

บทที่ 8

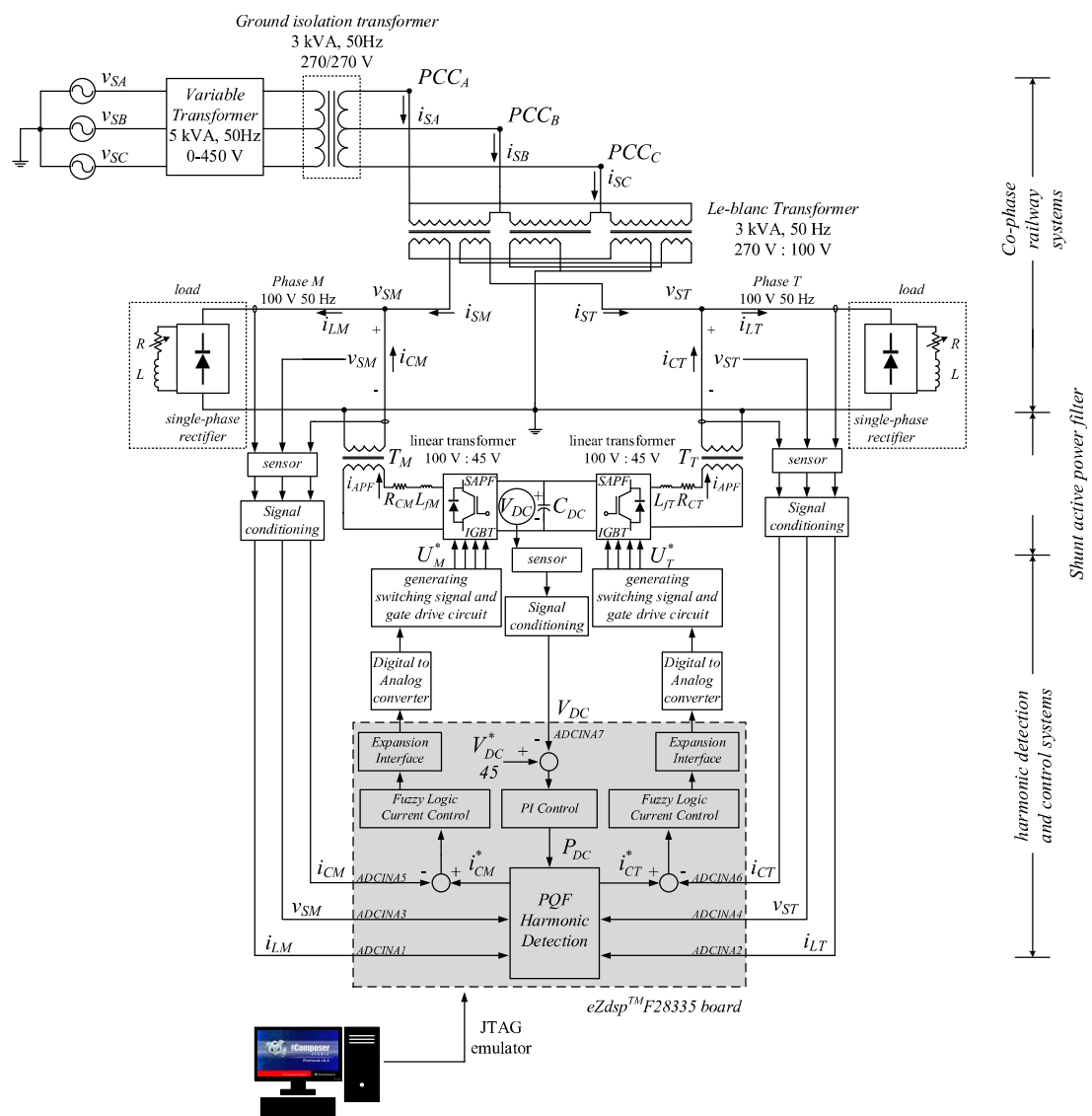
การทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าจำลอง ในห้องปฏิบัติการ

8.1 กล่าวนำ

เพื่อทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์โมนิกในทางปฏิบัติ ในบทนี้จึงนำเสนอการกำจัดฮาร์โมนิกบนระบบฮาร์ดแวร์สำหรับทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบรางไฟฟ้าจำลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ระบบรางไฟฟ้าจำลองซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ของ ชาคริต ปานแป้น (ชาคริต ปานแป้น, 2564) โดยระบบฮาร์ดแวร์ดังกล่าวจะมีโครงสร้างที่จำลองมาจากระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมที่พิจารณาในบทที่ผ่านมา แต่จะมีค่าพารามิเตอร์ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า รวมไปถึงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่แตกต่างไปเพื่อให้เหมาะสมกับระบบจำลองที่พิจารณา สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะทำการคำนวณตรวจสอบฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิกที่ได้จากการออกแบบไว้ด้วยวิธีการที่นำเสนอไว้ในบทที่ 6 และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอ โดยจะนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานใหม่ให้มีความเหมาะสมกับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองเพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองจะนำเสนอในหัวข้อที่ 8.2 การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจะนำเสนอในหัวข้อที่ 8.3 และการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์โมนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจะนำเสนอในหัวข้อที่ 8.4

8.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลอง

โครงสร้างของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา วงจรกรองกำลังแยกที่เฟสขนาน และการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก และระบบควบคุมซึ่งจะถูกโปรแกรมไว้บนบอร์ด eZdsp™F28335 ดังแสดงในรูปที่ 8.1 โดยสามารถแสดงรายละเอียดโครงสร้างแต่ละส่วนของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 8.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า

8.2.1 ระบบรางไฟฟ้าจำลอง

โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าจำลองที่พิจารณาจะเริ่มจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบคงค่าได้ที่เชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้ (variable transformer) สำหรับปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ค่าพิกัดเท่ากับ 270 V, 50 Hz จากนั้นเอาต์พุตจากหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้จะถูกจ่ายให้กับหม้อแปลงแยกกราวด์ (ground isolation transformer) เพื่อแยกกราวด์ของระบบรางไฟฟ้าออกจากกราวด์ของห้องปฏิบัติการ จากนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากหม้อแปลงแยกกราวด์จะถูกป้อนให้กับหม้อแปลงเลอบลองค์ (le-blanc transformer) เพื่อทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้า และแปลงจากระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสเป็นระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (เฟส M และ T) ที่ค่าพิกัดแรงดันเท่ากับ 100 V, 50 Hz โดยเอาต์พุตจากหม้อแปลงเลอบลองค์จะถูกนำไปป้อนให้กับชุดโหลดของระบบรางไฟฟ้าในแต่ละเฟส โดยชุดโหลดดังกล่าวในแต่ละเฟสจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดตัวต้านทาน (resistor) ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (inductor) โดยสามารถดูสรุปอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้าจำลองและค่าพิกัดของอุปกรณ์ได้ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบรางไฟฟ้าจำลอง

ชื่ออุปกรณ์	ค่าพิกัดอุปกรณ์
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบคงค่าได้	380 V, 50 Hz
หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้	อินพุต 0 – 415 V, เอาต์พุต 0 - 450 V, 50KVA, 50Hz
หม้อแปลงแยกกราวด์	270 V/270 V, 3 KVA, 50Hz
หม้อแปลงเลอบลองค์	270 V/100 V, 3 KVA, 50Hz
วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส	1000 V, 80 A
โหลดตัวเหนี่ยวนำ	200 mH, 5 A
ชุดโหลดไฟแทนโหลดตัวต้านทาน	220-230 V, 200 W

จากตารางที่ 8.1 สามารถแสดงรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้าจำลองได้ดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบคงค่าได้ : ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสให้กับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบคงค่าได้ที่เลือกใช้จะมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 380 V และมีค่าความถี่ 50 Hz ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบคงค่าได้

2) หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้ : ทำหน้าที่ในการลดระดับแรงดันที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสจาก 380 V ให้มีค่าเท่ากับ 270 V หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้ที่เลือกใช้สามารถรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตได้สูงสุด 415 V และด้านเอาต์พุตสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายได้ในช่วง 0-450 V พิกัดกำลังไฟฟ้า 5 KVA และมีค่าความถี่ 50 Hz ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.3



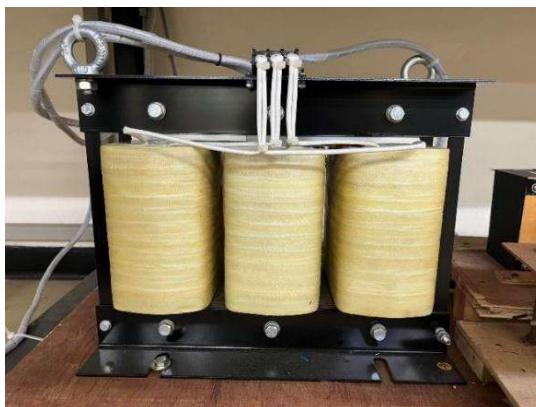
รูปที่ 8.3 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้

3) หม้อแปลงแยกกราวด์ : ทำหน้าที่แยกกราวด์ของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าออกจากกราวด์ของห้องปฏิบัติการเพื่อป้องกันระบบไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเกิดความเสียหาย นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันผลจากปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลเสียต่อการทำงานของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองอีกด้วย โดยหม้อแปลงแยกกราวด์ที่เลือกใช้จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 3 KVA และมีค่าความถี่ 50 Hz ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.4



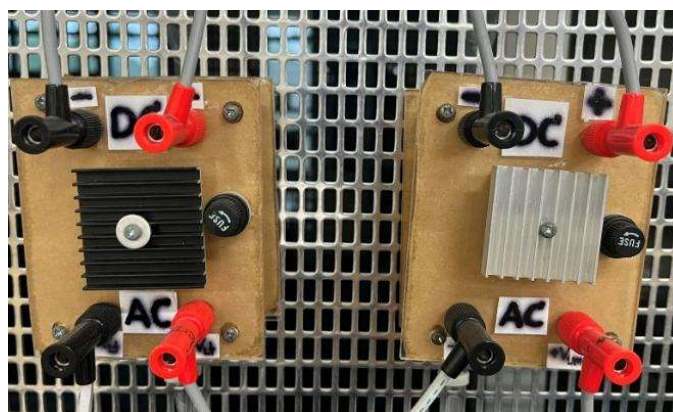
รูปที่ 8.4 หม้อแปลงแยกกราวด์

4) หม้อแปลงเลอบลองค์ : ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้า และแปลงจากระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส 270 V เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (เฟส M และ T) โดยทั้งสองเฟสมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเฟสละ 100 V และเนื่องจากหม้อแปลงเลอบลองค์มีคุณสมบัติในการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทั้งสองเฟสจึงมีแอมพลิจูดขนาดเท่ากัน แต่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา โดยหม้อแปลงเลอบลองค์ที่เลือกใช้จะมีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 3 KVA มีค่าความถี่ 50 Hz และมีอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า 380/143 V ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.5



รูปที่ 8.5 หม้อแปลงเลอบลองค์

5) ชุดโหลดของระบบรางไฟฟ้าจำลอง : ชุดโหลดของระบบรางไฟฟ้าจำลองแต่ละเฟส (เฟส M และ T) จะประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้กับโหลดตัวเหนี่ยวนำขนาด 200 mH ขนาดฟิวส์ 5 A ที่ต่ออนุกรมกับชุดโหลดไฟ (ทำหน้าที่เหมือนโหลดตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้) โดยการเปิดหลอดไฟ 1 ดวงจะทำให้ได้กระแสโหลด 0.25 A โดยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส โหลดตัวเหนี่ยวนำ และชุดโหลดไฟสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.6 ถึง 8.8 ตามลำดับ



รูปที่ 8.6 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส



รูปที่ 8.7 โหลดตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 8.8 ชุดหลอดไฟแทนโหลดตัวต้านทาน

8.2.2 วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน

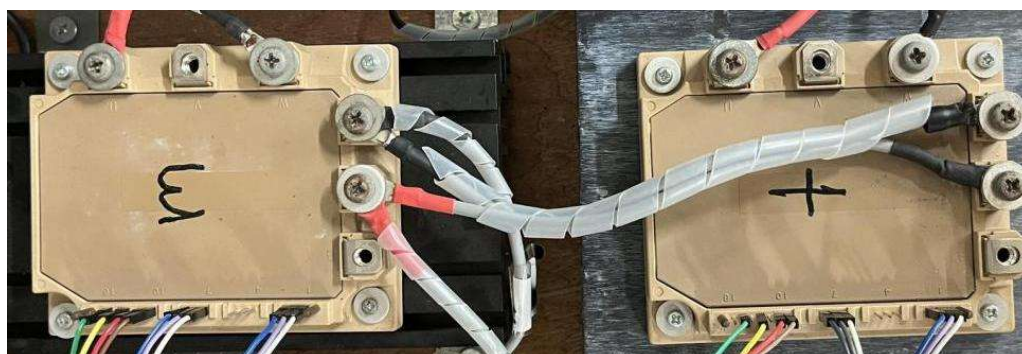
วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่ใช้ในฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจะใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานแบบชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสองขั้วที่มีแหล่งสะสมพลังงานเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor) ร่วมกัน โดยวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งขั้วจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ IGBT จำนวน 4 ตัวทำหน้าที่เป็นสวิตช์ อิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (เฟส M และ T) ผ่าน หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส (linear transformer) สำหรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อเป็นการลดขนาดของค่าแรงดันบัสไฟตรงรวมไปถึงลดขนาดพิกัดอุปกรณ์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน เช่น ตัวเก็บประจุ (capacitor) ตัวเหนี่ยวนำ (inductor) และตัวต้านทาน (resistor) ซึ่งเป็นการประหยัดต้นทุนในการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลอง โดยสามารถดูสรุปอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานและค่าพิกัดของอุปกรณ์ได้ดังตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ชื่ออุปกรณ์	ค่าพิกัดอุปกรณ์
วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส	600 V, 50 A
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	18 mH, 10 A
ตัวต้านทานของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	10 Ω , 200 W
ตัวเก็บประจุของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	4700 μ F, 400 V
หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส	220 V/100 V, 5 KVA, 50 Hz
ค่าแรงดันบัลไฟตรง	45 V

จากตารางที่ 8.2 สามารถแสดงรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานได้ดังนี้

1) วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส : ทำหน้าที่ในการฉีดกระแสชดเชยให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยจะใช้ไอจีบีทีมอดูลรุ่น Fuji 6MBP50RA060-55 ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 600 V และกระแส 50 A เนื่องจากไอจีบีทีมอดูลดังกล่าวมีระบบป้องกันการลัดวงจรซึ่งจะช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบฮาร์ดแวร์ ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดในการทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

2) ตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน (L_{JM}, L_{JT}) : ทำหน้าที่ในการลดการกระเพื่อมของสัญญาณกระแสชดเชยจากวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยตัวเหนี่ยวนำที่เลือกใช้สำหรับระบบที่พิจารณานี้มีขนาด 18 mH พิกัดกระแส 10 A ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.10



รูปที่ 8.10 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

3) ตัวต้านทานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (R_{CM}, R_{CT}) : ทำหน้าที่ในการหน่วงกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน รวมไปถึงลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าในกรณีที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทำการฉีดกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) โดยตัวต้านทานที่เลือกใช้จะมีขนาด $10\ \Omega$ พิกัด $200\ W$ ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.11



รูปที่ 8.11 ตัวต้านทานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

4) ตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (C_{DC}) : ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยจะจ่ายแรงดันบัสไฟตรงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส โดยตัวเก็บประจุที่เลือกใช้จะมีขนาด $4700 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 400 V จำนวน 2 ตัวต่อขนานกัน ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.12



รูปที่ 8.12 ตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

5) หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส : ทำหน้าที่ในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสจาก 100 V เหลือ 45 V และวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ส่งผลให้ขนาดพิกัดอุปกรณ์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน รวมไปถึงค่าแรงดันบัสไฟตรงมีขนาดลดลง โดยหม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟสที่เลือกใช้จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 5 KVA ค่าความถี่ 50 Hz และมีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าเป็น $220 \text{ V}/100 \text{ V}$ ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.13



รูปที่ 8.13 หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส

8.2.3 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกและระบบควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟ

สำหรับโค้ดโปรแกรมที่ถูกโปรแกรมไว้บนบอร์ด eZdspTMF28335 ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม CCS v3.3 จะประกอบไปด้วยการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ที่ไม่มีวิธี PSVD ร่วมในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก เนื่องจากกระบวนการคำนวณของวิธี PSVD จะทำให้บอร์ด eZdspTMF28335 ใช้เวลาประมวลผลมากขึ้นซึ่งส่งผลเสียต่อสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีลอสจิกที่ได้ออกแบบในไว้บทที่ 6 และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยค่าอินพุตที่จำเป็นของบอร์ด eZdspTMF28335 จะประกอบไปด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_{SM}, v_{ST}) ค่ากระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ค่ากระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) และค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) โดยค่าอินพุตทั้งหมดจะถูกวัดค่าด้วยตัวตรวจวัด (sensor) จากนั้นเอาต์พุตจากตัวตรวจวัดจะถูกป้อนให้กับวงจรปรัแต่งสัญญาณ (signal conditioning) เพื่อปรับสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่บอร์ด eZdspTMF28335 สามารถรับค่าได้ (ช่วง 0 ถึง 3.3 V) และสุดท้ายเอาต์พุตจากวงจรปรัแต่งสัญญาณจะผ่านการกรองสัญญาณรบกวน (noise) ด้วยวงจรกรองแบบ RC (RC filter) ก่อนจะถูกป้อนให้กับบอร์ด eZdspTMF28335 โดยค่าอินพุตที่ได้รับมาจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF รวมไปถึงคำนวณค่าเอาต์พุตของระบบควบคุม สำหรับค่าเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด eZdspTMF28335 คือ ค่าสัญญาณแรงดันอ้างอิง (U_M^*, U_T^*) โดยค่าแรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นอินพุตของวงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์เพื่อควบคุมการทำงานอุปกรณ์ IGBT ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกต่อไป รายละเอียดชุดอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้สำหรับการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกและระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า : ทำหน้าที่ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_{SM}, v_{ST}) โดยเอาต์พุตของตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าจะถูกจ่ายเป็นอินพุตของวงจรปรัแต่งสัญญาณต่อไป ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่เลือกใช้เป็นหม้อแปลงแท็ปกลาง (center-tapped transformer) ชนิดลดแรงดันไฟฟ้า โดยด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงดังกล่าวมีฟลักซ์แรงดันไฟฟ้า

220 V พิกัดกระแส 1 A และด้านทุติยภูมิมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 15 V ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.14



รูปที่ 8.14 หม้อแปลงแท่งกลางสำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

2) ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า : ทำหน้าที่ในการวัดค่ากระแสโหลดที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (i_{LM}, i_{LT}) และกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน (i_{CM}, i_{CT}) สำหรับค่ากระแสที่ตัวตรวจวัดวัดได้จะถูกแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า และจะถูกจ่ายเป็นอินพุตให้กับวงจรปรั้งแต่งสัญญาณต่อไป โดยจะเลือกใช้ตัวตรวจวัดกระแสรุ่น LEM HX15-P ที่มีย่านการวัดกระแสไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 15 A ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.15



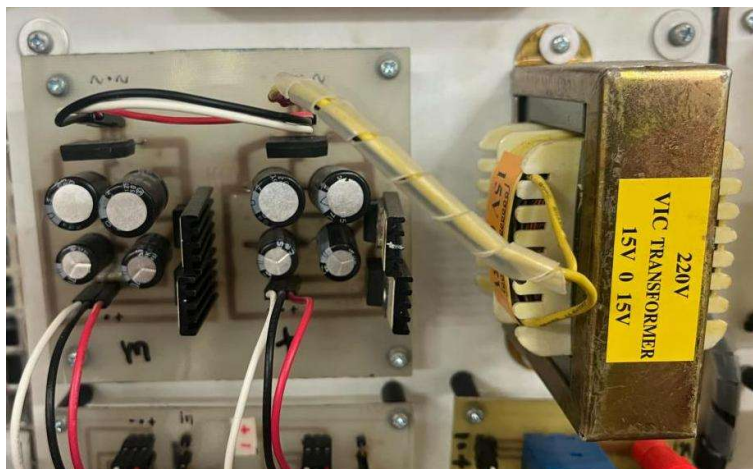
รูปที่ 8.15 ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

3) ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง : ทำหน้าที่ในการวัดค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน โดยจะเลือกใช้ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ารุ่น LEM LV-25P ที่มีย่านการวัดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 10 ถึง 500 V ซึ่งมีค่าครอบคลุมค่าแรงดันบัสไฟตรงที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 8.16



รูปที่ 8.16 ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

4) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง : ทำหน้าที่ในการจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้สำหรับเป็นไฟเลี้ยงให้กับตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ บนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะประกอบไปด้วย หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟสสำหรับลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีอัตราส่วนของหม้อแปลงเป็น 220 V / 15 V วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสสำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากหม้อแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวรักษาระดับแรงดันโดยจะใช้ไอซี L78XXCV สำหรับไฟบวก และไอซี L79XXCV สำหรับไฟลบ และสุดท้ายจะเป็นตัวเก็บประจุสำหรับลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาด 220 μ F พิกัดแรงดัน 50 V ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.17



รูปที่ 8.17 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

5) วงจรปรั้งแต่งสัญญาณ : ทำหน้าที่ในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจวัดกระแส และตัวตรวจวัดแรงดันให้อยู่ในย่านที่บอร์ด eZdspTMF28335 สามารถรับค่าได้ โดยปกติแล้วบอร์ด eZdspTMF28335 จะสามารถรับค่าได้เฉพาะค่าซีบววก และอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 V วงจรปรั้งแต่งสัญญาณจึงต้องปรับขนาดรวมถึงยกระดับสัญญาณแรงดันที่ได้รับจากตัวตรวจวัดให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 V โดยโครงสร้างของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณจะประกอบไปด้วยตัวต้านทาน และไอซีออปแอมป์รุ่น Texas instrument UA41CN ซึ่งสามารถแสดงอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.18 สำหรับ การออกแบบขนาดตัวต้านทานของวงจรปรั้งแต่งสัญญาณสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของ ภักดี สวัสดิ์นที (ภักดี สวัสดิ์นที, 2556)

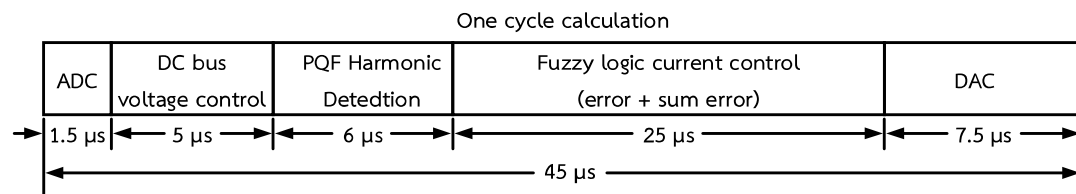


รูปที่ 8.18 วงจรปรั้งแต่งสัญญาณ

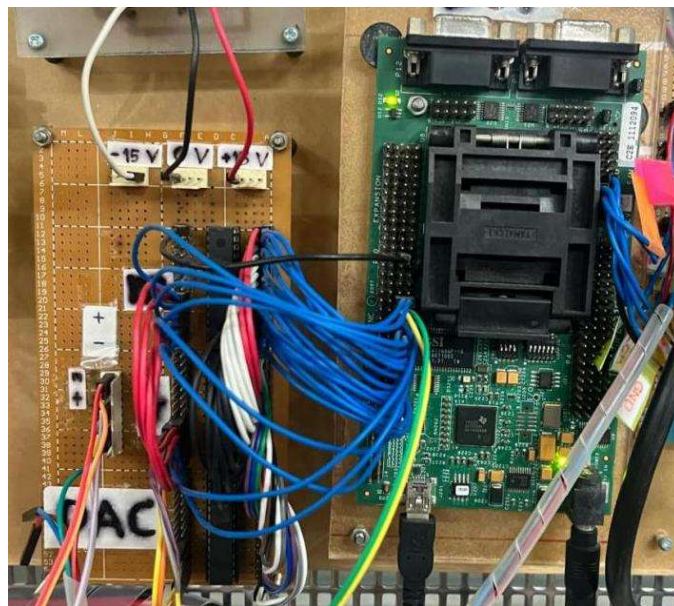
6) บอร์ด eZdspTMF28335 : ทำหน้าที่ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF และคำนวณค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอตามที่ได้โปรแกรมไว้ โดยบอร์ด eZdspTMF28335 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.19 สำหรับกระบวนการทำงานของบอร์ด eZdspTMF28335 จะใช้เวลา 1 รอบการคำนวณของโปรแกรมเท่ากับ 45 ไมโครวินาที โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 8.20 โดยเริ่มจากการรับค่าอินพุตสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแปลงสัญญาณด้วยช่องสัญญาณเชื่อมต่อแอนะล็อก (analog expansion) ซึ่งมีขนาดความแยกชัดเท่ากับ 12 บิต จำนวน 7 ช่อง (ADCINA1 ถึง ADCINA7) สำหรับรับค่าสัญญาณ i_{LM} , i_{LT} , i_{CM} , i_{CT} , v_{SM} , v_{ST} และ V_{DC} จากนั้นจะนำค่าสัญญาณที่ได้รับมาไปคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก รวมไปถึงคำนวณค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมตามที่ได้โปรแกรมไว้ ซึ่งจะได้เอาต์พุตของบอร์ด eZdspTMF28335 เป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิง (U_M^* , U_T^*) สำหรับสร้างการสวิตช์ในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลผ่านทาง expansion interface เพื่อส่งให้กับตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกต่อไป โดยการเชื่อมต่อ expansion interface และ analog expansion สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.21



รูปที่ 8.19 บอร์ด eZdspTMF28335



รูปที่ 8.20 เวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการคำนวณของบอร์ด eZdspTMF28335



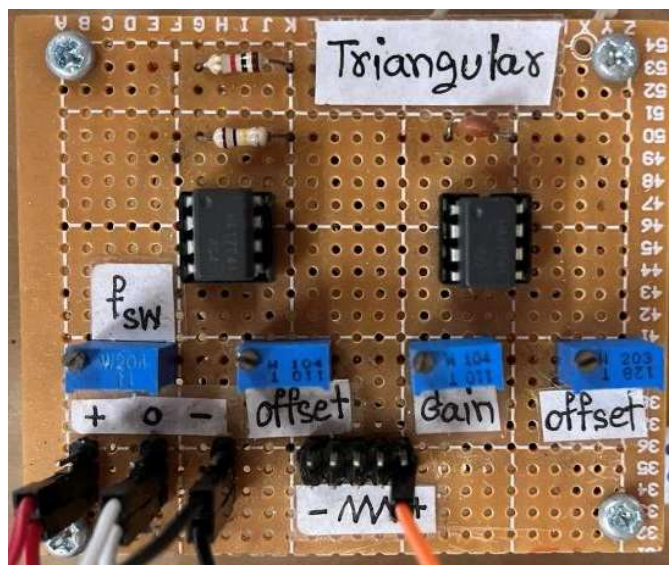
รูปที่ 8.21 การเชื่อมต่อ expansion interface และ analog expansion

7) ตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก : ทำหน้าที่ในการแปลงค่าสัญญาณแรงดันอ้างอิงจากบอร์ด eZdspTMF28335 ซึ่งเป็นสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยจะเลือกใช้ตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกรุ่น Burr-Brown DAC712P ที่มีขนาดความแยกชัดของสัญญาณเท่ากับ 14 บิต ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.22

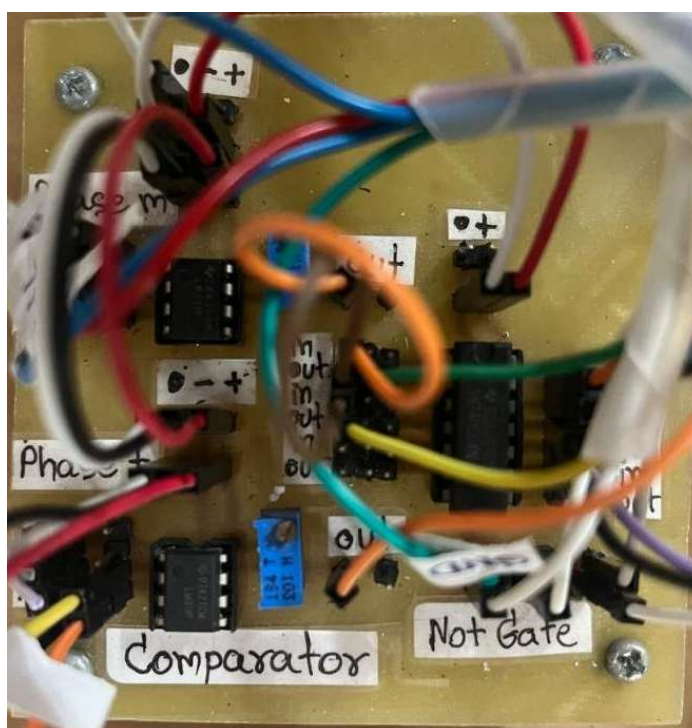


รูปที่ 8.22 ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก รุ่น Burr-Brown DAC712P

8) วงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์ : ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณสำหรับสวิตช์ อุปกรณ์ไอจีบีที (IGBT) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยโครงสร้างของวงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์จะแบ่งเป็น 4 ส่วน ส่วนแรก คือ วงจรสร้างสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม (triangular carrier circuit) ที่ประกอบไปด้วยออปแอมป์รุ่น HA17741 ต้านทาน และตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 8.23 ส่วนที่ 2 คือ วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator circuit) สำหรับเปรียบเทียบสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยมกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงจากตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก โดยใช้ไอซีรุ่น Texas Instruments LM311P ดังแสดงในรูปที่ 8.24 โดยสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะถูกนำไปจ่ายให้กับส่วนที่ 3 คือ วงจรนิเสธเกต (not gate circuit) ที่ใช้ไอซีรุ่น Texas Instrument HD74LS04P ดังแสดงในรูปที่ 8.25 เพื่อส่งสัญญาณสำหรับสวิตช์ไปที่อุปกรณ์ IGBT ตัวล่างของแต่ละกิ่งวงจร และเนื่องจากสัญญาณจากวงจรในส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 ยังไม่อยู่ในช่วงที่นำไปขับ (drive) อุปกรณ์ IGBT ได้ จึงต้องนำสัญญาณดังกล่าวเข้าสู่ส่วนที่ 4 คือ วงจรขับเกต (gate drive circuit) ที่ใช้ไอซีรุ่น Sharp PC923L ดังแสดงในรูปที่ 8.26 เพื่อปรับขนาดสัญญาณให้อยู่ในย่านที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังเป็นการแยกราวด์ทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานออกจากกราวด์ทางด้านวงจรควบคุมเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางฝั่งวงจรควบคุมในระหว่างการทดสอบกำลังฮาร์มอนิก



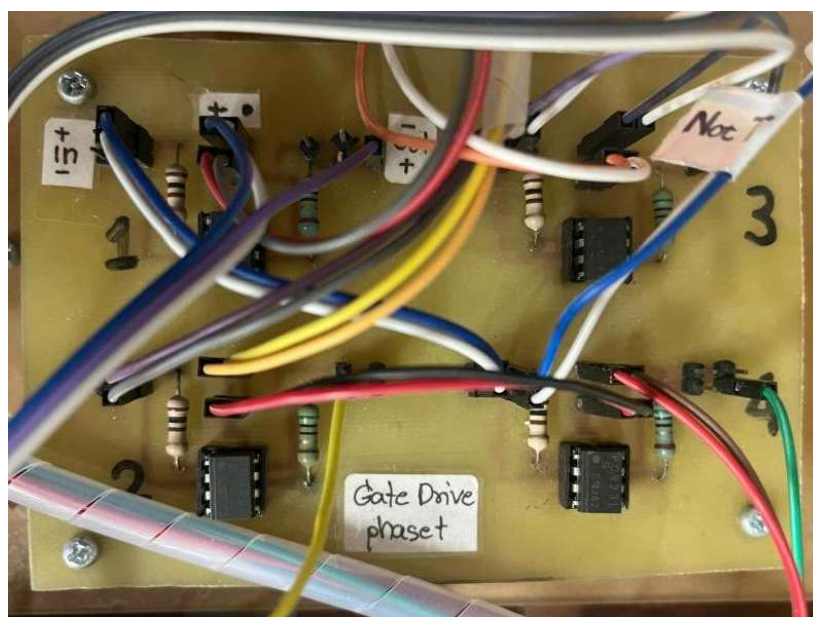
รูปที่ 8.23 วงจรสร้างสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 8.24 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

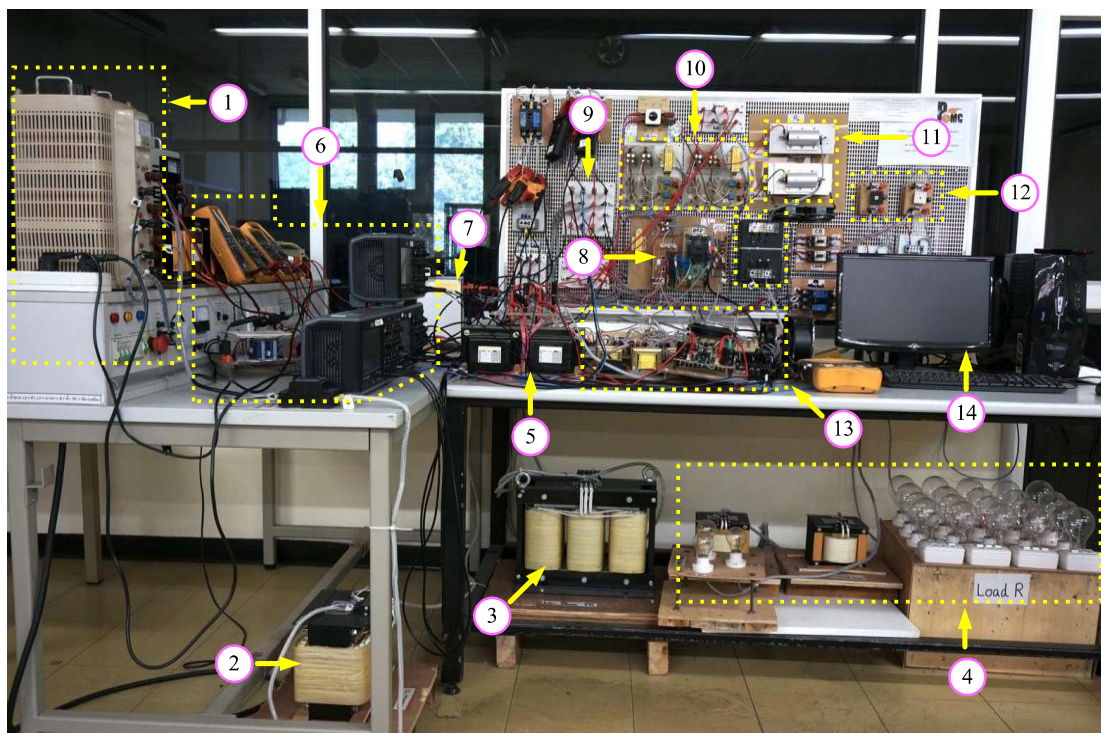


รูปที่ 8.25 วงจรนิเสธเกต



รูปที่ 8.26 วงจรขับเกต

อุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้นำเสนอจากโครงสร้างทั้ง 3 ส่วนของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าในหัวข้อที่ 8.2.1 ถึง 8.2.3 ที่ผ่านมามีเมื่อนำมาประกอบรวมกันเป็นฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองจะสามารถแสดงภาพรวมฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 8.27



- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Three-phase voltage source | 8. eZdsp F28335 and DAC |
| 2. Isolation transformer | 9. Point of common coupling |
| 3. Le-Blanc transformer | 10. Voltage and current sensors |
| 4. Load inductances and resistances | 11. SAPF inductances and resistances |
| 5. Step-down transformer | 12. Single-phase rectifier |
| 6. Electrical measuring equipment | 13. VSIs and switching signal modulator |
| 7. SAPF Capacitors | 14. Computer |

รูปที่ 8.27 ฮาร์ดแวร์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าจำลอง

8.3 การออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลอง

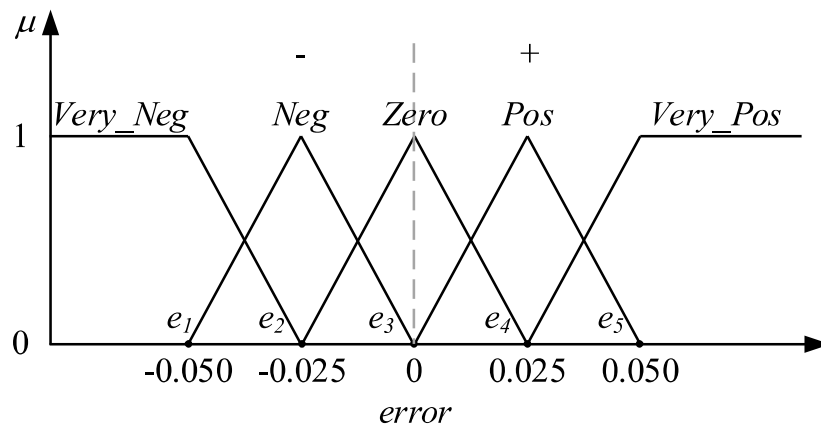
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิก โดยใช้วิธีการตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 และการออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสมกับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองเพื่อให้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิกจะกำหนดใช้รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกอินพุต รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต กฎพีซี และวิธีการอนุมานพีซี เช่นเดิมตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 แต่ในส่วนของการออกแบบค่าตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error (e_1 ถึง e_5) และอินพุต sum error (se_1 ถึง se_3) จะต้องคำนวณค่าใหม่ เพื่อให้เหมาะสมกับระบบรางไฟฟ้าจำลอง โดยพิจารณาจากสมการที่ (6.11)

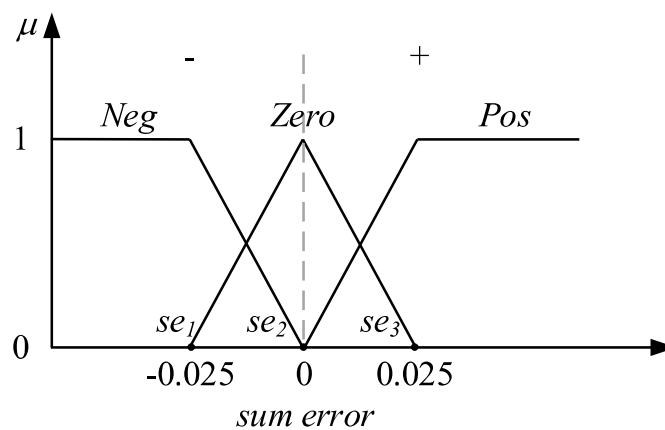
จากสมการที่ (6.11) จะเห็นว่าจำเป็นต้องพิจารณาค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ในการคำนวณค่า e_{max} ซึ่งโดยปกติแล้วจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่ายอดแรงดันของฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส ($V_s = 60$ V) แต่สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกบนระบบรางไฟฟ้าจำลองในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใส่ตัวต้านทานของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน (R_C) เพื่อรองสัญญาณรบกวนรวมไปถึงช่วยหน่วยกระแสชดเชย (นำเสนอในหัวข้อที่ 8.2.2) โดยแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานดังกล่าวจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่หน้าตัวเหนี่ยวนำฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงมีค่าลดลงเหลือ 45 V ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 45 V และสามารถคำนวณค่า e_{max} ได้เท่ากับ 0.05 A โดยสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$e_{max} = \left(\frac{v_L}{v_H} \right) \times \left(\frac{mV_{DC}}{L_f} \right) \times \Delta t = \left(\frac{45}{100} \right) \times \left(\frac{1 \times 45}{18 \times 10^{-3}} \right) \times 45 \times 10^{-6} = 0.05 \text{ A}$$

จากค่า e_{max} ที่คำนวณได้เมื่อกำหนดให้ e_1 มีค่าเท่ากับ $-e_{max}$ และ e_5 มีค่าเท่ากับ e_{max} จะสามารถแสดงค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error และอินพุต sum error สำหรับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองได้ดังรูปที่ 8.28 และ 8.29 ตามลำดับ

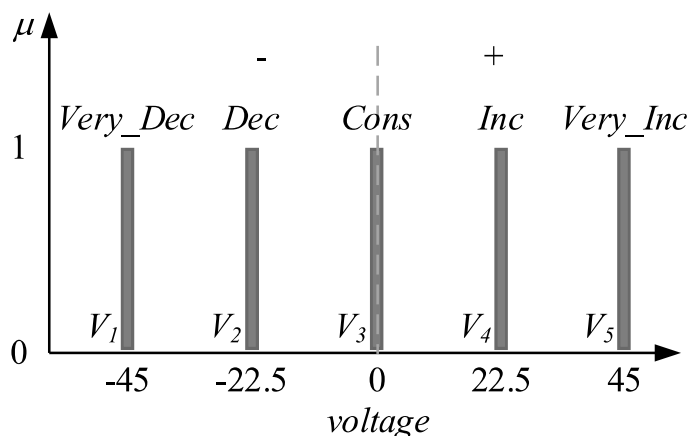


รูปที่ 8.28 ตำแหน่ง e_1 ถึง e_5 ของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต error ของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า



รูปที่ 8.29 ตำแหน่ง se_1 ถึง se_3 ของฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต sum error ของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า

ในส่วนของเอาต์พุต voltage (V_1 ถึง V_5) จะกำหนดค่าขอบเขตตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก ให้มีค่าเท่ากับค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานซึ่งมีค่าเท่ากับ 45 V โดยสามารถแสดงค่าตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต voltage สำหรับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 8.30



รูปที่ 8.30 ตำแหน่ง V_1 ถึง V_5 ของฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต voltage สำหรับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจะต้องทำการออกแบบค่า K_{pv} และ K_{iv} ใหม่สำหรับระบบรางไฟฟ้าจำลองที่พิจารณาโดยใช้วิธีการประมาณค่าตามสมการที่ (4.10) และ (4.11) ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณค่า K_{pv} และ K_{iv} ได้เท่ากับ 3.76 และ 16.70 ตามลำดับ โดยสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$K_{pv} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_{DC} V_{DC}^* = 2 \times 0.707 \times 2\pi \times 9400 \times 10^{-6} \times 45 = 3.76$$

$$K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_{DC} V_{DC}^* = (2\pi)^2 \times 9400 \times 10^{-6} \times 45 = 16.70$$

8.4 การทดสอบสมรรถนะการจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลอง

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการทดสอบการจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าจำลองด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน สำหรับขั้นตอนการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน โดยสามารถอธิบายกระบวนการในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 : ปรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบปรับค่าได้ให้แรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสมีค่าเท่ากับ 270 V 50 Hz ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสมีค่าเท่ากับ 100 V 50 Hz เท่ากันทั้งสองเฟส (เฟส M และ T) แต่มีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศา สำหรับจ่ายให้กับชุดโหลด

ของระบบรางไฟฟ้าจำลอง โดยในการทดสอบจะกำหนดใช้หลอดไฟจำนวน 4 หลอดเท่ากันทั้งสองเฟส (กระแสโหลดของแต่ละเฟสมีค่าประมาณ 2 A) แต่มีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศาเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส

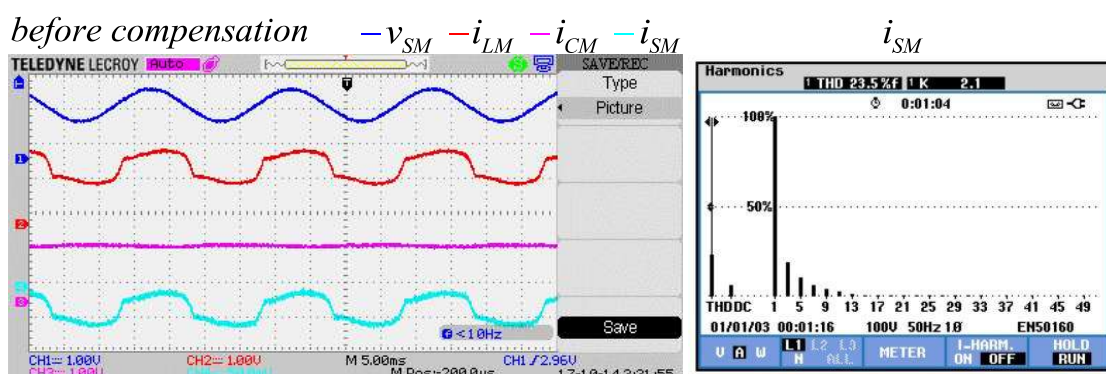
ขั้นที่ 2 : ทำการชาร์จแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ (C_{DC}) ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้มีค่าเท่ากับ 45 V ตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้กำหนดออกแบบไว้

ขั้นที่ 3 : สั่งให้บอร์ด eZdspTMF28335 เริ่มทำงานเพื่อรับค่าอินพุตจากวงจรแปลงสัญญาณประกอบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_{SM}, v_{ST}) ค่ากระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ค่ากระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) และค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) โดยค่าอินพุตดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิก และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาสำหรับเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด eZdspTMF28335 คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (U_M^*, U_T^*) จากระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิกซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นอินพุตให้กับวงจรสร้างสัญญาณเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ (pulses) สำหรับควบคุมอุปกรณ์ IGBT ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานต่อไป

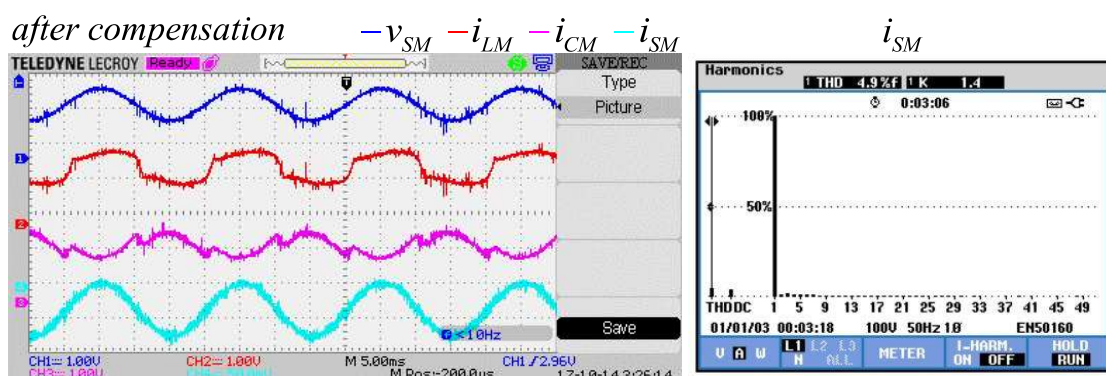
ขั้นที่ 4 : ทำการสับสวิตช์เบรกเกอร์เพื่อเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเข้ากับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ขั้นที่ 5 : สับสวิตช์เบรกเกอร์เพื่อเชื่อมต่อวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสเพื่อเริ่มการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าจำลอง

สำหรับผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M และ T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.31 และ 8.32 ตามลำดับเฟส ส่วนผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.33

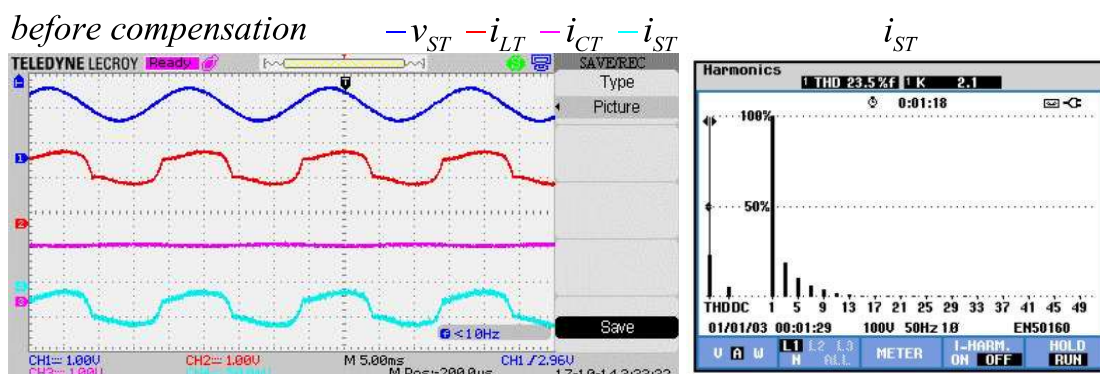


(ก) ก่อนการชดเชย

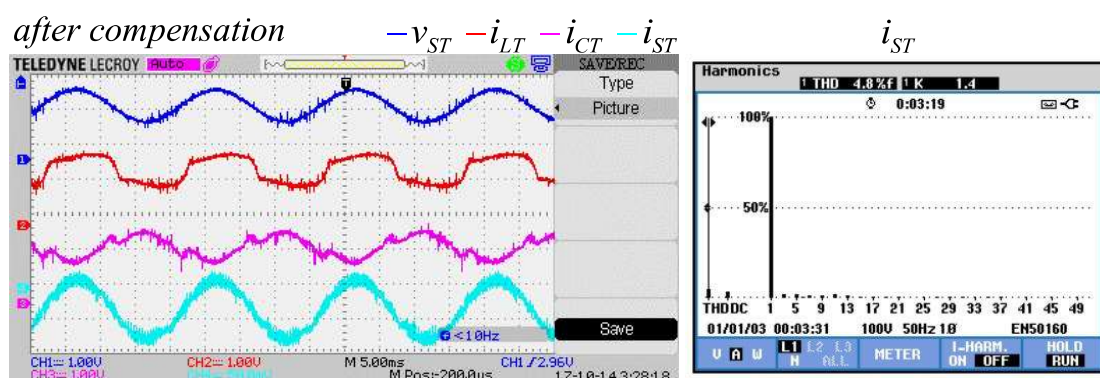


(ข) ภายหลังการชดเชย

รูปที่ 8.31 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองของเฟส M



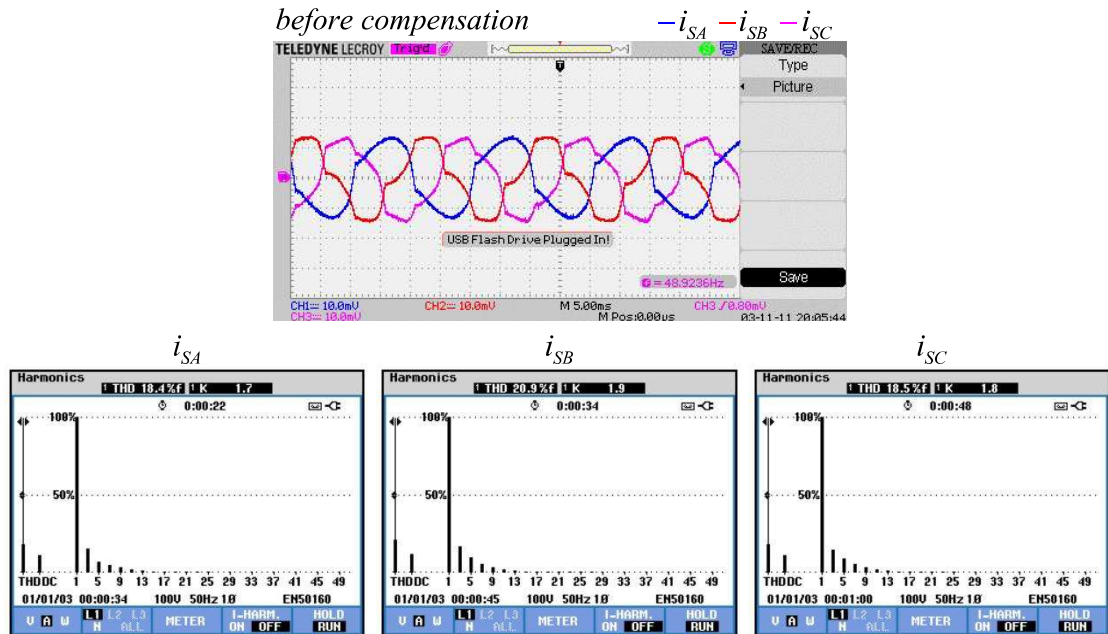
(ก) ก่อนการชดเชย



(ข) ภายหลังการชดเชย

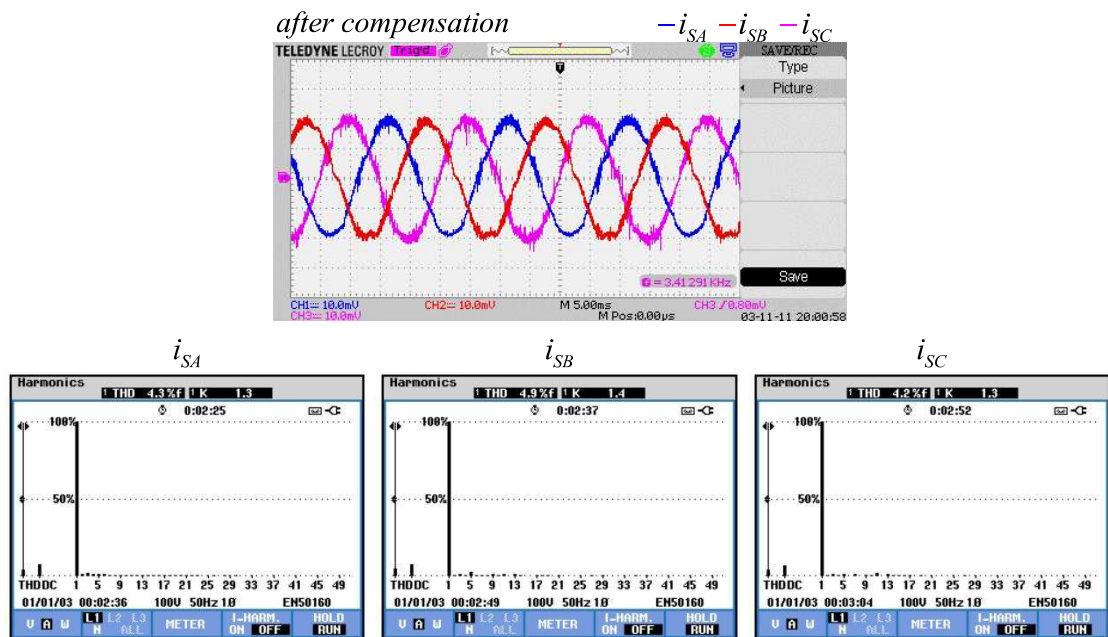
รูปที่ 8.32 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองของเฟส T

before compensation



(ก) ก่อนการชดเชย

after compensation



(ข) ภายหลังการชดเชย

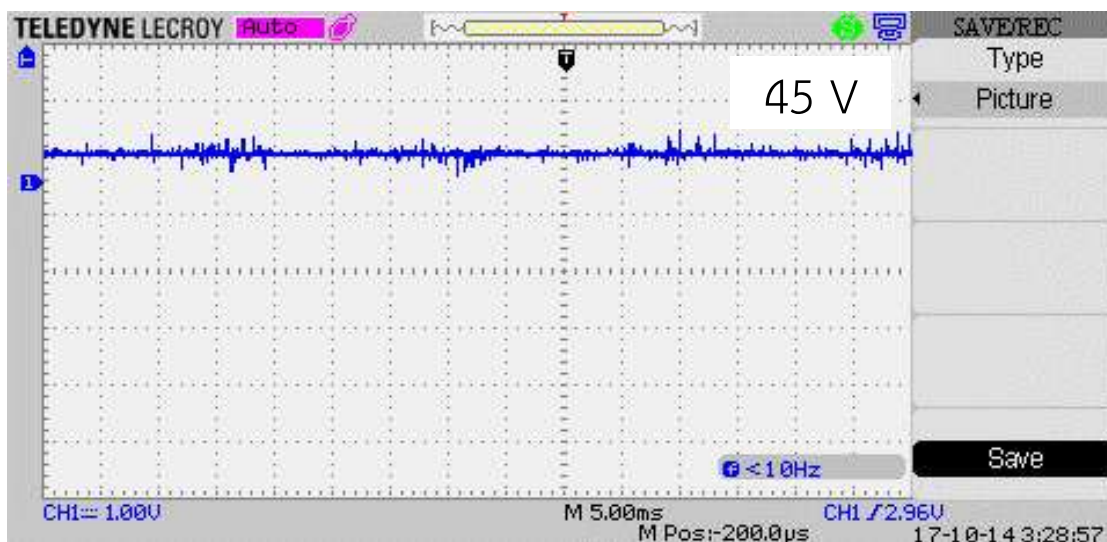
รูปที่ 8.33 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส

จากผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองของเฟส M และ T ดังแสดงในรูปที่ 8.31 และ 8.32 พบว่า ในช่วงช่วงก่อนการชดเชย (before compensation) กระแสที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) มีลักษณะสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) และวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายดังกล่าวได้เท่ากับ 23.5% เท่ากันทั้งสองเฟส ต่อมาในช่วงภายหลังการชดเชย (after compensation) หลังจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุมพีชซีลอจิกที่ได้จากการออกแบบทำการฉีดกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า พบว่า กระแส i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยสามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของเฟส M และ T ได้เท่ากับ 4.90% และ 4.80% ตามลำดับเฟส นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 8.33 พบว่า ในช่วงก่อนการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}) จะมีลักษณะกระแสที่ผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์และมีลักษณะรูปร่างกระแสที่ไม่สมดุล โดยวัดค่า %THD ของเฟส A B และ C ได้เท่ากับ 18.40% 20.90% และ 18.50% ต่อมาในช่วงภายหลังการชดเชยเมื่อมีการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสส่งผลให้ i_{SA}, i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้นและมีลักษณะรูปร่างกระแสที่สมดุล โดยวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยได้เท่ากับ 4.30% 4.90% และ 4.20% ตามลำดับเฟส ซึ่งสามารถดูสรุปผลค่า %THD ดังกล่าวได้จากตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 สรุปผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย

สถานะการชดเชย	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย						
	ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส			
	i_{SM}	i_{ST}	เฉลี่ย	i_{SA}	i_{SB}	i_{SC}	เฉลี่ย
ก่อนการชดเชย	23.50	23.50	23.50	18.40	20.90	18.50	19.27
ภายหลังการชดเชย	4.90	4.80	4.85	4.30	4.90	4.20	4.47

สำหรับผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.34 โดยสังเกตได้ว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีเพียงพอ โดยสามารถคงค่าแรงดันบัสไฟตรงไว้ได้ที่ 45 V ตลอดช่วงการฉีดกระแสชดเชยซึ่งมีค่าเท่ากับค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{DC}^*) ตามที่ได้ออกแบบไว้



(ก) ออสซิลโลสโคป



(ข) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

รูปที่ 8.34 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า

8.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการทดสอบการกำจัดฮาร์โมนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองด้วย วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF ระบบควบคุม กระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอ และระบบควบคุม แรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ยังนำเสนอโครงสร้างของฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และการคำนวณ ตรวจจับฮาร์โมนิกและระบบควบคุม รวมไปถึงนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ให้มีความเหมาะสมกับฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองที่พิจารณา และสุดท้ายได้นำเสนอการทดสอบ สมรรถนะกำจัดฮาร์โมนิกบนฮาร์ดแวร์ระบบรางไฟฟ้าจำลองเพื่อเก็บผลการกำจัดฮาร์โมนิกในทาง ปฏิบัติ โดยผลจากทดสอบ พบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้อย่างมี ประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่า %THD กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงน้อยกว่า 5% ซึ่งอยู่ ภายในค่ามาตรฐาน IEEE std. 519-2022 จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมกระแสชดเชย ด้วยตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอไว้ในบทที่ 6 มีสมรรถนะในการควบคุม กระแสชดเชยที่ดีสำหรับการนำมาใช้ในระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในทางปฏิบัติ