

วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเสมือนต่อแบบวี ที่มีความเพี้ยนของกระแสด้านเข้าต่ำ

นายเพิ่มศักดิ์ ฤงศิริ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-960-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A THREE PHASE V- CONNECTION – LIKE INVERTER WITH LOW INPUT
CURRENT DISTORTION**



Mr. Phoemsak Suksiri

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

**Graduate School
Chulalongkorn University**

Academic Year 1999


ISBN 974-332-960-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเสมือนต่อแบบวี ที่มี ความเพี้ยนของกระแส
ด้านเข้าต่ำ
โดย : นายเพิ่มศักดิ์ สุขศิริ
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมบุญม์ แสงวงศ์วานิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

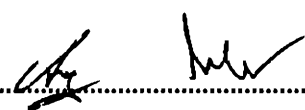

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กิระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุหนะนา กุลกวิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบุญม์ แสงวงศ์วานิชย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา)


..... กรรมการ
(อาจารย์เจ็ดกุด ไสภวานิชย์)

เพิ่มศักดิ์ สุขศิริ : วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเสมือนต่อแบบวี ที่มีความเพี้ยนของกระแสด้านเข้าต่ำ
(A THREE PHASE V-CONNECTION-LIKE INVERTER WITH LOW INPUT CURRENT DISTORTION)
อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.โคทม อาริยา, 149 หน้า.
ISBN 974-332-960-9

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเสมือนต่อแบบวี ที่มีความเพี้ยนของกระแสด้านเข้าต่ำ โดยที่วงจรมีโครงสร้างใหม่ที่เกิดจากการบูรณาการวงจรเรียงกระแสแบบวีตวิคซ์ เข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ซึ่งมีข้อเด่นในการใช้เทคนิคการสวิตซ์ช่วยลดปัญหากระแสฮาร์มอนิกทางด้านเข้าโดยมีวิธีการควบคุมที่ไม่ยุ่งยาก และการใช้สวิตซ์กำลังร่วมกันระหว่างวงจรเรียงกระแสกับวงจรอินเวอร์เตอร์ทำให้เราสามารถใช้งานสวิตซ์กำลังในวงจรเพียง 6 ตัวเท่ากับอินเวอร์เตอร์แบบปรกติ สวิตซ์กำลังที่ใช้จึงมีลักษณะเป็นแบบแพ็กเกจได้ ทำให้วงจรรวมมีความน่าเชื่อถือขึ้นและขนาดเล็กลง นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ยังได้นำเสนอการปรับปรุงรูปแบบการมอดูเลตสัญญาณขับนำสวิตซ์ที่เหมาะสมกับวงจรอินเวอร์เตอร์และนำไปใช้ได้ง่าย รวมถึงการวิเคราะห์และหาวิธีแก้ไขผลของค่าเวลาประวิงที่เกิดขึ้นกับวงจรโดยรวม ผลการทดสอบวงจรโดยรวมแสดงให้เห็นคุณสมบัติที่ดีของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่พัฒนาขึ้น โดยที่วงจรสามารถปรับปรุงรูปคลื่นกระแสด้านเข้าให้มีรูปร่างใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ได้ ในขณะที่เดียวกันวงจรอินเวอร์เตอร์ก็สามารถทำงานได้ดีที่ค่าความเร็วและโหลดต่างๆ เหมือนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

PHOEMSAK SUKSIRI : A THREE-PHASE V-CONNECTION-LIKE INVERTER WITH LOW INPUT CURRENT DISTORTION. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, THESIS COADVISOR : ASSO. PROF. GOTHOM ARYA, 149 pp. ISBN 974-332-960-9

In this thesis, a three-phase V-connection-like inverter with low input current distortion is newly proposed. The new structure of the inverter results from the integration of a switched-mode rectifier with a V-connection inverter circuit. The main feature of the proposed inverter is that it uses a simple switching technique to reduce the harmonics in the supply current while the overall circuit uses only 6 switching devices as do the typical inverters, owing to the sharing of switching devices in the U phase between the switched-mode rectifier and the inverter. The new structure enables the proposed inverter to be implemented with an intelligent power module which makes the inverter more reliable and compact. Moreover, this thesis also proposes a new and simple PWM modulation technique to generate gate drive signals suitable for the inverter circuit. The problem of the dead-time effect is investigated, and a compensation scheme is then given. The experimental results confirm the good characteristics of the proposed inverter. The supply current becomes sinusoidal and the inverter circuit operates well under various speed and load conditions.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิติ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) โดยมีอาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ. ดร.โคทม อาริยา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ได้ให้ความช่วยเหลือและดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี คุณมานะ เมฆถาวรวัฒนา และคุณชัชชัย สมิงแก้ว ที่มีส่วนช่วยเหลือในด้านการจัดการทำงาน บริษัท A.P.Y. ที่ให้ความช่วยเหลือด้านฮาร์ดแวร์ในการวิจัย รุ่นพี่และรุ่นน้องตลอดจนบุคลากรในห้องวิจัยปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่าน ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่ให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญเรื่อง.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
2 วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์แบบสวิตช์คู่	7
3 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี	54
4 ระบบรวมของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี	87
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	139
รายการอ้างอิง	141
ภาคผนวก	143
ประวัติผู้เขียน	149

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกสำหรับอุปกรณ์ใน Class A	6
2.1 ขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกอันดับต่ำ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน	26
2.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	29
2.3 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในวงจร	41
2.4 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดของกระแสฮาร์โมนิกในอันดับที่สำคัญ	53
3.1 รูปแบบการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเหมือนค่อแบบวี	62
3.2 รูปแบบการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเหมือนค่อแบบวี	63
3.3 รูปแบบการสวิตช์ในแต่ละเซกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเหมือนค่อแบบวี	63
4.1 ขนาดกระแสฮาร์โมนิกอันดับต่างๆของกระแสทางด้านเข้าเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน	119



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอินพุตเป็นแรงดันไฟสลับ 1 เฟส.....	1
1.2 วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์แบบต่างๆ.....	2
1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบต่างๆ	3
1.4 โครงสร้างของวงจรรวม	4
2.1 วงจรเรียงกระแสแบบวิธีสวิตช์แบบสวิตช์คู่.....	7
2.2 สถานะการทำงานของวงจรในครึ่งคาบบวกของแหล่งจ่าย.....	9
2.3 สถานะการทำงานของวงจรในครึ่งคาบลบของแหล่งจ่าย.....	11
2.4 วงจรแสดงทิศทางการไหลของกระแสที่จุดต่างๆ.....	12
2.5 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ 1(เส้นทึบ) และที่ 2 (เส้นประ).....	13
2.6 วงจรที่แทนส่วนที่เป็นสวิตช์ด้วยตัวต้านทานสมมูล เมื่อ $v_s(t) > 0$	20
2.7 วงจรที่แทนส่วนที่เป็นสวิตช์ด้วยตัวต้านทานสมมูล เมื่อ $v_s(t) < 0$	21
2.8 สเปกตรัมของกระแสขาเข้าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อ $\Delta = 0.1$	26
2.9 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE	31
2.10 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 1 เฟส	32
2.11 สเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายไฟสลับ 1 เฟส (i_1)	32
2.12 รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L1 (i_{L1})$	33
2.13 รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L2 (i_{L2})$	33
2.14 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 1 เฟส	34
2.15 สเปกตรัมของกระแสจากแหล่งจ่ายไฟสลับ 1 เฟส (i_1)	34
2.16 รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L1 (i_{L1})$	35
2.17 รูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L2 (i_{L2})$	35
2.18 บล็อกโคอะแกรมที่ใช้ในการประมาณค่ากระแสทางด้านเข้า.....	37
2.19 รูปคลื่นของกระแสด้านเข้าที่สภาวะโหลดพิกัด	38
2.20 รูปคลื่นแรงดันไฟสลับที่คกพร้อมตัวเก็บประจุ $C1$ ที่สภาวะโหลดพิกัด	39
2.21 รูปคลื่นแรงดันไฟสลับที่คกพร้อมตัวเก็บประจุ $C2$ ที่สภาวะโหลดพิกัด	39
2.22 รูปคลื่นของกระแสด้านเข้าที่สภาวะไร้อหลด	40
2.23 รูปคลื่นแรงดันไฟสลับที่คกพร้อมตัวเก็บประจุ $C1$ ที่สภาวะไร้อหลด	40

สารบัญญากาศ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 รูปคลื่นแรงดันไฟสถับที่คกคร่อมตัวเก็บประจุ C2 ที่สภาวะไร้โหลด	41
2.25 บล็อกไดอะแกรมในการควบคุมแรงดันไฟตรง	42
2.26 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานเมื่อมีการควบคุมแรงดันไฟตรงขาออก	43
2.27 รูปคลื่นของแรงดันบัสไฟตรงและความถี่การสวิตช์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดเพิ่มขึ้น ...	44
2.28 รูปคลื่นของแรงดันบัสไฟตรง และความถี่การสวิตช์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดลดลง ...	45
2.29 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน ของวงจรเรียงกระแส ที่สภาวะโหลดเบา (180W)	47
2.30 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	48
2.31 สเปกตรัมของกระแสทางด้านเข้าที่สภาวะโหลดเบา (180W)	48
2.32 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน ของวงจรเรียงกระแสที่สภาวะโหลดปานกลาง (260W)	49
2.33 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่สภาวะโหลดปานกลาง	50
2.34 สเปกตรัมของกระแสทางด้านเข้าที่สภาวะโหลดปานกลาง (260W)	50
2.35 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสที่สภาวะโหลดหนัก (330W)	51
2.36 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่สภาวะโหลดหนัก	52
2.37 สเปกตรัมของกระแสทางด้านเข้าที่สภาวะโหลดหนัก (330W)	52
3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบทั่วไป	54
3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการต่อแบบวี	55
3.3 รูปวงจรของแหล่งจ่ายแบบ Open Delta Connection	55
3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ลักษณะเสมือนต่อแบบวี	57
3.5 การมอดูเลตโดยวิธีสเปซเวกเตอร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่เสมือนต่อแบบวี เฉพาะ ในเซกเตอร์ที่ 1	59
3.6 ขอบเขตของ สเปซเวกเตอร์แรงดันที่สามารถสร้างได้ของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อ แบบวี เปรียบเทียบกับแบบทั่วไป	60
3.7 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟสกรณีที่ดี การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป	65
3.8 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี	66
3.9 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป	67

สารบัญญากาศ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี	68
3.11 การใช้ค่า T_n, T_v, T_w ในการเปรียบเทียบกับค่านับเวลา	71
3.12 เฟสเซอร์ของคำสั่งแรงดันที่ใช้การมอดูเลตแบบที่ได้พัฒนาขึ้น	72
3.13 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 2 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี กรณีที่ใช้วิธีคำนวณแรงดันเฟสโดยตรง	73
3.14 รูปคลื่นแรงดันวัดเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกทั้งสามเฟส กรณีที่ ความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20 kHz ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเสมือนต่อแบบวี กรณีที่ใช้วิธีคำนวณแรงดันเฟสโดยตรง	74
3.15 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออก ของวงจร อินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ที่ความถี่คำสั่ง 50 Hz โหลดขนาด 180 W	76
3.16 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจร อินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ที่ความถี่คำสั่ง 50 Hz โหลดขนาด 180 W	77
3.17 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจร อินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ที่ความถี่คำสั่ง 25 Hz โหลดขนาด 180 W	78
3.18 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออก ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ในรูปที่ 3.17	79
3.19 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจร อินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ที่ความถี่คำสั่ง 25 Hz โหลดขนาด 180 W	80
3.20 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของ วงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ในรูปที่ 3.19	81
3.21 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจร อินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ที่ความถี่คำสั่ง 12.5 Hz โหลดขนาด 180 W	82
3.22 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป ในรูปที่ 3.21	83
3.23 รูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจร อินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ที่ความถี่คำสั่ง 12.5 Hz โหลดขนาด 180 W	84

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 ภาพขยายของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสเทียบจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงและกระแสด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์เสมือนต่อแบบวี ในรูปที่ 3.23	85
4.1 โครงสร้างโดยรวมของฮาร์ดแวร์ของระบบ	87
4.2 ส่วนตรวจับสัญญาณกระแส	89
4.3 ส่วนตรวจับแรงดันบัสไฟตรง	90
4.4 โค้ดแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูลของโปรแกรมหลัก	92
4.5 โค้ดแกรมเวลาของซอฟต์แวร์โมดูลในส่วนสร้างสัญญาณการสวิตช์	94
4.6 รูปคลื่นกระแสทางด้านออก ของระบบรวมทั้งสถานะ โหลดหนัก	95
4.7 รูปคลื่นกระแสทางด้านออก ของระบบรวมทั้งสถานะ โหลดปานกลาง	96
4.8 รูปคลื่นกระแสทางด้านออก ของระบบรวมทั้งสถานะ โหลดเบา	96
4.9 วงจรเฉพาะส่วนสวิตช์เฟส U	97
4.10 รูปคลื่นกระแส i_u และ i_v	97
4.11 รูปคลื่นผลรวมของกระแส i_u และ i_v ที่ไหลผ่านสวิตช์ในกิ่งเฟส U และภาพขยายของทั้ง 3 กรณี	98
4.12 ทิศทางการไหลของกระแสผ่านสวิตช์กับแรงดันที่ขาดหายไป v_u^* - v_u เนื่องจากผลของเวลาประวิง (v_u^* : ค่าคำสั่งแรงดันเฟส U)	99
4.13 รูปคลื่นกระแสทางด้านออกของเฟส U (i_u) กับค่าเวลาที่ใช้ในการชดเชยค่าเวลาประวิงในเฟส U (T_{su})	100
4.14 รูปคลื่นกระแสทางด้านออกของเฟส V (i_v) กับค่าเวลาที่ใช้ในการชดเชยค่าเวลาประวิงในเฟส V (T_{sv})	101
4.15 รูปคลื่นกระแสทางด้านออกของเฟส W (i_w) กับค่าเวลาที่ใช้ในการชดเชยค่าเวลาประวิงในเฟส W (T_{sw})	102
4.16 รูปคลื่นของแรงดันจากแหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลอง	106
4.17 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวมทั้งคำสั่งความถี่ 50 Hz และสถานะ โหลดเบา	107
4.18 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวมทั้งคำสั่งความถี่ 50 Hz และสถานะ โหลดปานกลาง	108
4.19 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวมทั้งคำสั่งความถี่ 50 Hz	

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
และสภาวะโหลดหนัก	109
4.20 สเปกตรัมของกระแสทางด้านเข้าที่สภาวะต่างๆ เมื่อวงจรมอเตอร์ทำงานที่คำสั่ง ความถี่ 50 Hz	110
4.21 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่คำสั่งความถี่ 25 Hz และสภาวะโหลดเบา	111
4.22 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่คำสั่งความถี่ 25 Hz และสภาวะโหลดปานกลาง	112
4.23 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่คำสั่งความถี่ 25 Hz และสภาวะโหลดหนัก	113
4.24 สเปกตรัมของกระแสทางด้านเข้าที่สภาวะต่างๆ เมื่อวงจรมอเตอร์ทำงานที่คำสั่ง ความถี่ 25 Hz	114
4.25 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่คำสั่งความถี่ 12.5 Hz และสภาวะโหลดเบา	115
4.26 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่คำสั่งความถี่ 12.5 Hz และสภาวะโหลดปานกลาง	116
4.27 รูปคลื่นของกระแสด้านออกและกระแสด้านเข้าของระบบรวม ที่คำสั่งความถี่ 25 Hz และสภาวะโหลดหนัก	117
4.28 สเปกตรัมของกระแสทางด้านเข้าที่สภาวะต่างๆ เมื่อวงจรมอเตอร์ทำงานที่คำสั่ง ความถี่ 12.5 Hz	118
4.29 ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อทำการเร่งลดความเร็วระหว่าง 750 rpm และ 1500 rpm ...	119
4.30 ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm จนถึง 1500 rpm	120
4.31 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 1 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm	121
4.32 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 2 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm	121

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำใน ช่วงเวลาที่ 3 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm	122
4.34 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำใน ช่วงเวลาที่ 4 เมื่อทำการเร่งความเร็วจาก 750 rpm ถึง 1500 rpm	122
4.35 ผลการทดลองแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm	123
4.36 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 1 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm	124
4.37 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 2 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm	124
4.38 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 3 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm	125
4.39 รูปคลื่นความเร็วมอเตอร์ กระแสด้านเข้าและกระแสเฟส U ของมอเตอร์เหนี่ยวนำในช่วง เวลาที่ 4 เมื่อลดความเร็วจาก 1500 rpm จนถึง 750 rpm	125
4.40 ระบบรวมที่ใช้ทดลอง	129
4.41 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อเพิ่มโหลดขนาด 25% ของโหลดพิกัด	130
4.42 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราวเมื่อเพิ่มโหลดขนาด 50 % ของโหลดพิกัด	131
4.43 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราวเมื่อเพิ่มโหลดขนาด 75% ของโหลดพิกัด	132
4.44 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราวเมื่อเพิ่มโหลดขนาด100% ของโหลดพิกัด	133
4.45 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อลดโหลดขนาด 25% ของโหลดพิกัด	134
4.46 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อลดโหลดขนาด 50% ของโหลดพิกัด	135
4.47 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราวเมื่อลดโหลดขนาด 75 % ของโหลดพิกัด	136
4.48 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ที่สภาวะชั่วคราว เมื่อลดโหลดขนาด 100% ของโหลดพิกัด	137