

การออกแบบวงจรมายแบบวิธีสวิตช์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง



นายอรธพร เกษรคุปต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

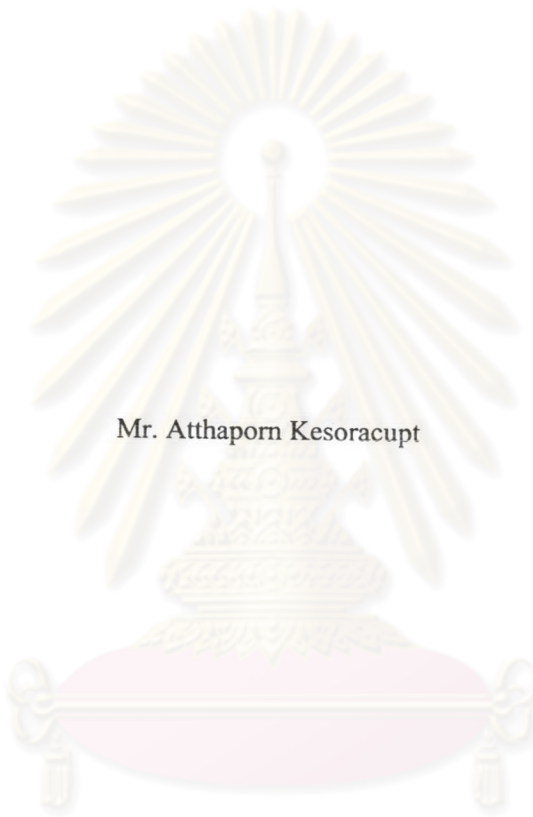
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4917-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21336696

DESIGN OF A SWITCHING POWER AMPLIFIER USING LOW FREQUENCY INVERTER
ACCOMPANIED BY HIGH FREQUENCY INVERTER



Mr. Atthaporn Kesoracupt

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4917-1

อรรถาพร เกษรคุปต์ : การออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง. (DESIGN OF A SWITCHING POWER AMPLIFIER USING LOW FREQUENCY INVERTER ACCOMPANIED BY HIGH FREQUENCY INVERTER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.เจ็ดกุล โสภานิตย์ 76 หน้า. ISBN 974-17-4917-1.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์(คลาสดี) โดยใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ(คลาสดีความถี่ต่ำ)ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง(คลาสดีความถี่สูง) วิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาแนวคิดใหม่ในการปรับปรุงความเพี้ยนของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟตรงค่าสูงร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ และใช้แหล่งจ่ายไฟตรงค่าต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง แนวคิดใหม่ที่ได้นำเสนอ เป็นการพัฒนางจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่แตกต่างจากในอดีตที่ผ่านมาและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวงจรขยายที่เป็นแบบเชิงเส้น วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ทำการออกแบบมีกำลังด้านออกสูงสุด 100 W และ แบนด์วิดท์ 20Hz-20kHz ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรขยายมีประสิทธิภาพ 72% และความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม 2.5% (ที่ความถี่หลักมูล 1 kHz, กำลังด้านออก 100W และโหลดตัวต้านทานขนาด 8 Ω)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิสิต 

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ปีการศึกษา 2546ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

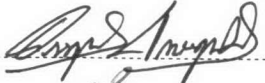

4470649321: MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: SWITCHING AMPLIFIER / ANALOGUE AMPLIFIER / AUDIO AMPLIFIER /
CLASS D AMPLIFIER

ATTHAPORN KESORACUPT: DESIGN OF A SWITCHING POWER AMPLIFIER
USING LOW FREQUENCY INVERTER ACCOMPANIED BY HIGH FREQUENCY
INVERTER. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. CHERDKUL SOPAVANIT, 76 pp.
ISBN 974-17-4917-1.

This thesis presents a design of a switching power amplifier (ClassD) using low frequency inverter (Low Frequency Class D) accompanied by high frequency inverter (High Frequency Class D). A new idea in improving the distortion of the switching power amplifier is by using a high DC supply with low frequency inverter together with a low DC supply with high frequency inverter. The proposed idea is different from the past research works and has efficiency higher than linear power amplifiers. The switching amplifier is designed for 100 W maximum output power and 20Hz-20kHz bandwidth. Experimental results indicate that the efficiency of the amplifier is about 72% and the total harmonic distortion is 2.5% (at fundamental frequency of 1 kHz, 100 W and resistive load 8Ω)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature 
Field of study ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature 
Academic year 2003 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจตกุล โสภานิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย ตลอดจนอาจารย์ และ รุ่นพี่ในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา และเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 โครงสร้างต่างๆของวงจรขยายเสียง.....	3
1.3 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	4
1.4 วัตถุประสงค์.....	5
1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2. โครงสร้างและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	7
2.2 หลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์.....	8
2.3 หลักการทำงานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์.....	9
2.4 ความเพี้ยนของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์เนื่องจากผลของเวลาพัก.....	13
2.5 ความสูญเสียเมื่อเกิดการสวิตช์ของวงจรขยาย.....	15
2.5.1 ความสูญเสียจากการนำกระแส.....	15
2.5.2 ความสูญเสียจากการสวิตช์.....	16
3. การออกแบบวงจรขับนำสวิตช์.....	18
3.1 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 80 kHz.....	18
3.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา.....	18
3.1.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม.....	19

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.1.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	20
3.2 วงจรขับนำสวิตช์.....	21
3.3 วงจรขับนำเกดแบบไม่สมมาตร.....	22
3.4 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 300 kHz.....	23
3.5 ผลการทดลอง.....	24
3.5.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 80 kHz.....	24
3.5.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา.....	24
3.5.1.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม.....	24
3.5.1.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์และวงจรสร้างเวลาพัก.....	25
3.5.1.4 วงจรขับนำสวิตช์.....	26
3.5.2 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ความถี่ 300 kHz.....	26
4. การออกแบบวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	30
4.1 วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง..	30
4.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำ.....	31
4.3 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟตรง.....	33
4.4 การออกแบบวงจรหน่วงเวลา.....	33
4.5 ผลการจำลองการทำงาน โดยโปรแกรม Matlab.....	35
4.5.1 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 1 kHz , 0.85 Vp.....	36
4.5.2 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 kHz , 0.85 Vp.....	38
4.5.3 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 Hz , 0.85 Vp.....	40
4.6 ผลการจำลองการทำงาน โดยโปรแกรม Orcad.....	42
4.6.1 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 1 kHz , 0.85 Vp.....	43
4.6.2 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 kHz , 0.85 Vp.....	45
4.6.3 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 Hz , 0.85 Vp.....	47
5. ผลการทดสอบการทำงานของระบบ.....	49
5.1 ประสิทธิภาพของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	50

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.1.1 ประสิทธิภาพของวงจรขยายที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำเพียงชุดเดียว.....	50
5.1.2 ประสิทธิภาพของวงจรขยายที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	51
5.2 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	52
5.3 ผลการทดลอง.....	54
5.3.1 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 1 kHz , 1.68 Vp.....	54
5.3.2 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 kHz , 1.68 Vp.....	56
5.3.3 ความถี่สัญญาณอ้างอิง 20 Hz , 1.68 Vp.....	58
5.3.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่.....	61
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าตัวเก็บประจุที่ไม่ได้ทำการสเกล(Unscaled) สำหรับวงจรกรองในรูปที่ 2.10.....	34
4.2 ผลการจำลองการทำงานที่ใช้สัญญาณอ้างอิงความถี่ต่างๆ.....	41



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์ (Class D).....	1
1.2 โครงสร้างทั้ง 4 แบบของวงจรขยาย (SMALA).....	3
1.3 วงจรขยายแบบวิธีสวิตช์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	4
2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	7
2.2 อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์.....	8
2.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	9
2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์.....	9
2.5 รูปลักษณะของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์.....	10
2.6 รูปคลื่น PWM ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว.....	11
2.7 ผลของเวลาพัก t_d ต่อรูปคลื่น v_{AN} ของวงจรบริดจ์.....	14
2.8 เส้นทางการนำกระแสของสวิตช์และไดโอด.....	15
2.9 (ก) การไขว้ของกระแสและแรงดันเฉพาะในช่วงเปลี่ยนสถานะ.....	17
(ข) การเหลื่อมกันระหว่างกระแสและแรงดันในช่วงเปลี่ยนสถานะ.....	17
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา.....	18
3.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม.....	19
3.3 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	20
3.4 วงจรขับนำสวิตช์ PWM.....	21
3.5 วงจรขับนำเกตแบบไม่สมมาตร.....	22
3.6 วงจรเชื่อมโยงผ่านแสง.....	23
3.7 สัญญาณนาฬิกาความถี่ 80 kHz และ 160 kHz.....	24
3.8 สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองผ่านสูงและสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 80 kHz.....	25
3.9 สัญญาณ PWM และสัญญาณที่ได้จากวงจรสร้างเวลาพัก.....	25
3.10 สัญญาณขับนำสวิตช์ ความถี่ 80 kHz.....	26
3.11 สัญญาณนาฬิกาความถี่ 300 kHz และ 600 kHz.....	27
3.12 สัญญาณที่ได้จากวงจรกรองผ่านสูงและสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 300 kHz.....	27
3.13 สัญญาณ PWM ทางด้านเข้าและด้านออกของวงจรเชื่อมโยงผ่านแสง.....	28
3.14 สัญญาณ PWM ที่ได้จาก Optocoupler และสัญญาณที่ได้จากวงจรสร้างเวลาพัก.....	28
3.15 สัญญาณขับนำสวิตช์ ความถี่ 300 kHz.....	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 วงจรขยายแบบวิธีสวิทช์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	30
4.2 วงจรกรองผ่านต่ำก่อนทำการชดเชยเฟส.....	32
4.3 วงจรกรองผ่านต่ำหลังทำการชดเชยเฟส.....	32
4.4 ผลตอบเชิงความถี่ก่อนทำการชดเชยเฟสและหลังทำการชดเชยเฟส.....	32
4.5 วงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกทีฟอันดับสอง.....	34
4.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรขยายแบบวิธีสวิทช์ที่ใช้ในการจำลอง.....	35
4.7 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (Vo1) และแรงดันผิดเพี้ยน (Verr) ที่ได้จากกรลต ทอนแรงดันVo1 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	36
4.8 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (Vo2) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (Vo3).....	36
4.9 แรงดันและสเปกตรัมของสัญญาณด้านออก(Vout) ที่ได้จาก การนำแรงดันVo3 มาหักล้างกับแรงดันVo2.....	37
4.10 รูปจำลองสัญญาณเสียงและสเปกตรัมที่ออกจากลำโพงจริงๆ.....	37
4.11 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (Vo1) และแรงดันผิดเพี้ยน (Verr) ที่ได้จากกรลตทอนแรงดันVo1 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	38
4.12 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (Vo2) และ แรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (Vo3).....	38
4.13 แรงดันของสัญญาณด้านออก(Vout) ที่ได้จากการนำแรงดันVo3 มาหักล้างกับ แรงดันVo2 และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงจริงๆ โดยการกรอง ความถี่ที่เกิน 20 kHz ออกไป.....	39
4.14 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (Vo1) และแรงดันผิดเพี้ยน (Verr) ที่ได้จากการลตทอนแรงดันVo1 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	40
4.15 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (Vo2) และ แรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (Vo3).....	40
4.16 แรงดันของสัญญาณด้านออก (Vout) ที่ได้จากการนำแรงดันVo3 มาหักล้างกับ แรงดันVo2 และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงจริงๆ โดยการกรอง ความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป.....	41
4.17 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.18 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	43
4.19 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3}).....	43
4.20 แรงดันของสัญญาณด้านออก (V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้าง กับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงจริงๆ โดยการ กรองความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป.....	44
4.21 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	45
4.22 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3}).....	45
4.23 แรงดันของสัญญาณด้านออก (V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้าง กับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงจริงๆ โดยการ กรองความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป.....	46
4.24 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	47
4.25 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3}).....	47
4.26 แรงดันของสัญญาณด้านออก (V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้าง กับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงจริงๆ โดยการกรอง ความถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป.....	48
5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพและความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม.....	49
5.2 ประสิทธิภาพของวงจรขยายที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำเพียงชุดเดียว.....	50
5.3 ประสิทธิภาพของวงจรขยายในช่วงความถี่เสียง.....	51
5.4 ประสิทธิภาพของวงจรขยายที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	51
5.5 ประสิทธิภาพของวงจรขยายกับความถี่.....	52
5.6 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่กำลังด้านออก 10 W.....	53
5.7 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่กำลังด้านออก 100 W.....	53

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.7 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	54
5.9 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3}).....	55
5.10 แรงดันของสัญญาณด้านออก (V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้าง กับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพง โดยการกรองความ ถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป.....	55
5.11 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	56
5.12 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3}).....	56
5.13 แรงดันของสัญญาณด้านออก (V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้าง กับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพง โดยการกรองความ ถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป.....	57
5.14 แรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ (V_{o1}) และแรงดันผิดเพี้ยน (V_{err}) ที่ได้จากการลดทอนแรงดัน V_{o1} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์.....	58
5.15 แรงดันจากอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำที่ได้รับการชดเชยเฟส (V_{o2}) และแรงดันผิดเพี้ยนที่ถูกขยายโดยอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (V_{o3}).....	58
5.16 แรงดันของสัญญาณด้านออก (V_{out}) ที่ได้จากการนำแรงดัน V_{o2} มาหักล้าง กับแรงดัน V_{o3} และรูปจำลองสัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพง โดยการกรองความ ถี่ที่เกิน 20kHz ออกไป.....	59
5.17 สัญญาณด้านเข้า สัญญาณด้านออก สัญญาณลดทอน และรูปจำลองสัญญาณ เสียงที่ออกจากลำโพง เมื่อทำการป้อนสัญญาณเสียง.....	60
5.18 วงจรกรองผ่านต่ำของอินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำ.....	61
5.19 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำ.....	61
5.20 วงจรสมมูลของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	62
5.21 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรขยายแบบวิธีสวิตช์.....	62
5.22 วงจรสวิตช์กำลังที่ใช้อินเวอร์เตอร์ความถี่ต่ำร่วมกับอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ข.1 แหล่งจ่ายกำลังแบบคุมค่าด้วยการป้อนกลับ.....	72
ข.2 การใช้โอปแอมป์ในแหล่งจ่ายกำลังแบบป้อนกลับ.....	73
ข.3 แหล่งจ่ายไฟตรงที่มีการคุมค่าแรงดันแบบลูปิด.....	74



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย