

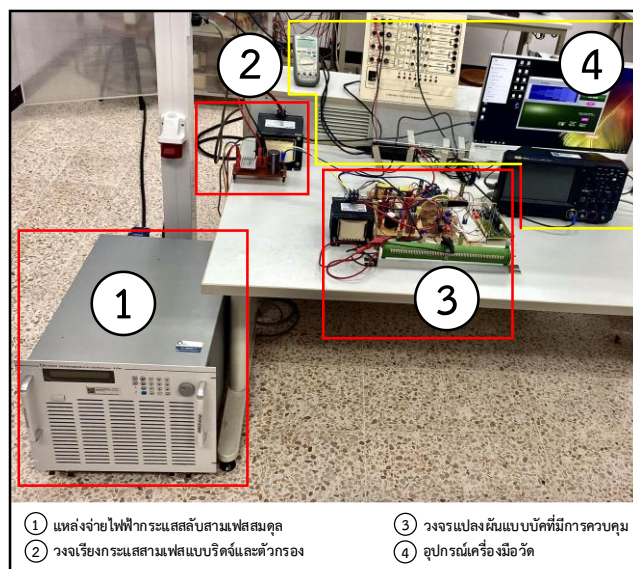
บทที่ 6

การสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

6.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ทั้งการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไว้ ในบทที่ 4 และบทที่ 5 ที่ผ่านมา ได้รับการยืนยันความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันว่าแนวคิด องค์ความรู้ และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ในบทที่ 6 นี้จึงเป็นการนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นให้ผลที่ถูกต้องและเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับยืนยันผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาต่อไป

6.2 การสร้างชุดทดสอบ



รูปที่ 6.1 ภาพรวมของชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ภาพรวมของชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าชุดทดสอบแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่ ① ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล ส่วนที่ ② วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรอง และส่วนที่ ③ วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยจากรูปที่ 6.2 จะพบว่าส่วนที่ ① ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบโปรแกรมได้ (programmable AC power supply) ยี่ห้อ chroma รุ่น 61704 ในขณะที่ส่วนที่ ② และส่วนที่ ③ มีรายละเอียดการเลือกใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

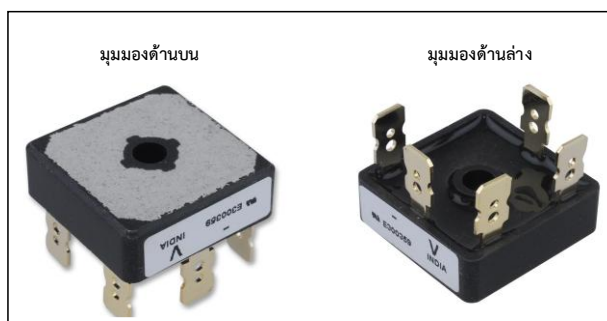
6.2.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นวงจรสำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แบบสำเร็จรูป Vishay Bridge Rectifier รุ่น VS-36MT160 ที่มีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1600 V ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และมีการติดตั้งร่วมกับแผ่นระบายความร้อน (heat sink) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 เพื่อช่วยระบายความร้อน และป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนที่สูงมากเกินไป โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6-1)

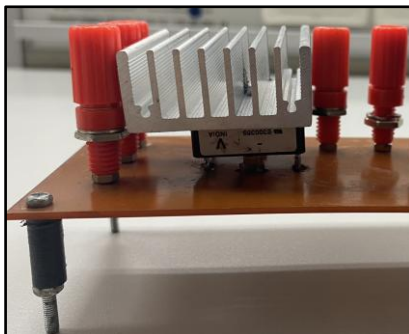
$$v_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} v_s \quad (6-1)$$

โดยที่ v_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

v_s คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีหน่วยเป็นค่าอาร์เอ็มเอส (rms)



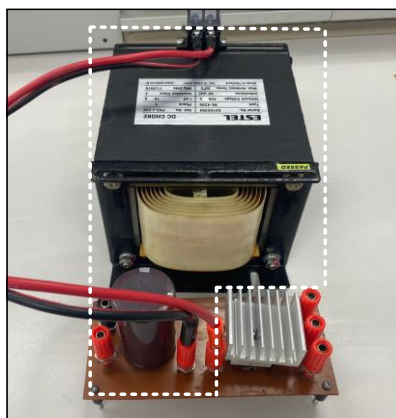
รูปที่ 6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์



รูปที่ 6.3 การติดตั้งแผ่นระบายความร้อนสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

6.2.2 วงจรกรอง

วงจรกรองทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link filter) ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแสดงได้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งวงจรกรองนี้มีหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้มีความเรียบและคงที่มากขึ้น

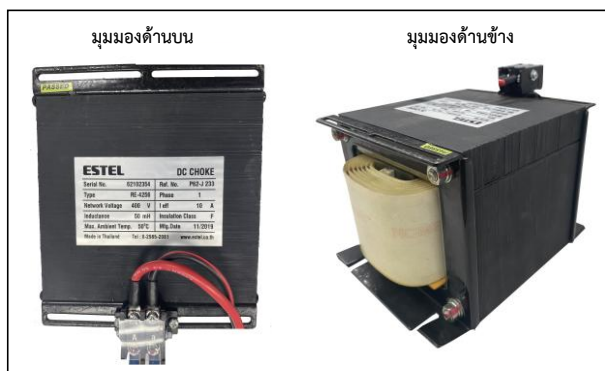


รูปที่ 6.4 วงจรกรอง

โดยรายละเอียดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรกรองที่เลือกใช้จะแสดงได้ดังนี้

1) ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองของ งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำของบริษัท ESTEL ประเภท RE-4256 ขนาด 50 mH ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 400 V และ 10 A ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

2) ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวเก็บประจุของบริษัท NIPPON รุ่น Radial Electrolytic Capacitors ขนาด 1000 μF ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 450 V ดังแสดงในรูปที่ 6.6

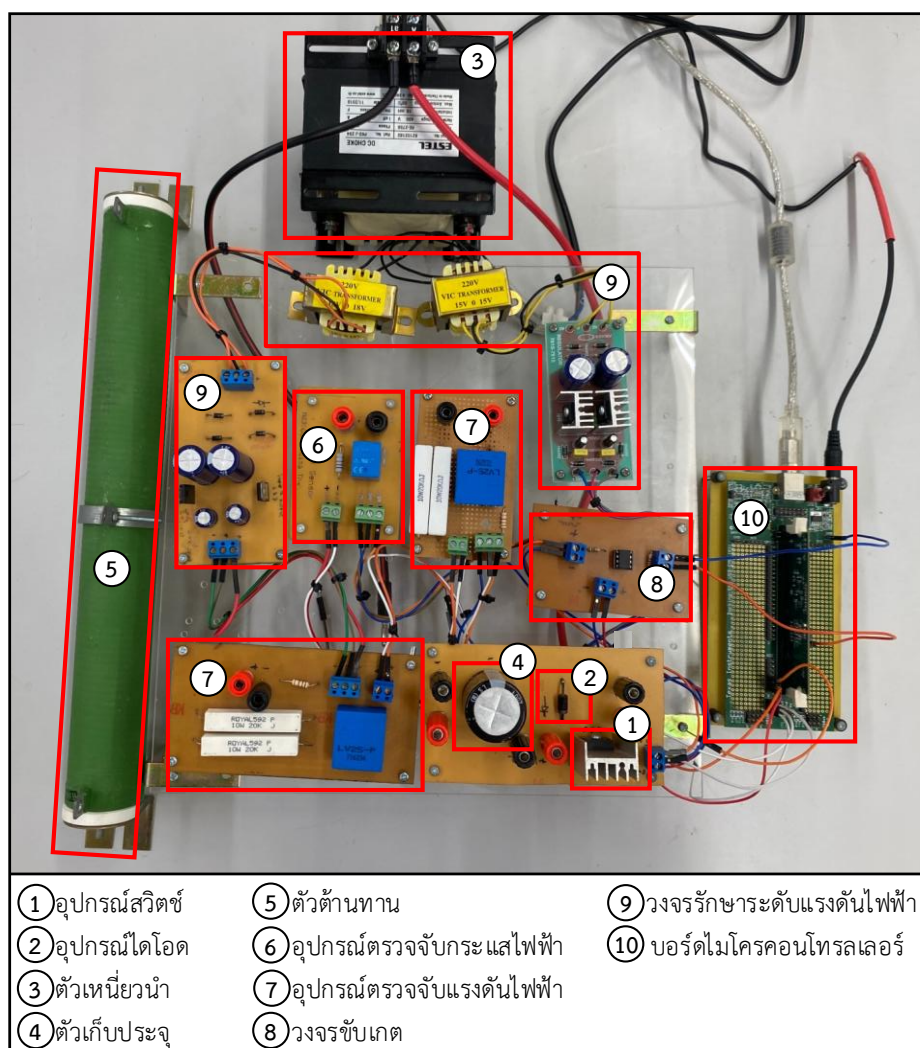


รูปที่ 6.6 ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

6.2.3 วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งจากรูปจะพบว่า สามารถแบ่งออกได้เป็น 10 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ ① อุปกรณ์สวิตช์ส่วนที่ ② ไดโอด ส่วนที่ ③ ตัวเหนี่ยวนำ ส่วนที่ ④ ตัวเก็บประจุ ส่วนที่ ⑤ ตัวต้านทานซึ่งเป็นโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัค ส่วนที่ ⑥ อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า ส่วนที่ ⑦ อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ส่วนที่ ⑧ วงจรขับเคลื่อน (gate driver) ส่วนที่ ⑨ วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า และส่วนที่ ⑩ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้

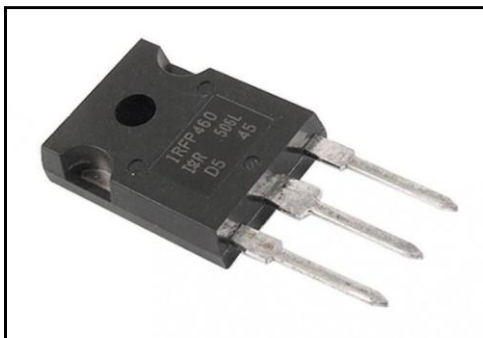
ออกแบบชุดทดสอบให้สามารถทำงานได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 360 W หรือพิกัดแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัค (v_o) เท่ากับ 60 V ซึ่งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่เลือกใช้งานแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 6.7 ชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1) อุปกรณ์สวิตช์

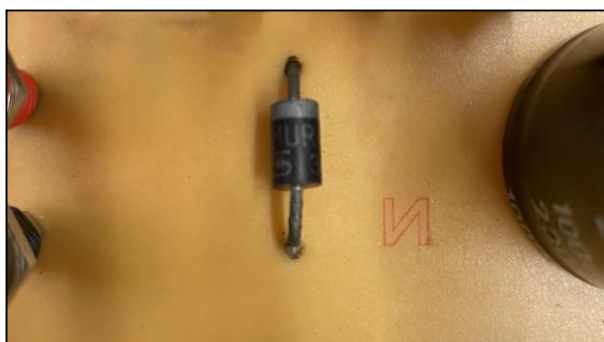
อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค เป็นมอดูลสวิตช์มอสเฟต (mosfet) รุ่น IRFP460 ของบริษัท Vishay ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 500 V และ 20 A ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 อุปกรณ์สวิตช์

2) ไดโอด

ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 ซึ่งเป็นไดโอดกำลังรุ่น MUR460 ของบริษัท Vishay มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 400 V



รูปที่ 6.9 อุปกรณ์ไดโอด

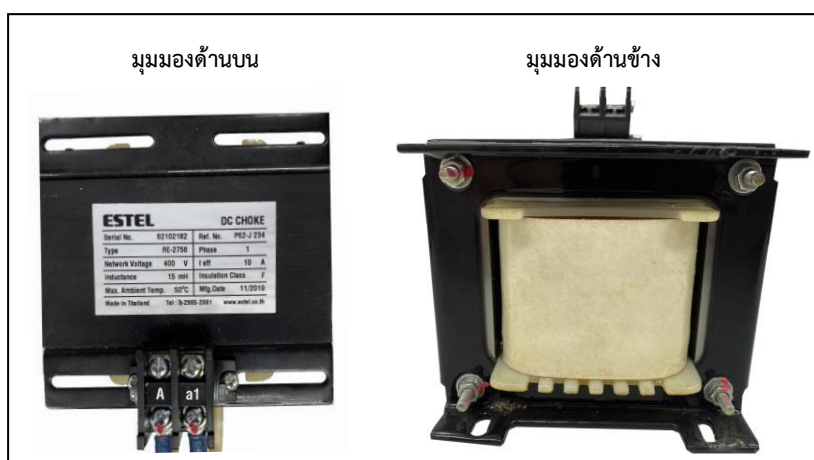
3) ตัวเหนี่ยวนำ

ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัค สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (6-2)

$$L > \frac{(V_{dc} - V_o)}{f \Delta i_L V_{dc}} V_o \quad (6-2)$$

โดยที่ Δi_L คือ ค่ากระแสไฟฟ้าพลัว (ripple current)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (6-2) ร่วมกับค่าพิกัดต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันแบบบัก ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_{dc}) เท่ากับ 93.56 V แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) เท่ากับ 60 V และความถี่การสวิตช์ (f_s) เท่ากับ 10 kHz และกำหนดให้ กระแสไฟฟ้าพลั่ว (Δi_L) มีค่าไม่เกิน 0.2 A จะสามารถคำนวณขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) ได้เท่ากับ 11 mH และเมื่อคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย (safety factor) เท่ากับ 25% แล้ว งานวิจัยวิทยานิพนธ์ จึงได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 15 mH ของบริษัท ESTEL รุ่น RE-2756 ดังแสดงในรูปที่ 6.10 ซึ่งมี พิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 400 V และ 10 A ตามลำดับ



รูปที่ 6.10 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก

4) ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัก สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (6-3)

$$C > \frac{\Delta i_L}{8f\Delta v_C} \quad (6-3)$$

โดยที่ ΔV_C คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าพลั่ว (ripple voltage)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (6-3) และกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าพลั่ว (Δv_C) มีค่าไม่เกิน 2.8 mV จะสามารถคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุ (C) ได้เท่ากับ 892.86 μF และเมื่อคำนึงถึง

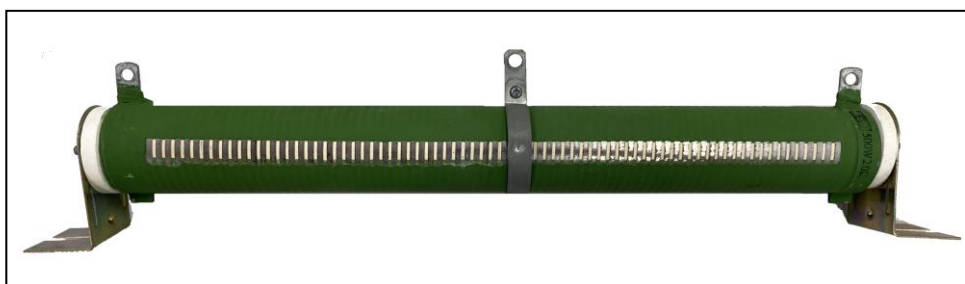
ตัวประกอบนิรภัยเท่ากับ 25% งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด $1000\ \mu\text{F}$ ของบริษัท Nichicon ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 200 V



รูปที่ 6.11 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัก

5) ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานซึ่งเป็นโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัก งานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้ตัวต้านทานกำลังประเภท Dummy Load Resistor ขนาด $10\ \Omega$ ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 500 W แสดงได้ดังรูปที่ 6.12

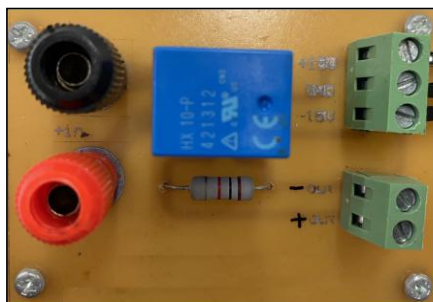


รูปที่ 6.12 โหลดตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัก

6) อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า มีหน้าที่ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก โดยจะตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงขนาด 0 V ถึง 3.3 V ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณควบคุม โดยอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้เป็น

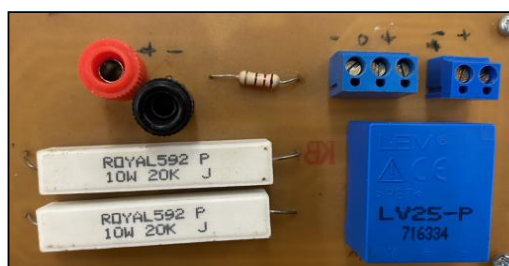
Current Transducer รุ่น HX 10-P ของบริษัท LEM สามารถตรวจจับสนกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 10 A ดังแสดงในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 อุปกรณ์ตรวจจับสนกระแสไฟฟ้า

7) อุปกรณ์ตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้า

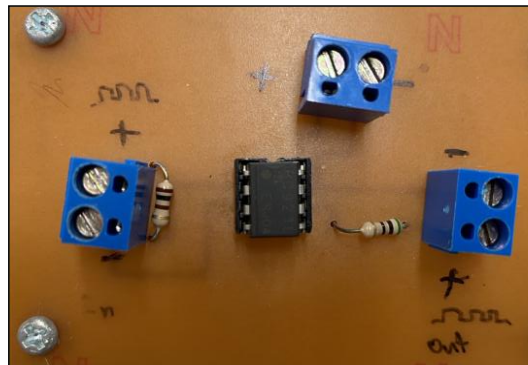
อุปกรณ์ตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้า มีหน้าที่ตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัค จากนั้นจะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 V ถึง 3.3 V ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณควบคุม โดยอุปกรณ์ตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้างัดกล่าวคือรุ่น LV 25-P ของบริษัท LEM ซึ่งสามารถตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 600 V ดังแสดงในรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 อุปกรณ์ตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้า

8) วงจรขับเกต

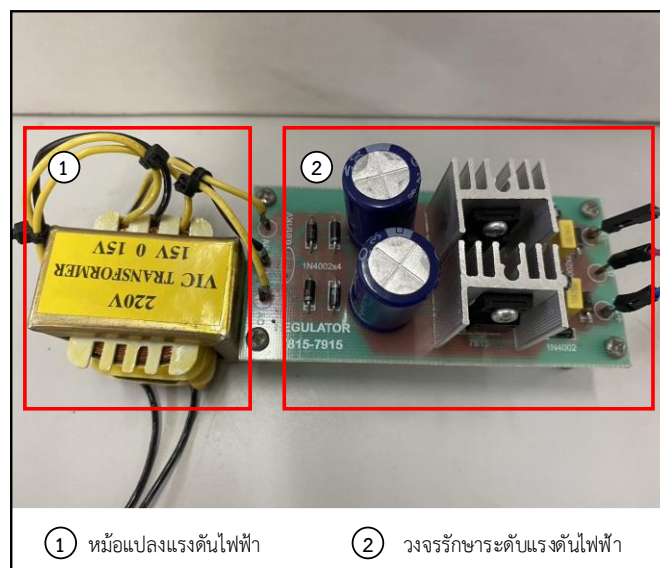
วงจรขับเกต (gate driver circuit) มีหน้าที่ในการขยายสัญญาณควบคุมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3.3 V ให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 15 V เพื่อให้มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเพียงพอต่อการควบคุมการเปิดและปิดของอุปกรณ์สวิตช์ซมอสเฟต โดยวงจรขับเกตดังกล่าวคือ PC923 ของบริษัท SHARP ดังแสดงในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 วงจรขั้วเกต

9) วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

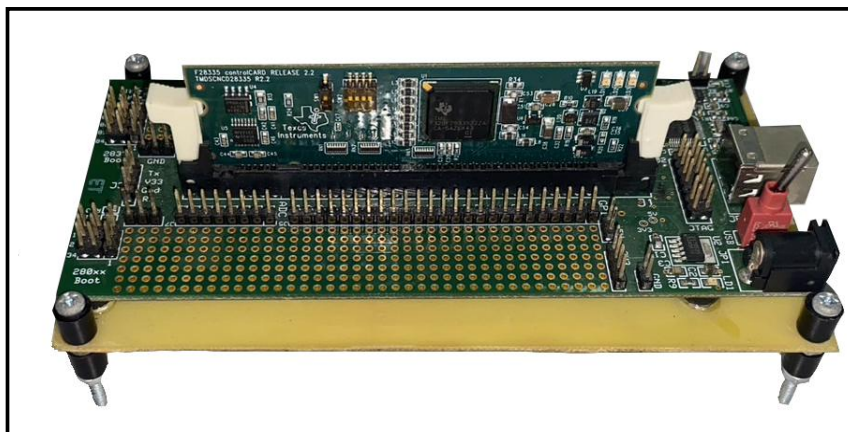
วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 6.16 ซึ่งจากรูปจะพบว่าประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ ① หม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัท VIC มีหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก $220\text{ V}_{\text{rms}}$ ให้มีค่าเท่ากับ 15 V_{rms} และส่วนที่ ② วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส มีหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 15 V_{rms} ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นใช้ไอซีคงค่าแรงดันไฟฟ้าเบอร์ 7815 และไอซีเบอร์ 7915 เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ -15 V , 0 V และ $+15\text{ V}$ สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า และวงจรขั้วเกตของชุดทดสอบ



รูปที่ 6.16 วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

10) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

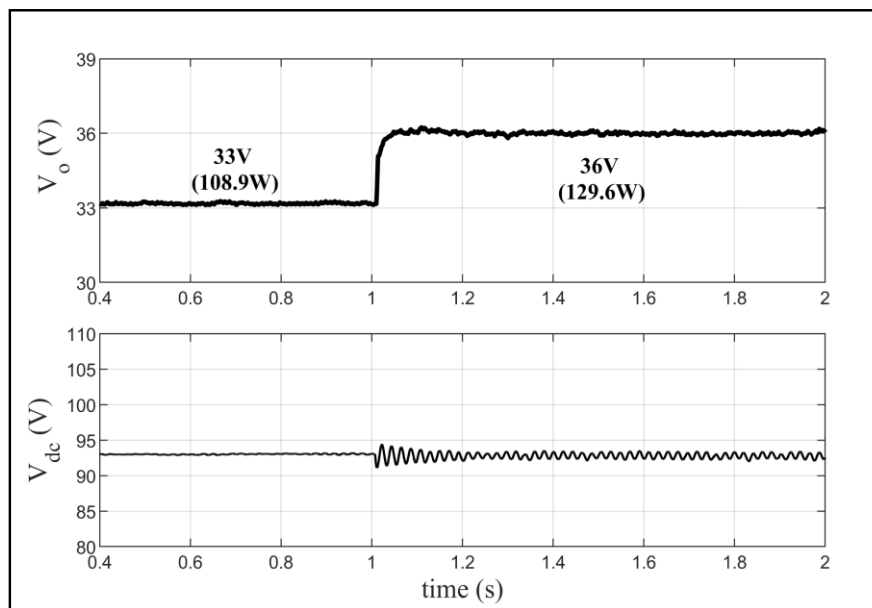
งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ของบริษัท Texas Instruments ดังแสดงในรูปที่ 6.17 สำหรับทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักโดยรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากอุปกรณ์ตรวจจับสนะไฟฟ้าและอุปกรณ์ตรวจจับสนะไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก (analog) ผ่านช่องรับสัญญาณ ADC ของบอร์ดแล้วมาแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) เพื่อใช้ในการประมวลผลสร้างสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนดังสมการที่ (3-84) ในบทที่ 3 ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะถูกโปรแกรมลงในบอร์ดดังกล่าว ด้วยภาษาซีที่อาศัยโปรแกรม Code Composer Studio จากนั้นจะส่งออกสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มขนาด 3.3 V ผ่านช่องส่งสัญญาณ ePWM ของบอร์ดไปยังวงจรขับเคลื่อนต่อไป



รูปที่ 6.17 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335

6.3 ผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ

การทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ จะดำเนินการโดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัก (V_o^*) จาก 33 V เป็น 36 V ที่เวลา 1 วินาที ผลการทดสอบที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 6.18 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ในช่วงเวลาที่ 0.4 วินาที ถึง 1 วินาที แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) จะมีค่าเท่ากับ 33 V และเมื่อถึงวินาทีที่ 1 แรงดันไฟฟ้างอกจะมีค่าเพิ่มเป็น 36 V จนกระทั่งถึงเวลาที่วินาทีที่ 2 ซึ่งแรงดันในทั้งสองช่วงเป็นไปตามแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยัน ได้ว่าชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับตรวจสอบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและแสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้ และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 7 ต่อไป



รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ

6.4 สรุป

บทที่ 6 นี้เป็นการนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยได้กล่าวถึง อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบเลือกใช้ รวมถึงนำเสนอผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ โดยจากผลแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมโหมดการเลื้อนสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบักได้ถูกต้องตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่โปรแกรมไว้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับองค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ โดยการยืนยันผลของเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 7