

เพาเวอร์แอมป์คลาสดีที่ใช้ระบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายประสิทธิภาพสูง Class D power amplifiers that use switching power supply efficiency.

นุกุล สุวรรณชาติ ปัญญา มาลีวัตร, เสน่ห์ ไมตรีจิตร

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม 19/1 แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม เพชรเกษมกรุงเทพฯ 10160

E-mail, sanae_53@hotmail.co.th Tel. 086-884-9062

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ขอเสนอการออกแบบและสร้างวงจรเครื่องขยายเสียงคลาสดีซึ่งอาศัยการสวิตซ์ชิงแบบมอดูเลตพัลส์(PWM)ของมอสเฟตกำลังเพื่อขยายกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่จะส่งไปยังลำโพงข้อดีของวงจรนี้คือจะมีประสิทธิภาพสูงถึง93.75% และมีขนาดเล็กกว่าคลาสอื่นๆที่มีกำลังขับเท่ากันและไม่มีปัญหาเรื่องของการระบายความร้อนนอกจากนี้ภาคขับต้องการกำลังเพียงเล็กน้อยก็สามารถขับมอสเฟตกำลังในภาคขยายให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

คำหลัก: คลาสดี , สวิตซ์ชิง, เครื่องขยายเสียง

Abstract

The paper presents the design and construction of a Class- D audio amplifier. The amplifier circuit power MOSFETS to switch in a pulse-width modulation manner so that audio signal is amplifier to drive the speaker. The circuit has higher efficiency to 93.75% and small size than when compared to other classes of amplifier and hence requiring smaller heat-sinks for power dissipation. The control and circuit require only low power to drive the power MOSFETS

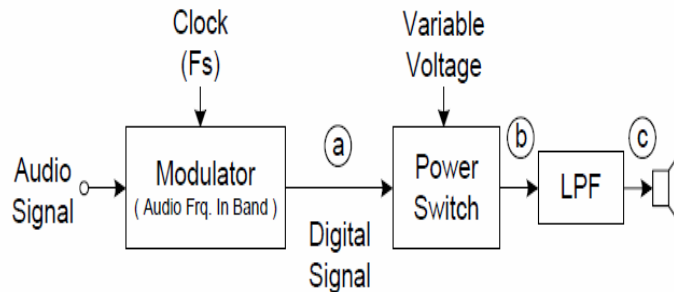
Keywords: Class-D, PWM , Power Amplifier

1. บทนำ

วงจรขยายกำลังงานเสียงเป็นวงจรที่มีการใช้งานกันมากโดยเฉพาะเครื่องขยายเสียงกลางแจ้ง(PA) และเครื่องขยายเสียงที่มีกำลังวัตต์สูงๆแต่เนื่องจากมีน้ำหนักมากดังนั้นจึงมีการแข่งขันระหว่างผู้ผลิตวงจรและเป็นปัจจัยหนึ่งของงานวิจัยที่ต้องศึกษานั้นคือน้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูงและกำลังขยายได้กำลังวัตต์สูงอีกด้วย

เพื่อพัฒนาเทคนิคในการขยายกำลังงานเสียงให้มีประสิทธิภาพสูงคุณภาพเสียงดีน้ำหนักเบาและราคาถูกโดยวงจรขยายกำลังงานเสียงที่ได้แบ่งประเภทตามเทคนิคในการขยายเสียงเป็นคลาสนั้นเช่นคลาส-เอ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 25%, คลาส-บี ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 75%เป็นการใช้ทรานซิสเตอร์2 ตัวทำงานแบบPush-Pull ความผิดเพี้ยนสูงมากถูกพัฒนามาเป็นคลาส-เอบี, และ คลาส-ดีมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 95%, คลาส-จีจะทำงานโดยภาคขยายเสียงจะปรับไปใช้ไฟเลี้ยงที่สูงขึ้นหากสัญญาณขาเข้ามีความแรงมากขึ้นจึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นแต่มีปัญหาในช่วงการเปลี่ยนจากภาคจ่ายไฟที่จะปรับใช้ในแต่ละความแรงของสัญญาณ, และคลาส-เอสคือการทำงานของภาคขยายเสียงที่ทำงานแบบ

switching ที่มีการทำงานแบบเปิด/ปิดอยู่ตลอดเวลาและต้องใช้วงจรกรองความถี่แบบ low pass สำหรับบทความนี้
ขอนำเสนอคลาสดีซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบันและมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางอันเนื่องมาจากข้อดีต่างๆเช่นมี
การใช้กระแสจากแหล่งจ่ายน้อยความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำจึงต้องการ Heat Sink ขนาดเล็กราคาถูก, มีประสิทธิภาพสูง
โดยหลักการขยายกำลังงานเสียงคลาสดีมีการทำงานตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการขยายเสียงคลาสดี

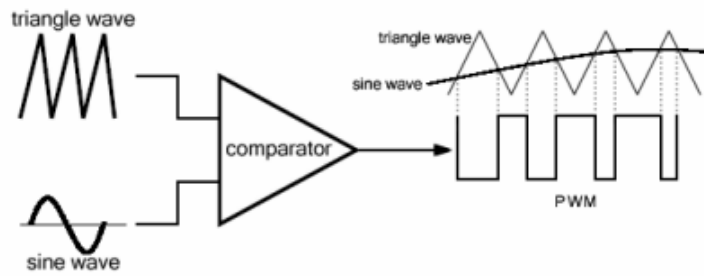
จากรูปที่ 1 สัญญาณเสียงจะผ่านมอดูเลเตอร์เพื่อแปลงเสียงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่จุด a โดยสัญญาณดิจิทัลที่ได้
จะต้องยังคงมีองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณเสียงอยู่ด้วยหลังจากนั้นจะนำสัญญาณดิจิทัลไปขยายกำลังโดย
ควบคุมทรานซิสเตอร์แบบเฟต (FET) และเมื่อนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter : LPF) ก็จะได้
สัญญาณเสียงที่มีกำลังงานเพิ่มขึ้นกลับคืนมาที่จุด c และนำไปขับลำโพงต่อไปและ ในบทความวิจัยเลือกใช้ ไอซีเบอร์
IRS2092 คุณสมบัติเป็นวงจรรวมแบบอนาล็อก ทำงาน PWM frequency สูงถึง 800 kHz ซึ่งจะช่วยปรับช่วงกำลังงาน
ของสัญญาณรบกวนจากการควอนไทซ์ (Quantization Noise) ให้ไปอยู่ในช่วงความถี่สูงดังนั้นในช่วงความถี่เสียง (Fs)
สัญญาณรบกวนจะถูกปรับลดลงคุณภาพเสียงจะดีขึ้นและเมื่อนำมาใช้ในการขยายกำลังงานเสียงและเสียงที่ผ่านการ
ขยายก็จะมีคุณภาพดีขึ้นด้วย

2. หลักการการทำงานของคลาส-D

คลาส-ดีถูกออกแบบมาให้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพแทนที่จะต้องเสียกำลังไปใน MOSFETs ที่เอาต์พุตการทำงาน
ถ้าไม่มีโวลเตจเสียก็ปิดวงจรตลอดส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพเต็มร้อยดังนั้นสัญญาณอินพุตอนาล็อกจะถูกแปลงเป็น
สัญญาณ PWM และแปลงกลับเป็นอนาล็อกทำให้เกิดการเสียของสัญญาณไป

2.1. Pulse Width Modulation (PWM)

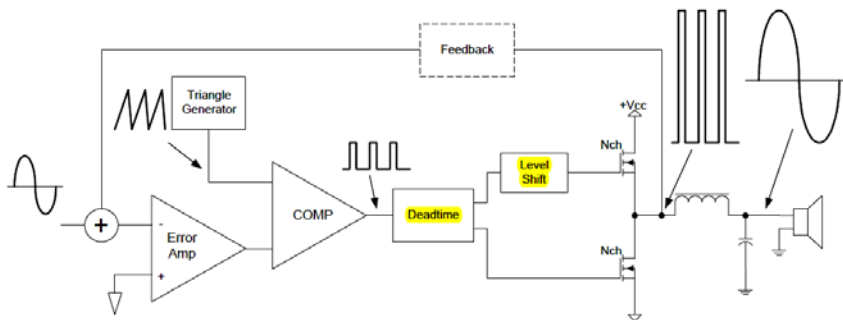
หลักการทั่วไปเครื่องขยายเสียงคลาส-ดีจะใช้การมอดูเลเตอร์แบบ Pulse Width Modulation (PWM) จะมีสัญญาณ
ควบคุมการทำงานอุปกรณ์สวิทซ์ซึ่ง คือการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณพัลส์ คล้ายกับรหัสดิจิทัล สามารถ
สร้างได้โดยนำเอาสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณเสียงมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2



รูปที่2การเปรียบเทียบสัญญาณคลาส-ดี

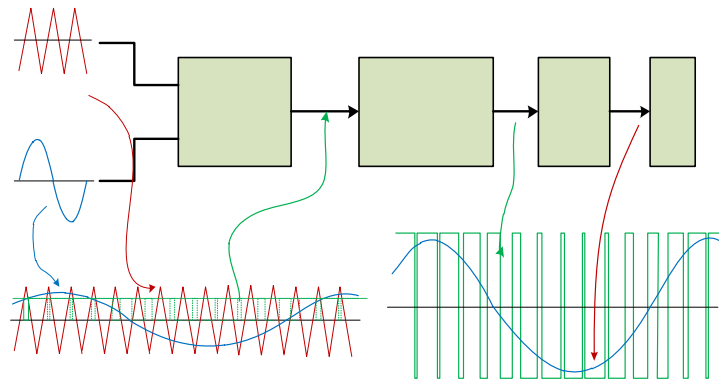
ในรูปที่3บล็อกไดอะแกรมของเครื่องขยายเสียงคลาสดีแบบ Half Bridge ประกอบด้วยรูปคลื่นแต่ละภาค ในวงจรมีการ Feedback จากเอาต์พุตของวงจร half-bridge ทำหน้าที่เป็นหน่วยงานกำกับดูแลเชิงเส้นเพื่อช่วยควบคุมค่าแรงดันที่เอาต์พุต

เครื่องขยายเสียงคลาส-ดีจะใช้ในรูปแบบที่แตกต่างกันจะมีแบบดิจิตอลและแบบอนาล็อกทั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่ชนิดแบบอนาล็อก



รูปที่3บล็อกการขยายกำลังงานเสียงคลาส-ดี

เครื่องขยายเสียงคลาส-ดีทำงานมากเช่นเดียวกับแหล่งจ่ายไฟPWM (เราจะแสดงการเปรียบเทียบในภายหลัง) ขอเริ่มต้นด้วยสมมติฐานที่ว่าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณเสียงมีระดับสัญญาณเสียงมาตรฐานและรูปสัญญาณเป็นรูปคลื่นซายน์ที่มีความถี่ตั้งแต่20Hz ถึง20kHz เมื่อนำสัญญาณนี้เมื่อเปรียบเทียบกับสามเหลี่ยมความถี่สูงหรือรูปคลื่นฟันเลื่อยเพื่อสร้างสัญญาณPWM ในรูปที่4สัญญาณPWM นี้จะนำมาใช้ในการขับกำลังงานในภาคต่อไป, การสร้างเครื่องขยายสัญญาณดิจิตอลและภาคสุดท้ายจะใช้วงจรกรองผ่านต่ำกรองความถี่พาหะของ PWM และปรับสภาพสัญญาณเสียงเป็นรูปคลื่นซายน์ (ดังแสดงในรูปที่4b)



(ก) PWM signal (ข)เอาต์พุต Filtering

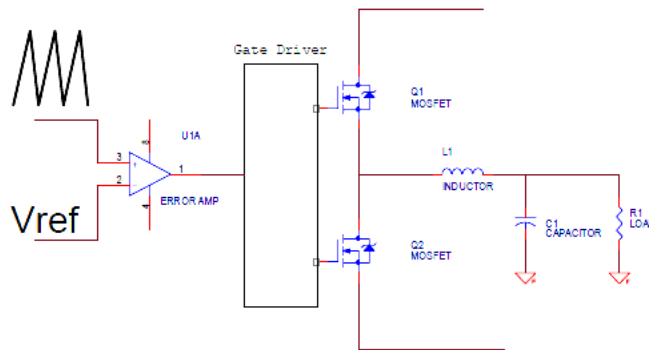
รูปที่4บล็อกการขยายกำลังงานเสียงคลาส-D

Comparator

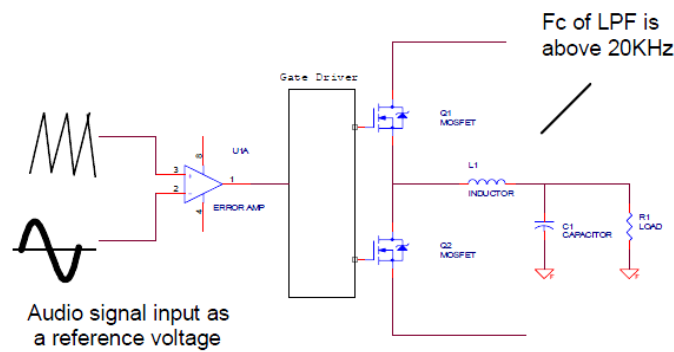
Class
Switch

2.2.การแปลงสัญญาณ

โครงสร้างเป็นหลักจะคล้ายคลึงกันระหว่าง คลาส ดีและแบบ **Buck Converter**เช่นเดียวกับที่สามารถมองเห็นด้านล่างในรูปที่5



(ก) Buck Converter



(ข) คลาส ดี

รูปที่5การขยาย (ก)Synchronous Buck Converter (ข)เครื่องขยายคลาสดี

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างสองวงจรคือการที่สัญญาณอ้างอิงของการแปลงสัญญาณ **synchronous** จะมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากการวงจรป้อนกลับซ้ำ (ถ้าให้แรงดันไฟฟ้าคงที่) ในกรณีของเครื่องขยายคลาสดีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณเสียงซึ่งหมายความว่ารอบการทำงานที่ค่อนข้างสัมพันธ์ในการแปลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ทำที่หน้าที่การแปลง โดยจะเฉลี่ย duty ที่ 50%

การแปลงสัญญาณแบบ **synchronous** กระแสที่ไหลผ่านโหลดเสมอแต่ใน คลาส ดีกระแสไหลทั้งสองทิศทาง ข้อแตกต่างใน MOSFETs ที่เหมาะสม จะแตกต่างกันคือการเพิ่มประสิทธิภาพด้านลอจิกสูงและค่า MOSFETs, ของ duty cycle ที่ประกอบด้วย $R_{DS(on)}$ ส่วนที่เครื่องขยายเสียงคลาส ดีจะมีประสิทธิภาพที่ MOSFETs ทั้งสองเหมาะสม ประกอบด้วย $R_{DS(on)}$ ด้านลอจิกสูงและต่ำ

2.3. กำลังงานที่สูญเสียใน MOSFETs

การสูญเสียกำลังงานในการสวิตช์ที่แตกต่างกันมากระหว่างเครื่องขยายแบบเชิงเส้นและเครื่องขยาย คลาส ดีอันดับแรกคือการสูญเสียในเครื่องขยายเสียงคลาส AB เชิงเส้นสามารถหาได้จาก

$$P_C = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{V_{CC}}{2} (1 - K \sin \omega t) \frac{V_{CC}}{2 \cdot R_L} K \sin \omega t \cdot d\omega t$$

เมื่อ K คืออัตราส่วนของ V_{bus} ที่แรงดันเอาต์พุต

สามารถจะลดรูปสมการของกำลังงานที่สูญเสียที่สวิตช์ของเครื่องขยายเชิงเส้น ได้

$$P_{tot} = \frac{V_{CC}^2}{8\pi \cdot R_L} \cdot \left(\frac{2K}{\pi} - \frac{K^2}{2} \right)$$

ขณะที่การสูญเสียของเครื่องขยาย คลาส ดีกำลังงานสูญเสียที่เอาต์พุตของอุปกรณ์จะได้

$$P_{Total} = P_{sw} + P_{cond} + P_{gd}$$

และ P_{sw} การสูญเสียจากการสวิตช์และได้จากสมการ

$$P_{sw} = C_{oss} \cdot V_{BUS}^2 \cdot f_{PWM} + I_D \cdot V_{DS} \cdot t_f \cdot f_{PWM}$$

และ P_{cond} การสูญเสียจากตัวนำหาได้จากสมการ

$$P_{cond} = \frac{R_{DS(ON)}}{R_L} \cdot P_o$$

และ P_{gd} การสูญเสียจาก gate drive หาได้จากสมการ

$$P_{gd} = 2Q_g \cdot V_{gs} \cdot f_{PWM}$$

2.4. THD and Dead Time

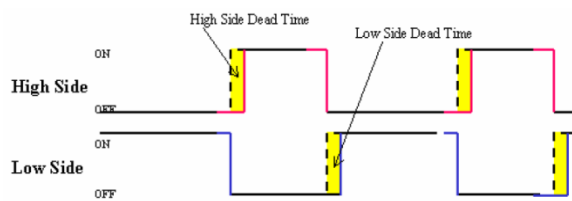
ในการทำงาน คลาส ดีแบ่งออกเป็นสามบริเวณที่แตกต่างกันของสัญญาณเอาต์พุตขึ้นอยู่กับระยะเวลาการป้อนข้อมูลทางอินพุตที่บริเวณทำงานแตกต่างกันคือขอบด้านลอจิกสูงและลอจิกต่ำของสัญญาณ และพบว่าบริเวณการทำงานกระแส เอาต์พุตจะไหลไปยังโหลดมีขนาดใหญ่ผ่านขดลวดคือกระแสกระเพื่อมเหนี่ยวนำ

เมื่อขอบลอจิกด้านสูง turn-off และก่อนที่จะขอบลอจิกด้านต่ำ turn-on ที่จุดเอาต์พุตจะได้โฟลต DC ผลจากการเหนี่ยวนำกระแสขดลวดที่เกิดขึ้นอัตโนมัติซึ่งจะไม่ดำเนินเวลา turn-on ลอจิกด้านล่าง ดังนั้นระยะเวลาในรูปแบบคลื่นที่

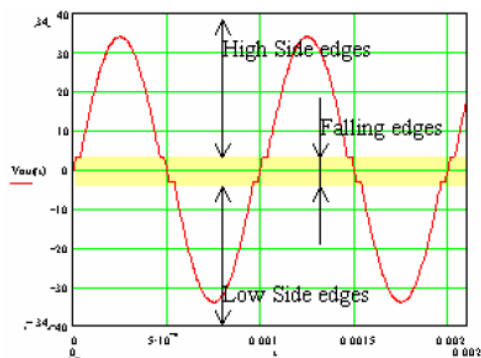
เอาต์พุต จะไม่มีผลจาก dead-time ที่เกิด turn-on ลอจิกด้านล่าง และตามอินพุต timing ลอจิกด้านล่าง ดังนั้นที่อินพุต duty cycle รูปคลื่น PWM จะ แคลบลงในช่วงของ dead-time ที่เกิดจากลอจิกด้านล่างของสัญญาณ gate ผลอัตราขยายแรงดัน ลดลงเล็กน้อยตามที่คาดไว้

ในทำนองเดียวกันบริเวณทำงานด้านทางลบที่กระแสเอาต์พุตของ คลาส ดี จะไหลผ่านโหลด จะมีปริมาณของกระแส ขนาดใหญ่กว่ากระแสเพื่อเหนี่ยวนำในปัจจุบัน ในกรณีนี้รูปคลื่นเอาต์พุตจะไม่ได้รับผลกระทบจาก dead-time ดังนั้น รูปแบบของคลื่น PWM จะสั้นลงโดยเฉพาะ dead-time ที่เกิดขึ้นใน gate signal ด้านต่ำ

บริเวณระหว่างสองโหมคการทำงานที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ระยะเอาต์พุต timing จะเป็นอิสระจาก dead-time เมื่อ กระแสเอาต์พุตมีขนาดเล็กกว่ากระแสเพื่อเหนี่ยวนำกระแสเอาต์พุต timing ผ่าน ไปตามจังหวะของ turn-off ของอินพุต เพราะบริเวณ turn-on จะกระทำโดย ZVS (Zero Voltage Switching) การทำงานจึงไม่มีความเพี้ยนในบริเวณกึ่งกลางนี้ ในขณะที่กระแสเอาต์พุตปรับเปลี่ยนตามสัญญาณเสียงคลาส ดีก็จะเปลี่ยนบริเวณการทำงานที่แตกต่างกันเล็กน้อย ส่วน สัญญาณเอาต์พุตจะผิดเพี้ยน สามบริเวณที่ขยายจะแตกต่างกันใน 1 รอบของสัญญาณเสียง ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า dead time มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานถ้า dead time 40ns สามารถสร้าง 2% THD และปรับปรุงให้ดีขึ้นถึง 0.2% โดยการปรับให้ dead time 15ns สิ่งสำคัญที่จะสวิตช์ลอจิกด้านล่างและจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายเชิงเส้นที่ดี



(ก)

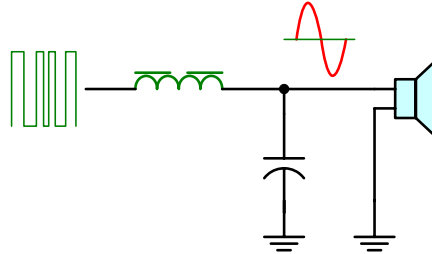


(ข)

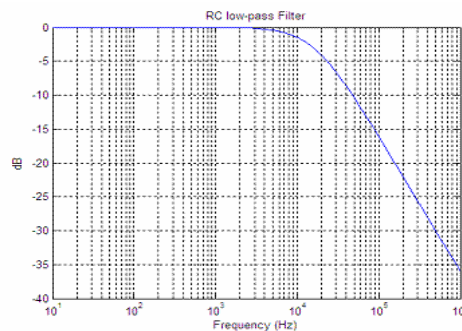
รูปที่ 6 สัญญาณ Dead-time

2.4. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ภาคสุดท้ายของเครื่องขยาย คลาส ดีเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน LPF คุณสมบัติจะผ่านสัญญาณช่วงความถี่ต่ำย่านเสียง ประมาณ 20 Hz ถึง 20 kHz ส่วนความถี่สูงที่ไม่ต้องการจะถูกลดทอนออกไปดังรูปที่ 7



(ก)

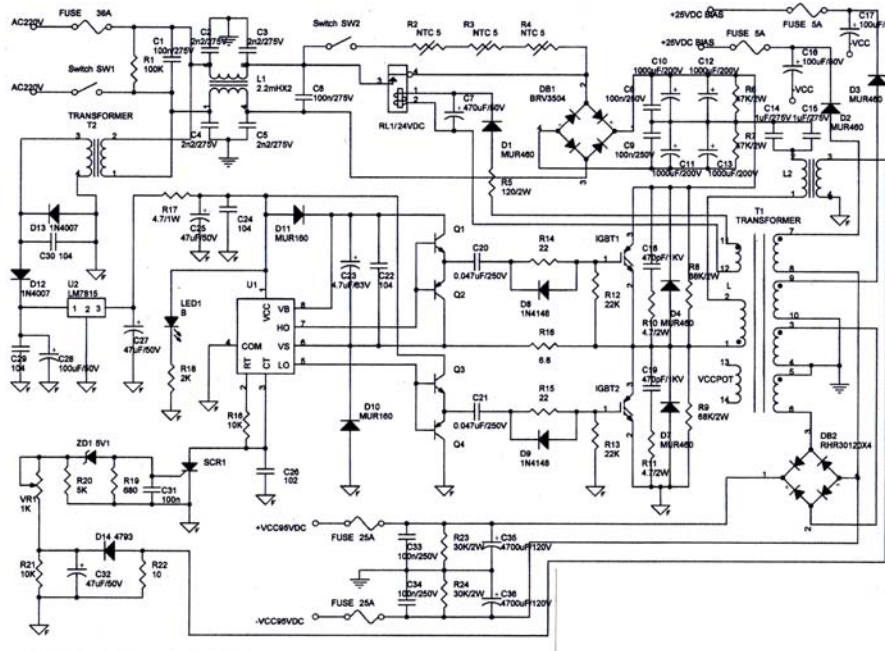


(ข)

รูปที่ 7 กรองความถี่ต่ำผ่านและผลตอบสนอง LPF

2.5 วงจรภาคจ่ายไฟระบบสวิทซ์ซิงเพาเวอร์ซัพพลาย

เครื่องขยายคลาส ดีและแหล่งจ่ายสวิทซ์ซิงเพาเวอร์ซัพพลายการออกแบบแหล่งจ่ายของภาคขยายกำลังเลือกใช้แบบสวิทซ์ซิงเพราะมีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเล็กโดยใช้แหล่งจ่ายไฟ 220 VAC ในบทความนี้ได้ออกแบบแหล่งจ่ายที่เป็นระบบสวิทซ์ซิงมีขนาดแรงดัน $\pm 60V_{DC}$ เพื่อลดน้ำหนักของเครื่องเสียง คลาส ดีและให้เป็นแหล่งจ่ายที่มีระบบ protection ป้องกันการเสียหายของวงจรเมื่อกำลังโหลดเกินพิกัดทั้งนี้จะไม่ขอบรรยายในส่วนนี้

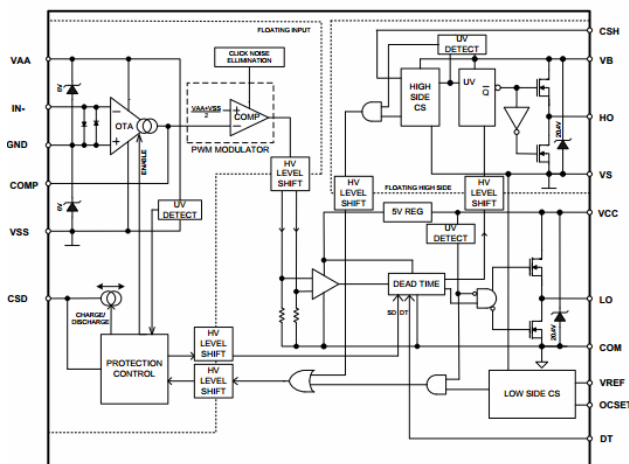


รูปที่ 8 ภาคจ่ายไฟระบบสวิทซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย

3. วงจรการทำงานของคลาสดีและการออกแบบ

3.1 วงจรขับเคลื่อน

เนื่องจากไอซีเบอร์ IRS2092 เป็นไอซีที่เป็นวงจรรวมแบบอนาล็อก คลาส ดีด้านเสียง มีวงจรต่างๆ หลายส่วนเช่น วงจร OTA และวงจรเปรียบเทียบ สำหรับกำเนิดสัญญาณ PWM วงจรเกตเพื่อที่จะขับอุปกรณ์ภายนอก วงจร Dead-time สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรขับเคลื่อนให้ทำงานที่มีประสิทธิภาพ เพื่อนำไป Drive Gate ของ MOFETs หรือ IGBT ที่ต่อวงจร ดังรูปที่ 9 โดยทางด้านอินพุตจะรับสัญญาณแล้วผ่านวงจรขมิดต์ทริกเกอร์แบบ OTA เพื่อให้สัญญาณเกิดความแน่นอนมากขึ้นผ่านวงจรเปรียบเทียบ



รูปที่ 9 วงจรภายในของ IRS2092

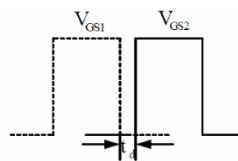
จากนั้น IRS2092 จะจัดการสร้างสัญญาณ Drive Gate ขึ้นมาซึ่งสัญญาณที่ Drive Gate นี้จะถูกส่งออกมาทางขา 14 ซึ่งเป็นขา Ho ไฟ Drive Gate ทาง Low ซึ่งสัญญาณที่ Drive Gate นี้จะต้องผ่านกระบวนการจัดการทางด้าน Dead Time ภายในตัว IRS 2092 ด้วยการตั้งค่าแรงดันที่ R_1, R_2 ให้ค่า Dead-time ตามต้องการ ก่อนที่จะถูกส่งไป Drive Gate ของ Power MOSFETs ให้ทำการสวิตช์ด้วยความถี่สูงแล้วส่งสัญญาณความถี่สูงที่เป็นสัญญาณแบบดิจิทัลส่งเข้ายังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแปลงสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบอนาลอก ต่อไป

3.2. วงจรขับแบบสวิตช์ซิง [3]

ภาคขยายจะประกอบด้วยวงจร 2 ส่วนคือวงจร Drive Gate และวงจรภาคขยายกำลังสวิตช์ซิงแบบ half bridge จะประกอบด้วย MOSFETs 2 ตัวในบทความนี้ใช้กับวงจร Drive Gate หนึ่งชุด โดยสัญญาณ Gate จะต่างเฟสกัน ส่วน Full bridge จะใช้ MOSFETs 4 ตัวต่อในลักษณะ Complementary ทำหน้าที่คล้ายกับสวิตช์ on-off จะสลับกันทำงาน

3.3. วงจรสร้าง Dead Time

เนื่องจากสัญญาณขับเกตของมอสเฟสกำลังทั้งสองนั้นจะต้องไม่ทำงานพร้อมกัน โดยจะต้องสลับกันทำงานคนละครึ่งหรือสัญญาณที่ได้จากวงจร PWM ซึ่งจะมีเวลาห่างกันเรียกว่า dead time (td) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 dead time (td)

การสร้างสัญญาณ Dead Time สามารถสร้างได้จากการตั้งค่าแรงดันที่ R_1, R_2 วงจรจริง R_{13}, R_{14} ในบทความนี้ใช้ DT4 กำหนด td ของตัวบน $5\mu s$ และตัวล่างไว้ที่ $3\mu s$ ตามลำดับ

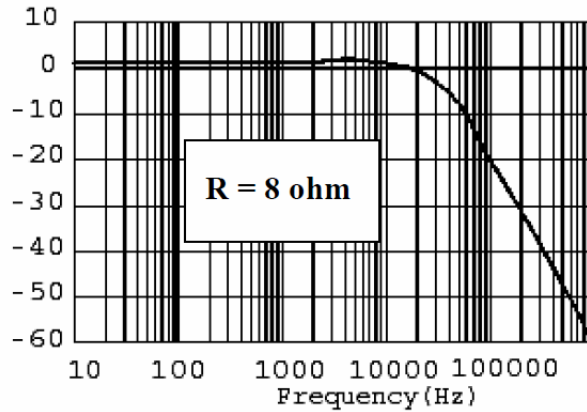
3.4. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำที่ใช้ในวงจรนี้มี 2 วงจรคือที่ทางด้านอินพุตและที่ทางด้านเอาต์พุตของเครื่องขยายเสียงโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำแบบอันดับสอง (Second order) หรืออันดับสาม (third-order) วงจรกรองความถี่ต่ำแบบอันดับสองดังรูปที่ 7a จะทำให้เกิดการกระเพื่อมและเกิดการหน่วงเกินเล็กน้อยซึ่งทำให้ระดับสัญญาณเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงความถี่สูง

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า L, C ดังสมการข้างล่างนี้

$$L = \frac{1.414 R_L}{2 \pi f_c}$$

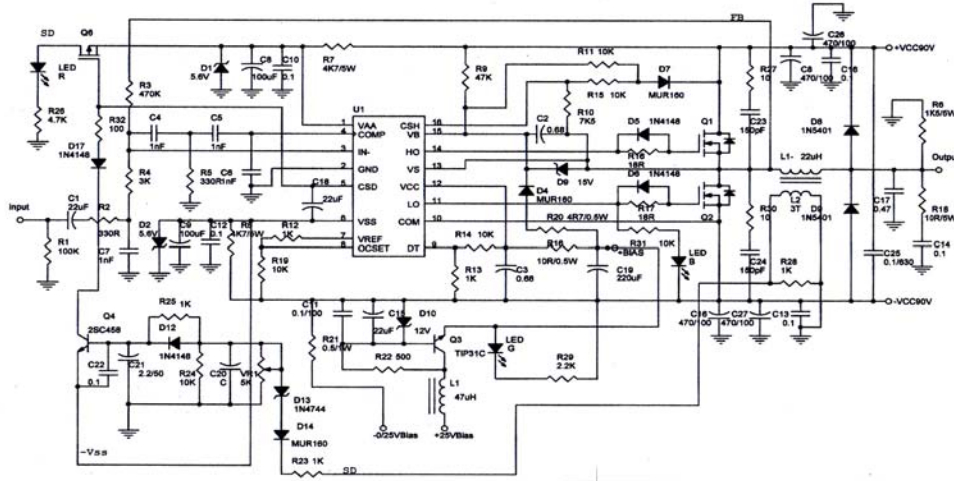
$$C = \frac{0.707}{2 \pi f_c R_L}$$



รูปที่11กราฟตอบสนองของวงจรกรองLPF

3.5. วงจรจริงที่ใช้ทดสอบ

วงจรขยายตามรูปที่ 12 เป็นเครื่องขยายกำลังงานเสียงคลาส ดีที่สมบรูณ์ใช้ทดสอบหาค่าประสิทธิภาพจะประกอบด้วย สัญญาณการทำงานเข้าสู่การสร้างสัญญาณที่ออกจาก IRS2092 และสัญญาณจะที่ Invert กับสัญญาณที่เข้ามาเพราะ ต้องการมีสัญญาณสองสัญญาณเพื่อขับ MOSFETs 2 ตัวสลับกัน โดยเลือกใช้ระบบ Power Switch ขนาดแรงดัน จ่าย $\pm 60V_{DC}$ หรือ $120V_{DC}$ ควบคุมการสวิทช์ด้วยความถี่ 50 KHz ให้ระบบ Gate Driver ของ MOSFETs IRF520 และ IRFIZ24N ให้เกิดการสวิทช์แบบ Half bridge จะส่งพลังงานแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดหม้อแปลง T1 ซึ่งเป็นหม้อแปลงความถี่สูงชนิดแกนฟอร์ไรร์ จะเกิดการยุบตัวในขด primary และ secondary จากนั้นจะถูกเรียงกระแส ด้วยไดโอดความเร็วสูง DB2 ในระบบ Full-wave ในแบบ Center-tap และ C35 และ C36 ทำหน้าที่ฟิลเตอร์ DC เอาต์พุต R23, R24 และ C33 C34 ทำหน้าที่เป็นวงจรไบแ่คป์ปรับค่าความสมดุลและดิสชาร์จไฟออกเมื่อวงจรหยุดทำงานส่วน แรงดันที่เอาต์พุตจะถูกส่งผ่านฟิวส์ขนาด 25 A

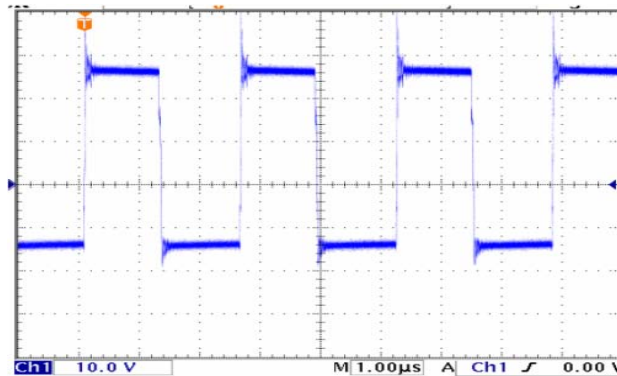


รูปที่ 12 เครื่องขยายเสียง คลาส ดีที่ใช้ทดสอบ

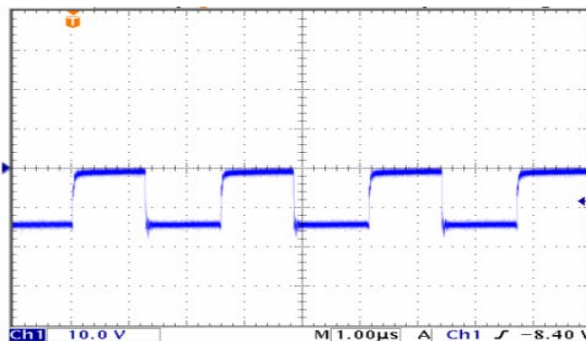
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการวัดด้วย Oscilloscope

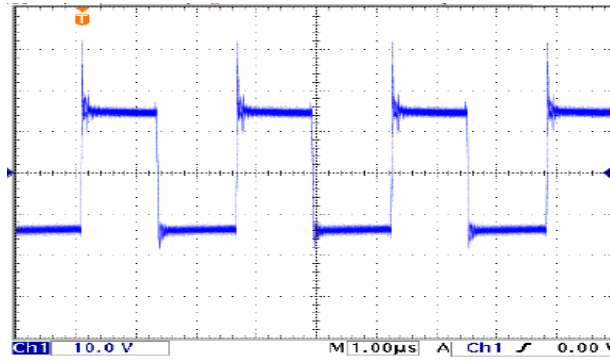
การทดสอบการวัดสัญญาณ gate Diver จากวงจรจริงในรูปที่ 12 ด้วย oscilloscope ที่ขา 14 (HO) และขา 11 (LO) ของ IRS2092 ด้วยความถี่รูปซายน์ 1 kHz ที่แรงดัน อินพุต 200 mVp-p โหลด เอาต์พุต 8 Ω



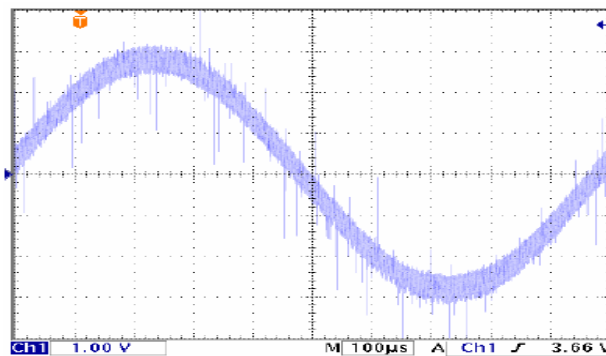
รูปที่ 13 สัญญาณที่ขา 14 (HO)



รูปที่ 14 สัญญาณที่ขา 11 (LO)



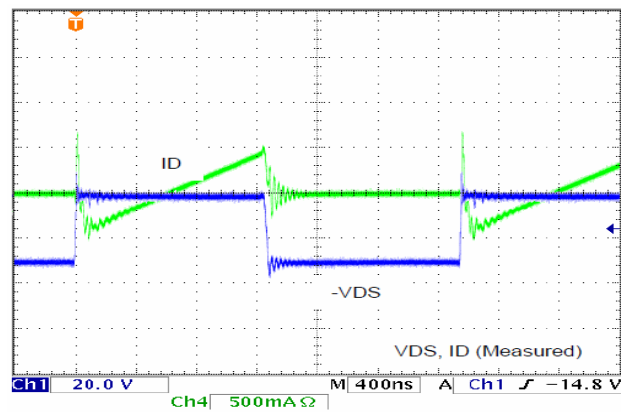
รูปที่ 15 สัญญาณที่ขา 13(VS)



รูปที่ 16 สัญญาณที่เอาต์พุตเมื่ออินพุต 0.2V

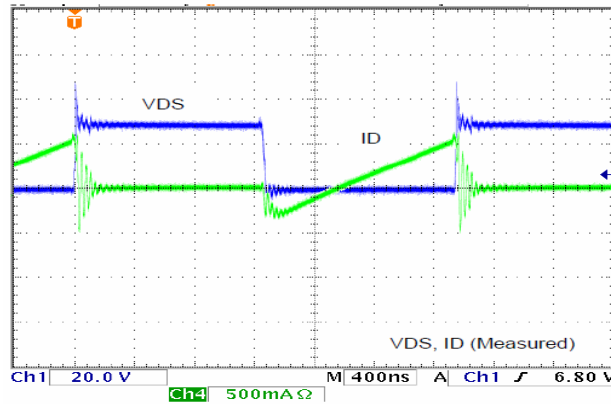
The total power loss in MOSFETs are given by

ผลรูปการทำงานที่ FET1: I_D และ V_{DS} ด้วย scope



รูปที่ 17 สัญญาณการทำงานที่ FET1

ผลรูปการทำงานที่ FET2: I_D และ V_{DS} ด้วย scope



รูปที่ 18 สัญญาณการทำงานที่ FET 2

4.2 ผลการประสิทธิภาพและกำลังงาน

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องขยายเสียงคลาส ดีได้จาก

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

-ที่ โหลด 8Ω : เมื่อ วัดแรงดันอินพุต = 1.2 V

ค่าวัดแรงดัน เอาต์พุตด้วย AC มิเตอร์ได้ = 60.75 V

$$\text{ค่าคำนวณจากสมการ } P = \frac{V^2}{R} = 450W.$$

-ที่ โหลด 4Ω : วัดแรงดันอินพุต = 1.2 V

ค่าวัดแรงดัน เอาต์พุตด้วย AC มิเตอร์ได้ = 50.25 V

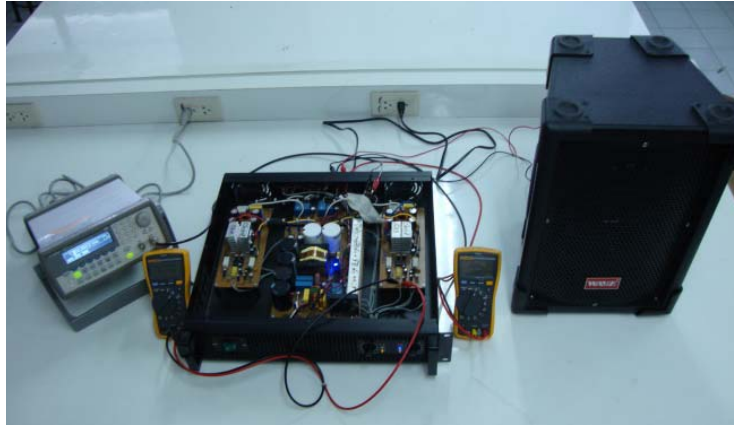
$$\text{ค่าคำนวณจากสมการ } P = \frac{V^2}{R} = 625W.$$

ประสิทธิภาพเครื่องขยายเสียงที่โหลด 8Ω :

P_2 คือกำลังไฟฟ้าวัดแรงดัน เอาต์พุตด้วย AC มิเตอร์ได้ = 60.75 V คิดคำนวณกำลังไฟฟ้าได้ 450W

จากจุด Supply ที่วัดจะมีค่ากำลังวัตต์สูงกว่าจุดอื่นเนื่องมาจากวัตไฟที่ 220 VAC เมื่อเปรียบเทียบกับซึ่งที่จุด P_1 คือกำลังวัตต์ของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง $\pm 60V_{DC}$ หรือ $120V_{DC}$ กระแส = 4A จะได้ 480W

ฉะนั้น $\eta = 93.75 \%$



รูปที่ 19 เครื่องขยาย คลาส ดีที่ทดสอบ

5.สรุปผลวิจัย

เครื่องขยาย คลาส ดีที่วิจัยนี้พบว่าเครื่องเสียงให้กำลังงานทาง เอาต์พุตสูง 450 W ที่โหลด 8 Ω : เมื่อ ปรับแรงดันอินพุต =1.2 Vขณะที่สัญญาณไม่เพี้ยน ซึ่งเปรียบเทียบกับอัตราขยายแล้วอยู่ประมาณ 35-40 เท่า ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความไวในการ Switching ของFET,ค่าdelay จากPropagation Delay และจากDelay ของไอซีIRS2092ที่ใช้สร้างสัญญาณInvert แต่ก็เป็นค่าความถี่ที่ลดลงเล็กน้อยในส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะค่อนข้างร้อนที่ขดลวด ถ้าออกแบบให้ดีขึ้นไม่มีสัญญาณคลื่นพาร์ป่นออกมาและเมื่อเพิ่มไฟเลี้ยงให้กับวงจร MOSFETsก็จะขยายกำลังงานเพิ่มขึ้นได้อีก