

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่งด้วยวิธีอัตโนมัติ  
สำหรับใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์



นาย ชมพู สุขภาพ

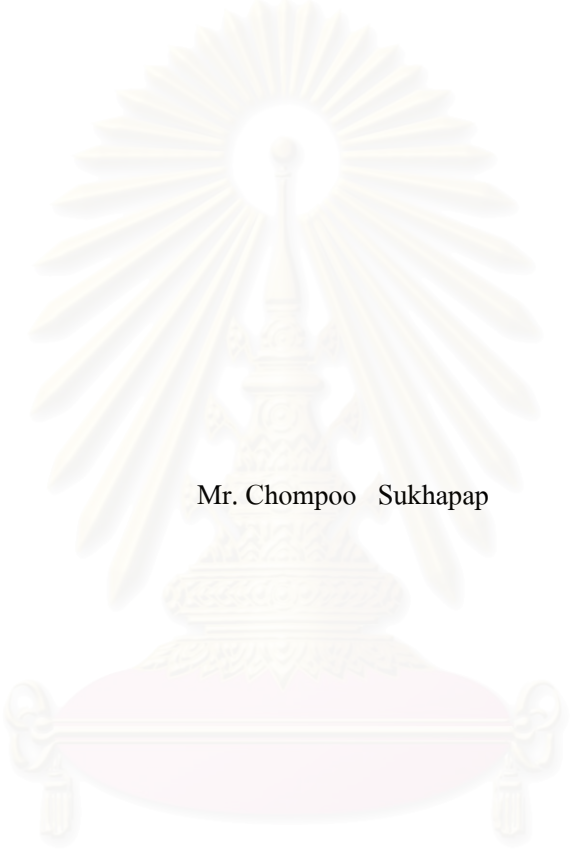
สถาบันวิทยบริการ  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0043-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**AUTO-TUNING OF INDUCTION MOTOR PARAMETERS  
AT STAND STILL FOR A VECTOR CONTROL SYSTEM**



Mr. Chompoo Sukhapap

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-17-0043-1



ชมพู สุขภาพ : การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่งด้วยวิธี  
อัตโนมัติสำหรับใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ (AUTO-TUNING OF  
INDUCTION MOTOR PARAMETERS AT STAND  
STILL FOR A VECTOR CONTROL SYSTEM.) อ. ที่  
ปรึกษา : อ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 125 หน้า. ISBN 974-17-0043-1

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่ง  
โดยใช้อินเวอร์เตอร์ ด้วยการจำลองแบบสัญญาณแรงดันและกระแสที่เหมาะสมสำหรับการ  
หาค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว และใช้วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดในการประมวลผลและลดผล  
ของสัญญาณรบกวน เพื่อศึกษาผลกระทบจากการใช้อินเวอร์เตอร์ในการหาค่าพารามิเตอร์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิติ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

# # 4170275021: MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: AUTO-TUNING / IDENTIFICATION OF STAND STILL / INDUCTION  
MOTOR PARAMETER / VECTOR CONTROL / RECURSIVE LEAST-SQUARE

CHOMPOO SUKHAPAP : AUTO-TUNING OF INDUCTION MOTOR  
PARAMETERS AT STAND STILL FOR A VECTOR CONTROL SYSTEM. THESIS

ADVISOR :Dr. SOMBOON SANGWONGWANICH, 125 pp. ISBN 974-17-0043-1

In this thesis a parameter auto-tuning method of an induction motor at stand still using an inverter is proposed. Each parameter of the motor is identified by the injection of an appropriate stator voltage or current of a predetermined pattern. The recursive least-square algorithm is then used in the calculation to reduce the effect of noise. The problems associated with the use of inverter in the auto-tuning process are also investigated.



Department ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature.....

Field of study ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature.....

Academic year 2001 Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความแนะนำตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา และรุ่นน้องรุ่นพี่รวมถึงเพื่อนในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำให้กำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้ความรู้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนเงินทุนวิจัยจากห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังและขอขอบคุณ บริษัท A.P.Y ENGINEERING CO., LTD. ที่ส่งเสริมและสนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาและญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่ให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ .....	ฅ
สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
2 สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์.....	5
2.1 สมการทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	5
2.2 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการทดสอบไร้โหลด และซัดโรเตอร์.....	7
2.2.1 การทดสอบไร้โหลด.....	7
2.2.2 การทดสอบซัดโรเตอร์.....	8
3 การหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์.....	28
3.1 การหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ).....	30
3.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์ ( $\sigma L_S$ ).....	39
3.3 การหาค่าเวลาคงตัวทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) และค่าความต้านทาน โรเตอร์สมมูลในวงจรสมมูลอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์( $R'_R$ ).....	46
3.4 การหาเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็ก(Saturation curve)ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..	57
4 การทดสอบค่าพารามิเตอร์ .....	66
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	88
รายการอ้างอิง .....	90
ภาคผนวก .....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ทำการทดสอบ.....	9
2.2 ผลการหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีทดสอบไร้โหลดและขั้วโรเตอร์.....	26
3.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์.....	65
ง.1 ผลการวัดค่าความต้านทาน $R_s$ ที่ขั้วของมอเตอร์.....	102
ง.2 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 50 Hz.....	103
ง.3 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 50 Hz.....	104
ง.4 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 30 Hz.....	105
ง.5 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 30 Hz.....	106
ง.6 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 10 Hz.....	107
ง.7 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 10 Hz.....	108
ง.8 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz.....	109
ง.9 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz.....	110
ง.10 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 50 Hz.....	112
ง.11 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 50 Hz.....	113
ง.12 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 30 Hz.....	114
ง.13 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 30 Hz.....	115
ง.14 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 10 Hz.....	116
ง.15 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 10 Hz.....	116
ง.16 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz.....	117
ง.17 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz.....	118
ง.18 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 50 Hz.....	119
ง.19 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 50 Hz.....	119
ง.20 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 30 Hz.....	120
ง.21 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 30 Hz.....	121
ง.22 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 10 Hz.....	121
ง.23 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 10 Hz.....	122
ง.24 ผลการทดสอบไร้โหลดของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz.....	123
ง.25 ผลการทดสอบขั้วโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz.....	123



## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่ง.....	6
2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะทำการทดสอบไร้โหลด.....	7
2.4 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำการทดสอบชัตโรเตอร์.....	8
2.5 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ของมอเตอร์ ABB ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	10
2.6 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ของมอเตอร์ SIEMENS ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	10
2.7 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่อุณหภูมิต่างๆ .	11
2.8 ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ ABB เปรียบเทียบกับแรงดันเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	12
2.9 ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ SIEMENS เปรียบเทียบกับแรงดันเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	13
2.9 ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ MITSUBISHI เปรียบเทียบกับแรงดันเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	13
2.10 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ของมอเตอร์ ABB ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	14
2.11 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ของมอเตอร์ SIEMENS ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	15
2.12 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ของมอเตอร์ MITSUBISHI ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	15
2.13 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) จากการทดสอบชัตโรเตอร์ที่ค่ากระแสพิกัด ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	16
2.14 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ $L_S$ ของมอเตอร์ ABB กับกระแสเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	17
2.15 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ $L_S$ ของมอเตอร์ SIEMENS กับกระแสเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	17
2.16 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ $L_S$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI กับกระแสเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	18
2.17 ค่าความเหนี่ยวนำ $M'$ และ $L_S$ ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 50 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	19

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 ค่าความเหนี่ยวนำ $M'$ และ $L_S$ ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 50 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	19
2.19 ค่าความเหนี่ยวนำ $M'$ และ $L_S$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 50 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	20
2.20 ค่า $L_S$ และค่า $M'$ จากผลการทดสอบไว้โหลดและชัตโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	21
2.21 ค่า $L_S$ และค่า $M'$ จากผลการทดสอบไว้โหลดและชัตโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	21
2.22 ค่า $L_S$ และค่า $M'$ จากผลการทดสอบไว้โหลดและชัตโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	22
2.23 ค่าความเหนี่ยวนำ $M'$ จากผลการทดสอบชัตโรเตอร์ที่ค่ากระแสพิคคของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	22
2.24 ค่า $\sigma L_S$ ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	23
2.25 ค่า $\sigma L_S$ ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	24
2.26 ค่า $\sigma L_S$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	24
2.27 ค่าคงที่ทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) จากผลการทดสอบชัตโรเตอร์ที่ค่ากระแสพิคค ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	25
2.28 เส้นกราฟการอิมิตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ของ ABB ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	26
2.29 เส้นกราฟการอิมิตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ของ SIEMENS ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	27
2.30 เส้นกราฟการอิมิตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ของ MITSUBISHI ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C .....	27
3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์.....	29
3.2 วงจรสมมูลไฟตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ทำการจ่ายแรงดันเพื่อหาค่า $R_S$ .....	30
3.3 รูปแบบการจ่ายแรงดันไฟตรงที่ขนาดต่างๆ.....	31
3.4 ค่ากระแส $i_S$ และ $R_S$ ขณะที่จ่ายแรงดัน $u_S$ ที่มุม 0 องศา.....	32
3.5 การหาค่า $R_S$ ด้วยการจ่ายแรงดันที่ค่ามุม 0, 120, 240 องศา.....	33

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ผลการหาค่า $R_S$ ของมอเตอร์ ABB ที่ค่ามุมต่างๆเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์.....	35
3.7 ผลการหาค่า $R_S$ ของมอเตอร์ ABB เฉลี่ยเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์.....	35
3.8 ผลการหาค่า $R_S$ ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ค่ามุมต่างๆเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์.....	36
3.9 ผลการหาค่า $R_S$ ของมอเตอร์ SIEMENS เฉลี่ยเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์.....	36
3.10 ผลการหาค่า $R_S$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ค่ามุมต่างๆเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์.....	37
3.11 ผลการหาค่า $R_S$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI เฉลี่ยเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์.....	37
3.12 รูปแบบการสวิตซ์ที่ใช้ในการจ่ายแรงดันพัลส์ให้กับมอเตอร์.....	39
3.13 วงจรสมมูลของมอเตอร์ขณะจ่ายแรงดันพัลส์ให้กับมอเตอร์.....	39
3.14 การใช้วงจรงรองผ่านตัว $F(z)$ ในกรองสัญญาณ $c(N)$ และ $y(N)$ .....	41
3.15 สัญญาณกระแสและแรงดันในขณะที่จ่ายแรงดันพัลส์ให้กับมอเตอร์.....	42
3.16 ผลการคำนวณค่า $\sigma L_S$ ด้วยวิธี RLS.....	43
3.17 ผลการหาค่า $\sigma L_S$ ของมอเตอร์ ABB จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	44
3.18 ผลการหาค่า $\sigma L_S$ ของมอเตอร์ SIEMENS จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	44
3.19 ผลการหาค่า $\sigma L_S$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	45
3.20 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะจ่ายกระแสไฟตรง เข้าทางด้านสเตเตอร์ที่ค่า $+I_S$ ณ เวลา $t < 0$ .....	46
3.21 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะจ่ายกระแสไฟตรง เข้าทางด้านสเตเตอร์ที่ค่า $-I_S$ ณ เวลา $t \geq 0$ .....	47
3.22 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะจ่ายกระแสไฟตรง เข้าทางด้านสเตเตอร์ที่ค่า $-I_S$ ณ เวลา $t \gg 0$ .....	47
3.23 ค่ากระแสและแรงดันต่างๆในวงจรสมมูลของมอเตอร์.....	48
3.24 ผลการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์จากค่ากระแส $+2 A$ เป็น $-2 A$ .....	50
3.25 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ $u_M'$ เมื่อควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์ จากค่ากระแส $+2 A$ เป็น $-2 A$ .....	51
3.26 ผลการคำนวณ RLS โดยใช้ข้อมูลในช่วง 100 ms ซ้ำ (แสดงเฉพาะ 8 รอบแรกของการคำนวณ).....	52
3.27 ค่าของ $\tau_R$ ของมอเตอร์ ABB จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	53
3.28 ค่าของ $R'_R$ ของมอเตอร์ ABB จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	53

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 ค่าของ $\tau_R$ ของมอเตอร์ SIEMENS จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	54
3.30 ค่าของ $R'_R$ ของมอเตอร์ SIEMENS จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	54
3.31 ค่าของ $\tau_R$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	55
3.32 ค่าของ $R'_R$ ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง.....	55
3.33 ผลการทดสอบลักษณะการอ้อมตัวของแกนเหล็ก.....	59
3.34 เส้นกราฟ $\lambda'_R(t)$ เทียบกับ $i_{MR}(t)$ ที่ได้จากการควบคุมกระแส $i_S$ จาก +5 A เป็น -5 A....	60
3.35 ค่าเฉลี่ยเส้นกราฟ $\lambda'_R(t)$ เทียบกับ $i_{MR}(t)$ ที่ได้จากการควบคุมกระแส $i_S$ จาก +5 A เป็น -5 A.....	61
3.36 ค่าเฉลี่ยเส้นกราฟ $\lambda'_R(t)$ เทียบกับ $i_{MR}(t)$ ที่ได้จากการควบคุมกระแส $i_S$ จาก +5 A เป็น -5 A และจาก -5 A เป็น +5 A .....	61
3.37 เส้นกราฟการอ้อมตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้.....	62
3.38 เส้นกราฟการอ้อมตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้ของมอเตอร์ ABB ในช่วงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มีค่าบวก.....	63
3.39 เส้นกราฟการอ้อมตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้ของมอเตอร์ SIEMENS ในช่วงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มีค่าบวก.....	64
3.40 เส้นกราฟการอ้อมตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้ของมอเตอร์ MITSUBISHI ในช่วงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มีค่าบวก.....	64
4.1 แผนภาพการจำลองระบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมผลของการอ้อมตัวของแกนเหล็ก.....	66
4.2 ความเร็วของโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB จากการป้อนแรงดัน 3 เฟส ที่ค่าพิคคของมอเตอร์โดยตรง.....	67
4.3 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ ABB.....	68
4.4 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ ABB ขยายจากแรงดันในรูปแบบที่ 4.3 ช่วงต้น.....	68
4.5 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ ABB.....	69
4.6 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ ABB ขยายจากกระแสในรูปแบบที่ 4.5 ช่วงต้น.....	69

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความเร็วของโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS จากการป้อนแรงดัน 3 เฟส ที่ค่าพิกัดของมอเตอร์โดยตรง.....	70
4.8 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ SIEMENS .....	71
4.9 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ SIEMENS ขยายจากแรงดันในรูปที่ 4.8 ช่วงต้น.....	71
4.10 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ SIEMENS .....	72
4.11 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ SIEMENS ขยายจากกระแสในรูปที่ 4.10 ช่วงต้น.....	72
4.12 ความเร็วของโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการป้อนแรงดัน 3 เฟสโดยตรง.....	73
4.13 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ MITSUBISHI .....	74
4.14 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ MITSUBISHI ขยายจากแรงดันในรูปที่ 4.13 ช่วงต้น.....	74
4.15 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ MITSUBISHI .....	75
4.16 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ MITSUBISHI ขยายจากกระแสในรูปที่ 4.16 ช่วงต้น.....	75
4.17 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ ของมอเตอร์ ABB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์.....	77
4.18 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ ของมอเตอร์ ABB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์.....	77
4.19 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ ของมอเตอร์ SIEMENS โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์.....	78
4.20 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ ของมอเตอร์ SIEMENS โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์.....	78
4.21 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ ของมอเตอร์ MITSUBISHI โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์.....	79
4.22 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ ของมอเตอร์ MITSUBISHI โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์.....	79



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34	ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดของจากการจำลองระบบของมอเตอร์ MITSUBISHI ขณะอยู่ตัวที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์..... 86
ก.1	แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ ที่จ่ายให้กับมอเตอร์..... 94
ก.2	ลักษณะของแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์เทียบกับจุดกึ่งกลางบัส..... 94
ข.1	การใช้ตัวควบคุม PI ในการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์..... 96
ค.1	การใช้ค่าผิดพลาดในการหาค่าพารามิเตอร์ $\hat{X}$ ..... 98



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

$V_u, V_v, V_w$	ค่าแรงดันสแตเตอร์ในเฟส $u, v, w$ ..... (V)
$i_u, i_v, i_w$	ค่ากระแสสแตเตอร์ในเฟส $u, v, w$ ..... (A)
$i'_u, i'_v, i'_w$	ค่ากระแสสแตเตอร์ในเฟส $u, v, w$ ที่ได้จากการจำลองระบบ..... (A)
$u_x, u_y$	ค่าแรงดันสแตเตอร์ที่ได้จากการแปลง 3 แกนเป็น 2 แกน..... (V)
$i_x, i_y$	ค่ากระแสสแตเตอร์ที่ได้จากการแปลง 3 แกนเป็น 2 แกน..... (A)
$u_d, u_q$	ค่าแรงดันสแตเตอร์ในแกน d และ q..... (V)
$i_d, i_q$	ค่ากระแสสแตเตอร์ในแกน d และ q..... (A)
$V_0$	ค่าเฉลี่ย 3 เฟสของแรงดันระหว่างเฟส..... (Vrms)
$I_0$	ค่าเฉลี่ย 3 เฟสของกระแสสแตเตอร์..... (Arms)
$P_0$	ค่ากำลังที่จ่ายให้มอเตอร์..... (Watt)
$P_m$	ค่ากำลังสูญเสียทางกล..... (Watt)
$f_0$	ความถี่ของแหล่งจ่าย..... (Hz)
$V_S$	ค่าเฉลี่ย 3 เฟสของแรงดันระหว่างเฟส..... (Vrms)
$I_S$	ค่าเฉลี่ย 3 เฟสของกระแสสแตเตอร์..... (Arms)
$P_S$	ค่ากำลังที่จ่ายให้มอเตอร์..... (Watt)
$f_S$	ความถี่ของแหล่งจ่าย..... (Hz)
$V_{BUS}$	ค่าแรงดันบัสไฟตรง..... (V)
$V_{drop}$	ค่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังขณะนำกระแส..... (V)
$u_S$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของแรงดันสแตเตอร์เมื่ออ้างอิงบนแกนสแตเตอร์..... (V)
$i_S$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของกระแสสแตเตอร์เมื่ออ้างอิงบนแกนสแตเตอร์..... (A)
$u_R$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของแรงดันโรเตอร์เมื่ออ้างอิงบนแกนสแตเตอร์..... (V)
$u_{L_s}$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของแรงดันตกคร่อมค่าความเหนี่ยวนำ $L_s$ ..... (V)
$u_{M'}$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของแรงดันตกคร่อมค่าความเหนี่ยวนำ $M'$ ..... (V)
$u_{DT}$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของแรงดันเนื่องจากเวลาประวิงและความไม่เป็นอุดมคติ ของสวิตช์..... (V)
$i_R$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของกระแสโรเตอร์เมื่ออ้างอิงบนแกนสแตเตอร์..... (A)
$i_{MR}$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของกระแสสร้างฟลักซ์เมื่ออ้างอิงบนแกนสแตเตอร์..... (A)



สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

$\lambda_S$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของสเตเตอร์ฟลักซ์เมื่ออ้างอิงบนแกนสเตเตอร์..... ( Wb )
$\lambda_R$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของโรเตอร์ฟลักซ์เมื่ออ้างอิงบนแกนสเตเตอร์..... ( Wb )
$\lambda'_R$	ค่าสเปซเวกเตอร์ของโรเตอร์ฟลักซ์ในวงจรสมมูลอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์..... ( Wb )
$\omega_m$	ค่าความเร็วของโรเตอร์..... ( rad/s )
$p$	จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก
$R_S$	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์..... ( $\Omega$ )
$R_R$	ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ที่อ้างอิงมาทางด้านสเตเตอร์..... ( $\Omega$ )
$R'_R$	ค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูลในวงจรสมมูลอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์..... ( $\Omega$ )
$R_C$	ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก..... ( $\Omega$ )
$L_S$	ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์..... ( H )
$L_R$	ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ที่อ้างอิงมาทางด้านสเตเตอร์..... ( H )
$M$	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมที่อ้างอิงมาทางด้านสเตเตอร์..... ( H )
$M'$	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลในวงจรสมมูลอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์..... ( H )
$\tau_R$	ค่าคงที่ทางเวลาทางด้านโรเตอร์..... ( sec )
$T_S$	ช่วงเวลาชักข้อมูล..... ( sec )
$x^*$	ค่าคำสั่งของ $x$
$\Delta x$	อัตราการเปลี่ยนแปลงของ $x$
$\sigma$	ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม
$\sigma_S$	ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
$\sigma_R$	ค่าสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านโรเตอร์
$S_u, S_v, S_w$	สัญญาณขั้วนำสวิตช์ในเฟส $u, v, w$
$R'$	ค่าความต้านทานสมมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบไร้โหลด..... ( $\Omega$ )
$X'$	ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบไร้โหลด..... ( $\Omega$ )
$R''$	ค่าความต้านทานสมมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบชัตโรเตอร์..... ( $\Omega$ )
$X''$	ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลที่ใช้ในการคำนวณการทดสอบชัตโรเตอร์..... ( $\Omega$ )
$K_P, K_I$	ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ PI

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเบื้องต้น

การควบคุมในแนวฟลักซ์ (Field orientation control) หรือการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) เป็นวิธีที่ได้พัฒนาเพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำให้ได้สมรรถนะที่สูง การควบคุมแบบเวกเตอร์จะควบคุมฟลักซ์และแรงบิดแยกอิสระต่อกัน โดยผ่านการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์อ้างอิงบนแกนของโรเตอร์ฟลักซ์ ดังนั้นตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้การควบคุมแบบเวกเตอร์สำเร็จผลได้ ตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์อาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ซึ่งต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ (Motor Parameter) ร่วมด้วยในการคำนวณ ข้อเสียของการควบคุมแบบเวกเตอร์คือมีความซับซ้อนในการคำนวณ อันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งก็ได้มีการแก้ไขโดยใช้ระบบดิจิทัลเข้ามาช่วยจัดการความยุ่งยากซับซ้อนนี้ด้วยซอฟต์แวร์ อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาอยู่ว่าระบบควบคุมแบบเวกเตอร์นี้ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในการควบคุม ถ้าค่าจริงของพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไม่ตรงกับค่าที่ใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์จะทำให้การคำนวณหาตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์ไม่แม่นยำส่งผลให้สมรรถนะในการควบคุมลดลง ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จึงเป็นค่าที่มีผลกระทบมากในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ และค่านี้ยังขึ้นกับค่าอุณหภูมิ ค่าระดับการอิ่มตัวของแกนเหล็ก และผลของปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect)

โดยทั่วไปค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์สามารถประมาณค่าได้จากข้อมูลค่าพิคตบนป้ายชื่อ (Name plate) หรืออาจคำนวณได้จากการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์ (No load and locked rotor test) ซึ่งมีข้อดีคือ การคำนวณไม่ยุ่งยากมากนักแต่ข้อเสียคือใช้เวลาในการทดสอบมากและต้องทำการปลดภาระหรือยึดตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ในขณะที่ทดสอบ ปัจจุบันเรามีวิธีการต่างๆมากมายในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าถูกต้องแม่นยำเพียงพอแก่การนำไปใช้ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์เพื่อให้ได้สมรรถนะการควบคุมที่ดี วิธีเหล่านั้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1) การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำก่อนการขับมอเตอร์ (Off-line Identification) วิธีนี้จะนำค่าผลตอบสนองของกระแสและแรงดันที่เราใส่ให้กับมอเตอร์มาประมวลผลด้วยวิธีการต่างๆทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ก่อนการนำไปใช้งานเพียงครั้งเดียว ซึ่งสัญญาณอินพุตที่เราใส่ให้กับมอเตอร์อาจจะไม่ทำให้เกิดการหมุนที่เพลลาของมอเตอร์ (Identification at stand still) หรือมีทั้งการหมุนและไม่หมุนที่เพลลาของมอเตอร์ ขึ้นกับลักษณะสัญญาณกระแสหรือแรงดันที่ใช้ และค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ตลอดการทำงานในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ ข้อเสียของวิธีนี้คือจะไม่คำนึงถึงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นได้ในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน

2) การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ขับมอเตอร์ (On-line Identification) วิธีนี้จะต้องใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมในการเริ่มเดินมอเตอร์ การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะกระทำขณะขับมอเตอร์และทำการการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ในขณะที่ขับมอเตอร์อาจจะมีปัญหาทางด้านเสถียรภาพได้ และเพิ่มภาระการคำนวณของระบบควบคุมมอเตอร์ด้วย

โดยคุณลักษณะที่ได้อธิบายข้างต้น วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ก่อนขับนำมอเตอร์จึงเป็นที่นิยมมากกว่าในปัจจุบัน เนื่องด้วยวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องขับมอเตอร์ให้หมุนไปที่ความเร็วรอบค่าหนึ่งก่อนจึงจะทำการหาค่า ไม่เหมาะกับการติดตั้งใช้งานของมอเตอร์กับภาระบางชนิดเช่นในระบบขนส่งทางสายพานหรือลิฟต์ขนส่ง ระบบปั้มน้ำ เป็นต้น เพราะว่าการปลดภาระของมอเตอร์ออกเพื่อที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์นั้นกระทำได้ยาก หรือถ้าทำได้ก็อาจจะต้องใช้เวลานานและยังมีปัญหาในเรื่องการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเพื่อให้ระบบเริ่มเดินได้ซึ่งอาจจะต้องใช้เวลาและความชำนาญในการปรับตั้ง

ในงานวิจัยนี้เราจึงเลือกใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ก่อนขับนำมอเตอร์โดยไม่ทำให้เกิดการหมุนที่เพลลา อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิ และการอิมตัวของแกนเหล็กและผลของการเกิดปรากฏการณ์ทางผิว เป็นสิ่งที่มีผลมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ โดยที่อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน การอิมตัวของแกนเหล็กจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ และการเกิดปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มักจะไม่ได้พิจารณาถึงระดับของค่ากระแสที่ไหลในขดลวดของมอเตอร์ทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ในขณะที่ทดสอบซึ่งมีผลต่อการอิมตัวของแกนเหล็ก

และการเกิดปรากฏการณ์ทางผิวในช่วงที่กระแสเกิดสภาวะชั่วคราว รวมทั้งผลของอุณหภูมิขณะหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งอาจแตกต่างจากค่าในขณะที่ระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ทำงานจริง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำก่อนการขับมอเตอร์ ในขณะที่หุคหนึ่งซึ่งมีข้อดีคือไม่ต้องปลดภาระออกขณะหาค่าพารามิเตอร์ ค่าพารามิเตอร์จะถูกคำนวณโดยอัลกอริทึมที่ครบทุกตัวได้แก่  $R_S, \sigma L_S, R'_R$  และ  $\tau_R$  ซึ่งจำเป็นและเพียงพอในการนำไปใช้กับระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยมีการพิจารณาถึงผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กอันเนื่องมาจากระดับที่แตกต่างกันของกระแสที่ไหลในมอเตอร์ทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ในกระบวนการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์เราจะใช้ระบบฮาร์ดแวร์ของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ PWM ซึ่งเป็นระบบที่มีใช้อยู่แล้วในระบบการควบคุมแบบเวกเตอร์ เพื่อจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ เราจึงไม่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมในการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ นอกจากนั้นในการกำหนดรูปแบบและวิธีในการสร้างสัญญาณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์เราจะคำนึงถึงความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ และจะต้องไม่ทำให้เกิดค่าของกระแสและแรงดันที่เกินค่าพิคคของมอเตอร์อันจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบหรือมอเตอร์ได้ โดยเราจะใช้ข้อมูลจากป้ายชื่อของมอเตอร์ร่วมด้วยในการออกแบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะหุคหนึ่ง โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว ณ สภาพการทำงานต่างๆ และใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์พื้นฐานซึ่งใช้การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ PWM ทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติม ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้สามารถนำไปใช้กับระบบควบคุมแบบเวกเตอร์

## 1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์

ออกแบบระบบการวัดและควบคุมรูปแบบของสัญญาณกระแสและแรงดันที่เหมาะสมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่มอเตอร์หุคหนึ่งด้วยวิธีอัตโนมัติ โดยคำนึงถึงผลของการอิ่มตัวของแกนเหล็กอันเนื่องมาจากระดับที่แตกต่างกันของกระแสที่ไหลในมอเตอร์ทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์และความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยใช้ระบบฮาร์ดแวร์ของ

อินเวอร์เตอร์ พร้อมทั้งหาข้อจำกัดของวิธีที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ ทดสอบค่าที่หาได้จากงานวิจัยนี้ กับค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธีทดสอบไร้โหลดและยัดโรเตอร์

#### 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมแบบเวกเตอร์
- 2) ศึกษาผลกระทบของการอิมิตัวของแกนเหล็ก
- 3) ศึกษารูปแบบและข้อจำกัดของวิธีการหาค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว
- 4) จำลองการทำงาน ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบแนวความคิด
- 5) ปรับปรุงแก้ไขระบบในส่วนซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้น
- 6) เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล
- 7) เขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาเทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าที่มีความเที่ยงตรงมากที่สุด
- 2) นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้กับระบบควบคุมเวกเตอร์
- 3) ปรับปรุงสมรรถนะของมอเตอร์อันเนื่องมาจากผลของการใช้ค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมแบบเวกเตอร์
- 4) สามารถนำผลการศึกษาและวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้จริง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### สมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงที่มาของสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ ในขณะหยุดนิ่ง และการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี No-Load และ Locked-Rotor Test เพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีอัตโนมัติ (Auto-tuning) โดยใช้อินเวอร์เตอร์

#### 2.1 สมการทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สมการทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำเขียนให้อยู่ในรูปของสเปซเวกเตอร์ ได้ดังสมการที่ (2.1)-  
(2.2)

$$u_S = R_S i_S + \frac{d}{dt} \lambda_S \quad (2.1)$$

$$u_R = R_R i_R + \frac{d}{dt} \lambda_R - j p \omega_m \lambda_R \quad (2.2)$$

โดยมีนิยามดังนี้

$$\lambda_S = L_S i_S + M i_R \quad (2.3)$$

$$\lambda_R = M i_S + L_R i_R = M i_{MR} \quad (2.4)$$

ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก จะมีค่า  $u_R = 0$  จากนิยามข้างต้นสามารถเขียนสมการที่ (2.1) และ (2.2) ได้ใหม่เป็น

$$u_S = \left( R_S + \frac{M^2}{L_R^2} R_R \right) i_S + \sigma L_S \frac{d}{dt} i_S - \left( \frac{R_R}{L_R} - j p \omega_m \right) \left( \frac{M}{L_R} \lambda_R \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{M}{L_R} \lambda_R \right) = \frac{M^2}{L_R^2} R_R i_S - \left( \frac{R_R}{L_R} - j p \omega_m \right) \left( \frac{M}{L_R} \lambda_R \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ 
$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_S L_R}$$

นิยามให้

$$R'_R = \frac{M^2}{L_R^2} R_R, \quad M' = \frac{M^2}{L_R}, \quad \lambda'_R = \frac{M}{L_R} \lambda_R$$

เราสามารถเขียนสมการที่ (2.5) และ (2.6) ได้ใหม่เป็น

$$u_S = (R_S + R'_R) i_S + \sigma L_S \frac{d}{dt} i_S - \left( \frac{R'_R}{M'} - j p \omega_m \right) \lambda'_R \quad (2.7)$$

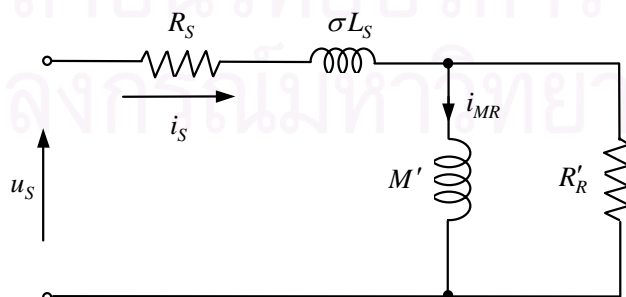
$$\frac{d}{dt} \lambda'_R = R'_R i_S - \left( \frac{R'_R}{M'} - j p \omega_m \right) \lambda'_R \quad (2.8)$$

ในขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง ( $\omega_m = 0$ ) สมการที่ (2.7) และ (2.8) จะลดรูปเป็นสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

$$u_S = (R_S + R'_R) i_S + \sigma L_S \frac{d}{dt} i_S - \frac{R'_R}{M'} \lambda'_R \quad (2.9)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda'_R = R'_R i_S - \frac{R'_R}{M'} \lambda'_R \quad (2.10)$$

เราจะใช้สมการที่ (2.9) และ (2.10) เป็นสมการพื้นฐานในการนำไปหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีอัตโนมัติในขณะหยุดนิ่ง ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.1



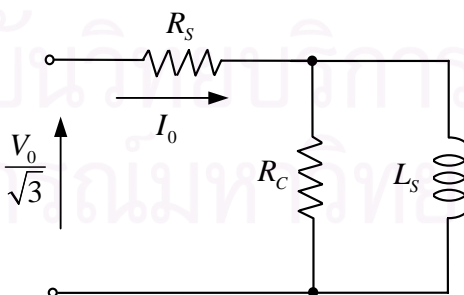
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่ง

## 2.2 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์

เราจะทำการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป วิธีการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์นี้เป็นวิธีทดสอบพื้นฐานทั่วไปในการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเบื้องต้น และในการคำนวณจะต้องใช้ค่าความต้านทานของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ร่วมด้วย ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องหาแยกต่างหาก และสามารถวัดได้โดยใช้มิเตอร์วัดความต้านทานที่ขั้วของมอเตอร์โดยตรง การทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์มีการคำนวณดังต่อไปนี้

### 2.2.1 การทดสอบไร้โหลด

ทดสอบโดยป้อนไฟ 3 เฟส ให้กับมอเตอร์ในสภาวะไร้โหลดและทำการวัดค่าต่างๆคือ  $V_0, I_0, P_0, P_m, f_0$  โดยที่ค่ากำลังสูญเสียทางกล ( $P_m$ ) สามารถหาได้โดยการต่อเซ็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังที่จ่ายให้มอเตอร์ ( $P_0$ ) กับค่าเฉลี่ย 3 เฟสของแรงดันระหว่างเฟส ( $V_0$ ) จะได้ค่า  $P_m$  ซึ่งก็คือค่า  $P_0$  ที่ค่า  $V_0$  มีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่ทำการทดสอบไร้โหลดนั้นค่าสลิปจะมีค่าน้อยมาก เราจึงสามารถละเลยค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ได้ วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ในขณะทำการทดสอบไร้โหลด โดยคำนึงค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะทำการทดสอบไร้โหลด



เราสามารถคำนวณค่า  $R_C$  และ  $L_S$  ได้โดยใช้สมการที่ (2.11) – (2.14)

$$R' = \frac{P_0 - P_m}{3I_0^2} - R_S \quad (2.11)$$

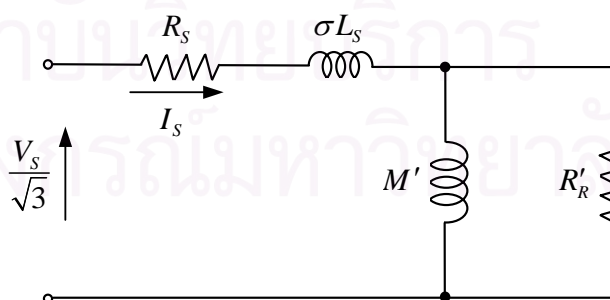
$$X' = \sqrt{\frac{V_0^2}{3I_0^2} - \left(\frac{P_0 - P_m}{3I_0^2}\right)^2} \quad (2.12)$$

$$R_C = \frac{R'^2 + X'^2}{R'} \quad (2.13)$$

$$L_S = \frac{R'^2 + X'^2}{(2\pi f_0) X'} \quad (2.14)$$

### 2.2.2 การทดสอบยัดโรเตอร์

ทดสอบโดยป้อนไฟ 3 เฟส ให้กับมอเตอร์และทำการยัดโรเตอร์ให้หยุดนิ่งไว้ และทำการวัดค่าต่างๆดังนี้  $V_S, I_S, P_S, f_S$  ในขณะที่ทำการทดสอบยัดโรเตอร์นั้นค่าแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าน้อยมาก เราสามารถละเลยค่ากำลังสูญเสียของแกนเหล็กได้ และสามารถเขียนวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ในขณะที่ทำการทดสอบยัดโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์นี้ขวนำขณะทำการทดสอบยัดโรเตอร์

ในการคำนวณเราจะนำค่าของ  $L_S$  ที่ได้จากการทดสอบไว้โหลดมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่า  $M'$  และ  $R'_R$  ดังสมการที่ (2.15) – (2.18)

$$R'' = \frac{P_S}{3I_S^2} - R_S \quad (2.15)$$

$$X'' = (2\pi f_S) L_S - \sqrt{\frac{V_S^2}{3I_S^2} - \left(\frac{P_S}{3I_S^2}\right)^2} \quad (2.16)$$

$$R'_R = R'' \left( \frac{R''^2 + X''^2}{X''^2} \right) \quad (2.17)$$

$$M' = \frac{X''}{(2\pi f_S)} \left( \frac{R''^2 + X''^2}{X''^2} \right) \quad (2.18)$$

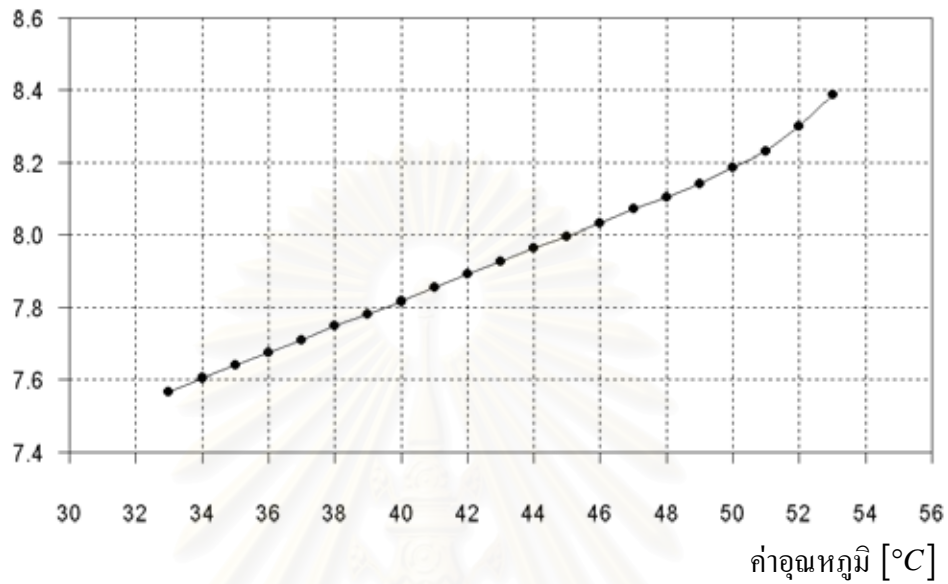
มอเตอร์ที่ใช้ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ตัว ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ทำการทดสอบ

ชื่อมอเตอร์	พิกัดแรงดัน [Vrms]	พิกัดกระแส [Arms]	ขนาด	พิกัดความเร็ว [rpm]	ความถี่ [Hz]	p.f.
ABB	380-420	2.9	1.1 kW	1410	50	0.73
SEIMENS	400	2.6	1.1 kW	1400	50	0.83
MITSUBISHI	380	3.6	2 Hp	1420	50	-

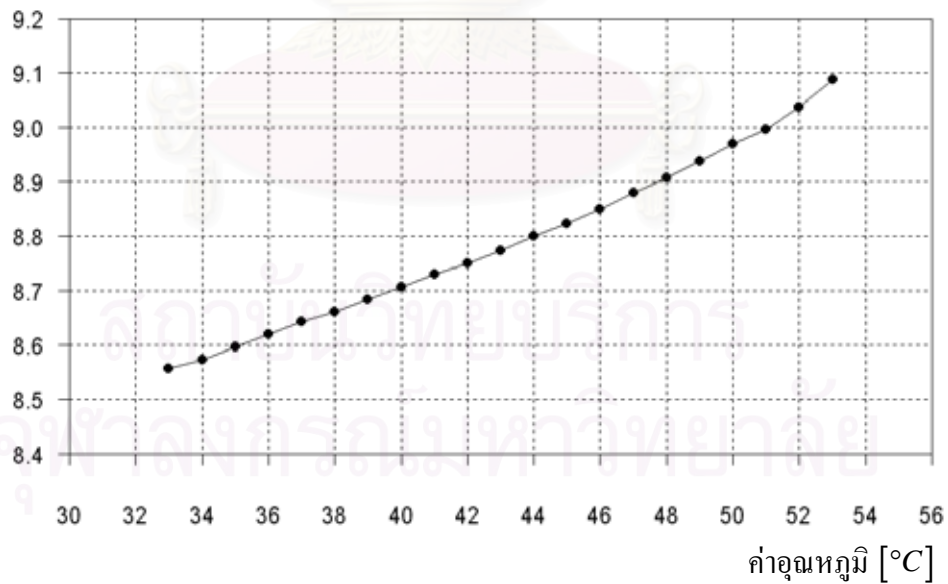
ในการวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) เราจะใช้มัลติมิเตอร์ความแม่นยำสูงวัดความต้านทานที่ขั้วของมอเตอร์โดยตรง และเพื่อที่จะดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $R_S$  ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เราจึงได้ทำการวัดค่า  $R_S$  ที่อุณหภูมิต่างๆ ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.4-2.6

ค่า  $R_S$  [ $\Omega$ ]

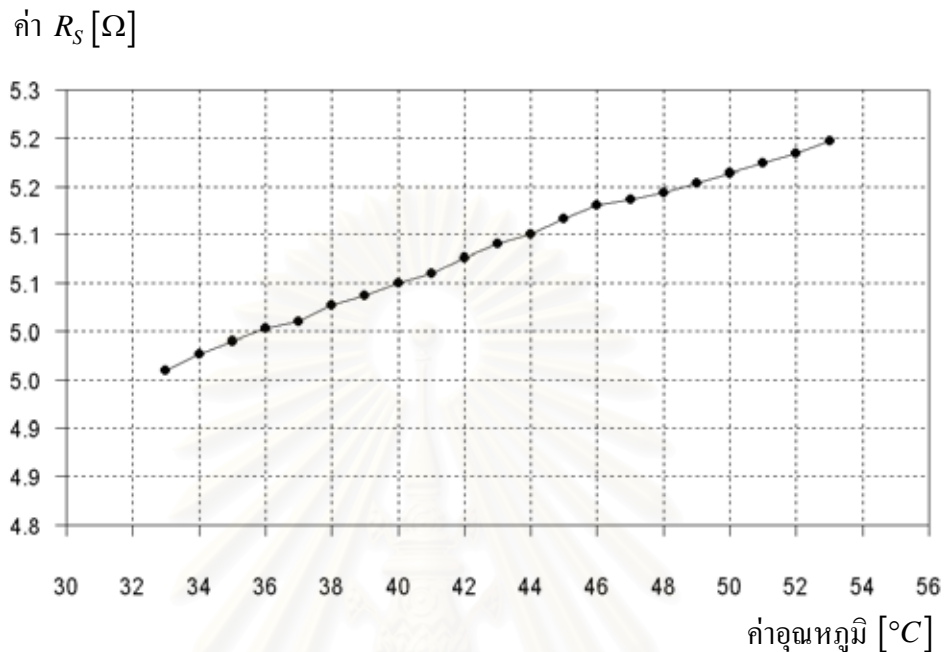


รูปที่ 2.4 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ของมอเตอร์ ABB ที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่า  $R_S$  [ $\Omega$ ]



รูปที่ 2.5 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ของมอเตอร์ SIEMENS ที่อุณหภูมิต่างๆ



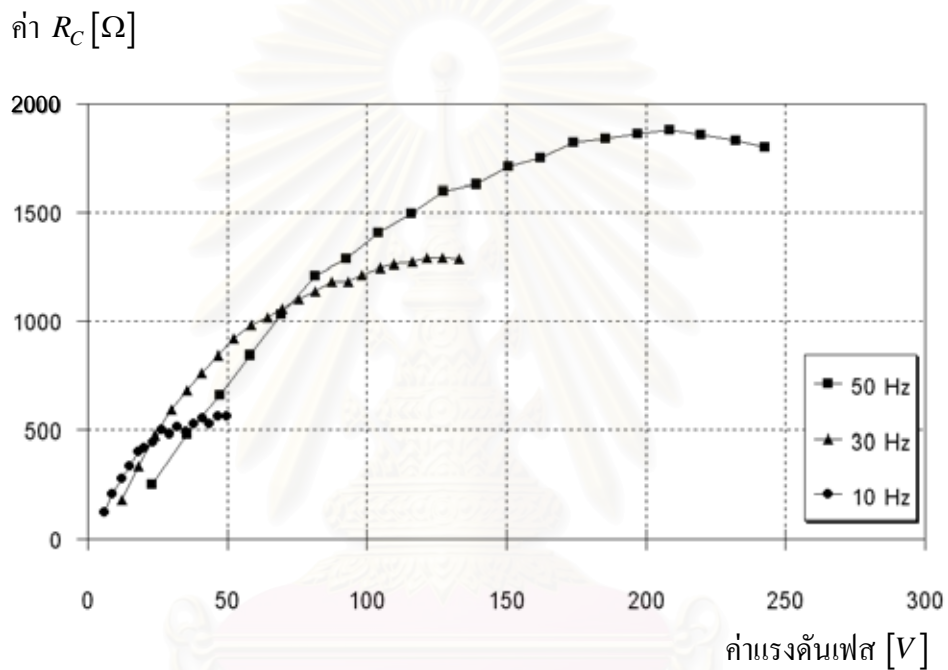
รูปที่ 2.6 ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ ) ที่ได้ดังรูปที่ 2.4-2.6 จะเห็นได้ว่าค่า  $R_S$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น แต่ในช่วงที่ค่าของอุณหภูมิมียุคสูงๆจากรูปจะเห็นว่ามียุคชันโค้งขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากการใช้การวัดอุณหภูมิที่เปลือกของมอเตอร์ ซึ่งที่อุณหภูมิค่าสูงนี้ขดลวดของมอเตอร์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่เปลือกของมอเตอร์ ทำให้เราวัดได้ค่าอุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิของขดลวดสเตเตอร์ แต่เราจะได้ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์มีค่าที่สูงกว่าปกติ

จากวิธีการทดสอบไร้อโหลดและยึดโรเตอร์ เราได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสภาวะการทำงานที่ต่างกัน โดยในการทดสอบไร้อโหลดเราจะทำการปรับเปลี่ยนแรงดันไปที่ค่าต่างๆ และในการทดสอบยึดโรเตอร์เราจะทำการปรับเปลี่ยนกระแสไปที่ค่าต่างๆ เราจะแยกพิจารณาผลการทดสอบการหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวได้ดังนี้

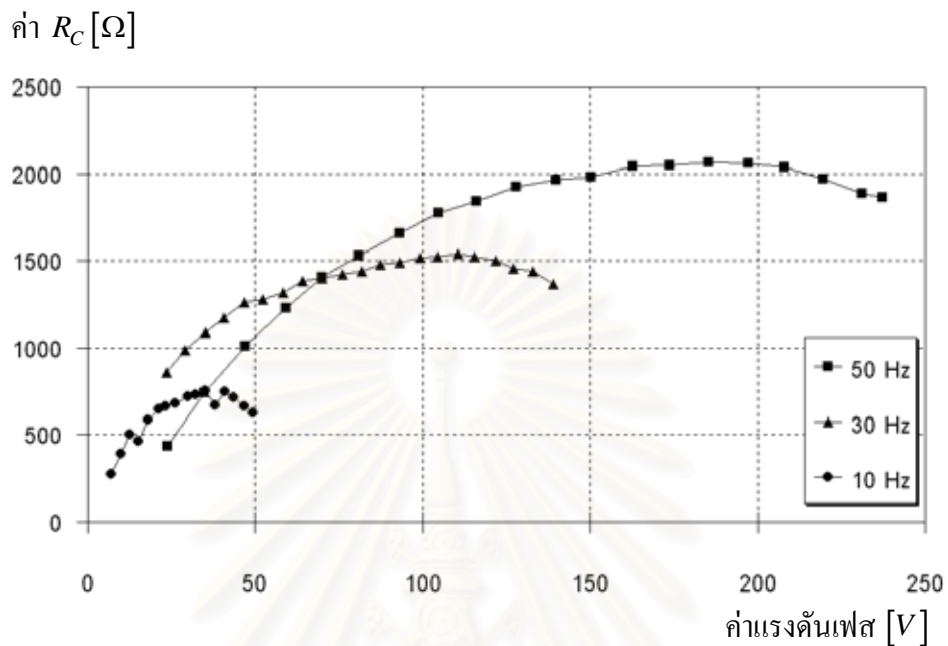
### ก) ความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ( $R_C$ )

จากผลการทดสอบไว้โหลดเราจะได้ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ( $R_C$ ) เนื่องจากค่า  $R_C$  เป็นค่ากำลังสูญเสียที่เกิดในแกนเหล็กและมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่และแรงดัน เราจึงได้ทำการทดสอบมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวเพิ่มเติมที่ความถี่ต่างๆ ดังแสดงผลในรูปที่ 2.7-2.9

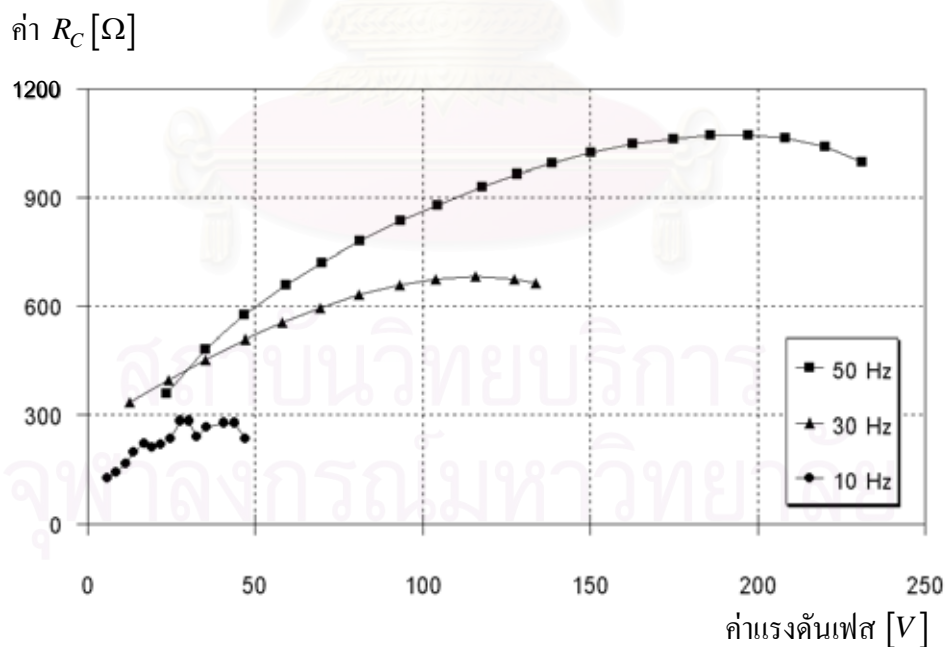


รูปที่ 2.7 ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ ABB  
เปรียบเทียบกับแรงดันเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ SIEMENS  
เปรียบเทียบกับแรงดันเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C

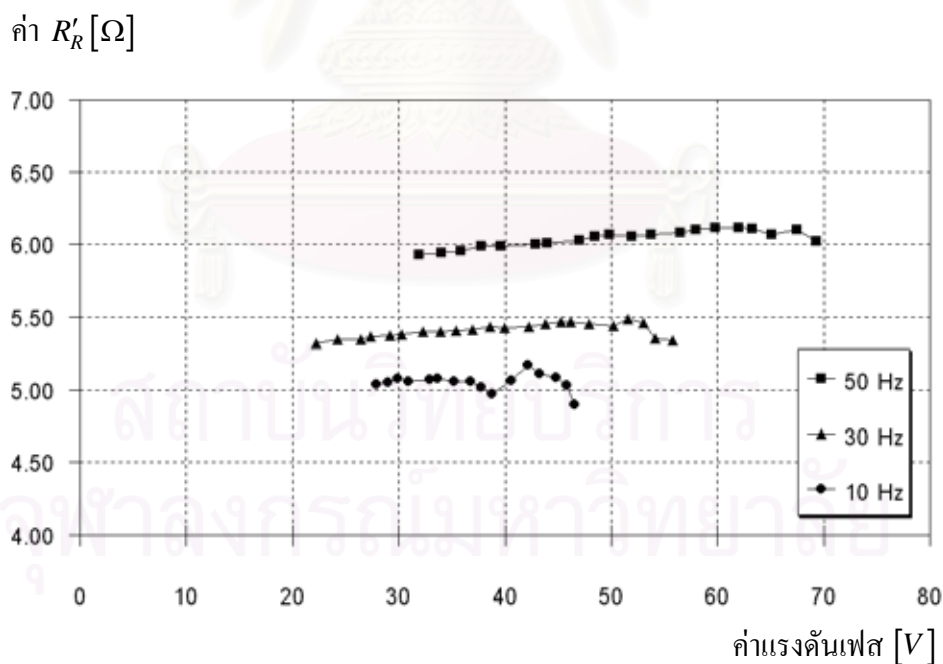


รูปที่ 2.9 ค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ MITSUBISHI  
เปรียบเทียบกับแรงดันเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C

จากผลการหาค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก ( $R_C$ ) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่ได้มีค่าลดลงตามแรงดันและความถี่ และในการนำมอเตอร์ไปใช้งานที่มีการปรับความถี่ที่ใช้รูปแบบการควบคุมแบบ  $V/f$  ซึ่งแรงดันที่ใช้ควบคุมจะมีขนาดลดลงตามความถี่ ดังนั้นค่า  $R_C$  ที่ลดลงเมื่อเทียบกับขนาดของแรงดันที่ลดลงตามความถี่แล้ว ค่าของ  $R_C$  ก็ยังมีขนาดที่ใหญ่มากจนสามารถละเลยได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ละเลยการหาค่า  $R_C$  นี้

### ข) ความต้านทานโรเตอร์ $R'_R$

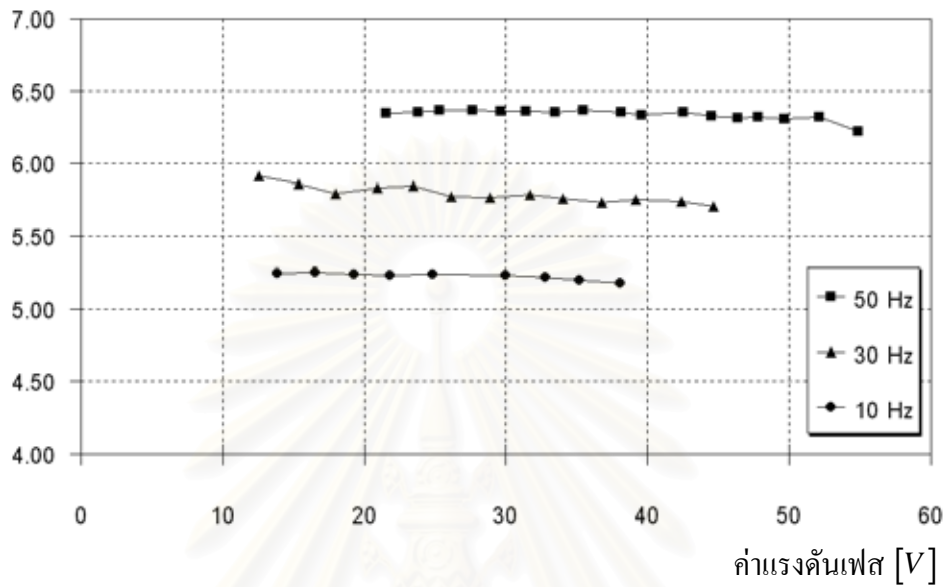
ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) หาได้จากการทดสอบขั้วโรเตอร์ เนื่องจากในมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกส่วนใหญ่แล้ว เส้นลวดอลูมิเนียมที่ใช้เป็นแท่งตัวนำทางด้านโรเตอร์จะมีขนาดใหญ่ ผลของปรากฏการณ์ทางผิวจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า  $R'_R$  ทำให้ค่า  $R'_R$  เปลี่ยนแปลงตามความถี่ เราจึงได้ทำการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ เพิ่มเติมดังแสดงผลการทดสอบการหาค่า  $R'_R$  ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ได้ดังในรูปที่ 2.10-2.12



รูปที่ 2.10 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ของมอเตอร์ ABB

ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C

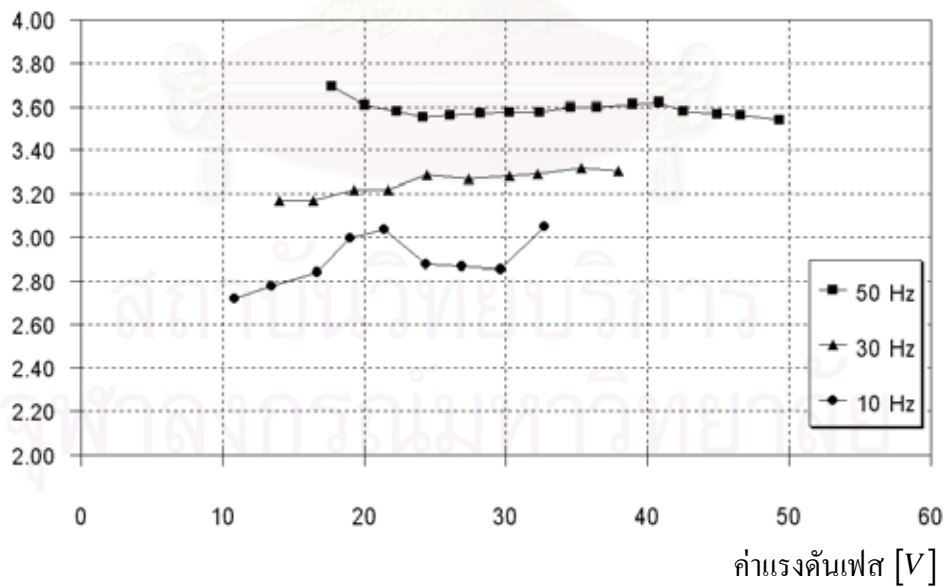
ค่า  $R'_R$  [ $\Omega$ ]



รูปที่ 2.11 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ของมอเตอร์ SIEMENS

ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}\text{C}$

ค่า  $R'_R$  [ $\Omega$ ]

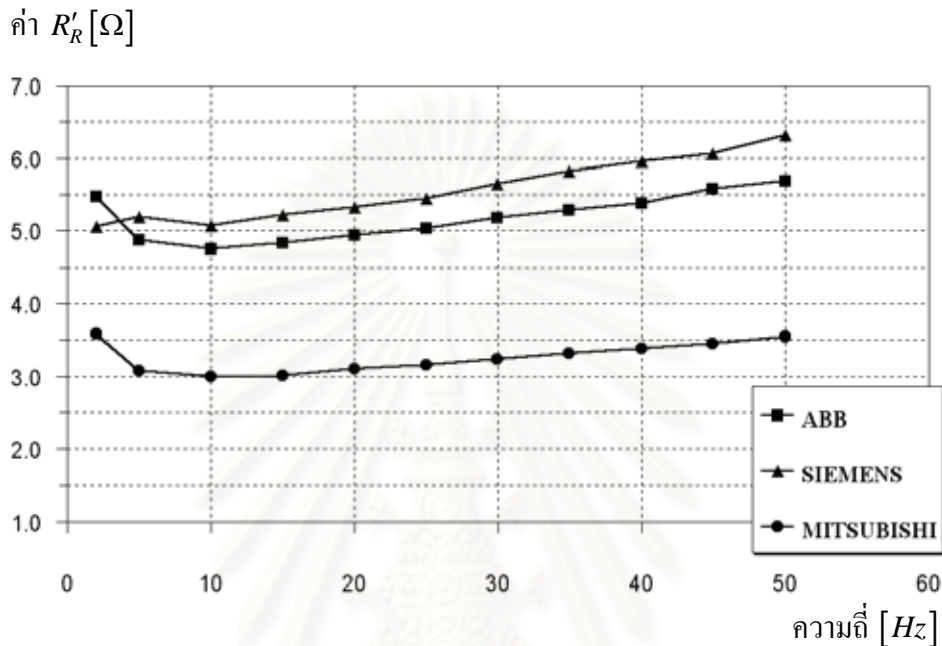


รูปที่ 2.12 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ของมอเตอร์ MITSUBISHI

ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}\text{C}$



เราสามารถแสดงผลการทดสอบขดลวดโรเตอร์เพื่อหาค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ได้ดังรูปที่ 2.13

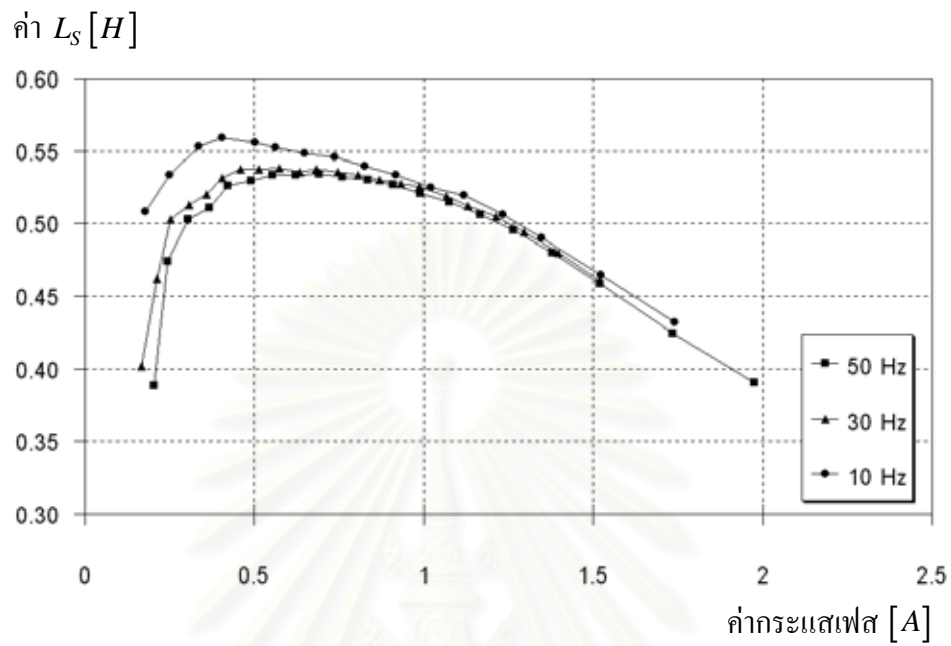


รูปที่ 2.13 ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์ ( $R'_R$ ) จากการทดสอบขดลวดโรเตอร์ที่ค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^\circ\text{C}$

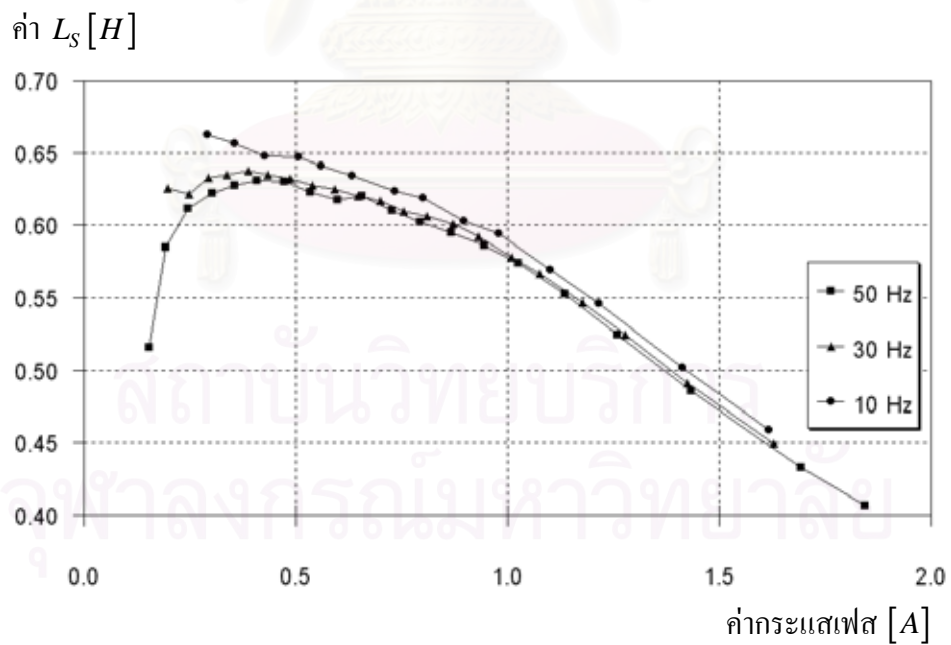
จากรูปที่ 2.10-2.13 จะเห็นได้ว่าค่า  $R'_R$  มีค่าลดลงตามความถี่เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางผิวมากกว่าการลดลงตามขนาดแรงดัน อย่างไรก็ตามในขณะที่มอเตอร์ถูกใช้งาน ความถี่ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดโรเตอร์จะมีค่าน้อย คือมีค่าเท่ากับความเร็วที่สลลิป ดังนั้นในการหาค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์เราจึงจะหาค่าที่ความถี่ต่ำเป็นหลัก

#### ค) ความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ ( $L_S$ )

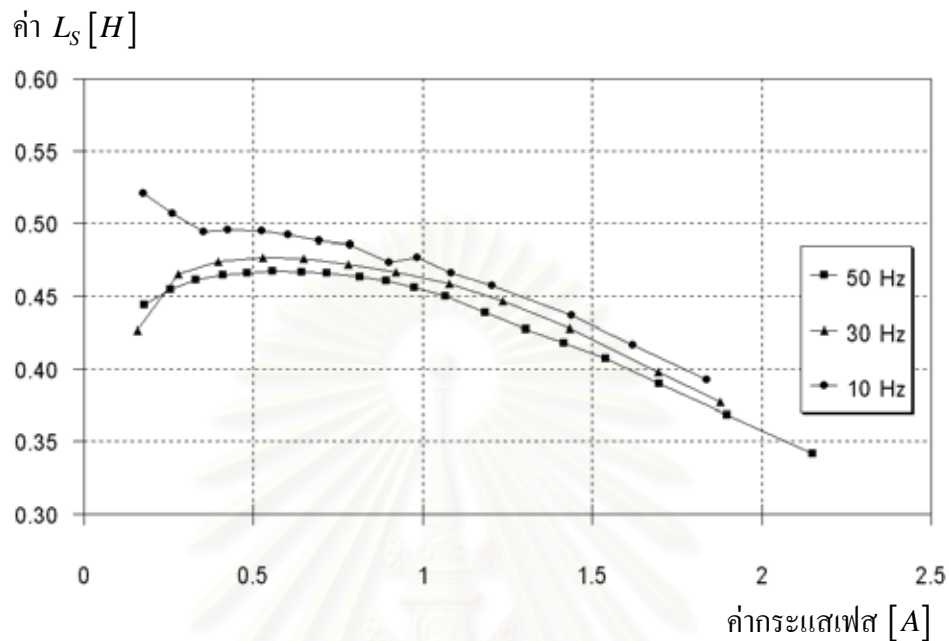
ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านสเตเตอร์ ( $L_S$ ) ที่ได้จากการทดสอบไว้โหลดที่ความถี่ต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.14-2.16



รูปที่ 2.14 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ  $L_s$  ของมอเตอร์ ABB กับกระแสเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}C$



รูปที่ 2.15 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ  $L_s$  ของมอเตอร์ SIEMENS กับกระแสเฟสที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}C$

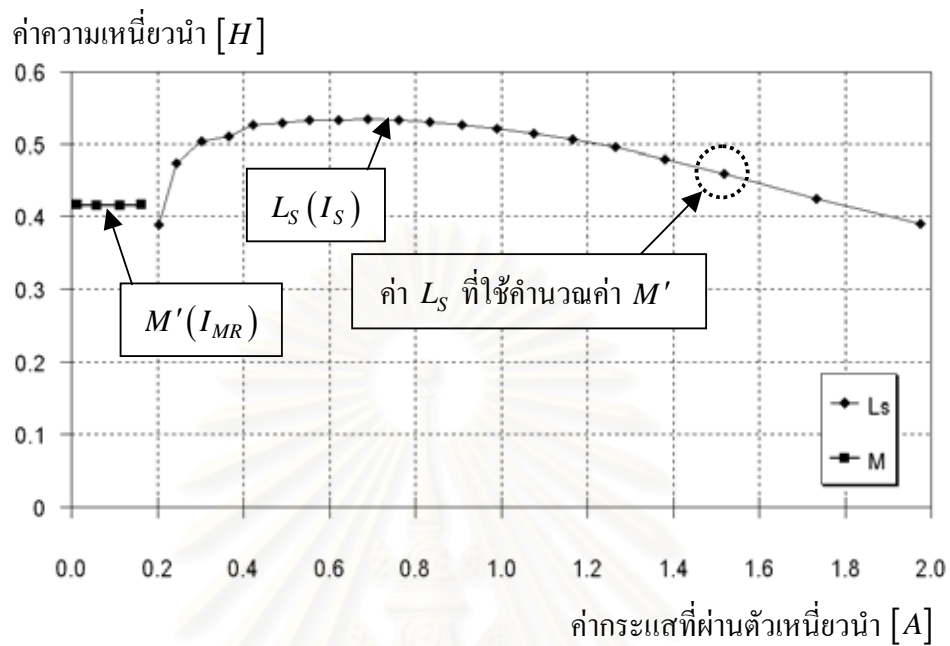


รูปที่ 2.16 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเหนี่ยวนำ  $L_s$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI กับกระแสไฟที่ความถี่ต่างๆ ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}\text{C}$

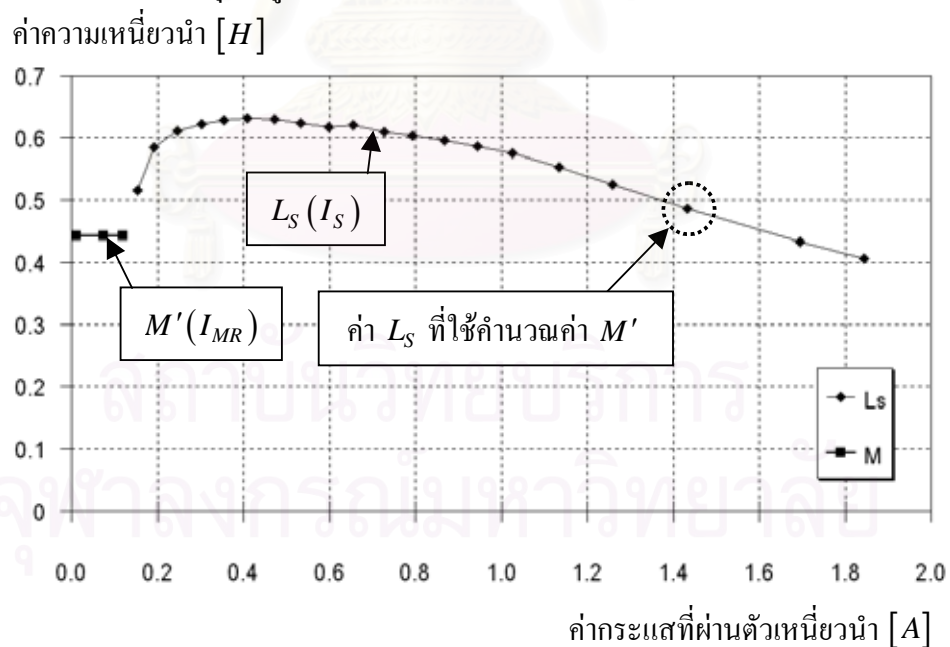
จากรูปที่ 2.14-2.16 จะเห็นว่าค่า  $L_s$  จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่เล็กน้อย แต่จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสมากกว่า ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้ศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสในรูปของเส้นกราฟการอิมิตัวของแกนเหล็ก

### ง) ความเหนี่ยวนำร่วม ( $M'$ )

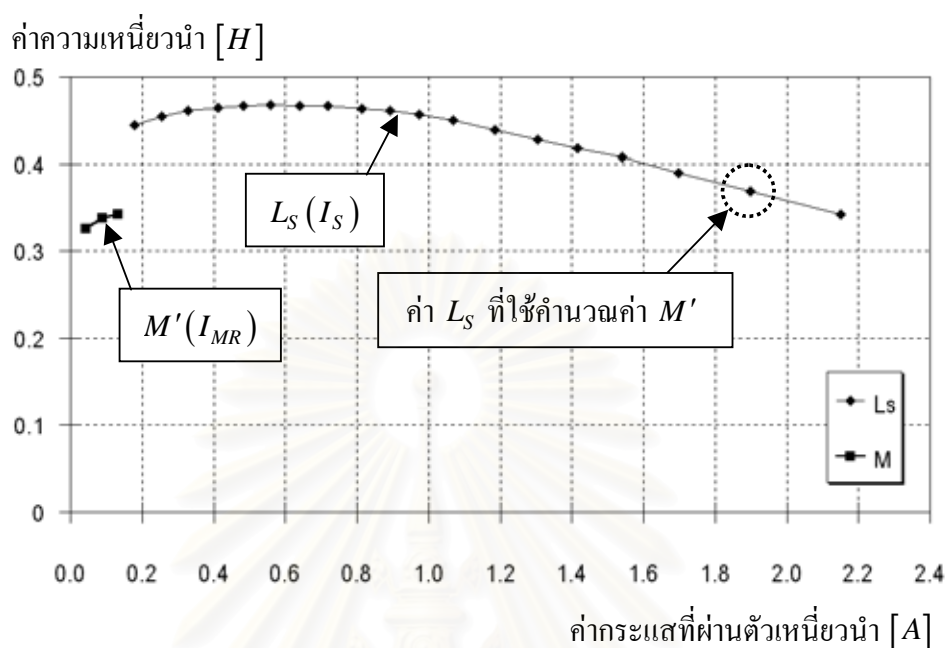
ค่าความเหนี่ยวนำร่วม ( $M'$ ) ที่ได้จากการทดสอบขั้วโรเตอร์นั้น ในการคำนวณต้องอาศัยข้อมูลของค่า  $L_s$  ที่ได้จากการทดสอบไว้โหลดด้วย ในที่นี้เราจะใช้ค่า  $L_s$  จากการทดสอบที่แรงดันและความถี่พิกัด ผลการทดสอบหาค่า  $M'$  ที่ความถี่ 50 Hz เทียบกับค่า  $L_s$  ที่ความถี่เดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.17-2.19



รูปที่ 2.17 ค่าความเหนี่ยวนำ  $M'$  และ  $L_S$  ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 50 Hz  
ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44°C



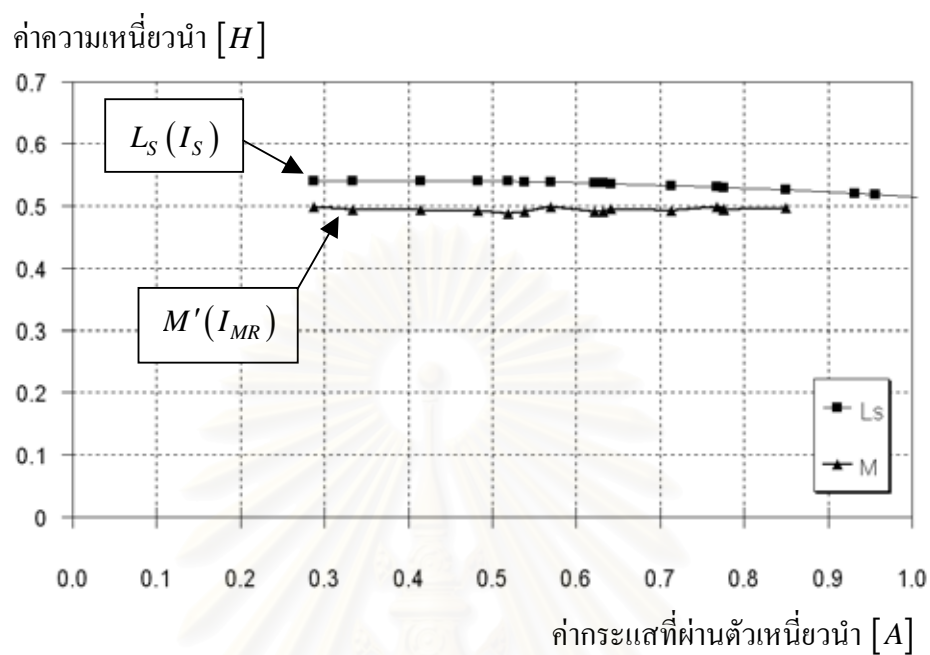
รูปที่ 2.18 ค่าความเหนี่ยวนำ  $M'$  และ  $L_S$  ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 50 Hz  
ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44°C



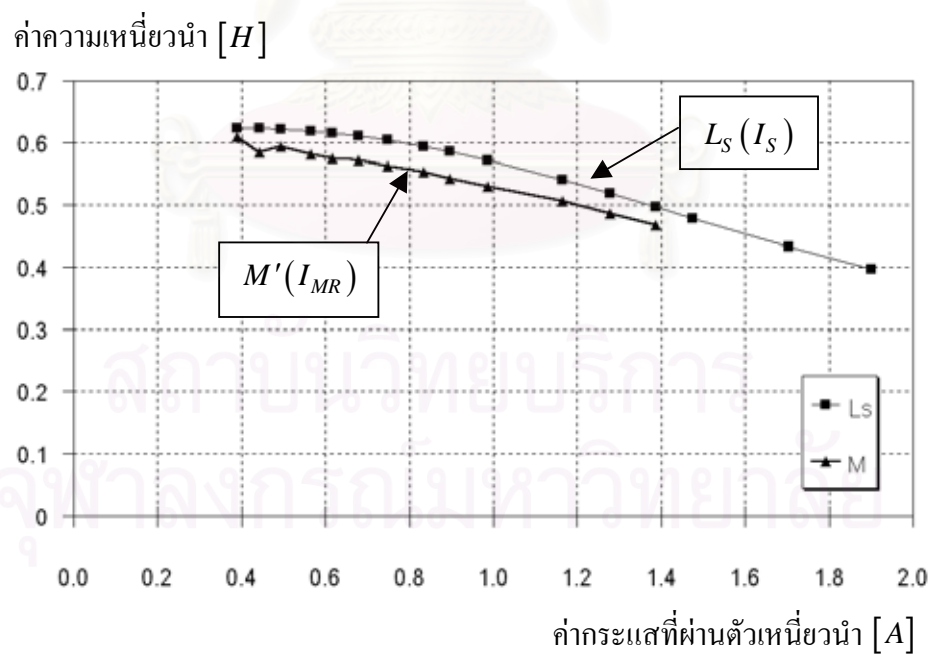
รูปที่ 2.19 ค่าความเหนี่ยวนำ  $M'$  และ  $L_S$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 50 Hz  
ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C

จากรูปที่ 2.17-2.19 จะเห็นว่าค่า  $M'$  ที่ได้จากการทดสอบยัดโรเตอร์เป็นค่าในช่วงที่ฟลักซ์มีค่าน้อย (ค่ากระแสสร้างฟลักซ์น้อย) แต่ค่า  $L_S$  ที่ได้จากการทดสอบไรโรลด์เป็นค่าในช่วงที่ฟลักซ์มีค่าสูง จากสถานะที่ค่าของฟลักซ์มีความแตกต่างกันเช่นนี้ การใช้ค่า  $L_S$  ไปคำนวณไปหาค่า  $M'$  จึงเป็นค่าที่ยังไม่ถูกต้องนัก เพื่อการศึกษาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $M'$  และค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม ( $\sigma L_S$ ) เราจึงได้ทำการทดสอบไรโรลด์และยัดโรเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ ในที่นี้เราจะใช้ความถี่ที่ 2 Hz และได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.20-2.22 ทั้งนี้ในการคำนวณค่า  $M'$  ณ แต่ละค่ากระแส เราจะใช้ค่า  $L_S$  ที่ประมาณได้จากเส้นกราฟของค่า  $L_S$  ในแต่ละรูป (รูปที่ 2.20-2.22) ณ ค่ากระแสนั้นๆ

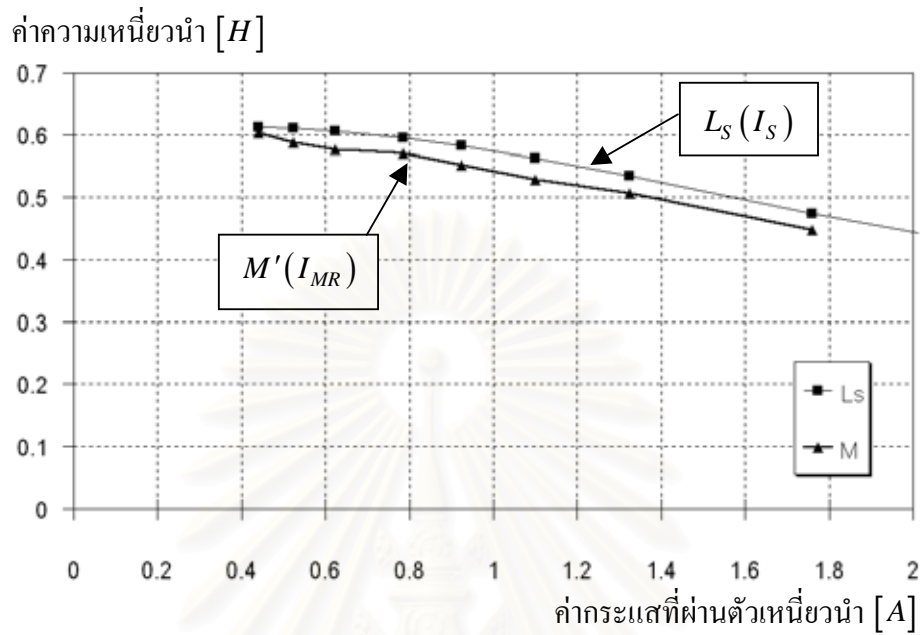
นอกจากนี้เราสามารถแสดงผลการหาค่าความเหนี่ยวนำ  $M'$  ที่ได้จากการทดสอบยัดโรเตอร์ที่ค่ากระแสพิคัดของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ณ ที่ความถี่ต่างๆ โดยในการคำนวณค่า  $M'$  เราจะใช้ค่า  $L_S$  โดยประมาณที่ความถี่ 50 Hz ร่วมด้วยในการคำนวณ แสดงได้ดังรูปที่ 2.23



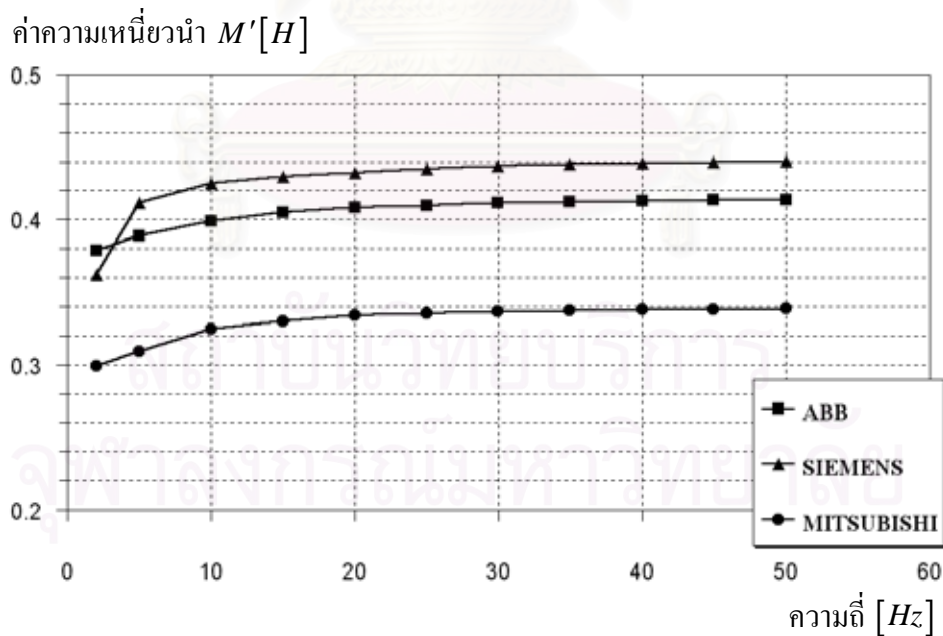
รูปที่ 2.20 ค่า  $L_s$  และค่า  $M'$  จากผลการทดสอบไว้โหลดและขีดโรเตอร์ ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}C$



รูปที่ 2.21 ค่า  $L_s$  และค่า  $M'$  จากผลการทดสอบไว้โหลดและขีดโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}C$



รูปที่ 2.22 ค่า  $L_s$  และค่า  $M'$  จากผลการทดสอบไร้อโหลดและยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}C$

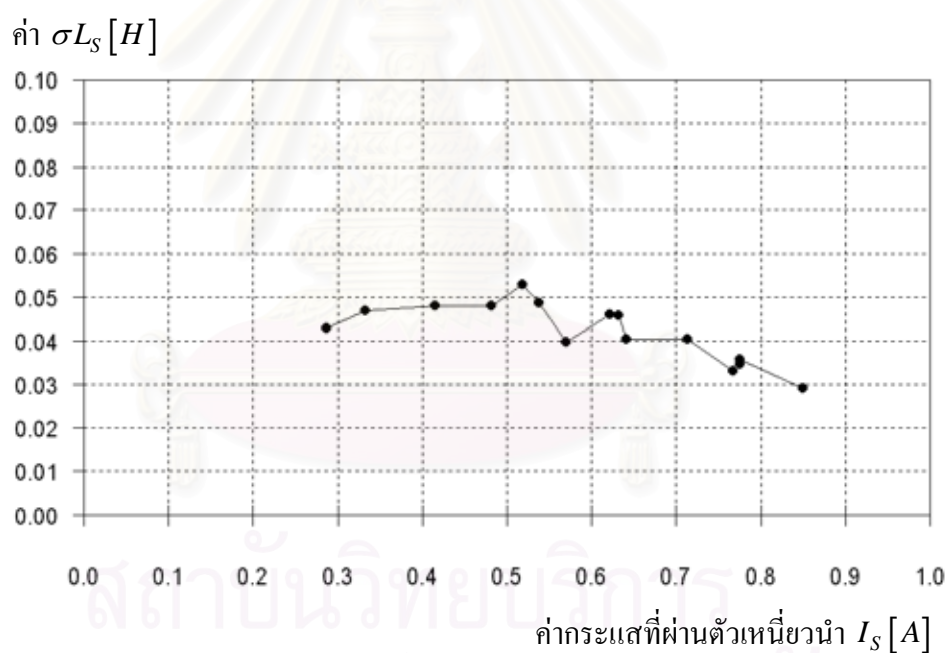


รูปที่ 2.23 ค่าความเหนียว  $M'$  จากผลการทดสอบยึดโรเตอร์ที่ค่ากระแสฟัดของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}C$

จากรูปที่ 2.20-2.23 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $M'$  จะมีความคล้ายคลึงกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $L_S$  คือจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $M'$  ตามค่ากระแสมากกว่าและเปลี่ยนแปลงตามความถี่เล็กน้อย

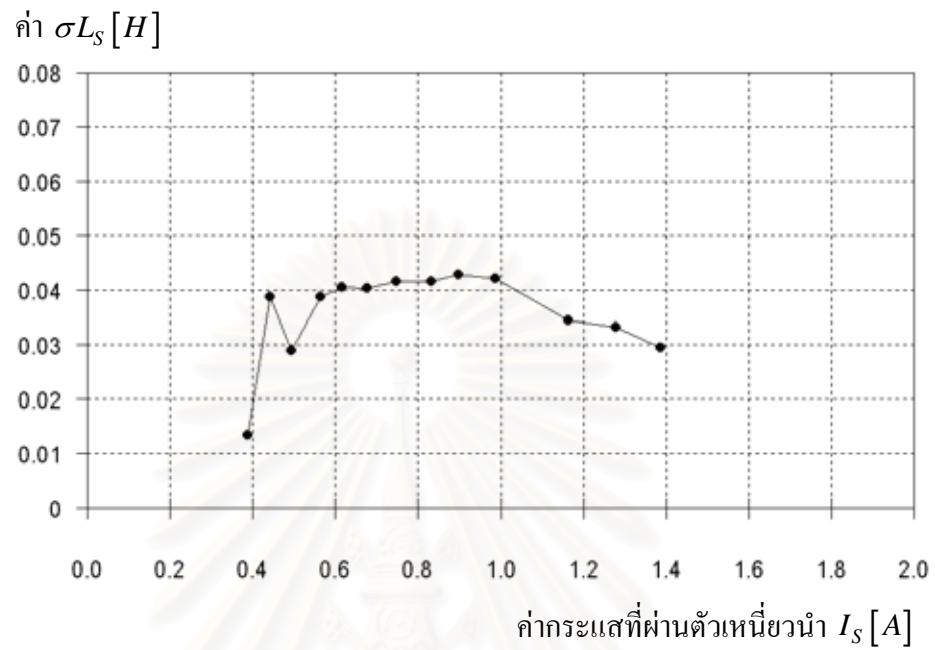
#### จ) ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม ( $\sigma L_S$ )

ผลการทดสอบค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม ( $\sigma L_S$ ) ซึ่งคำนวณจากผลต่างระหว่าง  $L_S$  และ  $M'$  ที่ได้จากการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์ที่ความถี่ต่ำ (2 Hz) แสดงได้ดังรูปที่ 2.24-2.26

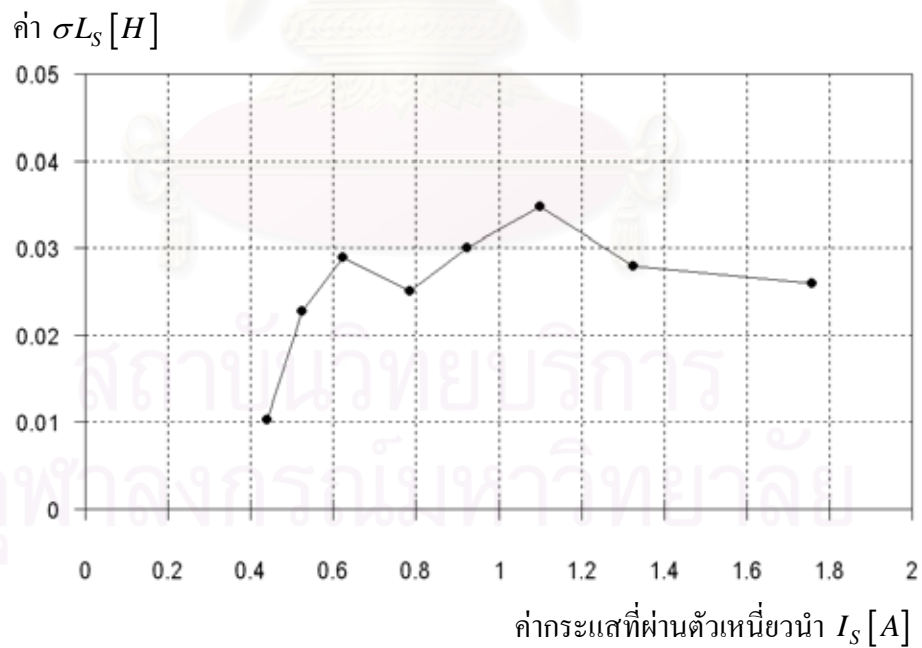


รูปที่ 2.24 ค่า  $\sigma L_S$  ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44 °C





รูปที่ 2.25 ค่า  $\sigma L_S$  ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^\circ C$

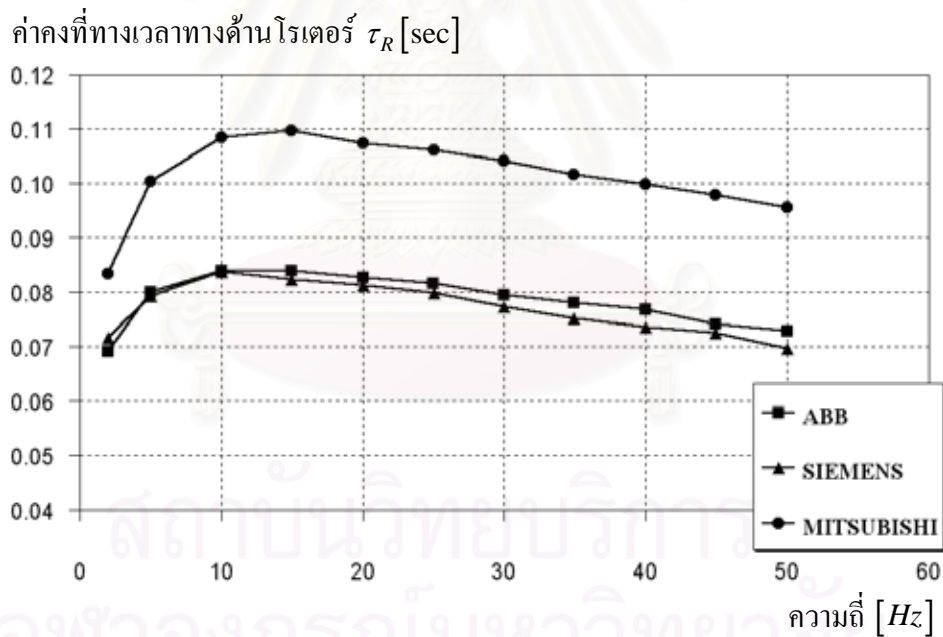


รูปที่ 2.26 ค่า  $\sigma L_S$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^\circ C$

จากผลการทดสอบในรูปแบบที่ 2.24-2.26 จะเห็นได้ว่าค่าของ  $\sigma L_S$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อฟลักซ์มีค่ามากและลดลงอีกทีเมื่อฟลักซ์มีค่าน้อยๆ ค่าความเหนียวนำรั้วไหลรวม ( $\sigma L_S$ ) นี้จึงเป็นค่าที่มีความซับซ้อนและเนื่องจากค่า  $\sigma L_S$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า  $L_S$  ,  $M'$  ในงานวิจัยนี้เราจึงใช้วิธีการหาค่า  $\sigma L_S$  ที่สภาวะเดียว คือสภาวะที่ค่าฟลักซ์เป็นศูนย์

### ฉ) ค่าคงที่ทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ )

จากการทดสอบยึดโรเตอร์ที่ค่ากระแสฟลักซ์ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวซึ่งจะได้ค่า  $R'_R$  และ  $M'$  ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.13 และ 2.23 นั้น เราสามารถนำค่าที่ได้นี้มาคำนวณหาค่าคงที่ทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) ได้โดยการคำนวณ  $\tau_R = M'/R'_R$  และได้แสดงผลการหาค่า  $\tau_R$  ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ได้ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ค่าคงที่ทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) จากผลการทดสอบยึดโรเตอร์ที่ค่ากระแสฟลักซ์ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 2.27 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางผิวทำให้ค่า  $R'_R$  เพิ่มขึ้นตามความถี่ดังรูปที่ 2.13 นั้น ทำให้ค่า

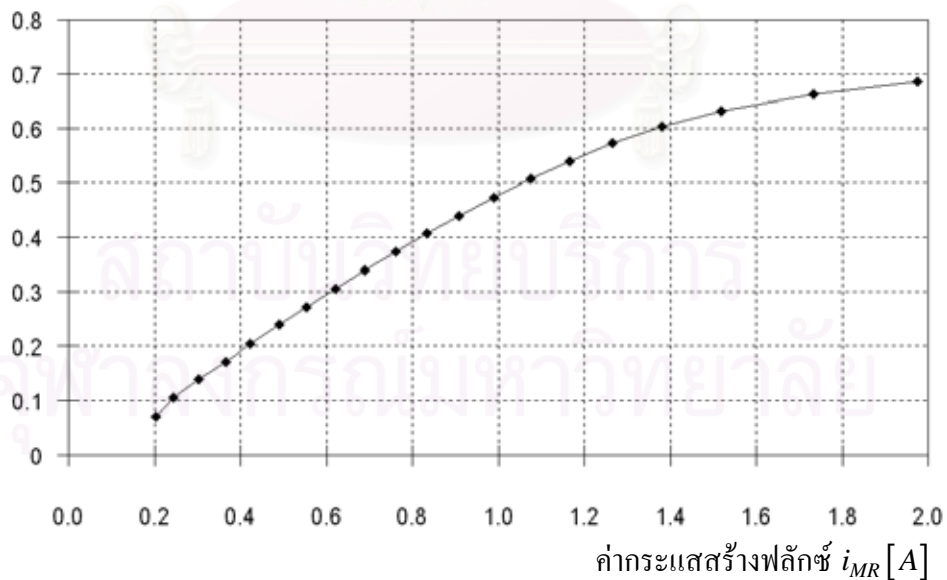
$\tau_R$  มีค่าลดลงตามความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.27

เราสามารถสรุปผลการทดสอบไว้โหลดและยึดโรเตอร์หาค่าพารามิเตอร์ ที่ความถี่ 50 Hz ได้ดังตารางที่ 2.2 และเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวแสดงได้ดังรูปที่ 2.28-2.30 ซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของกระแสเฟสกับเส้นกราฟค่า  $L_S - \sigma L_S$  ที่ความถี่ 50 Hz

ตารางที่ 2.2 ผลการหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีทดสอบไว้โหลดและยึดโรเตอร์

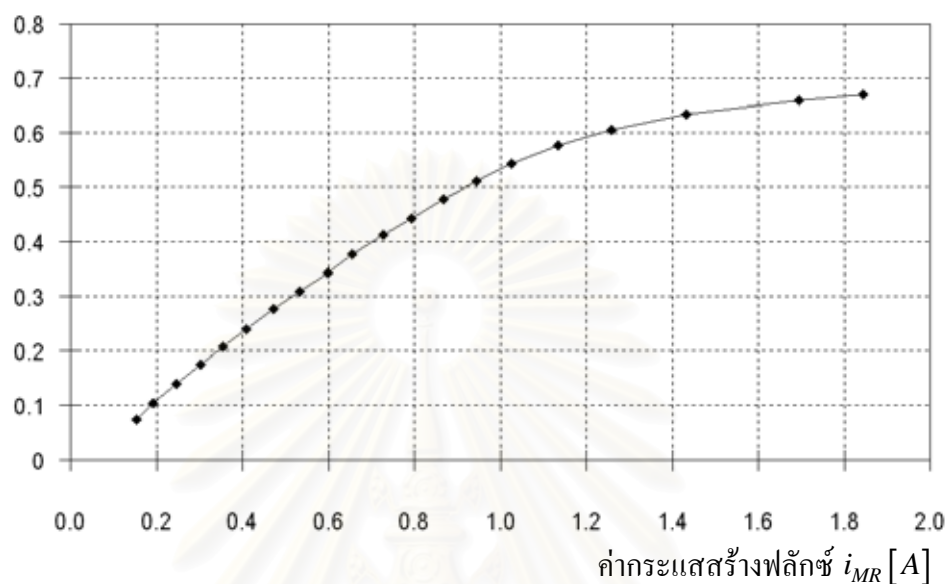
มอเตอร์	ค่าพารามิเตอร์				
	$R_S$ [ $\Omega$ ]	$\sigma L_S$ [mH]	$M'$ [mH]	$R'_R$ [ $\Omega$ ]	$\tau_R$ [ms]
ABB	7.96	43.4	415.4	6.10	68.1
SEIMENS	8.80	43.8	441.9	6.22	71.0
MITSUBISHI	5.10	27.8	340.0	3.56	95.5

ค่าฟลักซ์  $\lambda'_R$  [Wb]



รูปที่ 2.28 เส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ของ ABB ณ อุณหภูมิการทดสอบ 44°C

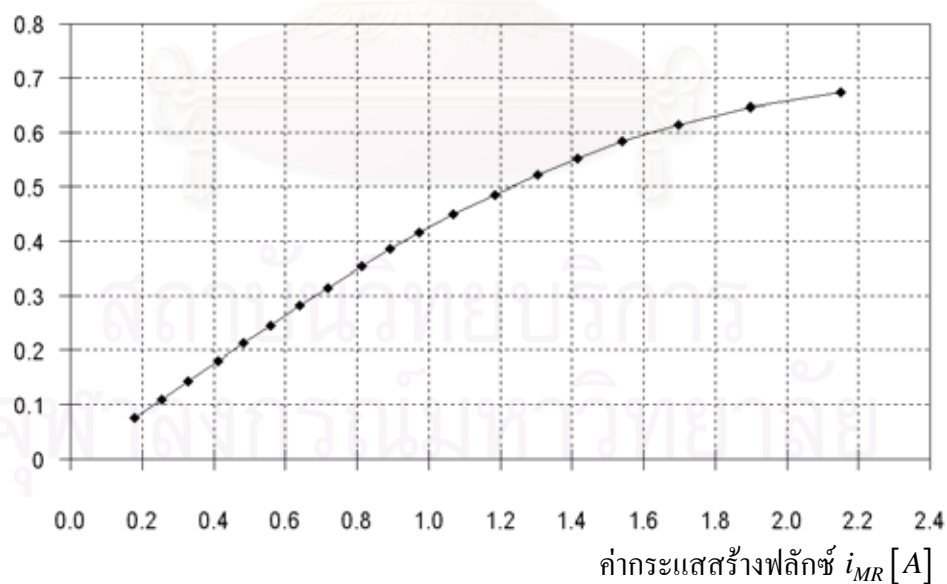
ค่าฟลักซ์  $\lambda'_R$  [Wb]



รูปที่ 2.29 เส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ของ SIEMENS

ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}\text{C}$

ค่าฟลักซ์  $\lambda'_R$  [Wb]



รูปที่ 2.30 เส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กของมอเตอร์ของ MITSUBISHI

ณ อุณหภูมิการทดสอบ  $44^{\circ}\text{C}$

### บทที่ 3

#### การหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์

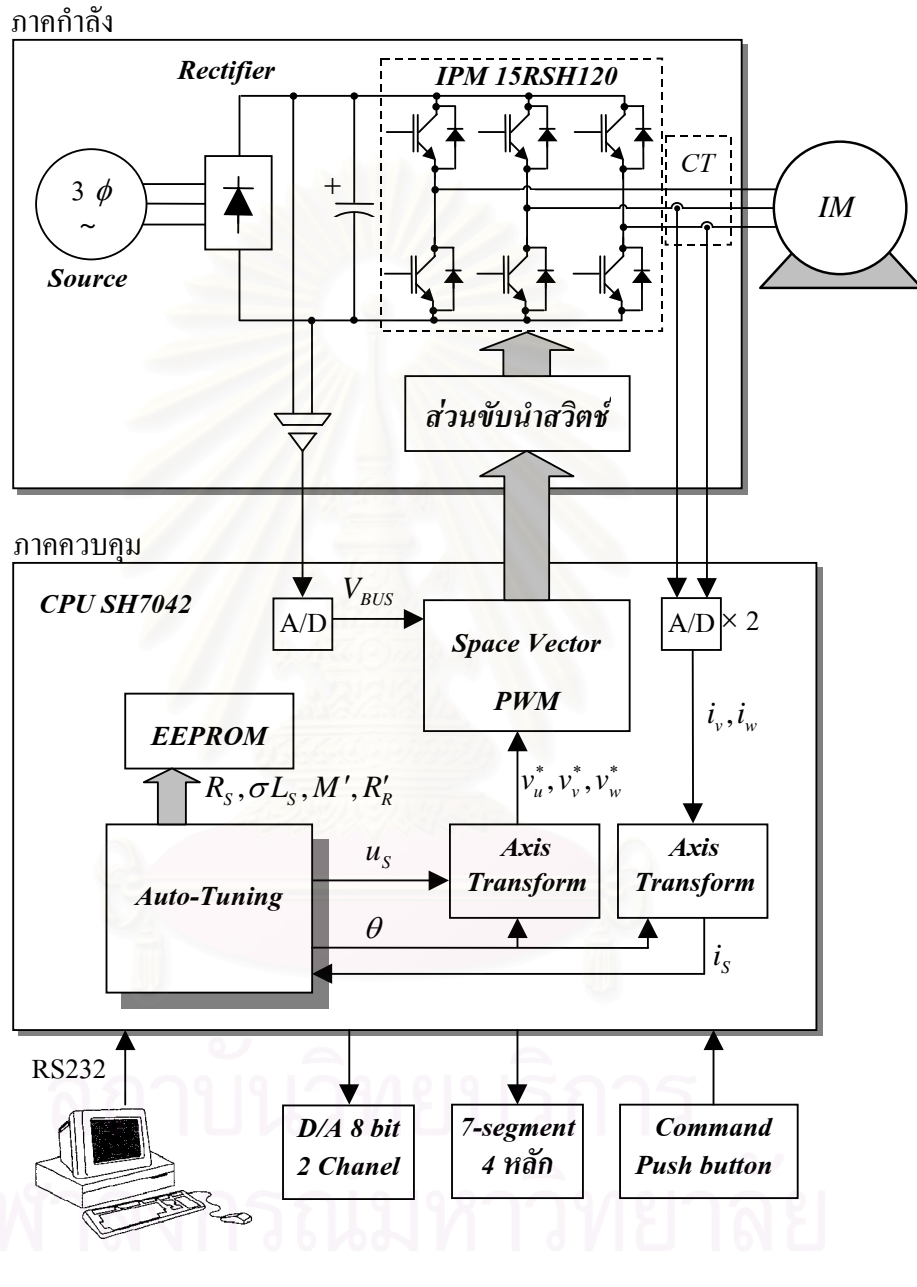
ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการจ่ายสัญญาณ กระตุ้นซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.1 ในส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้อ่านค่ากระแสเราได้ใช้ CT HC-PSG30V4B15 ซึ่งมีพิสัยกระแสที่ 30 Amp (Saturate at  $\pm 75$  Amp) ให้เอาท์พุท  $\pm 4 \text{ V} \pm 2\%$  มี Linearity  $\pm 1.5\%$  และในส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้อ่านค่าแรงดันเราได้ใช้ IC HP4562 และค่าความต้านทานในการแยกโคดและทอนระดับแรงดันลง ซึ่งค่าของแรงดัน  $V_{BUS}$  ที่ใช้ในงานวิจัยอยู่ที่ 540 V จากค่าของกระแสและแรงดันที่ได้จะถูกทำให้อยู่ในรูปของแรงดันที่มีค่าเหมาะสมสำหรับให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าโดยใช้ A/D ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ CPU ของ HITACHI เบอร์ SH7042 ซึ่งมี A/D 10 bit มี Linearity  $\pm 1.5\%$  ซึ่งจากผลการทดสอบการอ่านค่ากระแสและแรงดันจนได้ค่าในไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วจะมีค่าผิดพลาด  $\pm 2\%$  และ  $\pm 2\%$  ตามลำดับ การหาค่าพารามิเตอร์ในโครงงานนี้จะใช้วิธีการแยกหาค่าพารามิเตอร์ทีละตัว โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1. การหาค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ ( $R_S$ )
2. การหาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวม ( $\sigma L_S$ )
3. การหาค่าคงตัวทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) และค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูลในวงจรสมมูลอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ ( $R'_R$ ) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมสมมูลในวงจรสมมูลอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ ( $M'$ ) มีค่าเท่ากับ  $\tau_R R'_R$

โดยในแต่ละกลุ่มจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการจ่ายแรงดันและกระแส ด้วยรูปแบบและค่าที่เหมาะสมเพื่อที่จะกระตุ้นให้ได้ข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาในระบบออกมาอย่างเพียงพอ และในการจ่ายแรงดันและกระแสจะต้องมีค่าไม่มากเกินไปที่อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบ และมีค่าไม่น้อยเกินไปซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดสูงในการคำนวณ

ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เราจะใช้วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด (Recursive Least Square ; RLS) ช่วยในการประมวลผลเพื่อช่วยลดผลของสัญญาณรบกวนด้วย

ในตอนต้นนี้เราจะทำการทดสอบและแสดงผลการหาค่าพารามิเตอร์เฉพาะในกรณีมอเตอร์ของ ABB หลังจากนั้นในตอนท้ายของบท จะทำการสรุปค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวที่ใช้ในการทดสอบ

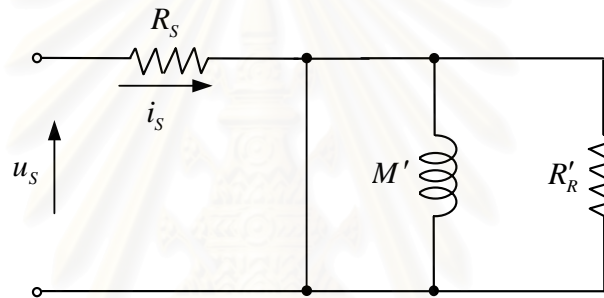


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์

### 3.1 การหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ( $R_S$ )

ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ สามารถหาได้โดยการป้อนแรงดันไฟตรงให้กับมอเตอร์ และวัดกระแสสเตเตอร์ที่ไหล เราสามารถคำนวณหาค่า  $R_S$  ได้จากอัตราส่วนของแรงดันต่อกระแส อย่างไรก็ตามผลของค่าประวิงเวลา (Dead time) ในการสวิตช์ และผลความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างได้ไม่ตรงกับแรงดันคำสั่งซึ่งเราใช้ในการคำนวณ เราสามารถเขียนวงจรสมมูลไฟตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ทำการจ่ายแรงดันเพื่อหาค่า  $R_S$  ได้ดังรูปที่

3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลไฟตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ทำการจ่ายแรงดันเพื่อหาค่า  $R_S$

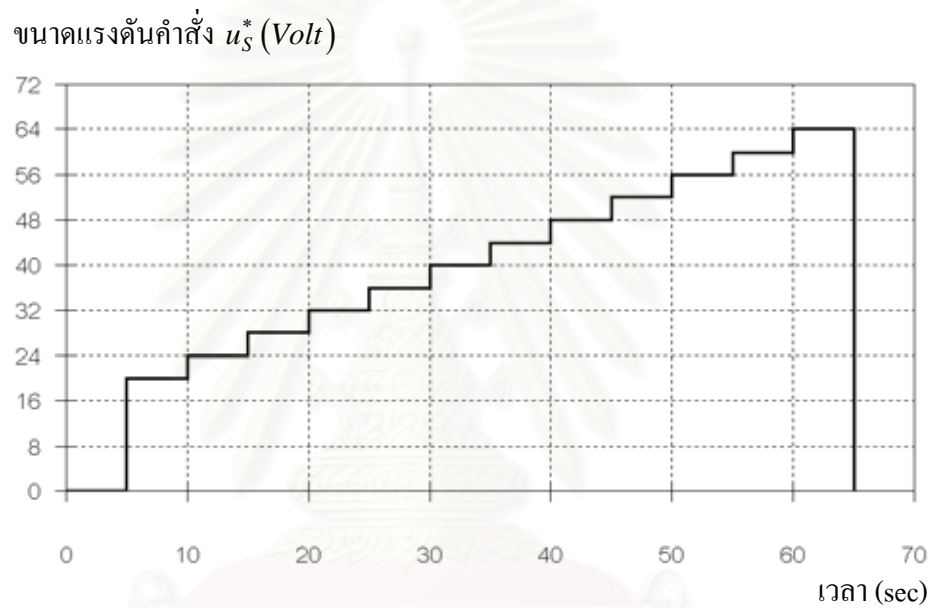
จากการศึกษาข้อมูลของสวิตช์กำลัง ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ (ดูในภาคผนวก ก) ค่าความต้านทานของสวิตช์มีค่าน้อยมากสามารถละเลยได้เลย และส่วนของแรงดันที่หายไปเนื่องจากแรงดันตกคร่อมสวิตช์และเวลาประวิง ( $u_{DT}$ ) สามารถเขียนรวมเข้ากับสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่ง ในขณะที่ป้อนแรงดันไฟตรงให้กับมอเตอร์ได้ดังสมการ

$$u_S^* - u_{DT} = u_S = R_S i_S \quad (3.1)$$

เนื่องจากเราสามารถประมาณได้ว่าค่าแรงดัน  $u_{DT}$  ไม่ขึ้นกับค่ากระแสสเตเตอร์เราจึงสามารถลดผลของแรงดันที่หายไปเนื่องจากแรงดันตกคร่อมสวิตช์และเวลาประวิงได้โดยการจ่ายแรงดันที่ขนาดต่างกันให้กับมอเตอร์และคำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_S$  จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ( $\Delta u_S$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแส ( $\Delta i_S$ ) และเพื่อหลีกเลี่ยงการจ่ายแรงดันที่ค่าต่ำๆ เราจะใช้

แรงดันเริ่มต้นที่ค่าประมาณเท่ากับแรงดันที่หายไปเนื่องจากค่าเวลาประจุ ในที่นี้แรงดัน  $u_{DT}$  มีค่าประมาณ 20 โวลต์ ค่าแรงดันคำสั่งที่จ่ายให้มอเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.3

ในที่นี้การเลือกค่าขนาดของแรงดันที่เพิ่มแต่ละขั้นจะพิจารณาจากค่ากระแสพิคคของมอเตอร์ และการกำหนดจำนวนขั้นของค่าแรงดันคำสั่งที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 รูปแบบการจ่ายแรงดันไฟตรงที่ขนาดต่างๆ

ค่า  $R_s$  คำนวณได้จากความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสตามสมการที่ (3.2)

$$R_s = \frac{\Delta u_s}{\Delta i_s} = \frac{u_s(n) - u_s(n-1)}{i_s(n) - i_s(n-1)} \quad (3.2)$$

โดยที่ “ $n$ ” แสดงถึงลำดับของข้อมูลในแต่ละขั้น



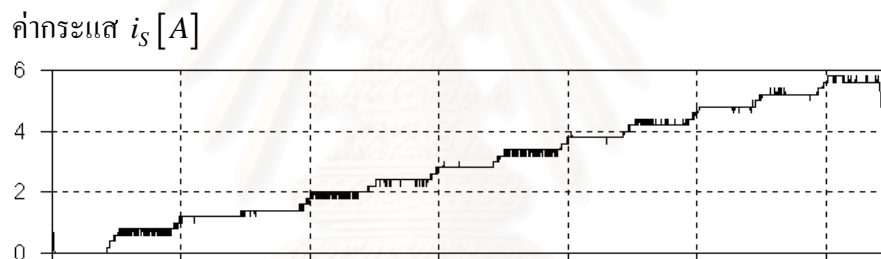
จากข้อมูลที่ได้ในแต่ละขั้น เราสามารถใช้วิธีการคำนวณด้วย RLS มาช่วยคำนวณค่า  $R_S$  ในแต่ละขั้นของแรงดันได้ สมการที่ (3.2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวลาไม่ต่อเนื่องเพื่อนำไปคำนวณด้วยวิธี RLS ดังนี้ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค)

$$\text{สัญญาณออก : } y(N) = \Delta u_S(N) \quad (3.3)$$

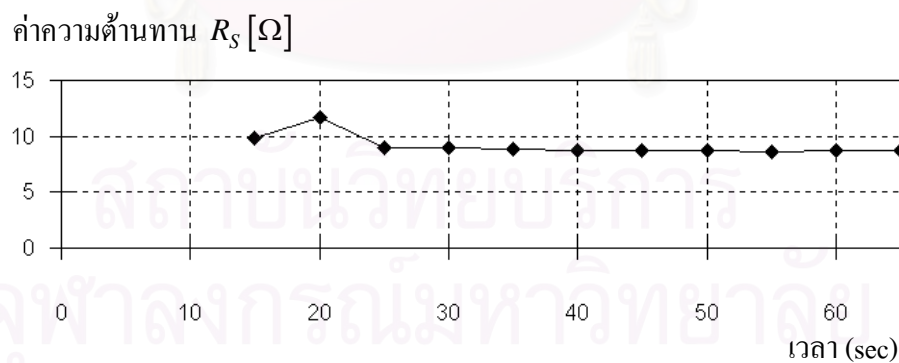
$$\text{สัญญาณเข้า : } c(N) = \Delta i_S(N) \quad (3.4)$$

$$\text{พารามิเตอร์ : } \hat{X}(N) = R_S \quad (3.5)$$

จากการใช้เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง  $u_S^*$  ดังรูปที่ 3.3 และใช้ค่ามุมของเวกเตอร์แรงดันมีค่าเป็น 0 องศาได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.4



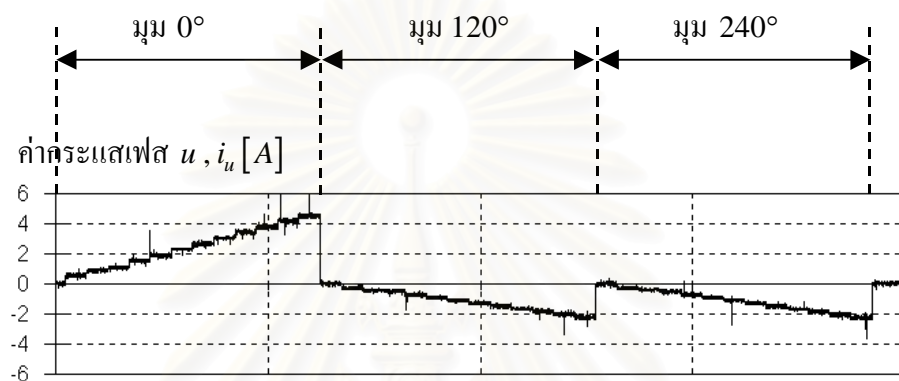
(ก) ค่ากระแส  $i_S$  ขณะที่จ่ายแรงดัน  $u_S$  ที่มีมุม 0 องศา



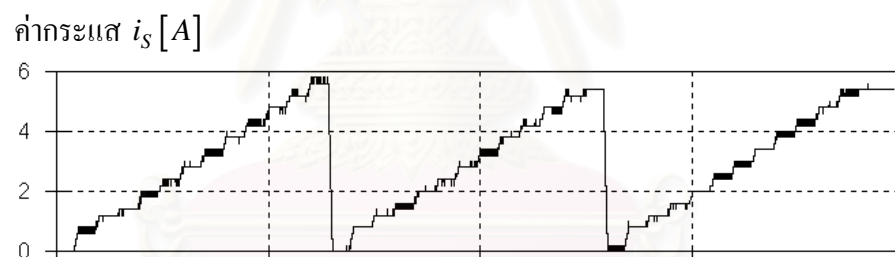
(ข) ผลการลู่เข้าของค่า  $R_S$  ด้วยการคำนวณ RLS

รูปที่ 3.4 ค่ากระแส  $i_S$  และ  $R_S$  ขณะที่จ่ายแรงดัน  $u_S$  ที่มีมุม 0 องศา

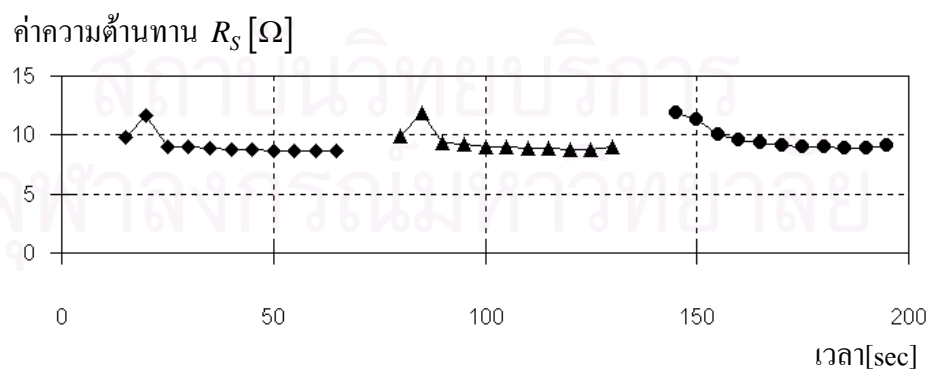
เนื่องจากขดลวดมอเตอร์ 3 เฟสอาจมีค่าความต้านทานต่างกันเล็กน้อยในแต่ละขด เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ย 3 เฟสของความต้านทาน เราจึงทำการป้อนแอมเพอเรจแรงดันที่ค่ามุมต่างๆกันในที่นี้เราเลือกใช้ 3 ค่าคือที่มุมเท่ากับ 0, 120, และ 240 องศา แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดสอบการหาค่า  $R_S$  แสดงในรูปที่ 3.5



(ก) ค่ากระแสในเฟส  $u$  ( $i_u$ ) ที่ค่ามุมต่างๆ



(ข) ค่าสเปซแอมเพอเรจ  $i_s$  ที่ค่ามุมต่างๆ



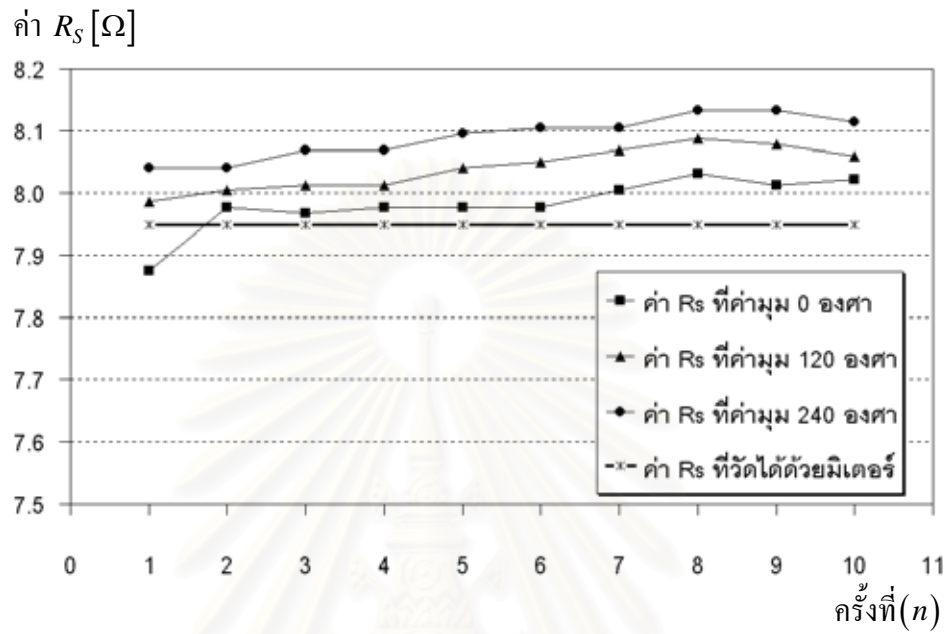
(ค) ผลการลู่เข้าของค่า  $R_S$  ด้วยการคำนวณ RLS

รูปที่ 3.5 การหาค่า  $R_S$  ด้วยการจ่ายแรงดันที่ค่ามุม 0, 120, 240 องศา

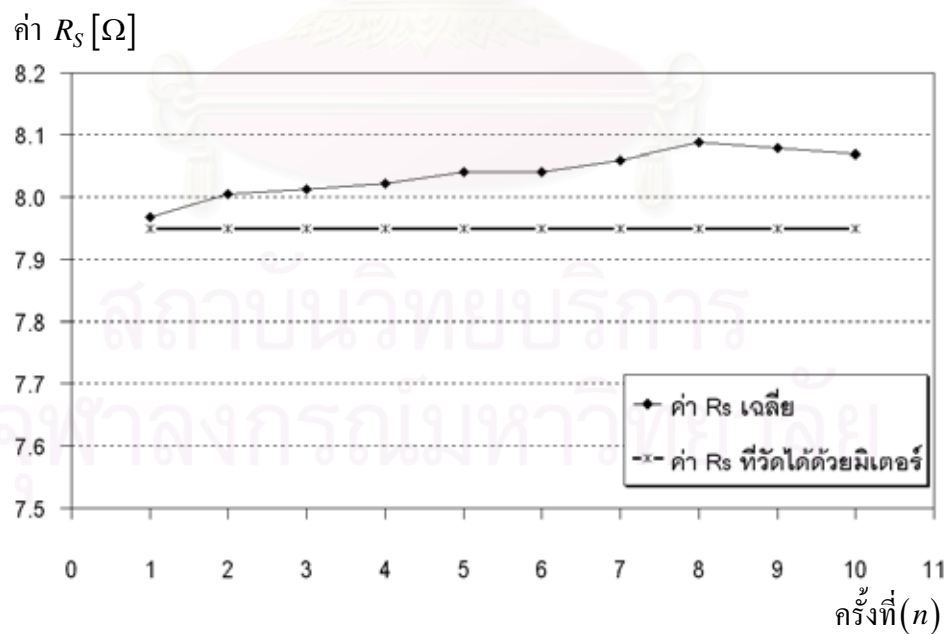
เนื่องจากค่า  $R_s$  จะมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.4-2.6 ในการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ที่หาได้จากอินเวอร์เตอร์ เราจึงเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่วัดโดยตรงที่ขั้วของมอเตอร์หลังจากหยุดการทดสอบแล้วทันที ผลการทดสอบการหาค่า  $R_s$  ของมอเตอร์ ABB ซ้ำหลายๆครั้ง ที่ค่ามุมต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 และค่าเฉลี่ยของ  $R_s$  ที่หาได้แสดงในรูปที่ 3.7 และเรายังทำการหาค่า  $R_s$  กับมอเตอร์ของ SIEMENS และของ MITSUBISHI ด้วยแสดงได้ดังรูปที่ 3.8-3.11



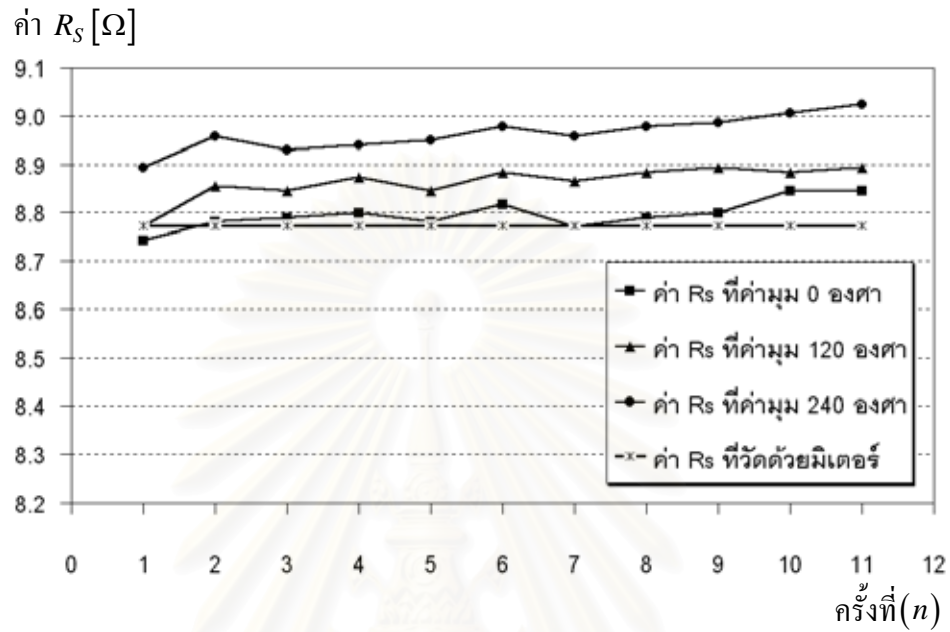
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



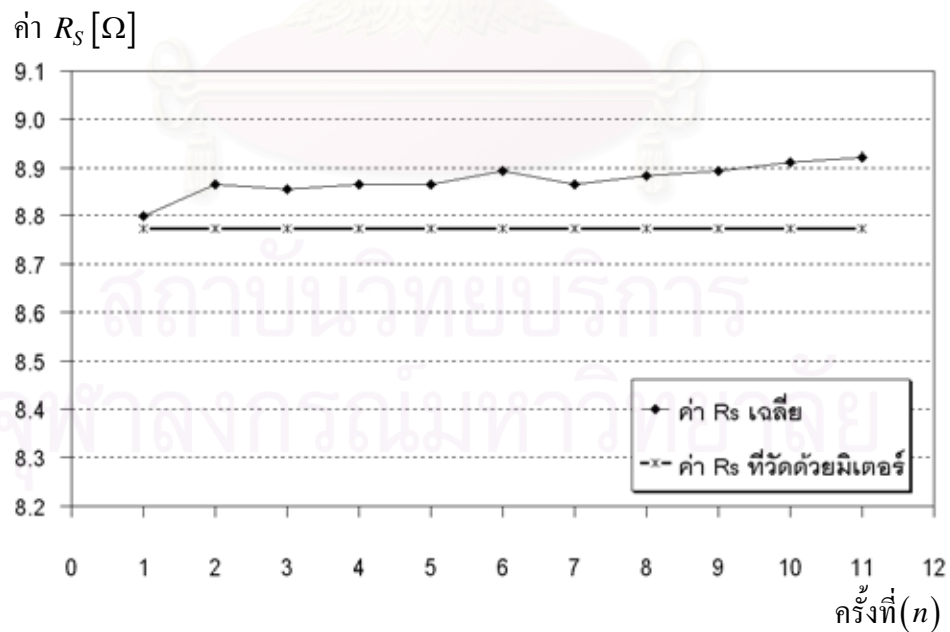
รูปที่ 3.6 ผลการหาค่า  $R_S$  ของมอเตอร์ ABB ที่ค่ามมต่างๆเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์



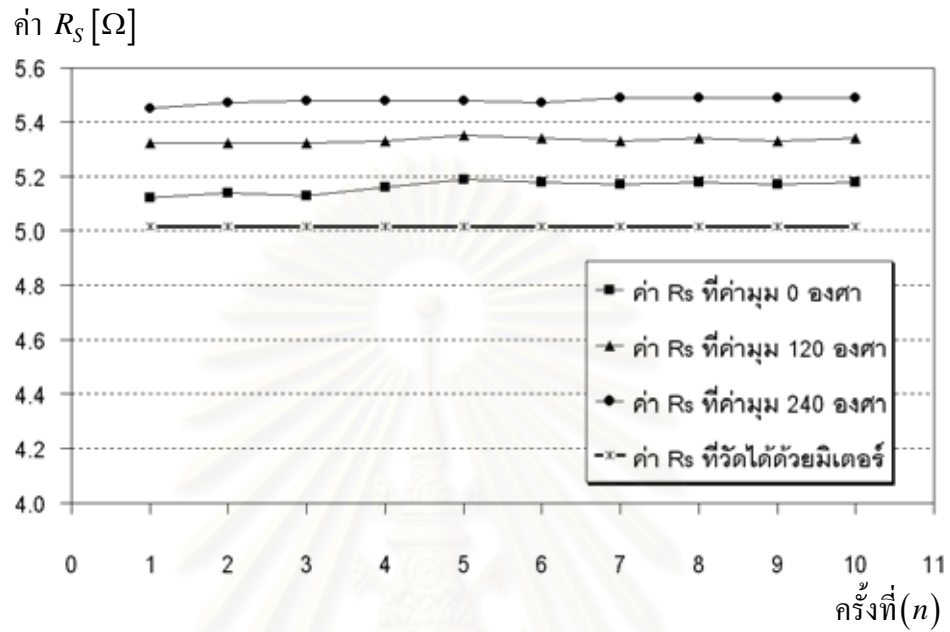
รูปที่ 3.7 ผลการหาค่า  $R_S$  ของมอเตอร์ ABB เฉลี่ยเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์



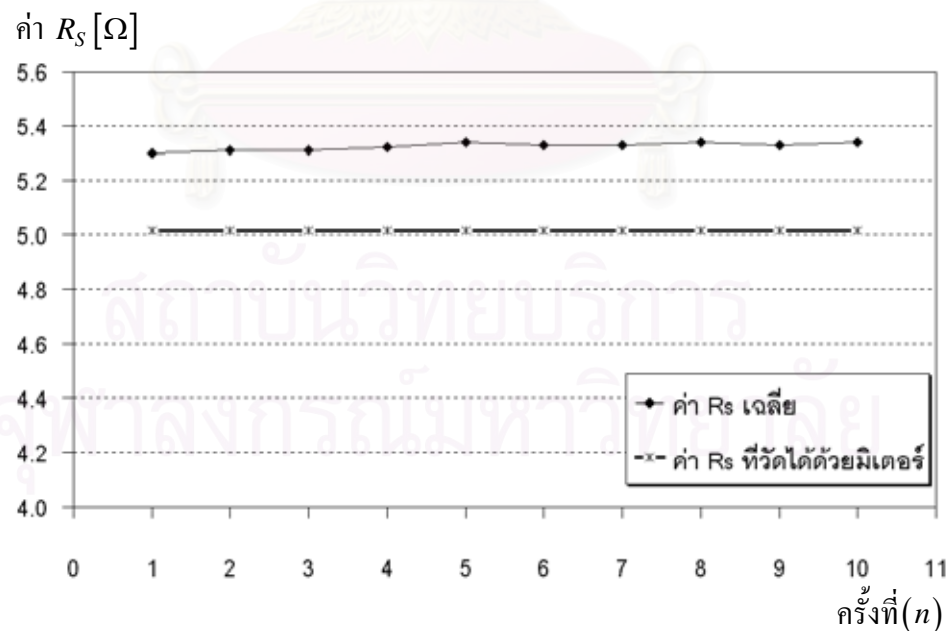
รูปที่ 3.8 ผลการหาค่า  $R_S$  ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ค้ำมุ่มต่างๆเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์



รูปที่ 3.9 ผลการหาค่า  $R_S$  ของมอเตอร์ SIEMENS เฉลี่ยเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์



รูปที่ 3.10 ผลการหาค่า  $R_s$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ค่ามุมต่างๆเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์



รูปที่ 3.11 ผลการหาค่า  $R_s$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI เจดีย์เทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์

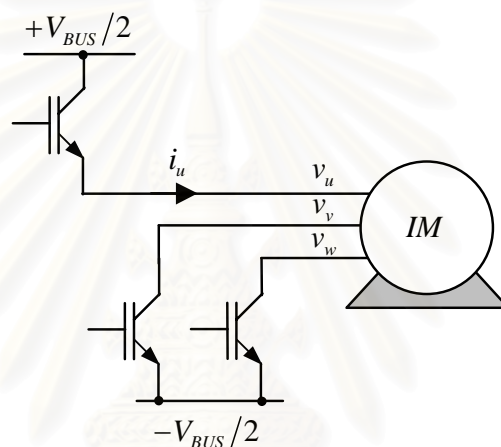
จากผลการหาค่า  $R_S$  ที่ได้เมื่อเทียบกับค่าที่วัดด้วยมิเตอร์จะได้ค่าผิดพลาดของค่า  $R_S$  ของมอเตอร์ ABB , SIEMENS และ MITSUBISHI ประมาณ +1.1 %,+0.6 % และ +3.9 % ตามลำดับ ซึ่งอาจมีสาเหตุจากค่าความผิดพลาดจากการอ่านค่ากระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์ และจากรูปที่ 3.6-3.11 จะเห็นว่าเมื่อเราทำการหาค่า  $R_S$  หลายๆครั้งต่อเนื่องกัน ความร้อนจากการที่เราจ่ายแรงดันไฟตรงนานๆทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งมีผลให้ค่า  $R_S$  เพิ่มขึ้นด้วย



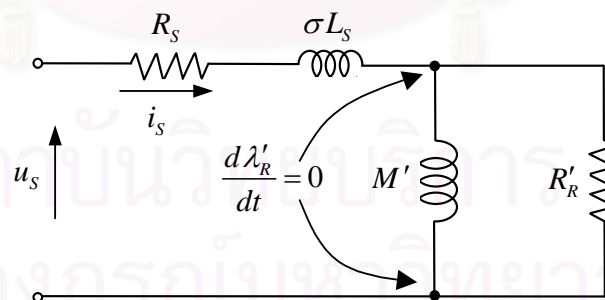
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 การหาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์ ( $\sigma L_s$ )

การหาค่าการหาค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์ เราใช้วิธีการป้อนแรงดันค่าสูงในช่วงเวลาสั้นๆ (แรงดันพัลส์) ในที่นี้เราใช้แรงดันบัสไฟตรงเป็นตัวจ่ายแรงดัน และใช้รูปแบบการสวิตช์ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เราสามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์ขณะที่เราใช้รูปแบบการสวิตช์นี้ แสดงได้ดังในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 รูปแบบการสวิตช์ที่ใช้ในการจ่ายแรงดันพัลส์ให้กับมอเตอร์



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของมอเตอร์ขณะจ่ายแรงดันพัลส์ให้กับมอเตอร์

ในช่วงเวลาที่เราป้อนแรงดันพัลส์นี้กระแสสเตเตอร์จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นด้วยความชันค่าหนึ่ง เนื่องจากมอเตอร์โดยทั่วไปค่าคงตัวทางเวลาทางด้านสเตเตอร์จะมีค่าน้อยกว่าทางด้านโรเตอร์มาก



ดังนั้นในช่วงที่ทำการป้อนแรงดันพัลส์แคบๆนี้ เราสามารถละเลยผลการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ได้ จากสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่งและจากการละเลยผลการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ ( $\frac{d\lambda'_R}{dt} = 0$ ) เราสามารถเขียนสมการทางด้านสเตเตอร์ได้ดังสมการที่ (3.6)

$$u_S = R_S i_S + \sigma L_S \frac{d}{dt} i_S \quad (3.6)$$

จากการที่เราใช้แรงดันบัสไฟตรงค่าสูงในการจ่ายแรงดัน ผลกระทบจากความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์จึงมีค่าน้อยจนสามารถละเลยได้ ในช่วงเวลาสั้นๆนี้ข้อมูลของกระแสจะถูกอ่านเข้ามาไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยช่วงเวลาซิกซ์ข้อมูล (Sampling time) ที่น้อยที่สุดเพื่อให้ได้ข้อมูลจำนวนมากพอสำหรับการคำนวณ แต่ด้วยขีดจำกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ เราจะแยกการอ่านข้อมูลกับการคำนวณออกจากกันโดยข้อมูลที่อ่านได้ในช่วงเวลาที่จ่ายแรงดันพัลส์จะถูกเก็บไว้ก่อนแล้วนำมาคำนวณภายหลัง

ในขณะที่จ่ายแรงดันพัลส์แคบๆนี้ แรงดันบัสไฟตรงจะตกลงเล็กน้อย เพื่อชดเชยแรงดันที่ลดลงนี้ ข้อมูลของแรงดันบัสไฟตรงจะถูกอ่านเข้ามาพร้อมกับกระแสด้วย และเพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อมความต้านทาน  $R_S$  เราจะนำค่าความต้านทานที่หามาได้ก่อนหน้านี้มาใช้ในการคำนวณด้วย สมการที่ (3.6) สามารถเขียนในรูปเวลาไม่ต่อเนื่องได้เพื่อเป็นสมการสำหรับการคำนวณ RLS ดังสมการที่ (3.7) – (3.9)

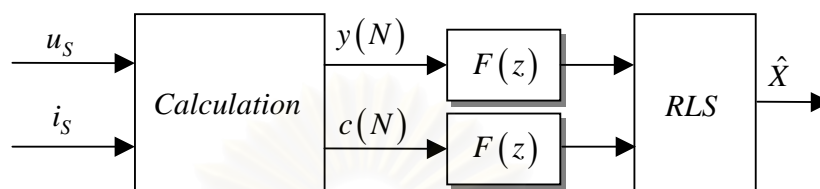
$$\text{สัญญาณออก : } y(N) = u_S(N) - R_S i_S(N) \quad (3.7)$$

$$\text{สัญญาณเข้า : } c(N) = i_S(N) - i_S(N-1) \quad (3.8)$$

$$\text{พารามิเตอร์ : } \hat{X}(N) = \frac{\sigma L_S}{T_S} \quad (3.9)$$

เนื่องจากค่า  $c(N)$  ในสมการที่ (3.8) เป็นค่าอนุพันธ์ของกระแสซึ่งจะไวต่อสัญญาณรบกวนที่ความถี่สูง เพื่อที่จะลดผลนี้เราจึงออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำ  $F(z)$  เพื่อกรองสัญญาณทั้ง  $c(N)$  และ  $y(N)$  ดังแสดงในรูปที่ 3.14 การใช้วงจรกรองผ่านต่ำทั้งสองข้างของสมการนี้ จะไม่มีผลต่อการ

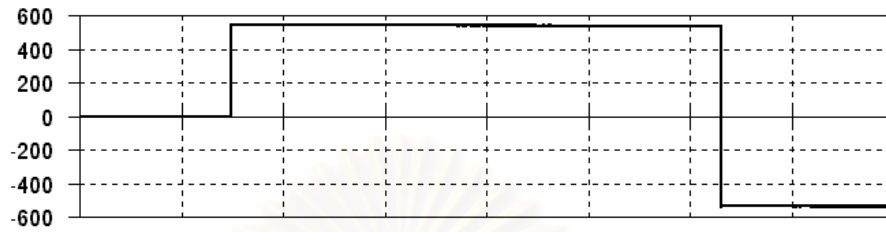
ค่านวนค่าของพารามิเตอร์ ในการออกแบบค่าความถี่ตัดข้ามของวงจรกรองผ่านต่ำนี้เราได้เลือกใช้ที่ความถี่  $1/5$  ของความถี่ของช่วงเวลาที่ชักข้อมูล



รูปที่ 3.14 การใช้วงจรกรองผ่านต่ำ  $F(z)$  ในกรองสัญญาณ  $c(N)$  และ  $y(N)$

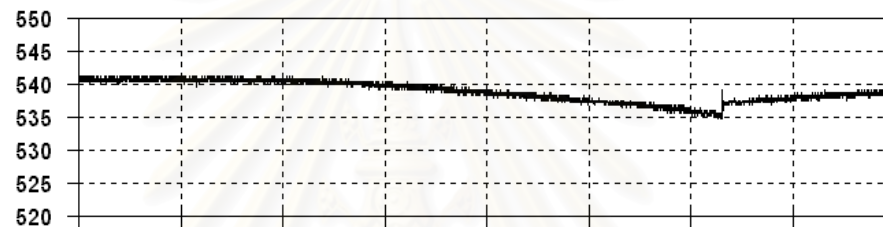
ผลการทดสอบหาค่า  $\sigma_{L_S}$  สามารถแสดงสัญญาณกระแสและแรงดันในขณะที่จ่ายแรงดันพัลส์ให้กับมอเตอร์ดังรูปที่ 3.15 และผลการคำนวณค่า  $\sigma_{L_S}$  ด้วยวิธี RLS แสดงได้ดังรูปที่ 3.16

แรงดันระหว่างสายที่ขั้วของมอเตอร์  $v_{uv}$  (Volt)



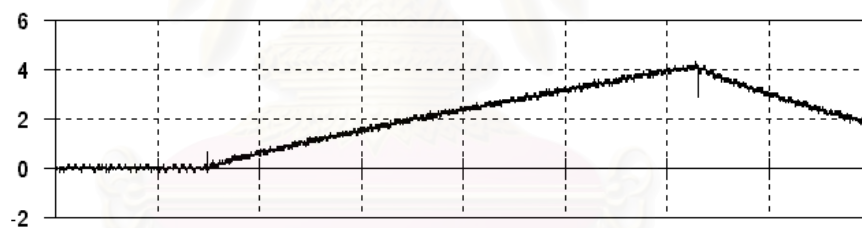
(ก) แรงดันระหว่างสายที่ขั้วของมอเตอร์

แรงดันบัสไฟตรง  $V_{BUS}$  [V]



(ข) แรงดันบัสไฟตรง

กระแสเฟส  $u, i_u$  [A]



0.0E+00 1.0E-04 2.0E-04 3.0E-04 4.0E-04 5.0E-04 6.0E-04 7.0E-04 8.0E-04

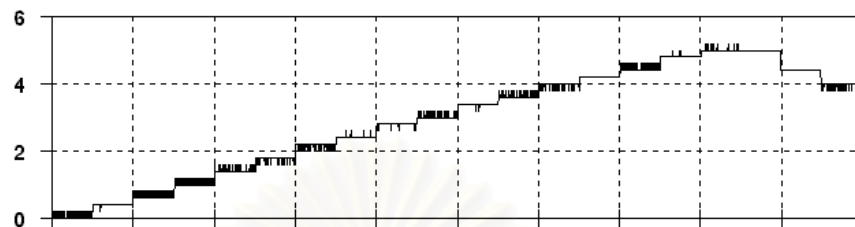
เวลา [sec]

(ค) กระแสในเฟส  $u$

รูปที่ 3.15 สัญญาณกระแสและแรงดันในขณะที่จ่ายแรงดันพัลส์ให้กับมอเตอร์

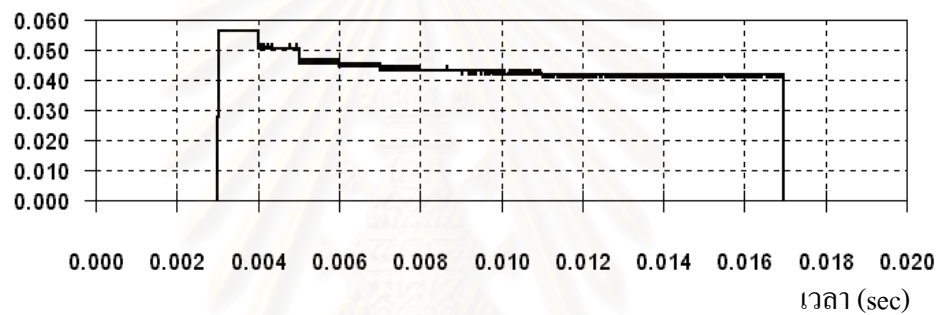
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่ากระแสเตเตอร์  $i_s$  (Amp)



(ก) กระแสเตเตอร์  $i_s$  ที่อ่านจากข้อมูลที่เก็บไว้ด้วยเวลาชักข้อมูล 1 ms

ค่า  $\sigma L_s$  (H)

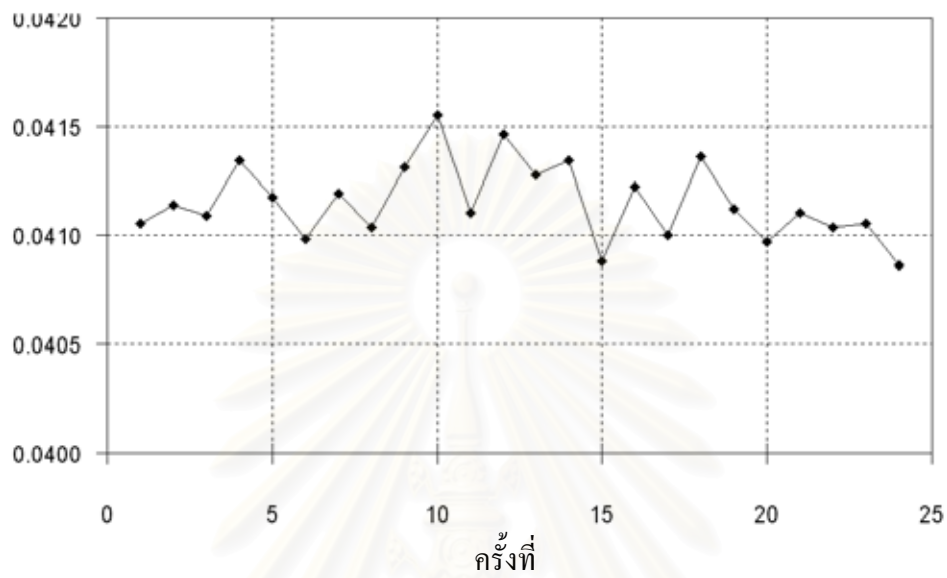


(ข) ค่า  $\sigma L_s$  ที่คำนวณได้ในแต่ละช่วงเวลา

รูปที่ 3.16 ผลการคำนวณค่า  $\sigma L_s$  ด้วยวิธี RLS

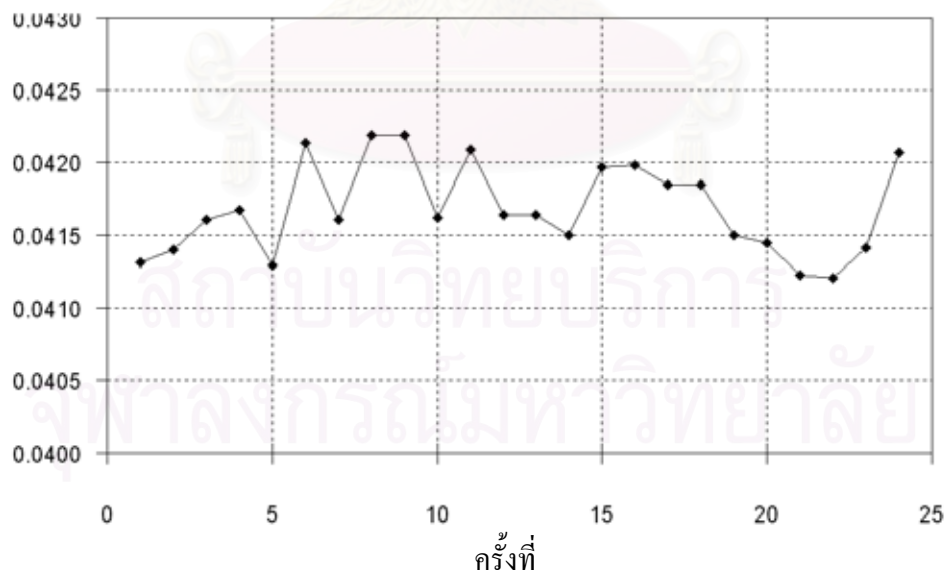
จากผลการจ่ายแรงดันพัลส์และการคำนวณค่า  $\sigma L_s$  ด้วยวิธี RLS กับมอเตอร์ ABB ข้างต้น ได้ผลการทดสอบการหาค่า  $\sigma L_s$  หลายๆ ครั้งแสดงดังรูปที่ 3.17 และเรายังได้ใช้วิธีการหาค่า  $\sigma L_s$  แบบนี้กับมอเตอร์ของ SIEMENS และมอเตอร์ของ MITSUBISHI ผลการทดสอบการหาค่า  $\sigma L_s$  ของมอเตอร์ทั้งสอง หลายๆ ครั้งแสดงได้ดังรูปที่ 3.18-3.19

ค่า  $\sigma L_S [H]$

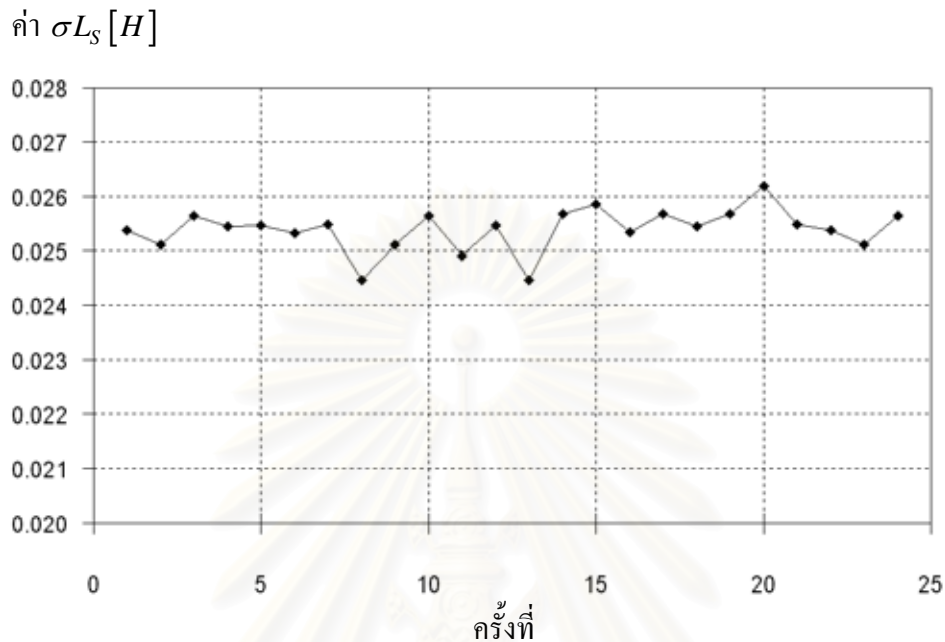


รูปที่ 3.17 ผลการหาค่า  $\sigma L_S$  ของมอเตอร์ ABB จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง

ค่า  $\sigma L_S [H]$



รูปที่ 3.18 ผลการหาค่า  $\sigma L_S$  ของมอเตอร์ SIEMENS จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง

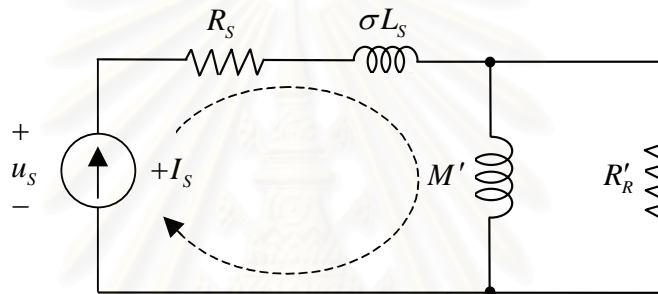


รูปที่ 3.19 ผลการหาค่า  $\sigma L_S$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง

จากผลการหาค่า  $\sigma L_S$  เราได้เฉลี่ยค่าดังนี้ มอเตอร์ ABB มีค่า  $\sigma L_S = 41.2 \text{ mH}$  , มอเตอร์ SIEMENS มีค่า  $\sigma L_S = 41.7 \text{ mH}$  และมอเตอร์ MITSUBISHI มีค่า  $\sigma L_S = 25.5 \text{ mH}$  , จากค่าที่ได้เมื่อเทียบกับค่าจากการทดสอบไว้โหลดและยัดโรเตอร์ มีค่าผิดพลาด -5% , -5% และ -8% ตามลำดับ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุจากค่าความผิดพลาดจากการอ่านค่ากระแสและแรงดันส่วนหนึ่ง และจากการที่เราพยายามให้การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์มีค่าน้อย ( $\frac{d\lambda'_R}{dt} = 0$ ) ซึ่งในทางปฏิบัติฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยซึ่งทำให้มีผลต่อค่ากระแสและแรงดันที่อ่านได้มีค่าเพี้ยนไป และจากการเลือกใช้ค่าความถี่ตัดข้ามในวงจรกรองผ่านต่ำก็อาจทำให้ผลการคำนวณได้ค่านี้น้อยลง

### 3.3 การหาค่าเวลาคงตัวทางเวลาทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) และค่าความต้านทานโรเตอร์สมมูลในวงจรสมมูลอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์ ( $R'_R$ )

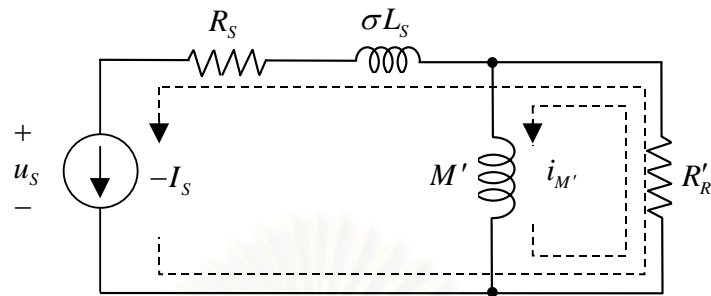
ในการหาค่า  $\tau_R$  และ  $R'_R$  เราจะจ่ายกระแสไฟตรงเข้าทางด้านสเตเตอร์ดังในรูปที่ 3.20 ที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์พิกัด ( $+I_S$ ) ด้วยตัวควบคุมกระแสแบบ PI (ที่ใช้การออกแบบดังในภาคผนวก ข) ด้วยระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้มอเตอร์เข้าสู่สถานะอยู่ตัวและสร้าง โรเตอร์ฟลักซ์ที่คงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (3.10)



รูปที่ 3.20 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะจ่ายกระแสไฟตรงเข้าทางด้านสเตเตอร์ที่ค่า  $+I_S$  ณ เวลา  $t < 0$

$$\lambda'_R = M'I_S \quad (3.10)$$

จากนั้นเราจะควบคุมให้กระแสสเตเตอร์ลดลงเป็นค่า  $-I_S$  อย่างรวดเร็วแบบขั้นบันไดที่เวลา  $t = 0$  ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลดังรูปที่ 3.21 จากสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่งจะคำนวณได้ว่า ในช่วงเวลา  $t > 0$  โรเตอร์ฟลักซ์จะมีค่าลดลงตามสมการที่ (3.11) และจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ขั้วของมอเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ ตามสมการที่ (3.12)

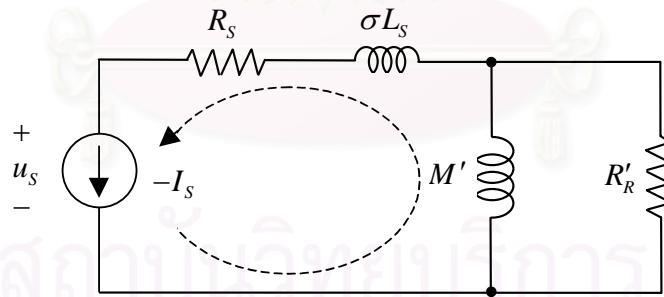


รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำหลังจ่ายกระแสไฟตรง  
เข้าทางด้านสเตเตอร์ที่ค่า  $-I_S$  ณ เวลา  $t = 0$

$$\frac{d\lambda'_R}{dt} = -R'_R I_S - \frac{\lambda'_R}{\tau_R} \quad (3.11)$$

$$u_s = -R_S I_S + \frac{d\lambda'_R}{dt} \quad (3.12)$$

ที่เวลา  $t \gg 0$  มอเตอร์จะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวใหม่ดังรูปที่ 3.22



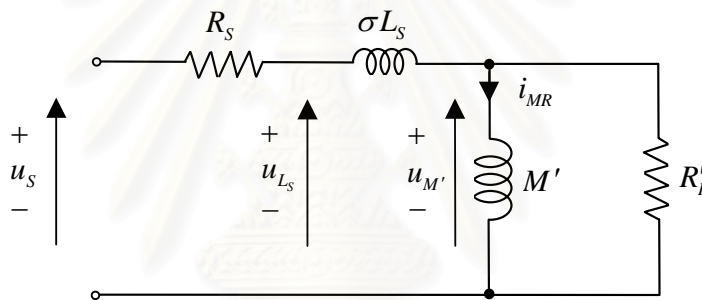
รูปที่ 3.22 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะจ่ายกระแสไฟตรง  
เข้าทางด้านสเตเตอร์ที่ค่า  $-I_S$  ณ เวลา  $t \gg 0$



แรงดัน  $u_S$  ที่ขั้วของกับมอเตอร์สามารถทราบค่าได้โดยทางอ้อมจากสัญญาณคำสั่ง  $u_S^*$  ของตัวควบคุมกระแสแบบ PI ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ จากสมการที่ (3.11) และ (3.12) เราสามารถคำนวณได้ว่าแรงดันสเตเตอร์ที่สังเกตได้จะมีค่าดังสมการที่ (3.13)

$$u_S^* - u_{DT} = -R_S I_S - 2R'_R I_S e^{-t/\tau_R} \quad (3.13)$$

ค่าแรงดัน  $u_S^*$  ในสภาวะอยู่ตัว  $u_S^*(\infty)$  จะเป็นผลรวมของแรงดันตกคร่อมสวิตช์ แรงดันจากผลของเวลาประวิงและแรงดันตกคร่อม  $R_S$  เราสามารถใช้ค่าแรงดันในสภาวะอยู่ตัว  $u_S^*(\infty)$  นี้ลบออกจากแรงดันชั่วขณะ(Transient) ของ  $u_S^*$  จะได้เป็นแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ  $L_S(u_{L_S})$  แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ค่ากระแสและแรงดันต่างๆในวงจรสมมูลของมอเตอร์

และในช่วงที่กระแสกำลังเปลี่ยนจาก  $I_S$  เป็น  $-I_S$  นั้น จะมีแรงดันชั่วขณะเนื่องจากค่า  $\sigma L_S$  เข้ามาปะปนในสัญญาณ  $u_S^*$  ด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะกำจัดผลของค่าชั่วขณะนี้ เราจึงตัดแรงดันในช่วงเวลานี้ (เวลาตั้งแต่  $0-t_{CUT}$  โดยที่ค่าของ  $t_{CUT}$  เป็นจำนวนเท่าของค่า  $T_S$ ) ทิ้งไป ไม่นำมาพิจารณา และหลังจากที่กระแสทางด้านสเตเตอร์ ( $i_S$ ) เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $\sigma L_S$  จะมีค่าเป็นศูนย์ แรงดัน  $u_{L_S}$  จึงเหลือแต่แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  $M'$  ( $u_{M'}$ ) จากสมการที่ (3.13) เราสามารถเขียนสมการของ  $u_{M'}$  ได้ดังสมการที่ (3.14)

$$u_{M'} = u_S^* - u_S^*(\infty) = -2R'_R I_S e^{-t/\tau_R} \quad (3.14)$$

โดยที่  $t_{CUT} \leq t < \infty$

เราสามารถจัดรูปแบบสมการที่ (3.14) ใหม่โดยใช้การคำนวณลอการิทึมร่วมด้วย ทำให้เราได้สมการเชิงเส้นเป็น

$$\ln[u_{M'}] = -\frac{t}{\tau_R} + \ln[2R'_R I_S] \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.15) เราสามารถใช้การคำนวณด้วยวิธี RLS ในการหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งเมื่อเขียนให้อยู่ในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่องสำหรับการคำนวณ RLS จะได้เป็นสมการที่ (3.16)-(3.18)

$$\text{สัญญาณออก : } y(N) = \ln[u_{M'}(N)] \quad (3.16)$$

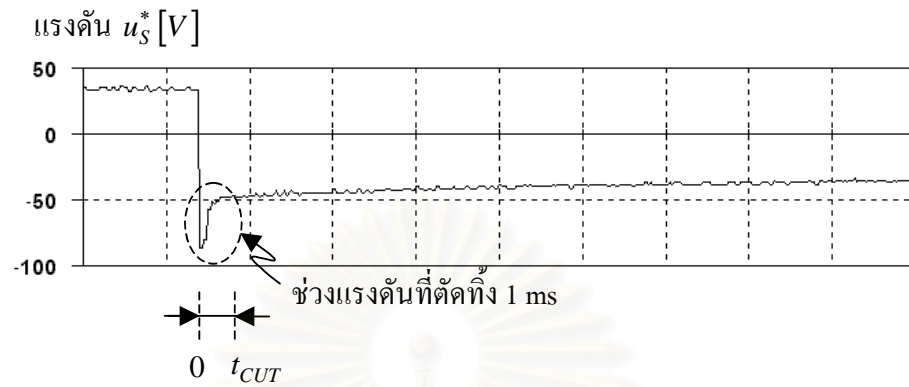
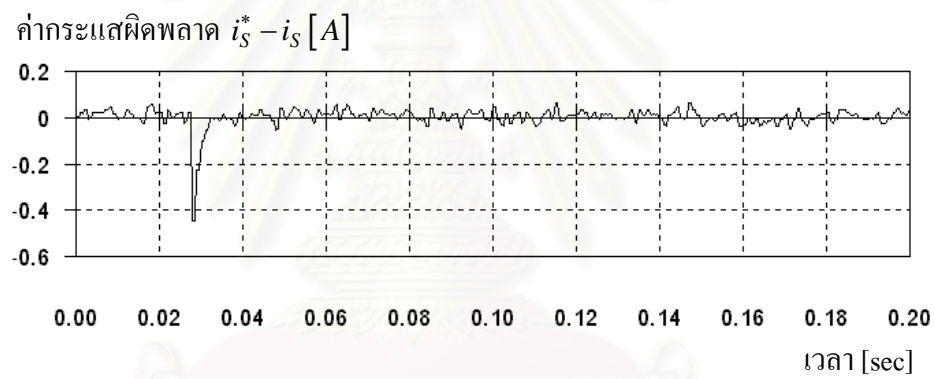
$$\text{สัญญาณเข้า : } c(N) = [k \quad 1] \quad (3.17)$$

$$\text{พารามิเตอร์ : } \hat{X}(N) = \left[ -\frac{T_S}{\tau_R} \quad \ln[2R'_R I_S] \right]^T \quad (3.18)$$

โดยที่  $k = a, a+1, a+2, \dots$  และ  $a = t_{CUT}/T_S$

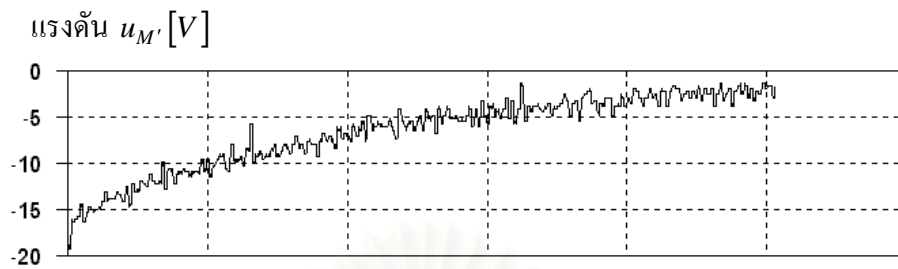
นอกจากนี้ในการคำนวณด้วยวิธี RLS เรายังใช้การคำนวณแบบทำซ้ำ โดยนำข้อมูลชุดเดิมของ  $y(N)$  และ  $c(N)$  มาคำนวณใหม่ โดยที่ค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์  $P$  และพารามิเตอร์  $\hat{X}$  นั้น จะใช้ค่าสุดท้ายจากการคำนวณในรอบก่อนหน้า ทั้งนี้ก็เพื่อให้มีข้อมูลยาวเพียงพอที่ค่าพารามิเตอร์จะลู่เข้าหาค่าในสถานะอยู่ตัวได้

ค่าพารามิเตอร์  $-\frac{T_S}{\tau_R}$  และค่า  $\ln[2R'_R I_S]$  ในเมตริกซ์  $\hat{X}$  ที่ได้จากการคำนวณ RLS สามารถนำมาหาค่าของ  $\tau_R$  และ  $R'_R$  ได้ โดยผลการทดสอบหาค่า  $\tau_R$  และ  $R'_R$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.24-3.25

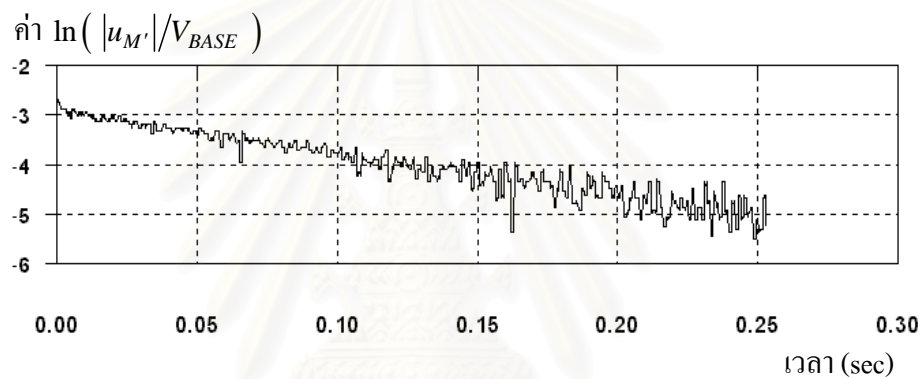
(ก) แรงดันทางด้านสแตเตอร์  $u_s^*$ (ข) ค่ากระแสผิดพลาด  $i_s^* - i_s$ 

รูปที่ 3.24 ผลการควบคุมกระแสทางด้านสแตเตอร์จากค่ากระแส +2 A เป็น -2 A

รูปที่ 3.24 แสดงแรงดันคำสั่งที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมกระแสและค่ากระแสผิดพลาดจากการควบคุม และเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากแรงดันชั่วขณะจากค่า  $\sigma L_s$  เราจะไม่นำค่าแรงดัน  $u_s^*$  ในช่วง 1 ms ( $t_{CUT} = 1$  ms) มาคิด



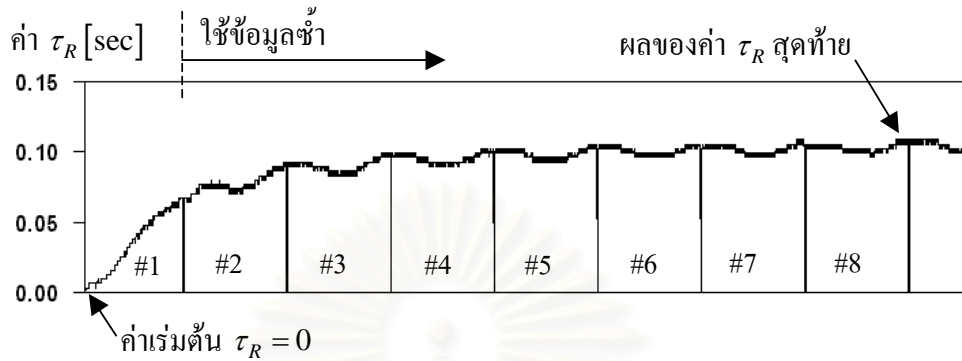
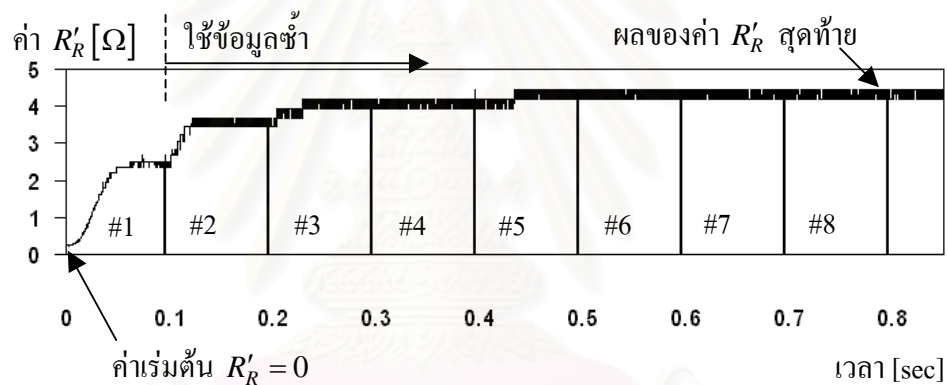
(ก) แรงดันทาง  $u_{M'}$  ในช่วง  $t > t_{CUT}$



(ข) ผลการคำนวณลอการิทึมเทียบเป็นค่าต่อหน่วยซึ่งใช้  $V_{BASE} = 220\sqrt{2}$

รูปที่ 3.25 ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ  $u_{M'}$  เมื่อควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์  
จากค่ากระแส +2 A เป็น -2 A

จากรูปที่ 3.25 จะเห็นว่าช่วงเวลาหลังจาก 100 ms ผลการคำนวณลอการิทึมเริ่มจะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาปะปนมาก เพราะเป็นช่วงที่แรงดันมีค่าน้อย ดังนั้นในการนำไปประมวลผลด้วย RLS เรา  
จะเลือกใช้ข้อมูลในช่วงต้น (0-100 ms) เท่านั้น

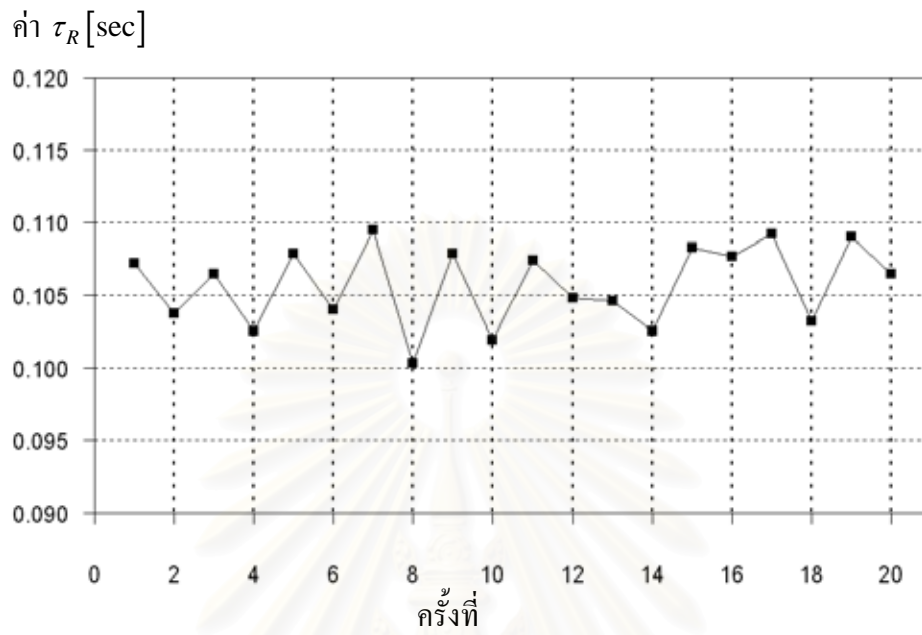
(ก) การลู่เข้าของค่า  $\tau_R$ (ข) การลู่เข้าของค่า  $R'_R$ 

รูปที่ 3.26 ผลการคำนวณ RLS โดยใช้ข้อมูลในช่วง 100 ms ซ้ำ

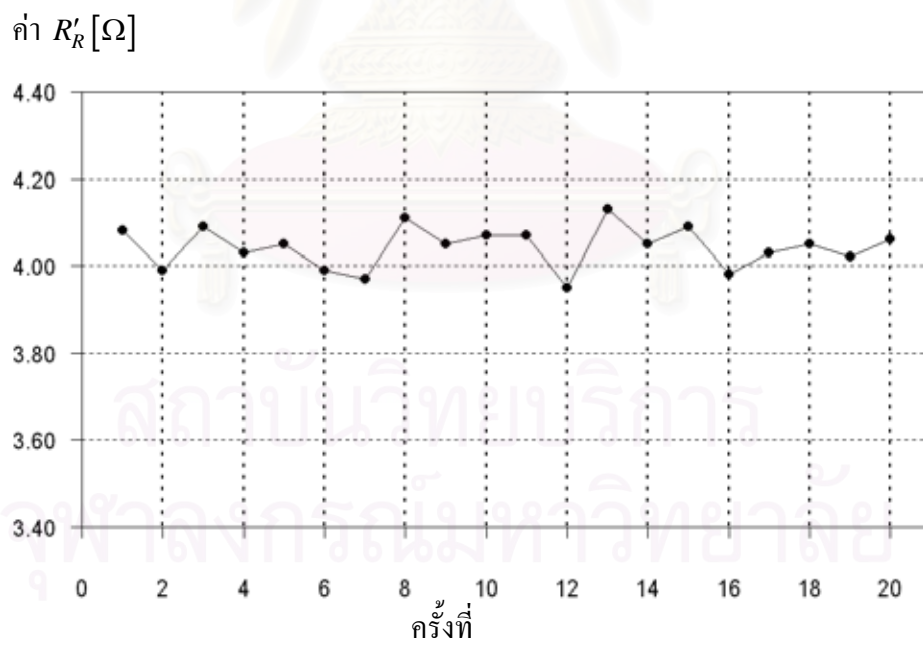
(แสดงเฉพาะ 8 รอบแรกของการคำนวณ)

จากข้อมูลแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ  $u_M'$  ในรูปที่ 3.25 เราสามารถนำไปคำนวณด้วยวิธี RLS โดยใช้ชุดข้อมูลเดิมซ้ำเป็นจำนวน 40 รอบ เราจะได้ผลของค่า  $\tau_R$  และ  $R'_R$  ค่าสุดท้ายเป็นคำตอบดังรูปที่ 3.26 เราทำการทดสอบการหาค่า  $\tau_R$  และ  $R'_R$  หลายครั้งและได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.27-3.28

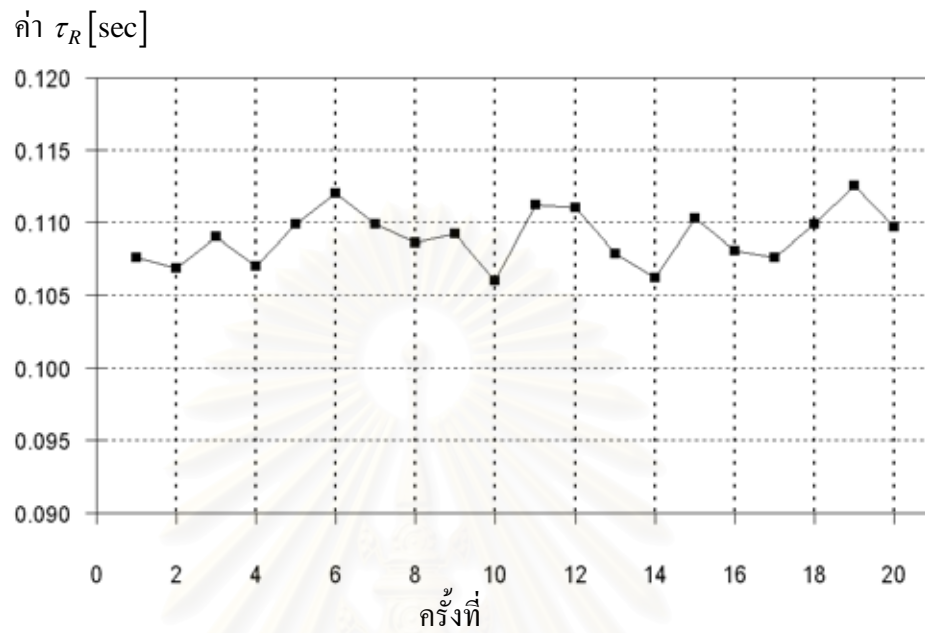
โดยวิธีการเดียวกันนี้ เรานำไปใช้ในการหาค่า  $\tau_R$  และ  $R'_R$  กับมอเตอร์ของ SIEMENS และมอเตอร์ของ MITSUBISHI ด้วยได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.29-3.32



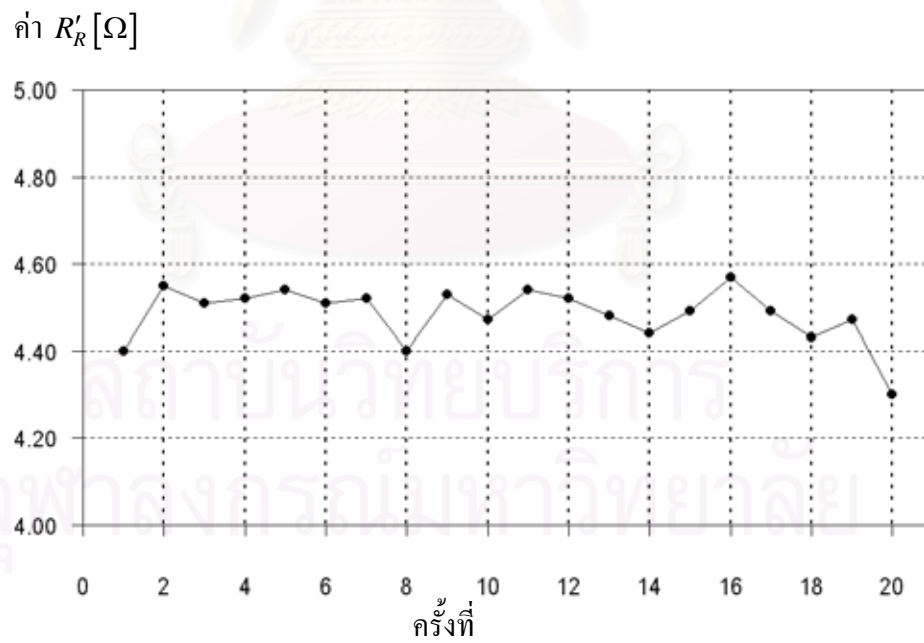
รูปที่ 3.27 ค่า  $\tau_R$  ของมอเตอร์ ABB จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง



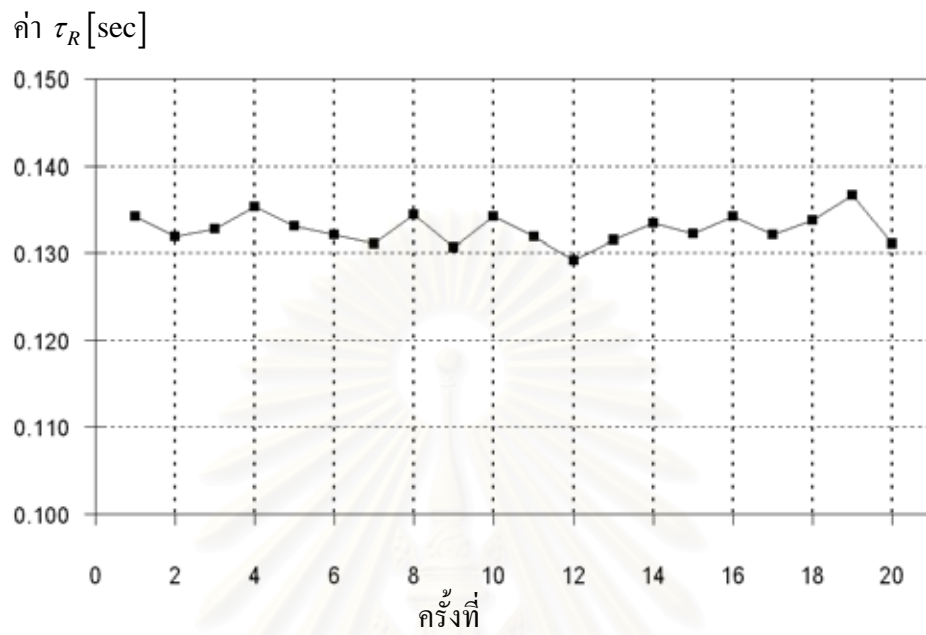
รูปที่ 3.28 ค่า  $R'_R$  ของมอเตอร์ ABB จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง



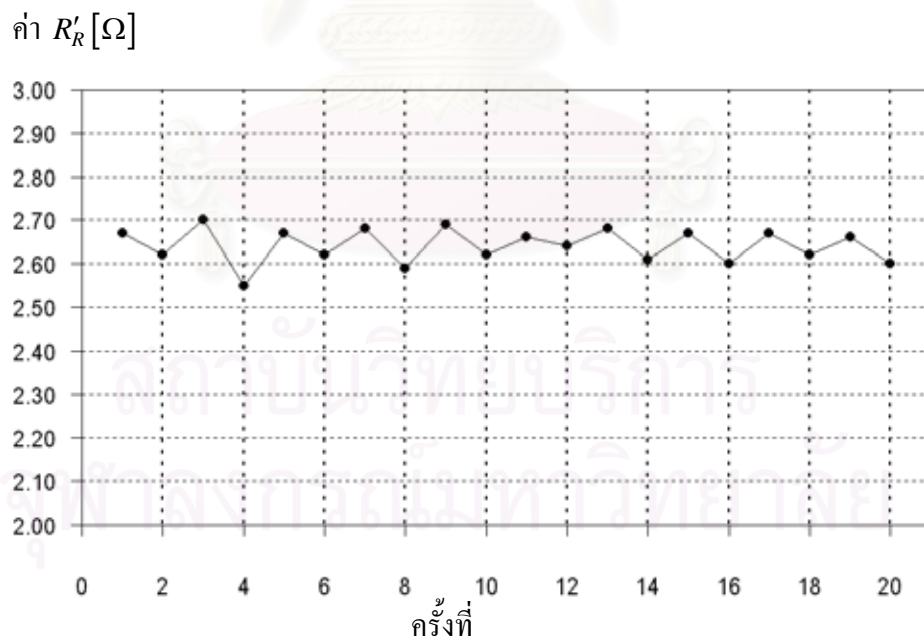
รูปที่ 3.29 ค่า  $\tau_R$  ของมอเตอร์ SIEMENS จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง



รูปที่ 3.30 ค่า  $R'_R$  ของมอเตอร์ SIEMENS จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง



รูปที่ 3.31 ค่า  $\tau_R$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง



รูปที่ 3.32 ค่า  $R'_R$  ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการเก็บข้อมูลหลายๆครั้ง



จากผลการทดสอบหาค่า  $\tau_R$  ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวได้ผลดังนี้ มอเตอร์ ABB มีค่า  $\tau_R = 106 \text{ ms}$  มอเตอร์ SIEMENS มีค่า  $\tau_R = 106 \text{ ms}$  และมอเตอร์ MITSUBISHI มีค่า  $\tau_R = 106 \text{ ms}$  เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบไร้อโหลดและยึดโรเตอร์ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ดังนี้คือ +55.6 % , +54.9 % และ +41.4 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า  $\tau_R$  ที่หาได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบยึดโรเตอร์ที่ 50 Hz เนื่องจากขณะที่ทำการทดสอบยึดโรเตอร์นั้นค่า ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในตัวของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่าฟลักซ์ของมอเตอร์ขณะใช้งานจริง จึงทำให้ได้ค่าที่ไม่ถูกต้องนัก ส่วนค่าที่เราได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์นั้นเราได้ทำการจ่ายกระแสเพื่อสร้างฟลักซ์ที่ค่าพิกัดของมอเตอร์ จึงน่าจะได้ค่าที่ถูกต้องมากกว่า

ผลการทดสอบหาค่า  $R'_R$  ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวได้ผลดังนี้ มอเตอร์ ABB มีค่า  $R'_R = 4.05 \Omega$  มอเตอร์ SIEMENS มีค่า  $R'_R = 4.50 \Omega$  และมอเตอร์ MITSUBISHI มีค่า  $R'_R = 2.65 \Omega$  เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบไร้อโหลดและยึดโรเตอร์ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ดังนี้คือ -33.6 % , -27.6 % และ -27.0 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า  $R'_R$  ที่หาได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบยึดโรเตอร์ที่ 50 Hz เนื่องจากการทดสอบยึดโรเตอร์ที่ 50 Hz นี้ ค่ากระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะมีค่าความถี่ 50 Hz ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้งานตามปกติ ที่มักจะมีค่าต่ำ และจากผลการทดสอบยึดโรเตอร์หาค่า  $R'_R$  ที่ความถี่ค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่ามีค่าลดลงตามความถี่อื่นเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางผิว จากการที่เราใช้อินเวอร์เตอร์หาค่า  $R'_R$  โดยการใช้การจ่ายกระแสไฟตรงและใช้ค่าของแรงดันในช่วงเวลาชั่วขณะในการคำนวณค่า  $R'_R$  ซึ่งมีค่าความถี่ต่ำนั้น เราน่าจะได้ค่า  $R'_R$  ที่มีค่าถูกต้องมากกว่า เพราะค่าผิดพลาดที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ทางผิวมีค่าลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4 การหาเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Saturation curve) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีไร้โหลดและขีดโรเตอร์จะเห็นได้ว่าค่า  $L_S$  หรือ  $M'$  นั้น มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงน้อยที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์น้อยกว่าพิกัด และมีแนวโน้มที่ค่าจะเปลี่ยนแปลงมากในทางที่ลดลงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มากกว่าพิกัด จากค่า  $\tau_R$  และ  $R'_R$  ที่หาได้ในหัวข้อ 3.3 เราสามารถนำมาหาค่าความเหนี่ยวนำรวม  $M' = \tau_R R'_R$  ได้ อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จะมีลักษณะเชิงเป็นค่าเฉลี่ยของค่า  $M'$  ในช่วงที่กระแสสร้างฟลักซ์มีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ถึงค่าพิกัด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ในระดับหนึ่ง แต่ถ้าเราต้องการให้ได้การควบคุมที่มีสมรรถนะสูง เรามีความจำเป็นที่จะต้องใช้ค่า  $M'$  ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสสร้างฟลักซ์แทน การใช้ค่าเฉลี่ยของ  $M'$  กล่าวคือเราต้องอาศัยข้อมูลเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กในการควบคุมนั่นเอง ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการหาเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กนี้

จากวิธีทดสอบในหัวข้อ 3.3 ที่ทำการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์ให้เปลี่ยนแปลงแบบขั้น และนำแรงดันที่ได้จากการควบคุมมาหาค่าพารามิเตอร์นั้น เราสามารถนำวิธีการเดียวกันนี้มาใช้ในการหาเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กได้ด้วย แต่จะทำการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์ให้มีค่าสูงกว่าค่าพิกัดของกระแสสร้างฟลักซ์ ในที่นี้เราเลือกใช้กระแสควบคุมที่ 2.5 เท่าของค่ากระแสสร้างฟลักซ์พิกัด และใช้ค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์ที่ได้ก่อนหน้าจากการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์ที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์อยู่ในพิกัดมาใช้ในการหาเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กนี้ด้วย

จากสมการของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะหยุดนิ่ง สามารถจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$u_{L_S} = u_S^* - R_S i_S - u_{DT} = \sigma L_S \frac{d}{dt} i_S + \frac{d}{dt} \lambda'_R \quad (3.19)$$

เนื่องจากเราได้ตัดแรงดันชั่วขณะตั้งแต่วเวลา 0 ถึง  $t_{cut}$  ที่ไปตั้งนั้น การอินทิเกรตสมการที่ (3.19) เพื่อหาค่าโรเตอร์ฟลักซ์ ( $\lambda'_R$ ) จึงเป็นการอินทิเกรตในช่วง  $t_{cut}$  ถึง  $t$  โดยที่  $t_{cut} < t < \infty$  เมื่อแทนค่า  $i_S(t) = -I_S$  เราจะได้ผลการอินทิเกรตดังแสดงในสมการที่ (3.20) และจากรูปที่ 3.23 สามารถหาค่ากระแสสร้างฟลักซ์ได้จากสมการที่ (3.21)

$$\lambda'_R(t) = \int_{t_{cut}}^t u_{L_S}(t) dt + \lambda'_R(t_{cut}) + \sigma L_S I_S \quad (3.20)$$

$$i_{MR}(t) = -I_S - \frac{u_{M'}(t)}{R'_R} \quad (3.21)$$

โดยที่ค่า  $\lambda(t_{cut})$  เป็นค่าเริ่มต้นของการอินทิเกรต กำหนดให้ค่าโรเตอร์ฟลักซ์ ณ เวลา  $t=0$  ที่ค่าดังนี้

$$\lambda'_R(0) = M'(0) I_S \quad (3.22)$$

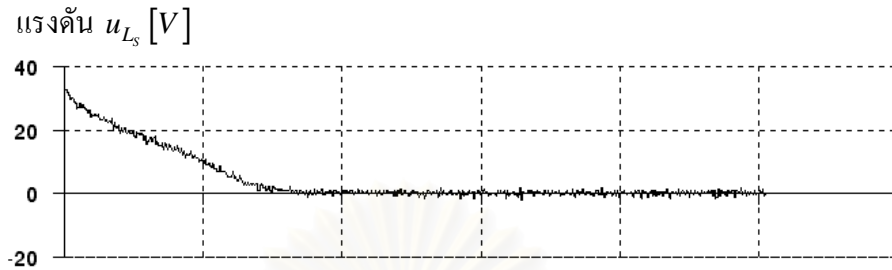
โดยที่ค่า  $\lambda'_R(0)$  และ  $M'(0)$  เป็นค่าที่ยังไม่ทราบค่า เนื่องจากช่วงเวลา 0 ถึงเวลา  $t_{cut}$  เป็นช่วงเวลานั้นๆ ค่าโรเตอร์ฟลักซ์ในมอเตอร์ยังคงเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นในช่วงที่ฟลักซ์เปลี่ยนแปลงแค่นี้ เราอาจประมาณได้ว่าการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะเป็นเชิงเส้นและค่า  $M'$  มีค่าเท่ากับ  $M'(0)$  ซึ่งเราจะได้ว่า ณ เวลา  $t = t_{CUT}$

$$\lambda'_R(t_{cut}) = \left[ 2e^{-R'_R t_{cut}/M'(0)} - 1 \right] M'(0) I_S \quad (3.23)$$

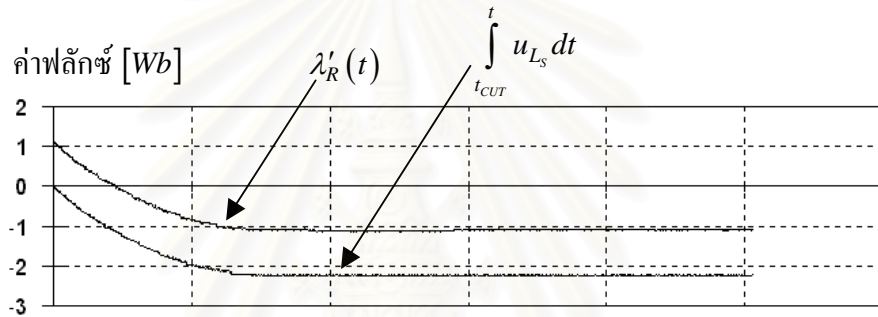
และเมื่อเราทำการอินทิเกรตตามสมการ (3.20) จนถึงค่า  $t = t_f$  ซึ่งเป็นจุดเวลาที่ฟลักซ์อิ่มตัวทางด้านลบแล้ว เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \lambda'_R(t_f) &= -\lambda'_R(0) = -M'(0) I_S \\ &= - \int_{t_{cut}}^{t_f} u_{L_S} dt + \lambda'_R(t_{cut}) + \sigma L_S I_S \end{aligned} \quad (3.24)$$

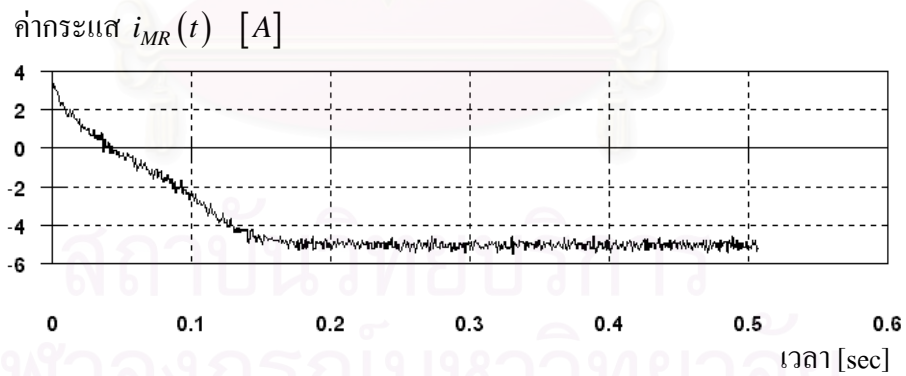
เราสามารถใช้ในการคำนวณแบบวนรอบ (Iteration) ในการแก้สมการที่ (3.23) และ (3.24) เพื่อหาค่า  $M'(0)$  และ  $\lambda'_R(t_{CUT})$  เมื่อเราได้ค่า  $\lambda'_R(t_{CUT})$  ก็จะสามารถแทนลงในสมการที่ (3.20) และหาค่า  $\lambda'_R(t)$  ณ เวลาใดๆ ได้ ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกับกระแสสร้างฟลักซ์  $i_{MR}(t)$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.21) ก็จะได้เป็นเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.33-3.34



(ก) แรงดัน  $u_{L_s}$  ที่ได้จากการควบคุมกระแส  $i_s$  จาก +5 A เป็น -5 A

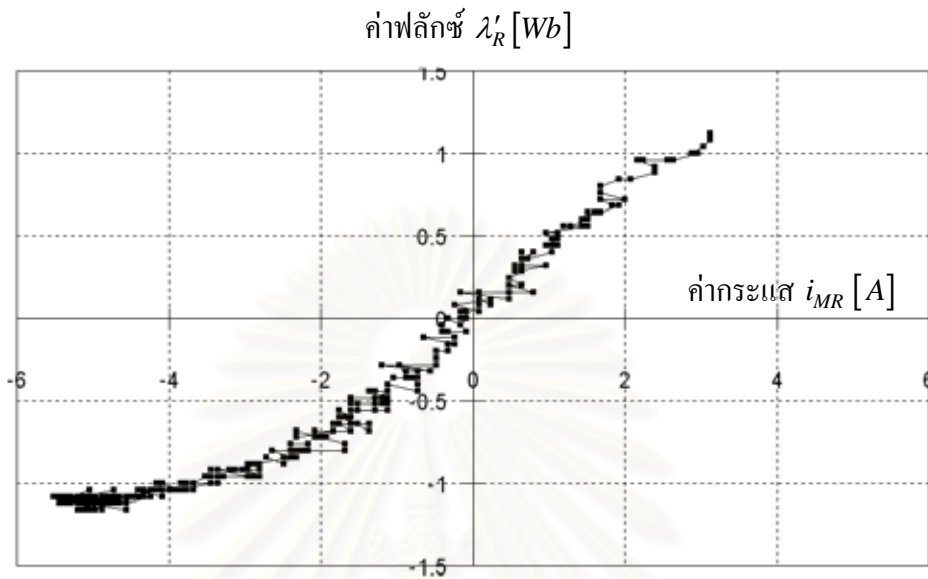


(ข) ผลการคำนวณค่า  $\lambda'_R(t)$  และ  $\int_{t_{CUT}}^t u_{L_s}(t) dt$



(ค) ผลการคำนวณค่า  $i_{MR}(t)$

รูปที่ 3.33 ผลการทดสอบลักษณะการอิมตัวของแกนเหล็ก

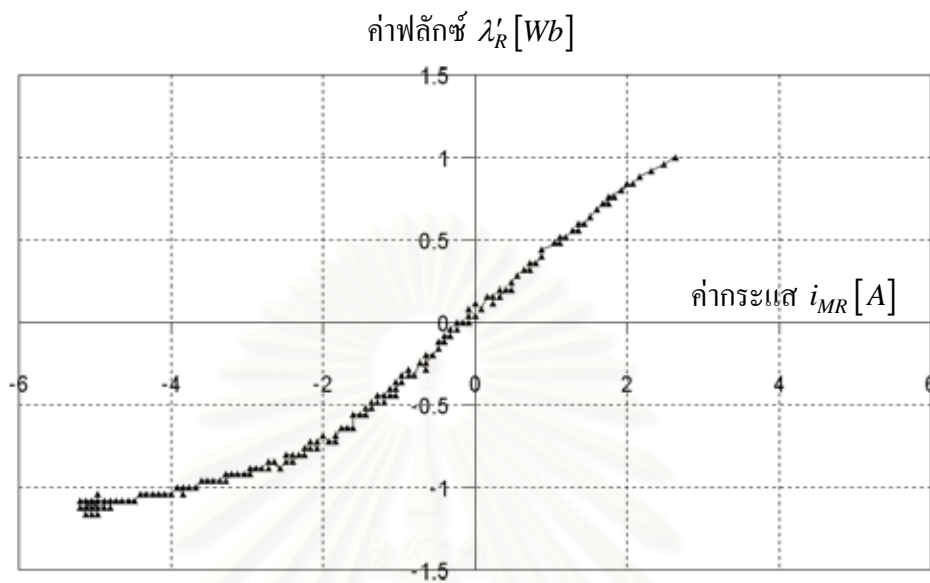


รูปที่ 3.34 เส้นกราฟ  $\lambda'_R(t)$  เทียบกับ  $i_{MR}(t)$  ที่ได้จากการควบคุมกระแส  $i_s$  จาก +5 A เป็น -5 A

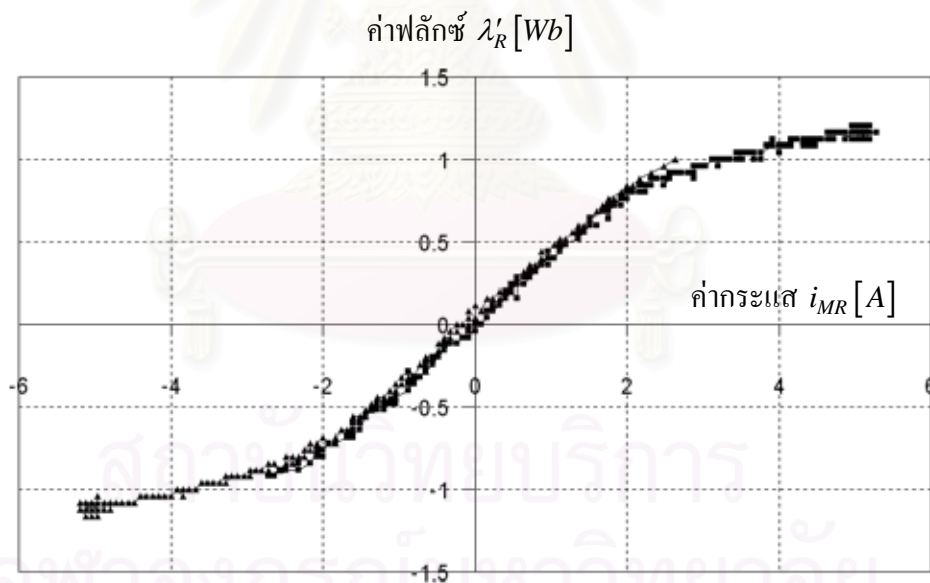
เมื่อนำผลในรูปที่ 3.34 ไปหาค่าเฉลี่ย เพื่อกรองเอาสัญญาณรบกวนออกโดยการใช้ Moving average filter จะได้กราฟที่เรียบขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.35

ในทำนองกลับกันเราสามารถทำการควบคุมกระแสในทิศทางตรงข้ามกับที่ทำก่อนหน้านี้โดยควบคุมกระแสเดเตอร์ให้เปลี่ยนจาก -5 A เป็น +5 A แบบขึ้นบันไดและนำไปหาค่าเฉลี่ยและเขียนเส้นกราฟร่วมกับเส้นกราฟในรูปที่ 3.35 ได้ดังรูปที่ 3.36

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

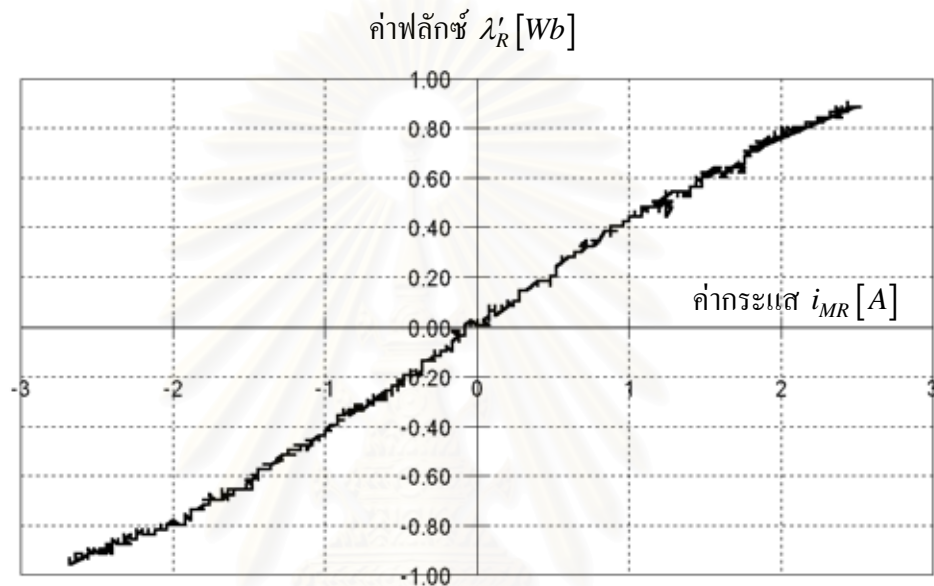


รูปที่ 3.35 ค่าเฉลี่ยเส้นกราฟ  $\lambda'_R(t)$  เทียบกับ  $i_{MR}(t)$  ที่ได้จากการควบคุมกระแส  $i_S$  จาก +5 A เป็น -5 A



รูปที่ 3.36 ค่าเฉลี่ยเส้นกราฟ  $\lambda'_R(t)$  เทียบกับ  $i_{MR}(t)$  ที่ได้จากการควบคุมกระแส  $i_S$  จาก +5 A เป็น -5 A และจาก -5 A เป็น +5 A

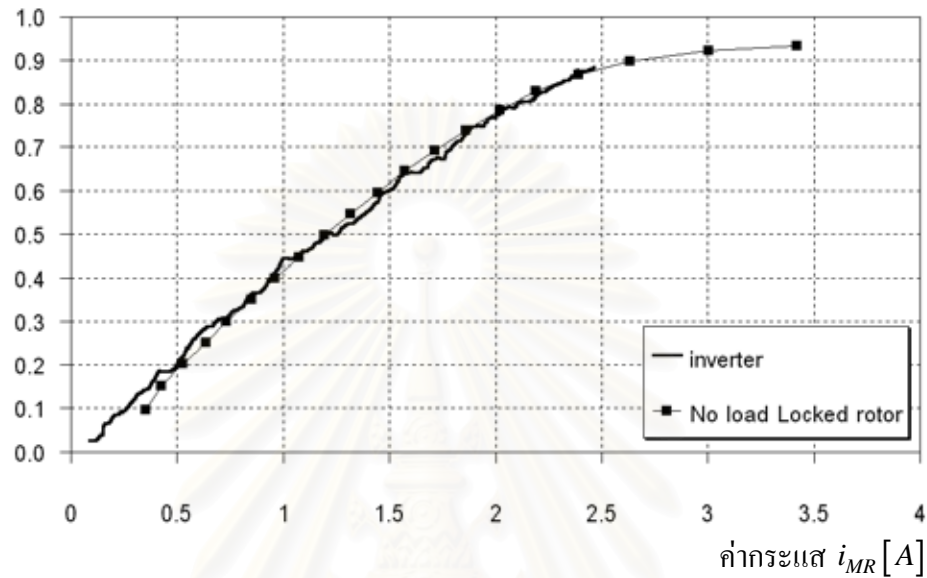
จากเส้นกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปที่ 3.36 เราสามารถนำไปประมาณเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กได้โดยนำค่าฟลักซ์ที่ได้จากเส้นกราฟทั้งสองเส้น ณ ค่ากระแส  $i_{MR}$  หนึ่งๆ มาบวกกันแล้วหารสอง และนำค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ที่ได้มาพล็อตเส้นกราฟการอิ่มตัวใหม่จะได้ผลดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 เส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้

อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยในการนำเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กไปใช้งาน เราจะถือว่าเส้นกราฟการอิ่มตัวในสี่กระแสบวกและลบมีลักษณะสมมาตร จึงสามารถประมาณเส้นกราฟในช่วงที่ค่าของกระแสสร้างฟลักซ์มีค่าเป็นบวกได้โดยหาค่าเฉลี่ยของขนาดของฟลักซ์ ณ กระแสสร้างฟลักซ์ที่มีค่าบวกและลบ จากรูปที่ 3.37 เราประมาณเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กได้ดังรูปที่ 3.38 และเราได้แสดงการเปรียบเทียบกับผลการหาเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ได้จากวิธีไรโรโหลดและยัดโรเตอร์จากรูปที่ 2.28 ซึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กในรูปที่ 2.28 นี้ให้อยู่ในสเปซเวกเตอร์ก่อน

ค่าฟลักซ์  $\lambda'_R$  [Wb]

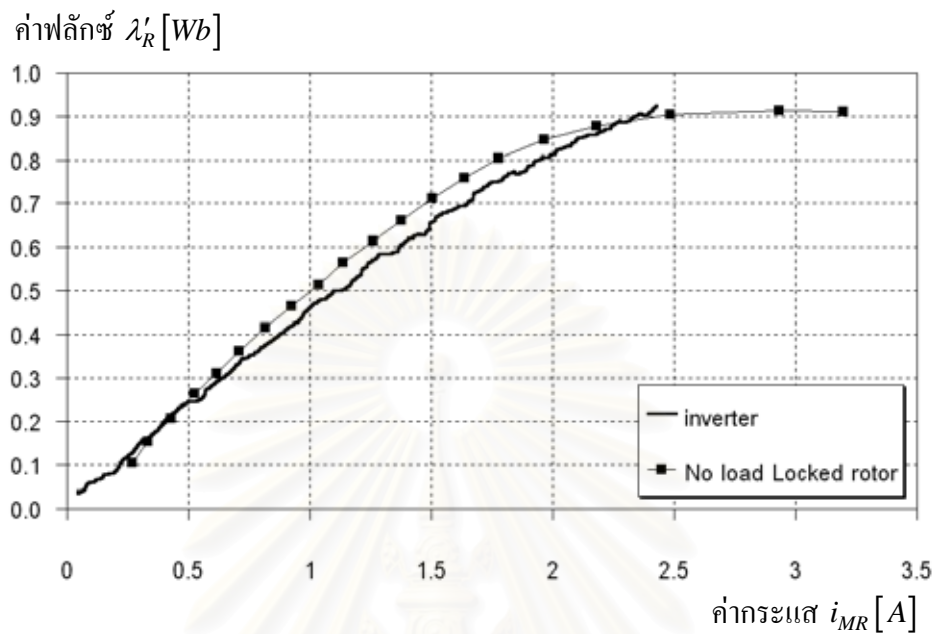


รูปที่ 3.38 เส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้ของมอเตอร์ ABB  
ในช่วงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มีค่าบวก

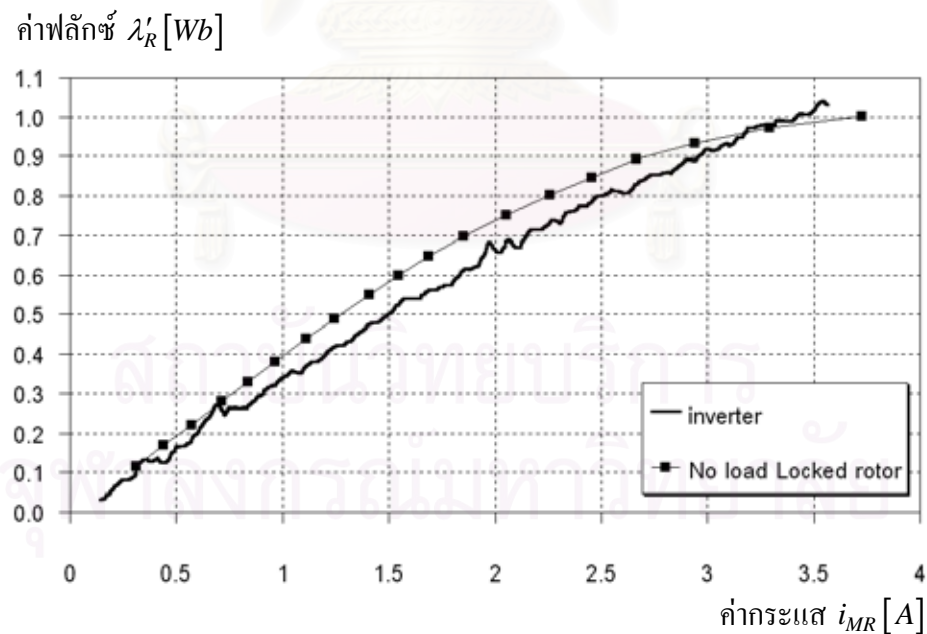
โดยวิธีการหาเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่กล่าวมาเราจะนำไปใช้กับมอเตอร์ของ SIEMENS และมอเตอร์ของ MITSUBISHI ได้ผลของเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้ในช่วงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มีค่าเป็นบวก ดังรูปที่ 3.39-3.40

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.39 เส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้ของมอเตอร์ SIEMENS  
ในช่วงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มีค่าบวก



รูปที่ 3.40 เส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ประมาณได้ของมอเตอร์ MITSUBISHI  
ในช่วงที่ค่ากระแสสร้างฟลักซ์มีค่าบวก

จากผลการทดสอบการหาเส้นกราฟประมาณการอิมิตัวของแกนเหล็กที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์มีค่าใกล้เคียงกับเส้นกราฟการอิมิตัวของแกนเหล็กที่ได้จากการทดสอบไว้โหลด

เราสามารถสรุปผลการทดสอบการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์

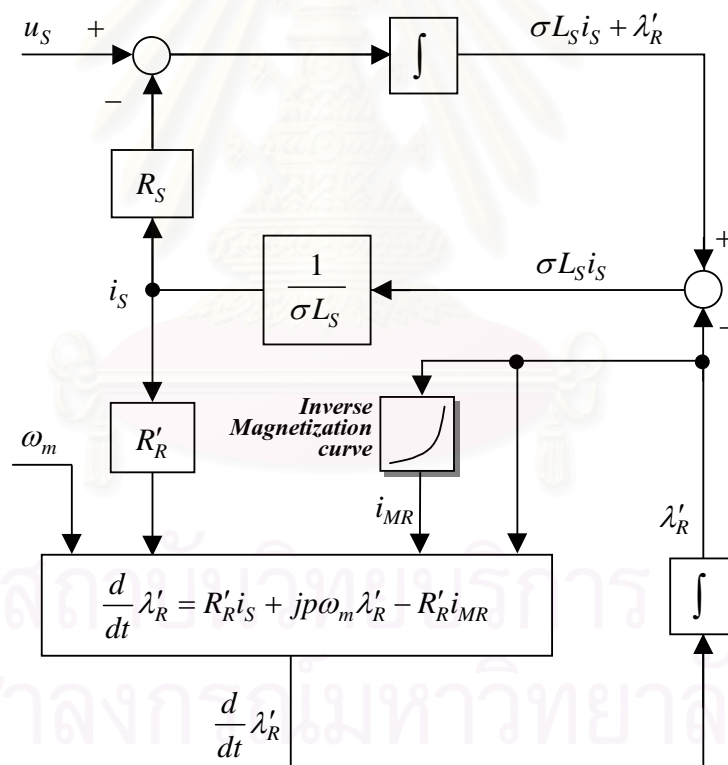
ชื่อมอเตอร์	ค่าพารามิเตอร์				
	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$\sigma L_s$ [mH]	$M'$ [mH]	$R'_R$ [ $\Omega$ ]	$\tau_R$ [ms]
ABB	8.05	41.2	429.3	4.05	106
SEIMENS	8.85	41.7	495.0	4.50	110
MITSUBISHI	5.30	25.5	357.8	2.65	135

## บทที่ 4

### การทดสอบค่าพารามิเตอร์

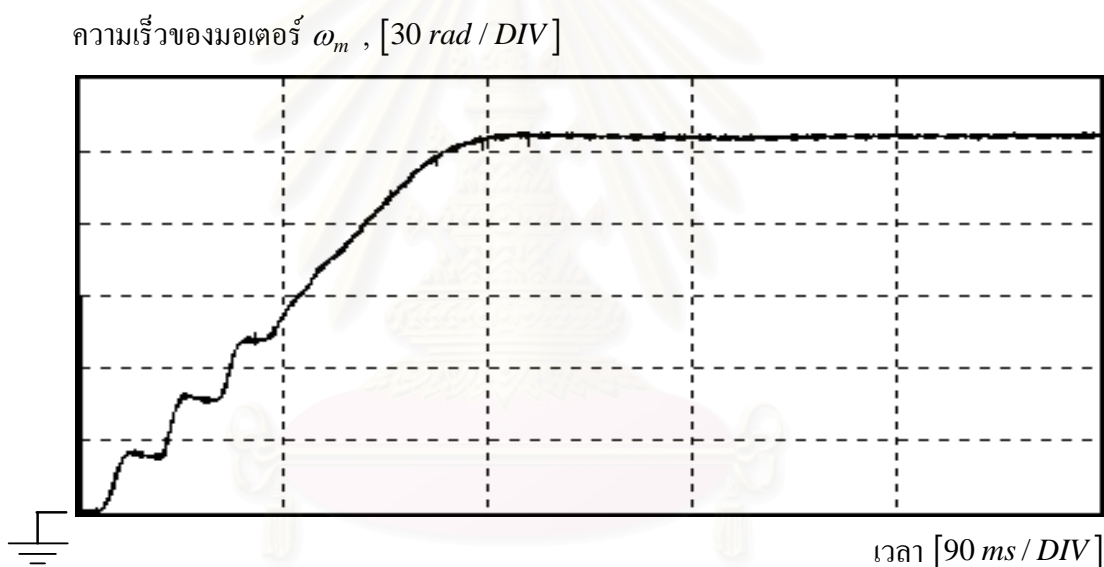
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบความถูกต้องค่าพารามิเตอร์ที่หาโดยใช้อินเวอร์เตอร์เปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่หาจากการทดสอบไว้โหลดและชัตโรเตอร์ ซึ่งจะใช้การทดสอบโดยเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดจากมอเตอร์จริงกับที่เกิดจากการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยค่าพารามิเตอร์ที่หาได้

จากสมการทั่วไปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อเรารวมผลของการอิมิตัวของแกนเหล็กด้วย สามารถเขียนเป็นแผนภาพการคำนวณได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพการจำลองระบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่รวมผลของการอิมิตัวของแกนเหล็ก

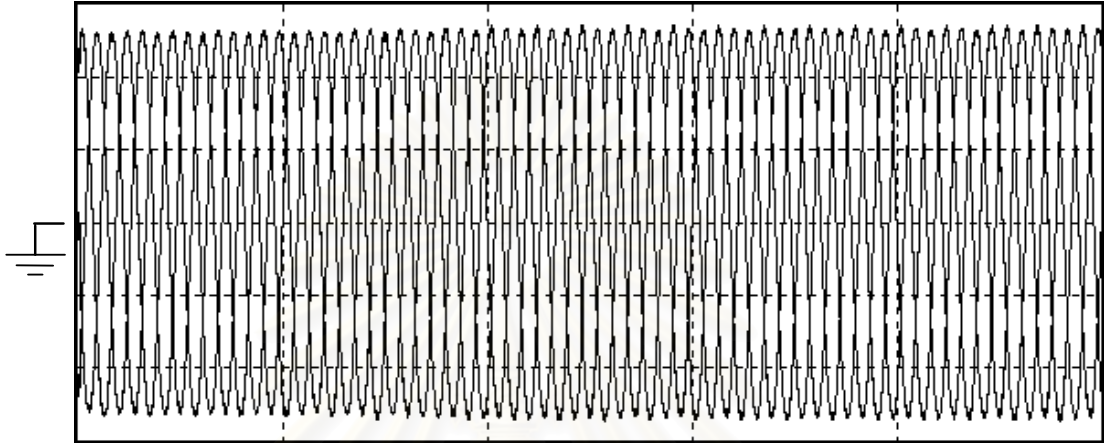
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเราต้องใช้ค่าของแรงดันและความเร็วของมอเตอร์มาเป็นอินพุตให้กับแบบจำลอง ซึ่งในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่หาได้เราจะใช้การป้อนแรงดัน 3 เฟส จากการไฟฟ้า ความถี่ 50 Hz ที่ค่าพิกัดของมอเตอร์ให้กับมอเตอร์โดยตรง (Direct on line) และทำการเก็บข้อมูลของแรงดันและความเร็วของมอเตอร์ในช่วงเวลาชั่วขณะ (Transient) มาเป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบจำลองในรูปที่ 4.1 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ในการจำลองการทำงาน เราจะเปรียบเทียบถูกต้องของค่าพารามิเตอร์โดยการเปรียบเทียบกระแสของมอเตอร์จากการจำลองกับกระแสจริงของมอเตอร์ที่ได้จากการป้อนแรงดัน 3 เฟสในช่วงต้นซึ่งในที่นี้เราได้เก็บข้อมูลในช่วงเวลา 0.45 sec มาใช้ในการคำนวณ ข้อมูลของความเร็วที่ได้ ของมอเตอร์ ABB แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB จากการป้อนแรงดัน 3 เฟส  
ที่ค่าพิกัดของมอเตอร์โดยตรง

แรงดันของมอเตอร์ที่เราทำการเก็บเป็นแรงดันระหว่างเฟส  $v_{uv}$  และ  $v_{vw}$  ซึ่งเราจะทำการแปลงเป็นแรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ก่อนเพื่อใช้กับระบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปขยายแรงดันในช่วงต้นของรูปที่ 4.3 แสดงดังรูปที่ 4.4 ส่วนข้อมูลของกระแสของมอเตอร์ที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบจะเป็นกระแสทั้ง 3 เฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) แสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปขยายกระแสในช่วงต้นของรูปที่ 4.5 แสดงดังรูปที่ 4.6

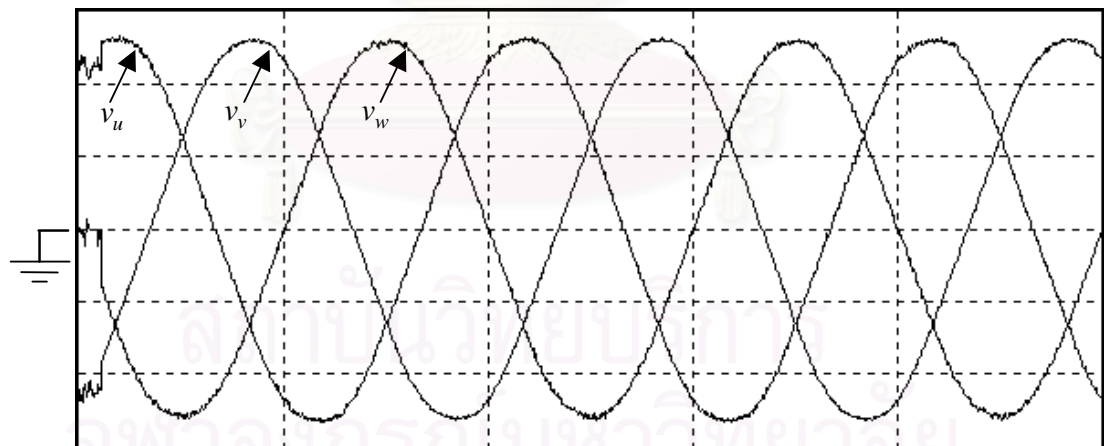
แรงดันเฟส  $v_u, v_v, v_w$  [120 V / DIV]



เวลา [90 ms / DIV]

รูปที่ 4.3 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ ABB

แรงดันเฟส  $v_u, v_v, v_w$  [120 V / DIV]

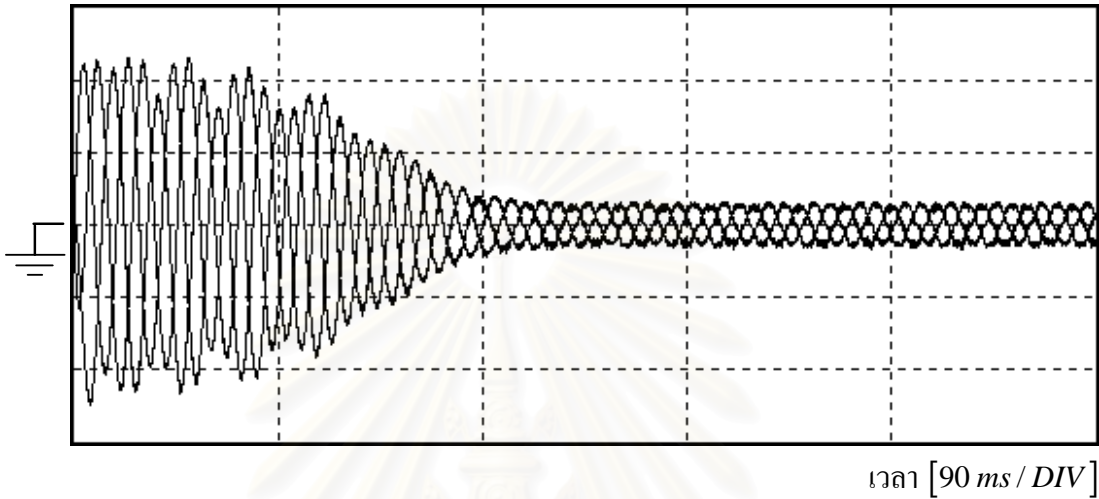


เวลา [10 ms / DIV]

รูปที่ 4.4 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ ABB

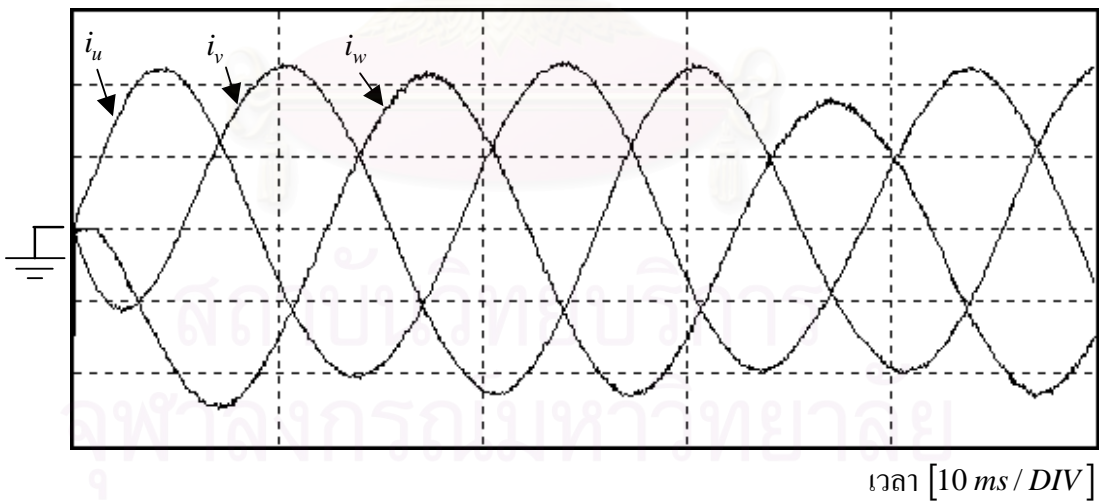
ขยายจากแรงดันในรูปที่ 4.3 ช่วงต้น

กระแสเฟส  $i_u, i_v, i_w$  [8 A / DIV]



รูปที่ 4.5 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ ABB

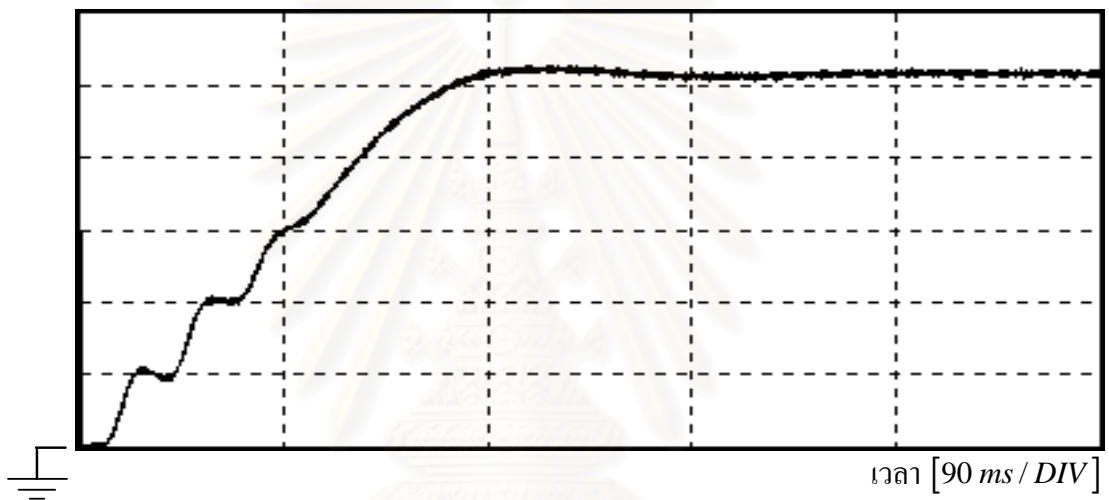
กระแสเฟส  $i_u, i_v, i_w$  [8 A / DIV]



รูปที่ 4.6 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ ABB  
ขยายจากกระแสในรูปที่ 4.5 ช่วงต้น

เราจะเก็บข้อมูลของความเร็วโรเตอร์ ค่าแรงดันและกระแส ของมอเตอร์ SIEMENS และของมอเตอร์ MITSUBISHI ได้เช่นเดียวกับมอเตอร์ ABB แสดงได้ดังรูปที่ 4.7-4.16

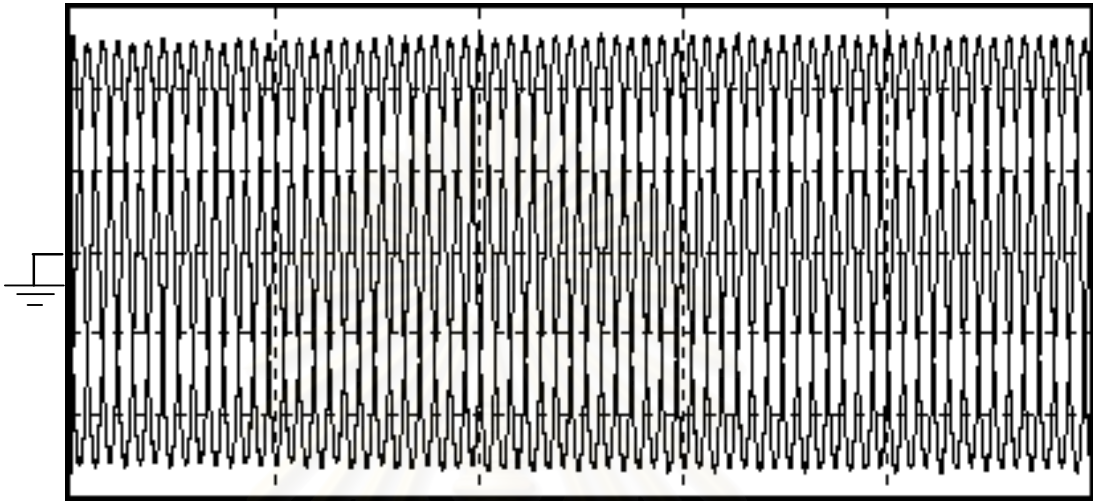
ความเร็วของมอเตอร์  $\omega_m$  , [30 rad / DIV]



รูปที่ 4.7 ความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS จากการป้อนแรงดัน 3 เฟส  
ที่ค่าพิกัดของมอเตอร์โดยตรง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

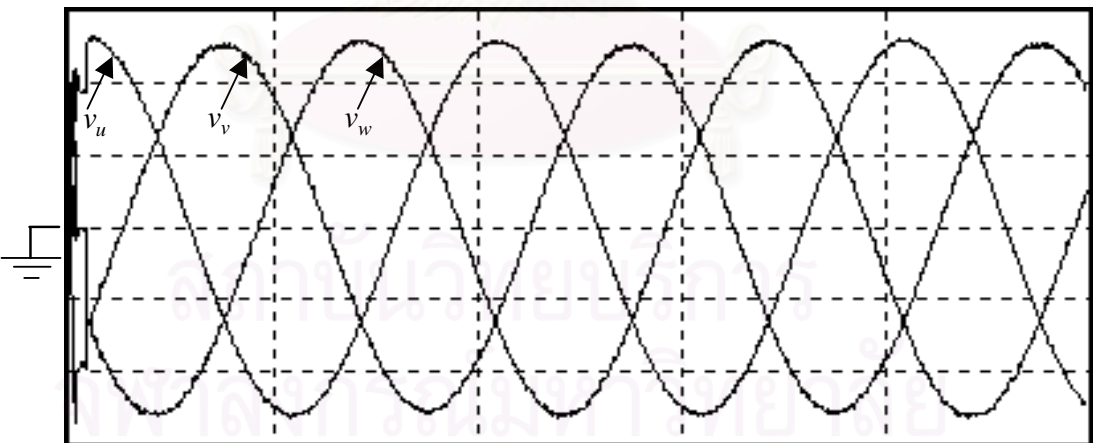
แรงดันเฟส  $v_u, v_v, v_w$  [120 V / DIV]



เวลา [90 ms / DIV]

รูปที่ 4.8 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ SIEMENS

แรงดันเฟส  $v_u, v_v, v_w$  [120 V / DIV]

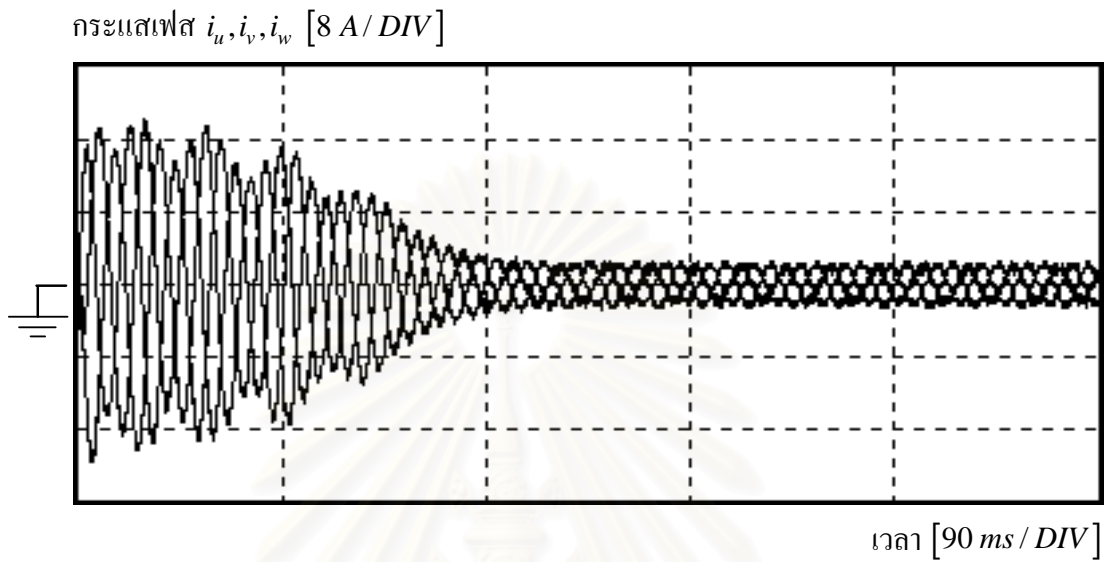


เวลา [10 ms / DIV]

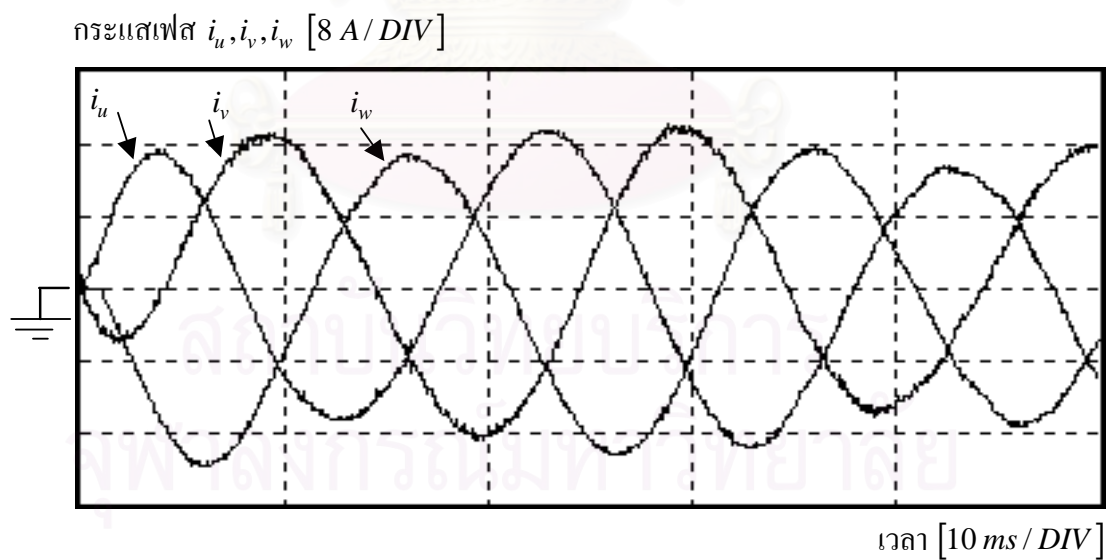
รูปที่ 4.9 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ SIEMENS

ขยายจากแรงดันในรูปที่ 4.8 ช่วงต้น

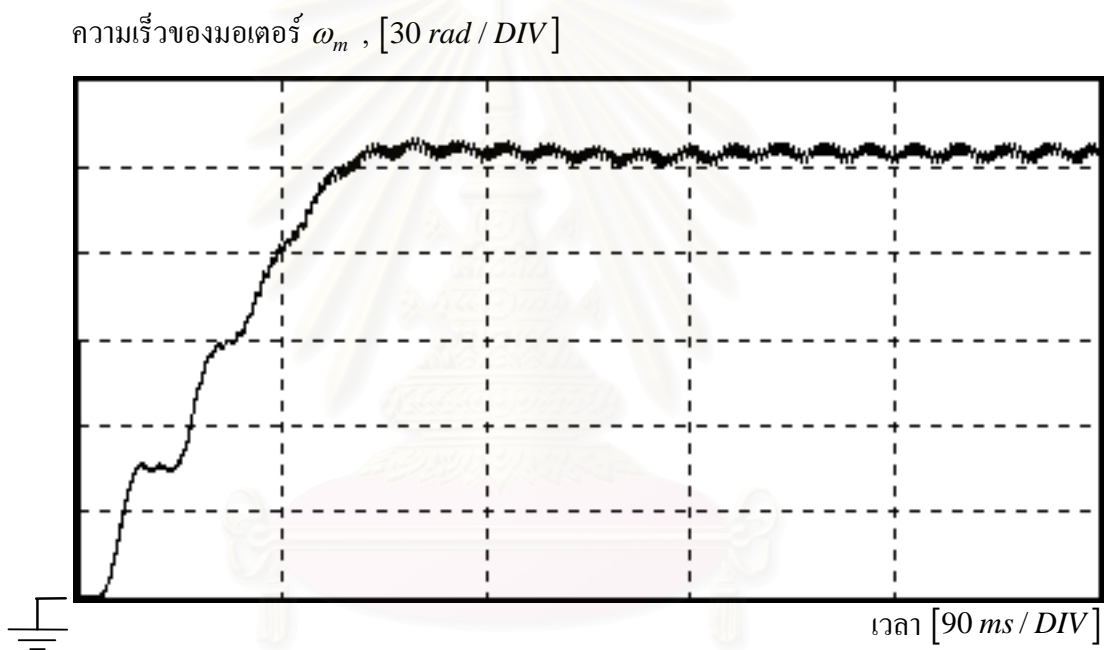




รูปที่ 4.10 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ SIEMENS



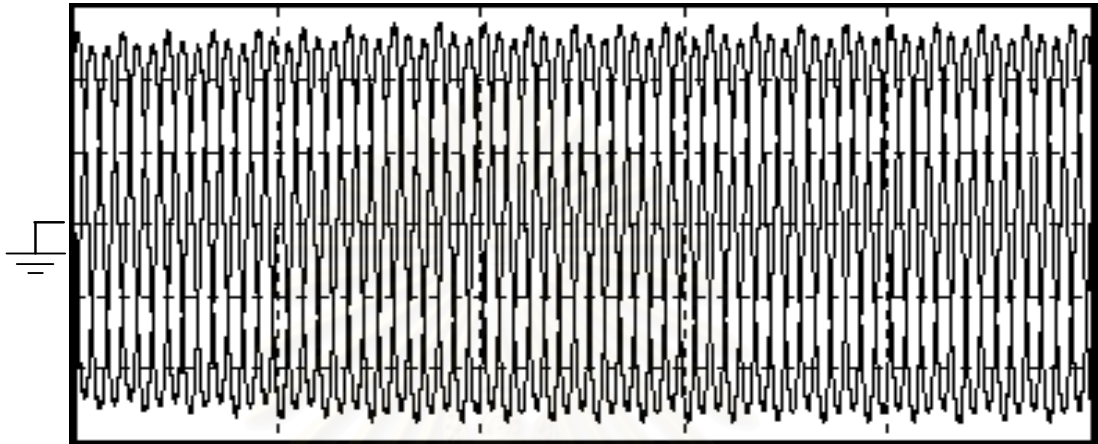
รูปที่ 4.11 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ SIEMENS  
ขยายจากกระแสในรูปที่ 4.10 ช่วงต้น



รูปที่ 4.12 ความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI จากการป้อนแรงดัน 3 เฟส โดยตรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

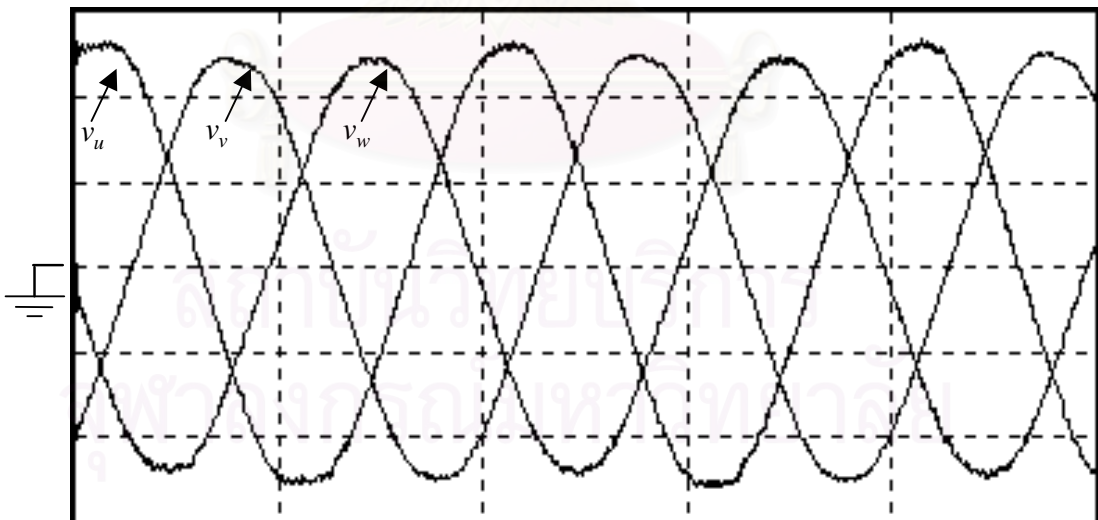
แรงดันเฟส  $v_u, v_v, v_w$  [100 V / DIV]



เวลา [90 ms / DIV]

รูปที่ 4.13 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ MITSUBISHI

แรงดันเฟส  $v_u, v_v, v_w$  [100 V / DIV]

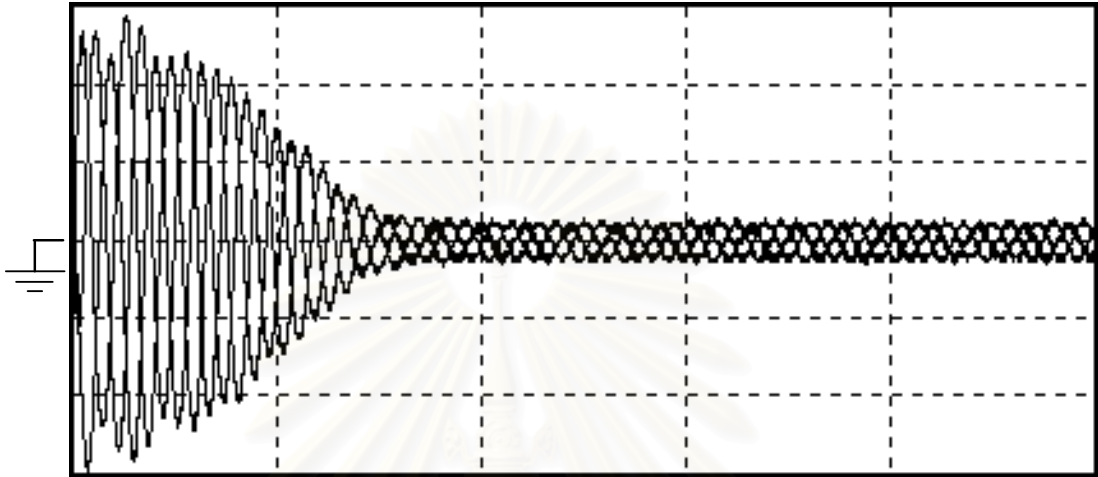


เวลา [10 ms / DIV]

รูปที่ 4.14 แรงดันเฟส ( $v_u, v_v, v_w$ ) ความถี่ 50 Hz ที่จ่ายให้มอเตอร์ MITSUBISHI

ขยายจากแรงดันในรูปที่ 4.13 ช่วงต้น

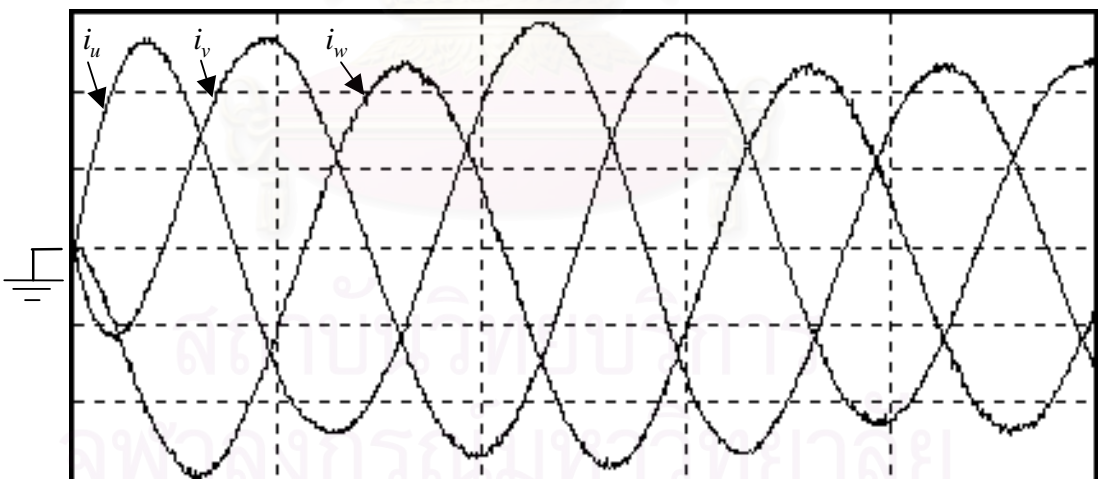
กระแสเฟส  $i_u, i_v, i_w$  [9 A/DIV]



เวลา [90 ms / DIV]

รูปที่ 4.15 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ MITSUBISHI

กระแสเฟส  $i_u, i_v, i_w$  [9 A/DIV]



เวลา [10 ms / DIV]

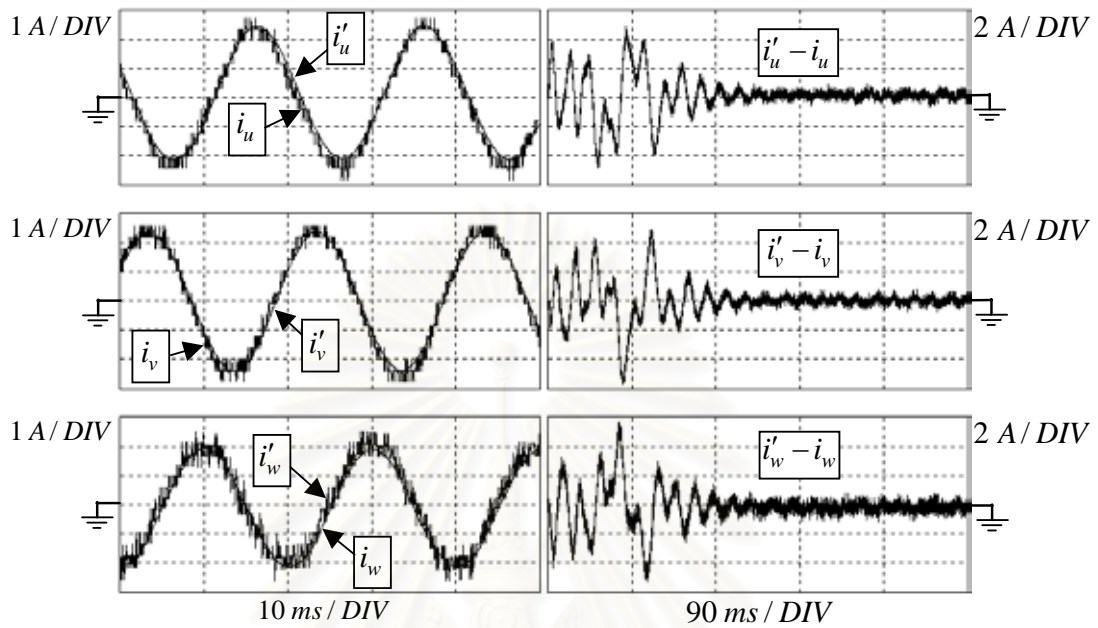
รูปที่ 4.16 กระแสเฟส ( $i_u, i_v, i_w$ ) ความถี่ 50 Hz ของมอเตอร์ MITSUBISHI

ขยายจากกระแสในรูปที่ 4.15 ช่วงต้น

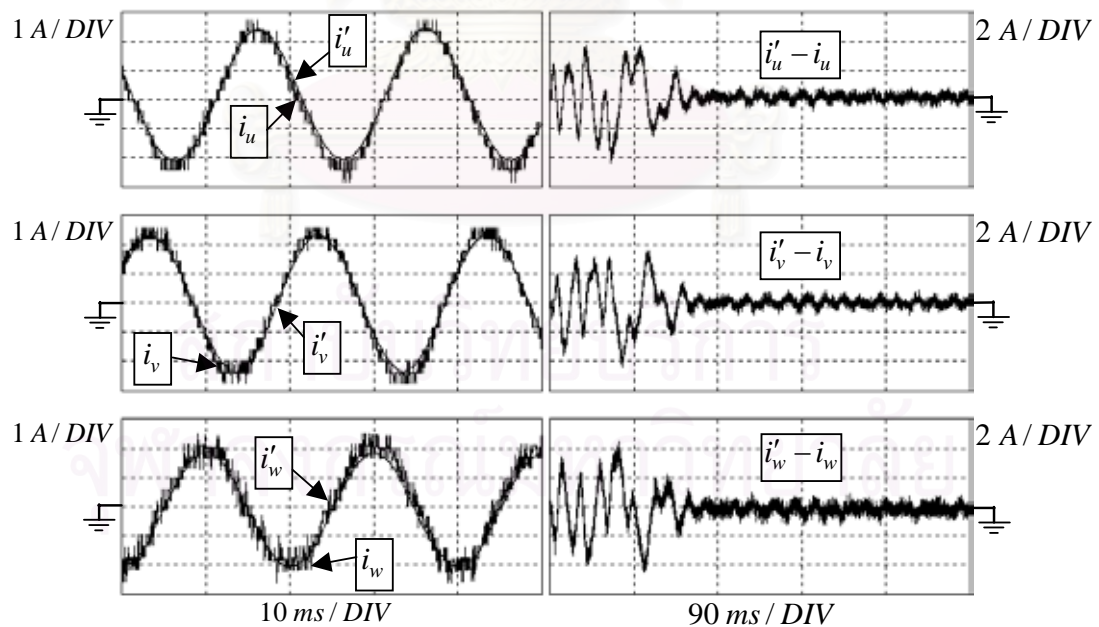
เราจะทดสอบความเที่ยงตรงของค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์ เทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการทดสอบไร้โหลดและยึดโรเตอร์ โดยใช้การเปรียบเทียบกระแสในแต่ละเฟสที่ได้จากการจำลองระบบ ( $i'_u, i'_v, i'_w$ ) จากการแปลงกระแส  $i_s$  ของระบบจำลองในรูปที่ 4.1 กับกระแสจริงในแต่ละเฟสที่เก็บข้อมูลได้จากการวัด ( $i_u, i_v, i_w$ ) สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบกระแสของมอเตอร์ ABB ได้ดังรูปที่ 4.17-4.18 ผลการเปรียบเทียบกระแสของมอเตอร์ SIEMENS ได้ดังรูปที่ 4.19-4.20 และผลการเปรียบเทียบกระแสของมอเตอร์ MITSUBISHI ได้ดังรูปที่ 4.21-4.22



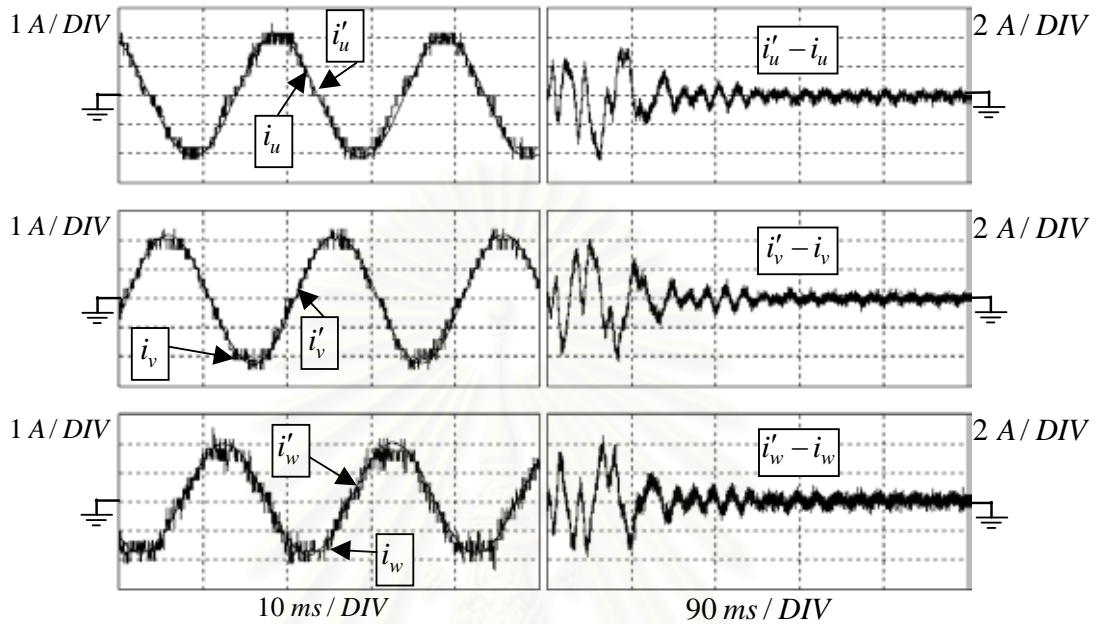
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



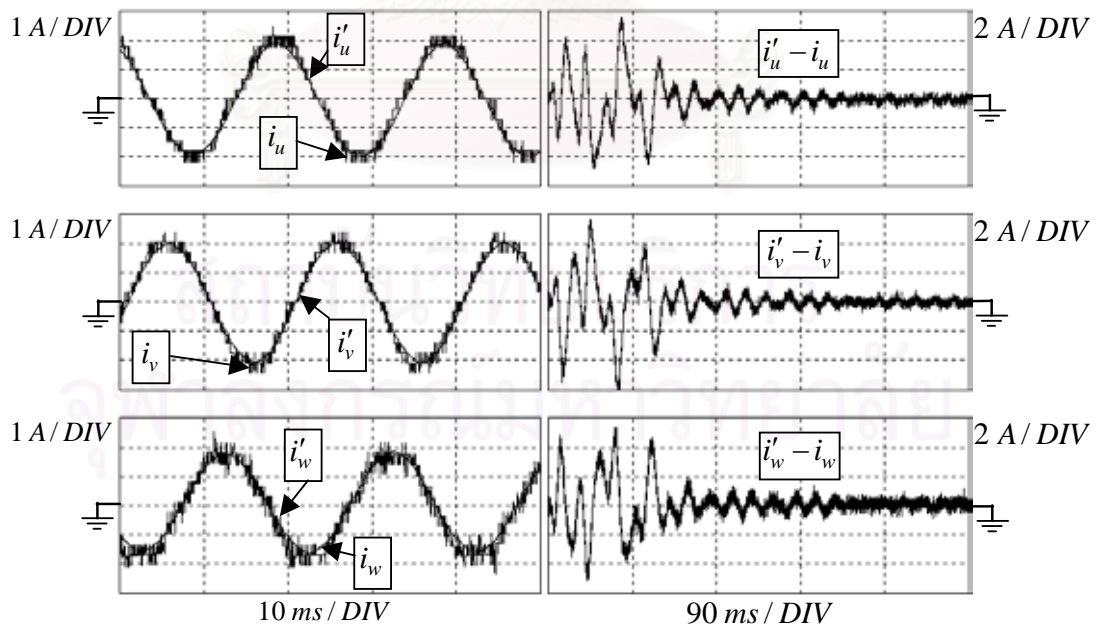
รูปที่ 4.17 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงท้ายและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ  
ของมอเตอร์ ABB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไว้โหลดและชัตโรเตอร์



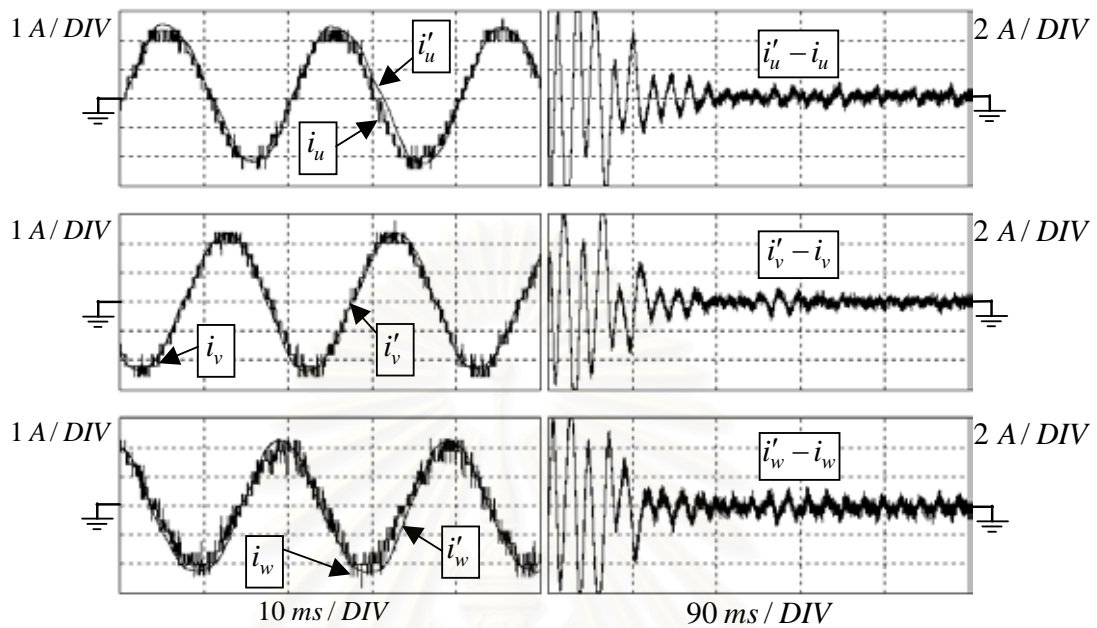
รูปที่ 4.18 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงท้ายและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบ  
ของมอเตอร์ ABB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



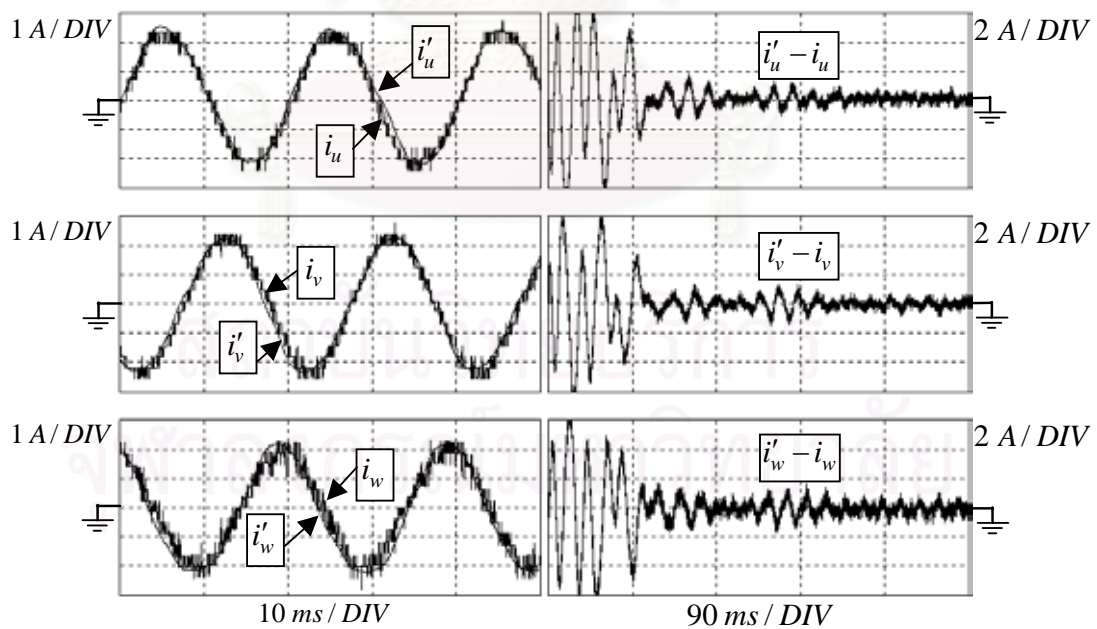
รูปที่ 4.19 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงท้ายและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ SIEMENS โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้โหนดและขั้วโรเตอร์



รูปที่ 4.20 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงท้ายและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ SIEMENS โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.21 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ MITSUBISHI โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้โหลดและซีดโรเตอร์



รูปที่ 4.22 ค่ากระแสเฟสขยายในช่วงทำยและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ MITSUBISHI โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



จากผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 4.17-4.22 ในช่วงเวลา 0-180 ms ที่มอเตอร์เริ่มหมุน และมีค่ากระแสเดเตอร์ที่สูง ในช่วงนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์สูง กระแสทางด้านโรเตอร์ จะมีขนาดและความถี่ที่สูง ดังนั้นในช่วงนี้ค่าพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ ( $R_s$  และ  $\sigma L_s$ ) และค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์ ( $M'$  และ  $R'_r$ ) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสทางด้านสเตเตอร์ นอกจากนี้ยังมีผลของปรากฏการณ์ทางผิวด้วย จากรูปที่ 4.17-4.22 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสผิดพลาดจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับค่ากระแสผิดพลาดจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบไว้โหลดและยึดโรเตอร์ และในช่วงเวลาหลังจาก 180 ms เป็นต้นไป ซึ่งความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์จะมีค่าน้อยลง จึงเหลือแต่ค่าพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์และค่าความเหนี่ยวนำ  $L_s$  ที่มีผลต่อกระแสทางด้านสเตเตอร์ ในช่วงนี้จากรูปที่ 4.17-4.22 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสผิดพลาดจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองวิธีมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน

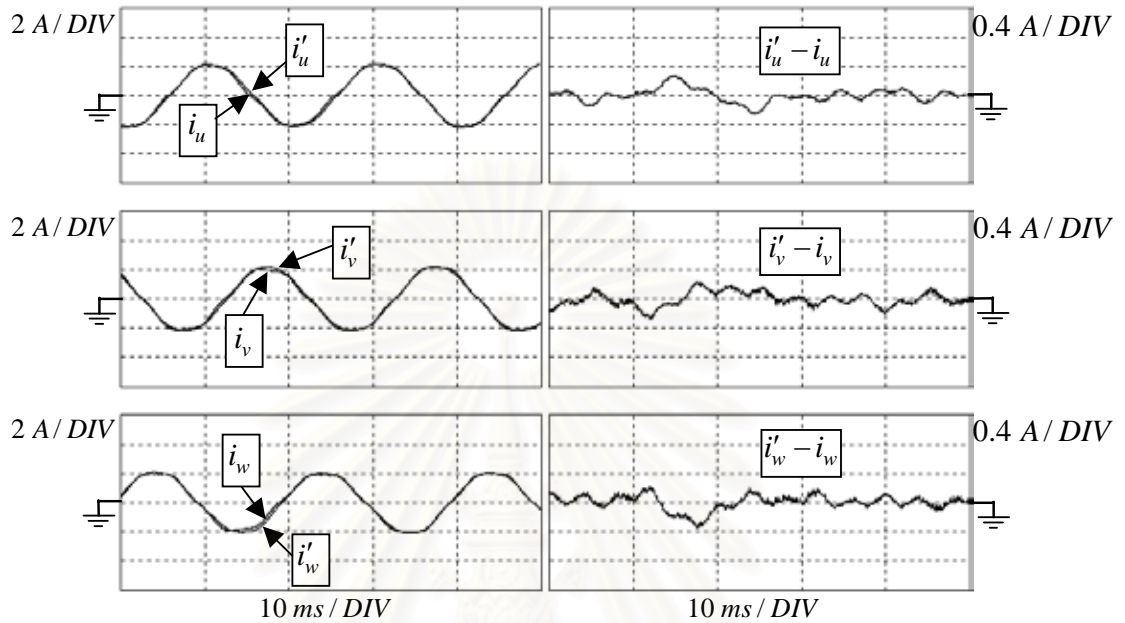
จากผลการทดสอบที่ได้จากรูปที่ 4.17-4.22 จะเห็นว่าในช่วงต้นๆซึ่งความเร็วและกระแสมีการเปลี่ยนแปลงและความแปรปรวนสูง จึงยากในการนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของค่าพารามิเตอร์และจากรูปคลื่นกระแสที่ได้จากการวัดในช่วงท้าย (รูปขยายทางด้านซ้ายของรูป) จะเห็นว่ามีความละเอียดของข้อมูลมีน้อย สืบเนื่องจากข้อมูลมีลักษณะเป็นขั้นบันได เนื่องจากเราต้องใช้สเกลขยายของสโคปให้ครอบคลุมข้อมูลของกระแสในช่วงต้นซึ่งมีค่าที่สูง ทำให้ข้อมูลกระแสในช่วงท้ายที่เก็บได้มีความละเอียดน้อย ดังนั้นเราจะทำการทดสอบเพิ่มเติม โดยการทดสอบมอเตอร์ขณะอยู่ตัว (Steady state) ที่สภาวะไว้โหลด และที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยทำการเก็บผลเช่นเดียวกับช่วงก่อน จะต่างกันที่ค่าความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จะมีค่าคงที่ดังนี้

มอเตอร์ ABB สภาวะไว้โหลดมีความเร็วของมอเตอร์ 1497 rpm และสภาวะขณะจ่ายโหลด 1 kW มีความเร็วของมอเตอร์ 1406 rpm

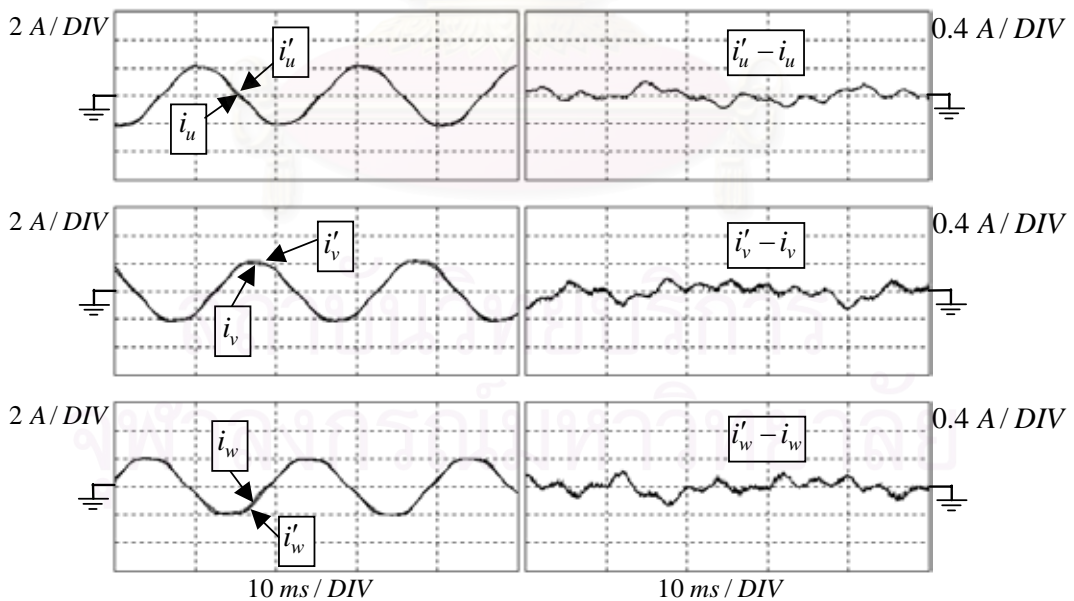
มอเตอร์ SIEMENS สภาวะไว้โหลดมีความเร็วของมอเตอร์ 1497 rpm และสภาวะขณะจ่ายโหลด 1 kW มีความเร็วของมอเตอร์ 1386 rpm

มอเตอร์ MITSUBISHI สภาวะไว้โหลดมีความเร็วของมอเตอร์ 1498 rpm และสภาวะขณะจ่ายโหลด 1 kW มีความเร็วของมอเตอร์ 1448 rpm

สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบค่ากระแสในแต่ละเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ ABB , SIEMENS และ MITSUBISHI ได้จากรูปที่ 4.23-4.34

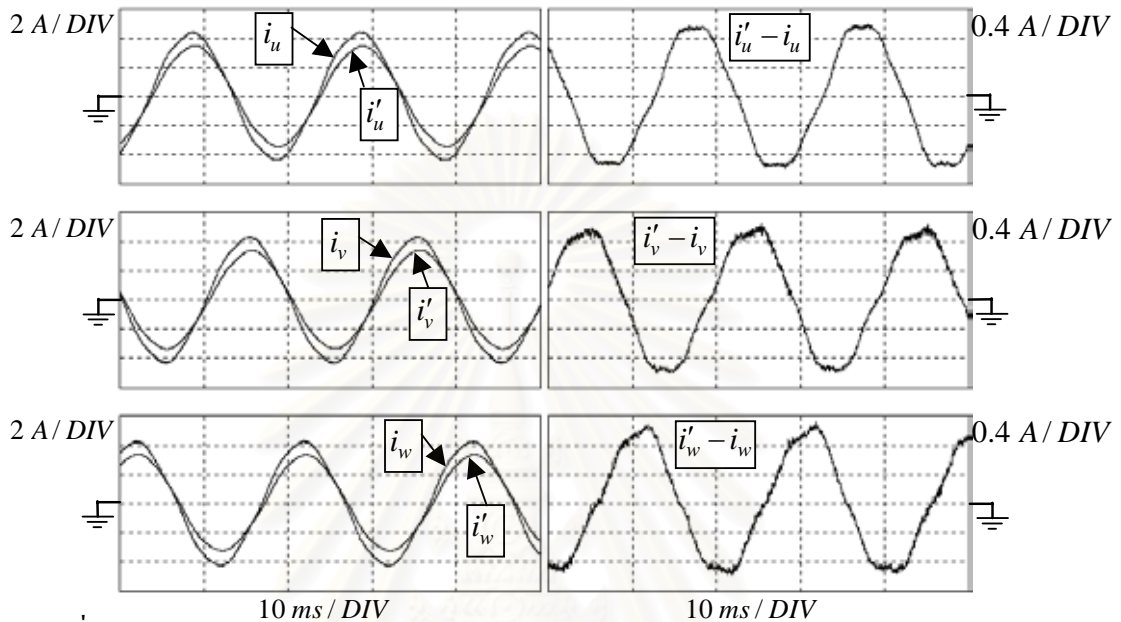


รูปที่ 4.23 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ ABB ขณะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้อโหลดโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้อโหลดและขั้วโรเตอร์

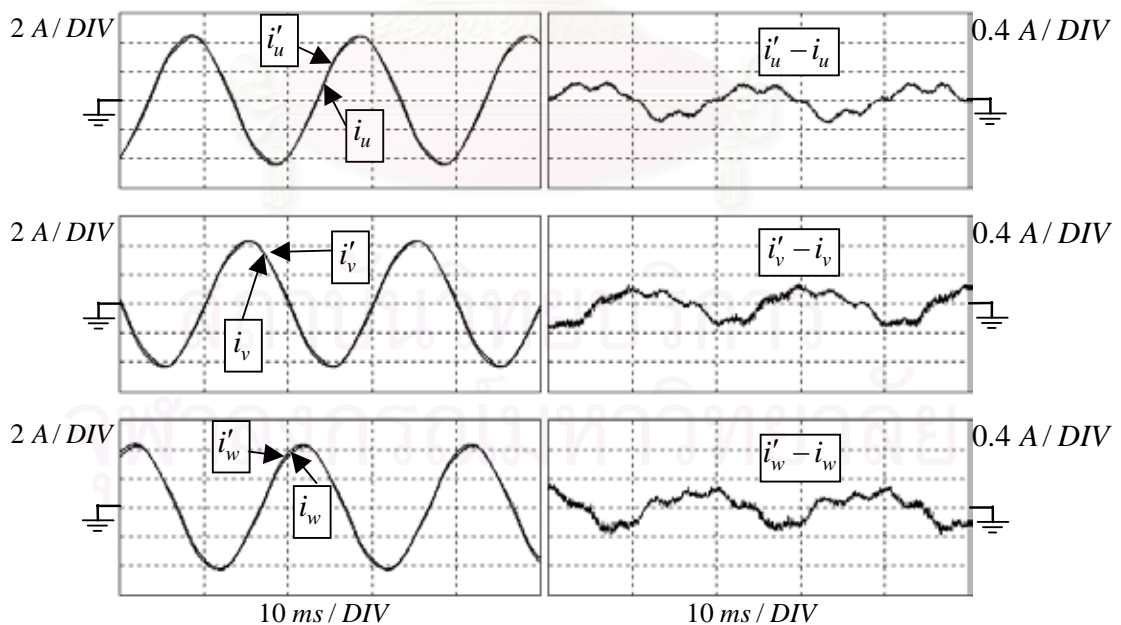


รูปที่ 4.24 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ ABB ขณะอยู่ตัว

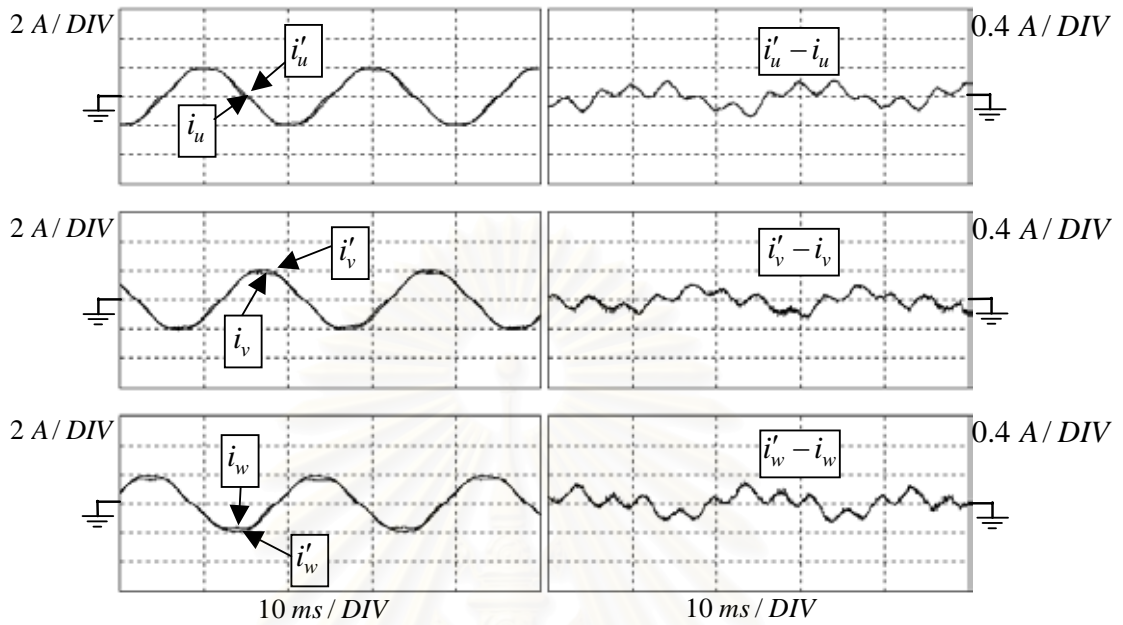
ที่สภาวะไร้โหลดโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



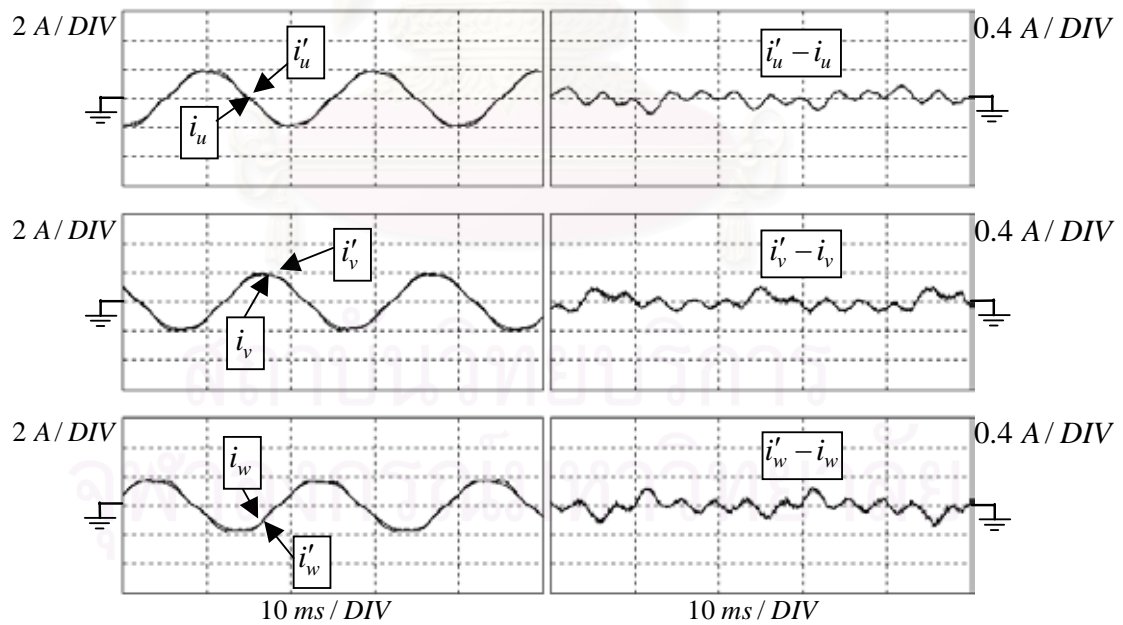
รูปที่ 4.25 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ ABB ขณะอยู่ตัวที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้โหลดและซิดโรเตอร์



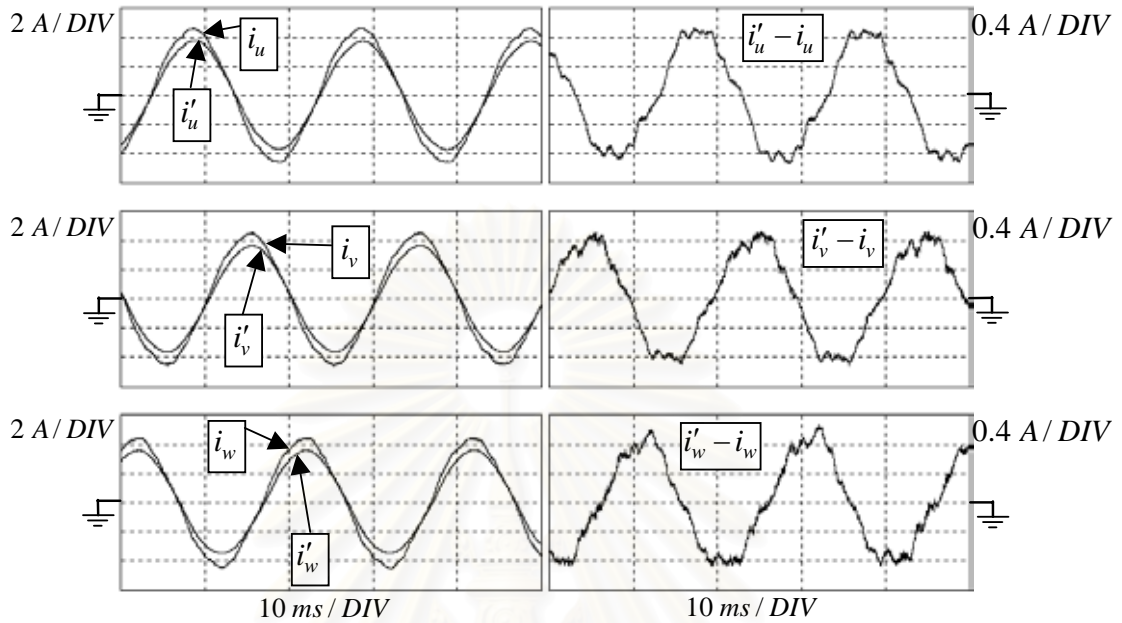
รูปที่ 4.26 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ ABB ขณะอยู่ตัวที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



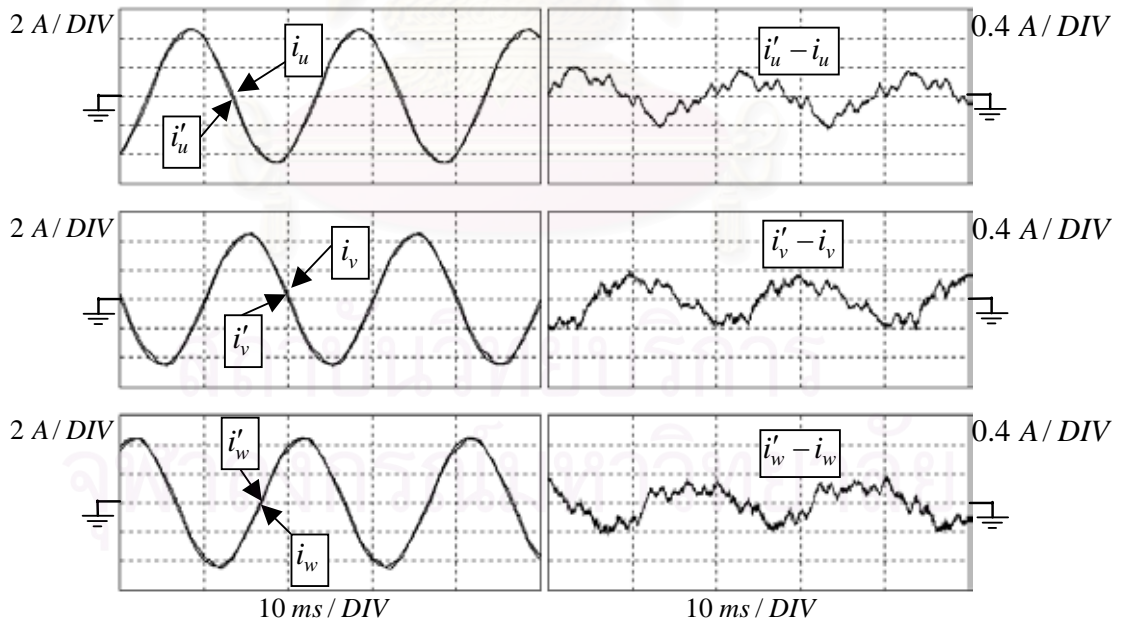
รูปที่ 4.27 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ SIEMENS ขณะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้โหลดโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้โหลดและยัดโรเตอร์



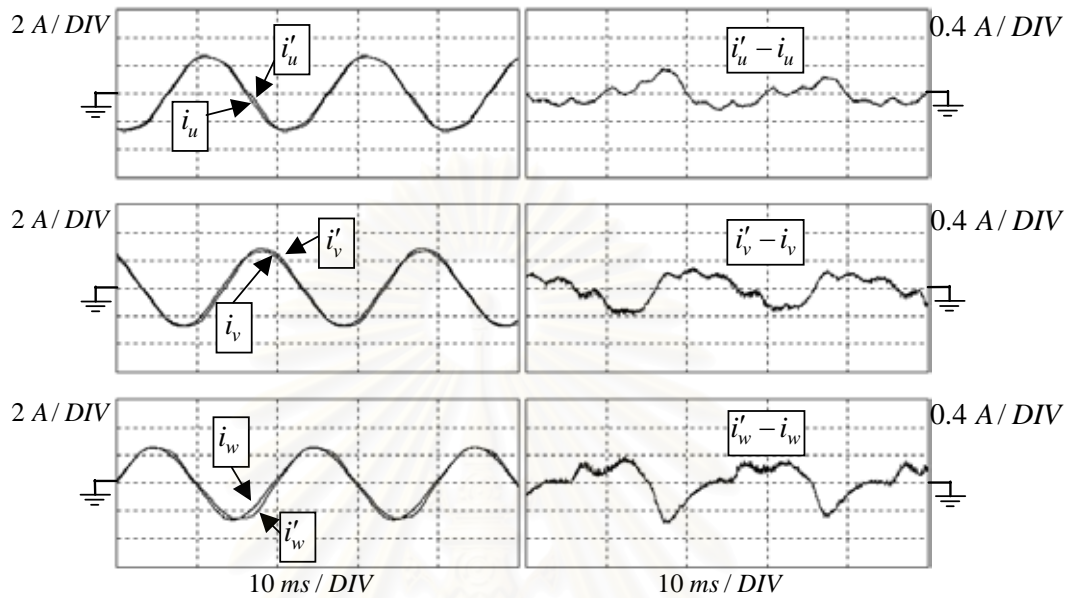
รูปที่ 4.28 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ SIEMENS ขณะอยู่ตัว ที่สภาวะไร้โหลด โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



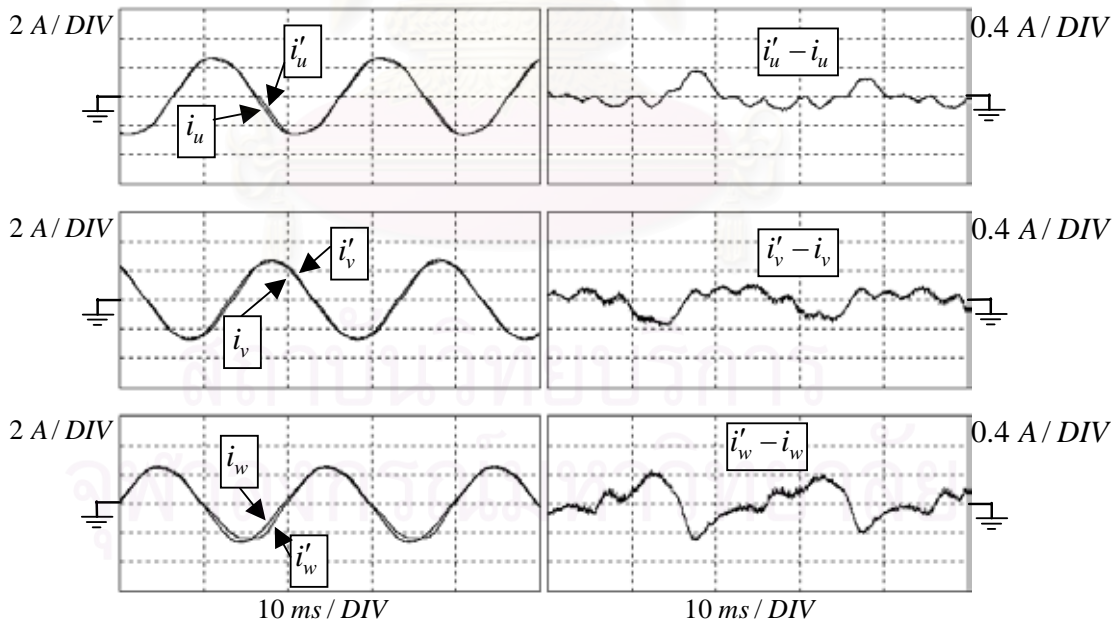
รูปที่ 4.29 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ SIEMENS ขณะอยู่ตัวที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไว้โหลดยัดโรตอร์



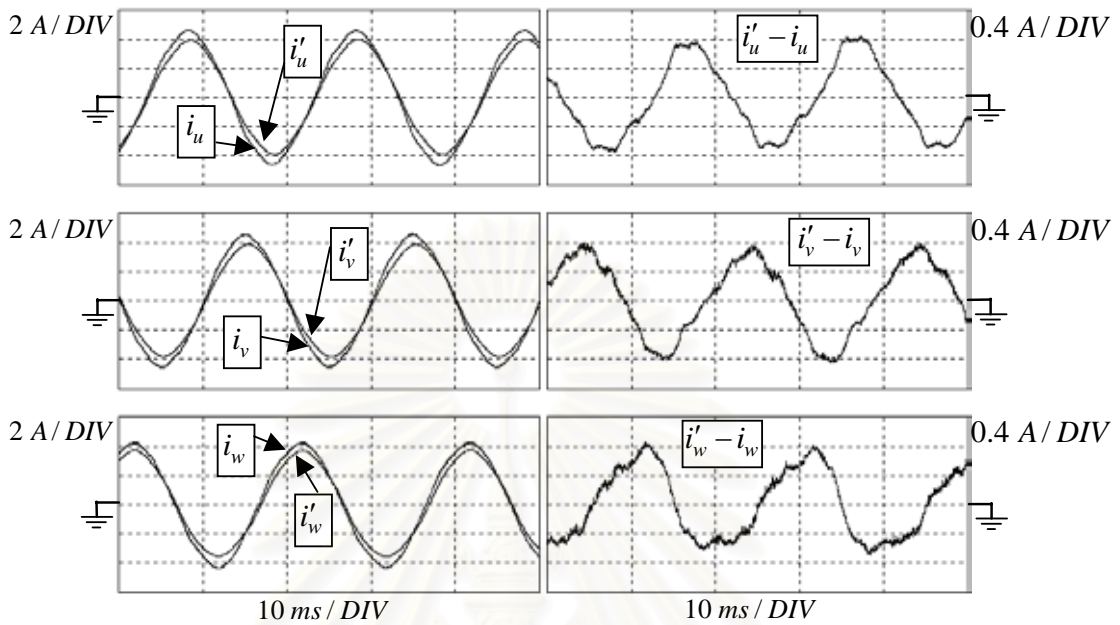
รูปที่ 4.30 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ SIEMENS ขณะอยู่ตัวที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



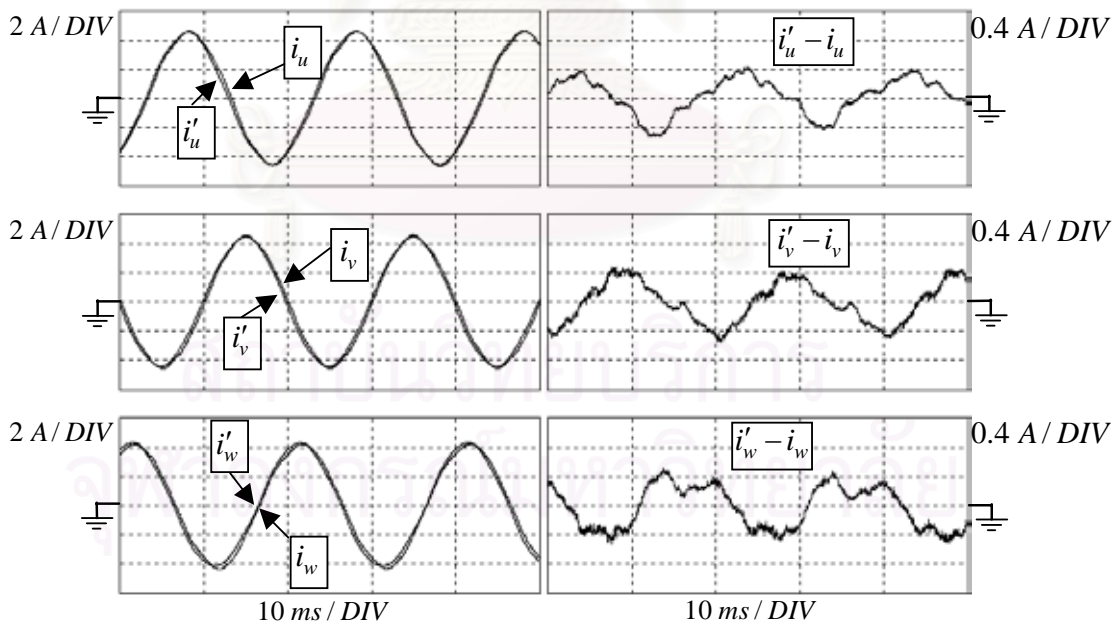
รูปที่ 4.31 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ MITSUBISHI ขณะอยู่ตัวที่สภาวะไร้อโหลด โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไร้อโหลดยัดโรเตอร์



รูปที่ 4.32 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ MITSUBISHI ขณะอยู่ตัวที่สภาวะไร้อโหลดโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.33 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ MITSUBISHI ขณะอยู่ตัว ที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไ้โรลดยึดโรเตอร์



รูปที่ 4.34 ค่ากระแสเฟสและค่ากระแสผิดพลาดจากการจำลองระบบของมอเตอร์ MITSUBISHI ขณะอยู่ตัว ที่สภาวะจ่ายโหลด 1 kW โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์

จากผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 4.23-4.34 ในสภาวะมอเตอร์ไร้โหลดนั้นมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวจะมีค่ากระแสผิดพลาดจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบไร้โหลดและยัดโรเตอร์กับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่สภาวะมอเตอร์ไร้โหลดนี้ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่ากระแสได้แก่ค่า  $R_S, \sigma L_S$  และ  $M'$  ซึ่งจากผลการหาค่าพารามิเตอร์จากวิธีการทดสอบไร้โหลดและยัดโรเตอร์ดังตารางที่ 2.2 กับค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์ดังตารางที่ 3.1 จะได้ค่า  $R_S, \sigma L_S$  และ  $M'$  มีค่าใกล้เคียงกันจึงได้ค่ากระแสผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงกัน

ในสภาวะมอเตอร์ที่มอเตอร์จ่ายโหลดนั้นจะเห็นได้ว่ามีค่ากระแสผิดพลาดจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบไร้โหลดและยัดโรเตอร์จะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากที่สภาวะมอเตอร์จ่ายโหลดนี้ค่าพารามิเตอร์ทุกตัวจะมีผลต่อค่ากระแส ซึ่งจากผลการหาค่าพารามิเตอร์จากวิธีการทดสอบไร้โหลดและยัดโรเตอร์ดังตารางที่ 2.2 กับค่าพารามิเตอร์จากการใช้อินเวอร์เตอร์ดังตารางที่ 3.1 ค่าที่มีความแตกต่างกันมากคือค่าของ  $R'_R$  และค่า  $\tau_R$  แต่จากผลการจำลองระบบที่ได้จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์จะได้ค่ากระแสผิดพลาดที่น้อยกว่าดังนั้นการใช้อินเวอร์เตอร์หาค่าพารามิเตอร์จึงได้ค่าที่ถูกต้องมากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองระบบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์ที่สภาวะไร้โหลดและที่สภาวะจ่ายโหลด จะเห็นได้ว่ามีค่ากระแสผิดพลาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการจ่ายโหลด เนื่องจากความถี่บนตัวโรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าสลิปที่เพิ่ม ทำให้ค่าความต้านทาน  $R'_R$  มีค่าเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของปรากฏการณ์ทางผิวทำให้เราได้ค่ากระแสผิดพลาดเพิ่มขึ้น

จากการใช้งานในสภาวะทั่วไปของมอเตอร์ซึ่งค่ากระแสและแรงดันบนตัวโรเตอร์จะมีค่าความถี่ที่ต่ำนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์จะมีค่าความถูกต้องมากกว่าเนื่องจากวิธีนี้ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์ที่ความถี่ต่ำ ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบไร้โหลดและยัดโรเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดมากเนื่องจากวิธีนี้ในขณะที่ทำการหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์จะมีค่าฟลักซ์ในระดับที่ต่ำมากและเกิดความถี่บนตัวโรเตอร์มีค่าสูงทำให้ค่าที่ได้เกิดการผิดพลาดเนื่องผลของปรากฏการณ์ทางผิว



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในการหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์โดยใช้ความแตกต่างของแรงดันและกระแสนั้น จะเห็นได้ว่าเป็นการลดความผิดพลาดในการคำนวณค่า อันเนื่องมาจากผลของเวลาประวิงและความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์ลงได้ และคำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากมอเตอร์โดยตรงด้วยมิเตอร์วัดค่าความต้านทานที่มีความแม่นยำสูง

ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวมที่เราได้ออกแบบโดยใช้สัญญาณพัลส์ในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณค่าโดยใช้ค่าความต้านทานและค่าแรงดันพัลส์ที่เราเข้าร่วมในการคำนวณด้วย จากการที่เราใช้สัญญาณพัลส์ค่าสูงด้วยเวลาที่แคบนี้ทำให้เราสามารถละเลยผลจากความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์ ผลของเวลาประวิง และละเอียดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ในมอเตอร์ได้ จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าเราสามารถ คำนวณ ได้ค่า ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบไว้โหลดและยึดโรเตอร์

การหาค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์ได้แก่ ค่าเวลาดังตัวทางด้านโรเตอร์ ( $\tau_R$ ) ค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์ ( $R'_R$ ) และค่าความเหนี่ยวนำรวม ( $M'$ ) ซึ่งเราได้ออกแบบใช้สัญญาณกระตุ้นทางด้านสเตเตอร์ โดยใช้การควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์และนำสัญญาณแรงดันที่ได้จากการควบคุมกระแสนี้มาใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางด้านโรเตอร์ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้แตกต่างจากค่าที่ได้จากผลการทดสอบยึดโรเตอร์มากเนื่องจาก ในการทดสอบยึดโรเตอร์นั้นจะทำให้เกิดสถานะที่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของค่าพารามิเตอร์ ก็จะมีสถานะที่ฟลักซ์มีค่าต่ำกว่าปกติมาก และความถี่ที่เกิดบนตัวโรเตอร์จะมีค่าสูงซึ่งทำให้เกิดผลของปรากฏการณ์ทางผิว ค่า  $R'_R$  ที่ได้จึงมีค่ามากขึ้นตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $R'_R$  จากผลการทดสอบในรูปแบบที่ 2.10-2.13 และทำให้  $\tau_R$  มีค่าลดลงด้วย แต่ค่าที่เราได้จากการใช้อินเวอร์เตอร์นั้น เราใช้การควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์เพื่อสร้างฟลักซ์ที่ค่าปกติ และช่วงของแรงดันที่เราใช้หาค่า  $\tau_R$  และ  $R'_R$  นั้นจะมีความถี่ต่ำผลของปรากฏการณ์ทางผิวจึงมีค่าลดลงค่าที่ได้จึงน่าจะมีความถูกต้องมากขึ้น

จากผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการหาค่าใช้อินเวอร์เตอร์และจากการหาโดยวิธีไว้โหลดและยึดโรเตอร์โดยการจ่ายแรงดัน 50 Hz จากการไฟฟ้าโดยตรงนั้น จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์

ที่ได้จากวิธีการหาโดยอัตโนมัติจะได้ค่าถูกต้องมากกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการหาโดยวิธีไร้โหลดและซีดีโรเตอร์

เนื่องจากค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์และทางด้านโรเตอร์ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นการหาค่าโดยวิธีอัตโนมัติ จะได้ค่าความถูกต้อง ณ อุณหภูมิที่ทำการหาค่าพารามิเตอร์นั้น แต่เมื่อเรานำมอเตอร์ไปใช้งานจะทำให้ตัวของมอเตอร์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ค่าความต้านทานของมอเตอร์ก็จะมีค่าเปลี่ยนไป แนวทางในการแก้ปัญหานี้อาจทำได้โดยการใช้ระบบการควบคุมที่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานนี้ หรืออีกแนวทางหนึ่งคือการใช้ระบบควบคุมหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปขณะทำการควบคุม (On-line identification)

ค่าความเหนี่ยวนำของมอเตอร์ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าฟลักซ์ในมอเตอร์นั้นหรือเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็ก เราสามารถนำเส้นกราฟการอิ่มตัวของแกนเหล็กนี้ไปใช้ในการควบคุมได้ ก็จะสามาถแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเหนี่ยวนำตามค่าฟลักซ์ในมอเตอร์นี้ได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

โสภณ สมัยรัฐ. “ระบบควบคุมเวกเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์”. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

### ภาษาอังกฤษ

Ashwin M., Khambadkone, Joachim Holtz, “Vector-Controlled Induction Motor Drive with a self-Commissioning Scheme”, IEEE Trans. on Industry Electronics, Vol.38 No.5, October 1991, pp 322-327.

Friedrich FrÖhr, and Fritz Orthenburger, “Introduction to Electronic Control Engineering”, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munchen, 1982.

Gene F. Frankin, J. David Powell, Michael L. Workman, “Digital Control of Dynamic System”, Addison-Wesley Publishing Company, United State of America, 1990.

Hangwen Pan, Jinshen Jiang, Joachim Holtz, “Decoupling Control and Parameter Identification of Field-Oriented Induction Motor with Saturation”, IEEE Trans. on Industry Electronics, 1996, pp 757-761.

H. Rasmussen, M. Knudsen, M. Tonnes, “Parameter Estimation of Inverter and Motor Model at Standstill using Measured Currents only”, IEEE Trans. on Industry Electronics, 1996, pp 331-336.

Katsuhiko Ogata, “Discrete-Time Control System”, Prentice-Hall International, United States of America, 1987.

M. Ruff, H. Grotstollen, “Off-Line Identification of the Electrical Parameters of an Industrial Servo Drive System”, IEEE Trans., 1996, pp 213-220.

Peter Vas. “Sensorless Vector and Direct Torque control”. New York: Oxford Univ. Press, 1998, pp 705-720.

R.J.A.Gorter, A.Veltman, P.P.J.Van den Bosch. “Skin effect impact on induction motor parameters estimation using an output-error identification method”. Conf. Rec. of PESC’94, Vol.1, 1994, pp. 763-768.

Toshihiko Noguchi, Paiboon Nakmahachalasint, Narin Watanakul, “Precise Torque Control of Induction Motor with On-Line Parameter Identification in Consideration of Core Loss”, IEEE Trans., 1997, pp 113-118.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

#### ผลของเวลาประวิงและความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กำลัง

จากการที่เราใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ ผลของเวลาประวิงและความไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์ทำให้ได้แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไม่เท่ากับแรงดันคำสั่งเราจะประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของสวิตช์ด้วยสมการเชิงเส้นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น จากข้อมูลของสวิตช์ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในโครงการนี้ใช้โมดูล IPM เบอร์ 15RSH120 เราสามารถเขียนสมการประมาณความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง กับกระแสที่ผ่านสวิตช์ได้เป็น

$$IGBT \text{ นำกระแส ; } V_{CE} \cong 1.0 + 0.1 \times I_C \quad (ก.1)$$

$$\text{ไดโอดที่ต่อขนานนำกระแส ; } V_{EC} \cong 1.0 + 0.08 \times I_C \quad (ก.2)$$

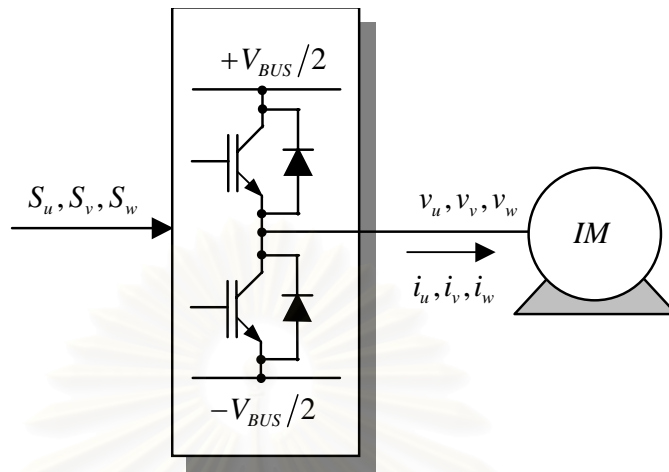
จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของสวิตช์ (  $0.08 \sim 0.1 \Omega$  ) เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของมอเตอร์แล้วมีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ คงเหลือแต่แรงดันตกคร่อมสวิตช์ ( $V_{drop}$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.0 Volt

เมื่อแรงดันคำสั่งมีขนาดเท่ากับ  $\|u_s^*\|$  และมีค่ามุมเป็นศูนย์ จากสมการการแปลงแกนอ้างอิงเราจะได้แรงดันคำสั่งในแต่ละเฟสมีค่าดังสมการที่ (ก.3)

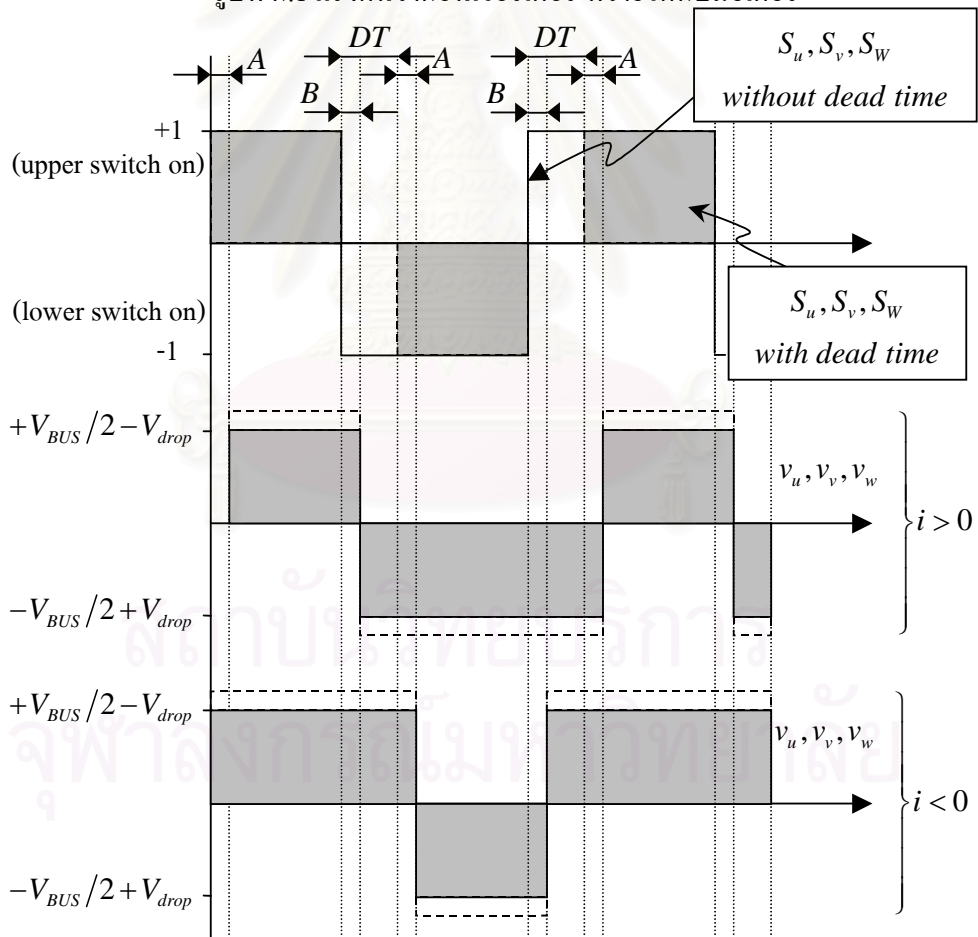
$$\begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \sin 0^\circ \\ -\sin 0^\circ & \cos 0^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|u_s^*\| \\ 0 \end{bmatrix} \quad (ก.3)$$

เมื่อนำค่าคำสั่ง  $v_u^*, v_v^*, v_w^*$  ไปใช้คำนวณรูปแบบการสวิตช์จะได้เป็นสัญญาณขั้วนำสวิตช์ในแต่ละเฟสเป็น  $S_u, S_v, S_w$  ตามลำดับ (ดูรูปที่ ก.1)

ในการเปิดปิดสวิตช์เราจะต้องใส่เวลาประวิง (Dead time) เข้าไปเพื่อไม่ให้สวิตช์ตัวบนและตัวล่างของกิ่งวงจรเดียวกันเกิดการลัดวงจร (Shoot through) ลักษณะของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เมื่อคิดรวมเวลาประวิงของสวิตช์และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ ที่จ่ายให้กับมอเตอร์



รูปที่ ก.2 ลักษณะของแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์เทียบกับจุดกึ่งกลางบัส

โดยที่

$$\begin{aligned}
 DT &= \text{Dead time} &= 4.0 \mu\text{s} \\
 A &= \text{Turn on time} &= 0.7 \mu\text{s} \\
 B &= \text{Turn off time} &= 1.7 \mu\text{s} \\
 V_{BUS} &= \text{แรงดันบัสไฟตรง} \\
 V_{drop} &= \text{แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง}
 \end{aligned}$$

ด้วยการจ่ายแรงดัน  $\|u_S^*\|$  ที่เป็นค่าไฟตรงจาก สมการที่ (ก.3) จะเห็นได้ว่าแรงดันคำสั่ง  $v_u^*$  จะทำให้กระแส  $i_u$  มีค่าเป็นบวกและแรงดันคำสั่ง  $v_v^*$  และ  $v_w^*$  จะทำให้กระแส  $i_v$  และ  $i_w$  มีค่าเป็นลบ จากรูปที่ ก.2 เราสามารถแสดงสมการของค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่ถูกรบกวนจากการประวิงเวลาในการสวิตช์ได้ดังสมการที่ ก.4

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u^* - (DT - t_{on} + t_{off}) \left( \frac{V_{BUS}}{2} - V_{drop} \right) \times \frac{2}{T_S} \\ v_v^* + (DT - t_{on} + t_{off}) \left( \frac{V_{BUS}}{2} - V_{drop} \right) \times \frac{2}{T_S} \\ v_w^* + (DT - t_{on} + t_{off}) \left( \frac{V_{BUS}}{2} - V_{drop} \right) \times \frac{2}{T_S} \end{bmatrix} \quad (\text{ก.4})$$

เราสามารถเขียนสมการของกระแสและแรงดันในรูปของสเปซเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ (ก.5)

$$u_S = u_S^* - u_{DT} \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่

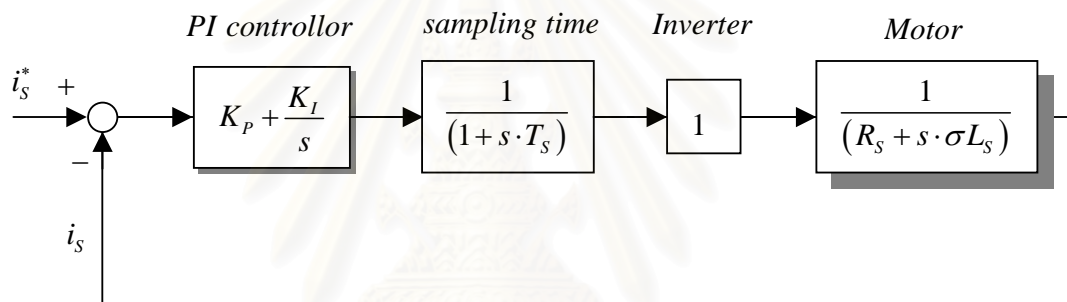
$$u_{DT} = (DT - t_{on} + t_{off}) \left( \frac{V_{BUS}}{2} - V_{drop} \right) \times 2 \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{2}{T_S} \times \frac{i_S}{\|i_S\|}$$



## ภาคผนวก ข

### การออกแบบค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ในวงรอบควบคุมกระแส

ในการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์เราสามารถใช้ตัวควบคุมแบบ PI ดังในรูปที่ ข.1 เนื่องจากในการหาค่าพารามิเตอร์ เราจำเป็นต้องควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์ให้ติดตามค่าคำสั่งซึ่งเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได เราจึงต้องออกแบบระบบให้มีความเร็วในการตอบสนองสูงจึงได้เลือกใช้การออกแบบโดยวิธี Magnitude-optimum



รูปที่ ข.1 การใช้ตัวควบคุม PI ในการควบคุมกระแสทางด้านสเตเตอร์

จากรูปที่ ข.1 เมื่อให้อินเวอร์เตอร์มีค่าอัตราขยายเป็น 1 และอาศัยข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ ( $R_s$  และ  $\sigma L_s$ ) โดยวิธีของ Magnitude-optimum เราสามารถคำนวณหาค่า  $K_p$  และ  $K_I$  ได้ดังสมการที่ (ข.1) และ (ข.2)

$$K_p = \frac{\sigma L_s}{2T_s} \quad (\text{ข.1})$$

$$K_I = \frac{R_s}{2T_s} \quad (\text{ข.2})$$

จากสมการที่ (ข.1) และ (ข.2) เราสามารถคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดได้ดังสมการที่ (ข.3)

$$F_{close}(s) = \frac{1}{1 + 2sT_S + 2s^2T_S^2} \quad (ข.3)$$

การใช้การออกแบบในลักษณะนี้จะทำให้มีระบบผลตอบสนองต่อสัญญาณคำสั่งแบบขั้นที่เร็ว โดยมีช่วงเวลายาขึ้น ( Rise time) มีค่าเท่ากับ  $4.7T_S$  และมีช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) เท่ากับ  $8.4T_S$  สำหรับช่วงผ่อนผัน (Tolerance)  $\pm 2\%$  และมีค่าพุ่งเกิน (Over Shoot) 4.3% เทียบกับสัญญาณคำสั่ง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

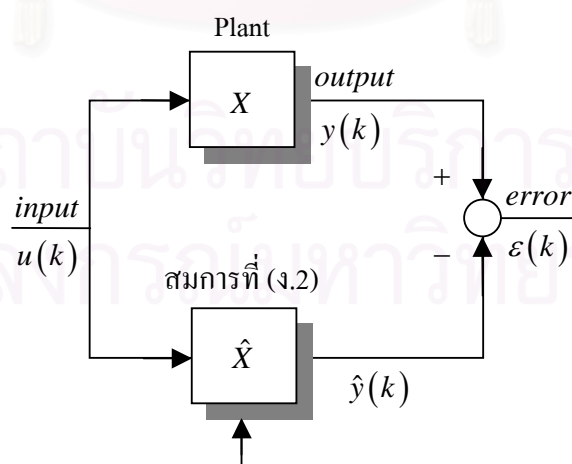
### การคำนวณทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด

ในที่นี้เราจะพิจารณาระบบเชิงเส้นทั่วไปที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้า ( $u$ ) และสัญญาณออก ( $y$ ) เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (ค.1)

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (\text{ค.1})$$

เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ ( $a_{1,k}, a_n, b_{0,k}, b_n$ ) ของระบบได้โดยการสร้างสมการที่มีรูปแบบเดียวกับระบบและใช้ค่าผิดพลาดระหว่างสัญญาณออกของระบบจริงกับสัญญาณออกที่คำนวณได้จากสมการที่ (ค.2) มาใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของสมการเพื่อให้เกิดค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ ค.1

$$G(z) = \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 z^{-1} + \hat{b}_2 z^{-2} + \dots + \hat{b}_n z^{-n}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1} + \hat{a}_2 z^{-2} + \dots + \hat{a}_n z^{-n}} \quad (\text{ค.2})$$



รูปที่ ค.1 การใช้ค่าผิดพลาดในการหาพารามิเตอร์  $\hat{X}$

เมื่อ  $X$  เป็นพารามิเตอร์จริงของระบบและ  $\hat{X}$  เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่า จากรูปที่ ค.1 เราสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (ค.3)

$$y(k) = u(k) \cdot \hat{X} + \varepsilon(k) \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่:  $0 \leq k \leq N$

$N$ : จำนวนจุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณ

เมื่อมีจำนวนข้อมูลถึงอันดับที่  $k$  โดยที่  $n \leq k \leq N$  เราสามารถเขียนสมการที่ (ค.3) ได้ใหม่เป็นสมการที่ (ค.4)

$$Y(N) = C(N) \cdot \hat{X} + \mathcal{E}(N) \quad (\text{ค.4})$$

โดยที่

$$Y(N) = [y(n) \quad y(n+1) \quad \text{L} \quad y(N)]^T \quad (\text{ค.5})$$

$$C(N) = \begin{bmatrix} y(n-1) \quad \text{L} \quad y(0) & \vdots & u(n) \quad \text{L} \quad u(0) \\ y(n) \quad \text{L} \quad y(1) & \vdots & u(n+1) \quad \text{L} \quad u(1) \\ \text{M} \quad \text{O} \quad \text{M} & \vdots & \text{M} \quad \text{O} \quad \text{M} \\ y(N-1) \quad \text{L} \quad y(N-n) & \vdots & u(N) \quad \text{L} \quad u(N-n) \end{bmatrix} \quad (\text{ค.6})$$

$$\hat{X}(N) = [-a_1 \quad -a_2 \quad \text{L} \quad -a_n \mid b_0 \quad b_1 \quad \text{L} \quad b_n]^T \quad (\text{ค.7})$$

$$\mathcal{E}(N) = [\varepsilon(n) \quad \varepsilon(n+1) \quad \text{L} \quad \varepsilon(N)]^T \quad (\text{ค.8})$$

ในวิธีการคำนวณแบบ Least-squares เราจะใช้ดัชนีสมรรถนะ (Performance index) ดังสมการที่ (ค.9)

$$J_N = \frac{1}{2} \sum_{k=n}^N \varepsilon^2(k) = \frac{1}{2} \mathcal{E}^T(N) \cdot \mathcal{E}(N) \quad (\text{ค.9})$$

เราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์  $\hat{X}(N)$  ที่ทำให้  $J_N$  มีค่าน้อยที่สุดได้โดยการหาอนุพันธ์ของค่า  $J_N$  เทียบกับค่า  $\hat{X}(N)$  ดังสมการที่ (ค.10)

$$\frac{\partial J_N}{\partial \hat{X}(N)} = 0 \quad (\text{ค.10})$$

จากสมการที่ (ค.4)-(ค.10) ถ้าค่าของเมตริกซ์  $[C^T(N) \cdot C(N)]^{-1}$  สามารถหาค่าได้แล้ว เราสามารถหาค่าของ  $\hat{X}$  ที่เราต้องการได้จากสมการที่ (ค.11)

$$\hat{X}(N) = [C^T(N) \cdot C(N)]^{-1} C^T(N) \cdot Y(N) \quad (\text{ค.11})$$

เนื่องจากการคำนวณหาค่า  $\hat{X}$  จากสมการที่ (ค.11) โดยตรงจะยุ่งยาก เราจึงนิยมที่จะใช้การคำนวณในรูปแบบทำซ้ำ (Recursive) เพื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า  $\hat{X}$  ทุกครั้งที่ได้ข้อมูลใหม่เข้ามา สมมุติว่าระบบได้ข้อมูลอันดับที่  $(N+1)$  เข้ามาอีก 1 ชุด สมการที่ (ค.4) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} Y(N) \\ y(N+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(N) \\ c(N+1) \end{bmatrix} \cdot \hat{X}(N+1) + \begin{bmatrix} \mathcal{E}(N) \\ \varepsilon(N+1) \end{bmatrix} \quad (\text{ค.12})$$

โดยที่  $c(N+1) = [y(N)_L \quad y(N-n)_M \quad u(N+n)]$

เราสามารถหาค่า  $\hat{X}(N+1)$  ใหม่ได้ดังสมการที่ (ค.13)

$$\hat{X}(N+1) = \hat{X}(N) + K(N+1) [y(N+1) - c(N+1) \cdot \hat{X}(N)] \quad (\text{ค.13})$$

โดยที่

$$K(N+1) = \frac{P(N) \cdot c^T(N+1)}{1 + c(N+1) \cdot P(N) \cdot c^T(N+1)} \quad (\text{ค.14})$$

$$P(N+1) = P(N) - \frac{P(N) \cdot c^T(N+1) \cdot c(N+1) \cdot P(N)}{1 + c(N+1) \cdot P(N) \cdot c^T(N+1)} \quad (\text{ค.15})$$

เราเรียกสมการที่ (ค.13)-(ค.15) ว่าสมการการคำนวณแบบ Recursive-Least squares (RLS) โดยการคำนวณ แบบ RLS นี้จำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าเมตริกซ์  $P$  และค่าเมตริกซ์  $\hat{X}$  ก่อน ซึ่งโดยทั่วไปการกำหนดค่าเริ่มต้นนี้ สามารถทำได้ 2 แบบ คือ

1. การกำหนดค่าเริ่มต้นโดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ 0 ถึง  $n$  ดังสมการที่ (ค.16)-(ค.17)

$$P_0 = [C^T(n) \cdot C(n)]^{-1} \quad (\text{ค.16})$$

$$\hat{X}_0 = P_0 \cdot C^T(n) \cdot Y(n) \quad (\text{ค.17})$$

2. กำหนดค่าเป็นตัวเลขโดยให้

$$P_0 = \alpha I_{n \times n} \quad (\text{ค.18})$$

$$\hat{X}_0 = [0]_{n \times n} \quad (\text{ค.19})$$

เมื่อ  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ที่มีค่ามากค่าหนึ่ง

## ภาคผนวก ง

## ข้อมูลผลการทดสอบไ่ว์โหลคและยัดโรเตอร์

ข้อมูลจากการทดสอบไ่ว์โหลคและยัดโรเตอร์และผลการวัดค่าความต้านทาน  $R_s$  ที่ขั้วของมอเตอร์ ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณในบทที่ 2 นั้น เราจะแสดงข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ ง.1 ผลการวัดค่าความต้านทาน  $R_s$  ที่ขั้วของมอเตอร์

อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่า $R_s$ ( $\Omega$ ) ของมอเตอร์		
	ABB	SIEMENS	MITSUBISHI
53	8.39	9.09	5.20
52	8.30	9.04	5.18
51	8.23	9.00	5.17
50	8.19	8.97	5.16
49	8.14	8.94	5.15
48	8.10	8.91	5.14
47	8.07	8.88	5.14
46	8.03	8.85	5.13
45	8.00	8.82	5.12
44	7.96	8.80	5.10
43	7.93	8.77	5.09
42	7.89	8.75	5.08
41	7.85	8.73	5.06
40	7.82	8.71	5.05
39	7.78	8.68	5.04
38	7.75	8.66	5.03

37	7.71	8.64	5.01
36	7.67	8.62	5.00
35	7.64	8.60	4.99
34	7.60	8.57	4.98
33	7.57	8.56	4.96

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบไร้อโหลดของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 50 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
420.4	1.975	192	49.906	1496
402.1	1.734	161	49.990	1498
380.3	1.519	134	49.995	1498
360.9	1.380	116	49.946	1496
341.2	1.265	102	49.917	1496
321.3	1.166	90	49.921	1496
301.5	1.075	79	49.984	1498
281.0	0.989	70	50.016	1499
260.9	0.908	61	50.044	1500
241.4	0.835	54	50.053	1500
220.9	0.761	46	50.052	1500
200.9	0.690	40	50.055	1500
180.3	0.621	34	50.016	1499
160.3	0.553	29	49.966	1497
141.3	0.491	24	50.024	1498
120.2	0.422	20	49.906	1493
100.8	0.366	17	49.892	1492
81.7	0.303	14	49.975	1491
61.5	0.245	11	49.992	1485



40.0	0.204	9	49.975	1462
------	-------	---	--------	------

ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบขีดโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 50 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
119.96	3.528	521.7	49.993
116.81	3.422	493.5	49.989
112.68	3.301	458.2	50.021
109.62	3.204	432.8	50.013
107.42	3.138	415.4	49.999
103.52	3.019	384.5	50.081
100.44	2.929	361.6	50.083
97.81	2.854	342.9	50.072
93.18	2.719	310.9	50.070
89.91	2.624	289.3	50.041
86.37	2.520	267.0	49.987
83.87	2.449	251.9	49.952
81.45	2.380	237.5	49.960
76.19	2.227	207.6	49.987
74.26	2.170	197.1	50.032
68.60	2.006	168.2	50.027
65.48	1.915	153.3	50.001
62.03	1.817	137.7	49.989
58.96	1.728	124.4	50.007
55.31	1.624	109.8	49.932
51.85	1.525	96.6	49.900
49.62	1.461	88.6	49.868
44.42	1.310	71.1	49.876
41.63	1.229	62.5	49.889

38.50	1.138	53.5	49.939
34.39	1.019	42.7	50.008
32.21	0.956	37.5	49.994
27.33	0.814	27.1	49.965
23.90	0.713	20.8	50.023
20.43	0.612	15.3	50.006
17.79	0.535	11.6	50.000
13.96	0.422	7.2	50.030
10.54	0.320	4.1	49.998

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 30 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
230.24	1.5207	96.6	29.959	898
220.19	1.3968	84.4	29.959	898
210.27	1.2952	74.7	29.959	898
201.24	1.2136	67.4	29.959	898
190.01	1.1293	59.5	29.959	898
181.51	1.0651	54.0	29.959	898
170.27	0.9869	47.7	29.959	898
161.38	0.9318	43.3	29.959	898
151.21	0.8688	38.0	29.959	898
140.95	0.8054	33.6	29.959	898
131.04	0.7453	29.5	29.959	898
120.27	0.6823	25.5	29.959	898
111.61	0.6350	22.6	29.959	898
101.32	0.5739	19.1	29.959	897
90.57	0.5138	16.0	29.959	897
80.90	0.4592	13.6	29.959	897

70.36	0.4039	11.2	29.959	896
61.23	0.3593	9.4	29.959	895
51.60	0.3074	7.6	29.959	894
41.50	0.2531	6.0	29.959	891
31.63	0.2110	4.9	29.959	885
21.09	0.1664	3.9	29.959	863

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 30 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_s (Hz)$
96.54	3.531	496.5	29.958
93.78	3.425	467.7	29.957
91.91	3.337	447.4	29.959
89.30	3.236	421.5	29.958
87.00	3.159	400.4	29.959
82.91	3.007	363.1	29.959
80.03	2.900	338.1	29.959
78.36	2.839	324.0	29.959
75.93	2.752	304.1	29.967
73.15	2.653	282.2	29.958
69.13	2.508	252.1	29.960
66.84	2.424	235.6	29.958
64.05	2.325	216.4	29.960
61.26	2.224	198.0	29.958
58.76	2.134	182.2	29.960
55.94	2.033	165.3	29.958
52.46	1.908	145.4	29.960
50.47	1.837	134.7	29.956
47.29	1.722	118.3	29.968

45.73	1.667	110.7	29.960
41.98	1.532	93.5	29.958
38.45	1.405	78.5	29.957
36.65	1.342	71.4	29.960
34.06	1.248	61.8	29.958
31.50	1.157	53.0	29.963
28.33	1.042	42.9	29.960
24.79	0.915	33.0	29.957
23.27	0.860	29.1	29.961
20.32	0.753	22.3	29.957
16.99	0.632	15.6	29.951
14.50	0.541	11.4	29.953
11.48	0.431	7.2	29.948
8.53	0.322	4.0	29.973
6.1	0.232	2.1	29.955

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 10 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
86.19	1.7389	84.1	9.9987	300
80.78	1.5228	65.9	9.9987	300
75.24	1.3484	53.2	9.9987	300
70.87	1.2328	44.6	9.9987	300
65.96	1.1195	37.5	9.9987	300
60.74	1.0197	31.7	9.9987	300
55.45	0.9175	25.6	9.9987	300
50.57	0.8271	21.2	9.9987	300
45.54	0.7372	16.8	9.9987	300
40.18	0.6468	13.3	9.9987	300

35.07	0.5606	10.2	9.9987	300
31.64	0.5023	8.3	9.9987	300
25.70	0.4049	5.7	9.9987	300
21.05	0.3343	4.1	9.9987	299
15.27	0.2500	2.5	9.9987	297
10.41	0.1778	1.5	9.9987	291

ตารางที่ ง.7 ผลการทดสอบยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 10 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
80.59	3.533	476.0	9.9986
79.29	3.443	456.5	9.9988
77.67	3.361	436.7	9.9991
74.95	3.237	405.8	9.9991
72.99	3.140	383.4	9.9987
70.27	3.044	357.7	9.9989
67.22	2.930	329.1	9.9989
65.41	2.842	310.7	9.9983
63.62	2.756	293.0	9.9985
61.00	2.643	269.5	9.9986
58.29	2.521	245.5	9.9984
56.99	2.466	234.8	9.9989
53.58	2.319	207.5	9.9992
51.84	2.242	194.2	9.9991
50.14	2.172	181.9	9.9985
48.37	2.097	169.4	9.9985
45.20	1.963	148.2	9.9988
42.44	1.847	130.9	9.9987
39.59	1.723	114.0	9.9981

37.05	1.616	100.0	9.9998
35.42	1.546	91.5	9.9987
33.11	1.448	80.0	9.9989
30.89	1.353	69.8	9.9993
28.00	1.228	57.4	9.9979
26.02	1.143	49.7	9.9999
22.97	1.011	38.8	9.9966
21.89	0.963	35.2	9.9950
18.57	0.820	25.4	9.9969
17.08	0.756	21.6	10.0023
14.13	0.627	14.8	9.9993
11.90	0.529	10.5	10.0020
10.54	0.470	8.3	9.9973
7.20	0.322	3.9	9.9996

ตารางที่ ง.8 ผลการทดสอบไร้อุณหภูมิของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
31.09	1.8558	85.1	2.00320	60
29.40	1.7193	73.7	2.00300	60
27.76	1.5966	63.9	2.00220	60
26.47	1.5020	56.9	1.99866	60
25.57	1.4389	52.3	1.99680	60
24.45	1.3647	47.2	2.00130	60
23.46	1.3005	42.9	1.99933	60
22.22	1.2227	37.9	2.00040	60
21.20	1.1612	34.2	2.00270	60
20.07	1.0937	30.4	2.00110	60
19.61	1.0678	28.9	1.99769	60

18.88	1.0260	26.7	1.99915	60
18.00	0.9755	24.2	1.99917	60
16.76	0.9045	20.8	1.99919	60
15.44	0.8302	17.5	1.99964	60
14.34	0.7689	15.1	1.99986	60
13.28	0.7095	12.8	2.00010	60
12.11	0.6445	10.6	1.99994	60
10.95	0.5805	8.6	1.99971	60
10.43	0.5526	7.8	1.99797	60
9.63	0.5093	6.7	2.00180	60

ตารางที่ ง.9 ผลการทดสอบยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ ABB ที่ความถี่ 2 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
64.10	3.535	382.2	1.99958
62.66	3.427	362.0	1.99945
61.96	3.318	346.8	2.00010
60.47	3.210	327.4	1.99975
59.92	3.160	319.5	1.99981
59.69	3.158	317.9	1.99978
57.67	3.010	292.8	1.99965
56.04	2.931	276.9	1.99969
53.22	2.786	250.0	1.99973
52.25	2.709	238.6	2.00010
50.12	2.578	217.9	1.99982
48.32	2.474	201.6	1.99970
47.76	2.448	197.1	1.99966
45.93	2.340	181.3	2.00000
45.27	2.306	176.0	1.99975

43.85	2.225	164.5	1.99986
42.29	2.141	152.7	1.99973
41.44	2.095	146.4	1.99961
40.03	2.020	136.4	1.99965
38.03	1.917	123.1	1.99993
37.96	1.912	122.5	1.99986
35.36	1.779	106.2	1.99994
34.36	1.729	100.3	1.99975
33.92	1.708	97.8	1.99977
33.07	1.667	93.1	1.99972
31.75	1.599	85.8	1.99917
31.00	1.562	81.8	1.99888
28.77	1.452	70.6	1.99971
26.65	1.350	60.8	1.99928
26.41	1.334	59.5	1.99941
26.36	1.333	59.4	1.99968
24.74	1.256	52.5	1.99839
22.55	1.146	43.7	2.00170
22.14	1.126	42.1	2.00180
21.86	1.113	41.1	1.99950
20.37	1.038	35.8	1.99846
19.14	0.977	31.6	2.00100
18.40	0.940	29.2	1.99975
17.28	0.883	25.8	1.99950
14.97	0.766	19.4	1.99919
12.16	0.624	12.8	1.99818
10.60	0.545	9.8	1.99898
8.39	0.433	6.2	2.00180
5.98	0.311	3.2	1.99000



ตารางที่ ง.10 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 50 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
410.8	1.8443	180.8	50.063	1500
400.6	1.6938	161.3	49.990	1498
380.2	1.4332	128.4	50.021	1499
360.4	1.2582	106.6	50.025	1499
341.6	1.1342	91.8	49.984	1497
320.9	1.0252	78.9	49.995	1497
300.9	0.9439	69.1	49.921	1496
281.6	0.8681	60.2	50.044	1499
260.2	0.7934	52.3	49.981	1498
242.0	0.7274	45.4	50.076	1500
221.4	0.6555	38.5	50.026	1499
201.1	0.5980	33.1	49.993	1497
181.2	0.5339	27.8	50.044	1499
161.5	0.4715	23.4	49.995	1497
140.4	0.4090	19.1	50.081	1499
121.1	0.3553	15.6	50.045	1497
102.3	0.3033	12.8	50.028	1496
81.2	0.2460	10.0	50.008	1493
60.1	0.1919	7.7	50.058	1489
41.4	0.1542	6.4	49.939	1471

ตารางที่ ง.11 ผลการทดสอบยี่ดโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 50 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
95.02	2.672	320.7	49.971
90.27	2.525	288.3	50.009
85.94	2.403	260.8	49.998
82.77	2.312	241.7	49.962
80.23	2.240	226.8	49.999
77.14	2.151	209.3	50.049
73.59	2.050	190.4	50.040
68.53	1.909	164.9	50.025
65.98	1.837	152.9	50.025
61.40	1.710	132.6	49.925
57.97	1.615	118.2	49.923
54.36	1.514	103.9	49.954
51.36	1.430	92.7	49.998
47.89	1.333	80.6	50.025
43.86	1.221	67.6	50.004
41.16	1.147	59.6	49.967
37.29	1.039	48.9	50.032
33.09	0.919	38.6	50.004
30.02	0.834	31.7	50.068
26.48	0.733	24.7	50.080
23.52	0.653	19.6	50.035
19.24	0.535	13.1	50.027
15.08	0.420	8.1	50.017
11.48	0.320	4.7	50.026
8.18	0.229	2.4	49.992

ตารางที่ ง.12 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 30 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
240.8	1.6276	112.0	29.959	897
230.1	1.4254	90.4	29.959	897
220.2	1.2785	76.6	29.959	897
211.2	1.1765	66.5	29.959	897
200.0	1.0756	57.2	29.959	897
191.6	1.0095	51.2	29.959	897
180.7	0.9301	44.8	29.959	897
171.8	0.8718	40.1	29.959	897
161.2	0.8107	35.4	29.959	897
151.1	0.7556	31.2	29.959	897
141.7	0.7006	27.6	29.959	897
131.4	0.6463	23.9	29.959	897
121.2	0.5913	20.5	29.959	897
111.0	0.5393	17.4	29.959	897
100.8	0.4865	14.8	29.959	897
90.3	0.4341	12.2	29.959	897
80.8	0.3865	10.0	29.959	897
70.1	0.3368	8.1	29.959	896
60.9	0.2936	6.6	29.959	896
50.3	0.2469	5.1	29.959	895
40.6	0.1983	3.9	29.959	893

ตารางที่ ง.13 ผลการทดสอบยี่ดโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 30 Hz

$V_s (V)$	$I_s (A)$	$P_s (W)$	$f_s (Hz)$
77.29	2.640	301.9	29.960
73.41	2.500	271.4	29.957
67.82	2.307	231.3	29.958
63.68	2.168	204.0	29.960
58.91	2.002	174.3	29.961
54.87	1.861	150.9	29.958
50.05	1.700	125.7	29.959
45.25	1.536	102.7	29.968
40.63	1.376	82.8	29.960
36.24	1.228	65.9	29.950
31.14	1.057	48.7	29.959
26.66	0.903	35.7	29.957
21.77	0.736	23.8	29.949
17.52	0.593	15.5	29.954
13.26	0.445	8.8	29.966
8.48	0.285	3.6	29.955
4.14	0.140	0.9	30.028

ตารางที่ ง.14 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 10 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
85.28	1.6160	79.0	9.9987	299
80.92	1.4127	61.4	9.9987	299
75.32	1.2156	46.1	9.9987	299
70.92	1.1014	38.1	9.9987	299
65.67	0.9785	31.1	9.9987	299
60.95	0.8962	25.7	9.9987	299
55.81	0.8007	20.8	9.9987	299
51.58	0.7343	17.6	9.9987	299
45.16	0.6321	13.3	9.9987	299
40.32	0.5590	10.5	9.9987	299
36.89	0.5066	8.7	9.9987	299
31.08	0.4262	6.3	9.9987	299
26.31	0.3553	4.7	9.9987	299
21.75	0.2914	3.1	9.9987	299
16.91	0.2249	2.0	9.9987	298
11.84	0.1553	1.1	9.9987	296

ตารางที่ ง.15 ผลการทดสอบยึดโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 10 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
65.90	2.671	294.8	9.9987
60.89	2.464	251.3	9.9986
56.82	2.296	218.4	9.9986
51.89	2.095	182.0	9.9988
43.04	1.737	125.2	9.9984
37.72	1.523	96.2	9.9985

33.35	1.347	75.3	9.9984
28.66	1.157	55.6	9.9987
23.99	0.968	38.9	9.9994
19.54	0.784	25.7	9.9982
14.76	0.591	14.7	10.0000
10.54	0.417	7.4	9.9985
5.76	0.224	2.2	10.0018

ตารางที่ ง.16 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
35.44	2.0303	109.87	2.00660	60
33.16	1.8575	92.82	1.99821	60
30.94	1.6904	77.67	1.99901	60
28.64	1.5313	63.95	1.99893	60
26.23	1.3704	51.35	1.99926	60
24.50	1.2602	43.44	1.99909	60
21.81	1.0963	32.91	1.99989	60
19.57	0.9711	25.81	1.99997	60
17.59	0.8652	20.47	1.99943	60
15.05	0.7325	14.70	1.99975	60
13.00	0.6287	10.84	1.99977	60
10.92	0.5241	7.56	2.00050	60
8.41	0.4009	4.46	1.99952	60
5.86	0.2784	2.18	2.00010	59

ตารางที่ ง.17 ผลการทดสอบยัดโรเตอร์ของมอเตอร์ SIEMENS ที่ความถี่ 2 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
54.31	2.766	252.6	2.00070
51.72	2.602	226.2	1.99991
49.42	2.440	202.9	1.99970
46.68	2.275	178.8	2.00010
44.64	2.150	161.6	1.99911
42.44	2.028	144.9	1.99992
39.98	1.896	127.7	1.99922
35.72	1.684	101.4	1.99948
33.29	1.565	87.9	1.99984
31.40	1.473	78.1	2.00010
28.69	1.343	65.1	1.99985
26.25	1.226	54.4	1.99956
24.07	1.123	45.7	1.99975
21.87	1.015	37.5	1.99960
19.42	0.900	29.6	2.00020
17.18	0.796	23.1	1.99979
15.05	0.690	17.6	1.99906
12.46	0.570	12.0	2.00010
10.40	0.472	8.3	1.99800
7.57	0.343	4.4	1.99989
6.76	0.307	3.5	1.99885

ตารางที่ ง.18 ผลการทดสอบไว้โหลคของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 50 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
400.5	2.1509	228.4	50.113	1503
381.3	1.8992	192.6	50.158	1503
360.8	1.6964	164.4	50.172	1505
341.5	1.5394	143.3	50.159	1505
321.9	1.4161	125.8	50.116	1503
302.7	1.3049	111.0	50.046	1502
281.7	1.1841	96.0	49.996	1500
260.0	1.0678	82.5	49.934	1498
240.3	0.9738	71.7	49.943	1499
221.9	0.8914	62.4	49.943	1499
203.8	0.8135	54.1	50.019	1501
180.8	0.7175	44.5	50.050	1502
161.7	0.6413	37.1	50.049	1501
140.6	0.5573	29.7	50.109	1503
121.3	0.4830	23.6	50.118	1503
102.5	0.4114	18.2	50.077	1502
81.0	0.3294	12.8	50.065	1502
61.0	0.2540	8.5	50.058	1502
40.8	0.1784	5.0	50.056	1502

ตารางที่ ง.19 ผลการทดสอบขี้ดโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 50 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
85.34	4.066	423.9	50.035
80.65	3.801	371.3	49.983
77.80	3.641	341.0	49.957



73.60	3.404	298.5	49.935
70.64	3.226	269.3	50.054
67.51	3.053	241.0	50.051
63.04	2.809	203.7	50.011
59.88	2.637	179.5	49.950
56.09	2.428	151.8	49.990
52.38	2.223	127.2	49.982
48.76	2.022	105.2	50.004
45.18	1.826	85.7	49.977
41.82	1.638	68.9	50.036
38.60	1.460	54.9	50.001
34.67	1.241	39.8	50.012
30.70	1.021	27.2	49.998
27.49	0.844	18.9	49.976
23.73	0.640	11.4	50.027
20.34	0.466	6.5	50.030
14.16	0.206	1.9	50.004

ตารางที่ ง.20 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 30 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
231.58	1.8765	133.1	29.959	899
220.49	1.6945	114.9	29.959	900
200.40	1.4329	89.5	29.959	901
180.07	1.2346	71.1	29.959	902
161.25	1.0776	57.2	29.959	903
140.05	0.9199	44.2	29.959	904
120.11	0.7812	34.0	29.959	905
100.33	0.6475	25.1	29.959	906

81.42	0.5261	17.9	29.959	907
60.78	0.3960	11.3	29.959	908
41.64	0.2769	6.4	29.959	909
21.50	0.1564	2.7	29.959	910

ตารางที่ ง.21 ผลการทดสอบขีดโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 30 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
65.72	3.664	334.6	29.959
61.17	3.380	285.1	29.959
55.84	3.048	231.1	29.959
52.36	2.833	199.5	29.958
47.35	2.524	158.1	29.981
42.25	2.204	120.8	29.959
37.58	1.920	90.9	29.936
33.42	1.658	67.8	29.959
28.35	1.341	44.1	29.959
24.27	1.082	28.7	29.959
19.24	0.761	14.4	29.959
15.18	0.503	6.5	29.981

ตารางที่ ง.22 ผลการทดสอบไว้โหลดของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 10 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
81.14	1.8363	76.5	9.9987	300
75.71	1.6190	58.6	9.9987	300
70.29	1.4382	47.6	9.9987	300
61.49	1.2027	34.9	9.9987	300

56.41	1.0826	30.0	9.9987	300
52.28	0.9830	23.6	9.9987	300
47.64	0.9011	19.7	9.9987	300
42.54	0.7848	16.4	9.9987	300
37.81	0.6941	13.3	9.9987	300
33.11	0.6031	10.3	9.9987	300
29.02	0.5258	7.7	9.9987	300
23.49	0.4250	5.3	9.9987	300
19.50	0.3539	4.0	9.9987	300
14.65	0.2599	2.4	9.9987	300
10.11	0.1753	1.2	9.9987	300

ตารางที่ ง.23 ผลการทดสอบขีดโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 10 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_s (Hz)$
56.70	3.792	345.5	9.9987
51.29	3.438	277.3	9.9987
46.60	3.108	226.9	9.9970
42.11	2.803	184.8	10.0005
37.11	2.440	142.8	9.9970
32.88	2.149	110.2	9.9970
28.92	1.886	83.3	10.0005
23.27	1.496	52.0	9.9952
18.76	1.180	32.1	9.9987
14.37	0.874	17.4	10.0023
9.43	0.522	6.0	10.0005

ตารางที่ ง.24 ผลการทดสอบไร้อุณหภูมิของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	$P_0 (W)$	$f_0 (Hz)$	$\omega_m (rpm)$
29.93	2.280	81.9	1.99950	60
27.87	2.039	66.5	1.99975	60
26.17	1.854	55.6	1.99975	60
24.30	1.645	45.4	1.99975	60
22.21	1.472	35.7	1.99975	60
20.61	1.319	29.0	2.00000	60
18.24	1.135	22.1	1.99476	60
16.63	1.010	17.7	1.99975	60
14.52	0.868	12.8	2.00000	60
12.44	0.729	8.8	2.00000	60
10.45	0.586	5.9	2.00020	60
8.86	0.474	4.0	2.00000	60
6.64	0.333	1.9	1.99925	60

ตารางที่ ง.25 ผลการทดสอบขีดโรเตอร์ของมอเตอร์ MITSUBISHI ที่ความถี่ 2 Hz

$V_S (V)$	$I_S (A)$	$P_S (W)$	$f_S (Hz)$
51.37	3.880	308.6	2.00100
47.41	3.528	258.3	2.00000
43.46	3.190	213.2	1.99975
39.68	2.857	175.3	1.99925
36.08	2.599	142.5	1.99925
31.96	2.279	109.9	1.99847
28.28	2.002	84.5	1.99925
24.51	1.719	62.0	1.99900
20.57	1.418	41.8	1.99626

16.53	1.126	26.1	2.00330
12.61	0.827	14.0	1.99900
9.19	0.575	6.6	1.99950



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชมพู สุขภาพ เกิดเมื่อวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคต้นของปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย