การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเพื่อเพิ่มกำลัง

นาย ต่อศักดิ์ พ่วงมหา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2535

ISBN 974-581-487-3

ลิขสิทธิ์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018482 เ๔๗๘๐๗๙

PARALLELING OF DC-DC CONVERTERS FOR INCREASED POWER

Mr. TORSAK PUANGMAHA

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 974-581-487-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเพื่อเพิ่มกำลัง
โดย : นายต่อศักดิ์ พ่วงมหา
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.โกทม อารียา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ต่อศักดิ์ พ่วงมหา : การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เพื่อเพิ่มกำลัง (PARALLELING OF DC-DC CONVERTERS FOR INCREASED POWER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิทิต, 141 หน้า. ISBN 974-581-487-3

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบ สร้าง และทดสอบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง 3 ชุดซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน สามารถปรับแรงดันออกได้ระหว่าง 24-30 โวลต์ และจ่ายกำลังสูงสุดได้ 1.8 กิโลวัตต์ การควบคุมการแบ่งจ่ายกระแสของชุดวงจรที่นำมาขนานนี้ ใช้หลักการควบคุมกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแต่ละชุด การใช้วิธีการควบคุมที่เหมาะสมทำให้วงจรสามารถทนภาวะผิดปกติที่มีการลัดวงจรทางด้านออกได้ ภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเป็นวงจรบริดจ์ไม่สมมาตร ในภาวะปกติการควบคุมอาศัยการกำหนดค่าสูงสุดของกระแสตัวเหนี่ยวนำ โดยมีความถี่การสวิตช์คงที่เท่ากับ 45 กิโลเฮิรตซ์ แต่เมื่อเข้าสู่ภาวะการลัดวงจรขาออก การควบคุมกระแสจะทำให้กระแสตัวเหนี่ยวนำอยู่ระหว่างพิกัดสูงสุด-ต่ำสุด โดยความถี่การสวิตช์จะลดลง เป็นสัดส่วนจำนวนเต็มกับความถี่ 45 กิโลเฮิรตซ์ ประสิทธิภาพของชุดวงจรมีค่าสูงสุดเท่ากับ 88 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงดันออก 30 โวลต์ กระแสออก 14 แอมแปร์ การคงค่าแรงดันออกของระบบที่มีชุดวงจรขนาน 3 ชุด ต่อการเปลี่ยนโหลดมีค่า 0.4 เปอร์เซ็นต์ ที่แรงดันออก 30 โวลต์และการแบ่งจ่ายกระแสของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง แต่ละชุดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างสูงสุดของกระแสเท่ากับ 0.4 แอมแปร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ต่อศักดิ์ พ่วงมหา

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ยุทธนา กุลวิทิต

ปีการศึกษา 2534 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C115901 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD : DC-DC CONVERTER/PARALLEL CONVERTER

TORSAK PUANGMAHA : PARALLELING OF DC-DC CONVERTERS FOR INCREASED POWER. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.YOUTHANA KULVITIT,Dr.Ing., 141 PP. ISBN 974-581-487-3

This thesis presents the design, construction and testing of three DC-DC converter modules and their paralleling to form a DC power supply which can deliver a maximum power output of 1.8 kilowatts and withstand output short circuit fault and whose output voltage can be varied between 24 and 30 volts. The inductor current in each module is controlled in order to provide output current sharing. Each module consists of an asymmetrical bridge converter. In normal operation, current programmed technique is used and the switching frequency is fixed at 45 kHz. when there is an output short circuit fault, hysteretic control is used to reduce the switching frequency to a submultiple of 45 kHz. The maximum efficiency of each module is 88% at an output voltage of 30 volts and an output current of 14 amperes. The load voltage regulation is 0.4% at an output voltage of 30 volts. The maximum difference between modular output currents is 0.4 ampere.

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2534 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด รวมทั้ง ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสามท่านตลอดจนขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

ต่อศักดิ์ ผ่วงมหา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญภาพ ..... ช

บทที่

1. บทนำ 1
2. โครงสร้าง และการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง 5
3. การออกแบบ และการจำลองแบบของวงจรไฟตรง-ไฟตรง และการขนาน 30
4. การสร้างวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และการขนาน 73
5. การทดสอบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และการขนาน 80
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ 122

เอกสารอ้างอิง 127

ภาคผนวก 129

ประวัติผู้เขียน 141

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	บล็อกไดอะแกรมของการชนานแหล่งจ่ายไฟตรง	2
2.1	วงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันที่ไม่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง	
	ก. วงจรทอนระดับ (buck)	8
	ข. วงจรทอนทบระดับภาคแรงดัน (buck-boost)	8
	ค. วงจรทอนทบระดับภาคกระแส (Cuk)	8
2.2	วงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันที่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง	
	ก. วงจรทอนทบระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดด (isolated Cuk)	10
	ข. วงจรบินกลับ (flyback)	10
	ค. วงจรไปหน้า (forward)	10
	ง. วงจรพุช-พูลภาคแรงดัน (push-pull)	11
	จ. วงจรกึ่งบริดจ์ (half-bridge)	11
	ฉ. วงจรบริดจ์เต็ม (full-bridge)	11
	ช. วงจรบริดจ์แบบไม่สมมาตร (asymmetrical bridge)	12
2.3	การควบคุมกระแสแบบ hysteretic control	
	ก. รูปวงจรการควบคุมแบบ hysteretic control สำหรับวงจรทอนระดับ	15
	ข. รูปคลื่นของการควบคุมแบบ hysteretic control	16
2.4	การควบคุมแบบ current-programmed mode	
	ก. รูปวงจรการควบคุมแบบ current-programmed mode สำหรับวงจรทอนระดับ	16
	ข. รูปคลื่นของการควบคุมแบบ current-programmed mode ...	17
2.5	การควบคุมแบบ current-programmed mode และ hysteretic control ร่วมกัน	
	ก. รูปวงจรการควบคุมแบบ current-programmed mode และ hysteretic control ร่วมกัน สำหรับวงจรทอนระดับ	19
	ข. รูปคลื่นการทำงานแบบ current-programmed mode และ hysteretic control ร่วมกัน	19
2.6	การเปลี่ยนแปลงผลการปิดเปิดสวิตช์เป็นหม้อแปลง	
	ก. วงจรพื้นฐานของวงจรทอนระดับ	22
	ข. วงจรทอนระดับที่แปลงผลการปิดเปิดสวิตช์เป็นหม้อแปลง	22

รูปที่ หน้า

2.7 การเปลี่ยนแปลงหม้อแปลงในรูปที่ 2.6ข เป็นแหล่งจ่ายที่สมนัยกัน ... 23

2.8 canonical model ของวงจรทอนระดับที่ใช้การควบคุมแบบ duty ratio programmed 24

2.9 ลักษณะรูปคลื่นที่แสดงการทำงานของวงจรทอนระดับที่ใช้วิธีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตช์คงที่ 25

2.10 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตช์คงที่ 27

2.11 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่มีความถี่ในการสวิตช์คงที่ในรูปของตัวแปร y 27

2.12 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสองท่าแบบ y 28

3.1 บล็อกไดอะแกรมของการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง 31

3.2 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง 31

3.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรภาคควบคุม 33

3.4 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงภาคกำลัง 34

3.5 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรอง 36

3.6 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ 38

3.7 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ 38

3.8 กระแสในไดโอดและกระแสสลับขาเข้า 39

3.9 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสสลับขาเข้าเมื่อแรงดันไฟสลับขาเข้าเป็นไซน์ 40

3.10 แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสสลับขาเข้าเมื่อแรงดันไฟสลับขาเข้าเป็นโคไซน์ 41

3.11 วงจรที่ใช้ในการซีมูเลตตอนเริ่มทำงาน 41

3.12 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสไดโอดตอนเปิดเครื่องเมื่อมีรีเลย์ป้องกันกระแสกระชาก 42

3.13 กราฟแสดงกำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่อน้ำหนักกับความถี่ 44

3.14 กระแสในสวิตช์กำลัง 48

3.15 กระแสในไดโอด D_1 และ D_2 48

3.16 กระแสไดโอดเรียงกระแสด้านออก D_3 49

3.17 กระแสในไดโอด freewheeling D_4 49

รูปที่ หน้า

3.18 ผลการคำนวณผลตอบเชิงความถี่ ($\hat{v}_o/\hat{v}_c$) ที่วัฏจักรงาน 0.365
ก. อัตราขยาย 52
ข. มุมเฟส 52
3.19 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก
ของระบบการชนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง 53
3.20 อัตราขยายวงรอบ (T_v) เมื่อ G_R เป็นไปตามสมการ (3.27) .. 55
3.21 อัตราขยายวงรอบปิด ($\hat{v}_o/\hat{v}_r$) ตามสมการ (3.28) 57
3.22 วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ 58
3.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร
แปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ทำงานในภาคกระแส 59
3.24 บล็อกไดอะแกรมของระบบการชนานวงจรที่ใช้ในการจำลอง
ที่ทำงานในภาคแรงดัน 60
3.25 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงด้วยคอมพิวเตอร์
เมื่อทำงานในภาคกระแส และได้รับแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้น
จาก 0 โวลต์ เป็น 10 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 61
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) 61
3.26 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงด้วยคอมพิวเตอร์
เมื่อทำงานในภาคกระแส และได้รับแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้น
จาก 10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 62
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) 62
3.27 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงด้วยคอมพิวเตอร์
เมื่อทำงานในภาคกระแส และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้น
จาก 0 โวลต์ เป็น 30 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 63
ข. รูปคลื่นกระแสออก (i_o) 63
3.28 ผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงด้วยคอมพิวเตอร์
เมื่อทำงานในภาคกระแส และมีการลดโหลดแบบขั้น
จาก 30 โวลต์ เป็น 0 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 64

รูปที่ หน้า

ข. รูปคลื่นกระแสออก (i_o) 64
3.29 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นขนาดเล็กจาก 5.7 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์ 65
3.30 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นขนาดเล็กจาก 5.8 โวลต์ เป็น 5.7 โวลต์ 65
3.31 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นขนาดเล็กจาก 18 แอมแปร์ เป็น 30 แอมแปร์ 66
3.32 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นขนาดเล็กจาก 30 แอมแปร์ เป็น 18 แอมแปร์ 66
3.33 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$) 67
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$) . 67
3.34 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 5.8 โวลต์ เป็น 0 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$) 68
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$).. 68
3.35 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก 0 แอมแปร์ เป็น 45 แอมแปร์
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$) 69
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) 69
ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$) 70

รูปที่ หน้า

3.36 ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลังด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีการลดโหลดแบบขั้นขนาดเล็กจาก 45 แอมแปร์ เป็น 0 แอมแปร์
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$) 71
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) 71
ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$) 72
4.1 โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ใช้ทางปฏิบัติ 75
4.2 วงจรควบคุมของชุดวงจร 77
4.3 วงจรเปรียบเทียบ และควบคุมแรงดัน 79
4.4 วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา 79
5.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ 81
5.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพของชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง 82
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกกับแรงดันคำสั่งกระแส ... 82
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง line current regulation กับแรงดันคำสั่งกระแส สำหรับการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า +/- 10% เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี
ก. กรณีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า +10% 84
ข. กรณีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า -10% 84
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง load current regulation กับแรงดันคำสั่งกระแส สำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลด เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี 86
5.6 กราฟแสดงการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และการกระเพื่อมของแรงดันออกที่แรงดันออก ค่าต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี
ก. กราฟแสดงการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ที่แรงดันออกค่าต่าง ๆ 88
ข. กราฟแสดงการกระเพื่อมของแรงดันออกที่แรงดันออกค่าต่าง ๆ 88
5.7 กราฟแสดงการกระเพื่อมของกระแสออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ ที่กระแสออกค่าต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี 89
5.8 ผลตอบเชิงความถี่ของ $\hat{v}_o/\hat{v}_c$ ที่วัฏจักรงาน 0.3 เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี 90

รูปที่ หน้า

5.9 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส
โดยเปลี่ยนแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้น จาก 0 โวลต์ เป็น 10 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 92
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) 92
5.10 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส
โดยเปลี่ยนแรงดันคำสั่งกระแสแบบขั้น จาก 10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 93
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) 93
5.11 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส
และมีการเพิ่มโหลดแบบขั้น จาก 0 โวลต์ เป็น 30 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 95
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) 95
5.12 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อชุดวงจรทำงานในภาคกระแส
และมีการลดโหลดแบบขั้น จาก 30 โวลต์ เป็น 0 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) .. 96
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก (i_o) 96
5.13 รูปคลื่นของกระแสสลับด้านเข้า และแรงดันออกของวงจรเรียงกระแส
เมื่อชุดวงจรจ่ายกำลังออก 30 โวลต์ 20 แอมแปร์ 98
5.14 รูปคลื่นของแรงดันขับนำเกต และแรงดันคร่อมสวิตช์ 98
5.15 รูปคลื่นของกระแสในสวิตช์ 99
5.16 รูปคลื่นของแรงดันคร่อมสวิตช์ และไดโอด D_1 และ D_2 99
5.17 รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ 100
5.18 รูปคลื่นของแรงดันคร่อมหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ 101
5.19 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันคร่อมไดโอด
เรียงกระแส D_3 101
5.20 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันคร่อมไดโอด
freewheeling D_4 102
5.21 รูปคลื่นของกระแสออก และแรงดันออกตอนลัดวงจรด้านขาออก 103
5.22 รูปคลื่นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันออกตอนลัดวงจรด้านออก 103
5.23 วงจรที่ใช้ในการทดสอบระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจร 104

รูปที่ หน้า

5.24 กราฟแสดงการแบ่งจ่ายกระแสของชุดวงจร
สำหรับกระแสออกรวมของระบบค่าต่าง ๆ 105
5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง load voltage regulation
กับแรงดันออก 106
5.26 ผลตอบเชิงความถี่ของอัตราขยายวงรอบปิดแรงดัน ($\hat{v}_o/\hat{v}_r$)
ที่วัฏจักรงาน 0.3 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี . 108
5.27 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) เมื่อระบบที่ได้จากการขนาน
ชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่า
แบบขั้นขนาดเล็กจาก 5.7 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์ 109
5.28 ผลการวัดรูปคลื่นแรงดันออก (v_o) เมื่อระบบที่ได้จากการขนาน
ชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่า
แบบขั้นขนาดเล็กจาก 5.8 โวลต์ เป็น 5.7 โวลต์ 110
5.29 ผลการวัดรูปคลื่นของแรงดันออก (v_o) เมื่อระบบที่ได้จากการขนาน
ชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงกระแสออก
แบบขั้นขนาดเล็ก จาก 18 เป็น 30 แอมแปร์ 111
5.30 ผลการวัดรูปคลื่นของแรงดันออก (v_o) เมื่อระบบที่ได้จากการขนาน
ชุดวงจรกำลังทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงกระแสออก
แบบขั้นขนาดเล็กจาก 30 เป็น 18 แอมแปร์ 111
5.31 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลัง
ทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่า
แบบขั้นขนาดใหญ่ จาก 0 โวลต์ เป็น 5.8 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ
ของชุดวงจร ($i_{L\ module}$) 113
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$) . 113
ค. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก
ของชุดวงจร ($i_{o\ module}$) 114
5.32 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลัง
ทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งค่า
แบบขั้นขนาดใหญ่จาก 5.8 โวลต์ เป็น 0 โวลต์
ก. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสในตัวเหนี่ยวนำ
ของชุดวงจร ($i_{L\ module}$)..... 115

รูปที่ หน้า

ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$).. 115
ค. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) และกระแสออก
ของชุดวงจร ($i_{o\ module}$)..... 116
5.33 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลัง
ทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงกระแสออก
แบบขั้นขนาดใหญ่จาก 0 แอมแปร์ เป็น 45 แอมแปร์
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$)..... 117
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o)..... 117
ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$).... 118
ง. รูปคลื่นกระแสออกของชุดวงจร ($i_{o\ module}$)..... 118
5.34 ผลการวัดรูปคลื่นต่าง ๆ เมื่อระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรกำลัง
ทำงานในภาคแรงดัน ได้รับการเปลี่ยนแปลงกระแสออก
แบบขั้นขนาดใหญ่จาก 45 แอมแปร์ เป็น 0 แอมแปร์
ก. รูปคลื่นกระแสออกรวม ($i_{o\ total}$)..... 119
ข. รูปคลื่นแรงดันออก (v_o) 119
ค. รูปคลื่นกระแสในตัวเหนี่ยวนำของชุดวงจร ($i_{L\ module}$).... 120
ง. รูปคลื่นกระแสออกของชุดวงจร ($i_{o\ module}$)..... 120
ผ.1 วงจรของแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหา
line current regulation 135
ผ.2 วงจรของแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหา
load current regulation 136
ผ.3 วงจรของแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหาการกระเพื่อม
ของกระแสออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ 138
ผ.4 วงจรทดลองหาผลตอบเชิงความถี่ $\hat{v}_o/\hat{v}_c$ 140
ผ.5 วงจรทดลองหาผลตอบเชิงความถี่ $\hat{v}_f/\hat{v}_{error}$ 140
ผ.6 วงจรทดลองหาผลตอบเชิงความถี่ $\hat{v}_o/\hat{v}_r$ 140