อินเวอร์เตอร์แบบป้อนกลับกระแสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.5 กิโลวัตต์

นาย ชูชีพ เชาว์ศิริกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2535

ISBN 974-581-491-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018508 i17198901

A Current Feedback Inverter for 1.5 kW Induction Motor Drive

Mr. Chucheep Chaosirikul

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1992

ISBN 974-581-491-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อินเวอร์เตอร์แบบป้อนกลับกระแสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.5 กิโลวัตต์

โดย นาย ชูชีพ เชาว์ศิริกุล

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สัณห์ ศิวารัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ชูชีพ เชาว์ศิริกุล : อินเวอร์เตอร์แบบป้อนกลับกระแสสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.5 กิโลวัตต์ (A Current Feedback Inverter for 1.5 kW Induction Motor Drive) อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา , 112 หน้า . ISBN 974-581-491-1

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบ สร้างและทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบป้อนกลับกระแส เพื่อให้กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ มีรูปร่างใกล้รูปไซน์และสามารถคุมค่ากระแสด้านออกได้ เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด 3 เฟสก็สามารถควบคุมให้ขนาดของกระแสเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมของโหลดทางกล ซึ่งมีผลทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศของมอเตอร์มีค่าเกือบคงที่โดยไม่ขึ้นกับแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ และไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานด้านตัวอยู่นิ่ง ได้มีการทดลองใช้อินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่มีสองคู่ขั้วและสามารถปรับความเร็วได้อย่างต่อเนื่องจาก 150 ถึง 1500 รอบต่อนาที และสามารถคุมค่าความเร็วได้ดีกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นการใช้วงจรเรียงกระแสแบบสวิตชิงทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ยังทำให้เกิดการคงค่าแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ อีกทั้งสามารถคุมค่าให้กระแสทางด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสมีรูปร่างใกล้เคียงไซน์ วงจรเรียงกระแสนี้มีตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งและสามารถคืนพลังงานส่วนเกินอันเนื่องมาจากการเบรกมอเตอร์กลับสู่แหล่งจ่ายไฟสลับได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ชูชีพ เชาว์ศิริกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2534 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C115672 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD : INVERTER/PULSE-WIDTH MODULATION/CURRENT BANG-BANG
CHUCHEEP CHAOSIRIKUL : A CURRENT FEEDBACK INVERTER FOR 1.5 kW INDUCTION MOTOR DRIVE. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF GOTHOM ARYA, Dr.-Ing. 112 pp. ISBN 974-581-491-1

This thesis present the design, construction and testing of a current feedback inverter. The feedback of output current produces an almost sinusoidal current waveform and allows inverter output current to be regulated. When the inverter is used for motor drive, its output current is regulated so as to follow a specific function of mechanical load, resulting in a constant value of airgap flux which becomes independent of DC supply voltage and the stator resistance. The inverter can drive a 3-phase, 1.5-kW induction motor whose speed can be continuously adjusted from 150 to 1500 rpm. Moreover, the DC supply voltage can be regulated by using a switchmode rectifier whose input current waveform is almost a sine wave. The power factor of the rectifier is close to unity. The rectifier can feed excess power, resulting from motor braking, back to the ac source.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ชูชีพ เชาวลิขิกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2534 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.โคทม อารียา ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา อีกทั้ง ศ.ดร.มงคล เดชนครินทร์, รศ.สัณห์ ศิวารัตน์, ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต และ อ.เจิดกุล โสภาวนิตย์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น ตลอดทั้งคุณ เกษียร สุชีโมกข์ และ คุณ วิจิตร เหลืองเจริญโต และเพื่อนนิสิตทุกท่านที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาเป็นอย่างสูง ซึ่งได้สนับสนุนด้านการเงินและกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

ชูชีพ เชาว์ศิริกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ช

สารบัญภาพ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ..... 1
2. วงจรเรียงกระแส..... 14
3. วงจรอินเวอร์เตอร์..... 37
4. การทดสอบ..... 64
5. สรุปและข้อเสนอแนะ..... 107

รายการอ้างอิง..... 110

ประวัติผู้เขียน..... 112

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

1.1 ข้อกำหนดในการออกแบบอินเวอร์เตอร์..... 12

1.2 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์..... 13

4.1 ผลการวัดการคงค่าแรงดันโดยการเปลี่ยนแรงดันด้านเข้า..... 65

4.2 ผลการทดสอบหาการคงค่าแรงดันโดยการเปลี่ยนโหลด..... 66

4.3 ผลการวัดหาค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสรวมและค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่ความถี่หลักมูล..... 66

4.4 ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่ความถี่หลักมูลรวมทั้งค่าฮาร์มอนิกส์ที่อันดับความถี่ต่างๆ..... 68

4.5 ผลการทดสอบหาการคงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์..... 70

4.6 ผลการวัดหาค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสรวม และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่ความถี่หลักมูล และผลการคำนวณหาค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 71

4.7 ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่ความถี่หลักมูล รวมทั้งค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของฮาร์มอนิกที่อันดับความถี่ต่างๆ ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 72

4.8 ผลการวัดหาค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสมอเตอร์ และค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันที่ความถี่หลักมูล และผลการคำนวณหาค่าผลรวมความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 78

4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ด้านออกกับค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์..... 82

4.10 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังของระบบที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 1420 รอบต่อนาที..... 98

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์กับความเร็วรอบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ โดยแสดงในปริมาณสัมพัทธ์..... 3

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (V_a), แรงบิด (T_a), กระแสตัวอยู่นิ่ง (I_a), และสลิป (S) กับความเร็วรอบของมอเตอร์..... 4

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด (T_a) กับความเร็ว (ω_r) เมื่อมีการปรับอัตราส่วนของแรงดัน กับความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ให้มีค่าคงที่..... 4

1.4 ลักษณะโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งแรงดัน..... 7

1.5 ลักษณะโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งกระแส..... 7

1.6 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน ที่มีวงจรทางด้านเข้าเป็นวงจรเรียงกระแสแบบสวิตชิง..... 10

1.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรอินเวอร์เตอร์..... 11

2.1 ลักษณะโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสแบบสวิตชิง..... 14

2.2 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งบริดจ์ และรูปคลื่นของกระแสด้านเข้า..... 16

2.3 รูปคลื่นของผลรวมของกระแสทางด้านเข้า..... 18

2.4 วงจรภาคควบคุมของวงจรเรียงกระแสแบบสวิตชิง..... 19

2.5 วงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง..... 20

2.6 ก) แสดงวงจรคุมค่าแบบ PI..... 21

2.6 ข) แสดงลักษณะฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่า..... 21

2.7 วงจรคูณสัญญาณ..... 22

2.8 วงจรเปรียบเทียบแบบมีแถบฮิสเตอริซิส..... 22

2.9 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟตรง..... 23

2.10 สัญญาณที่ใช้ควบคุมทรานซิสเตอร์ตัวบนและตัวล่างของภาพที่ 2.1..... 24

2.11 วงจรหน่วงเวลาการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิตช์..... 26

2.12 วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์..... 27

2.13 ระดับกระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแส..... 29

2.14 รายละเอียดของวงจรป้องกัน..... 30

2.15 วงจรเรียงกระแสแบบสวิตชิงสามเฟสที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นโหลด..... 32

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่

2.16 แผนภาพบล็อกเพื่อคุมค่าแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสแบบสวิตชิง.. 32
2.17 ค่าฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่าที่เลือกใช้..... 33
2.18 ผลตอบสนองของแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง V_r แบบขั้นไป 2% ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองด้วยสวิตช์อุดมคติและแบบจำลองเฉลี่ยต่อ T_L โดยมีค่าต่างๆดังนี้ V_i = 220 V_{rms} ; L_i = 22 mH ; C = 440 uF ; R_L = 20.8 Ω ; ω_z = 100π rad/sec..... 34
2.19 ก) ผลตอบสนองของแรงดันออกเมื่อเปลี่ยนกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่เป็นโหลด I_m แบบขั้นไป 10 % โดยมีค่า L_i = 22 mH..... 35
2.19 ข) ผลตอบสนองของแรงดันออกเมื่อเปลี่ยนกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่เป็นโหลด I_m แบบขั้นไป 10 % โดยมีค่า L_i = 44 mH..... 35
2.20 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกเมื่อเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงแบบขั้นโดยมีพารามิเตอร์เหมือนภาพที่ 2.18..... 36
3.1 ลักษณะโครงสร้างและการควบคุมของวงจรอินเวอร์เตอร์..... 37
3.2 แผนภาพบล็อกของวงจรภาคควบคุม..... 40
3.3 แสดงรูปคลื่นขนาดของกระแสในฟังก์ชันของสลิป..... 41
3.4 รายละเอียดและขนาดของสัญญาณในแต่ละส่วนของวงจรภาคควบคุม..... 42
3.5 วงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง..... 43
3.6 วงจรคุมค่าที่เป็นแบบ PI..... 44
3.7 วงจรตรวจวัดความเร็วรอบ..... 45
3.8 โครงสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์..... 45
3.9 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่..... 46
3.10 รายละเอียดของวงจรนับแบบไบนารีที่สามารถควบคุมให้นับขึ้นหรือนับลงได้..... 48
3.11 วงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะลอก..... 49
3.12 วงจรฟังก์ชันไม่เชิงเส้น..... 50
3.13 วงจรเปรียบเทียบแบบมีแถบฮิสเตอริซิส..... 52
3.14 สัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ตัวบนและตัวล่างของวงจรในภาพที่ 3.1 53

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่

3.15 วงจรหน่วงเวลาการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิตช์..... 55
3.16 วงจรขับนำเบสของทรานซิสเตอร์..... 55
3.17 ก) รายละเอียดของวงจรควบคุมการกลับทางหมุนของมอเตอร์..... 57
3.17 ข) ลักษณะรูปคลื่นที่จุดต่างๆของวงจรในภาพที่ 3.17 ก..... 58
3.18 ระดับกระแสและแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์..... 59
3.19 รายละเอียดของวงจรป้องกัน..... 60
3.20 ฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดที่ค่าสลิปต่างๆ..... 62
4.1 วงจรที่ใช้สำหรับการทดสอบ..... 64
4.2 รูปคลื่นของกระแสด้านเข้าวงจรเรียงกระแส
และขนาดของกระแสที่อันดับความถี่ต่างๆที่ภาวะโหลดเต็ม
ก) รูปคลื่นของกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส..... 67
ข) ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสเข้า
วงจรเรียงกระแสที่อันดับความถี่ต่างๆ..... 67
4.3 รูปคลื่นของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์และขนาดของกระแสออก
อินเวอร์เตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 282 รอบต่อนาที
ก) รูปคลื่นของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์..... 73
ข) ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ที่
อันดับความถี่ต่างๆ..... 73
4.4 รูปคลื่นของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์และขนาดของกระแสออก
อินเวอร์เตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 568 รอบต่อนาที
ก) รูปคลื่นของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์..... 74
ข) ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ที่
อันดับความถี่ต่างๆ..... 74
4.5 รูปคลื่นของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์และขนาดของกระแสออก
อินเวอร์เตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ
ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1420 รอบต่อนาที
ก) รูปคลื่นของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์..... 75
ข) ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสออกของอินเวอร์เตอร์ที่
อันดับความถี่ต่างๆ..... 75

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่

4.6 รูปคลื่นของแรงดันเฟสของมอเตอร์ และขนาดแรงดันเฟสของมอเตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 282 รอบต่อนาที

ก) รูปคลื่นของแรงดันเฟสมอเตอร์..... 79

ข) ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสมอเตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ..... 79

4.7 รูปคลื่นของแรงดันเฟสของมอเตอร์ และขนาดแรงดันเฟสของมอเตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 568 รอบต่อนาที

ก) รูปคลื่นของแรงดันเฟสมอเตอร์..... 80

ข) ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสมอเตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ..... 80

4.8 รูปคลื่นของแรงดันเฟสของมอเตอร์ และขนาดแรงดันเฟสของมอเตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1420 รอบต่อนาที

ก) รูปคลื่นของแรงดันเฟสมอเตอร์..... 81

ข) ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันเฟสมอเตอร์ที่อันดับความถี่ต่างๆ..... 81

4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่กระแสอาร์เมเจอร์ค่าต่างๆ..... 84

4.10 ก) รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะไร้โหลด..... 89

ข) ผลคูณของแรงดันและกระแสเฟสของแหล่งจ่าย..... 89

4.11 ก) รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเฟสของแหล่งจ่ายเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลดเต็ม..... 90

ข) ผลคูณของแรงดันและกระแสเฟสของแหล่งจ่าย..... 90

4.12 รูปคลื่นและขนาดของกระแสของแหล่งจ่ายไฟแต่ละเฟส..... 91

4.13 การวัดหากำลังงานของแหล่งจ่ายไฟสลับแต่ละเฟส..... 91

4.14 ก) รูปคลื่นของแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรเรียงกระแสเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลดเต็ม..... 93

ข) ผลคูณของแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรเรียงกระแส..... 93

4.15 ก) รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเฟสของมอเตอร์

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่

เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะไร้โหลด..... 94
ข) ผลคูณของแรงดันและกระแสเฟสของมอเตอร์..... 94
4.16 ก) รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเฟสของมอเตอร์
เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลดเต็ม..... 95
ข) ผลคูณของแรงดันและกระแสเฟสของมอเตอร์..... 95
4.17 รูปคลื่นและขนาดของกระแสมอเตอร์แต่ละเฟส..... 96
4.18 การวัดหากำลังงานของมอเตอร์แต่ละเฟส..... 96
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแส
และกำลังงานด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1420 รอบต่อนาที..... 99
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์
และกำลังงานด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1420 รอบต่อนาที..... 99
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรรวม
และกำลังงานด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1420 รอบต่อนาที..... 100
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกำลังของ
วงจรเรียงกระแสและกำลังงานด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1420 รอบต่อนาที..... 100
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์
และกำลังงานด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์
ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1420 รอบต่อนาที..... 101
4.24 สัญญาณความเร็วรอบและกระแสของมอเตอร์เมื่อทำการ
เดินเครื่องและหยุดเดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด..... 102
4.25 สัญญาณความเร็วรอบและกระแสของมอเตอร์เมื่อทำการ
เดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด 102
4.26 สัญญาณความเร็วรอบและกระแสของมอเตอร์เมื่อทำการ
หยุดเดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด..... 103
4.27 สัญญาณความเร็วรอบและกระแสเข้าของวงจรเรียงกระแส

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่

เมื่อทำการเริ่มเดินเครื่องและหยุดเดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด.... 103
4.28 สัญญาณความเร็วรอบและกระแสเข้าของวงจรเรียงกระแส
เมื่อทำการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด..... 104
4.29 สัญญาณความเร็วรอบและกระแสเข้าของวงจรเรียงกระแส
เมื่อทำการหยุดเดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด..... 104
4.30 สัญญาณของแรงดันออกของวงจรเรียงกระแสและกระแสมอเตอร์
เมื่อทำการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด..... 105
4.31 สัญญาณของแรงดันออกของวงจรเรียงกระแสและกระแสมอเตอร์
เมื่อทำการหยุดเดินเครื่องมอเตอร์ที่ภาวะไร้โหลด..... 105
4.32 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันเฟสของแหล่งจ่าย
เมื่อทำการเบรกมอเตอร์..... 106

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย