การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V

The Design of a Gate Drive Circuit for Inverter DC 12V to AC 220V

กฤษ เฉยไสย* ณัฐพงษ์ แก่นมาลี และ ไปรยา เฉยไสย

Krit Choeisai1* Nattapong Keanmalee and Pairaya Choeisai

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Faculty of Engineering ,Khon Kaen University, Thailand,

***Corresponding Author E-mail**: kritchoeisai@kku.ac.th

Received: 28/08/24, **Revised**: 1/10/24, **Accepted**: 1/10/24

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงการออกแบบวงจรขับเกตสำหรับเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V วงจรที่ออกแบบมาจะนำไปเป็นต้นแบบเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในอนาคต วงจรที่นำเสนอนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ แบบ NPN และ PNP ร่วมกัน ส่วนอุปกรณ์อื่นๆเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่สามารถจัดหาได้ง่าย ทำให้เมื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แล้วสามารถจัดหาอุปกรณ์ได้โดยไม่ขาดตอน นอกจากนี้การใช้ทรานซิสเตอร์ทำให้มีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้ IC สำเร็จรูป จากการทดสอบการทำงานของวงจรที่นำเสนอแสดงให้เห็นได้ว่า วงจรขับเกตสำหรับเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V ที่ได้ออกแบบมานั้นสามารถใช้ขับหม้อแปลงที่เป็นแกนเหล็กด้วยคลื่น PWM ความถี่สูงถึง 110kHz ได้ ความถี่ที่สูงขึ้นทำให้การออกแบบวงจรกรองสัญญาณความถี่สูงมีขนาดเล็กลงและมีต้นทุนต่ำลง วงจรขับเกตที่นำเสนอนี้สามารถใช้กับ อินเวอร์เตอร์ขนาด 500W ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ทรานซิสเตอร์, PWM อินเวอร์เตอร์, หม้อแปลงไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the design of a gate drive circuit for a 12V DC to 220V AC converter. The designed circuit is intended to be a prototype for future product development. This circuit utilizes both NPN and PNP transistors, along with other basic electronic components that are readily available. As a result, when this circuit is produced as a product, the components can be easily sourced. Additionally, the use of transistors reduces costs compared to using integrated circuits. Testing results demonstrate that the designed 12V DC to 220V AC converter gate drive circuit can drive a transformer with an iron core using a high-frequency PWM waveform up to 110kHz. The higher frequency allows for a smaller and lower-cost high-frequency filter circuit design. The presented gate drive circuit can be effectively applied to a 500W inverter.

Keywords: Transistor, PWM inverter, Transformer

1. บทนำ

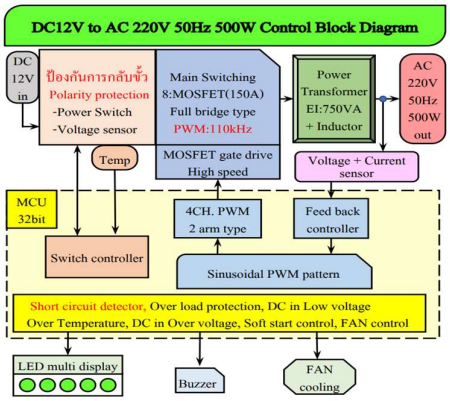
ปัจจุบันวงจรขับเกตจะมีวงจรรวม IC สำเร็จรูป เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับขาเกต (gate pin) ของ MOSFET ในอินเวอร์เตอร์เพื่อสร้าง สัญญาณ PWM ป้อนไปยังโหลด และจากการสำรวจทางการตลาดจะเห็นได้ว่า IC สำเร็จรูป นั้นมีต้นทุนที่สูง [1] นอกจากนี้บางช่วงเวลายังไม่สามารถที่จะจัดหาเพื่อส่งมอบให้กับโรงงานผลิตได้ทันในเวลาที่กำหนดได้ จากปัญหาข้างต้นทีมวิจัยจึงได้ทำการออกแบบวงจรขับเกตสำหรับเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V โดยใช้ทรานซิสเตอร์และอุปกรณ์พื้นฐานเพื่อให้มีต้นทุนที่ต่ำลง และที่สำคัญคือ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ง่ายทำให้ผลิตสินค้าอย่างต่อเนื่องได้

โครงสร้างของวงจรเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V นี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเหล็กซึ่งจะทำการเพิ่มแรงดันที่สร้างจากอิเวอร์เตอร์ 6V เป็น 220V 50Hz โดยอินเวอร์เตอร์จะใช้ระบบ Hard switching กระแสสูงป้อนผ่านอินดักเตอร์เพื่อกรองความถี่สูงออก แล้วส่งไปยังหม้อแปลงแกนเหล็กเพื่อเพิ่มแรงดันเป็น 220V 50Hz ในการนี้ PWM จะต้องมีความถี่ (switching frequency) ที่สูงมากพอที่จะแยกออกจากความถี่พื้นฐาน 50Hz ได้ และนอกจากนี้การที่สามารถใช้ความถี่สูงขึ้นจะทำให้ ตัวกรองความถี่ซึ่งใช้อินดักเตอร์ (L:inductor) ที่มีค่าต่ำลงเป็นผลให้มีขนาดเล็กลงและมีต้นทุนที่ต่ำลงได้ ซึ่ง PWM ที่ป้อนให้กับหม้อแปลงจะมีค่าสูงถึง 110kHz ซึ่งสูงกว่าท้องตลาดทั่วไปโดยมีความถี่ในช่วง 20 – 30 kHz เท่านั้น ส่วนตัวกำเนิดสัญญาณ PWM จะใช้ MCU 32 bit ในการสร้างสัญญาณ sin wave 50 Hz โดยมีการ sampling ที่ความถี่ 10 kHz

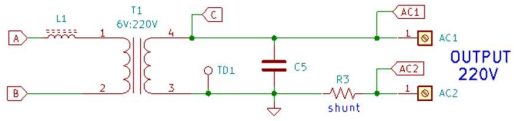
2. การออกแบบวงจรและสัญญาณที่จุดสำคัญ

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างขอเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V จากรูปแรงดันจากแบตเตอรี่ 12V จะเข้ามาผ่านวงจรป้องกันการกลับขั้วก่อน จากนั้นจะป้อนเข้าไปที่อินเวอร์เตอร์แบบ Full bridge ขับโดยวงจร gate drive โดยสัญญาณ PWM จะสร้างมาจาก MCU พร้อมทั้ง dead time สัญญาณ PWM สร้างขึ้นโดย

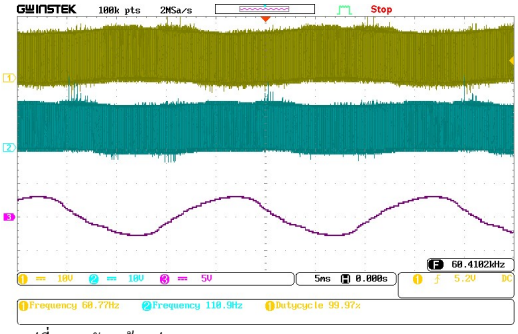
การ Modulate กับ sine wave เพื่อสร้างสัญญาณ sine wave 50 Hz นอกจากนี้ MCU จะควบคุมระบบป้อนกลับของแรงดันขาออกโดยการปรับการ Modulate กับ ขนาด (Amplitude) ของ sine wave เพื่อให้ได้แรงดัน 220 V คงที่อยู่ตลอดเวลาที่มีการใช้งาน [2]



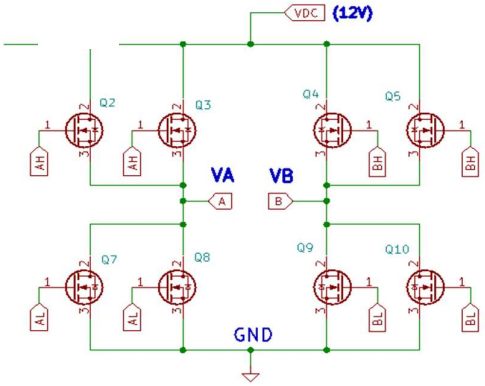
รูปที่ 1 โครงสร้างของครื่องแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับ



รูปที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าแกนเหล็กเพิ่มแรงดัน 6V เป็น 220V 50Hz



รูปที่3 แรงดันหม้อแปลง PWM A (CH1:10V/div), PWM B (CH2:10V/div) และแรงดันขาออก220V 50Hz(CH3:500V/div), 5ms/div, NO-Load



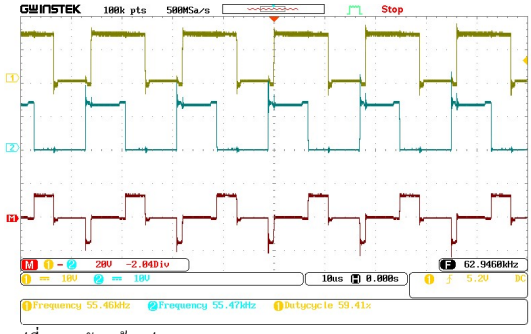
รูปที่ 4 วงจร Full Bridge PWM อินเวอร์เตอร์

รูปที่ 2 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าแกนเหล็ก ทำหน้าที่เพิ่มแรงดัน 6Vrms เป็น 220Vrms 50Hz ความต้านทานขดลวดที่จุด 1-2(A-B) เท่ากับ 4.2mΩ และ จุด 3-4 เท่ากับ 3.4Ω เมื่อมีกระแสไหลจะเกิดความสูญเสียกลายเป็นความร้อนทำให้ต้องมีการระบายความร้อนโดยพัดลม ทางขาเข้าของหม้อแปลงไฟฟ้าจะจ่ายคลื่น PWM A และ PWM B ซึ่งมีอินดักเตอร์ L1 และตัวเก็บประจุ C5 เป็นตัวกรองสัญญาณความถี่สูงให้เหลือเฉพาะ 50 Hz เพื่อใช้งานกับโหลดรูปที่ 3 แสดงแรงดันหม้อแปลง PWM A, PWM B ซึ่งป้อนที่ขาเข้าของหม้อแปลงและแรงดันขาออก 220V 50Hz จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงดันขาออกไม่มีสัญญาณความถี่สูงจาก PWM ผสมอยู่แสดงให้เห็นว่าตัวกรองสัญญาณความถี่สูงสามารถกรองความถี่สูงได้เป็นอย่างดีส่วน R3 เป็น shunt เพื่อใช้ในการคำนวนกระแสของโหลดโดย MCU และแสดงผลผ่าน LED display

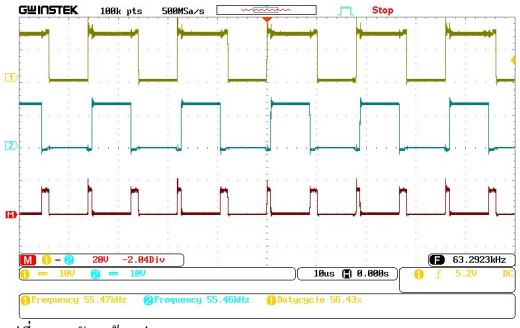
รูปที่ 4 แสดงวงจร Full Bridge PWM อินเวอร์เตอร์ [3] ในวงจรนี้จะ ทำการขนาน MOSFET เพื่อเพิ่มกระแสให้เพียงพอกับกำลังวัตต์ที่ต้องการที่ 500W เนื่องจากเป็นวงจรที่ต้องการกระแสสูงมาก (50A) การออกแบบ PCB และโครงสร้างอื่นๆจะต้องมีขนาดที่ใหญ่เพื่อให้กระแสไหลได้อย่างเพียงพอ รูปที่ 5 แสดงแรงดันหม้อแปลง PWM A, PWM B และแรงดันตกคร่อมขาเข้า (PWM A - PWM B) ของหม้อแปลง จากรูปจะเห็นว่า PWM เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยมีความถี่สูงกว่า 50 kHz ภายในคลื่นจะมีสัญญาณ spike ผสมอยู่เนื่องจากเป็นวงจรแบบ Hard switching inverter หากต้องการลดทอนสัญญาณ spike สามารถใช้วงจร Snubber หรืออื่นๆเพิ่มเข้าไปในระบบได้เช่นกัน ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมขาเข้าของหม้อแปลงนั้นจะมีทั้งด้านบวกและลบเนื่องจากเป็นแรงดันที่เกิดจาก Full bridge inverter ส่วนความถี่ที่ตกคร่อมหม้อแปลงนั้นจะมีบางช่วงความถี่จะเป็น 2 เท่าของ PWM ดังแสดงในรูปที่ 6 (CHM) จากเหตุนี้เองทำให้ Full bridge inverter สามารถสร้างความถี่สูงขึ้นได้ทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่มีขนาดที่เล็กและมีต้นทุนที่ต่ำลง

รูปที่ 7 แสดงวงจรขับเกตด้านล่าง (AL) สำหรับ MOSFET ซึ่งทาง output Vg จะนำสัญญาณไปขับที่ขาเกตระหว่าง AL และ GND ของวงจรในรูปที่4 โดยทาง input V1 จะมาจาก MCU PWM 3.3V วงจรนี้ใช้ VB (+12V) ในการทำงานซึ่งนำมาจากแบตเตอรี่ รูปที่ 8 แสดงสัญญาณของวงจรขับเกตด้านล่าง(AL) ในจุดที่สำคัญ สัญญาณ V1 จะเป็นสัญญาณมาจาก MCU PWM 0-3.3V ส่วน V2 จะเป็นสัญญาณที่ไม่กลับเฟสกับ V1 แต่จะมีส่วนที่เป็น DC-offset ปนอยู่เนื่องจากเป็นการถ่ายสัญญาณจาก Q30 ไปยัง Q26 ของรูปที่ 7 ส่วน V3 จะเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าขาเบสของ Q33 เพื่อสร้างสัญญาณ V4 ต่อไป จากรูปที่8 จะเห็นว่า V4 มีขนาดที่ใหญ่มากขึ้นเพื่อจะนำไปขับ Q25,Q29 ของรูปที่7 เพื่อเพิ่มกระแสต่อไป รูปที่9 แสดงสัญญาณต่อเนื่องจากรูปที่ 8 ของวงจรขับเกตด้านล่าง (AL) รูปที่ 7 จากรูปที่9 สัญญาณ V1 ซึ่งเป็น input PWM จะทำให้เกิดเป็น V5 ซึ่งเป็นแรงดันที่ได้เพิ่มกระแสแล้ว จากนั้นใช้ Vg เพื่อนำไปขับขาเกตของ MOSFET ได้โดยตรง และเมื่อ MOSFET ON ก็จะทำให้แรงดันตกลงเป็น

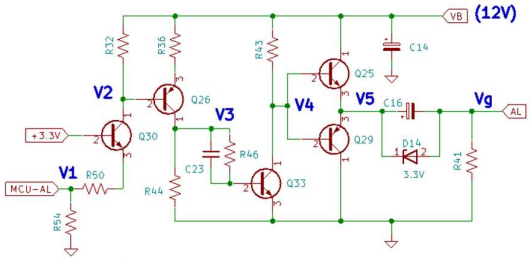
สัญญาณของ Vdrain (VA) จากรูปที่ 9 สัญญาณ V1 ไปจนถึง Vdrain นั้นมีการหน่วงเวลา (delay) ของสัญญาณน้อยมาก



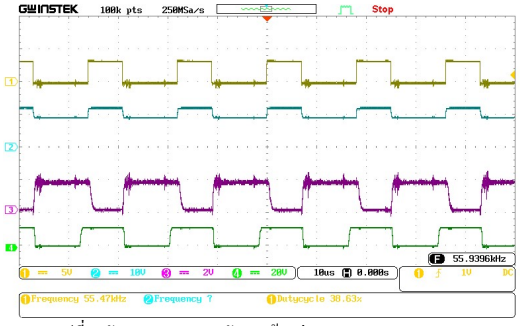
รูปที่ 5 แรงดันหม้อแปลง PWM A (CH1:10V/div), PWM B (CH2:10V/div) และแรงดันตกคร่อมขาเข้า (PWM A - PWM B) (CHM:20V/div), 10us/div



รูปที่ 6 แรงดันหม้อแปลง PWM A (CH1:10V/div), PWM B (CH2:10V/div) และแรงดันตกคร่อมขาเข้า (PWM A - PWM B) (CHM:20V/div), 10us/div



รูปที่ 7 วงจรขับเกตด้านล่าง(AL) สำหรับ MOSFET



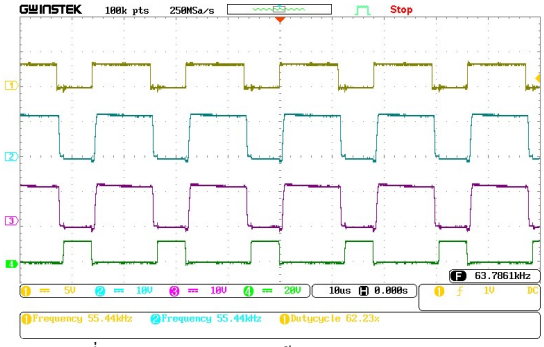
รูปที่ 8 สัญญาณของวงจรขับเกตด้านล่าง(AL), V1(CH1:5V/div), V2(CH2:10V/div), V3(CH3:2V/div), V4(CH4:20V/div), 10us/div

ทำให้วงจรนี้สามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์ที่เป็น MOSFET ความถี่สูงได้ ทำให้วงจรที่นี้สามารถใช้กับ Full bridge inverter ที่มีความถี่สูงถึง 110 kHz ได้ รูปที่10 แสดงวงจรขับเกตด้านบน (AH) สำหรับ MOSFET ซึ่งจะนำสัญญาณขาออก 2 จุดคือ V4 ต่อกับ AH (gate pin) และ V3 ต่อกับจุด A (source pin) ของวงจรในรูปที่4 ดังนั้นแรงดันที่จ่ายให้กับขาเกต คือ แรงดัน Vg=V4-V3 นั่นเอง รูปที่11 แสดงสัญญาณของวงจรขับเกตด้าน บน(AH) จากรูปที่ 11 จะเห็นว่า V2 จะมีสัญญาณที่สูงกว่า 12V เนื่องจากเป็นแรงดันที่ตกคร่อม C9 เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจร กล่าวคือ เมื่อ MOSFET ON จะทำให้จุด A มีระดับแรงดันเท่ากับ 12V (แรงดันของแบตเตอรี่) และการที่จะทำให้ MOSFET ON อยู่ได้อย่างต่อเนื่องคือ การใช้ประจุที่ชาร์จไว้ของ C9 มาเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรซึ่งมีระดับแรงดันที่สูงกว่า 12V ดังนั้นแรงดันของ V2 จึงสูงกว่า 12V ดังแสดงในรูปที่11 จากรูปเดียวกัน VA(source pin) เป็น out put ส่วน V4 (gate pin) จะมีแรงดันที่สูงกว่า VA เพื่อขับ MOSFET ให้ทำงานขณะที่อยู่ในสภาวะ ON แรงดันที่ใช้ขับขาเกต Vg = (V4-V3) แสดงจากกราฟ CHM ในรูปที่ 11 มีค่าระหว่าง 0-8V ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอสำหรับให้ขับขาเกตให้ทำงานได้ โดย MOSFET ที่ใช้ในวงจรจะทำงาน (ON) เต็มที่ในระดับแรงดันประมาณ 4-5V รูปที่ 12 แสดงการทดสอบวงจรต้นแบบและการเก็บข้อมูลของสัญญาณไฟฟ้าที่สำคัญ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟ switching power supply แทนแบตเตอรี่เพื่อเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้ Digital Oscilloscope จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้โหลดเต็มพิกัด 500W เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อวัน ทำการทดสอบไม่น้อยกว่า 5 วัน ซึ่งสามารถทำงานได้เป็นปกติ

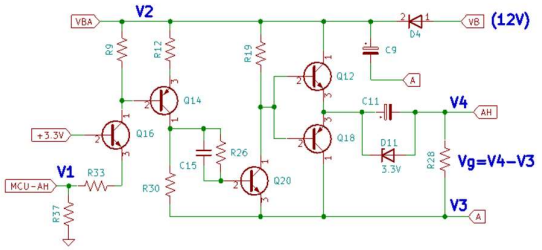
3. สรุป

บทความนี้ได้แสดงการออกแบบวงจรขับเกตสำหรับเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V โดยวงจรที่นำเสนอนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ แบบ NPN และ PNP ร่วมกันทำงานและอุปกรณ์อื่นๆซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้สามารถจัดหาอุปกรณ์การผลิตให้กับสายการผลิตได้โดยไม่ขาดตอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการผลิตสินค้า นอกจากนี้ยังมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้ IC สำเร็จรูปจากการทดสอบการทำงานของวงจรแสดงให้เห็นว่าวงจรขับเกตสำหรับเครื่องแปลงไฟกระแสตรง 12V เป็นไฟกระแสสลับ 220V ที่นำเสนอนั้นทำงานได้อย่างถูกต้อง สังเกตุได้จากคลื่นสัญญาณไฟฟ้าในจุดที่สำคัญจะเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้และเมื่อนำวงจรนี้มาใช้งานกับอินเวอร์เตอร์แบบ Full bridge ก็จะสามารถสร้างสัญญาณ PWM ที่ความถี่สูงถึง 110 kHz เพื่อใช้ขับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแกนเหล็กได้และการที่สามารถทำความถี่ได้สูงนี้เองจึงทำให้การออกแบบวงจรกรองความถี่มีขนาดที่เล็กลงเป็นผลให้ต้นทุนการผลิตสินค้าต่ำลงและจากการใช้งานในภาคสนามเป็นระยะเวลานาน

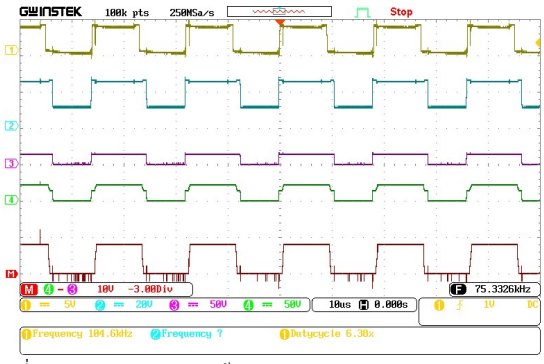
ทำให้ทราบว่า วงจรที่ได้นำเสนอนี้สามารถใช้กับอินเวอร์เตอร์ขนาด 500 W ต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี



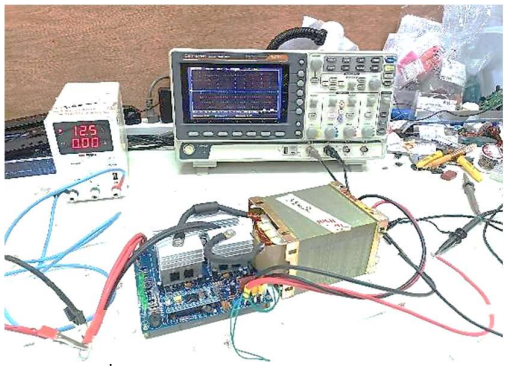
รูปที่ 9 สัญญาณของวงจรขับเกตด้านล่าง(AL), V1(CH1:5V/div), V5(CH2:10V/div), Vg(CH3:10V/div), Vdrain=VA(CH4:20V/div), 10us/div



รูปที่ 10 วงจรขับเกตด้านบน(AH) สำหรับ MOSFET



รูปที่ 11 สัญญาณของวงจรขับเกตด้านบน(AH), V1(CH1:5V/div), V2(CH2:20V/div), V3=VA(CH3:50V/div),V4(CH4:50V/div),Vg=(V4-V3) (CHM:10V/div), 10us/div



รูปที่ 12 การทดสอบวงจรต้นแบบและการเก็บข้อมูล

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณผู้ร่วมวิจัยทุกท่านที่ทำให้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้ รวมทั้งห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ บริษัท พีพี เอส โซล่าเอนเนอจี จำกัด ที่ให้คณะวิจัยได้ทำงานวิจัยชิ้นนี้จนเป็นผลสำเร็จ สุดท้ายนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้สนใจ และ นำไปต่อยอดประยุกต์ใช้งานในระดับที่สูงขึ้นต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] JLCPCB Parts. [Online]. Available: https://jlcpcb.com/parts /all-electronic-components. [Accessed: Oct. 10, 2024].

[2] กฤษ เฉยไสย ณฐัพงษ์แก่นมาลี และ ไปรยา เฉยไสย, “การออกแบบผลิตภัณฑ์ต้นแบบเครื่องแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟ กระแสสลับ”, การประชุมวชาการวิศวกรรมทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46, 15-17 พฤศจิกายน 2566

[3] Kelechi Inyama, “Modeling of aPureSine WavePower Inverter usingSinusoidalPulse Width Modulation (SPWM) Technique”. International Journalof InnovativeScience and Research Technology. vol 8, Issue 5, May 2023 [Online serial]. Available: https://www.researchgate.net/publication. [Accessed: Oct. 10, 2024].