

การออกแบบและสร้างวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย
เพื่อใช้ทดแทนหม้อแปลงแบบออโต้

นายสมชาติ มุ่มแดง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2580-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A 3-PHASE 4-WIRE AC CHOPPER
FOR REPLACEMENT OF AN AUTOTRANSFORMER

Mr.Somchat Mumtang

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14 -2580-5

Copyright of Chulalongkorn University

490066

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายเพื่อ
ใช้ทดแทนหม้อแปลงแบบออโต้

โดย

นายสมชาติ มุมแดง


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

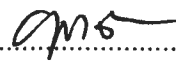
อาจารย์ที่ปรึกษา

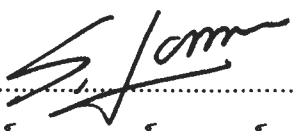
อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์

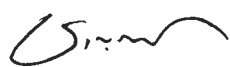
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

สมชาติ มุมแดง : การออกแบบและสร้างวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย เพื่อใช้ทดแทนหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A 3-PHASE 4-WIRE AC CHOPPER FOR REPLACEMENT OF AN AUTOTRANSFORMER) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร.สมบุญ แสงวงศ์ วาณิชย์, 89 หน้า. ISBN 974-14-2580-5.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟสลับรูปแบบหนึ่งที่เรียกว่า วงจรเอซีชอปเปอร์ เพื่อนำมาใช้ทดแทนหม้อแปลงแบบอัตโนมัติแบบ 3 เฟส ซึ่งข้อดีคือ น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก และซ่อมแซมง่าย วงจรเอซีชอปเปอร์ที่นำเสนอเป็นโครงสร้างแบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้ง 1 เฟสและ 3 เฟสเช่นเดียวกับหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ การออกแบบวงจรควบคุมสำหรับวงจรเอซีชอปเปอร์นี้ได้มีการปรับปรุงวิธีการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ให้ทำงานได้ปลอดภัยขึ้นโดยใช้วิธีการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสและแบบแรงดัน ในส่วนของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันนั้นเป็นการนำแนวคิดการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์มาจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเมทริกซ์รวมถึงวิธีการป้องกันวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้วงจรแคลมป์ป้องกันแรงดันเกินก็เช่นเดียวกัน วงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่นำเสนอได้ถูกนำไปสร้างจริงซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถทำงานได้จริง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

477 04814 21 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD : 3-PHASE 4-WIRE AC CHOPPER / COMMUTATION

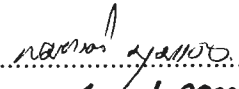
SOMCHAT MUMDANG : DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A 3-PHASE 4-WIRE AC CHOPPER FOR REPLACEMENT OF AN AUTOTRANSFORMER. THESIS ADVISOR : SOMBOON SANGWONGWANICH, Ph.D., 89 pp. ISBN 974-14-2580-5.

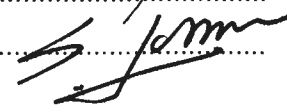
This thesis presents design and implementation of a 3-phase 4-wire AC chopper for replacement of an 3-phase autotransformer. The advantages of the AC chopper compared with an autotransformer include decreasing in size and weight, and very simple maintenance. The structure of the AC chopper proposed is a 3-phase 4-wire type, which can be used for both 1-phase and 3-phase loads as same as a 3-phase autotransformer. Improvement of commutation method by using the so-called mixed commutation is also introduced in the design of the control circuit, resulting in better commutation safety. This mixed commutation method allows switching between current and voltage commutations depending on the signs and magnitudes of the current and voltage signals. The voltage commutation sequence as well as the clamping circuit for protection of over voltage are the same as those of the matrix converter topology. The experimental results of the 3.3 kVA 3-phase 4-wire AC chopper are presented to verify the feasibility of the circuit.

Department : Electrical Engineering

Field of Study : Electrical Engineering

Academic Year : 2006

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย เป็นอย่างดีตลอดมา ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนตั้งแต่ต้นอดีต จนถึง ปัจจุบัน และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสร็จสมบูรณ์ไม่ได้ถ้าขาดบุคคลดังต่อไปนี้ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณภิน ที่ช่วยดูแลการทำวิจัยและให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมถึง ขอขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างงานวิจัย เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ที่ให้ชีวิต โอกาส ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในทุกๆ ด้านและเป็นกำลังใจที่ดีให้กับผู้เขียนเสมอมา

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ณ |
| สารบัญภาพ | ญ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| 1.4 นิยามสัญลักษณ์ | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย..... | 4 |
| 2. วงจรเอซีชอปเปอร์และการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ | 5 |
| 2.1 วงจรเอซีชอปเปอร์ | 5 |
| 2.2 วงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทาง | 7 |
| 2.3 วงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง | 9 |
| 2.4 การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ | 10 |
| 2.4.1 การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส..... | 10 |
| 2.4.2 การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน | 15 |
| 2.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาในขณะสวิตช์ถูกอ้างอิงข้ามผ่านศูนย์ | 20 |
| 2.6 วงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์ทางเดียว..... | 23 |
| 3. การออกแบบและสร้างวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย | 26 |
| 3.1 การออกแบบและสร้างวงจรถ้ากำลัง | 28 |
| 3.1.1 สวิตช์สองทาง | 28 |
| 3.1.2 การกำหนดเวลาหน่วงของรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ ... | 29 |
| 3.1.3 วงจรกรองด้านเข้าและด้านออก | 31 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1.4 วงจรป้องกัน | 33 |
| 3.2 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุม | 36 |
| 3.2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็ม..... | 38 |
| 3.2.2 วงจรหน่วงเวลา | 38 |
| 3.2.3 วงจรเลือกสัญญาณ | 40 |
| 3.2.4 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ | 44 |
| 3.2.5 วงจรรับนำสวิตช์สองทาง..... | 45 |
| 3.2.6 วงจรการควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 46 |
| 4. ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง | 49 |
| 4.1 ผลการจำลองการทำงาน | 49 |
| 4.2 ผลการทดลองของวงจรควบคุม | 54 |
| 4.3 ผลการทดลองการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ | 60 |
| 4.4 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย | 66 |
| 4.4.1 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแสอย่างเดียว | 66 |
| 4.4.2 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันอย่างเดียว | 67 |
| 4.4.3 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 67 |
| 4.4.4 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์จ่ายโหลดคงที่ โดยปรับค่า D ตั้งแต่ 0.1 – 1 | 69 |
| 4.4.5 ผลการทดลองวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแส ระหว่างสวิตช์แบบผสมกับโหลดไม่เชิงเส้น | 69 |
| 4.4.6 ผลการทดสอบวงจรป้องกัน | 70 |
| 4.5 สรุปผลการจำลองการทำงานและผลการทดลอง | 70 |
| 5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 86 |
| 5.1 สรุปผลงานวิจัย | 86 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 86 |
| รายการอ้างอิง | 88 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 89 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 4.1 ค่าแรงขั้นต่ำด้านนอกที่รัฐจักรงานตั้งแต่ 0.1 – 1 | 69 |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 การนำวงจรเอซีชอปเปอร์มาใช้ทดแทนหม้อแปลงแบบออโต้แบบ 3 เฟส | 1 |
| 1.2 วงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์สองทาง | 2 |
| 1.3 วงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์ทางเดียว | 2 |
| 1.4 วงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้สวิตช์สองทาง | 3 |
| 2.1 ลักษณะการทำงานของวงจรเอซีชอปเปอร์ | 5 |
| 2.2 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสทั้งด้านเข้าและด้านออกและแรงดันเฉลี่ยด้านออก | 6 |
| 2.3 วงจรเอซีชอปเปอร์ 1 เฟสที่ใช้สวิตช์สองทาง | 7 |
| 2.4 วงจรเอซีชอปเปอร์ 3 เฟส 3 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง | 8 |
| 2.5 โครงสร้างวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้สวิตช์สองทาง | 9 |
| 2.6 การทำงานของสวิตช์ $S_1 - S_6$ ของวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย | 9 |
| 2.7 วงจร 1 เฟส | 10 |
| 2.8 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์ | 11 |
| 2.9 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์ | 12 |
| 2.10 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์ | 13 |
| 2.11 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์ | 14 |
| 2.12 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์ | 15 |
| 2.13 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์ | 17 |
| 2.14 รูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์ | 18 |
| 2.15 ลำดับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์ | 19 |
| 2.16 รูปคลื่นสัญญาณการตรวจจับผ่านศูนย์ของสัญญาณอ้างอิงที่ถูกรบกวน..... | 20 |
| 2.17 การลัดวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดในการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน | 20 |
| 2.18 การเปิดวงจรเมื่อเกิดความผิดพลาดในการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส | 21 |
| 2.19 หลักการทำงานของรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 22 |
| 2.20 วงจรเอซีชอปเปอร์ 1 เฟสที่ใช้สวิตช์ทางเดียว | 23 |
| 2.21 รูปคลื่นสัญญาณขั้วนำสวิตช์ของวงจร 1 เฟสที่ใช้สวิตช์ทางเดียว | 23 |
| 2.22 วงจรเอซีชอปเปอร์ 3 เฟสที่ใช้สวิตช์ทางเดียว | 24 |
| 2.23 รูปคลื่นสัญญาณขั้วนำสวิตช์ของวงจร 1 เฟส กรณีแรงดันเฟส 3 น้อยกว่า แรงดันเฟส 1 และแรงดันเฟส 2 | 24 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 2.24 โหมดการทำงานของสัญญาณรับนำสวิตช์ของวงจรเอซีชอปเปอร์ที่ใช้สวิตช์ทางเดียว | 25 |
| 2.25 การลัดวงจรของวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย ที่ใช้สวิตช์ทางเดียว | 25 |
| 3.1 โครงสร้างวงจรจริงของวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย | 27 |
| 3.2 สวิตช์สองทางแบบไดโอดบริดจ์ | 28 |
| 3.3 สวิตช์สองทางแบบอิมิตเตอร์ร่วมและแบบคอลเลคเตอร์ร่วม | 28 |
| 3.4 การประมาณหาช่วงเวลา t_{x1} | 29 |
| 3.5 การประมาณหาช่วงเวลา t_{x2} | 30 |
| 3.6 วงจรกรองด้านเข้าและวงจรสมมูลของกระแสฮาร์มอนิก | 30 |
| 3.7 วงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย | 33 |
| 3.8 รูปคลื่นกระแสไหลลดด้านออกที่ถูกจำกัดด้วยการป้องกันทั้ง 2 แบบ | 34 |
| 3.9 วงจรแคลมป์ป้องกันแรงดันเกิน | 34 |
| 3.10 วงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สายที่มีวงจรแคลมป์ | 35 |
| 3.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมแรงดัน | 36 |
| 3.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมของวงจรการควบคุม | 37 |
| 3.13 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม | 38 |
| 3.14 วงจรหน่วงเวลาสำหรับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส | 39 |
| 3.15 รูปแบบสัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส | 39 |
| 3.16 วงจรหน่วงเวลาสำหรับการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน | 39 |
| 3.17 รูปแบบสัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน | 40 |
| 3.18 การสร้างวงจรหน่วงเวลาที่ใช้ในวงจรเอซีชอปเปอร์แบบ 3 เฟส 4 สาย | 40 |
| 3.19 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรเลือกการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ | 41 |
| 3.20 วงจรเลือกสัญญาณรับนำของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ | 41 |
| 3.21 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรเลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่า ศูนย์ของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ | 42 |
| 3.22 วงจรเลือกรูปแบบมากกว่าศูนย์หรือน้อยกว่าศูนย์ของการสับเปลี่ยนกระแสระหว่าง สวิตช์ | 42 |
| 3.23 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรเลือกสัญญาณอ้างอิงจากวงจร ตรวจจับผ่านศูนย์ | 43 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 3.24 วงจรเลือกข้อมูลของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ทั้ง 3 เฟส | 43 |
| 3.25 การทำงานของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ | 44 |
| 3.26 วงจรตรวจจับผ่านศูนย์ | 44 |
| 3.27 วงจรรับนำสวิตช์สองทาง | 45 |
| 3.28 การแยกกราวด์ของวงจรรับนำสวิตช์สองทาง | 46 |
| 3.29 หลักการทำงานของ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 46 |
| 3.30 วงจร window comparator ที่ใช้สร้างย่านสัญญาณ | 47 |
| 3.31 วงจรเลือกรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์..... | 47 |
| 3.32 การทำงานของ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 48 |
| 4.1 รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าและกระแสด้านเข้า 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส | 50 |
| 4.2 รูปคลื่นแรงดันด้านออกและกระแสด้านออก 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส | 50 |
| 4.3 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส | 51 |
| 4.4 รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าและกระแสด้านเข้า 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน | 51 |
| 4.5 รูปคลื่นแรงดันด้านออกและกระแสด้านออก 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน | 52 |
| 4.6 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน | 52 |
| 4.7 รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าและกระแสด้านเข้า 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 53 |
| 4.8 รูปคลื่นแรงดันด้านออกและกระแสด้านออก 3 เฟส ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 53 |
| 4.9 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง ในกรณีใช้การสับเปลี่ยน กระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม | 54 |
| 4.10 สัญญาณรับนำสำหรับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์ | 54 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 4.11 สัญญาณขับนำสำหรับรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์ | 55 |
| 4.12 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดันกรณีแรงดันมากกว่าศูนย์ และแรงดันด้านออกที่เกิดขึ้นจริง | 55 |
| 4.13 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน กรณีแรงดันมากกว่าศูนย์ และแรงดันด้านออกที่เกิดขึ้นจริง เมื่อมีการเลื่อนเวลาของสัญญาณขับนำ | 56 |
| 4.14 สัญญาณรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่า ศูนย์ | 56 |
| 4.15 สัญญาณรูปแบบการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่า ศูนย์ | 57 |
| 4.16 การทำงานของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ที่มีวงรอบฮีสเตอร์รีซิสและการคงค่าสัญญาณ ตลอด 1 คาบการสวิตช์ ขณะเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ | 57 |
| 4.17 การทำงานของวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ที่มีวงรอบฮีสเตอร์รีซิสและการคงค่า สัญญาณตลอด 1 คาบการสวิตช์ ขณะเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก | 58 |
| 4.18 สัญญาณควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ขณะกระแส ไหลดมีค่าน้อย | 58 |
| 4.19 สัญญาณควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ขณะกระแส ไหลดเพิ่มขึ้นจากรูปที่ 4.18 | 59 |
| 4.20 สัญญาณควบคุมการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ขณะกระแส ไหลดมีค่ามาก | 59 |
| 4.21 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแส มากกว่าศูนย์และแรงดันออกที่เกิดขึ้นจริง | 61 |
| 4.22 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์,แรงดันมากกว่าศูนย์ | 61 |
| 4.23 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสมากกว่าศูนย์,แรงดันน้อยกว่าศูนย์ | 61 |
| 4.24 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อย กว่าศูนย์และแรงดันออกที่เกิดขึ้นจริง | 62 |
| 4.25 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์,แรงดันมากกว่าศูนย์ | 62 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 4.26 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบกระแส เมื่อกระแสน้อยกว่าศูนย์, แรงดันน้อยกว่าศูนย์ | 62 |
| 4.27 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมาก กว่าศูนย์และแรงดันออกที่เกิดขึ้นจริง | 64 |
| 4.28 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์ | 64 |
| 4.29 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันมากกว่าศูนย์, กระแสน้อยกว่าศูนย์ | 64 |
| 4.30 สัญญาณการสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อย กว่าศูนย์และแรงดันด้านออกที่เกิดขึ้นจริง | 65 |
| 4.31 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดันน้อยกว่าศูนย์, กระแสมากกว่าศูนย์ | 65 |
| 4.32 ผลการทดลองในกรณีที่ใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบแรงดัน เมื่อแรงดัน น้อยกว่าศูนย์, กระแสน้อยกว่าศูนย์ | 65 |
| 4.33 วงจรที่ใช้ทดลอง | 66 |
| 4.34 กราฟแสดงแรงดันด้านออกที่วัฏจักรงานตั้งแต่ 0.1 – 1 | 69 |
| 4.35 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบ กระแส ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน 50 Ω , ความเหนี่ยวนำ 30 mH | 71 |
| 4.36 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบ กระแส ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน 50 Ω , ความเหนี่ยวนำ 30 mH | 71 |
| 4.37 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ แบบกระแส ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน 50 Ω , ความเหนี่ยวนำ 30 mH | 72 |
| 4.38 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบ แรงดัน ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน 50 Ω , ความเหนี่ยวนำ 30 mH | 72 |
| 4.39 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบ แรงดัน ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน 50 Ω , ความเหนี่ยวนำ 30 mH | 73 |
| 4.40 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ แบบแรงดัน ที่วัฏจักรงาน 0.5 โหลดความต้านทาน 50 Ω , ความเหนี่ยวนำ 30 mH | 73 |
| 4.41 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.2 โหลดความต้านทาน 50 Ω , ความเหนี่ยวนำ 30 mH | 74 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 4.57 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ | 82 |
| 4.58 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรอง เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.8 โหลดความต้านทาน $35\ \Omega$, ความเหนี่ยวนำ $30\ mH$ | 82 |
| 4.59 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้า เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.6 โหลดไดโอดบริดจ์ | 83 |
| 4.60 รูปคลื่นแรงดันด้านออกก่อนผ่านวงจรกรองและแรงดันด้านออกหลังวงจรกรอง เมื่อใช้ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์แบบผสม ที่วัฏจักรงาน 0.6 โหลดไดโอดบริดจ์ | 83 |
| 4.61 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออก เมื่อใช้การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ แบบผสมที่วัฏจักรงาน 0.6 โหลดไดโอดบริดจ์ | 84 |
| 4.62 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรไดโอดบริดจ์ | 84 |
| 4.63 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์, กระแสด้านออก และแรงดันที่ตัวเก็บประจุ ของวงจรแคลมป์ เมื่อเกิดการป้องกันกระแสเกินพิกัด | 85 |