2.9)$$

และจากสมการที่ (2.2) และสมการที่(2.4) เราจะเขียนสมการแบบจำลองของโรเตอร์ฟลักซ์ที่อ้างอิงบนแกนนิ่งได้เป็น

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = -\frac{\phi_{rd}}{\tau_r} + \frac{m_{srd}}{\tau_r} i_{sd} - P\omega_r \phi_{rq} \quad (2.10)$$





$$\frac{d\phi_{rq}}{dt} = -\frac{\phi_{rq}}{\tau_r} + \frac{m_{srd}}{\tau_r} i_{sq1} + P\omega_r \phi_{rd} \quad (2.11)$$

โดยที่ ค่าคงที่ทางเวลาของโรเตอร์

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2.12)$$

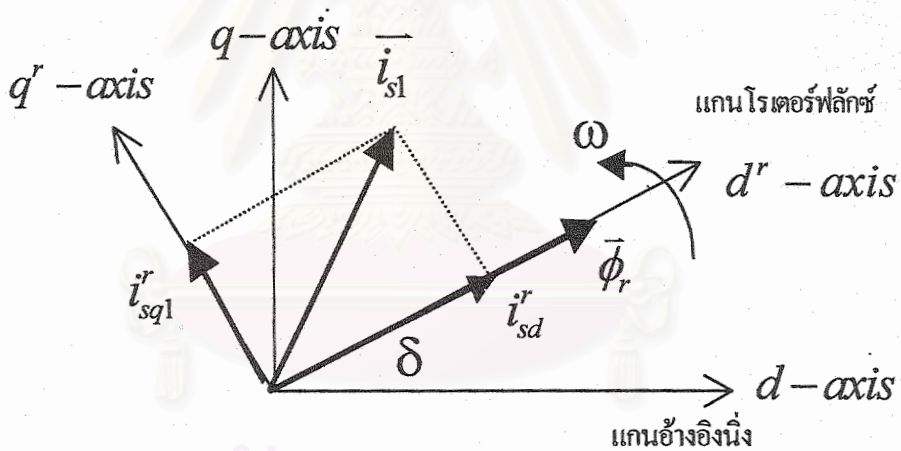
จะเห็นได้ว่าสมการ (2.9) ถึง (2.11) อยู่ในรูปแบบที่สมมูลกับกรณีมอเตอร์สองเฟสสมมาตรแล้วเมื่อเรา นิยามสเปซเวกเตอร์ของปริมาณฟลักซ์และกระแสเป็น

$$\bar{\phi}_r = \phi_{rd} + j\phi_{rq} \quad (2.13)$$

$$\bar{i}_{s1} = i_{sd} + ji_{sq1} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.10) ถึง (2.14) เราจะได้สมการเวกเตอร์ของโรเตอร์ฟลักซ์ที่อ้างอิงบนแกนนิ่งดังนี้คือ

$$\frac{d\bar{\phi}_r}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} \bar{\phi}_r + \frac{m_{srd}}{\tau_r} \bar{i}_{s1} + jP\omega_r \bar{\phi}_r \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.1 เวกเตอร์โรเตอร์ฟลักซ์และเวกเตอร์กระแสเตเตอร์

หากพิจารณาสมการเวกเตอร์โรเตอร์ฟลักซ์อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ที่มีความถี่เชิงมุม  $\omega$  และทำมุมกับระนาบแกนนิ่งเป็นมุม  $\delta$  เราจะเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$\frac{d\bar{\phi}_r}{dt} = -\frac{1}{\tau_r} \bar{\phi}_r + \frac{m_{srd}}{\tau_r} \bar{i}_{s1} - j\omega_s \bar{\phi}_r \quad (2.16)$$

โดยที่ ความถี่สลิป  $\omega_s = \omega - P\omega_r$

โดยตัวห้อยบน “r” หมายถึงค่าที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์

เมื่อพิจารณาส่วนจริงของสมการที่(2.16) จะได้สมการของขนาดโรเตอร์เตอร์ฟลักซ์  $\phi_r$  ดังนี้

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -\frac{\phi_r}{\tau_r} + \frac{m_{srd}}{\tau_r} i_{sd}^r \quad (2.17)$$

หรือ

$$i_{sd}^r = \frac{\tau_r}{m_{srd}} \left( \frac{\phi_r}{\tau_r} + \frac{d\phi_r}{dt} \right) \quad (2.18)$$

โดยปกติในสถานะอยู่ตัวโรเตอร์ฟลักซ์คำสั่งจะมีขนาดคงที่ ดังนั้นขนาดของโรเตอร์ฟลักซ์และกระแสสร้างโรเตอร์ฟลักซ์ จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.19)

$$i_{sd}^r = \frac{\phi_r}{m_{srd}} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.9) ถ้าพิจารณาบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ จะได้สมการแรงบิดของมอเตอร์เป็น

$$T_e = \frac{P m_{srd} i_{sq1}^r \phi_r}{L_r} \quad (2.20)$$

หรือ

$$i_{sq1}^r = \frac{T_e L_r}{\phi_r P m_{srd}} \quad (2.21)$$

ดังนั้นในกรณีที่โรเตอร์ฟลักซ์มีขนาดคงที่แรงบิดของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับกระแส  $i_{sq1}^r$  เท่านั้น กระแสค่านี้จึงเป็นกระแสสร้างแรงบิด และเมื่อพิจารณาส่วนจินตภาพของสมการที่ (2.16) เราสามารถหาสมการผลต่างระหว่างความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์และความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ซึ่งก็คือความถี่สลลิปได้ดังนี้

$$\omega_s = \omega - P\omega_r = \frac{m_{srd} i_{sq1}^r}{\tau_r \phi_r} \quad (2.22)$$

และในสถานะอยู่ตัว

$$\omega_s = \frac{i_{sq1}^r}{\tau_r i_{sd}^r} \quad (2.23)$$

เราสามารถนำสมการของกระแสสร้างโรเตอร์ฟลักซ์ สมการของกระแสสร้างแรงบิด และสมการของความถี่สลลิป มาสร้างบล็อกการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์และแรงบิดผ่านกระแสสตเตอร์ได้ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

### 2.3 แบบจำลองด้านสเตเตอร์และการควบคุมแบบแยกอิสระ

ในงานวิจัยนี้เราจะใช้การควบคุมแบบแยกอิสระบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์โดยนำค่าคำสั่งของกระแสสร้างโรเตอร์ฟลักซ์และแรงบิดที่ได้มาคำนวณหาค่าแรงดันคำสั่งที่เหมาะสมที่ต้องจ่ายให้ขดลวดทั้งสองของมอเตอร์ เพื่อชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างกันของขดลวดทั้งสอง จากแบบจำลองลักษณะพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในสมการที่ (2.1) ถึงสมการที่ (2.4) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่อ้างอิงบนแกนนี้ได้เป็น

$$v_{sd} = \left( R_{sd} + \frac{m_{srd}^2}{\tau_r L_r} \right) i_{sd} + \sigma L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} + e_{sd} \quad (2.24)$$

$$v_{sq} = \left( R_{sq} + \frac{m_{srq}^2}{\tau_r L_r} \right) i_{sq} + \frac{L_{sq} L_r - m_{srq}^2}{L_r} \frac{di_{sq}}{dt} + e_{sq} \quad (2.25)$$

โดยที่ 
$$e_{sd} = -\frac{m_{srd}}{L_r} \left( P\omega_r \phi_{rq} + \frac{\phi_{rd}}{\tau_r} \right) \quad (2.26)$$

$$e_{sq} = \frac{m_{srq}}{L_r} \left( P\omega_r \phi_{rd} - \frac{\phi_{rq}}{\tau_r} \right) \quad (2.27)$$

และ  $\sigma = 1 - \frac{m_{srd}^2}{L_r L_{sd}}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม

โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของขดลวดทั้งสองของมอเตอร์คือ  $\frac{m_{srd}}{m_{srq}} = n$  และ

$\frac{L_{sd}}{L_{sq}} = n^2$  เราจะนิยามแรงดันของขดลวดช่วยเป็น  $v_{sq1}$  และ  $e_{sq1}$  ขึ้นใหม่ ได้ดังนี้

$$v_{sq1} = n v_{sq} = \left( n^2 R_{sq} + \frac{m_{srd}^2}{\tau_r L_r} \right) i_{sq1} + \sigma L_{sd} \frac{di_{sq1}}{dt} + e_{sq1} \quad (2.28)$$

โดยที่ 
$$e_{sq1} = n e_{sq} = \frac{m_{srd}}{L_r} \left( P\omega_r \phi_{rd} - \frac{\phi_{rq}}{\tau_r} \right) \quad (2.29)$$

ทำให้ได้สมการแรงดัน (2.24) และ (2.28) ที่ตัวแปรต่างๆอ้างอิงบนแกนหนึ่งมีลักษณะเหมือนสมการแรงดันของมอเตอร์สองเฟสสมมาตร(ยกเว้นส่วนค่าความต้านทาน) แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้เราใช้การควบคุมแบบแยกอิสระบนแกน โรเตอร์ฟลักซ์ ดังนั้นเราจึงต้องการหาสมการแรงดันที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์แทน สมการการแปลงตัวแปรบนแกนหนึ่งไปเป็นตัวแปรบนแกน โรเตอร์ฟลักซ์แสดงได้ดังสมการที่ (2.30)

$$\begin{bmatrix} x_{sd}^r \\ x_{sq1}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sd} \\ x_{sq1} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

โดยในที่นี้ตัวแปร  $x$  คือค่ากระแส, แรงดันหรือโรเตอร์ฟลักซ์ เราสามารถหาสมการแรงดันที่อ้างอิงบนแกนโรเตอร์ฟลักซ์ได้ดังนี้

$$v_{sd}^r = \left( R_{sd} + \frac{m_{srd}^2}{\tau_r L_r} \right) i_{sd}^r + \sigma L_{sd} \left( \frac{di_{sd}^r}{dt} - \omega i_{sq1}^r \right) - \frac{m_{srd}}{\tau_r L_r} \phi_r + \Delta R \sin \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \quad (2.31)$$

$$v_{sq1}^r = \left( R_{sd} + \frac{m_{srd}^2}{\tau_r L_r} \right) i_{sq1}^r + \sigma L_{sd} \left( \frac{di_{sq1}^r}{dt} + \omega i_{sq1}^r \right) + \frac{m_{srd}}{L_r} P \omega_r \phi_r + \Delta R \cos \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \quad (2.32)$$

$$\text{เมื่อ } \Delta R = n^2 R_{sq} - R_{sd}$$

โดยปกติเราจะสั่งให้โรเตอร์ฟลักซ์มีขนาดคงที่ ซึ่งในสภาวะอยู่ตัว เราสามารถใช้สมการที่ (2.19) และ (2.22) แทนลงในสมการที่ (2.31) และ (2.32) ได้เป็น

$$\begin{aligned} v_{sd}^r &= R_{sd} i_{sd}^r + \sigma L_{sd} \left( \frac{di_{sd}^r}{dt} - \omega i_{sq1}^r \right) + \Delta R \sin \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \\ &= u_{sd}^r + \Delta R \sin \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} v_{sq1}^r &= R_{sd} i_{sq1}^r + \sigma L_{sd} \frac{di_{sq1}^r}{dt} + \omega L_{sd} i_{sd}^r + \Delta R \cos \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \\ &= u_{sq1}^r + \Delta R \cos \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \end{aligned} \quad (2.34)$$

จะพบว่าสมการแรงดันของขดลวดทั้งสองมีองค์ประกอบสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่อยู่ในรูปที่คล้ายคลึงกับสมการของขดลวดสองเฟสสมมาตร ได้แก่  $u_{sd}^r$  และ  $u_{sq1}^r$  ของขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับและส่วนที่สะท้อนถึงความไม่สมมาตรเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานในขดลวดทั้งสองได้แก่เทอม

$$\Delta R \sin \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \quad \text{และ} \quad \Delta R \cos \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta)$$

สำหรับแรงดันที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยตามลำดับ

### การชดเชยแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ

ในอันดับแรกเราจะพิจารณาแรงดันส่วนที่อยู่ในรูปที่คล้ายคลึงกับขดลวดสองเฟสสมมาตรของขดลวดทั้งสองคือ

$$u_{sd}^r = R_{sd} i_{sd}^r + \sigma L_{sd} \left( \frac{di_{sd}^r}{dt} - \omega i_{sq1}^r \right) \quad (2.35)$$

$$u_{sq1}^r = R_{sd} i_{sq1}^r + \sigma L_{sd} \frac{di_{sq1}^r}{dt} + \omega L_{sd} i_{sd}^r \quad (2.36)$$

จะเห็นได้ว่ามีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันระหว่างขดลวดหลักและขดลวดช่วย แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ปรากฏบนขดลวดหลักซึ่งมีผลมาจากกระแสในขดลวดช่วยคือ  $-\omega \sigma L_{sd} i_{sq1}^r$  และ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ปรากฏบนขดลวดช่วยซึ่งมีผลมาจากขดลวดหลัก คือ  $\omega L_{sd} i_{sd}^r$  ถ้าเราควบคุมให้  $u_{sd}^r$  และ  $u_{sq1}^r$  เป็นไปตามสมการ

$$u_{sd}^r = u_d - \omega \sigma L_{sd} i_{sq1}^r \quad (2.37)$$

$$u_{sq1}^r = u_q + \omega L_{sd} i_{sd}^r \quad (2.38)$$

แทนสมการที่ (2.37) และ (2.38) ลงในสมการที่ (2.35) และ (2.36) ตามลำดับจะได้

$$u_d = R_{sd}i_{sd}^r + \sigma L_{sd} \frac{di_{sd}^r}{dt} \quad (2.39)$$

$$u_q = R_{sd}i_{sq1}^r + \sigma L_{sd} \frac{di_{sq1}^r}{dt} \quad (2.40)$$

ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมกระแส  $i_{sd}^r$  และ  $i_{sq1}^r$  สามารถแยกอิสระต่อกันได้โดยผ่าน  $u_d$  และ  $u_q$  ถ้าเรากำหนดให้

$$u_d = R_{sd}i_{sd}^{r*} \quad (2.41)$$

$$u_q = R_{sd}i_{sq1}^{r*} \quad (2.42)$$

เมื่อสัญลักษณ์ “\*” แสดงถึงค่าคำสั่ง จากสมการที่ (36) และ (37) จะได้ว่า

$$i_{sd}^r = \frac{1}{\tau_s s + 1} i_{sd}^{r*} \quad (2.43)$$

$$i_{sq1}^r = \frac{1}{\tau_s s + 1} i_{sq1}^{r*} \quad (2.44)$$

โดยที่  $\tau_s = \frac{\sigma L_{sd}}{R_{sd}}$  คือ ค่าคงที่ทางเวลาทางด้านสเตเตอร์

ในทางปฏิบัติเนื่องจากค่าคงที่ทางเวลา  $\tau_s$  มีค่าน้อยมากและอาจละเลยได้ เราจึงกำหนดให้แรงดันสเตเตอร์ในสมการที่ (2.37) และ (2.38) มีค่าดังนี้คือ

$$u_{sd}^r = R_{sd}i_{sd}^{r*} - \omega \sigma L_{sd} i_{sq1}^{r*} \quad (2.45)$$

$$u_{sq1}^r = R_{sd}i_{sq1}^{r*} + \omega L_{sd} i_{sd}^{r*} \quad (2.46)$$

### ส่วนชดเชยความไม่สมมาตร

การชดเชยความไม่สมมาตรเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานในขดลวดทั้งสอง จะกระทำบนแกนอ้างอิงหนึ่งเพราะคำนวณง่ายกว่า จากสมการที่ (2.33) และ (2.34) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{sd}^r \\ v_{sq1}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sd}^r \\ u_{sq1}^r \end{bmatrix} + \Delta R \begin{bmatrix} \sin \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \\ \cos \delta (i_{sd}^r \sin \delta + i_{sq1}^r \cos \delta) \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

เมื่อทำการแปลงสมการข้างต้นไปอ้างอิงบนแกนหนึ่ง โดยการคูณทั้งสองข้างของสมการด้วยเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \text{ จะได้สมการแรงดันของขดลวดทั้งสองบนแกนนี้ดังนี้}$$

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sql} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sql} \end{bmatrix} + \Delta R \begin{bmatrix} 0 \\ i_{sql} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

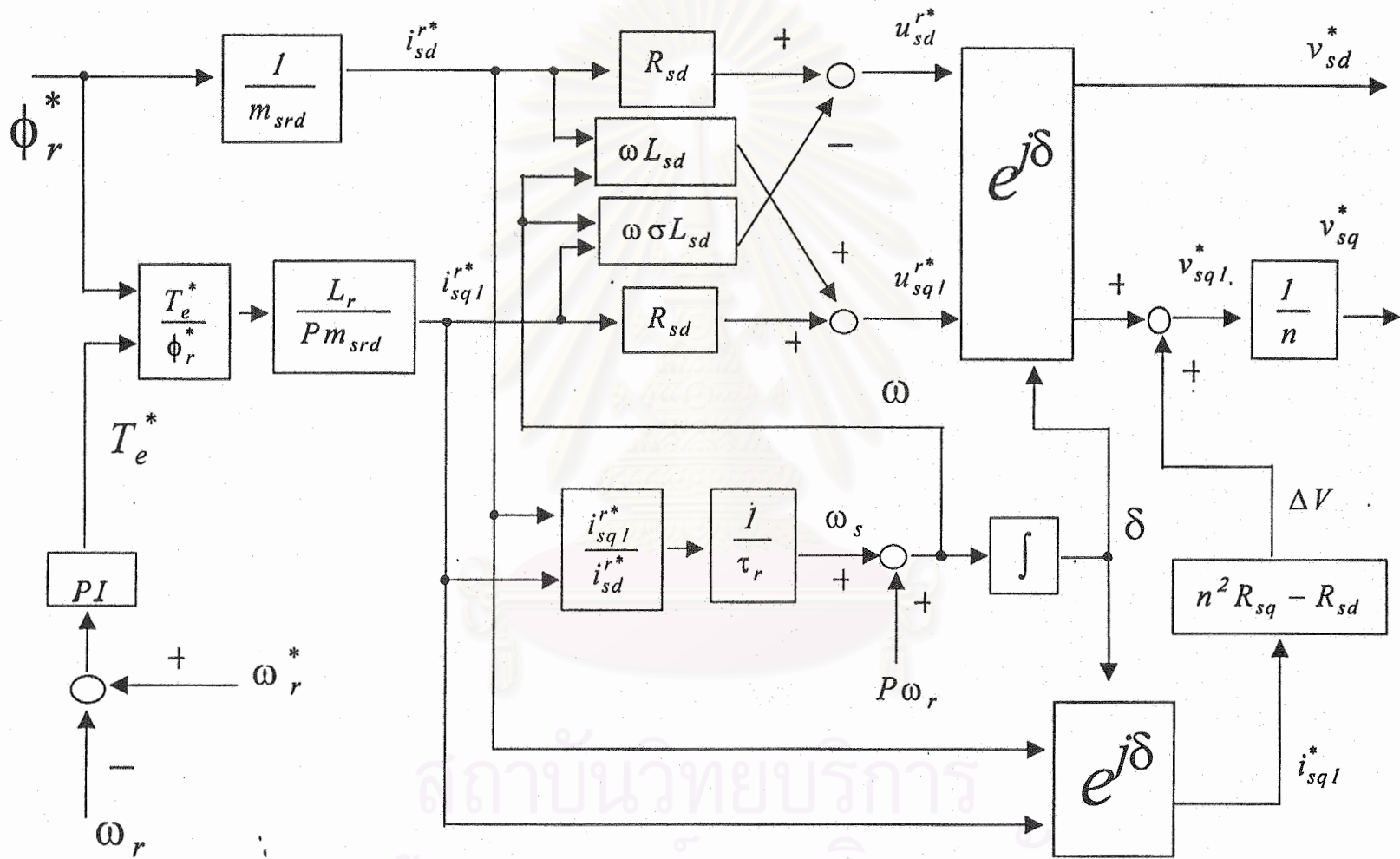
การชดเชยแรงดันอินเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างความต้านทานของขดลวดหลักและขดลวดช่วยของขดสเตเตอร์ ทำให้โดยบวกค่าแรงดันเพิ่มเข้าไปที่ค่าแรงดันของขดลวดช่วย ค่าแรงดันชดเชยที่บวกเพิ่มเข้าไปมีค่าเท่ากับ

$$\Delta V = \Delta R i_{sql} = (n^2 R_{sq} - R_{sd}) i_{sql} \quad (2.49)$$

จากความสัมพันธ์ที่ (2.45), (2.46) และ (2.49) ข้างต้น เราสามารถสร้างบล็อกการควบคุมแบบแยกอิสระได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยแรงบิดคำสั่งได้มาจากตัวควบคุมแบบ PI อันขึ้นอยู่กับผลต่างของความเร็วโรเตอร์กับความเร็วคำสั่ง แรงดันคำสั่งที่คำนวณได้จากบล็อกการควบคุมจะเป็นคำสั่งเพื่อให้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสต่อไป

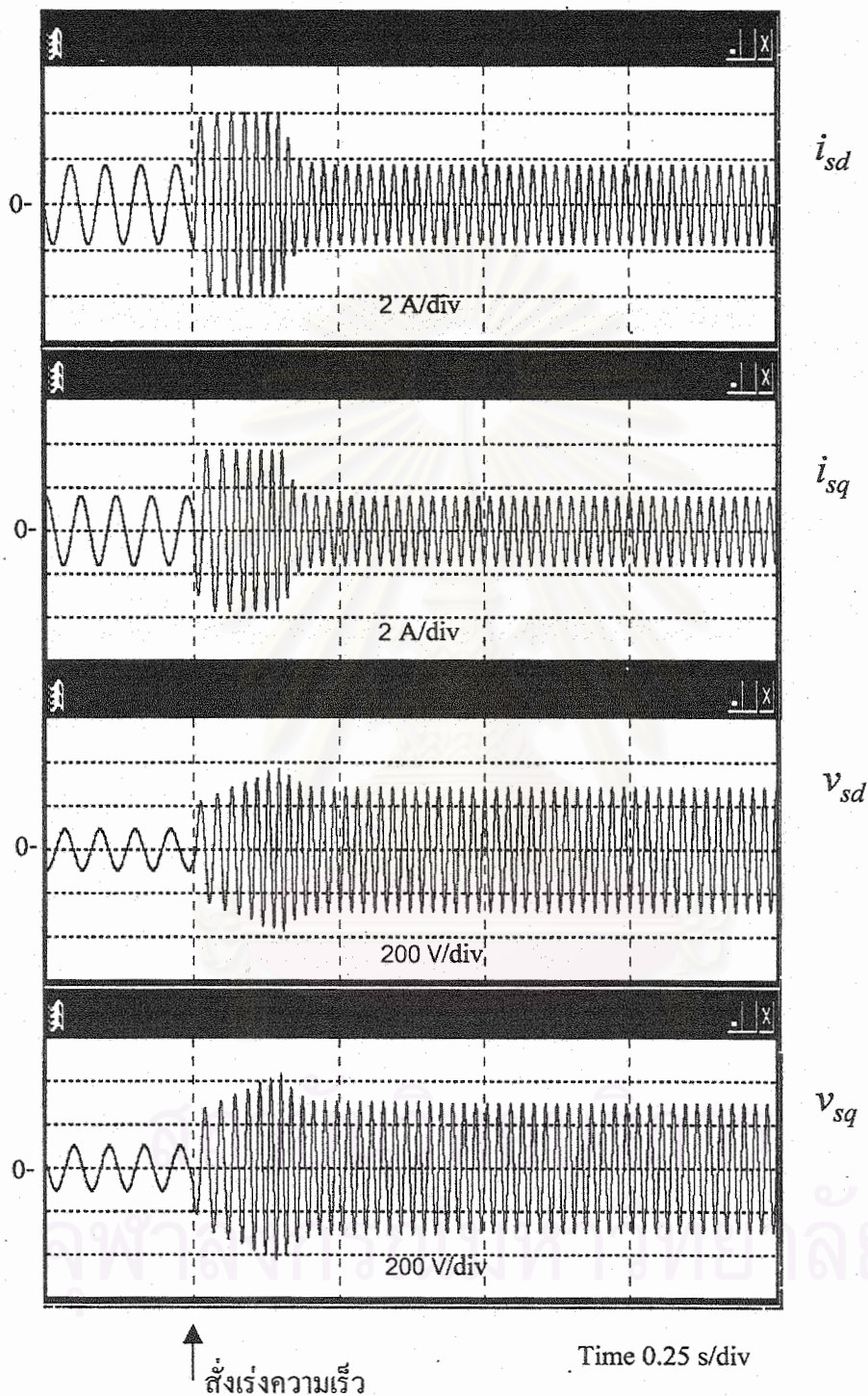
## 2.4 ผลจำลองการทำงาน

ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB with SIMULINK โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ตามภาคผนวก ก แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ถึง 2.6 โดยจำกัดค่าแรงบิดไว้ที่ 5.75 Nm จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของความเร็วต่อคำสั่งแบบขั้นในการเร่งความเร็ว จากรูปจะเห็นว่าเราสามารถควบคุม ฟลักซ์และแรงบิดได้ตามค่าคำสั่งเป็นอย่างดี และกระแสก็มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วและไม่มีการแกว่ง รูปที่ 2.5 เป็นผลการจำลองในขณะลดความเร็วซึ่งระบบก็สามารถทำงานได้เป็นอย่างดีเหมือนกับกรณีเร่งความเร็ว สำหรับรูปที่ 2.6 เป็นผลการจำลองในขณะกลับทิศการหมุนระบบก็สามารถควบคุมทั้งกระแส แรงบิด และ ฟลักซ์ได้ตามคำสั่งเช่นกัน จากผลการจำลองทั้งหมด เราจึงสามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมเวกเตอร์แบบแยกอิสระที่ควบคุมเฉพาะแรงดันของขดลวดหลักและขดลวดช่วยนั้นสามารถควบคุมกระแสให้ได้ตามที่เราร้องการได้โดยไม่ต้องมีการป้อนกลับกระแสเพื่อใช้ในการควบคุม



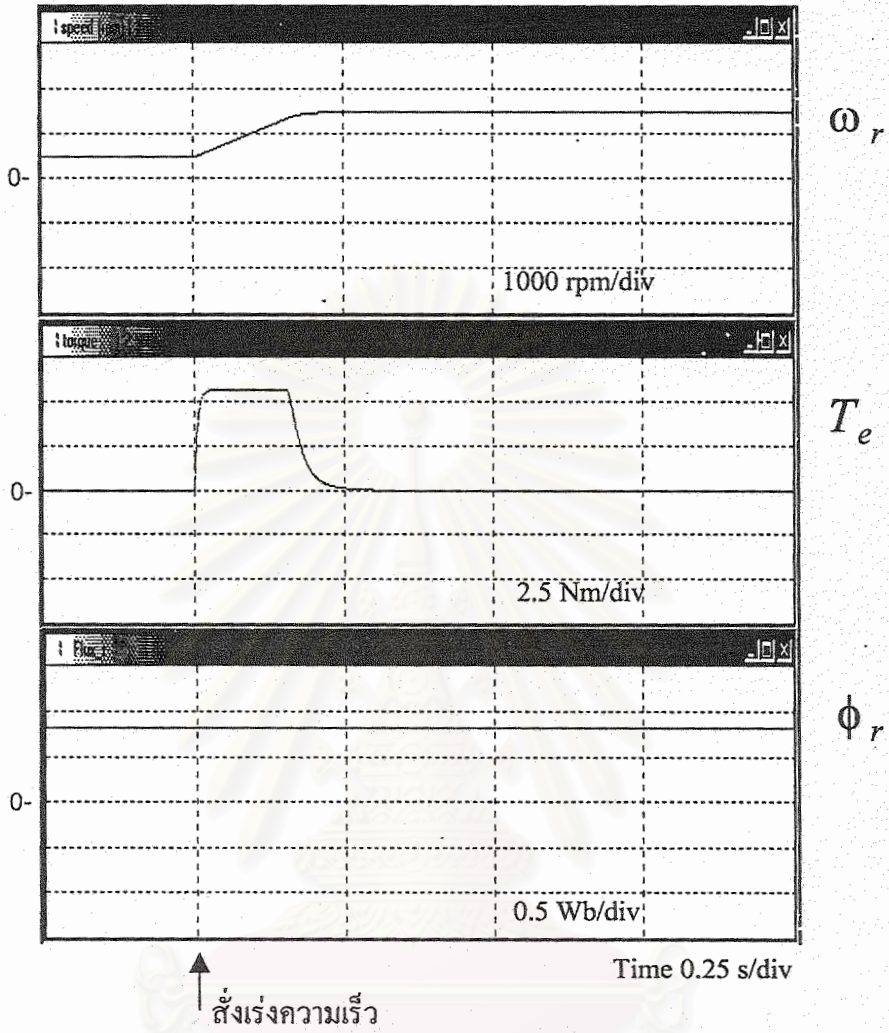
รูปที่ 2.2 บล็อกการควบคุมแบบแยกอิสระ

ผลจำลองการทำงานขณะเร่งความเร็ว จาก 500 rpm ไปยัง 1500 rpm



รูปที่ 2.4 ผลการจำลองการทำงานขณะเร่งความเร็ว 500 rpm  $\rightarrow$  1500 rpm

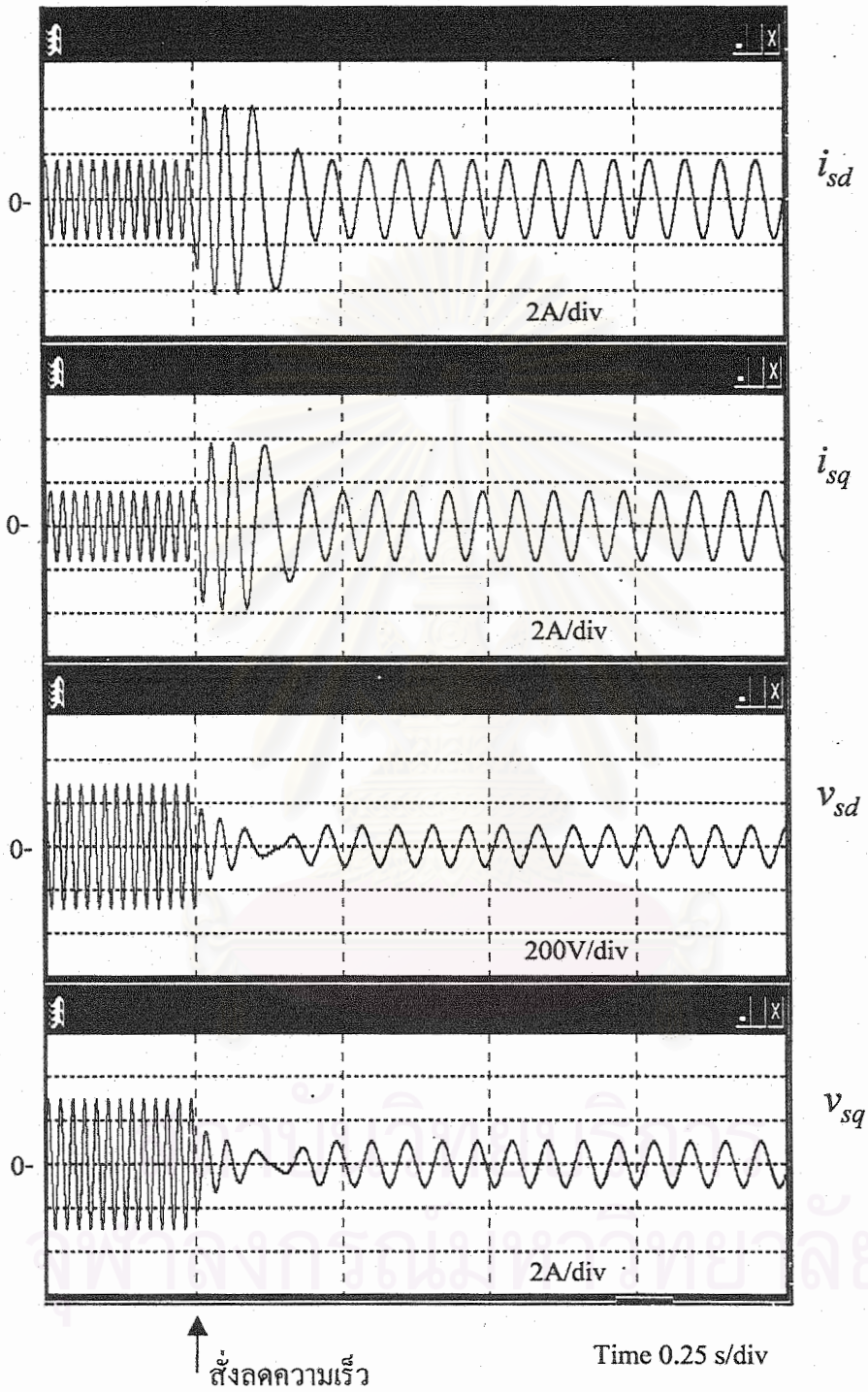




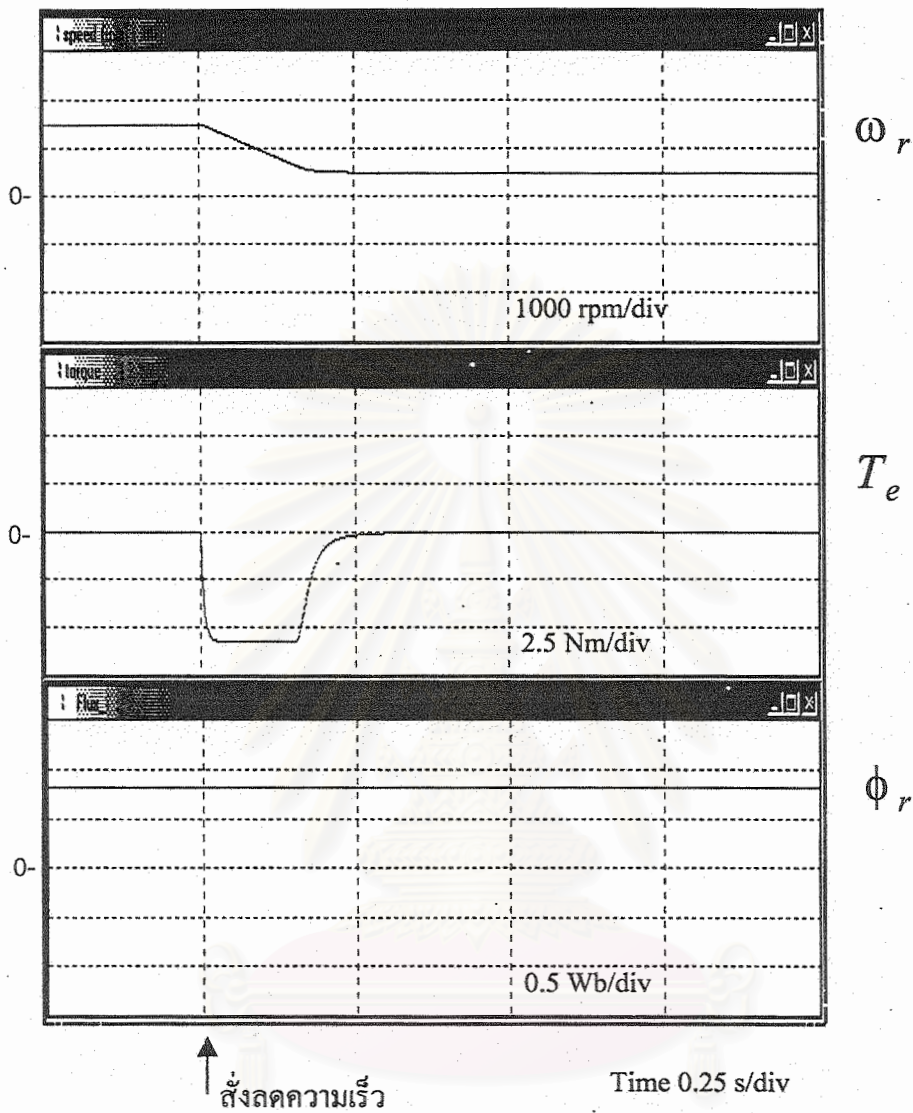
รูปที่ 2.4 (ต่อ) ผลการจำลองการทำงานขณะเร่งความเร็ว 500 rpm ->1500 rpm

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลจำลองการทำงานขณะลดความเร็ว จาก 1500 rpm ไปยัง 500 rpm



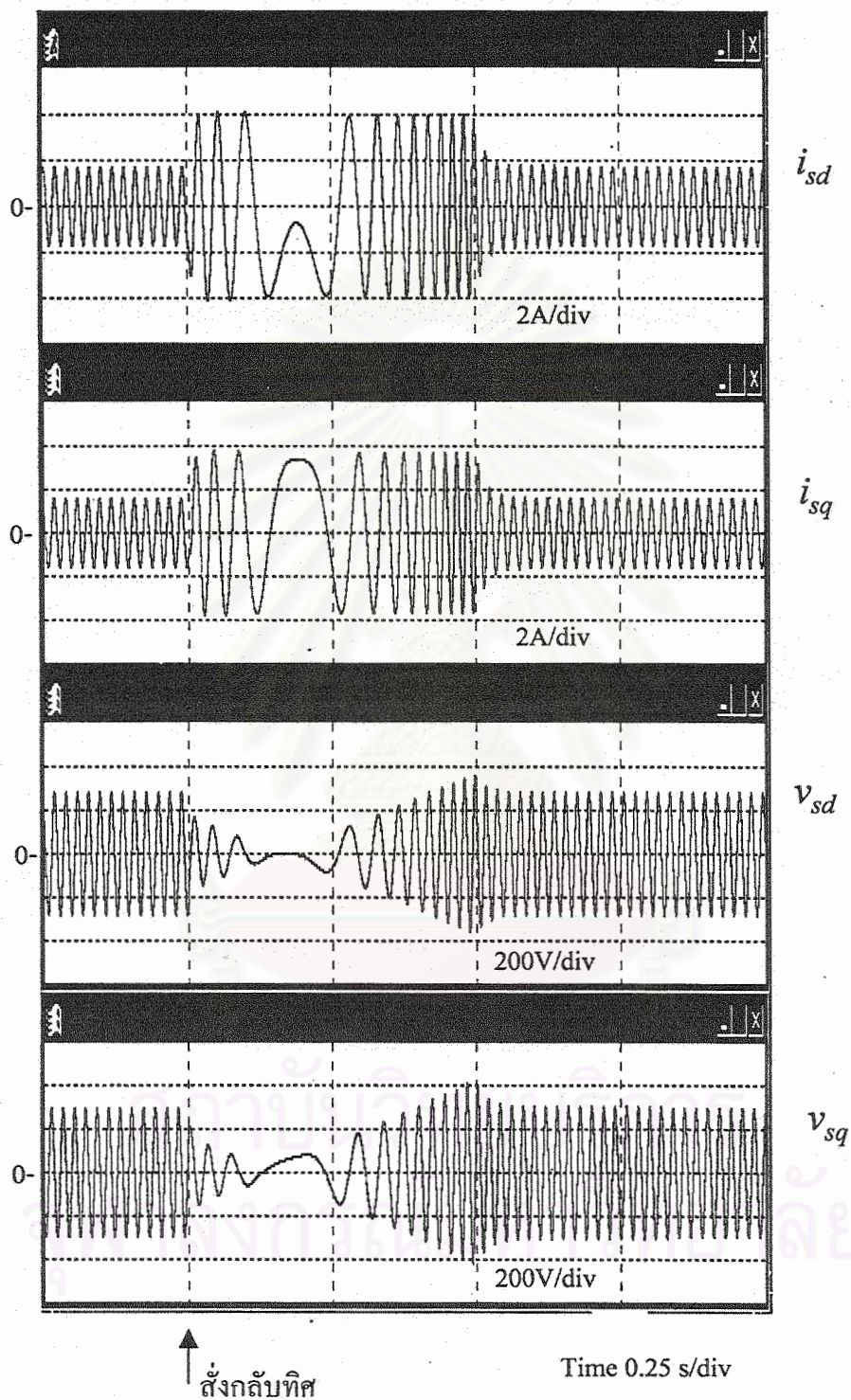
รูปที่ 2.5 ผลการจำลองการทำงานขณะลดความเร็ว 1500 rpm  $\Rightarrow$  500 rpm



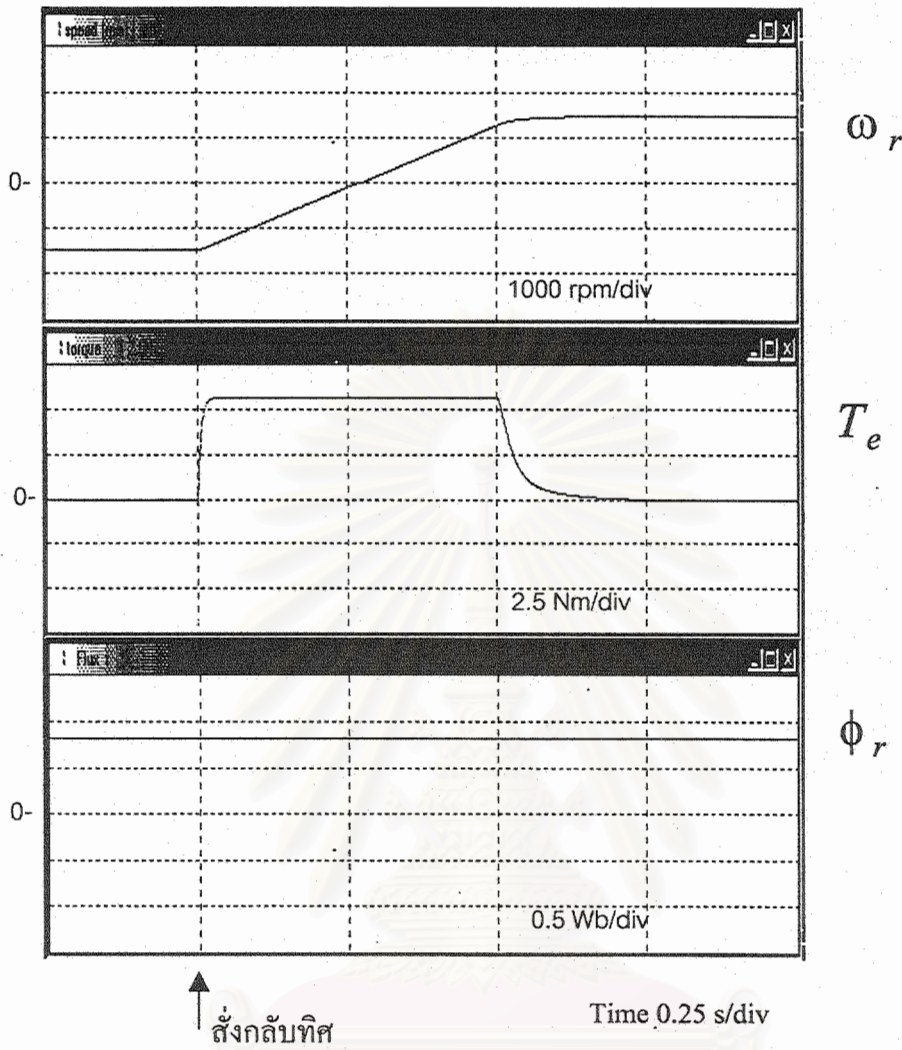
รูปที่ 2.5 (ต่อ) ผลการจำลองการทำงานขณะลดความเร็ว 1500 rpm => 500 rpm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็ว จาก -1500 rpm ไปยัง 1500 rpm



รูปที่ 2.6 ผลจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็ว จาก -1500 rpm -> 1500 rpm



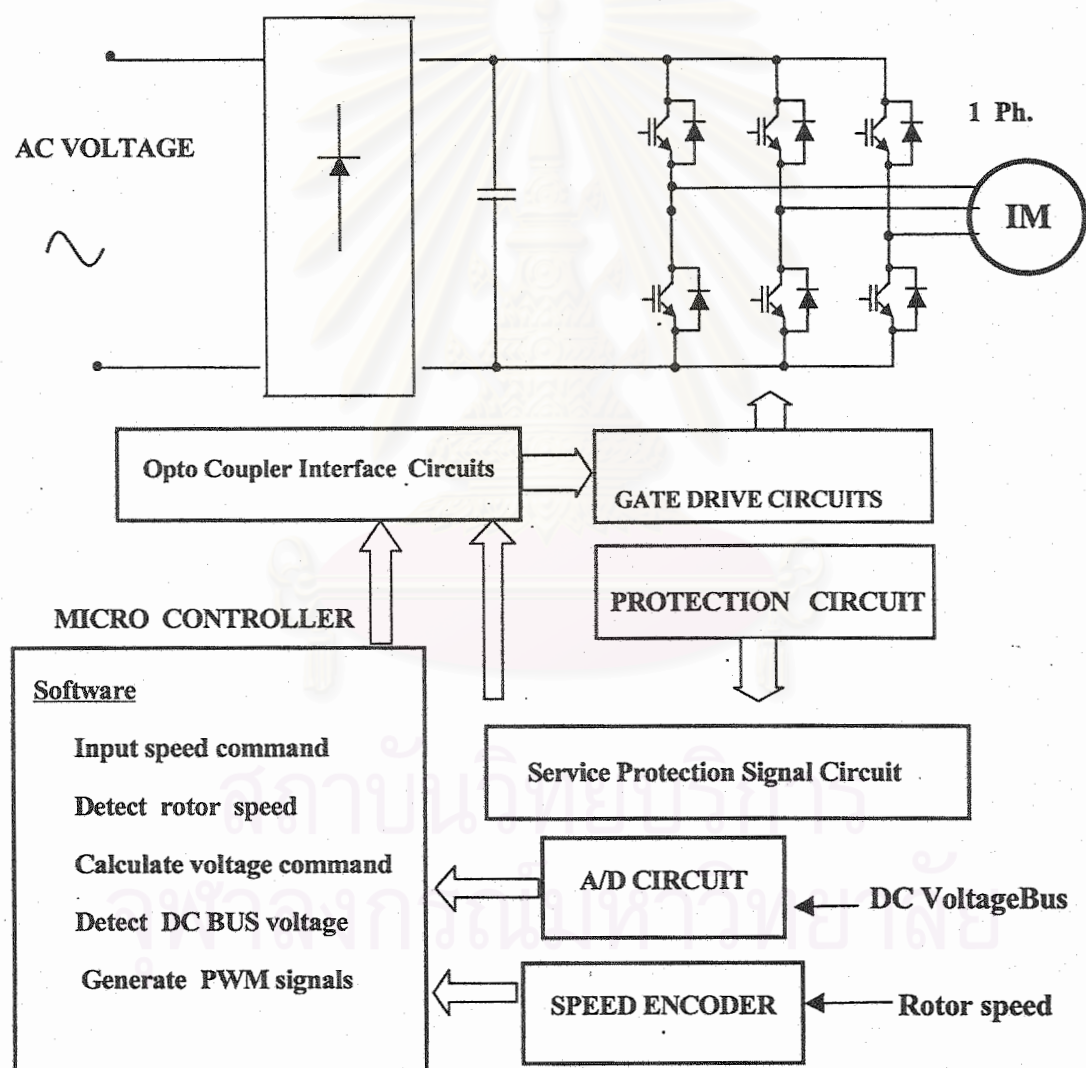
รูปที่ 2.6 (ต่อ) ผลจำลองการทำงานขณะกลับทิศความเร็ว จาก -1500 rpm  $\rightarrow$  1500 rpm

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบและการสร้างแรงดัน PWM

3.1 ระบบโดยรวม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบโดยรวมของการควบคุม สำหรับโครงสร้างฮาร์ดแวร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างโดยรวมของฮาร์ดแวร์ของระบบ

### 3.2 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ

#### 3.2.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ

ในส่วนของฮาร์ดแวร์ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

##### 1) ภาคกำลัง

##### 1.1 แหล่งจ่ายไฟสลับ

- แหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟส คั่นสาย 380 Vrms
- แหล่งจ่ายไฟสลับ 1 เฟส 220 Vrms

##### 1.2 Intelligent Power Module (IPM) ภายในประกอบด้วย

- ชุดวงจรเรียงกระแส
- ชุดสวิตช์กำลังพร้อมไดโอด 6 ชุด
- ชุดขั้วนำของ IGBT 6 ชุด
- ชุดวงจรป้องกัน

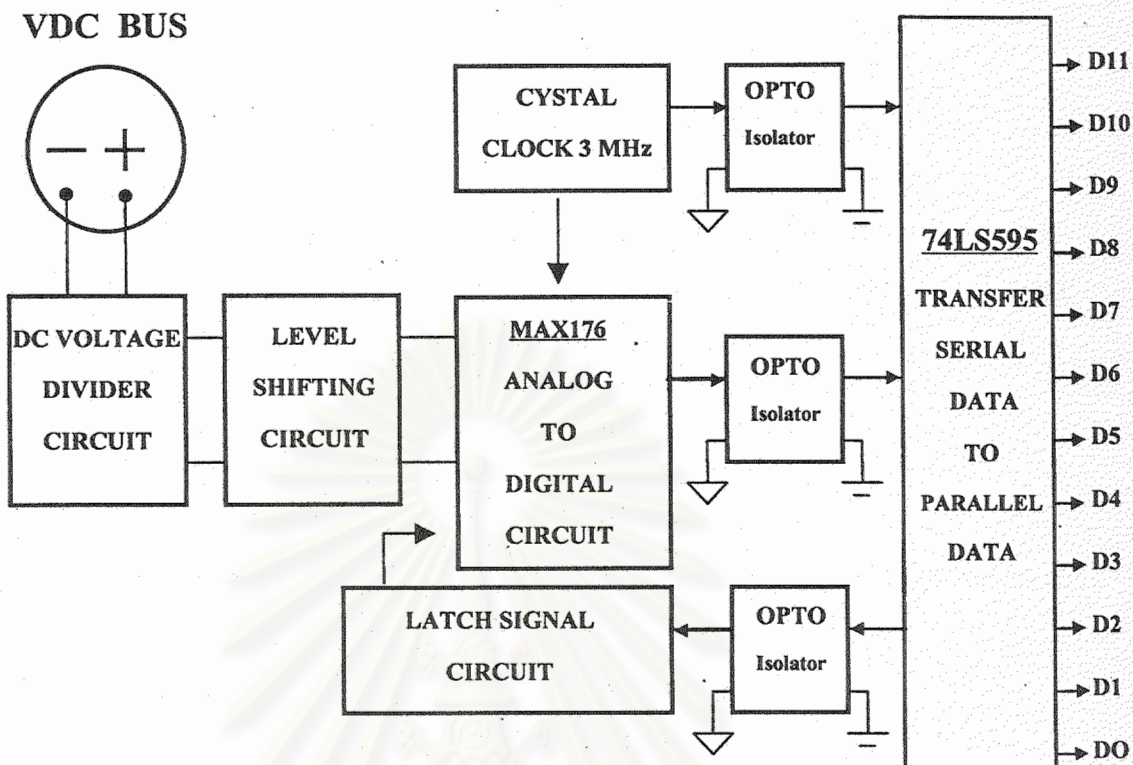
##### 1.3 แหล่งจ่ายไฟตรง ประกอบด้วย

- แหล่งจ่ายไฟตรง +5 V สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์
- แหล่งจ่ายไฟตรง +5 V สำหรับชุดตรวจจับความเร็วรอบ
- แหล่งจ่ายไฟตรง +5 V สำหรับวงจร Opto Coupler Interface
- แหล่งจ่ายไฟตรง +15 V และ -15 V สำหรับวงจรแปลงผันสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก
- แหล่งจ่ายไฟตรง +15 V และ -15 V สำหรับวงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

##### 2) ภาคการตรวจจับสัญญาณต่างๆ ประกอบด้วย

##### 2.1 ส่วนตรวจจับแรงดันบัสไฟตรง

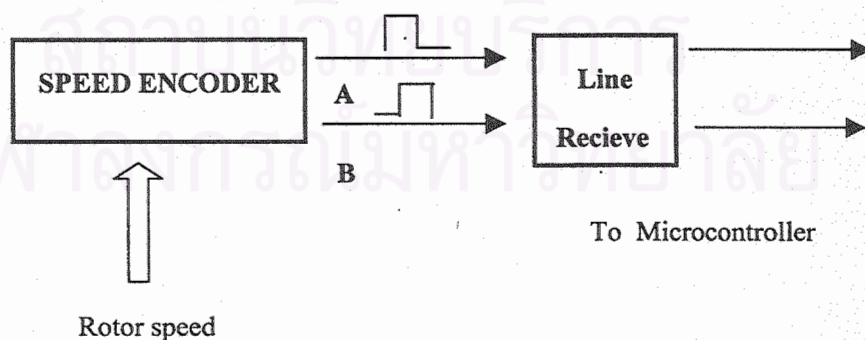
เป็นส่วนวงจรที่ทำการตรวจจับแรงดันบัสไฟตรงเพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้สร้างสัญญาณ PWM ในส่วนนี้จะทำการรับค่าแรงดันบัสไฟตรง มาทำการทอนระดับแรงดันให้มีค่าระดับแรงดันที่ต่ำลง จากนั้นทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกไปอยู่ในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลแบบอนุกรม จากนั้นทำการแยกโคดทางไฟฟ้า โดยใช้ opto isolator การที่สัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลเป็นแบบอนุกรมทำให้การแยกโคดทางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยใช้จำนวน opto isolator น้อยกว่าข้อมูลแบบขนาน ข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรมที่ส่งผ่านจะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลแบบขนานเพื่อส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ส่วนตรวจจับแรงดันบัสไฟตรง

2.2 ส่วนตรวจจับความเร็ว ( Speed detector )

แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยชุดตรวจจับความเร็วจะรับสัญญาณ 2 สัญญาณคือ A และ B ที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา มาจากตัวเข้ารหัส ( encoder ) ขนาด 1024 pulses/rev นำมาผ่าน line receiver ส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งใช้ตัวนับขึ้น-ลง ภายในคำนวณค่าความเร็วต่อไป



รูปที่ 3.3 ส่วนตรวจจับความเร็วรอบโรเตอร์



### 3) ภาคการควบคุม ในส่วนนี้จะประกอบด้วย

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ SH7032 แบบบอร์ดเดียว 1 บอร์ด
- วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเพื่อการแสดงผล

### 4) ภาคการป้องกัน

ในส่วนของภาคป้องกันนั้นจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนวงจรป้องกันภายใน Intelligent Power Module (IPM) เอง และส่วนที่เป็นวงจรมองนอกที่รับสัญญาณแจ้งจาก IPM เมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในระบบเพื่อทำการหยุดการทำงานของวงจรขั้วนำเกด

### 3.21 ซอฟต์แวร์ของระบบ

ส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบรวม จะทำหน้าที่หลักๆดังต่อไปนี้

- 1) อ่านค่าความเร็วรอบป้อนกลับของมอเตอร์นำมาเปรียบเทียบกับค่าคำสั่งเพื่อคำนวณแรงบิดคำสั่ง
- 2) คำนวณในส่วนของการสร้างแรงบิด และกระแสสร้างฟลักซ์
- 3) คำนวณความถี่และมุมโรเตอร์ฟลักซ์
- 4) คำนวณแรงดันคำสั่งโดยการควบคุมแบบแยกอิสระและชดเชยความไม่สมมาตรเนื่องมาจากความแตกต่างของค่าความต้านทานของขดสเตเตอร์ทั้งสองชุด
- 5) สร้างสัญญาณการสวิตช์แบบปรับความกว้างพัลส์

ซอฟต์แวร์ทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังแสดงใน PDL (Program Development Language) ต่อไปนี้ และแสดงไคอะแกรมเวลาได้ดังรูปที่ 3.3 ซอฟต์แวร์โมดูลนี้จะใช้การอินเทอร์รัปต์ทุกๆ 500 ไมโครวินาที และโปรแกรมในการบริการการอินเทอร์รัปต์จะใช้เวลาทั้งหมด 103 ไมโครวินาที

\*\*\*\*\*

#### DECOUPLING VECTOR CONTROL FOR A SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR

\*\*\*\*\*

#### MODULE : MAIN PROGRAM

##### Initialize

\_Initialize all variables

Initialize all timers and enable timer interrupt

**Loop here and wait for interrupt only**

**Switching frequency Interrupt Service Routine**

Get speed command

Read rotor speed

Speed regulator

    Calculate speed error

    Calculate Torque command

    Calculate current command

Calculate rotor flux frequency and angle

Decoupling control

    Calculate voltages command

    Compensate the effect of unsymmetrical resistance

Generate PWM signal

    Input Vdc from external A/D

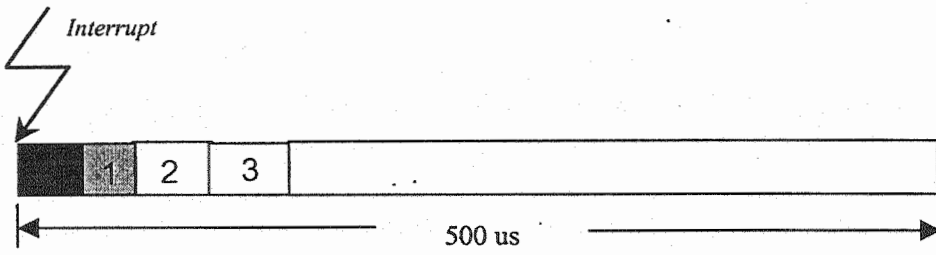
    Calculate timing of switch pattern






Return

**END MAIN PROGRAM.**

\*\*\*\*\*

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

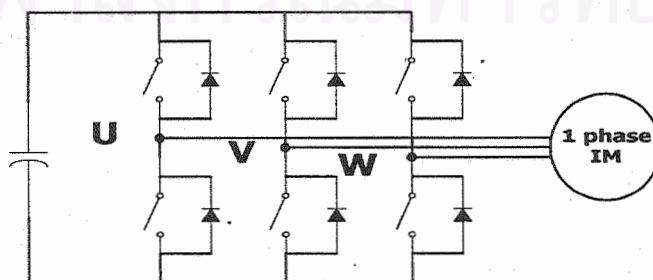


-  Speed regulation (20us)
-  Calculate rotor flux frequency and angle (16us)
-  Decoupling control (37us)
-  Generate PWM signal (30us)
-  Wait loop

รูปที่ 3.4 ไตอะแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูล

3.3 อินเวอร์เตอร์และการสร้างแรงดัน

จากแรงดันที่คำนวณได้จากระบบควบคุมเวกเตอร์ในบทที่ 2 จะถูกนำมาใช้เป็นแรงดันคำสั่ง เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันตามที่เราต้องการ เราจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟสจ่ายแรงดันให้กับชุดขดลวดทั้งสองของสเตเตอร์ โดย จุดต่อร่วมของขดหลักและขดช่วยต่อกับเฟส U ขดลวดหลักและขดลวดช่วยต่อเข้ากับ เฟส V และ เฟส W ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับสร้างแรงดัน

ดังนั้น แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดหลัก  $v_{sd} = V_V - V_U$  (3.1)

แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดช่วย  $v_{sq} = V_W - V_U$  (3.2)

โดยปกติหากเราสั่งให้เฟส U สร้างแรงดันเป็นศูนย์เทียบกับจุดกึ่งกลางบัส (วัตถุทำงานคงที่  $D=0.5$ ) วงจรอินเวอร์เตอร์จะทำงานเป็นแบบกึ่งบริดจ์ ขนาดของบัสไฟตรงที่ใช้ต้องมีค่าน้อยเป็น 2 เท่าของค่ายอดสูงสุดของแรงดันที่ต้องการสร้าง ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องใช้แรงดันประมาณ 620 V ขึ้นไป ดังนั้นเพื่อให้เราสามารถลดขนาดแรงดันบัสไฟตรงที่จำเป็นต้องใช้เพื่อลดต้นทุนการกวานและลดขนาดพิกัดการทนแรงดันของอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง ในงานวิจัยนี้เราจึงใช้เทคนิคการเพิ่มแรงดันศูนย์  $v_z$  (Zero voltage) ที่เฟส U, V และ W ของอินเวอร์เตอร์ดังสมการดังต่อไปนี้

$$V_U = v_z \tag{3.3}$$

$$V_V = v_{sd} + v_z \tag{3.4}$$

$$V_W = v_{sq} + v_z \tag{3.5}$$

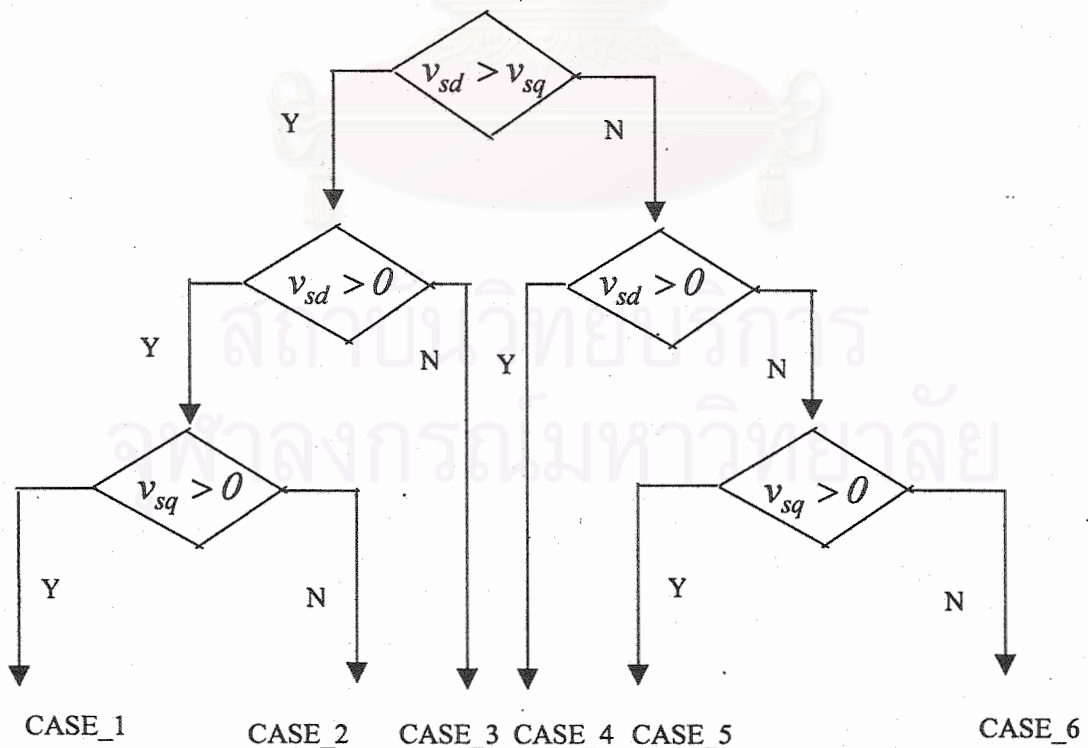
โดยแรงดันศูนย์ ณ เวลาใดๆ ที่ใช้หาได้จากสมการ

$$v_z = -\frac{1}{2}(max + min) \tag{3.6}$$

เมื่อ  $max$  คือค่าสูงสุด ของ  $v_{sd}, v_{sq}$  และ 0 ในขณะนั้น

$min$  คือค่าต่ำสุด ของ  $v_{sd}, v_{sq}$  และ 0 ในขณะนั้น

การหาค่า  $max$  และ  $min$  ณ เวลาใดๆ พิจารณาได้ตามแผนภาพดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 การหาค่าสูงสุดและต่ำสุด เปรียบเทียบระหว่าง  $v_{sd}, v_{sq}$  และ 0

แบ่งได้เป็นกรณีต่างๆได้ดังนี้

$$\text{CASE}_1: \begin{array}{l} \max = v_{sd} \\ \min = 0 \end{array}$$

$$\text{CASE}_4: \begin{array}{l} \max = v_{sq} \\ \min = 0 \end{array}$$

$$\text{CASE}_2: \begin{array}{l} \max = v_{sd} \\ \min = v_{sq} \end{array}$$

$$\text{CASE}_5: \begin{array}{l} \max = v_{sq} \\ \min = v_{sd} \end{array}$$

$$\text{CASE}_3: \begin{array}{l} \max = 0 \\ \min = v_{sq} \end{array}$$

$$\text{CASE}_6: \begin{array}{l} \max = 0 \\ \min = v_{sd} \end{array}$$

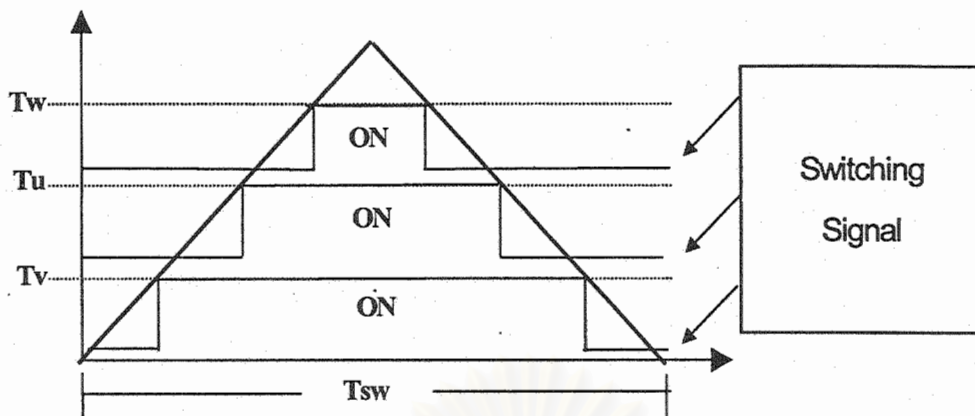
จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาแรงดันที่ต้องการให้แต่ละเฟสสร้างได้ จากนั้นเราจึงสามารถนำค่าแรงดันในแต่ละเฟสมาคำนวณหาระดับสัญญาณที่ใช้ในการกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการเปิดปิดสวิตช์ของแต่ละเฟส( $T_u, T_v, T_w$ )ได้ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะสามเหลี่ยมที่มีคาบเป็น  $T_{sw}$  ซึ่งแสดงเป็นสมการในแต่ละเฟสได้ดังสมการที่ 3.7 ถึง 3.9 ค่า ( $T_u, T_v, T_w$ ) ดังกล่าวนี้จะนำไปใช้เป็นระดับสัญญาณในการเปรียบเทียบกับตัวนับเวลาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะให้เอาท์พุทออกมาเป็นสัญญาณควบคุมการเปิดปิดของสวิตช์ดังแสดงในผังรูปที่ 3.7

$$T_u = \frac{T_{sw}}{2} - \left( \frac{V_U}{ed/2} \right) \left( \frac{T_{sw}}{2} \right) = \frac{T_{sw}}{2} \left( 1 - \frac{2V_U}{ed} \right) \quad (3.7)$$

$$T_v = \frac{T_{sw}}{2} - \left( \frac{V_V}{ed/2} \right) \left( \frac{T_{sw}}{2} \right) = \frac{T_{sw}}{2} \left( 1 - \frac{2V_V}{ed} \right) \quad (3.8)$$

$$T_w = \frac{T_{sw}}{2} - \left( \frac{V_W}{ed/2} \right) \left( \frac{T_{sw}}{2} \right) = \frac{T_{sw}}{2} \left( 1 - \frac{2V_W}{ed} \right) \quad (3.9)$$

เมื่อ  $ed$  คือ ขนาดแรงดันบัสไฟตรง



รูปที่ 3.7 การใช้ค่า  $T_u, T_v, T_w$  ในการเปรียบเทียบกับตัวนับเวลา

### 3.21 ข้อเปรียบเทียบการใช้เทคนิคการบวกแรงดันศูนย์

ในกรณีที่เรากำลังต้องการสร้างแรงดันที่ป้อนให้ชุดขดลวดทั้งสองให้มีขนาดเท่ากัน คือ มีค่ายอดเท่ากับ  $V_{peak}$  แต่มีเฟสต่างกัน  $\frac{\pi}{2}$  เรเดียน ตามความสัมพันธ์

$$v_{sd} = V_{peak} \cos(\omega t)$$

$$v_{sq} = V_{peak} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

- กรณีไม่ใช้เทคนิคการบวกแรงดันศูนย์ เมื่อเราควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานเป็นแบบกึ่งบริดจ์โดยให้เฟส U ของอินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันเป็นศูนย์เทียบกับจุดกึ่งกลางบัส และให้เฟส V สร้างแรงดันเป็น  $v_{sd}$  เฟส W สร้างแรงดันเป็น  $v_{sq}$  พบว่าต้องใช้แรงดันบัสไฟตรงสูงถึง  $2V_{peak}$  เป็นอย่างน้อยจึงจะเพียงพอในการสร้างแรงดันเพื่อจ่ายแก่ชุดขดลวดทั้งสอง

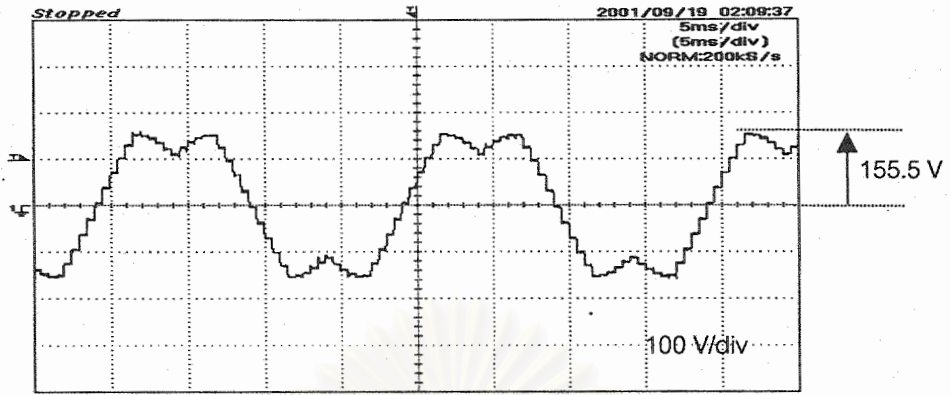
- กรณีใช้เทคนิคการบวกแรงดันศูนย์ที่ทุกเฟส จากความสัมพันธ์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าขนาดแรงดันศูนย์จะมีขนาดสูงสุดเท่ากับ  $0.5V_{peak}$  และแรงดันที่เฟส V และเฟส W มีขนาดสูงสุดเท่ากับ  $\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}}$  หรืออาจกล่าวได้ว่าต้องการใช้แรงดันบัสไฟตรงขนาดเท่ากับ  $\sqrt{2}V_{peak}$  ซึ่งพบว่าสามารถลดขนาดแรงดันบัสไฟตรงลงได้มากเมื่อเทียบกับแบบแรก

แนวคิดดังกล่าวสามารถทดสอบให้เห็นจริงได้โดยใช้ซอฟต์แวร์การคำนวณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อให้แรงดัน  $v_{sd} = 311 \cos(314.16t)$  และ  $v_{sq} = 311 \cos(314.16t - \frac{\pi}{2})$  สามารถวัดค่าแรงดันที่ต้องการให้แต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์สร้างได้ดังรูปที่ 3.8 รูป ก) แสดงแรงดันที่เฟส U หรือแรงดันศูนย์ รูป ข) แสดงแรงดันที่เฟส V รูป ค) แสดงแรงดันที่เฟส W จะเห็นว่าค่ายอดของแรงดันที่เฟส V และเฟส U มีขนาดเท่ากับ 220 V ดังนั้นจึงต้องการขนาดแรงดันบัสไฟตรงเพียง 440 V เท่านั้น ก็เพียงพอที่จะสร้างแรงดันได้ทุกเฟส แทนที่จะเป็น 622 V

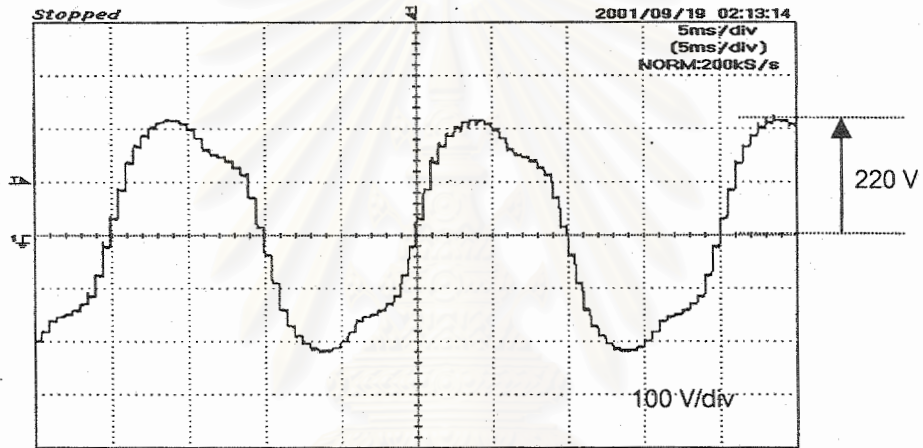
โดยสรุปแล้วกล่าวได้ว่าการใช้เทคนิคการบวกแรงดันศูนย์สามารถลดขนาดแรงดันบัลไฟตรงได้มาก จากผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ต้องการจ่ายให้กับขดลวดหลักมีขนาดใกล้เคียงกับแรงดันที่ต้องการจ่ายให้ขดลวดช่วยเนื่องจากอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดหลักและขดลวดช่วยมีค่าใกล้ 1 ( $n = 0.936$ ) และมีเฟสต่างกัน  $\frac{\pi}{2}$  เรเดียน ในการขึ้นแรงดันบัลไฟตรงเราจะให้มีขนาดเท่ากับ 600 V ซึ่งเพียงพอที่จะสร้างแรงดันให้กับขดลวดทั้งสองตลอดย่านการทำงาน



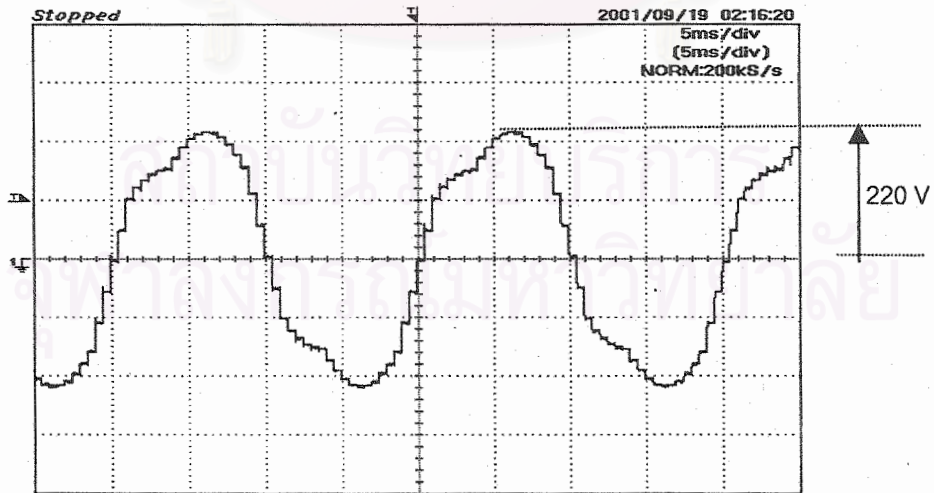
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) แรงดันเฟส U Time 5 ms/div



ข) แรงดันเฟส V Time 5 ms/div



ค) แรงดันเฟส W Time 5 ms/div

รูปที่ 3.8 แรงดันที่ต้องการสร้างในแต่ละเฟสจากการใช้เทคนิคการบวกแรงดันศูนย์



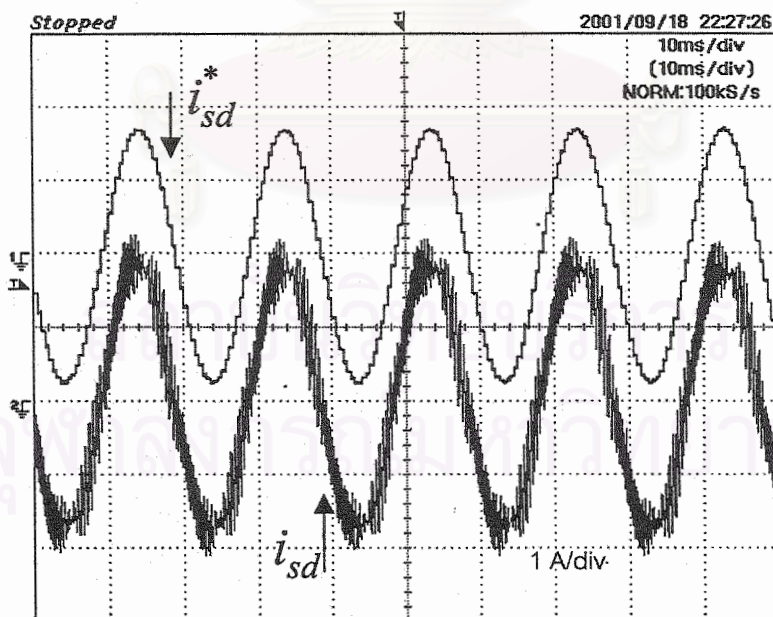
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบระบบ

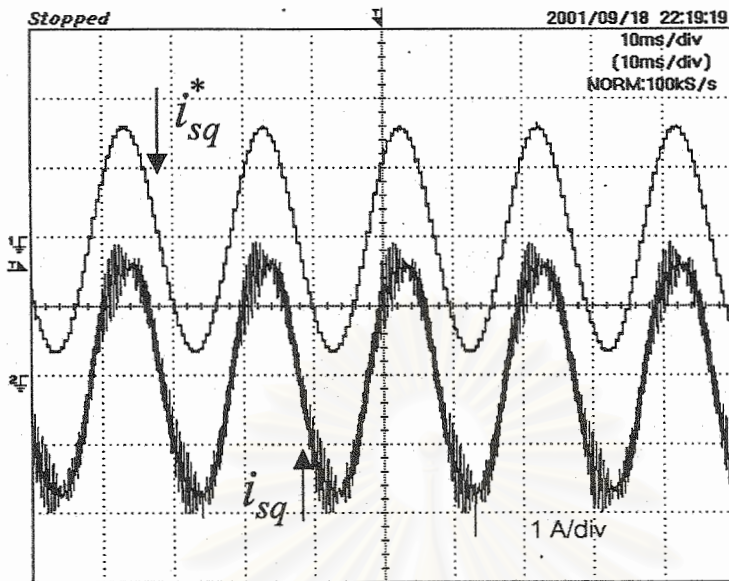
โดยอาศัยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ทั้งระบบที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในบทนี้เราได้ทำการทดสอบระบบจริงและได้ผลการทดลองของการทดสอบในสถานะต่างๆดังนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบในสถานะอยู่ตัว

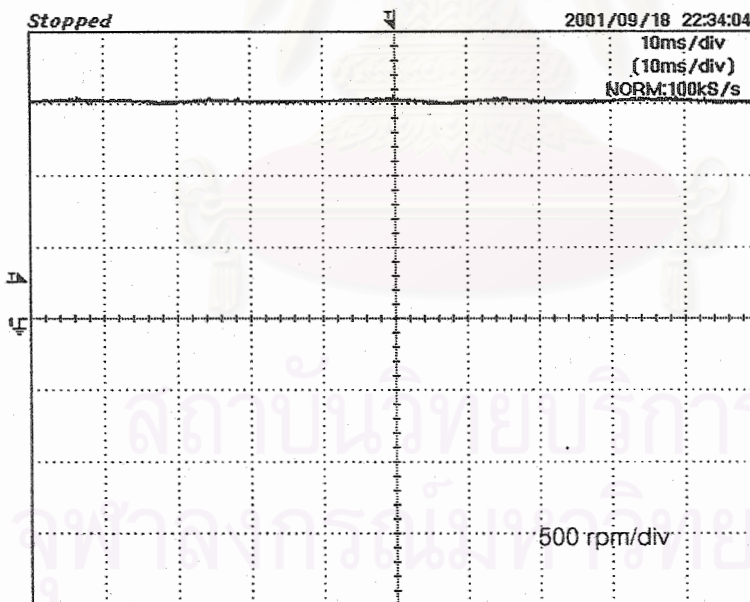
ผลการทดสอบการควบคุมกระแสและความเร็ว ที่ความเร็วคำสั่งค่าต่างๆ โดยไม่มีโหลด ได้ผลแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าเราสามารถควบคุมความเร็วได้โดยความเร็วมอเตอร์ จะเท่ากับค่าคำสั่งทุกค่าที่ต้องการ และกระแสของขดลวดหลักและกระแสขดลวดช่วยมีค่าโดยประมาณเท่ากับค่าคำสั่ง แสดงว่าการควบคุมแยกอิสระผ่านทางแรงดันทำงานได้ดีแม้จะไม่มีวงรอบการควบคุมกระแสก็ตาม แต่ก็มีปัญหาอยู่บ้างในย่านความเร็วต่ำกว่า 200 rpm (รูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.15) พบว่ากระแสของขดลวดทั้งสองมีค่าต่ำกว่าค่าคำสั่ง ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากผลของการประวิงเวลาระหว่างสวิทช์ตัวบนและสวิทช์ตัวล่างของอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันที่มอเตอร์ได้รับน้อยกว่าค่าคำสั่ง



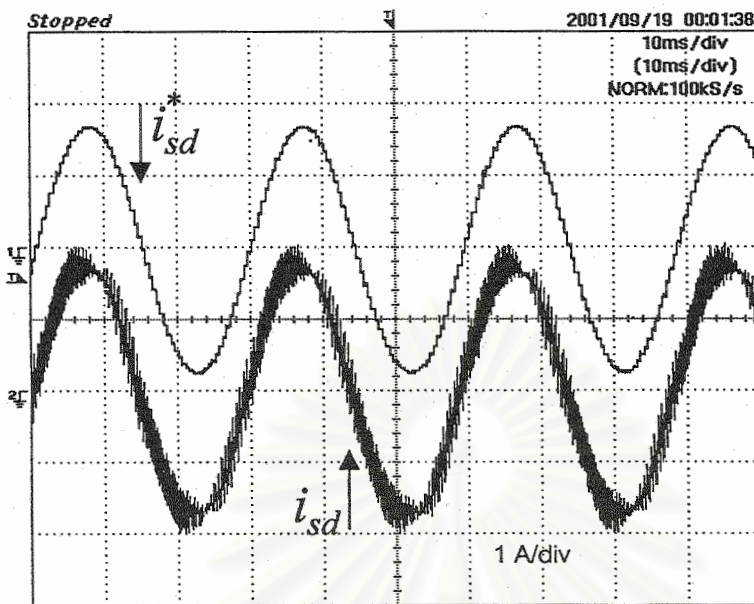
รูปที่ 4.1 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 1500 rpm



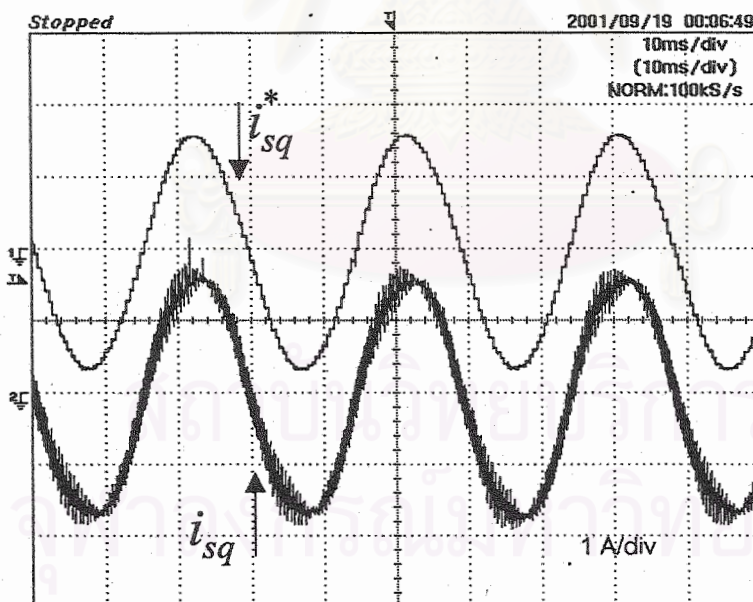
รูปที่ 4.2 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 1500 rpm



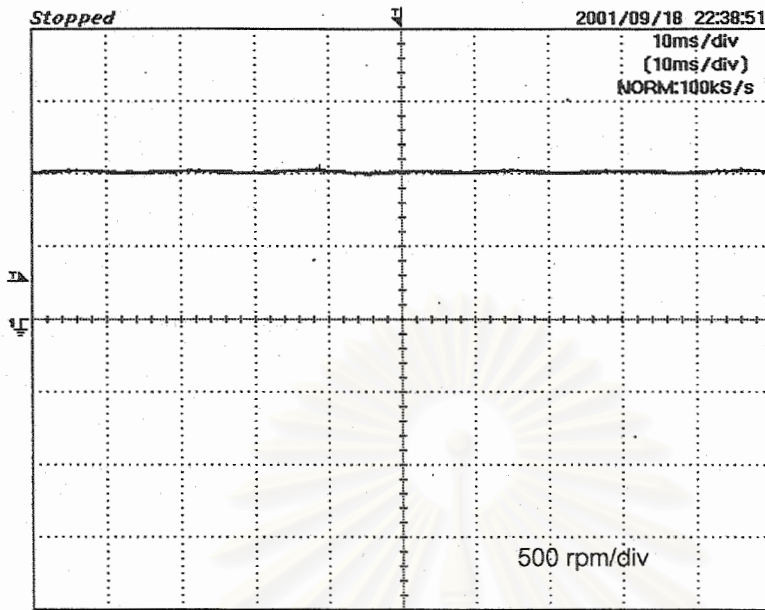
รูปที่ 4.3 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 1500 rpm



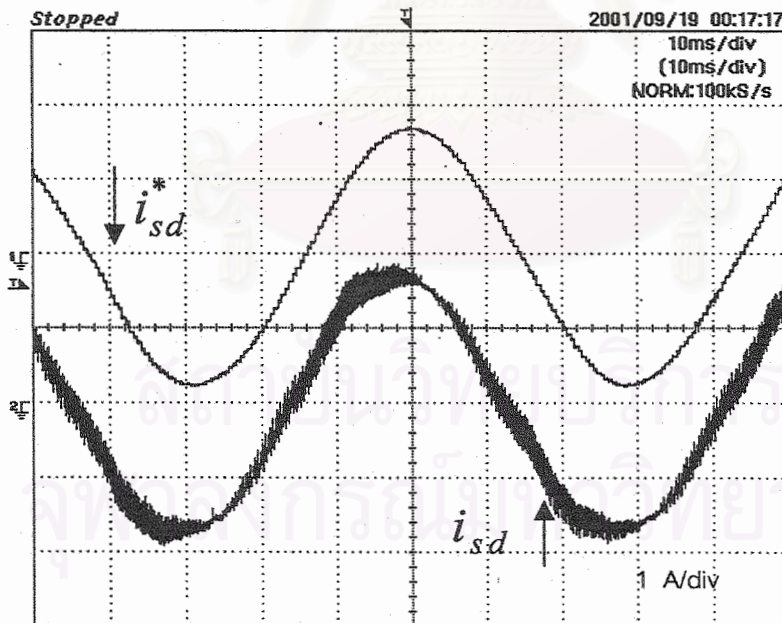
รูปที่ 4.4 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 1000 rpm



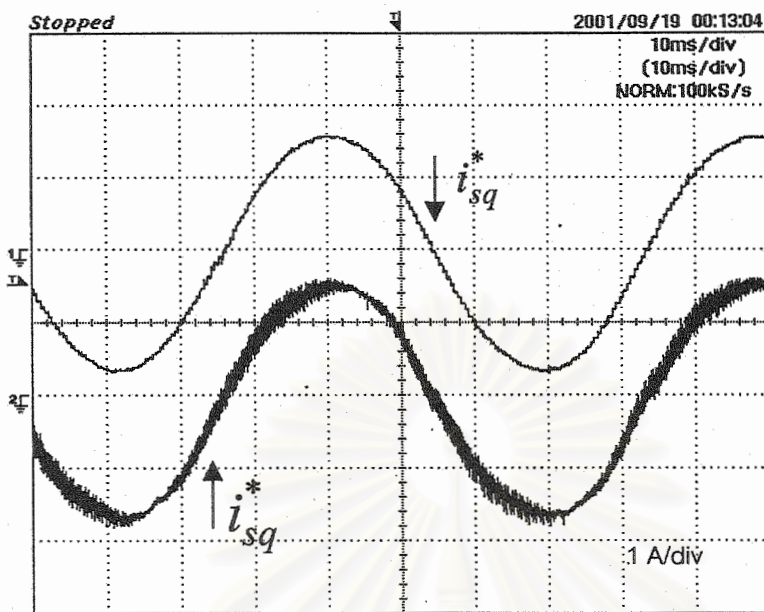
รูปที่ 4.5 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดช่วยที่ความเร็ว 1000 rpm



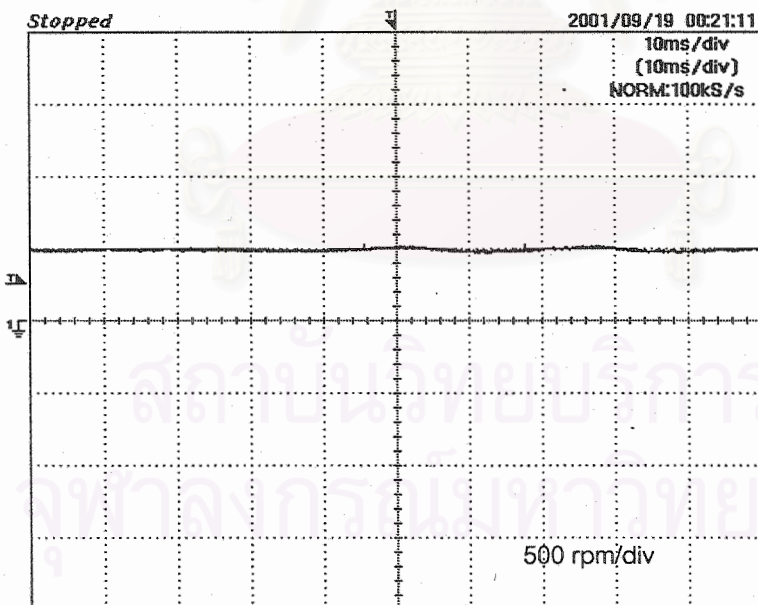
รูปที่ 4.6 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 1000 rpm



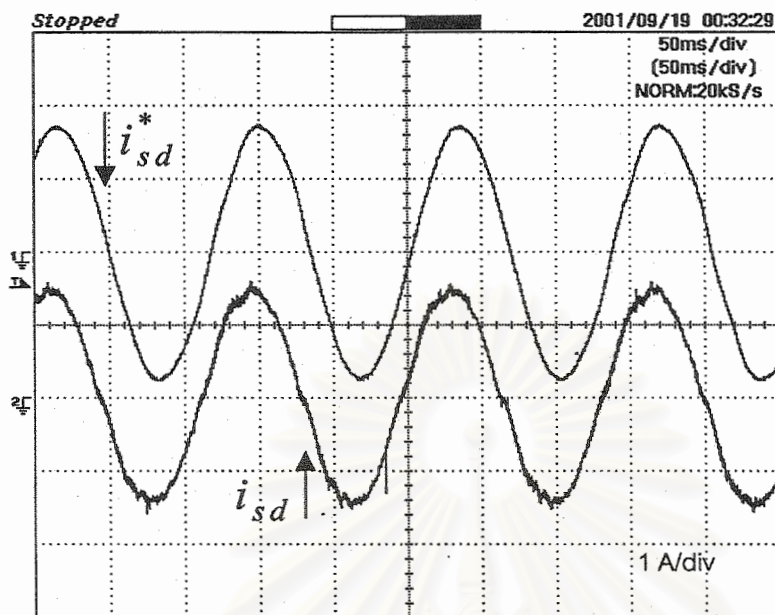
รูปที่ 4.7 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 500 rpm



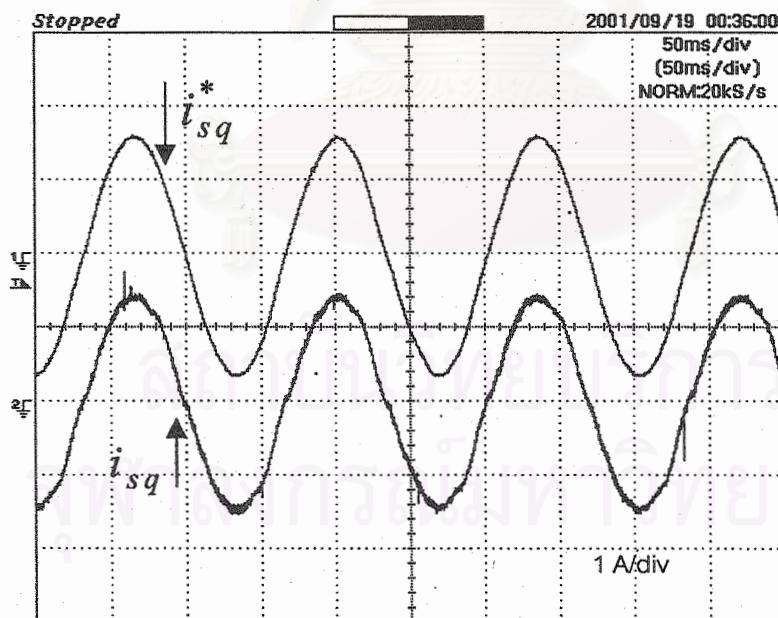
รูปที่ 4.8 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 500 rpm



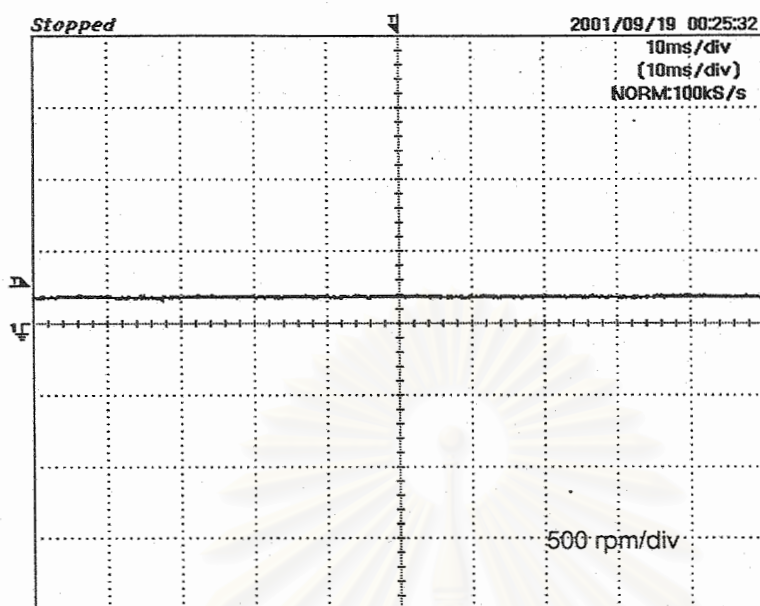
รูปที่ 4.9 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 500 rpm



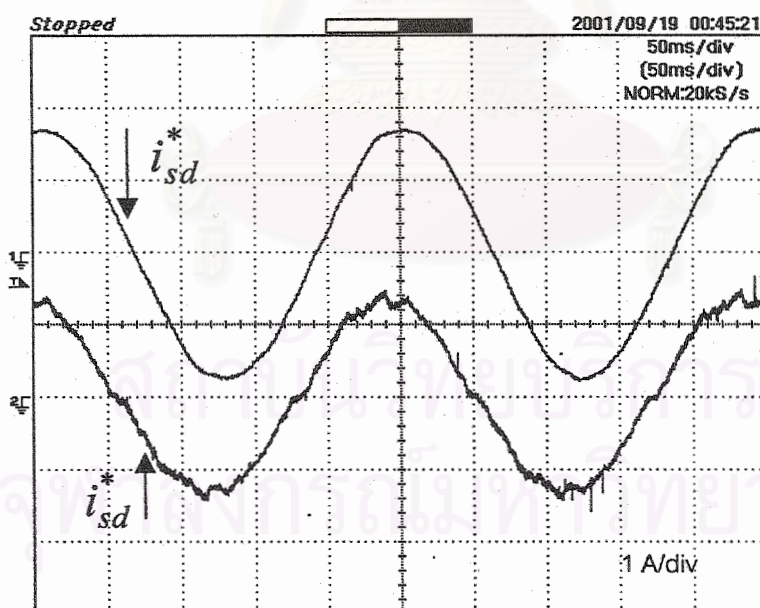
รูปที่ 4.10 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 200 rpm



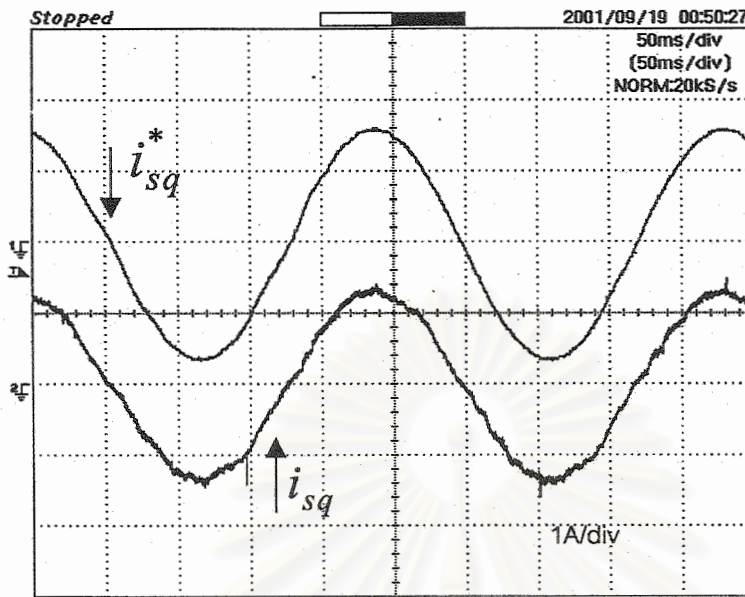
รูปที่ 4.11 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 200 rpm



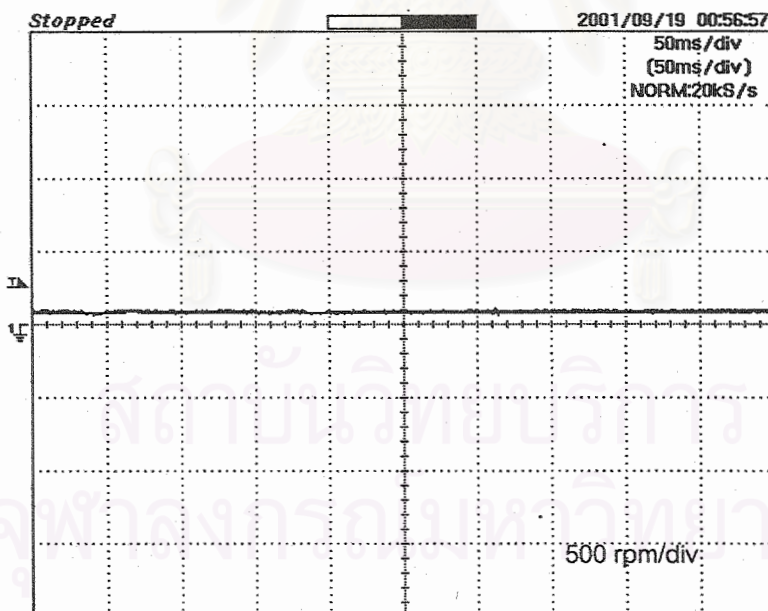
รูปที่ 4.12 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 200 rpm



รูปที่ 4.13 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักที่ความเร็ว 100 rpm



รูปที่ 4.14 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยที่ความเร็ว 100 rpm

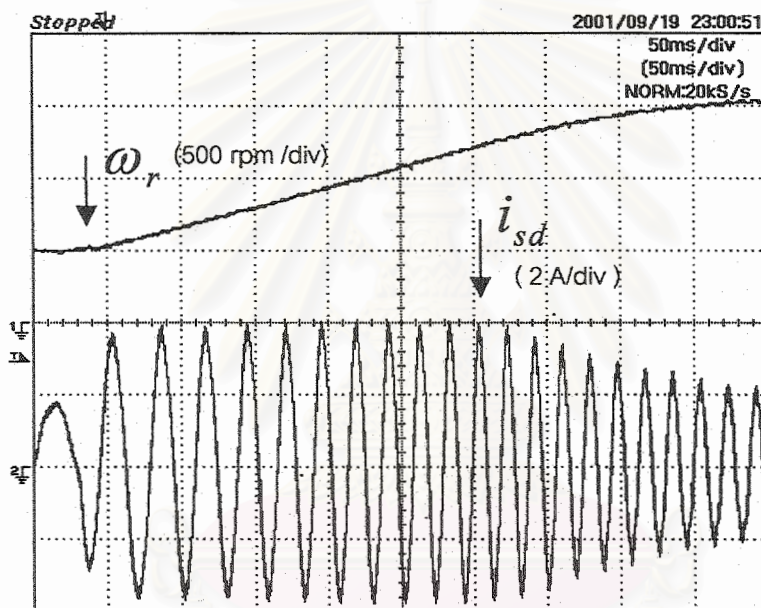


รูปที่ 4.15 ความเร็วรอบที่วัดได้ขณะความเร็วคำสั่ง 100 rpm



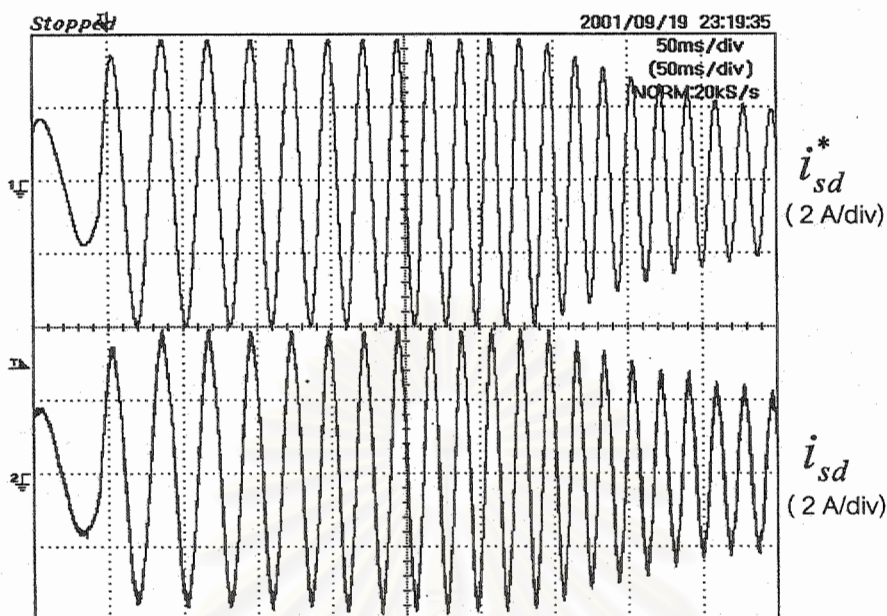
#### 4.2 ผลการทดสอบขณะมีการเร่งความเร็วจาก 500rpm เป็น 1500 rpm

ผลการทดสอบขณะมีการเร่งความเร็วจาก 500 rpm ไปยัง 1500 rpm แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ถึง รูปที่ 4.18 จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วเข้าหาค่าคำสั่งได้ดี พิจารณาในช่วงแรกขณะที่แรงบิดที่คำนวณได้จากตัวควบคุมแบบ PI เป็นค่าแรงบิดสูงสุดที่ได้ตั้งไว้ จะสังเกตเห็นความเร็วมีการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น แสดงว่าเราสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ให้คงที่ได้ตามคำสั่ง จากรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 จะสังเกตเห็นว่ากระแสของขดลวดทั้งสองชุดมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสคำสั่งมาก แสดงว่าเราสามารถควบคุมกระแสได้ดีเช่นกันแม้ในขณะมีการเร่งความเร็ว

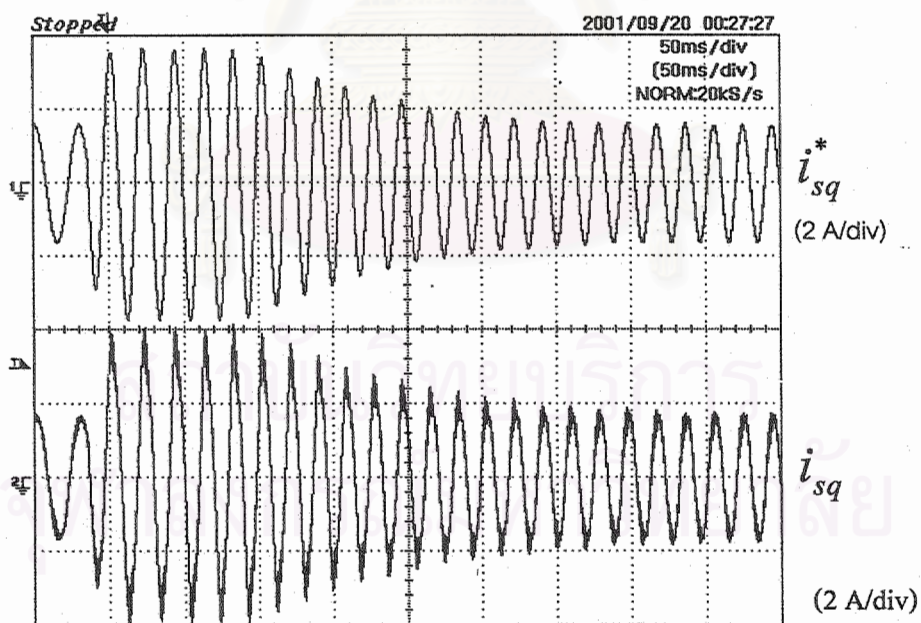


รูปที่ 4.16 ความเร็วและกระแสของขดลวดหลักขณะเร่งความเร็ว 500->1500 rpm

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



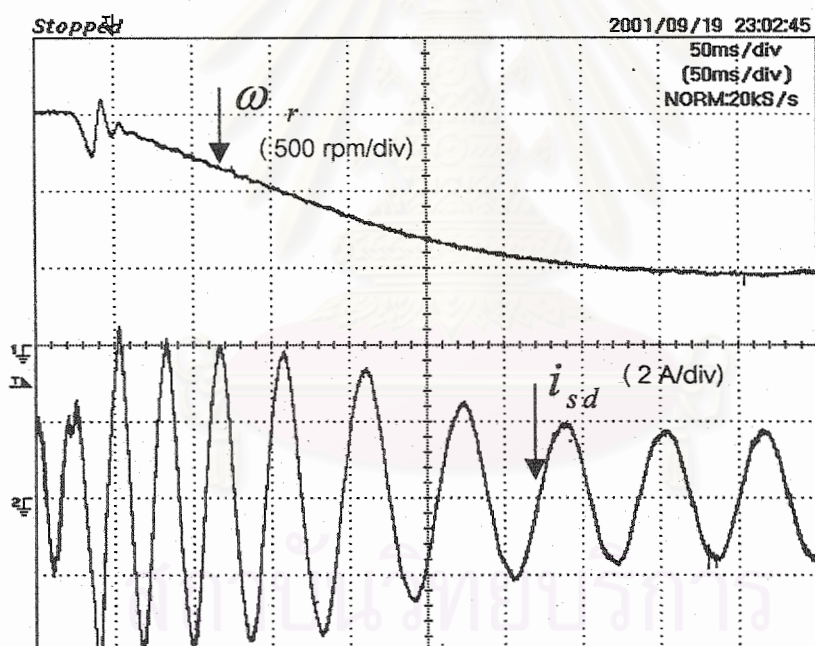
รูปที่ 4.17 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักขณะเร่งความเร็ว 500->1500 rpm



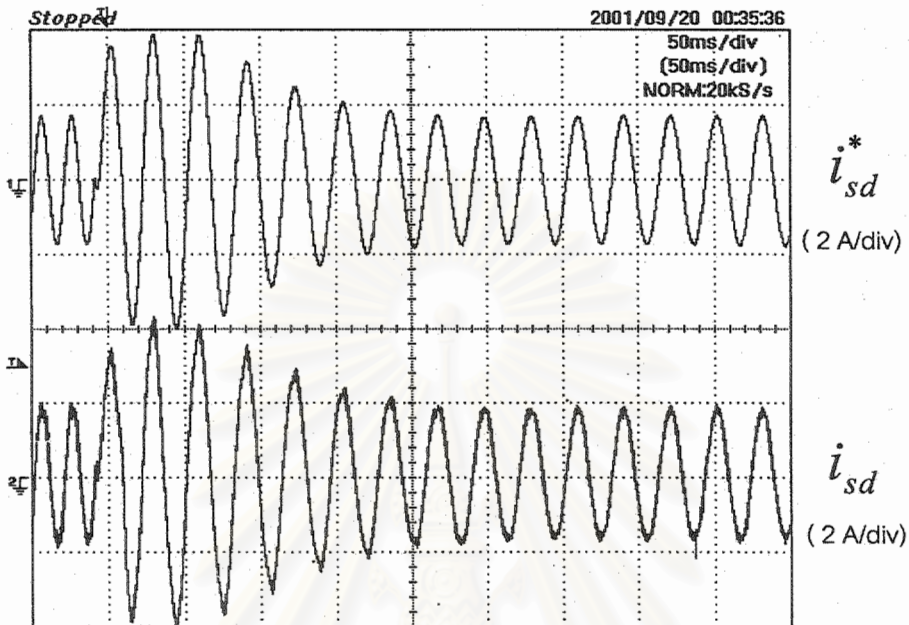
รูปที่ 4.18 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยขณะเร่งความเร็ว 500->1500 rpm

#### 4.3 ผลการทดสอบขณะมีการลดความเร็วจาก 1500rpm เป็น 500 rpm

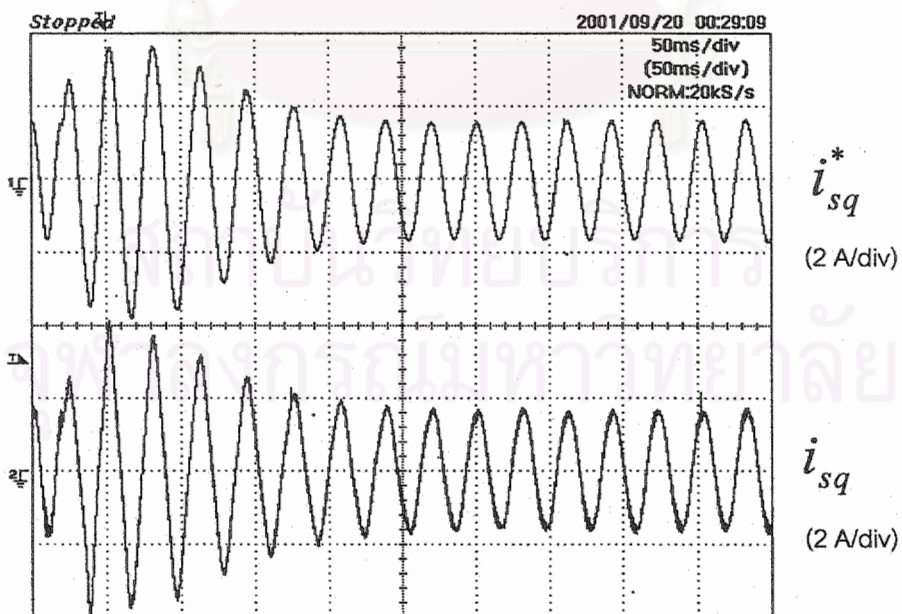
ผลการทดสอบขณะมีการลดความเร็วจาก 1500 rpm ไปยัง 500 rpm แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.21 จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าความเร็วเข้าหาค่าคำสั่งได้ดีเหมือนกับในกรณีเร่งความเร็ว แต่เวลาในการตอบสนองจะสั้นกว่าเพราะมีแรงต้านทานทางกลช่วยเสริมแรงแรงบิดที่มอเตอร์สร้างด้วย พิจารณาในช่วงแรกขณะที่แรงบิดที่คำนวณได้จากตัวควบคุมแบบ PI เป็นค่าแรงบิดสูงสุดที่ได้ตั้งไว้ จะสังเกตเห็นความเร็วมีการลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น แสดงว่าเราสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ให้คงที่ได้ตามคำสั่ง จากรูปที่ 4.20 และ รูปที่ 4.21 จะสังเกตเห็นว่ากระแสของขดลวดทั้งสองขดมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสคำสั่งมาก แสดงว่าเราสามารถควบคุมกระแสได้ขณะมีการลดความเร็ว



รูปที่ 4.19 ความเร็วและกระแสของขดลวดหลักขณะลดความเร็ว 1500->500 rpm



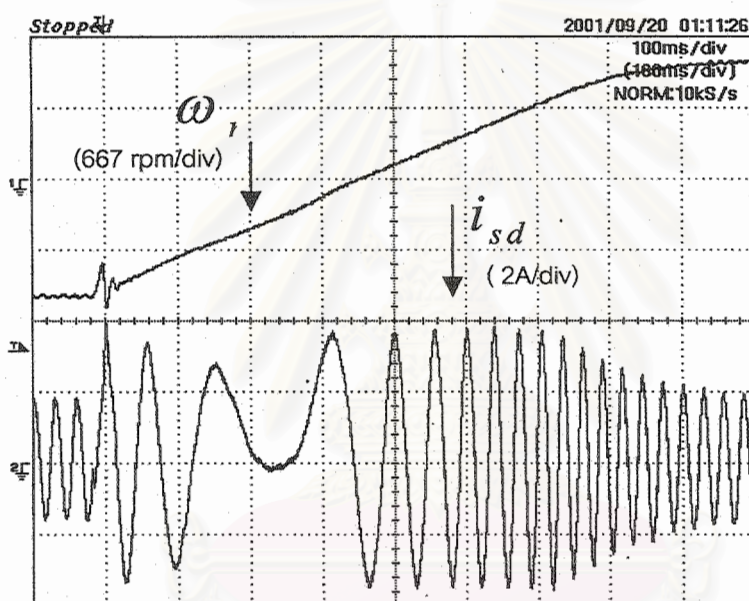
4.20 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักขณะลดความเร็ว 1500 → 500 rpm



4.21 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยขณะลดความเร็ว 1500 → 500 rpm

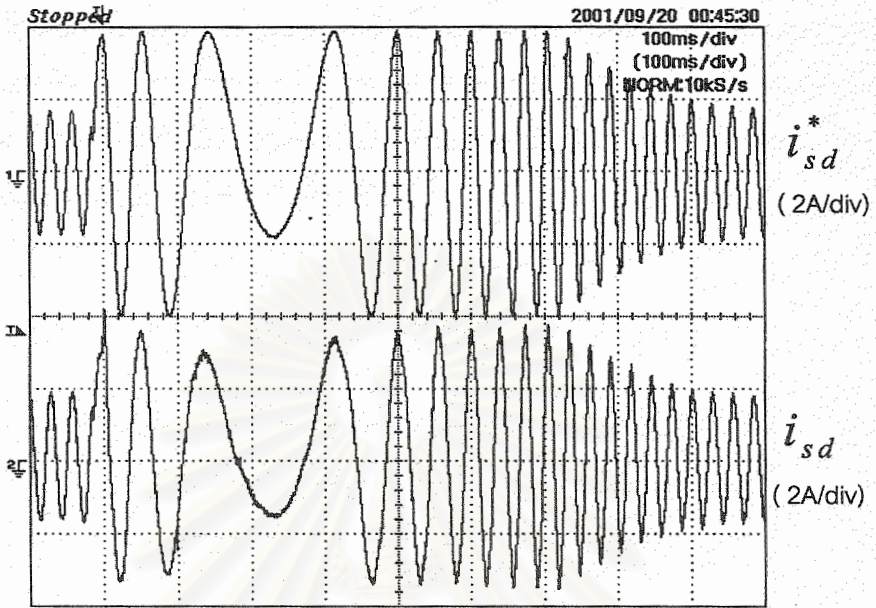
#### 4.4 ผลการทดสอบขณะมีการกลับทิศความเร็วจาก -1000 rpm ไปยัง 1000 rpm

ผลการทดสอบขณะมีการกลับทิศความเร็วจาก -1000 rpm ไปยัง 1000 rpm แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 ถึง รูปที่ 4.25 จะเห็นว่า การเพิ่มของความเร็วค่อนข้างเป็นเชิงเส้น แสดงว่าแรงบิดค่อนข้างคงที่ จะมีความผิดเพี้ยนไปในตอนขณะความถี่ต่ำ เนื่องจากการลดลงของกระแสจริงที่ต่ำกว่าค่าคำสั่งในช่วงความถี่ต่ำ อันมาจากผลของการประวิงเวลาระหว่างสวิตซ์ตัวบนและสวิตซ์ตัวล่างของอินเวอร์เตอร์

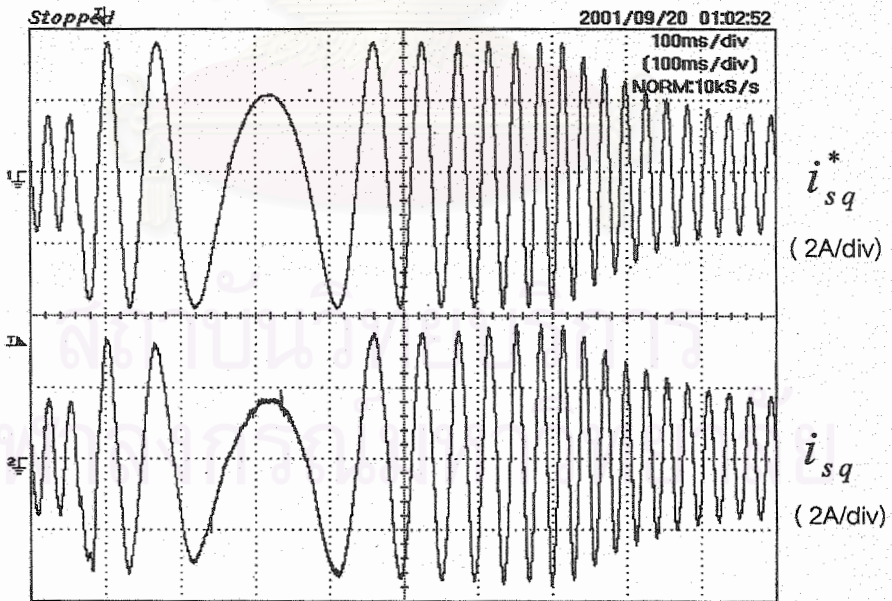


รูปที่ 4.22 ความเร็วและกระแสของขดลวดหลักขณะกลับทิศความเร็ว -1000 → 1000 rpm

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



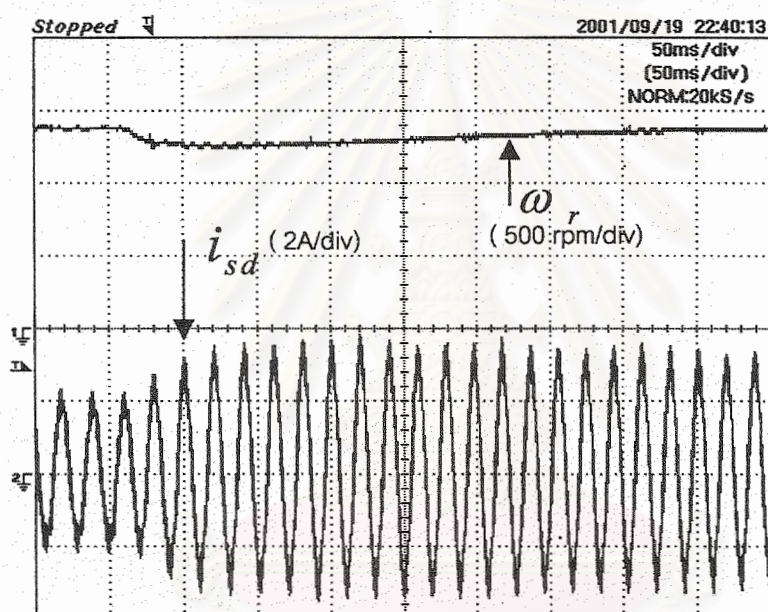
รูปที่ 4.23 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักขณะกลับทิศความเร็ว  
-1000 rpm -> 1000 rpm



4.24 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยขณะกลับทิศความเร็ว  
-1000 rpm -> 1000 rpm

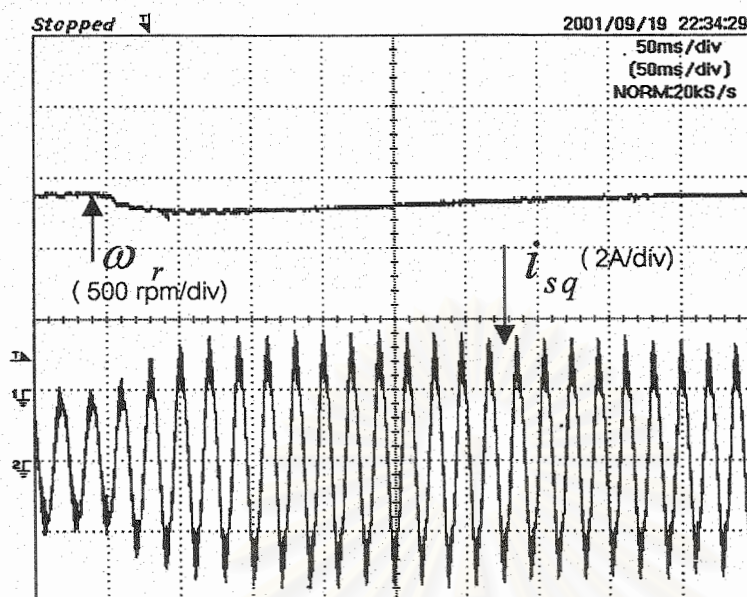
#### 4.5 ผลการทดสอบขณะมีการป้อนโหลดพิกัดแบบขั้นที่ความเร็ว 1360 rpm

รูปที่ 4.25 ถึง รูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของกระแสและเวลาในการคืนสู่ค่าความเร็วปกติของระบบเมื่อมีการเพิ่มโหลดพิกัดแบบขั้น จากรูปจะเห็นว่าระบบมีความเร็วในการตอบสนองต่อต่อคำสั่งและโหลดสูง (เวลาในการคืนสู่ความเร็วปกติ ประมาณ 400 ms) และค่าการเสถียรของขดลวดทั้งสองมีค่าตามคำสั่งได้ดี

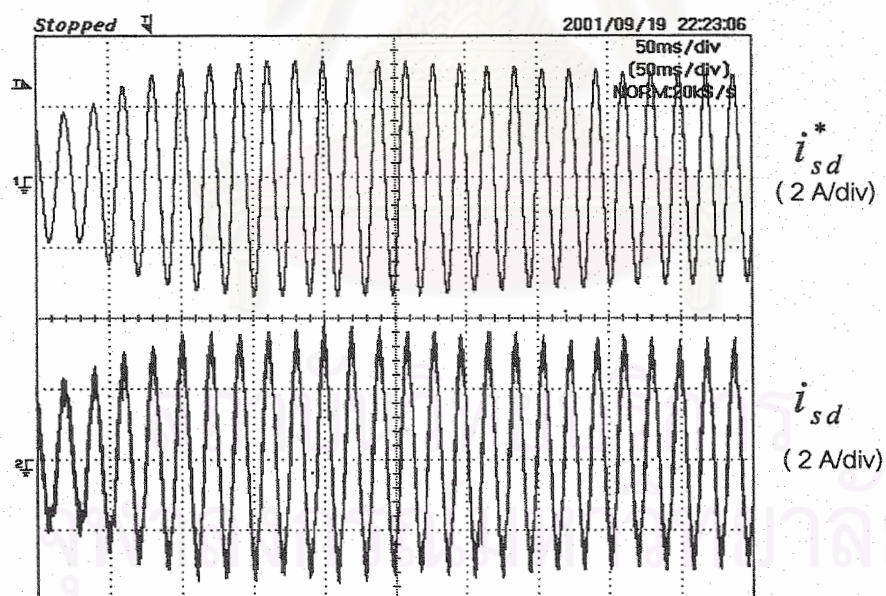


รูปที่ 4.25 ความเร็วและกระแสขดลวดหลักขณะมีการป้อนโหลดพิกัดแบบขั้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

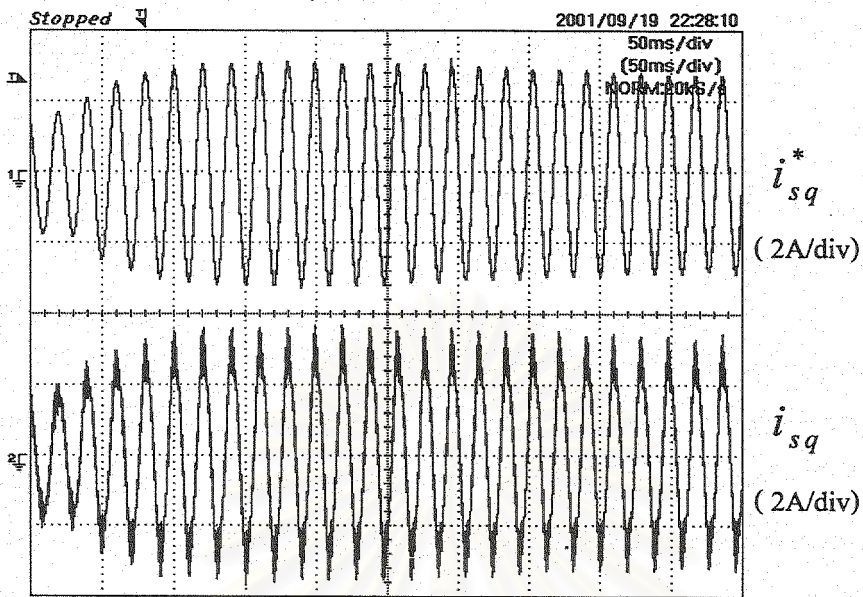


รูปที่ 4.26 ความเร็วและกระแสควดช่วยขณะมีการป้อน โหลดพิกัดแบบขั้น



รูปที่ 4.27 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดหลักขณะมีการป้อน โหลดพิกัดแบบขั้น





รูปที่ 4.28 กระแสคำสั่งและกระแสจริงของขดลวดช่วยขณะมีการป้อน โหลดพิกัดแบบขั้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา ออกแบบและสร้างระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยใช้วิธีการควบคุมเวกเตอร์แบบแยกอิสระ ได้มีการชดเชยผลจากความไม่สมมาตรของค่าพารามิเตอร์ของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองชุด ทำให้ขนาดของโรเตอร์ฟลักซ์และแรงบิดของมอเตอร์ถูกควบคุมได้ตามต้องการโดยไม่มีการแกว่ง ค่ากระแสสเตเตอร์ที่เหมาะสมที่ต้องการจ่ายให้แก่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยทั้งสองชุดซึ่งกระแสสเตเตอร์ในส่วนสร้างฟลักซ์และแรงบิดจะถูกควบคุมผ่านค่าแรงดันด้วยวิธีการควบคุมแบบแยกอิสระ ผลการจำลองการทำงานและผลการทดสอบจากระบบจริงแสดงให้เห็นว่าความเร็วและกระแสของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองชุดสามารถถูกควบคุมได้ตามต้องการโดยไม่ต้องมีวงรอบควบคุมกระแส

ในการทดสอบระบบจริง ผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานของระบบควบคุมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ขนาด 220 V 370 W โดยระบบควบคุมทั้งหมดเขียนด้วยภาษาแอสเซมบลีบนไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากเราไม่ต้องการตรวจสอบกระแสในวงจรควบคุมทำให้ขนาดของฮาร์ดแวร์มีความกระทัดรัด นอกจากนั้นในส่วนของการสร้างแรงดันPWM เรายังมีการนำเสนอเทคนิคการบวกแรงดันศูนย์ให้กับแรงดันคำสั่งในทุกเฟสของอินเวอร์เตอร์ ทำให้สามารถลดขนาดของแรงดันบัลไฟตรงที่ต้องใช้ลงได้มาก

#### 5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

จากผลการทดสอบระบบขณะที่มอเตอร์ถูกขับเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสที่ผ่านขดลวดทั้งสองชุดของสเตเตอร์มีค่าน้อยกว่าค่าคำสั่ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการประวิงเวลาระหว่างสวิตช์ตัวบนกับสวิตช์ตัวล่างของอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันที่สร้างได้จากอินเวอร์เตอร์มีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นการชดเชยผลของการประวิงเวลาก็เป็นข้อเสนอแนะหนึ่งในการปรับปรุงสำหรับการวิจัยในครั้งต่อไป และในส่วนของการตรวจจับค่าความเร็วเพื่อใช้ในการป้อนกลับ เนื่องจากการวิจัยนี้มีการใช้ตัวตรวจจับความเร็วที่มีขีดจำกัดในกรณีที่ต้องการวัดค่าความเร็วในช่วงกว้าง อีกทั้งยังมีราคาที่สูงและต้องมีการติดตั้งทางกลซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นแนวคิดในการพัฒนาระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ที่ปราศจากตัวตรวจจับความเร็วก็เป็นอีกแนวคิดหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เพิ่มศักดิ์ สุขศิริ, “วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเสมือนต่อแบบวี ที่มีค่าความเพี้ยนของกระแสด้านเข้าต่ำ”  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.  
โสภณ สมัยรัฐ, “ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์”  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

### ภาษาอังกฤษ

- A.E. Fitzgerald, Stephen D. Umans, “Electric Machinery”, Fourth Edition, Mc Graw Hill, 1985  
E.R. Collins Jr., A.B. Puttgen, “Single-phase induction motor adjustable speed drive: Direct phase angle control of the auxiliary winding supply”, in Conf. Rec. of IEEE, IAS Annual Meeting 1988, pp. 246-252.  
M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, “Field Oriented Control of a Single-phase Induction Motor Drive”  
Conf. Rec. of PESC'98, Vol.2, 1998, pp. 990-996.  
S. Sangwongwahich, S. Suwankawin, “A Speed-Sensorless IM Drive with Modified Decoupling Control”, *Proc. of PCC-Nagaoka*, Vol.1, 1997, pp. 85-90.  
S. Suwankawin, S. Sangwongwanich, “Stability Analysis of Speed-Sensorless Vector Control System”, *Proc. of IPEC-Korea*, 1995, pp. 403-408.  
W. Leonhard, “Control of Electrical Drives”, Springer-verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 1985.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

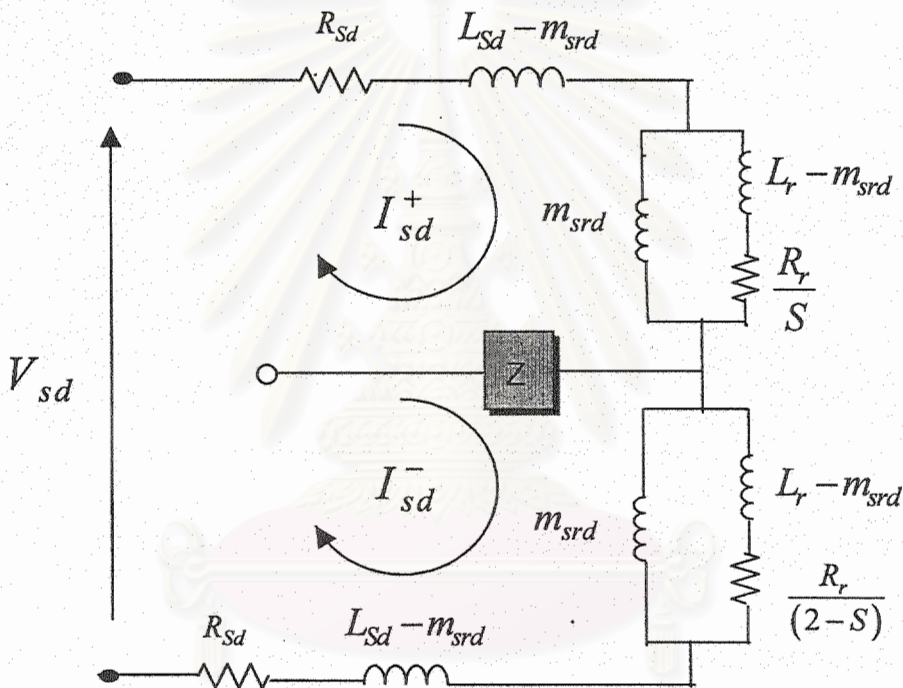
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

ก.1) วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

สามารถหาวงจรมูลของขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสกรณีอีกขดหนึ่งเปิดวงจรได้โดยอาศัยทฤษฎีสนามหมุน (revolving-field theory) จากรูปที่ ก.1 แสดงวงจรมูลของขดลวดหลักในกรณีที่มีการจ่ายไฟให้ขดลวดทั้งสองของมอเตอร์



รูปที่ ก.1 วงจรมูลของขดลวดหลัก

จากรูป ก.1 จะเห็นว่า กระแสไฟสลับจะมีสองส่วนด้วยกันดังนี้คือ

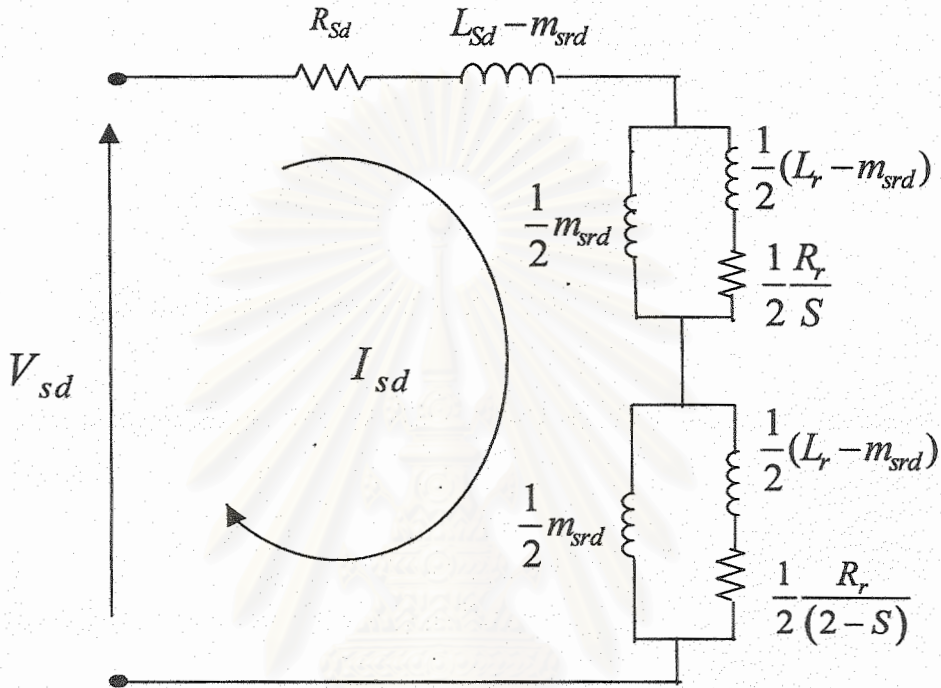
$I_{sd}^+$  คือ กระแสที่สร้างสนามหมุนไปข้างหน้า ( forward revolving field )

$I_{sd}^-$  คือ กระแสที่สร้างสนามหมุนย้อนกลับ ( backward revolving field )

ในกรณีที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดหลักเพียงขดเดียวส่วนขดลวดช่วยเปิดวงจร จะทำให้  $I_{sd}^+ = I_{sd}^-$  กระแสจะไม่ผ่านอิมพีแดนซ์ Z ในวงจร

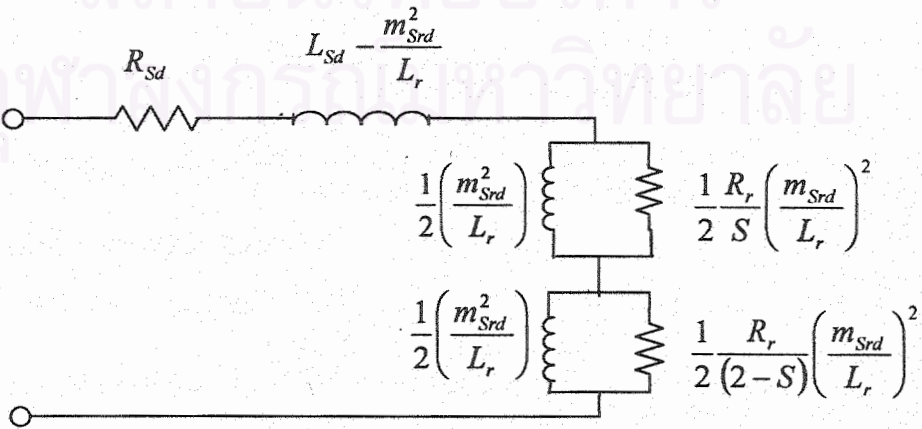
กระแสที่ผ่านขดหลัก  $I_{sd} = I_d^+ + I_d^- = 2I_d^+$

จะเห็นได้ว่าถ้าขนาดแรงดันที่จ่ายเท่ากัน กรณีจ่ายไฟเข้าเพียงขดลวดเพียงขดเดียวกระแสจะมีขนาดเป็นสองเท่าของการจ่ายไฟเข้าทั้งสองขดลวด ซึ่งก็เปรียบเสมือนว่าวงจรสมมูลกรณีจ่ายไฟเพียงขดลวดหลักขดเดียวค่าอิมพีแดนซ์ที่ทุกตัวของวงจรจะเป็นครึ่งหนึ่งของวงจรในรูป ก.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.2

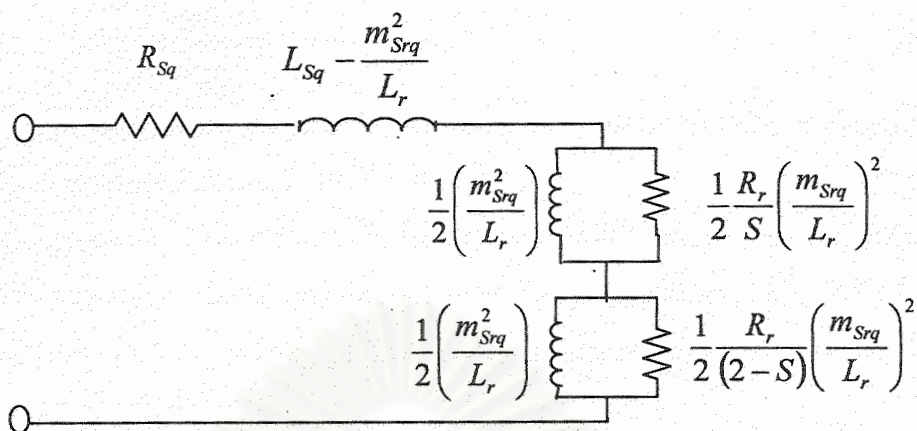


รูปที่ ก.2 วงจรสมมูลของขดลวดหลัก กรณีจ่ายไฟเข้าขดหลักเพียงขดเดียว

โดยอาศัยการคำนวณจากกฎแรงดัน(KVL) ในวงจรรูปที่ ก.2 เราสามารถหาวงจรที่สมมูลกัน โดยรวมเอาความเหนี่ยวนำรั่วไหลทั้งหมดไว้ทางด้านสเตเตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ ก.3 สำหรับใน ส่วนของขดลวดช่วยก็สามารถหาได้ในทำนองเดียวกันดังแสดงได้ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.3 วงจรสมมูลของขดลวดหลัก กรณีขดลวดช่วยเปิดวงจร



รูปที่ ก.4 วงจรสมมูลของขดลวดช่วย กรณีขดลวดหลักเปิดวงจร

จากวงจรสมมูลที่ได้จะพบว่าคุณสมบัติของวงจรขึ้นกับค่า  $S$  คือสลลิปซึ่งขึ้นกับความเร็วของโรเตอร์โดยที่

$$S = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ  $\omega$  คือความถี่เชิงมุมของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์

#### ก.2) การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์โดยการทดสอบ

จากวงจรสมมูลของขดลวดทั้งสองขด เราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลซึ่งขึ้นกับค่าสลลิป  $S$  ได้ดังนี้

[1] ค่าอิมพีแดนซ์ที่ขดลวดหลัก  $Z_d(S)$

$$Z_d(S) = R_d(S) + j X_d(S)$$

$$R_d(S) = R_{sd} + 0.5 \omega^2 \tau_r \frac{m_{srd}^2}{L_r} \left( \frac{S}{1 + \tau_r^2 \omega^2 S^2} + \frac{(2-S)}{1 + \tau_r^2 \omega^2 (2-S)^2} \right) \quad (\text{ก.2})$$

$$X_d(S) = \omega L_{sd} + 0.5 \omega \frac{m_{srd}^2}{L_r} \left( \frac{1}{1 + \tau_r^2 \omega^2 S^2} + \frac{1}{1 + \tau_r^2 \omega^2 (2-S)^2} - 2 \right) \quad (\text{ก.3})$$

[2] ค่าอิมพีแดนซ์ที่ขดลวดช่วย  $Z_q(S)$

$$Z_q(S) = R_q(S) + j X_q(S)$$

$$R_q(S) = R_{sq} + 0.5 \omega^2 \tau_r \frac{m_{srq}^2}{L_r} \left( \frac{S}{1 + \tau_r^2 \omega^2 S^2} + \frac{(2-S)}{1 + \tau_r^2 \omega^2 (2-S)^2} \right) \quad (\text{ก.4})$$

$$X_q(S) = \omega L_{sq} + 0.5 \omega \frac{m_{srq}^2}{L_r} \left( \frac{1}{1 + \tau_r^2 \omega^2 S^2} + \frac{1}{1 + \tau_r^2 \omega^2 (2-S)^2} - 2 \right) \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่

$$\tau_r = \frac{R_r}{L_r} \quad (ก.6)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (ก.2) ถึงสมการที่ (ก.6) เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ได้ จากการทดสอบมอเตอร์ตามวิธีต่างๆ ดังนี้

1) DC test ทดสอบโดยการจ่ายแรงดันไฟตรงแก่ขดลวดที่ต้องการทดสอบ ค่อยๆ เพิ่มแรงดันจนกระแสที่ผ่านขดลวด เท่ากับกระแสพิภักของขดลวด วัดค่าแรงดันไฟตรง ( $V_{ddc}$  หรือ  $V_{qdc}$ ) และ กระแสที่ผ่านขดลวด ( $I_{ddc}$  หรือ  $I_{qdc}$ ) อัตราส่วนของแรงดันและกระแสที่ได้คือค่าความต้านทานของขดลวด ตามสมการต่อไปนี้

$$R_{sd} = \frac{V_{ddc}}{I_{ddc}} \quad (ก.7)$$

$$R_{sq} = \frac{V_{qdc}}{I_{qdc}} \quad (ก.8)$$

2) No load test ป้อนแรงดันไฟสลับให้กับขดลวดที่ต้องการทดสอบ โดยให้มอเตอร์หมุนตัวเปล่าไม่มีโหลด (S มีค่าประมาณ 0) เพิ่มแรงดันจนกระทั่งแรงดันคร่อมขดลวดเท่ากับแรงดันพิภัก จากการวัดค่าแรงดันไฟสลับ ( $V_{dnl}$  หรือ  $V_{qnl}$ ) กระแสไฟสลับ ( $I_{dnl}$  หรือ  $I_{qnl}$ ) ที่ผ่านขดลวดและกำลังสูญเสีย ( $P_{dnl}$  หรือ  $P_{qnl}$ ) ที่เกิดขึ้น เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล ( $R_{dnl}, R_{qnl}$ ) และรีแอกแตนซ์สมมูล ( $X_{dnl}, X_{qnl}$ ) ของขดลวดในกรณีที่  $S=0$  ได้จากความสัมพันธ์

$$R_{dnl} = \frac{P_{dnl}}{I_{dnl}^2} \quad (ก.9)$$

$$R_{qnl} = \frac{P_{qnl}}{I_{qnl}^2} \quad (ก.10)$$

$$X_{dnl} = \frac{\sqrt{(V_{dnl} I_{dnl})^2 - P_{dnl}^2}}{I_{dnl}^2} \quad (ก.11)$$

$$X_{qnl} = \frac{\sqrt{(V_{qnl} I_{qnl})^2 - P_{qnl}^2}}{I_{qnl}^2} \quad (ก.12)$$

3) Lock rotor test ยึดโรเตอร์ให้อยู่นิ่ง ( $S=1$ ) ป้อนแรงดันไฟสลับให้กับขดลวดที่ต้องการทดสอบ เพิ่มแรงดันจนกระแสที่ผ่านขดลวดเท่ากับกระแสพิภักของขดลวด จากการวัดค่าแรงดันไฟสลับ ( $V_{dlr}$  หรือ  $V_{qlr}$ ) กระแสไฟสลับ ( $I_{dlr}$  หรือ  $I_{qlr}$ ) ที่ผ่านขดลวด และ กำลังสูญเสีย ( $P_{dlr}$  หรือ  $P_{qlr}$ ) ที่เกิดขึ้น เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล ( $R_{dlr}, R_{qlr}$ ) และรีแอกแตนซ์สมมูล ( $X_{dlr}, X_{qlr}$ ) ของขดลวดในกรณี  $S=1$  ได้จากความสัมพันธ์

$$R_{dlr} = \frac{P_{dlr}}{I_{dlr}^2} \quad (ก.13)$$



$$R_{qlr} = \frac{P_{qlr}}{I_{qlr}^2} \quad (ก.14)$$

$$X_{dlr} = \frac{\sqrt{(V_{dlr} I_{dlr})^2 - P_{dlr}^2}}{I_{dlr}^2} \quad (ก.15)$$

$$X_{qlr} = \frac{\sqrt{(V_{qlr} I_{qlr})^2 - P_{qlr}^2}}{I_{qlr}^2} \quad (ก.16)$$

### ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส  $220V_{rms}$   $2.7A_{rms}$   $50Hz$  2 คู่ขั้ว

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ  $50Hz$  ดังนั้นความถี่เชิงมุม  $\omega = 314.14 \text{ rad/sec}$

ความเร็วซิงโครนัส เท่ากับ  $1500 \text{ rpm}$

กระแสพิคที่ขดลวดหลักเท่ากับ  $2.19A_{rms}$

กระแสพิคที่ขดลวดช่วยเท่ากับ  $1.88A_{rms}$

### การทดสอบที่ขดลวดหลัก

#### DC test

$$V_{ddc} = 27.13 \text{ V}$$

$$I_{ddc} = 2.17 \text{ A}$$

จากสมการที่ (ก.7) คำนวณได้ว่า  $R_{sd} = 12.5\Omega$

No load test ขณะทดสอบวัดความเร็วรอบได้  $1479 \text{ rpm}$  ดังนั้น ค่า Slip  $S = 0.014$

$$V_{dnl} = 207.7 \text{ V}$$

$$I_{dnl} = 2.17 \text{ A}$$

$$P_{dnl} = 143.9 \text{ W}$$

จากสมการที่ (ก.9) คำนวณได้ว่า  $R_{dnl} = 30.55 \Omega$

จากสมการที่ (ก.11) คำนวณได้ว่า  $X_{dnl} = 90.7 \Omega$

#### lock rotor test Slip $S=1$

$$V_{dlr} = 84.08 \text{ V}$$

$$I_{dlr} = 2.18 \text{ A}$$

$$P_{dlr} = 152.5 \text{ W}$$

จากสมการที่ (ก.13) คำนวณได้ว่า  $R_{dlr} = 32.00 \Omega$

จากสมการที่ (ก.15) คำนวณได้ว่า  $X_{dlr} = 21.39 \Omega$

### จากผลการทดสอบ

ค่า  $R_{dnl}$  และ  $X_{dnl}$  จะเท่ากับสมการที่ (ก.2) และ (ก.3) ตามลำดับ ในกรณี  $S=0.014$

ค่า  $R_{dlr}$  และ  $X_{dlr}$  จะเท่ากับสมการที่ (ก.2) และ (ก.3) ตามลำดับ ในกรณี  $S=1$

จากเงื่อนไขของค่าต่างๆที่หาได้ เราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดหลักได้ดังนี้

$$R_{sd} = 12.5 \, \Omega, \quad \tau_r = 0.0231 \, \text{sec}$$

$$L_{sd} = 0.519 \, \text{H}, \quad \frac{m_{Srd}^2}{L_r} = 0.460 \, \text{H}$$

โดยคิดวงจรมูลที่รวมเอาฟลักซ์รั่วไหลไว้ทางด้านสเตเตอร์ จะได้  $L_r = m_{Srd} = 0.460 \, \text{H}$

### การทดสอบที่ขดลวดช่วย

#### DC test

$$V_{qdc} = 31.93 \, \text{V}$$

$$I_{qdc} = 1.38 \, \text{A}$$

จากสมการที่ (ก.8) คำนวณได้ว่า  $R_{sq} = 23.13 \, \Omega$

No load test ขณะทดสอบวัดความเร็วรอบได้ 1479 rpm ดังนั้น ค่า Slip  $S = 0.014$

$$V_{qnl} = 212.56 \, \text{V}$$

$$I_{qnl} = 1.88 \, \text{A}$$

$$P_{qnl} = 161.7 \, \text{W}$$

จากสมการที่ (ก.10) คำนวณได้ว่า  $R_{qnl} = 45.75 \, \Omega$

จากสมการที่ (ก.12) คำนวณได้ว่า  $X_{qnl} = 103.39 \, \Omega$

lock rotor test Slip  $S=1$

$$V_{qlr} = 105.39 \, \text{V}$$

$$I_{qlr} = 1.87 \, \text{A}$$

$$P_{qlr} = 163.91 \, \text{W}$$

จากสมการที่ (ก.14) คำนวณได้ว่า  $R_{qlr} = 46.87 \, \Omega$

จากสมการที่ (ก.16) คำนวณได้ว่า  $X_{qlr} = 31.29 \, \Omega$

#### จากผลการทดสอบ

ค่า  $R_{qnl}$  และ  $X_{qnl}$  จะเท่ากับสมการที่ (ก.4) และ (ก.5) ตามลำดับ ในกรณี  $S=0.014$

ค่า  $R_{qlr}$  และ  $X_{qlr}$  จะเท่ากับสมการที่ (ก.4) และ (ก.5) ตามลำดับ ในกรณี  $S=1$

จากเงื่อนไขของค่าต่างๆที่หาได้ เราสามารถหาอัตราส่วนจำนวนรอบ

$$n = \frac{n_{Sd}}{n_{Sq}} = \frac{m_{Srd}}{m_{Srq}} = 0.936$$

เมื่อ  $n_{Sd}$  คือจำนวนรอบของขดลวดหลัก

$n_{Sq}$  คือจำนวนรอบของขดลวดช่วย

สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นต้องใช้เป็นข้อมูลในการควบคุม

$$R_{sd} = 12.5 \ \Omega$$

$$R_{sq} = 23.13 \ \Omega$$

$$L_{sd} = 0.519 \text{ H}$$

$$m_{srd} = 0.460 \text{ H}$$

$$L_r = 0.460 \text{ H}$$

$$\tau_r = 0.0231 \text{ sec}$$

$$n = 0.936$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียน

นายสมโรจน์ เรืองรุ่งเรือง เกิดเมื่อวันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2516 ที่ จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2538 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย