

การออกแบบวงจรรขยายเสียงคลาสดีร่วมกับคลาสเอ



นาย จักรกฤษณ์ เคลือบวัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

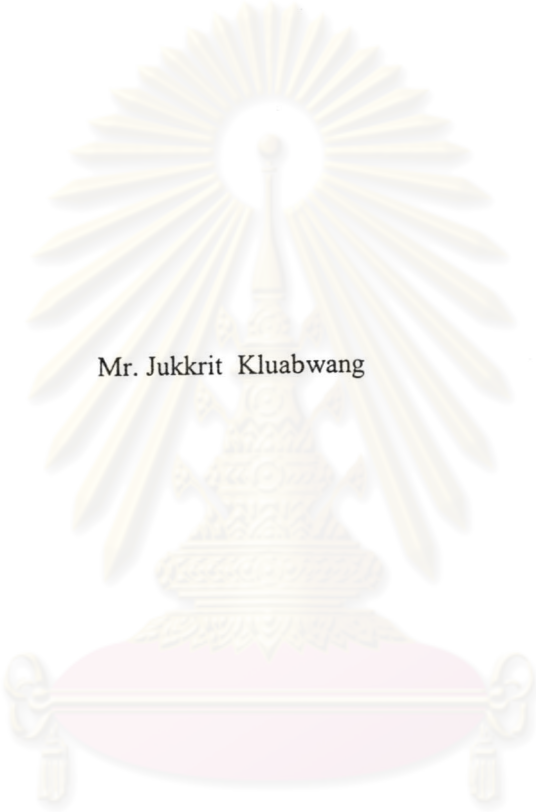
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-5942-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF A CLASS-D ACCOMPANIED BY CLASS-A AUDIO POWER AMPLIFIER

Mr. Jukkrit Kluabwang



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 2004

ISBN 974-17-5942-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบวงจรถยายเสียงคลาสดีร่วมกับคลาสเอ

โดย

นาย จักรกฤษณ์ เคลือบวัง


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจ็ดกุล โสภานิตย์

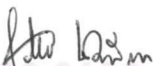
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจ็ดกุล โสภานิตย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพิระยุทธ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

จักรกฤษณ์ เกลือบวัง : การออกแบบวงจรขยายเสียงคลาสดีร่วมกับคลาสเอ. (DESIGN OF A CLASS-D ACCOMPANIED BY CLASS-A AUDIO POWER AMPLIFIER)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. เจตกุล โสภานิตย์, 80 หน้า. ISBN 974-17-5942-8.

การใช้วงจขยายคลาสเอชคเซยแรงดันผิดเพี้ยนของวงจขยายคลาสดีสามารถลดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมของวงจขยายคลาสดีได้ วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวคิดใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพแรงดันด้านออกของวงจขยายเสียงคลาสดีให้มีค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมที่ต่ำลง โดยประยุกต์โครงสร้างการต่อร่วมวงจขยายสองวงจเข้าด้วยกันแบบแรงดัน วงจขยายคลาสดีจะทำหน้าที่หลักในการขยายสัญญาณ ส่วนวงจขยายคลาสเอทำหน้าที่ขยายสัญญาณผิดเพี้ยนจากวงจขยายคลาสดี ผลต่างของแรงดันทั้งสองจะเป็นแรงดันด้านออกที่ตกร้อมโหลด วงจขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอที่ทำการออกแบบมีกำลังออกสูงสุด 100W แบนวิดท์ 20Hz-20.5kHz ผลการทดสอบการทำงานแสดงให้เห็นว่าวงจขยายนี้มีค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม 0.15% และประสิทธิภาพ 61.07% (ที่ความถี่หลักมูล 1kHz , ความถี่การสวิตซ์ 80kHz , กำลังด้านออก 100W และ โหลดตัวต้านทาน 8Ω)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....

4470243121 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEYWORD: CLASS-D AUDIO POWER AMPLIFIER / CLASS-A POWER AMPLIFIER /

ERROR DETECTOR

JUKKRIT KLUABWANG: DESIGN OF A CLASS-D ACCOMPANIED BY CLASS-A AUDIO POWER AMPLIFIER. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHERDKUL SOPAVANIT, 80 pp. ISBN 974-17-5942-8.

THD (Total Harmonic Distortion) of a class-D audio power amplifier is reduced by compensation of its output error using a class-A power amplifier. The key concept of the solution proposed is the combination between two amplifiers in voltage mode to produce the desired output voltage. One class-D audio power amplifier operates as the primary amplifier producing the main voltage for the load, and the other class-A audio power amplifier behaves as the secondary amplifier to amplify the class-D output voltage error for compensation and is connected to the other side of the load. The difference between their output voltage (class-D and class-A) is the output voltage of the proposed amplifier called class-D&A. The class-D&A audio power amplifier in this thesis is designed for 100W maximum output power and a 20Hz-20.5kHz bandwidth. Experimental results indicate that THD of the proposed amplifier is about 0.15% and its efficiency is 61.07% (at 1kHz fundamental frequency, 80kHz switching frequency, output power 100W and 8 Ω resistive load)

Department..... ELECTRICAL ENGINEERING Student's signature.....
 Field of study..... ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's signature.....
 Academic year..... 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและความเอาใจใส่อย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ เจ็ดกุล โสภานิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา รวมทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา กุลวิทิต และ อาจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ในงานวิจัยและการดำรงชีวิต ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลที่ได้สนับสนุนและโอกาสทางการศึกษาสำหรับข้าพเจ้า และขอขอบคุณวันเวลาที่ทำให้ข้าพเจ้าได้มารู้จักกับพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่ดี ๆ ของห้องวิจัยอิเล็กทรอนิกส์แห่งนี้

นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาธรรมิ ที่อนุเคราะห์เครื่องวัดสัญญาณพลวัต (Dynamic Signal Analyzer) Agilent 35670A สำหรับมาวัดค่า THD

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้านด้วยดีเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฅ
รายการสัญลักษณ์.....	ฉ

บทที่

1 บทนำ.....	1
2 ทฤษฎี.....	4
3 การออกแบบ.....	24
4 ผลการทดสอบระบบ.....	51
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมพัทธ์ของฮาร์มอนิกของรูปคลื่น PWM ที่มีการสวิตช์แรงดันแบบ 2 ขั้ว เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของรูปคลื่น	8
3.1 ผลการจำลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพัทต่ออัตราขยายและ สัญญาณผิดเพี้ยน ของวงจรถยายคลาสดี.....	42
3.2 ผลการจำลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การสวิตช์ต่ออัตราขยายและสัญญาณ ผิดเพี้ยน ของวงจรถยายคลาสดี ที่ความถี่ 1kHz และ 20kHz	43
3.3 ผลการคำนวณการสูญเสียในการสวิตช์ของวงจรถยายคลาสดีและการสูญเสีย ในวงจรถยายคลาสเอ ที่ความถี่การสวิตช์ต่าง ๆ	46
3.4 ขนาดของฮาร์มอนิก และค่า THD ณ ความถี่การสวิตช์ต่าง ๆ ที่เวลาพัท 0.8%	48
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวงจรถยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ	59
4.2 ผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การสวิตช์กับขนาดของ สัญญาณผิดเพี้ยน	63
4.3 ผลการจำลองและผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพัทกับขนาดของ สัญญาณผิดเพี้ยน	65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพรวมวงจรขยายในงานวิจัยนี้	2
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรขยายเสียง	4
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรขยายคลาสดี	5
2.3 วงจรกึ่งบริดจ์และลักษณะสถิติ	5
2.4 รูปคลื่น PWM ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบสองขั้วและสเปกตรัม	7
2.5 ความสัมพันธ์ของ v_o และทิศทางของ i_o ในช่วงเวลาพักของวงจรถานอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์	9
2.6 ช่วงการทำงานของอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์	10
2.7 วงจรกรองผ่านต่ำ LC	12
2.8 เส้นโค้งลักษณะขนาดของฟังก์ชันโอนย้าย $\ G\ $ ที่มีสองขั้ว	15
2.9 กราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ของระบบ G ที่มีค่า Q ต่างๆ	16
2.10 บล็อกไดอะแกรมวงจรขยายคลาสเอ	17
2.11 วงจรขยายไม่กลับเฟส	18
2.12 วงจรขยายกลับเฟส	18
2.13 กราฟของอัตราขยายกระแส β และแรงดัน $V_{CE(sat)}$ ของทรานซิสเตอร์ BJT ในฟังก์ชันของ กระแสคอลเลกเตอร์ I_C	20
2.14 ทรานซิสเตอร์คู่คาร์ลิงตัน	20
2.15 วงจรพุ่มพูลที่ใช้ทรานซิสเตอร์ BJT	21
2.16 แบบจำลองการป้อนกลับแบบลบ	22
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา	24
3.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม	26
3.3 วงจรอินทิเกรตที่ใช้จำลอง	27
3.4 วงจรมอดูเลตความกว้างพัลส์	28
3.5 วงจรขับนำเกต รูปคลื่นสัญญาณ PWM HIN และ LIN	29
3.6 วงจรสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์	29
3.7 วงจรเชื่อมโยงผ่านแสง (Optocoupler)	30
3.8 ระบบกราวด์ทั้งหมดของวงจรขยายที่เสนอ	31
3.9 วงจรกรองผ่านต่ำที่ออกแบบได้	32
3.10 กราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำที่ออกแบบได้	32
3.11 ส่วนการตรวจจับสัญญาณผิดเพี้ยน	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 วงจรขยายความต่าง	33
3.13 วงจรกรองผ่านต่ำ RC อันดับสอง แบบไวแกน	34
3.14 วงจรตรวจจับสัญญาณผิเคเพี้ยน	35
3.15 ส่วนปรับอัตราขยาย (Voltage gain adjust)	37
3.16 ส่วนสวิทช์กำลัง	37
3.17 รูปวงจขยายคลาสติที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM 4.1	39
3.18 รูปคลื่นแรงคั้นด้านเข้า แรงคั้นด้านออก และแรงคั้นผิเคเพี้ยน จากการจำลอง	39
3.19 สัญญาณในแกนความถี่ของรูปคลื่น ในรูปที่ 3.19	41
3.20 เวลาพักและขนาดสัญญาณผิเคเพี้ยน	42
3.21 ความถี่การสวิทช์และขนาดสัญญาณผิเคเพี้ยน	44
3.22 ความถี่การสวิทช์กับการสูญเสียในการสวิทช์และการสูญเสียในคลาสเอ	47
3.23 ความถี่การสวิทช์ กับTHDวงจขยายคลาสติจากการจำลอง ที่เวลาพักต่าง ๆ.....	48
3.24 รูปวงจขยายคลาสเอที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Orcad 9.1	49
3.25 ผลการจำลองวงจขยายคลาสเอที่ความถี่ 1kHz ขนาด 1Vp	49
3.26 ผลการจำลองวงจขยายคลาสเอที่ความถี่ 20kHz ขนาด 1Vp	50
3.27 ผลการจำลองวงจขยายคลาสเอที่ความถี่ 20Hz ขนาด 1Vp	50
4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมและประสิทธิภาพ	51
4.2 ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมของวงจขยายคลาสติ คลาสติร่วมกับคลาสเอและคลาสเอ ที่ความถี่ 1kHz แกนนอนเป็นกำลังด้านออก Po ต่อกำลังด้านออกสูงสุด Po(max).....	52
4.3 ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมในย่านความถี่เสียง 20Hz ถึง 20kHz ที่กำลังด้านออก 100วัตต์	53
4.4 ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมในย่านความถี่เสียง 20Hz ถึง 20kHz ที่กำลังด้านออก 50วัตต์	53
4.5 ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมในย่านความถี่เสียง 20Hz ถึง 20kHz ที่กำลังด้านออก 10วัตต์	54
4.6 ค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวมในย่านความถี่เสียง 20Hz ถึง 20kHz ที่กำลังด้านออก 2วัตต์	54
4.7 ประสิทธิภาพของวงจขยายคลาสติ และวงจขยายคลาสติร่วมกับคลาสเอ ที่กำลังด้านออก 1วัตต์ ถึง 100วัตต์ ณ ความถี่ 1kHz	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ประสิทธิภาพของวงจรขยายคลาสดี วงจรขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ และวงจรขยาย คลาสเอแแกนนอนเทียบกำลังด้านออก P_o ต่อกำลังออกสูงสุด $P_o(max)$	57
4.9 ประสิทธิภาพในย่านความถี่เสียง 20kHz ถึง 20kHz ที่กำลังด้านออก 100วัตต์.....	58
4.10 ประสิทธิภาพในย่านความถี่เสียง 20kHz ถึง 20kHz ที่กำลังด้านออก 10วัตต์.....	58
4.11 รูปคลื่นของวงจรขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ ที่กำลังด้านออก ความถี่ 1kHz	59
4.12 รูปคลื่นของวงจรขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ ที่กำลังด้านออก ความถี่ 10kHz	60
4.13 รูปคลื่นของวงจรขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ ที่กำลังด้านออก ความถี่ 100Hz	61
4.14 รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าและด้านออกของวงจรขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ	61
4.15 ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ ที่กำลังด้านออก 100วัตต์	62
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การสวิตช์และขนาดของสัญญาณผิดเพี้ยน	64
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพักและขนาดของสัญญาณผิดเพี้ยน	65
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออก ที่ความถี่ 1kHz	66
4.19 รูปคลื่นของวงจรขยายเสียงคลาสดีร่วมกับคลาสเอ ทดสอบด้วยสัญญาณเสียง	67
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การสวิตช์กับค่าTHD จากการทดลอง	69
4.21 FFT ของวงจรขยายคลาสดี THD 1.622% (ก่อนการชดเชย)	70
4.22 FFT ของวงจรขยายคลาสดี THD 0.094% (หลังการชดเชย)	70
ก.1 วงจรที่ใช้ทดสอบเพื่อหาอิมพีแดนซ์ของลำโพง	74
ก.2 รูปคลื่นแรงดันคร่อมลำโพงและกระแสผ่านลำโพง	75
ก.3 อิมพีแดนซ์ของลำโพงที่ได้จากการทดสอบ (Real)และจากแบบจำลอง (Model) $R\ 8\ \Omega$	76
ก.4 อิมพีแดนซ์ของลำโพงหลังจากชดเชยด้วย วงจรกรอง zobel	76
ข.1 รูปคลื่นสัญญาณของวงจรขยายคลาสดีร่วมกับคลาสเอ ณ กำลังด้านออก 100วัตต์.....	77

รายการสัญลักษณ์

f_s	ความถี่การสวิตช์ที่เวลาใดๆ
M	อัตราการผลิตผัน (แรงดัน) ของวงจรรีโวลต์เตอร์
Q	ตัวประกอบคุณภาพของวงจรกรองผ่านต่ำ (Quality factor)
P_{IN}	กำลังด้านออก (Input power)
P_{OUT}	กำลังด้านออก (Output power)
T	คาบการสวิตช์ ที่เวลาใดๆ
A_v	อัตราขยายแรงดัน (Voltage gain)
β	อัตราขยายกระแสไฟตรงของทรานซิสเตอร์ (Current gain)
ζ	ตัวประกอบหน่วง (Damping factor)
η	ประสิทธิภาพ (Efficiency)
V_{IN}	แรงดันด้านเข้า (Input voltage)
V_O	แรงดันด้านออก (Output voltage)
V_{IN1}	แรงดันด้านเข้าที่ผ่านวงจรหน่วงเวลา
V_{out}	แรงดันด้านออกที่ผ่านวงจรลดทอน
V_{err}	แรงดันผิดเพี้ยนที่ได้จาก $V_{out} - V_{IN1}$
V_a	แรงดันด้านออกของวงจรขยายคลาสเอ
THD	ความเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย