บทที่ 4
ผลการทดสอบโครงการ

4.1 บทนำ

การทดลองชุดต้นแบบการพัฒนาระบบควบคุมแบบเวลาจริงด้วยระบบสมองกลฝังตัว ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับการเรียนรู้ในวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโครงการ แบ่งออกเป็นการทดสอบแต่ละวงจรดังนี้

1. การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณ
2. การทดสอบวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นแบบควบคุมเฟส
3. การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบทอนระดับแรงดัน
4. การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบทบระดับแรงดัน
5. การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ FFM 180°
6. การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ FFM 120°

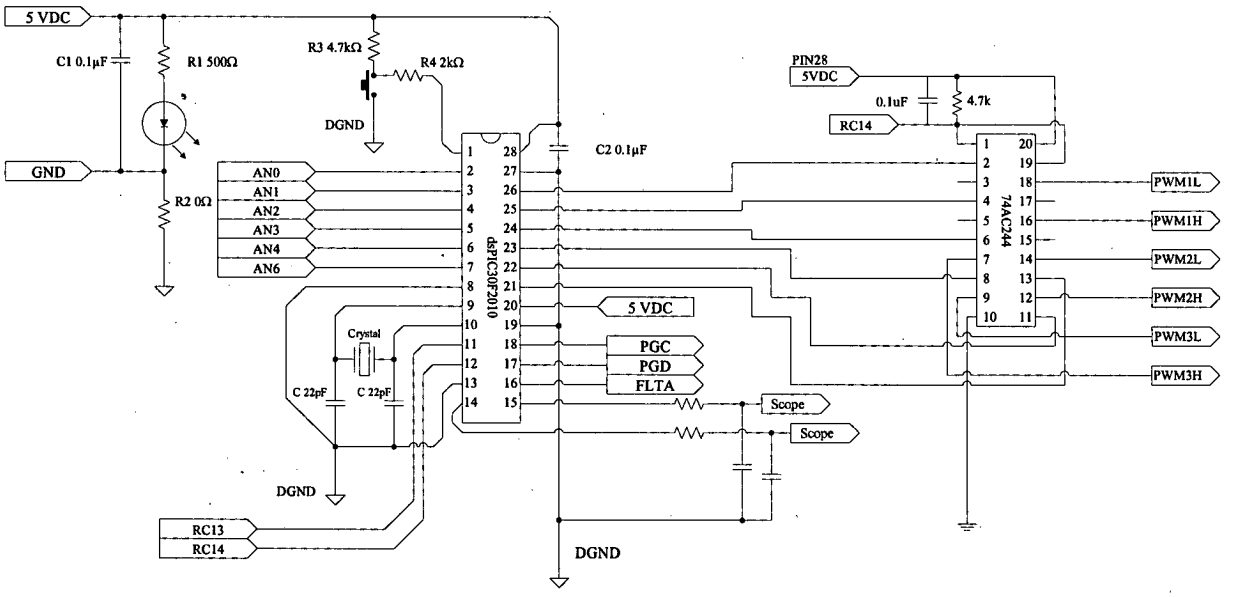
4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรในโครงการ มีดังนี้

1. DC Power Supply ขนาด 0 – 50 VDC แบบ 2 Channel
2. Digital Voltmeter แบบ True RMS
3. Digital Ammeter แบบ True RMS
4. Digital Oscilloscope
5. AC/DC Voltage Probe และ Current Probe
6. วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ได้จัดสร้างขึ้น

4.3 การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณ

การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยบอร์ดประมวลผล Controller Board ซึ่งเป็นวงจรสร้างสัญญาณควบคุมที่ประยุกต์ด้วยชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010 เพื่อตรวจสอบสัญญาณขาออกของวงจรดังกล่าวว่า สามารถสร้างสัญญาณควบคุมได้ถูกต้องตามที่ต้องการหรือไม่ ทั้งนี้วงจรสร้างสัญญาณควบคุมเป็นดังแสดงในภาพที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยการประยุกต์ใช้ dsPIC30F2010

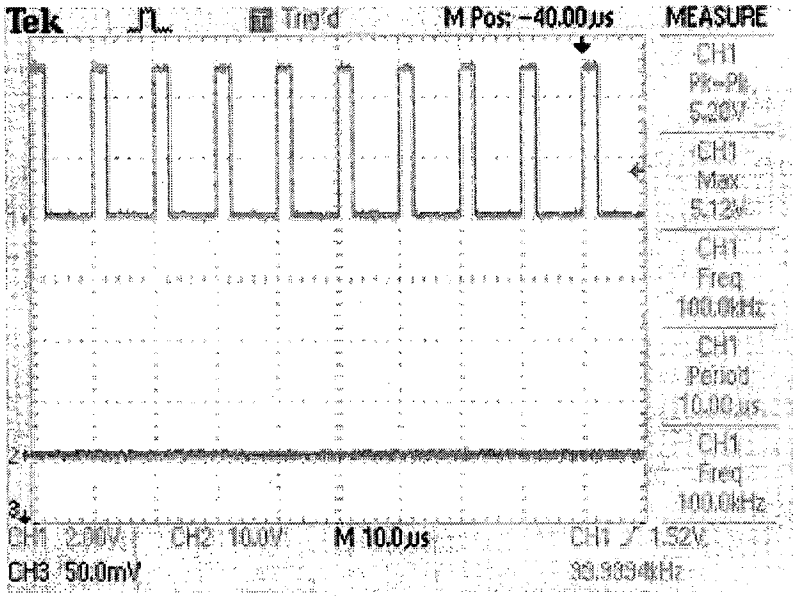
จากภาพที่ 4.1 ภายในวงจรสร้างสัญญาณควบคุม จะประกอบด้วย

1. ชิปประมวลผลสัญญาณ dsPIC30F2010 ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลสัญญาณ พร้อมทั้ง รับ/ส่งสัญญาณควบคุมกับวงจรภายนอก
2. ส่วนสร้างสัญญาณนาฬิกา ให้กับชิปประมวลผลสัญญาณ dsPIC30F2010 ที่ความถี่ขนาด 20 MHz.
3. ไอซี 74AC422 เป็นไอซี TTL ซึ่งภายในไอซีประกอบด้วยบัฟเฟอร์ จำนวน 8 ตัว ทำหน้าที่รองรับสัญญาณอินพุตจำนวน 8 ช่องสัญญาณจากชิป DSP ทั้งนี้การทำงานของพอร์ตอินพุต คือเมื่อพอร์ตไม่ถูกเลือกให้ทำงาน พอร์ตจะอยู่ในสถานะความต้านทานสูง และเมื่อมีสัญญาณอินพุทมากระตุ้นให้พอร์ต พอร์ตจะอยู่ในสถานะความต้านทานต่ำ เพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อข้อมูลอินพุตสู่ด้านเอ๊าท์พุทเข้ากับบัสข้อมูลของระบบต่อไป

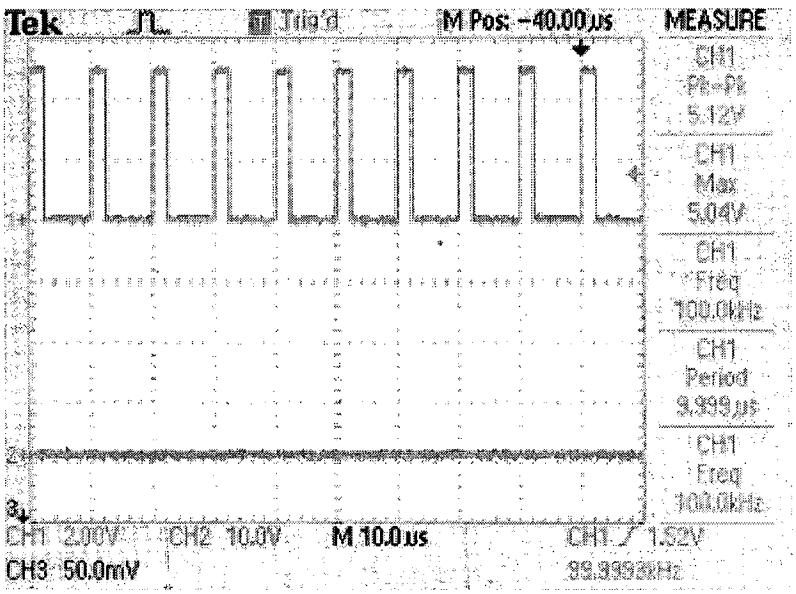
การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณ dsPIC30F2010 ในที่นี้เป็นการแสดงผลทดสอบวงจรเพื่อสร้างสัญญาณแบบ PWM สำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง (DC Converter) โดยการส่งผ่านการแปลง Code ของโปรแกรม "DC Converter" จาก MPLAB Program ในคอมพิวเตอร์ ผ่านทางการ์ด ICD2 ซึ่งจะได้รูปคลื่นสัญญาณขาออกที่ขา 26 (ขา AN6/OCFA/RB6) ดังแสดงในภาพที่ 4.2

สัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปที่วงจร Buffer ในไอซี 74AC244 ที่ขา 2 ทำให้สัญญาณขาออกจาก Buffer ส่วนนี้อยู่ที่ขา 18 (PWM1L) ของไอซี 74AC244 ดังแสดงในภาพที่ 4.3

อย่างไรก็ตาม สัญญาณขาออกในภาพที่ 4.2 และ 4.3 มีขนาด 5 โวลต์เท่านั้น เนื่องจากเป็นสัญญาณจากไอซี TTL ดังนั้นเมื่อต้องการนำไปใช้ควบคุมการทำงานกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบใดๆก็ตามจะต้องนำไปผ่านวงจร Isolator (ด้วย TLP250) อีกทอดหนึ่งก่อนเพื่อแยกส่วนวงจรควบคุมออกจากวงจรกำลังและเพื่อยกระดับให้สัญญาณมีขนาดสูง พอที่จะใช้ขับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรนั้นๆได้



ภาพที่ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณขาออกแบบ PWM ที่ขา 26 (ขา AN6/OCFA/RB6) จาก dsPIC30F2010 (โดยมีขนาดสัญญาณที่ 5 V.)



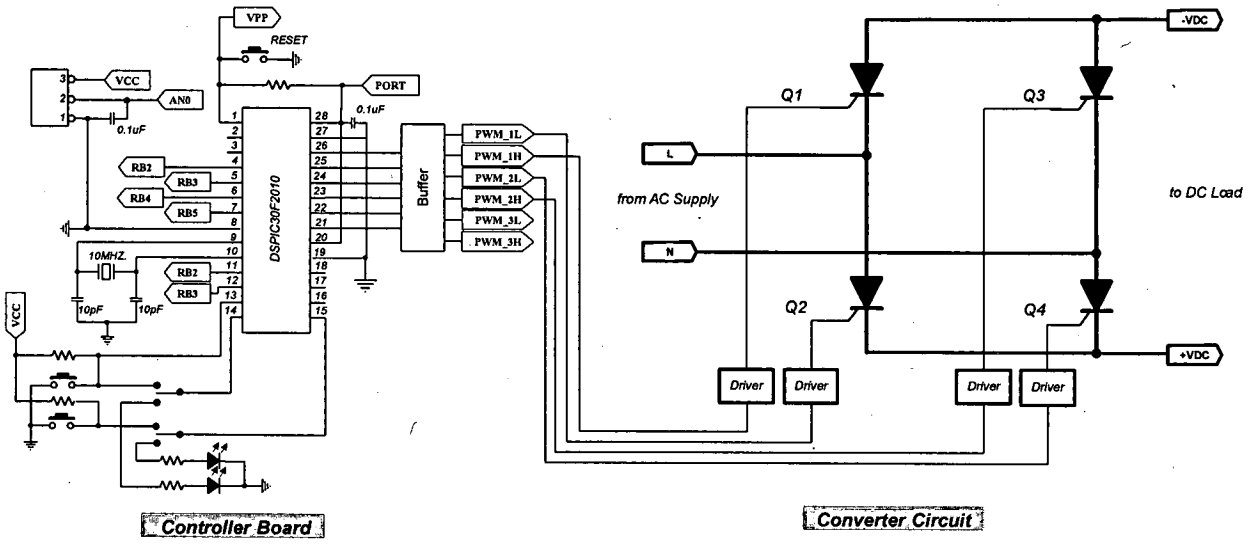
ภาพที่ 4.3 รูปคลื่นสัญญาณขาออกที่ขา PWM1L (ขา 18 จากไอซี 74AC244) (โดยมีขนาดสัญญาณที่ 5 V.)

จากสัญญาณที่ได้จากภาพที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นว่า Controller Board ที่ประยุกต์ด้วยชิพประมวลผลสัญญาณ dsPIC30F2010 สามารถแปลง Code จากโปรแกรม "DC Converter" ในการสร้างสัญญาณ PWM ออกทางขา PWM 1Lของวงจร เพื่อใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเชิงปฏิบัติได้อย่างสมบูรณ์

4.4 การทดสอบวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นแบบควบคุมเฟส

วงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นแบบควบคุมเฟสหรือ Single phase Full Wave Controlled Rectifier มี 2 กิ่งวงจรแต่ละกิ่งวงจรมี Thyristor จำนวน 2 ตัวต่ออนุกรมกันดังแสดงในภาพที่ 3.13 ซึ่ง Thyristor ที่อยู่ในกิ่งวงจรเดียวกันจะทำงานห่างเฟสกัน 180° ดังอธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 ทั้งนี้การทดสอบวงจรแสดงดังในภาพที่ 4.4

วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นแบบควบคุมเฟส ในโครงการจะใช้ dsPIC30F2010 เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุม โดยการรับข้อมูลการสร้างสัญญาณจากโปรแกรม "DC Converter" ผ่านโปรแกรม MPLABC30 และ CCS (Code Composer Studio) เพื่อแปลงเป็น HEX file และส่งผ่านการ์ด ICD2 มาทางพอร์ต USB



ภาพที่ 4.4 วงจรทดสอบการทำงานของวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นแบบควบคุมเฟส

การทดสอบวงจรวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่นแบบควบคุมเฟส ประกอบด้วยวงจร 2 ส่วน คือ วงจรสร้างสัญญาณควบคุม (dsPIC30F2010 Controller Board) และวงจร Single Phase Full Wave Controlled Rectifier

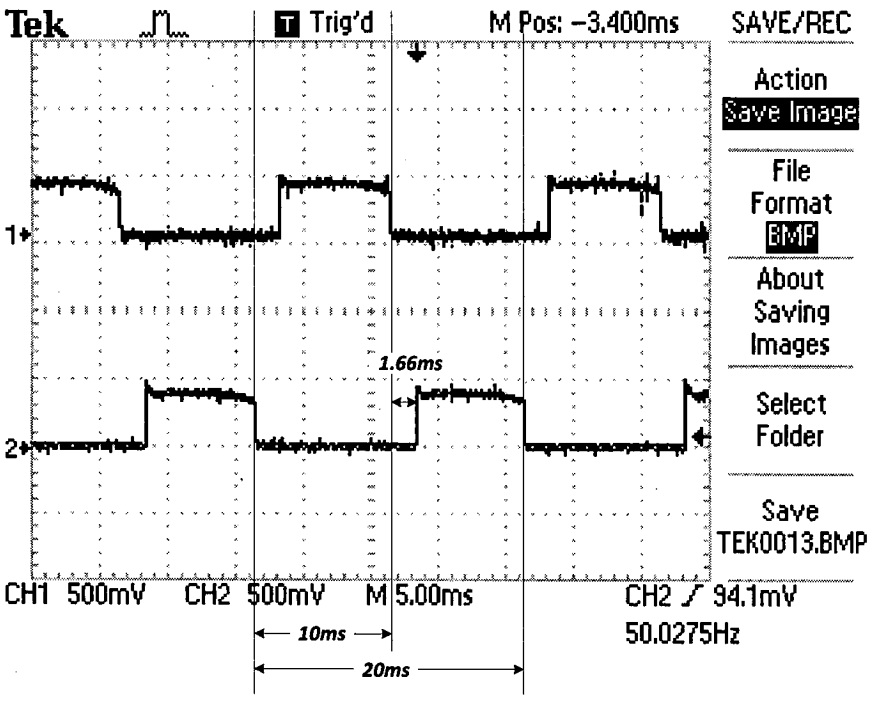
ส่วนสร้างสัญญาณควบคุมประกอบด้วย ชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลสัญญาณ พร้อมทั้งรับ/ส่งสัญญาณควบคุมกับวงจรภายนอก และไอซี 74AC422 ทำ

หน้าที่เป็น Buffer เพื่อรับสัญญาณอินพุตจำนวน 8 ช่อง ซึ่งเมื่อพอร์ตไม่ถูกเลือกให้ทำงาน จะอยู่ในสถานะความต้านทานสูง แต่เมื่อมีสัญญาณมากระตุ้น พอร์ตจะอยู่ในสถานะความต้านทานต่ำ เพื่อเชื่อมต่อข้อมูลอินพุตเข้ากับบัสข้อมูลของระบบ

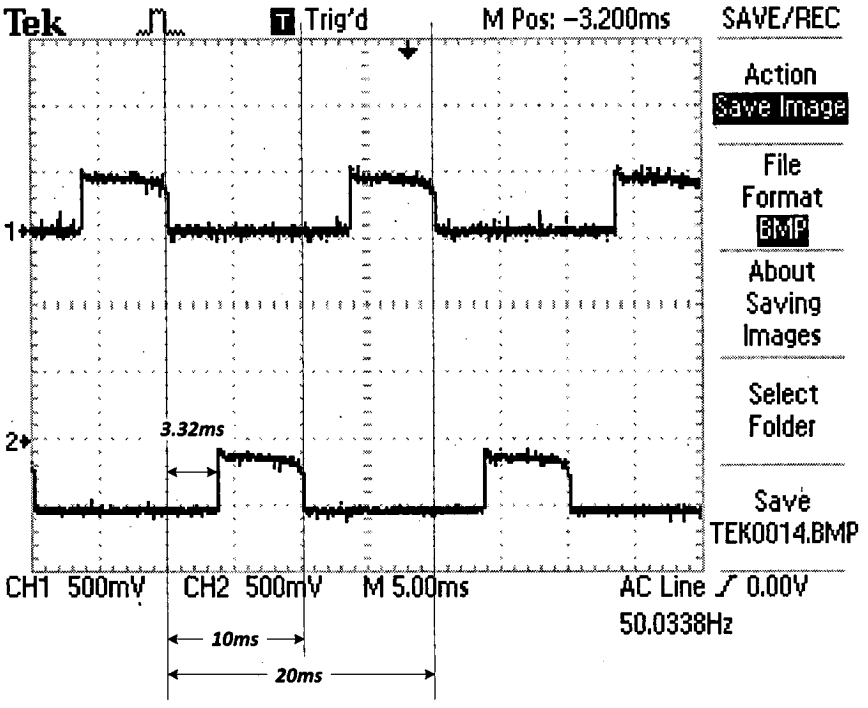
วงจร Single Phase Full Wave Controlled Rectifier ประกอบด้วย

1. สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็น Power Thyristor รุ่น 5P4M ของบริษัท NEC ซึ่งมีขนาดพิกัดแรงดัน 500V. ทนกระแสสูงสุดได้ 8A.
2. มีตัวตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสในวงจร
3. โหลดตัวต้านทาน 100 Ω ตัวเหนี่ยวนำ 50 mH. ขนาดพิกัดกำลัง 100 วัตต์

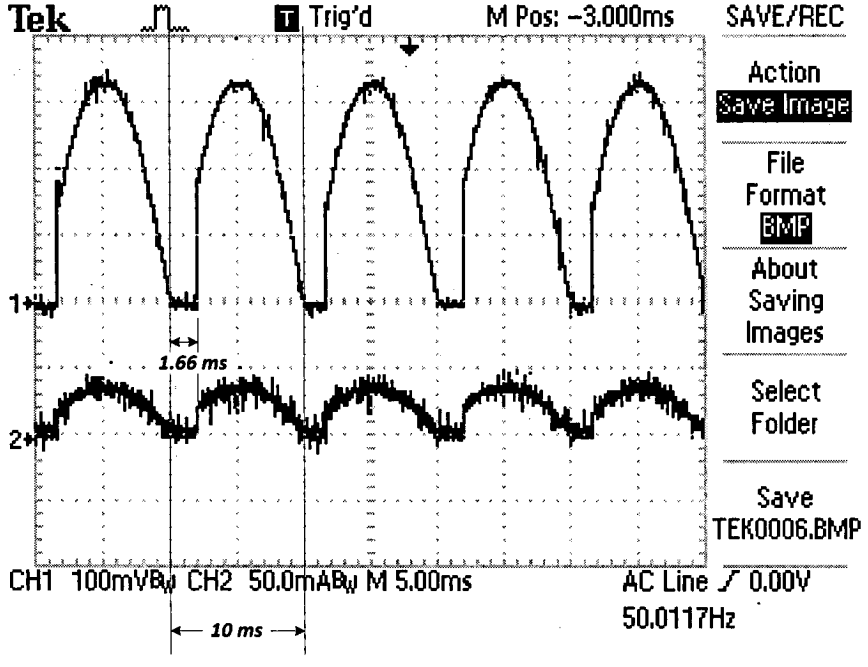
รูปคลื่นสัญญาณต่างๆที่ได้จากการทดสอบวงจร Single Phase Full Wave Controlled Rectifier ในโครงการ แสดงในภาพที่ 4.5 ถึงภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นสัญญาณควบคุม V_{GK1} และ V_{GK2} ขณะมุมนำกระแส (α) ที่ 30 องศา

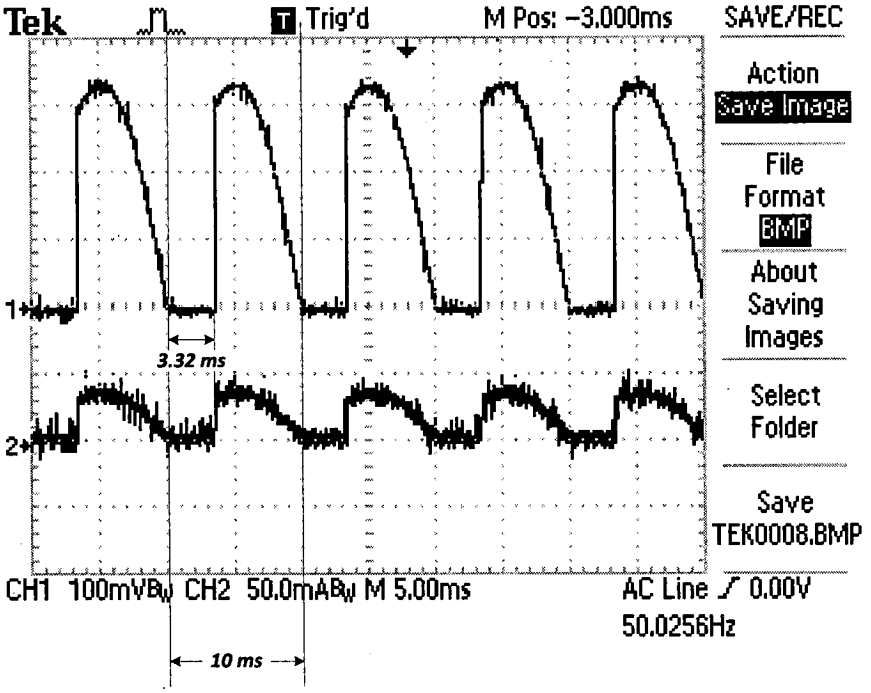


ภาพที่ 4.6 รูปคลื่นสัญญาณควบคุม V_{GK1} และ V_{GK2} ที่มุมนำกระแส (α) ที่ 60 องศา

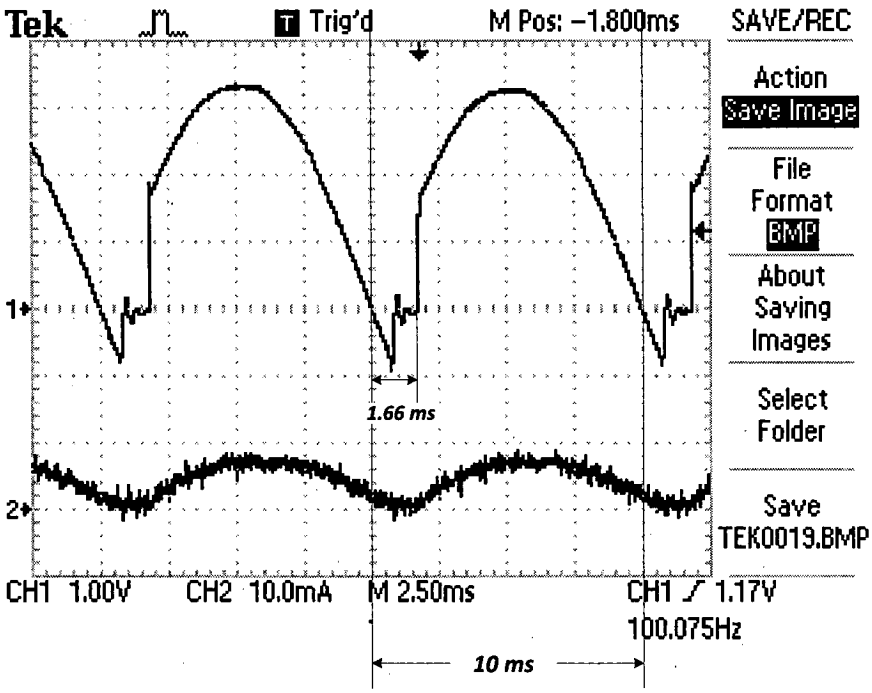


ภาพที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด ที่มุมนำกระแส (α) 30 องศา

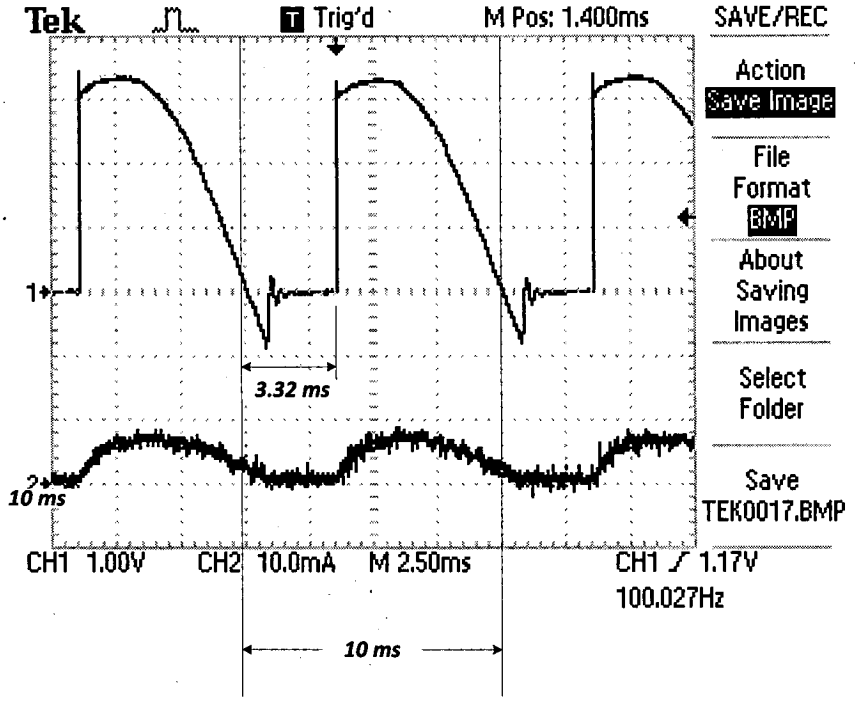
ขณะโหลด R เท่ากับ 100 Ω



ภาพที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด ที่มุมนำกระแส (α) 60 องศา ขณะโหลด R เท่ากับ 100 Ω



ภาพที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด ที่มุมนำกระแส (α) 30 องศา ขณะโหลด RL $100\Omega + j\omega(50mH)$

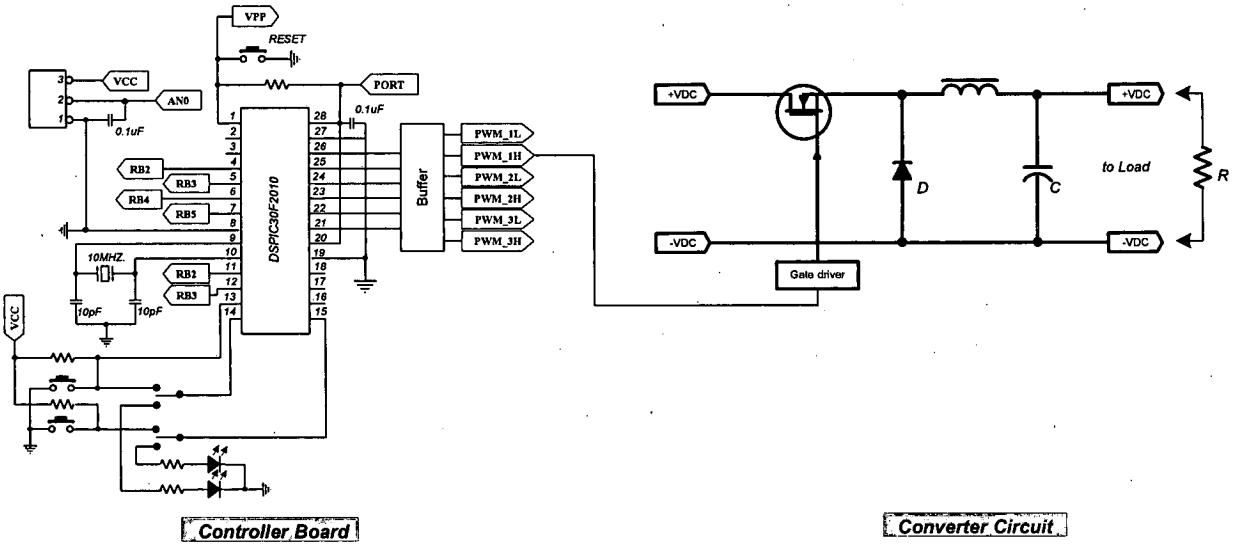


ภาพที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด ที่มุมนำกระแส (α) 60 องศา ขณะโหลด RL $100\Omega + j\omega(50mH)$

ภาพที่ 4.5 และ 4.6 เป็นรูปคลื่นสัญญาณควบคุมที่ V_{GK1} และ V_{GK2} (ดูภาพที่ 4.4 ประกอบ) ขณะมุมนำกระแส (α) ที่ 30 และ 60 องศา ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า V_{GK1} และ V_{GK2} มีการเหลื่อมเฟสกัน 180° ทางไฟฟ้า (อย่างไรก็ตามสัญญาณควบคุม V_{GK4} และ V_{GK3} ซึ่งจะซิงโครไนซ์กับ V_{GK1} และ V_{GK2} ตามลำดับนั้นไม่ได้แสดงภาพสัญญาณในที่นี้) และเมื่อนำสัญญาณควบคุมทั้ง 4 นี้ไปควบคุม Thyristor ในวงจรเรียงกระแส 1 เฟสเต็มคลื่น (ในภาพที่ 4.4) จะได้รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านโหลดในกรณีโหลด R และโหลด RL ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ถึง 4.10 ซึ่งผลตอบสนองของสัญญาณจะสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการจำลองวงจรดังอธิบายไว้ในบทที่ 2.

4.5 การทดสอบวงจรแปลงกำลังไฟตรงแบบทอนระดับแรงดัน

วงจรแปลงกำลังไฟตรงแบบทอนระดับแรงดัน หรือวงจร DC Buck Converter มีทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟตรงขาออกดังแสดงในภาพที่ 3.15 วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรแปลงกำลังไฟตรงแบบ DC Buck Converter ในโครงการจะใช้ dsPIC30F2010 เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุม โดยการรับข้อมูลการสร้างสัญญาณจากโปรแกรม "DC Converter" ผ่านโปรแกรม MPLABC30 และ CCS (Code Composer Studio) เพื่อแปลงเป็น HEX file และส่งผ่านการ์ด ICD2 มาทางพอร์ต USB



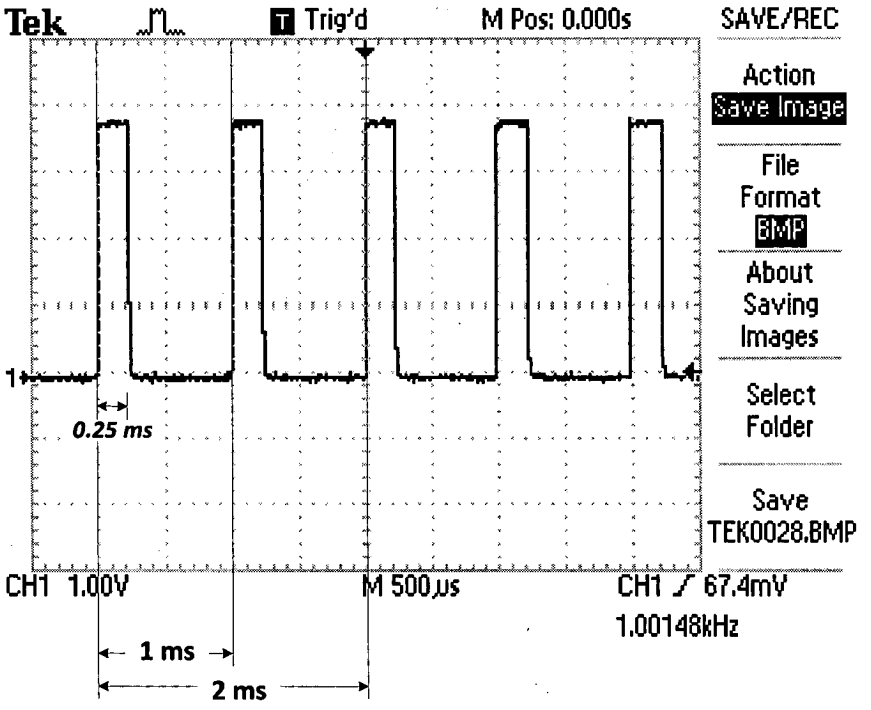
ภาพที่ 4.11 วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบ DC Buck Converter

การทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงชนิดทอนระดับแรงดันนี้ ประกอบด้วยวงจร 2 ส่วนคือ วงจรสร้างสัญญาณควบคุม (dsPIC30F2010 Controller Board) และวงจร DC Buck Converter

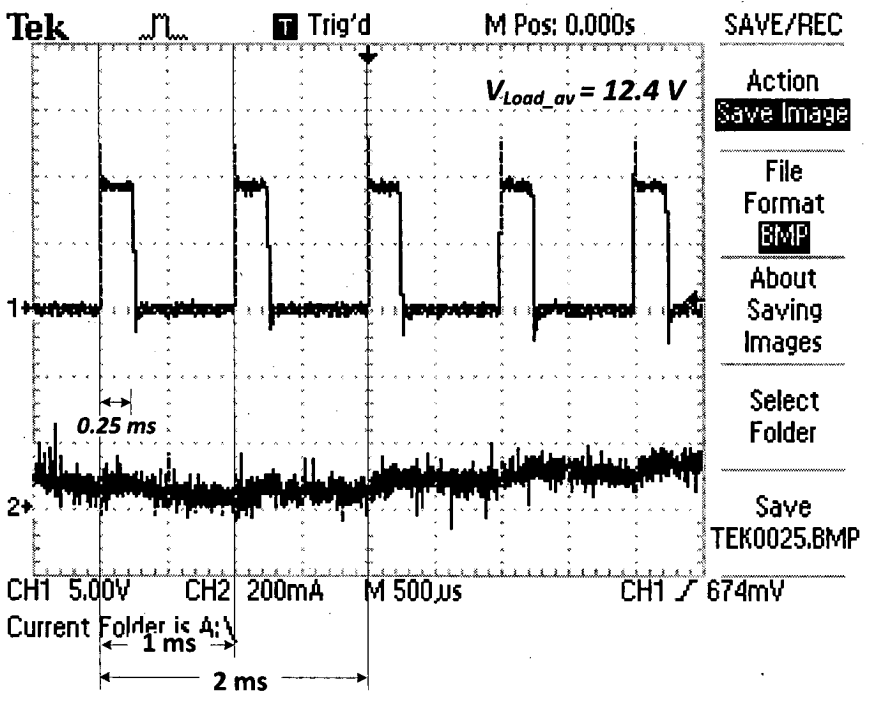
วงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบทอนระดับแรงดันในโครงการ ประกอบด้วย

1. สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็น Power MOSFET รุ่น IRFP460 ซึ่งเป็นแบบ N-Channel ขนาดพิกัดแรงดัน 500V. ทนกระแสสูงสุดได้ 20A. สามารถทำงานสวิตชิ่งที่ความถี่สูงได้
2. ไดโอดกำลัง MUR460 เป็นแบบ Ultra-Fast Recovery Diode ขนาดพิกัดแรงดัน 600V. ทนกระแสสูงสุด 4 A. และสามารถใช้งานที่ความถี่สวิตซ์สูงๆได้ดีกว่าแบบ General Purpose Diode
3. ขดลวดเหนี่ยวนำ แกน Ferrite core ขนาด 285 μH. ทนกระแสสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 5A.
4. ตัวเก็บประจุไฟฟ้า แบบ Electrolytic ขนาด 600 μF. พิกัดแรงดัน 600V.
5. ตัวตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสในวงจร

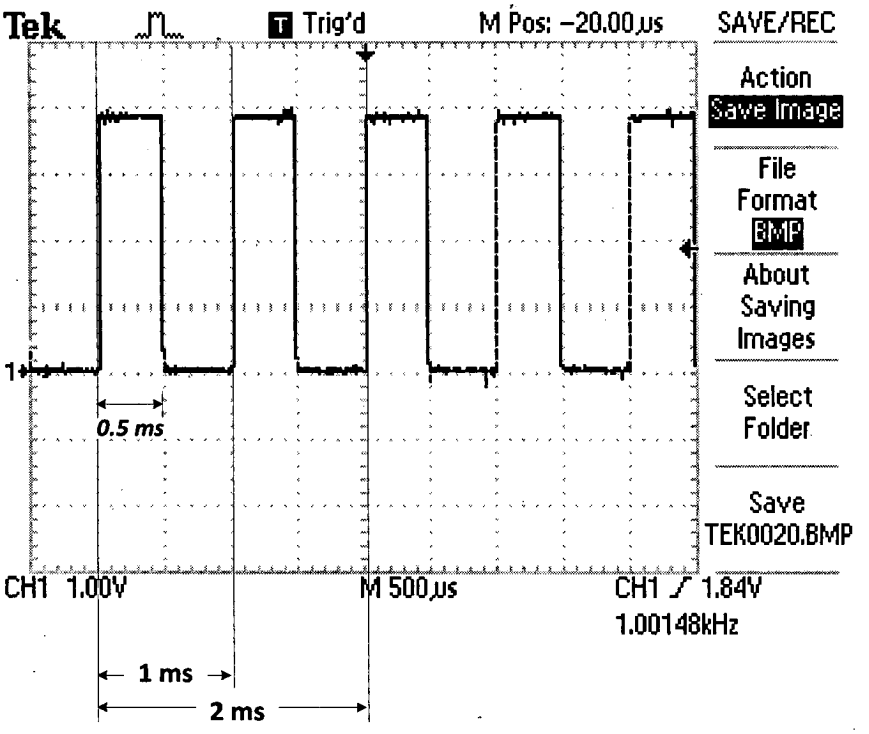
รูปคลื่นสัญญาณจากการทดสอบวงจร DC Buck Converter ในโครงการ แสดงในภาพที่ 4.12 ถึงภาพที่ 4.17



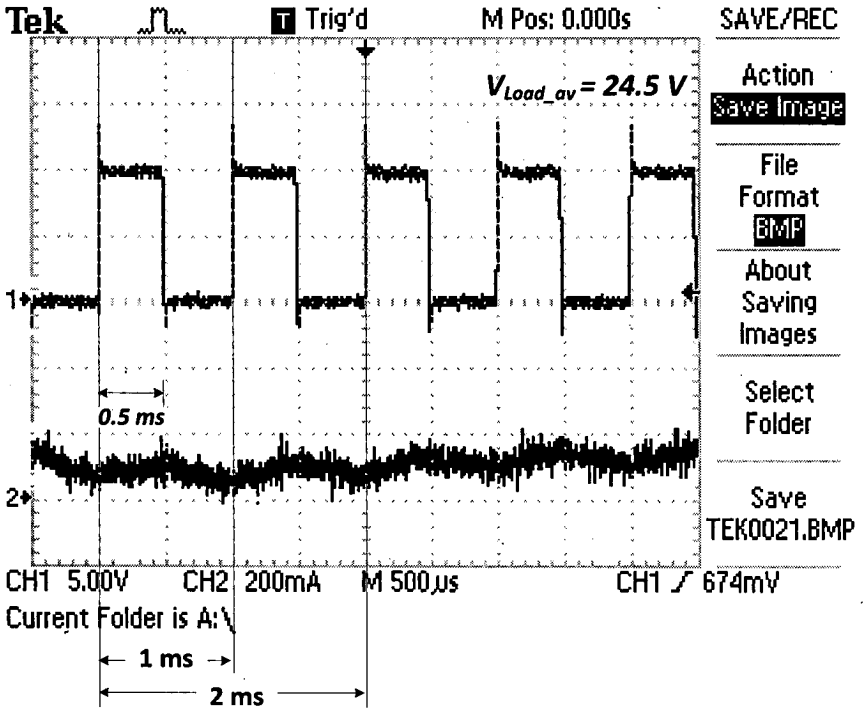
ภาพที่ 4.12 รูปคลื่นสัญญาณควบคุม V_{GS} ของ Power MOSFET Q1 ในภาพที่ 4.11 ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.25



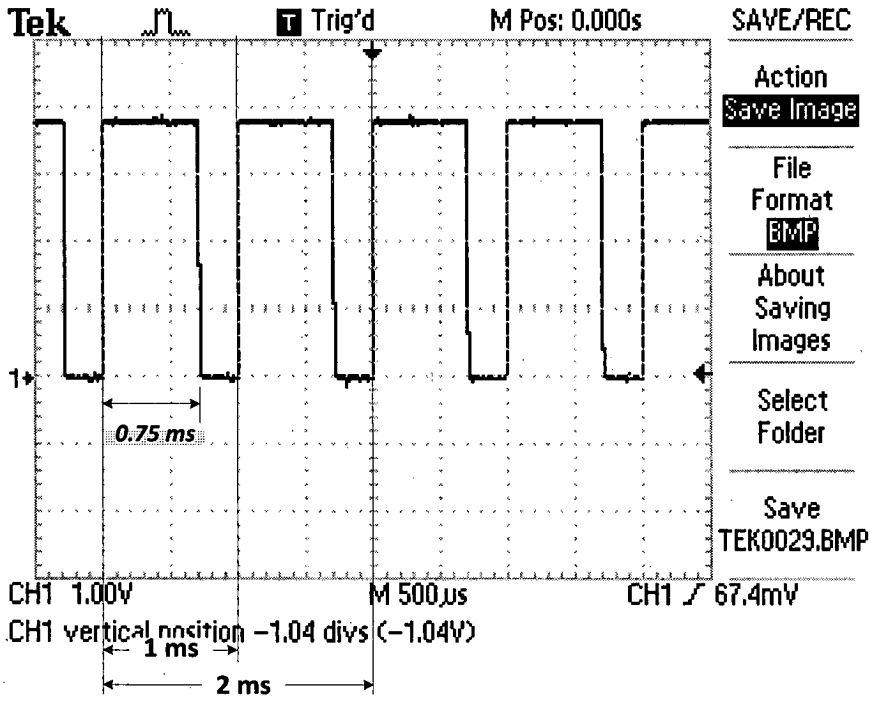
ภาพที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด (V_{Load}, I_{Load}) ของวงจร DC Buck Converter ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.25



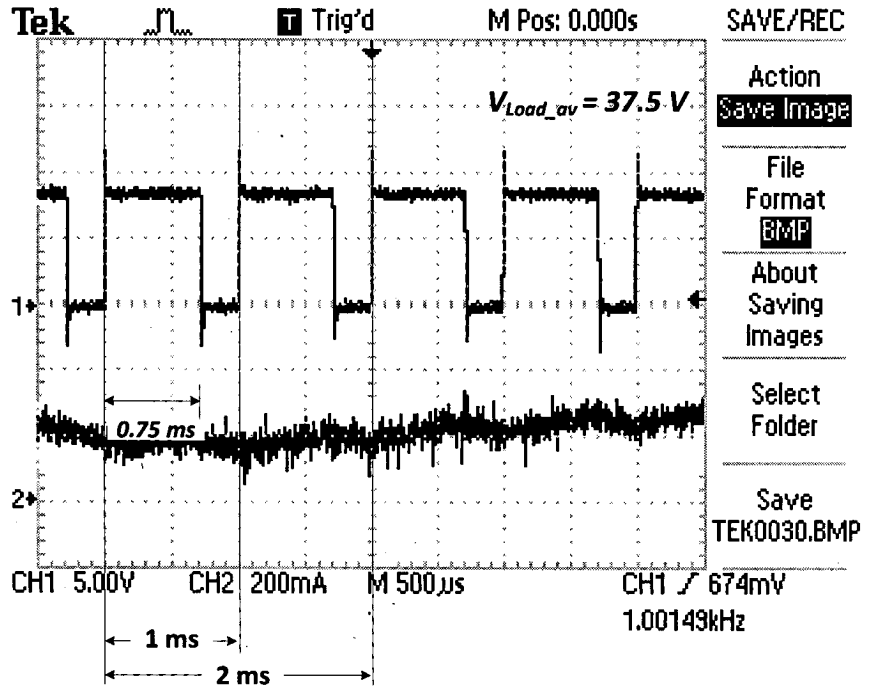
ภาพที่ 4.14 รูปคลื่นสัญญาณควบคุม V_{GS} ของ Power MOSFET Q1 ในภาพที่ 4.11 ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.5



ภาพที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด (V_{Load}, I_{Load}) ของวงจร DC Buck Converter ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.5



ภาพที่ 4.16 รูปคลื่นสัญญาณควบคุม V_{GS} ของ Power MOSFET Q1 ในภาพที่ 4.11 ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.75



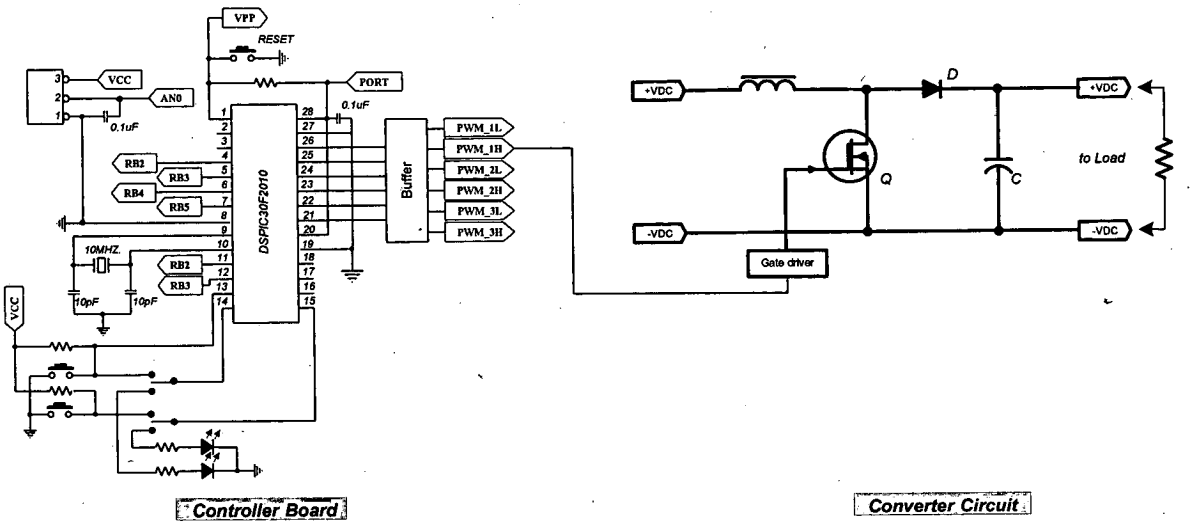
ภาพที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด (V_{Load}, I_{Load}) ของวงจร DC Buck Converter ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.75

ในการทดลองวงจร DC Buck Converter กำหนดให้แรงดันเข้า 50 VDC ค่าความถี่สวิตซ์ที่ 1kHz. โดยประมาณ อัตราขยายของตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสเป็น 20V/1V และ 1A/1V ตามลำดับ ทั้งนี้จะทดสอบวงจรที่ค่า Duty Cycle ที่ 0.25, 0.5 และ 0.75

ขณะค่า Duty Cycle ที่ 0.25 รูปคลื่นสัญญาณ V_{GS} และ V_{Load}, I_{Load} ของวงจรแสดงดังภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 ขณะค่า Duty Cycle ที่ 0.5 รูปคลื่นสัญญาณ V_{GS} และ V_{Load}, I_{Load} ของวงจรแสดงดังภาพที่ 4.14 และ 4.15 และขณะค่า Duty Cycle ที่ 0.75 รูปคลื่นสัญญาณ V_{GS} และ V_{Load}, I_{Load} ของวงจรแสดงดังภาพที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อค่า Duty Cycle มีค่าสูงขึ้นค่าแรงดันและกระแสเฉลี่ยของวงจรจะสูงขึ้น ซึ่งผลตอบสนองของสัญญาณจะสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการจำลองวงจรดังอธิบายไว้ในบทที่ 2.

4.6 การทดสอบวงจรแปลงกำลังไฟตรงแบบทบระดับแรงดัน

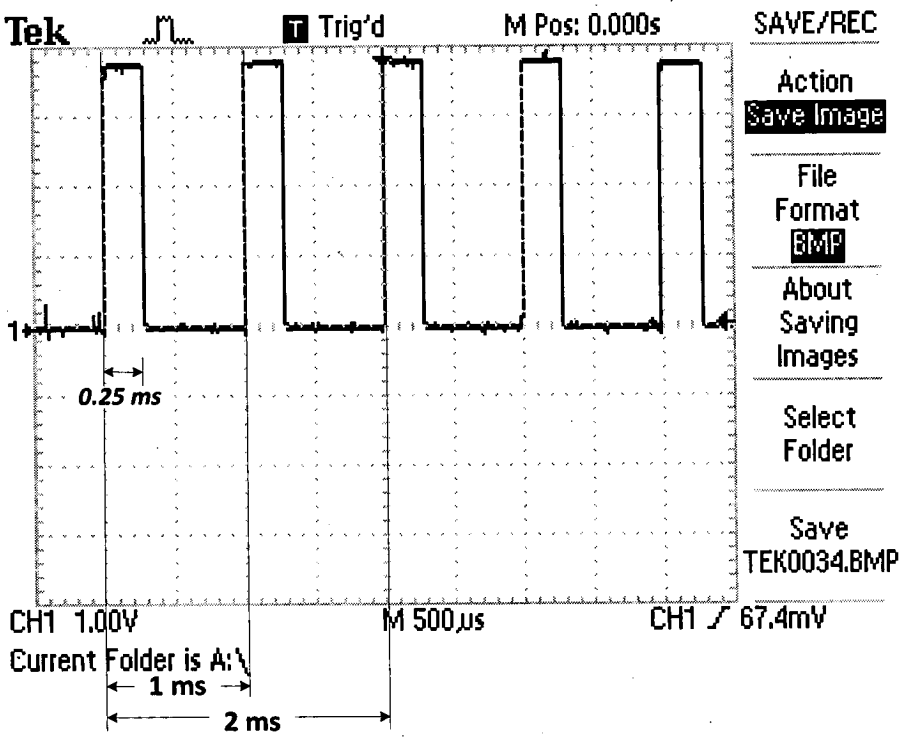
วงจร DC Boost Converter มีทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟตรงขาออกดังแสดงในภาพที่ 3.16 วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรแปลงกำลังไฟตรงแบบ DC Boost Converter ในโครงการจะใช้ dsPIC30F2010 เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุม โดยการรับข้อมูลการสร้างสัญญาณจากโปรแกรม "DC Converter" ผ่านโปรแกรม MPLABC30 และ CCS (Code Composer Studio) เพื่อแปลงเป็น HEX file และส่งผ่านการ์ด ICD2 มาทางพอร์ต USB เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.4



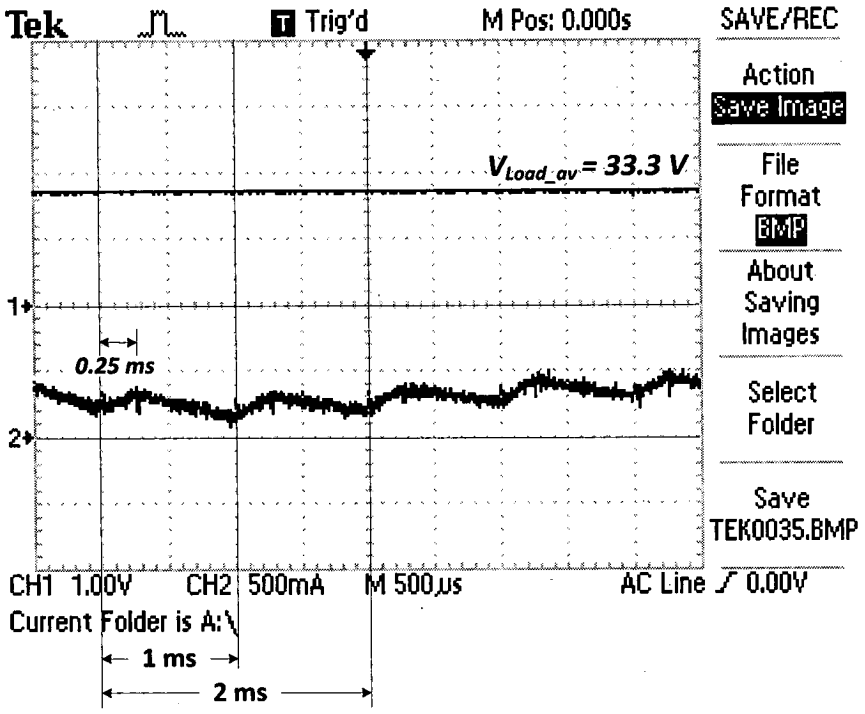
ภาพที่ 4.18 วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบ DC Boost Converter

วงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบทบระดับแรงดันประกอบด้วย 2 ส่วนคือ วงจรสร้างสัญญาณควบคุม (dsPIC30F2010 Controller Board) และวงจร DC Boost Converter โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟตรงแบบนี้มีโครงสร้างเหมือนกับในวงจร DC Buck Converter ในหัวข้อที่ 4.4

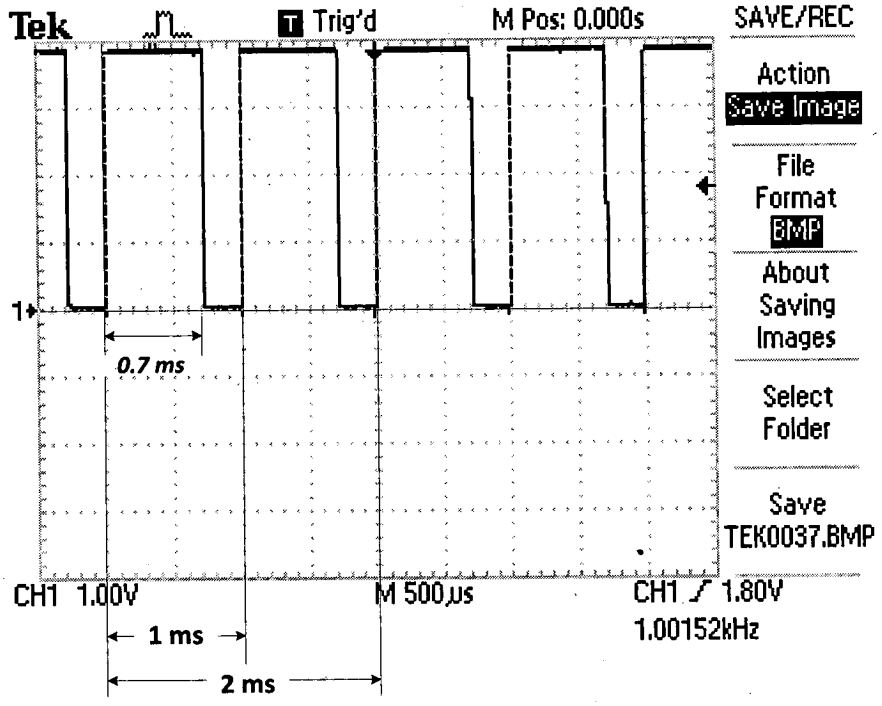
รูปคลื่นสัญญาณจากการทดสอบวงจร DC Boost Converter แสดงในภาพที่ 4.19 ถึงภาพที่ 4.24



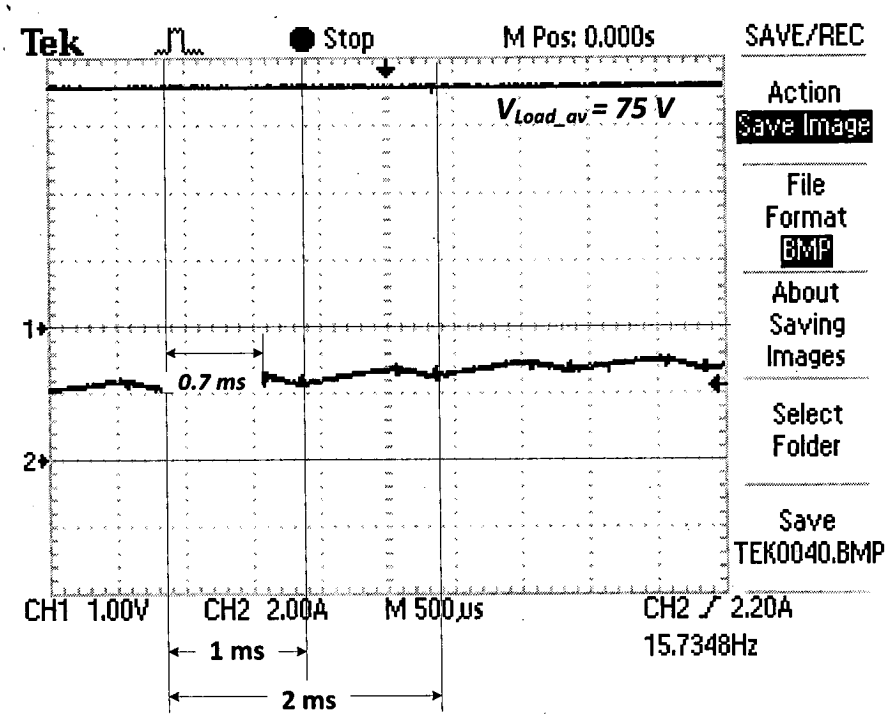
ภาพที่ 4.19 รูปคลื่นสัญญาณควบคุม V_{GS} ของ Power MOSFET Q1 ในภาพที่ 4.18 ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.25



ภาพที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด (V_{Load}, I_{Load}) ของวงจร DC Boost Converter ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.25



ภาพที่ 4.21 รูปคลื่นสัญญาณควบคุม V_{GS} ของ Power MOSFET Q1 ในภาพที่ 4.18 ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลด (V_{Load}, I_{Load}) ของวงจร DC Boost Converter ขณะค่า Duty Cycle เท่ากับ 0.7

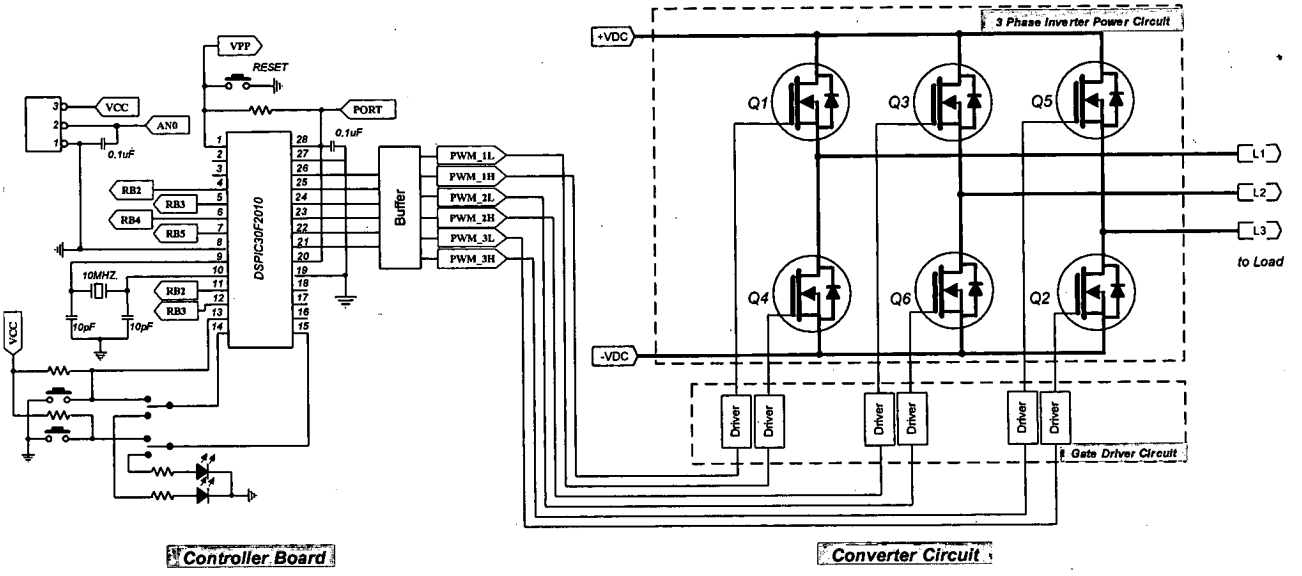
ในการทดลองวงจร DC Buck Converter กำหนดให้แรงดันเข้าเท่ากับ 24 VDC ความถี่สวิตซ์ที่ 1 kHz. โดยประมาณ อัตราขยายของตัวตรวจวัดแรงดันและกระแสเป็น 20V/1V และ 1A/1V ตามลำดับ ทั้งนี้จะทดสอบวงจรที่ค่า Duty Cycle ที่ 0.25 และ 0.7

ขณะค่า Duty Cycle ที่ 0.25 รูปคลื่นสัญญาณ V_{GS} และ V_{Load}, I_{Load} ของวงจรแสดงดังภาพที่ 4.19 และภาพที่ 4.20 ขณะค่า Duty Cycle ที่ 0.7 รูปคลื่นสัญญาณ V_{GS} และ V_{Load}, I_{Load} ของวงจรแสดงดังภาพที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ

จะเห็นว่าเมื่อค่า Duty Cycle มีค่าสูงขึ้นค่าแรงดันเฉลี่ยของวงจรจะมีค่าสูงขึ้น โดยจะมีค่าสูงกว่าแรงดันขาเข้า และค่าเฉลี่ยของกระแสจะสูงขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ผลตอบสนองของสัญญาณจะสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการจำลองวงจรดังอธิบายไว้ในบทที่ 2.

4.7 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ FFM 180°

วงจร 3 Phase Fundamental Frequency Modulation (FFM) Inverter มีลักษณะของแรงดันขาออกเป็นรูปคลื่น Square wave ดังได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 วงจรจะประกอบด้วยสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แบบ Power MOSFET จำนวน 6 ตัวต่อเป็น 3 กิ่งวงจรๆละ 2 ตัวต่ออนุกรมกันดังแสดงในภาพที่ 3.18 โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ทั้ง 6 ตัวดังกล่าว แสดงในภาพที่ 2.40



ภาพที่ 4.23 วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

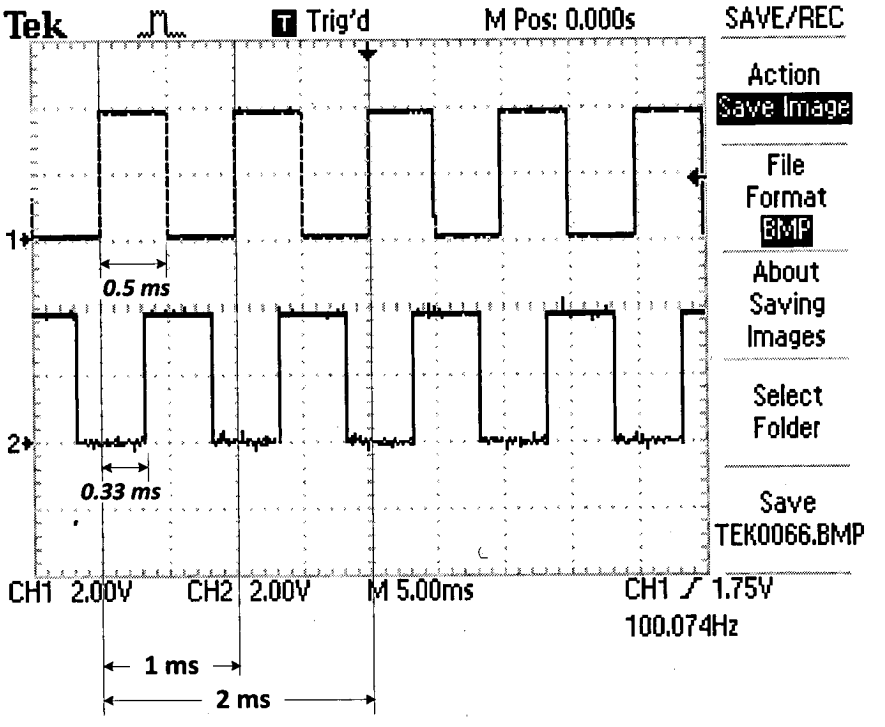
อย่างไรก็ตาม วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจร 3 Phase FFM Inverter ในโครงการนี้จะใช้ dsPIC30F2010 เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุม ทั้งนี้บอร์ด dsPIC30F2010 จะรับข้อมูลการสร้างสัญญาณควบคุมจากโปรแกรม "3 Phase FFM Inverter 180°" ผ่านโปรแกรม MPLABC30 และ CCS

(Code Composer Studio) เพื่อแปลงเป็น HEX file และส่งผ่านการ์ด ICD2 มาทางพอร์ต USB ทั้งนี้ วงจรทดสอบดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 4.23

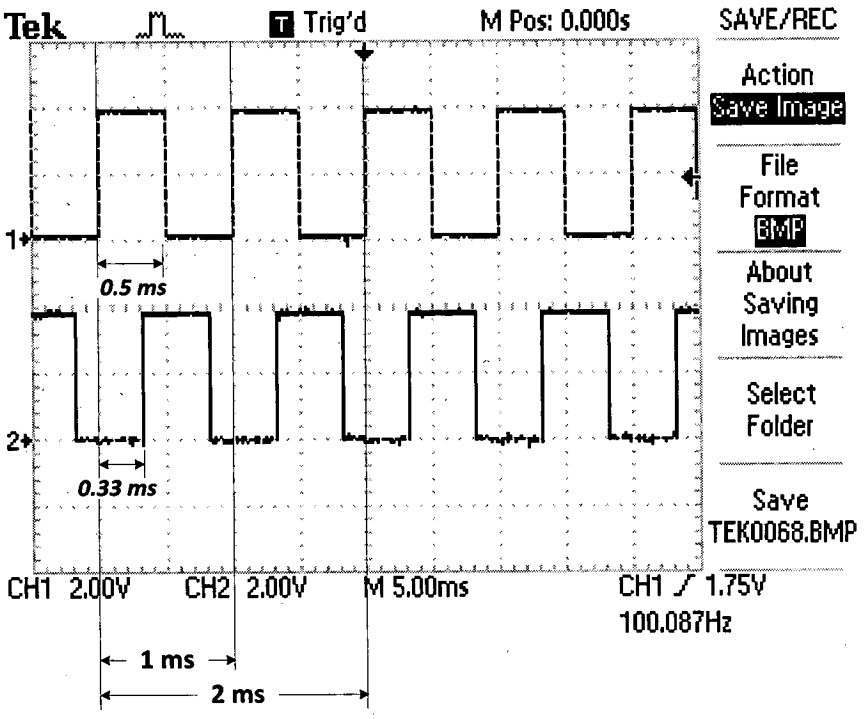
จากภาพที่ 4.23 วงจรทดสอบในส่วนนี้ จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนสร้างสัญญาณควบคุม (dsPIC30F2010 Controller Board) และวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส จะประกอบด้วยวงจรย่อย 3 ส่วน ดังนี้

1. วงจร TLP250 ทำหน้าที่เป็นวงจรแยกส่วนสัญญาณด้วย Opto Isolator พร้อมทั้งยกระดับสัญญาณควบคุมให้สูงขึ้น เพียงพอต่อการใช้ขับเกตของ Power MOSFET ซึ่งเป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งทั้งนี้จะต้องใช้วงจร TLP250 จำนวน 6 วงจร
2. วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสใช้ Power MOSFET เบอร์ IRFP460 ซึ่งเป็นแบบ N-Channel ขนาดพิกัดแรงดัน 500V. ทนกระแสสูงสุดได้ 20A. สามารถทำงานสวิตชิ่งที่ความถี่สูงได้ จำนวน 6 ตัว

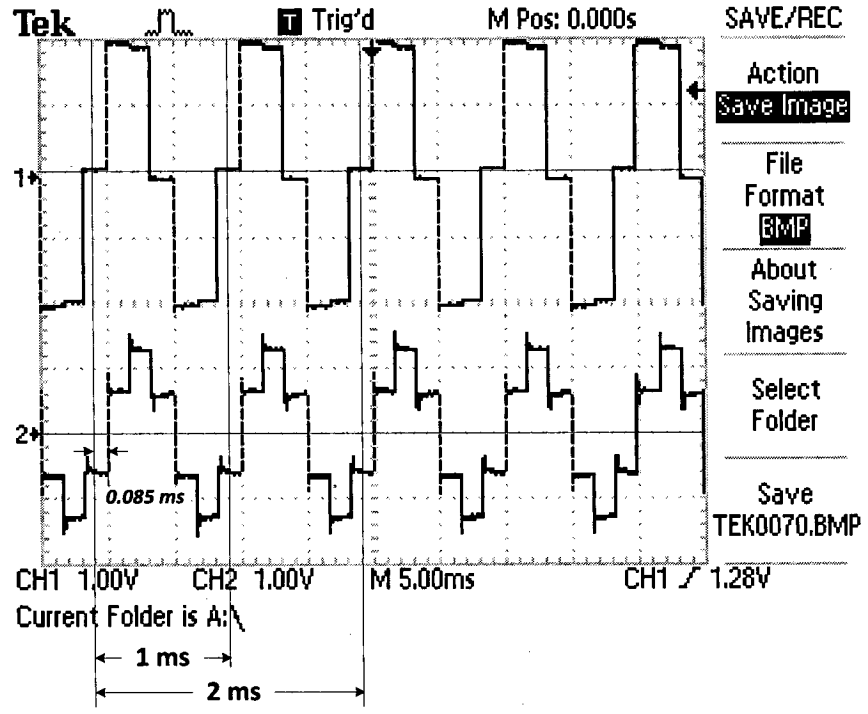
รูปคลื่นสัญญาณควบคุมและแรงดันขาออกจากการทดสอบวงจร 3 Phase FFM Inverter 180° แสดงดังภาพที่ 4.24 ถึงภาพที่ 4.26 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.24 รูปคลื่นสัญญาณที่ขาเกต V_{GS} ของสวิตซ์ Q1 และ Q3 ในวงจร 3 Phase FFM 180° Inverter ที่ความถี่หลักขาออก 100 Hz.



ภาพที่ 4.25 รูปคลื่นสัญญาณที่ขาเกต V_{GS} ของสวิตช์ Q3 และ Q5 .oวงจร 3 Phase FFM 180° Inverter ที่ความถี่หลักขาออก 100 Hz.



ภาพที่ 4.26 รูปคลื่นแรงดันเฟสและแรงดันสายไฟขาออกของวงจร 3 Phase FFM 180° Inverter ที่ความถี่หลักขาออก 100 Hz.

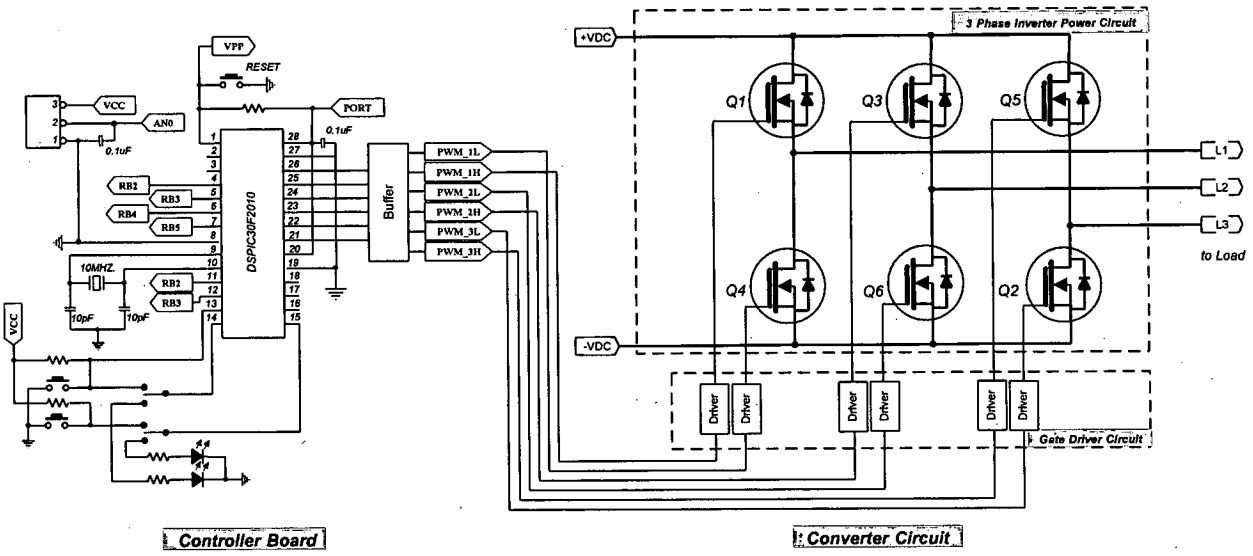
จากภาพที่ 4.24 และ 4.25 จะเห็นว่ารูปคลื่นสัญญาณควบคุมที่ขาเกต (V_{GS}) ของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $Q1$, $Q3$ และ $Q5$ จะล้าหลังซึ่งกันและกันอยู่ 120° ไฟฟ้า (ในที่นี้คือ 0.33 ms.) ตามซีเควันซ์ของแต่ละเฟสที่สวิตช์นั้นต่อวงจร โดยสัญญาณควบคุมแต่ละสัญญาณมีความกว้าง 180° ไฟฟ้า (ในที่นี้คือ 0.5 ms.) อย่างไรก็ตามสัญญาณควบคุมระหว่างสวิตช์ที่ต่ออนุกรมกันอยู่ (เช่น $Q1$ กับ $Q4$) ซึ่งจะต้องล้าหลังซึ่งกันและกัน (ในที่นี้เป็นสัญญาณแบบ Complimentary) นั้นไม่ได้นำแสดงในภาพ

จากภาพที่ 4.26 จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันเฟสและแรงดันสายไฟขาออกของวงจร 3 Phase FFM 180° Inverter มีผลตอบสนองของสัญญาณสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการจำลองวงจรดังอธิบายไว้ในบทที่ 2. โดยแรงดันเฟสล้าหลังแรงดันสายไฟอยู่ 30° ไฟฟ้า (0.085 ms.)

4.8 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ FFM 120°

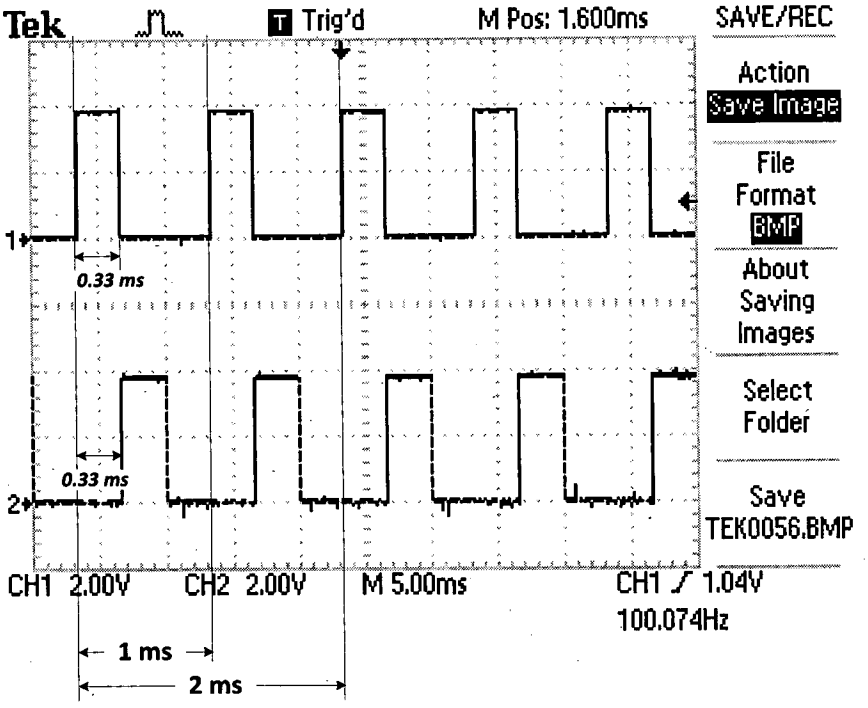
วงจร 3 Phase FFM 120° Inverter มีลักษณะวงจรเหมือนกับแบบ FFM 180° ดังได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 โดยสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ทั้ง 6 ตัว จะมีรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 2.45

อย่างไรก็ตาม วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจร 3 Phase FFM Inverter ในโครงการนี้จะใช้ dsPIC30F2010 เป็นตัวสร้างสัญญาณควบคุม ทั้งนี้บอร์ด dsPIC30F2010 จะรับข้อมูลการสร้างสัญญาณควบคุมจากโปรแกรม "3 Phase FFM 120° Inverter" ผ่านโปรแกรม MPLABC30 และ CCS (Code Composer Studio) เพื่อแปลงเป็น HEX file และส่งผ่านการ์ด ICD2 มาทางพอร์ต USB ทั้งนี้วงจรทดสอบจะเหมือนกับวงจร 3 Phase FFM 180° Inverter ทุกประการ ดังแสดงในภาพที่ 4.27

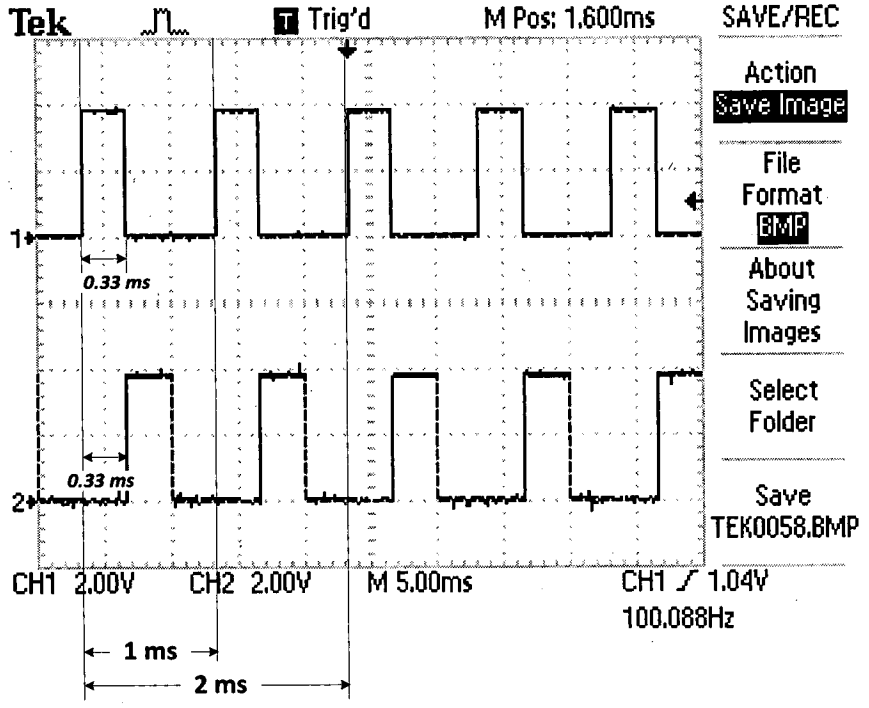


ภาพที่ 4.27 วงจรสำหรับทดสอบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

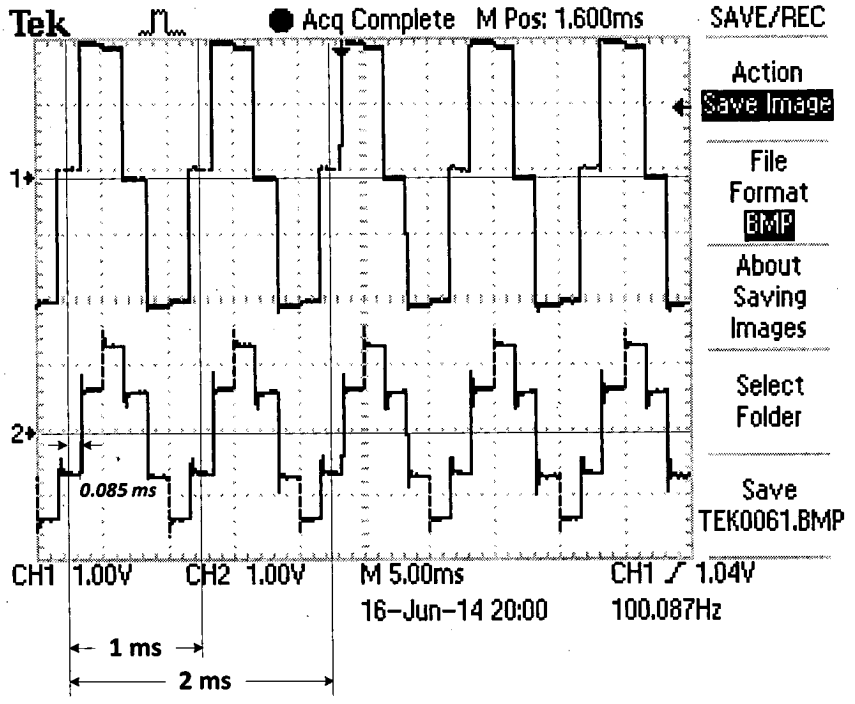
รูปคลื่นสัญญาณควบคุมและแรงดันขาออกจากการทดสอบวงจร 3 Phase FFM Inverter 180° แสดงดังภาพที่ 4.28 ถึงภาพที่ 4.30 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.28 รูปคลื่นสัญญาณที่ขาเกต V_{GS} ของสวิตซ์ Q1 และ Q3 ในวงจร 3 Phase FFM 120° Inverter ที่ความถี่หลักขาออก 100 Hz.



ภาพที่ 4.29 รูปคลื่นสัญญาณที่ขาเกต V_{GS} ของสวิตซ์ Q3 และ Q5 ในวงจร 3 Phase FFM 120° Inverter ที่ความถี่หลักขาออก 100 Hz.



ภาพที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดันเฟสและแรงดันสายไฟขาออก ของวงจร 3 Phase FFM 120° Inverter ที่ความถี่หลักขาออก 100 Hz.

จากภาพที่ 4.28 และ 4.29 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมที่ขาเกต (V_{GS}) ของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง $Q1$, $Q3$ และ $Q5$ จะล้าหลังซึ่งกันและกันอยู่ 120° ไฟฟ้า (0.33 ms.) ตามซีเควันซ์ของแรงดันเฟสแต่ละเฟสที่สวิตซ์นั้นต่ออยู่ในวงจร โดยแต่ละสัญญาณควบคุมมีความกว้าง 120° ไฟฟ้า (0.33 ms.) อย่างไรก็ตามสัญญาณควบคุมระหว่างสวิตซ์ที่ต่ออนุกรมกันอยู่ (เช่น $Q1$ กับ $Q4$) ซึ่งจะล้าหลังซึ่งกันและกัน 180° ไฟฟ้า (หรือเรียกว่าสัญญาณแบบ Complimentary) นั้นไม่ได้นำแสดงในภาพ

จากภาพที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดันเฟสและแรงดันสายไฟขาออกของ 3 Phase FFM 120° Inverter มีผลตอบสนองของสัญญาณสอดคล้องกับทฤษฎีและผลการจำลองวงจรดังอธิบายไว้ในบทที่ 2. โดยแรงดันเฟสล้าหลังแรงดันสายไฟอยู่ 30° ไฟฟ้า (0.085 ms.) เช่นกัน

4.9 สรุปการทดสอบ

ผลจากการทดสอบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบต่างๆด้วยการประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโครงการนี้ จะเห็นได้ว่าสามารถแปลงผันกำลังไฟฟ้าได้ตรงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ ทั้งนี้สามารถใช้ในการเรียนรู้หลักการควบคุมการแปลงผันได้

หลายรูปแบบ และยังสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆในการควบคุมระบบได้เช่นกัน โดยการปรับเปลี่ยนในโปรแกรมการสร้างสัญญาณควบคุม

อย่างไรก็ตาม วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโครงการนี้นับว่ายังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากยังมีสัญญาณรบกวนในรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออกอยู่บ้าง และยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าความถี่สวิตซ์ให้ได้ค่าแม่นยำตามที่กำหนดไว้ได้ เนื่องจากค่าอุปกรณ์ต่างๆที่ได้คำนวณและกำหนดไว้ รวมทั้งการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร อีกทั้งการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโครงการนี้ยังกระทำที่ระดับแรงดันไม่สูงนัก และค่าความถี่สวิตซ์ที่ใช้ในโครงการจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งในที่นี้จะเน้นในเรื่องความปลอดภัยของผู้ใช้งานซึ่งเป็นนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งถ้านำไปใช้ในงานอื่นๆ เช่นงานวิจัย งานโครงงาน หรือ อื่นๆ ก็สามารถปรับใช้ในระดับแรงดันที่สูงขึ้นได้