

การพัฒนาวงจรรขยายเซอร์โวกระแสตรงขนาด 2 กิโลวัตต์



นายธีรภัทร โชติชานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2534

ISBN 974-578-453-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

017551

11๗๙๐๘๗๕

DEVELOPMENT OF A 2-kW DC SERVO AMPLIFIER



Mr. TERAPAT CHOTICHANON

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

1991

ISBN 974-578-453-2



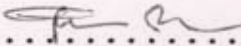
หัวข้อวิทยานิพนธ์ : การพัฒนาวงจรขยายเซอร์โวลีแอดตรง  
ขนาด 2 กิโลวัตต์  
โดย : นายธีรภัทร์ โชติชานนท์  
ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิฑิต


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

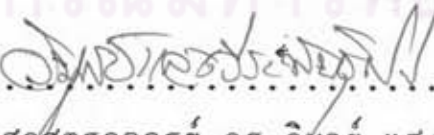
  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรไภย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนดิรินทร์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อาริยา)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

ธีรภัทร โชติชานนท์ : การพัฒนาวงจรรขยายเซอร์โวกระแสตรงขนาด 2 กิโลวัตต์ (DEVELOPMENT OF A 2-kW DC SERVO AMPLIFIER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ยุทธนา กุลวิจิต , 195 หน้า. ISBN 974-578-453-2

วงจรรขยายเซอร์โวกระแสตรงแบบสวิตซิ่งที่มีกำลังออกแบบต่อเนื่อง 1 กิโลวัตต์และกำลังออกชั่วครู่สูงสุด 2 กิโลวัตต์ สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดกระแสและแหล่งกำเนิดแรงดัน ภาคกำลังเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบริดจ์ที่มีวงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ การควบคุมกระแสออกและแรงดันออกใช้การควบคุมผ่านกระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง โดยจำกัดค่าสูงสุดของกระแสที่ควบคุม ความถี่ในการทำงานของสวิตช์มีค่าคงที่เท่ากับ 20 กิโลเฮิรตซ์ การควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์ในสภาวะปกติเป็นแบบซัวเดี่ยวจำกัดและมีการสลับการทำงานของสวิตช์เพื่อลดความแตกต่างของกำลังสูญเสียในสวิตช์ด้วยในกรณีที่แรงดันออกเป็นไฟตรง แต่ในบางสภาวะของการจำกัดค่ากระแสออกต้องมีการเปลี่ยนการควบคุมลำดับการทำงานของสวิตช์เป็นแบบสองซัว ในการทดสอบใช้โหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมโหลดที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงสามารถทำให้พลังงานไหลได้ 2 กิโลวัตต์ แรงดันออกมีค่าแปรได้ระหว่าง  $\pm 100$  โวลต์ โดยมีกระแสออกสูงสุดชั่วขณะได้  $\pm 20$  แอมแปร์ มีกระแสออกสูงสุดอย่างต่อเนื่องได้  $\pm 10$  แอมแปร์ ประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรรขยายเซอร์โวกระแสตรงเท่ากับ 86% ที่จำกัดอย่างต่อเนื่องของกระแสและแรงดันออก การตอบสนองของสัญญาณออกเมื่อสัญญาณตั้งค่า เป็นสัญญาณแบบขั้นและไม่มีการจำกัดกระแสของวงจร ภาคกำลังมีเวลาขึ้นเท่ากับ 0.6 มิลลิวินาทีเมื่อทำงานในภาคแรงดัน และมีเวลาขึ้นเท่ากับ 5 มิลลิวินาที เมื่อทำงานในภาคกระแส



ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์  
สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์  
ปีการศึกษา ๒๕๖๖

ลายมือชื่อนิติ ธีรภัทร โชติชานนท์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [Signature]  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

TERAPAT CHOTICHANON : DEVELOPMENT OF A 2-kW DC SERVO  
AMPLIFIER. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. YOUTHANA KULVITIT,  
Dr. Ing 195 PP.

A full bridge converter with LC low pass filter is used as a power circuit of a 1 kW continuous and 2 kW peak switching dc servo amplifier, which can operate either as a voltage source or a current source. The output voltage or output current is controlled via an inductor current using current programmed mode technique. The operating frequency is fixed at 20 kHz. The limited unipolar mode is used in normal operation. The operating sequence of the four switches of the converter is arranged so as to minimize the difference of the losses of the four switches, when the amplifier is operating as a dc amplifier. The M-G set is used to test the performance of the dc servo amplifier. Because of the four quadrant nature of converter, the output voltage of the amplifier can be varied between +/- 100 volts with a peak current of +/- 20 amperes, and maximum continuous current of +/- 10 amperes. The maximum efficiency of the dc servo amplifier is 86% at continuous rated voltage and current. The step response of the dc servo amplifier working in a voltage and current mode without current limiting; the output voltage and output current rise times are 0.6 ms and 5 ms, respectively.

ภาควิชา .....  
สาขาวิชา .....  
ปีการศึกษา ๒๕๓๓ .....

ลายมือชื่อนิติกร .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด อีกทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร.โคทม อารียา รองศาสตราจารย์ สัมภ์ ศิวารัตน์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสามท่าน ตลอดจนขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรของห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกท่านที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ธีรภัทร์ โชติชานนท์



ศูนย์วิจัยและพัฒนาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

ซี

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ช

บทที่

1. บทนำ .....	1
2. การควบคุมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	8
3. การออกแบบและการจำลองแบบวงจรมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	48
4. การสร้างวงจรมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	92
5. การทดสอบวงจรมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	126
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	166
เอกสารอ้างอิง .....	171
ภาคผนวก .....	174
ประวัติผู้เขียน .....	179

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า	
1.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบเซอร์โวทางไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว .....	2
1.2	ก. แสดงโครงสร้าง ข. สัญลักษณ์ที่ใช้แทนมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	4
2.1	วงจรมุมลทางไฟฟ้าและลักษณะเชิงกลของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	9
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงที่แรงดัน $V_u$ ค่าต่างๆกัน .....	11
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	12
2.4	แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรง .....	13
2.5	ก. แสดงบล็อกไดอะแกรมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเมื่อ $T_u(s) = 0$ ข. แสดงบล็อกไดอะแกรมมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงเมื่อ $V_u(s) = 0$ .....	14
2.6	แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงที่ได้ทำเป็นบรรทัดฐานแล้ว .....	17
2.7	แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เซอร์โวกระแสตรงในรูป normalized เมื่อให้ $T_{un}(s) = 0$ .....	17
2.8	โครงสร้างและตัวอย่างวงจรถอนระดับ ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรถอนระดับ ข. ตัวอย่างวงจรถอนระดับที่พลังงานไหลได้ทางเดียว .....	19
2.9	โครงสร้างและตัวอย่างวงจรถบระดับ ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรถบระดับ ข. ตัวอย่างวงจรถบระดับที่พลังงานไหลได้ทางเดียว .....	21
2.10	โครงสร้างและตัวอย่างวงจรถอนทบระดับ ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรถอนทบระดับ ข. ตัวอย่างวงจรถอนทบระดับที่พลังงานไหลได้ทางเดียว ...	22



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.11 โครงสร้างและตัวอย่างวงจรถูก	
ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรถูก	
ข. ตัวอย่างวงจรถูกที่พลังงานไหลได้ทางเดียว .....	23
2.12 โครงสร้างและตัวอย่างวงจรวัด	
ก. โครงสร้างพื้นฐานของวงจรวัด	
ข. ตัวอย่างวงจรวัด .....	24
2.13 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดัน	
ก. การควบคุมวัฏจักรงานโดยตรง	
ข. การควบคุมแบบ Voltage Bang-Bang .....	31
2.14 ลักษณะรูปคลื่นของกระแส .....	32
2.15 แสดงการแปลงผลของการเปิดปิดสวิตช์เป็นหม้อแปลง	
ก. วงจรพื้นฐานของวงจรถอนระดับ	
ข. วงจรถอนระดับที่แปลงผลของการเปิดปิดสวิตช์เป็นหม้อแปลง	37
2.16 แสดงการเปลี่ยนหม้อแปลงในรูปที่ 2.15 ข. เป็นต้นกำลังที่สมนัยกัน	37
2.17 Canonical model ของวงจรถอนระดับที่ใช้การควบคุมแบบ Duty ratio programmed .....	38
2.18 แสดงลักษณะรูปคลื่นการทำงานของวงจรถอนระดับที่ใช้วิธี การควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตช์คงที่ .....	39
2.19 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรถอนระดับที่มีการ ควบคุมโดยกำหนดกระแสที่มีความถี่ในการสวิตช์คงที่ .....	41
2.20 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรถอนระดับที่มีการ ควบคุมโดยกำหนดกระแสที่มีความถี่ในการสวิตช์คงที่ ในรูปของ ตัวแปร $y$ .....	42
2.21 บล็อกไดอะแกรมของวงจรถอนระดับแบบ $y$ .....	42
3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรถอนระดับเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงาน ในภาคแรงดัน .....	49
3.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรถอนระดับเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงาน ในภาคกระแส .....	50

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.3 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง .....	51
3.4 บล็อกไดอะแกรมวงจรเปรียบเทียบและควบคุมกระแสของ วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง .....	52
3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรรก .....	53
3.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเปรียบเทียบกระแส .....	56
3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงาน ของสวิตช์ .....	58
3.8 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลัง .....	61
3.9 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม .....	62
3.10 ลักษณะของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ .....	66
3.11 แสดงผลตอบทางความถี่ของ ( $\hat{i}_o / \hat{v}_c$ ) ที่วัฏจักรงาน 0.95 ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	71
3.12 แสดงผลตอบทางความถี่ของ ( $\hat{i}_o / \hat{v}_c$ ) ที่วัฏจักรงาน 0.95 ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	72
3.13 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของ วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดัน .....	73
3.14 แสดงอัตราขยายวงรอบแรงดัน ( $T_v$ ) เมื่อ $g_v$ เป็นตามสมการ 3.12 ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	75
3.15 แสดงอัตราขยายวงรอบบิดแรงดันเมื่อ $g_v$ เป็นตามสมการ 3.12 ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	76
3.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของ วงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคกระแส .....	77

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.17 แสดงอัตราขยายวงรอบกระแส( $T_1$ )เมื่อ $g_i$ เป็นตามสมการ 3.15	
ก. อัตราขยาย	
ข. มุมเฟส .....	79
3.18 แสดงอัตราขยายวงรอบปิดกระแสเมื่อ $g_i$ เป็นไปตามสมการ 3.15	
ก. อัตราขยาย	
ข. มุมเฟส .....	80
3.19 วงจรกรอง LC แบบผ่านต่ำ .....	82
3.20 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อแทนค่าตัวค่า คงที่ต่างๆ .....	83
3.21 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและโหลด .....	83
3.22 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของ วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคแรงดัน ...	85
3.23 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของ วงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงเมื่อทำงานในภาคกระแส ...	86
3.24 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคแรงดันและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น -10 โวลต์	
ก. สเกลเวลา 2 มิลลิวินาทีต่อช่อง	
ข. สเกลเวลา 110 มิลลิวินาทีต่อช่อง .....	87
3.25 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคแรงดันและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก -10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ .....	88
3.26 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคแรงดันและมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก -1 แอมแปร์ เป็น -10 แอมแปร์ ที่แรงดันออก -100 โวลต์ ..	88
3.27 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคแรงดันและมีการลดโหลดแบบขั้นจาก -10 แอมแปร์ เป็น -1 แอมแปร์ ที่แรงดันออก -100 โวลต์ ..	89

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.28 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแสและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ ก. สเกลเวลา 2 มิลลิวินาทีต่อช่อง ข. สเกลเวลา 150 มิลลิวินาทีต่อช่อง .....	90
3.29 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแสและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 5 โวลต์ เป็น 0 โวลต์ .....	90
3.30 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแสและมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก 40 โวลต์เป็น 100 โวลต์ ที่กระแสออก 10 แอมแปร์ ....	91
3.31 ผลการจำลองการทำงานของวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรง เมื่อทำงานในภาคกระแสและมีการลดโหลดแบบขั้นจาก 100 โวลต์เป็น 40 โวลต์ ที่กระแสออก 10 แอมแปร์ .....	91
4.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ใช้ในทางปฏิบัติ .....	92
4.2 วงจรขับน้ำเกิดและวงจรสร้างสัญญาณความถี่ผสม .....	96
4.3 วงจรตรรก .....	98
4.4 วงจรควบคุมส่วนที่หนึ่ง .....	103
4.5 วงจรควบคุมส่วนที่สอง .....	106
4.6 วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกลำดับการทำงานของสวิตช์ .....	109
4.7 วงจรกำลังของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังและวงจร ควบคุมการปิดเปิด .....	114
4.8 แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังที่ใช้ในการจำลองด้วย คอมพิวเตอร์ .....	116
4.9 วงจรป้องกัน .....	119
4.10 วงจรคายประจุ .....	123
4.11 แหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคควบคุม .....	124
5.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ .....	127

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
5.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพของวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรง ..	128
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออก ( $V_o$ ) กับแรงดันตั้ง ค่า ( $V_r$ ) .....	130
5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออก ( $I_o$ ) กับแรงดันตั้ง ค่า ( $V_r$ ) .....	130
5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load voltage regulation กับแรงดันออก ( $V_o$ ) .....	132
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load current regulation กับกระแสออก ( $I_o$ ) .....	134
5.7 กราฟแสดงการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำและการกระ เพื่อมของแรงดันออก ที่แรงดันออกค่าต่างๆ .....	135
5.8 ผลการทดสอบหาผลตอบทางความถี่ของ $\hat{v}_o/\hat{v}_c$ ที่วัฏจักรงาน 0.8 เปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎี ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	137
5.9 ผลการทดสอบหาผลตอบทางความถี่ของ $\hat{i}_o/\hat{v}_c$ ที่วัฏจักรงาน 0.8 เปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎี ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	138
5.10 ผลการทดสอบหาผลตอบทางความถี่ของ $\hat{v}_o/\hat{v}_r$ ที่วัฏจักรงาน 0.8 เปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎี ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	140
5.11 ผลการทดสอบหาผลตอบทางความถี่ของ $\hat{i}_o/\hat{v}_r$ ที่วัฏจักรงาน 0.8 เปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎี ก. อัตราขยาย ข. มุมเฟส .....	141

สารบัญ

รูปที่	หน้า
5.12 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคแรงดันและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น -10 โวลต์	
ก.แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ข.กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $w$ )	145
ค.แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ง.กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $w$ )	146
5.13 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคแรงดันและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก -10 โวลต์ เป็น 0 โวลต์	
ก.แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ข.กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $w$ )	147
5.14 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคแรงดันและมีการเพิ่มโหลดแบบขั้นจาก -1 แอมแปร์ เป็น -10 แอมแปร์	
ก.แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ข.กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $w$ )	150
5.15 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคแรงดันและมีการลดโหลดแบบขั้นจาก -10 แอมแปร์ เป็น -1 แอมแปร์.	
ก.แรงดันออกกับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ข.กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $w$ )	151
5.16 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเซอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขั้นจาก 0 โวลต์ เป็น +5 โวลต์	
ก.แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ข.กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $w$ )	153
ค.แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ง.กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $w$ )	154

## สารบัญ

รูปที่	หน้า
5.17 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสและได้รับแรงดันตั้งค่าแบบขึ้นจาก +5 โวลต์ เป็น 0 โวลต์	
ก. แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ข. กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $\omega$ ) ..	156
5.18 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสและได้มีการเพิ่มโหลดแบบขึ้นจาก 40 โวลต์ เป็น 100 โวลต์	
ก. แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) .....	
ข. กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $\omega$ ) ....	157
5.19 รูปคลื่นต่างๆเมื่อวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงทำงานในภาคกระแสและได้มีการลดโหลดแบบขึ้นจาก 100 โวลต์ เป็น 40 โวลต์	
ก. แรงดันออก ( $v_o$ ) กับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ )	
ข. กระแสออก ( $i_o$ ) กับความเร็วรอบของมอเตอร์ ( $\omega$ ) ...	158
5.20 กระแสสลับด้านเข้าและแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังเมื่อวงจรขยายเชอร์โวกระแสตรงจ่ายกำลังออก 100 โวลต์ 10 แอมแปร์ .....	160
5.21 กระแสสลับขาเข้าแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังในช่วงหลังจากปิดวงจรสวิตช์ on/off โดยที่มีสภาวะอยู่ตัวเช่นเดียวกับในรูปที่ 5.20 .....	161
5.22 แรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาคกำลังในช่วงหลังจากปิดวงจรสวิตช์ on/off โดยที่มีสภาวะอยู่ตัวเช่นเดียวกับในรูปที่ 5.20 .....	161
5.23 สัญญาณสั่งวงจรขั้วนำเกต SA1, SA2 .....	162
5.24 การกระเพื่อมของแรงดันออก ( $\Delta v_o$ ) และการกระเพื่อมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ( $\Delta i_L$ ) ที่วัฏจักรงานเท่ากับ 0.5 ....	163

สารบัญ

รูปที่	หน้า
5.25 สัณฐานขั้วนำเกิด ( $v_{d_u}$ ) และ กระแสเดรน ( $i_d$ ) ที่วัฏจักรงาน เท่ากับ 0.8 แรงดันออกเท่ากับ 100 โวลต์ กระแสออก 10 แอมแปร์ .....	164
5.26 กระแสเดรน ( $i_d$ ) และแรงดันเดรนซอร์ส ( $v_{d_u}$ ) ที่สภาวะเดียวกับ รูปที่ 5.25 .....	165
5.27 แสดงการเพิ่มขึ้นของแรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับภาค กำลังจากการหยุดหมุนมอเตอร์ในสภาวะเดียวกับรูปที่ 5.13 ..	165



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย