

บทที่ 7

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า

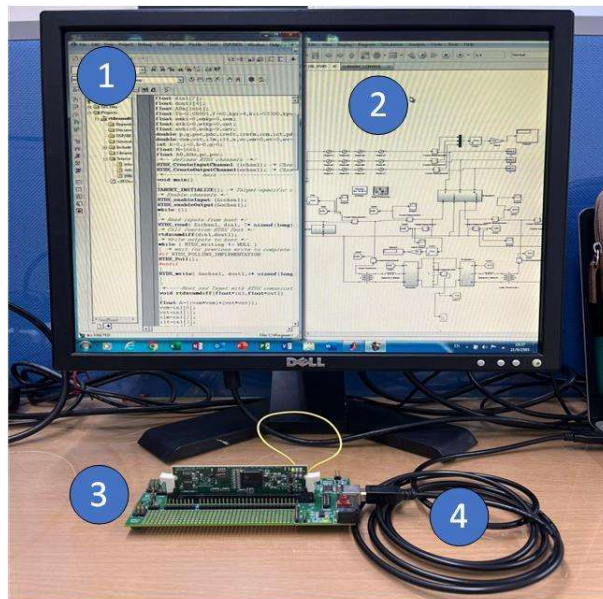
กระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

7.1 กล่าวนำ

เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมควบคุมฟิชซีลอจิกที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 6 ว่ามีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีเพียงพอ ในบทจึงนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In the Loop : HIL) เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจะให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีความสมจริง และมีความถูกต้องของการณ์จำลองสถานการณ์ใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริงมากกว่าการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB เพียงอย่างเดียว โดยรายละเอียดการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.2 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.3 และการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อทดสอบกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะนำเสนอในหัวข้อที่ 7.4

7.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In the Loop : HIL) (ทศพร ณรงค์ฤทธิ, 2557) จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ที่ใช้บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ที่ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม CCStudio V3.3 และส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ คือ โปรแกรม Simulink/MATLAB โดยทั้งสองส่วนจะเชื่อมต่อกันผ่านสาย USB JTAG emulator ดังแสดงในรูปที่ 7.1 สำหรับกระบวนการทำงานของการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน โดยสามารถอธิบายกระบวนการในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้



1. CCStudio v3.3
2. Simulink program
3. TMS320c2000™ Experimenter Kit
4. JTAG emulator

รูปที่ 7.1 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

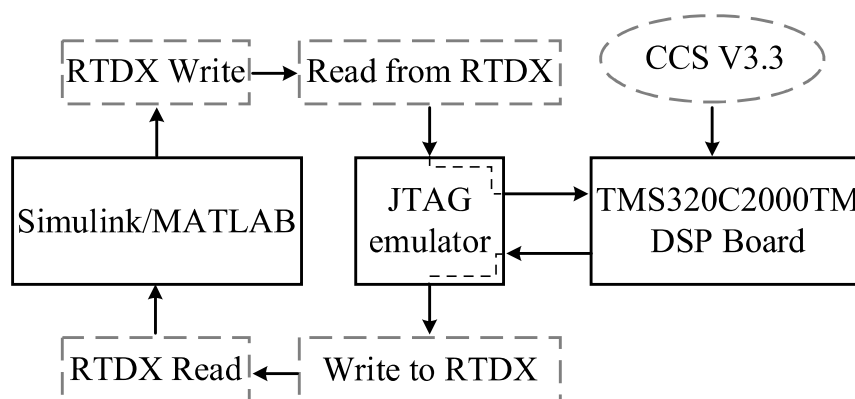
ขั้นที่ 1 : บล็อก RTDX Write บนโปรแกรม Simulink จะส่งข้อมูลอินพุตจากแบบจำลองผ่านสาย USB JTAG emulator ไปยังบอร์ด DSP

ขั้นที่ 2 : บอร์ด DSP จะรับข้อมูลอินพุตจากโปรแกรม Simulink ด้วยคำสั่ง Read from RTDX จากนั้นบอร์ด DSP จะนำอินพุตดังกล่าวมาคำนวณหรือประมวลผลตามที่ได้โปรแกรมไว้บนบอร์ด DSP โดยอาศัยการควบคุมจากโปรแกรม CCStudio V3.3

ขั้นที่ 3 : หลังจากที่บอร์ด DSP คำนวณหรือประมวลผลตามที่ได้โปรแกรมไว้เสร็จสิ้นแล้ว บอร์ด DSP จะส่งข้อมูลเอาต์พุตกลับไปยังโปรแกรม Simulink ด้วยคำสั่ง Write to RTDX ผ่านสาย USB JTAG emulator โดยอาศัยการควบคุมจากโปรแกรม CCStudio V3.3

ขั้นที่ 4 : โปรแกรม Simulink จะรับข้อมูลเอาต์พุตจากบอร์ด DSP ด้วยบล็อก RTDX Read เพื่อนำไปจำลองสถานการณ์ต่อไป

จากขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดจะเป็นกระบวนการทำงาน 1 รอบของเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) สำหรับการคำนวณในรอบถัด ๆ ไปจะดำเนินการตามกระบวนการเดิม โดยมีค่าอินพุต และเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ใช้จำลองสถานการณ์ โดยขั้นตอนการทำงานทั้งหมดสามารถสรุปเป็นแผนภาพกระบวนการทำงานของการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปได้ดังรูปที่ 7.2

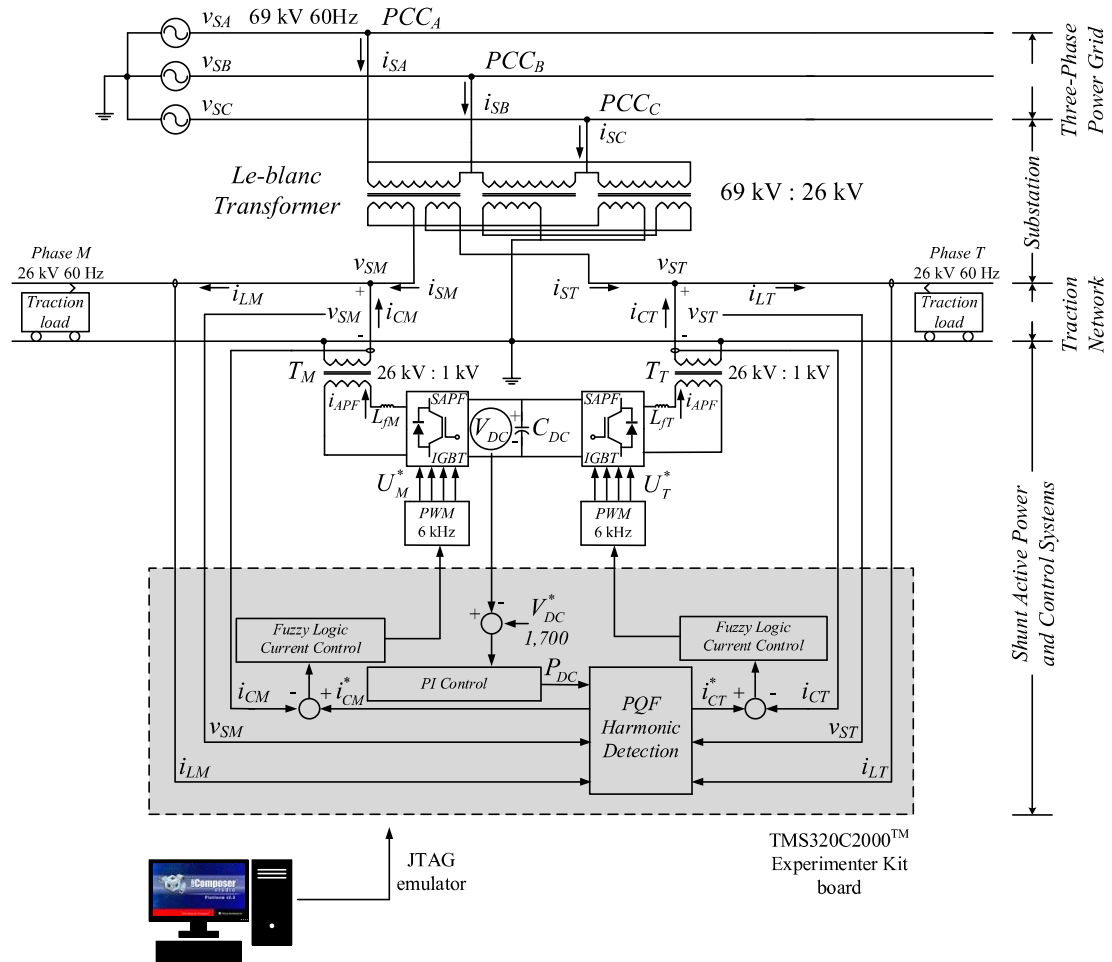


รูปที่ 7.2 กระบวนการทำงานของการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

7.3 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

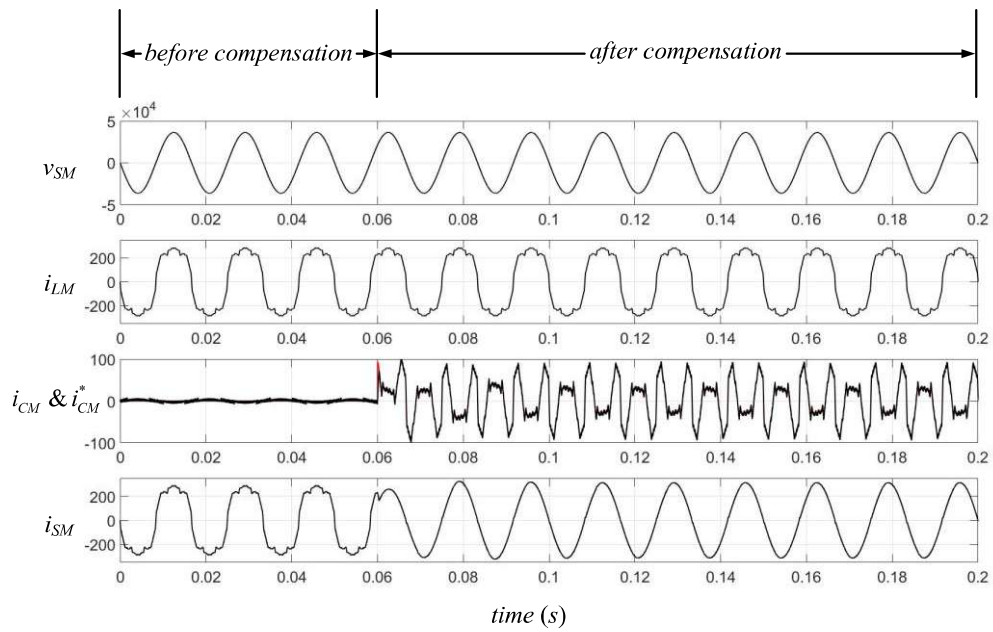
ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.3 โดยส่วนที่อยู่บนซอฟต์แวร์จะประกอบไปด้วย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองค์ ระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม และโหลดรวมไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า รวมไปถึงวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานซึ่งจะถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม Simulink/MATLAB โดยการใช้บล็อกไฟฟ้ากำลัง (Simscape/Power Systems) และสำหรับส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ คือ บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ที่มีการโปรแกรมการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีซีแอลจิกและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยอาศัยโปรแกรม CCStudio V3.3 ในการควบคุมการทำงาน สำหรับอินพุตที่โปรแกรม Simulink ส่งให้กับบอร์ด DSP จะประกอบไปด้วยค่ากระแสไหล (i_{LM}, i_{LT}) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_{SM}, v_{ST}) ค่ากระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) และค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) สำหรับเอาต์พุตที่บอร์ด DSP ส่งกลับมาที่โปรแกรม Simulink คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (U_M^*, U_T^*) โดยค่าแรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (triangular carrier) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์

(pulse) สำหรับใช้เป็นอินพุตในการสวิตช์อุปกรณ์ IGBT ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานบนโปรแกรม Simulink

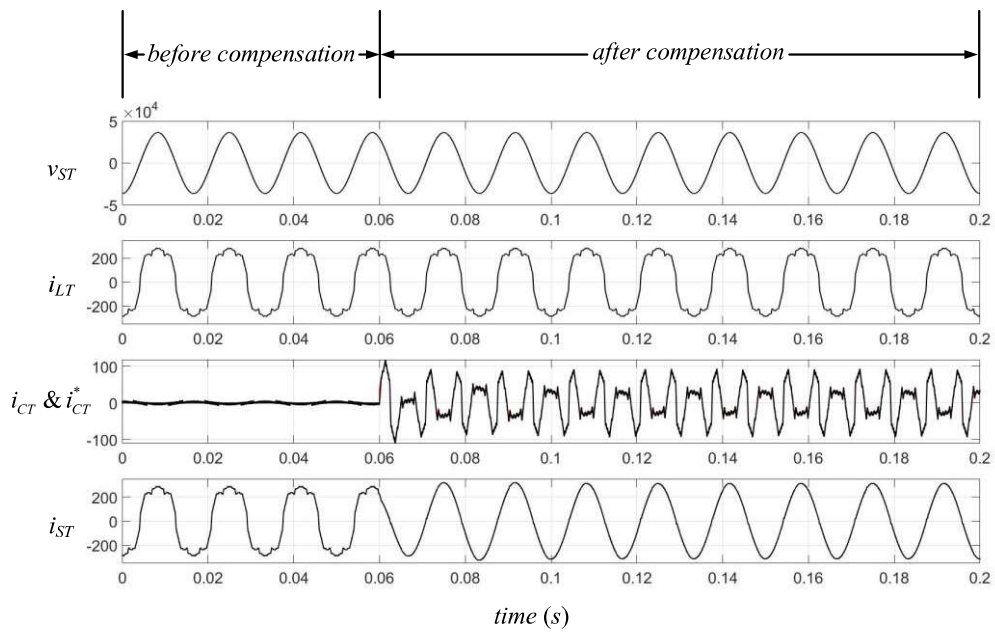


รูปที่ 7.3 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปรูป

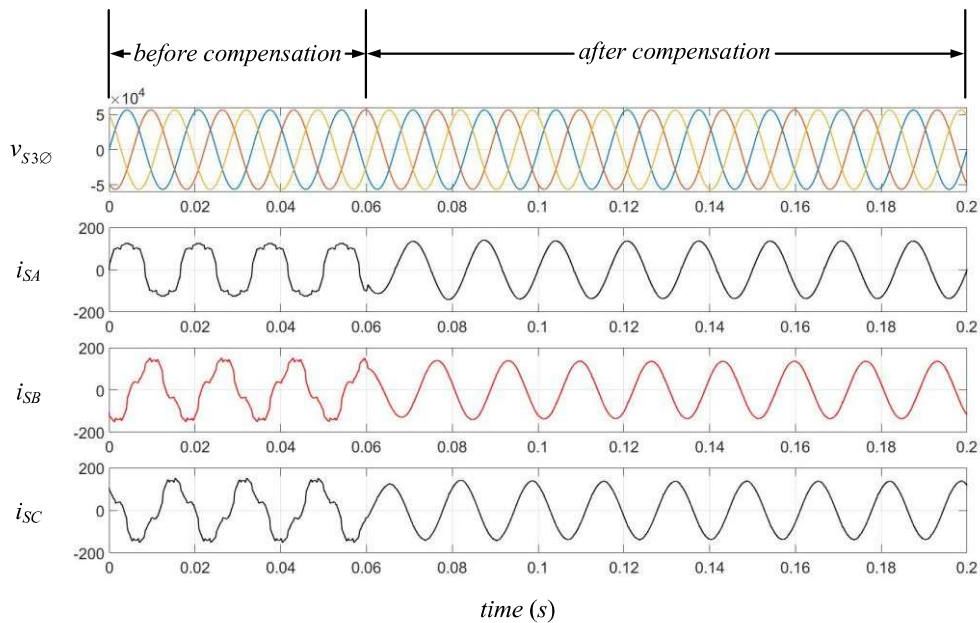
ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปรูปที่ 7.3 ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M และ T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.4 และ 7.5 ตามลำดับเฟส และผลการจำลองสถานการณ์ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของเฟส A B และ C แสดงได้ดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.4 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบของเฟส M



รูปที่ 7.5 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบของเฟส T



รูปที่ 7.6 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C)

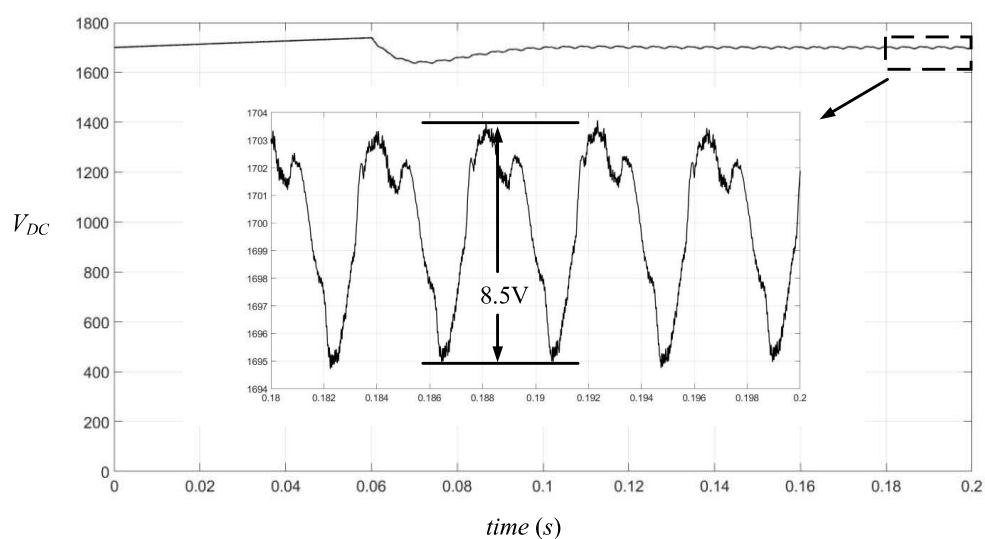
จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาของเฟส M และ T ดังแสดงในรูปที่ 7.4 และ 7.5 ตามลำดับเฟส พบว่าในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 0.06 วินาที หรือช่วงก่อนการชดเชย (before compensation) กระแสที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) มีลักษณะสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) และวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายได้เท่ากับ 22.16% เท่ากันทั้งสองเฟส ต่อมาในช่วงเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป หรือช่วงภายหลังการชดเชย (after compensation) วงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุมพีชซีลอจิกกรณี่ใช้อินพุต error และ sum error จะทำการฉีดกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ส่งผลให้กระแส i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น และสามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของเฟส M และ T ได้เท่ากับ 1.52% และ 1.42% ตามลำดับเฟส สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 7.6 พบว่าในช่วงก่อนการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสซึ่งประกอบไปด้วย i_{SA} , i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะรูปสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ และวัดค่า %THD ได้เท่ากับ 22.14% เท่ากันทุกเฟส ต่อมาในช่วงภายหลังการชดเชยเมื่อมีการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสส่งผลให้ i_{SA} , i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น และวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยได้เท่ากับ 1.51% 1.44% และ 1.44% ตามลำดับเฟส และสามารถดูสรุปผลค่า %THD ภายหลังการชดเชยดังกล่าวได้จากตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ผลสรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย						
ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส			
i_{SM}	i_{ST}	เฉลี่ย	i_{SA}	i_{SB}	i_{SC}	เฉลี่ย
1.52	1.42	1.47	1.51	1.44	1.44	1.46

จากตารางที่ 7.1 พบว่าภายหลังการชดเชยค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}) มีค่าลดลงและอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 โดยมีค่าเท่ากับ 1.47% และ 1.46% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชซีลอจิกที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 6 มีสมรรถนะที่ดีเพียงพอในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.7 จากรูปดังกล่าว พบว่า ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ มีสมรรถนะในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ดี โดยสามารถคงค่าแรงดันบัสไฟตรงไว้ได้เท่ากับ 1,700 V ตามที่ได้ออกแบบไว้ และมีการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 8.5 V โดยค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงมีค่าไม่เกิน 2% ของค่า V_{DC} ($\Delta V_{DC} = 34$ V) ซึ่งเป็นค่าที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยอมรับได้

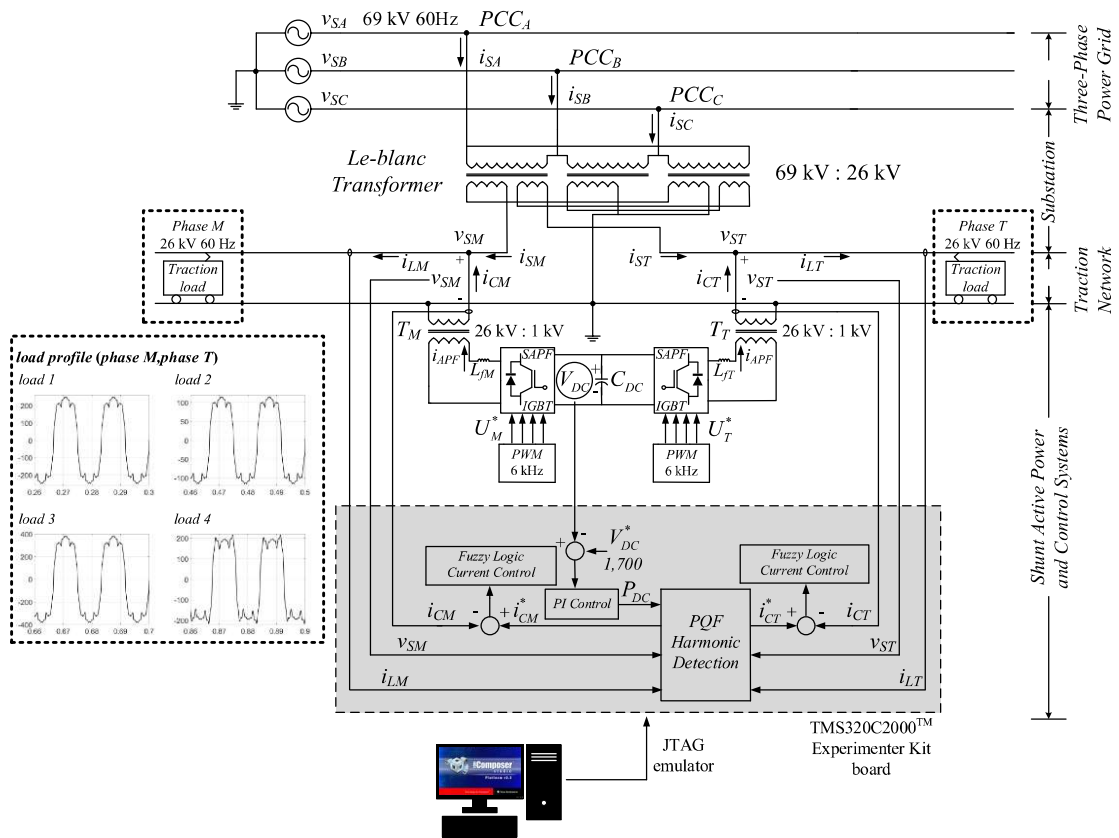


รูปที่ 7.7 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

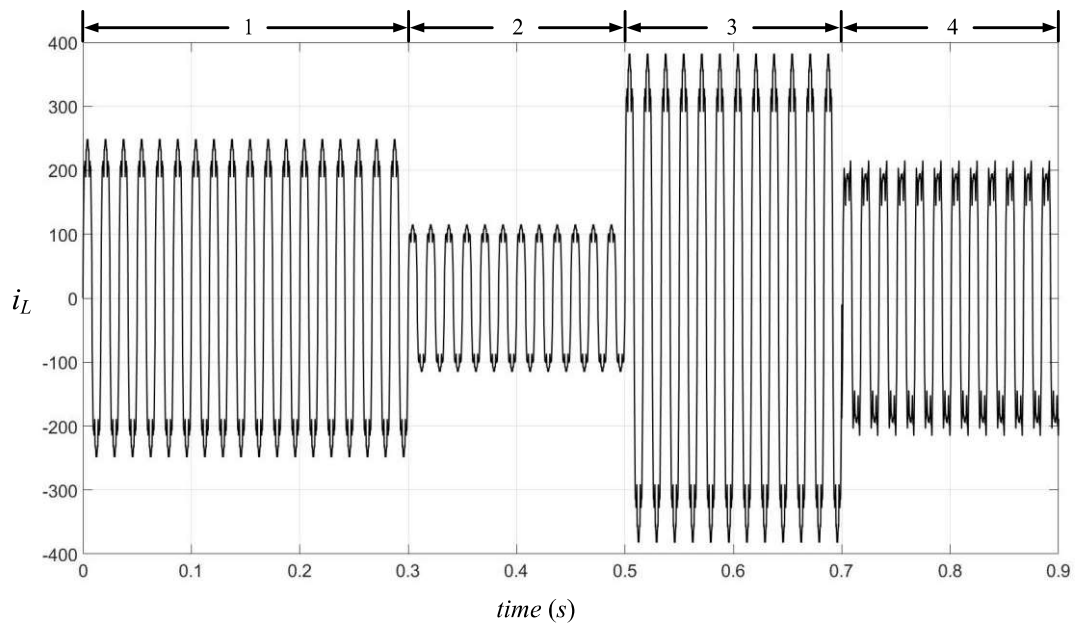
7.4 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีทดสอบให้กระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลง

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชซีลอจิกที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 6 ในกรณีที่กระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยจะใช้ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปดังรูปที่ 7.8 โดยมีการพิจารณาให้กระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงจากโหลดปกติในลักษณะเดียวกันและมีขนาดเท่ากันทั้งสองเฟสทั้งหมด 3 กรณี ประกอบด้วยกรณีกระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด (กระแสไหลตมมีขนาดลดลง 0.5 เท่า) กรณีกระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด (กระแสไหลตมมีขนาดเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า) และกรณีกระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยจำลองสถานการณ์จะแบ่งกระแสไหลตมได้เป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 กระแสไหลตมปกติ (ช่วงเวลา 0 ถึง 0.3 วินาที) ช่วงที่ 2 กรณีกระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด (ช่วงเวลา 0.3 ถึง 0.5 วินาที) ช่วงที่ 3 กระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด (ช่วงเวลา 0.5 ถึง 0.7 วินาที) และช่วงที่ 4 กระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ช่วงเวลา 0.7 ถึง 0.9 วินาที) ดังแสดงในรูปที่ 7.9 ซึ่งแสดงรายละเอียดลักษณะกระแสไหลตมแต่ละกรณีดังรูปที่ 7.10 โดยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกกรณีกระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด กระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด และกระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.2 ถึง 7.4 ตามลำดับ

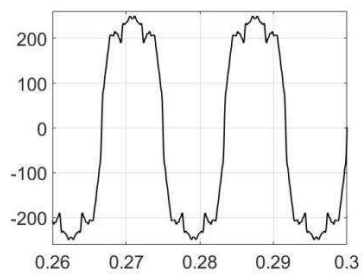
สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีที่กระแสไหลตมมีการเปลี่ยนแปลงที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.11 และสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบ i_{CM}^* และ i_{CM} ได้ดังรูปที่ 7.12 สำหรับเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.13 และสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบ i_{CT}^* และ i_{CT} ได้ดังรูปที่ 7.14 และสำหรับที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของเฟส A B และ C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.15 และสามารถแสดงรายละเอียดของ i_{SA} i_{SB} และ i_{SC} ได้ดังรูปที่ 7.16



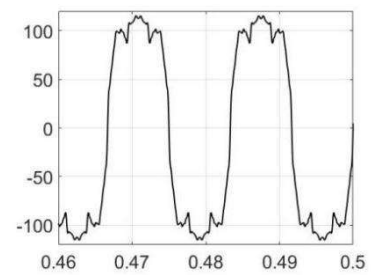
รูปที่ 7.8 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลตของระบบแรงไฟฟ้า



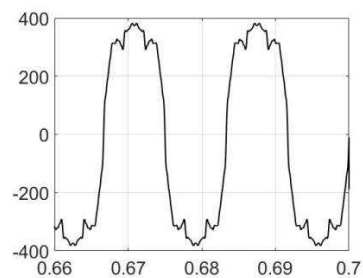
รูปที่ 7.9 กระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากรณีกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลง



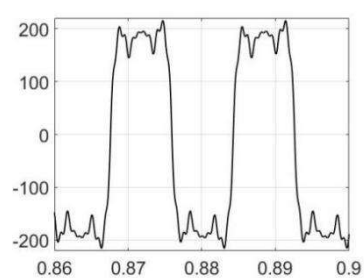
(ก) กรณีกระแสไหลปกติ



(ข) กรณีกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด



(ค) กรณีกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด



(ง) กรณีกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด

รูปที่ 7.10 กระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากรณีกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 7.2 องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

อันดับฮาร์มอนิก (h)	กระแสโหลด (A)	ร้อยละ (%)
1	110.500	100.000
3	19.950	18.100
5	13.055	11.820
7	2.880	2.610
11	2.112	1.910
13	1.440	1.303
17	2.112	1.911
19	2.496	2.260
23	1.115	1.010
25	0.625	0.566
29	0.815	0.740
31	1.248	1.130
35	0.576	0.521
37	0.576	0.521
41	0.525	0.475
43	0.430	0.390
47	0.525	0.475
49	0.625	0.566

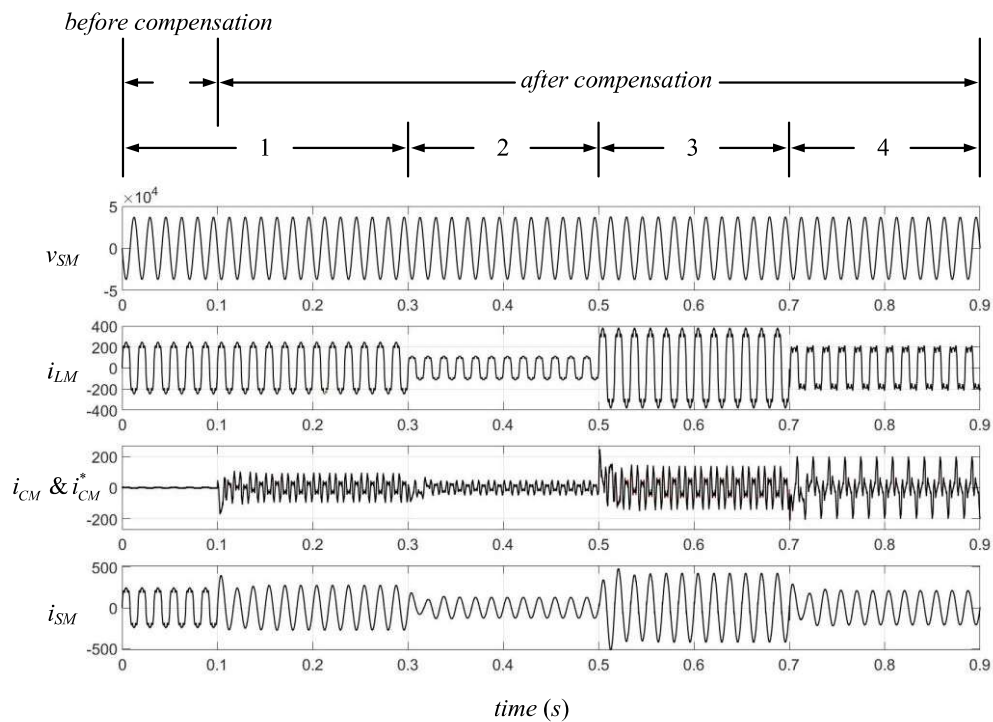
ตารางที่ 7.3 องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด

อันดับฮาร์มอนิก (h)	กระแสโหลด (A)	ร้อยละ (%)
1	331.500	100.000
3	59.850	18.100
5	39.165	11.820
7	8.640	2.610
11	6.336	1.910
13	4.320	1.303
17	6.336	1.911
19	7.488	2.260
23	3.345	1.010
25	1.875	0.566
29	2.445	0.740
31	3.744	1.130
35	1.728	0.521
37	1.728	0.521
41	1.575	0.475
43	1.290	0.390
47	1.575	0.475
49	1.875	0.566

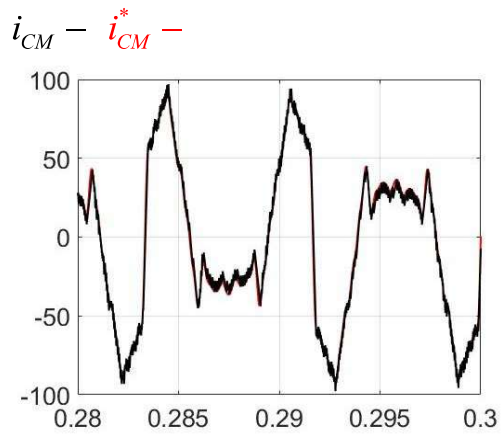
ตารางที่ 7.4 องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกกรณีโหนดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

อันดับฮาร์มอนิก (h)	กระแสโหนด (A)	ร้อยละ (%)
1	221.000	100.000
3	39.900	18.100
5	26.110	11.820
7	5.760	2.610
11	4.224	1.910
13	2.880	1.303
17	4.224	1.911
19	4.992	2.260

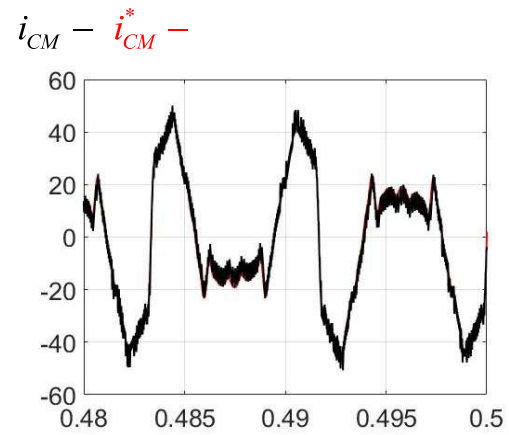
หมายเหตุ : กำหนดให้มีการเลื่อนเฟสในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกของกระแสโหนดเท่ากับ 20 องศา



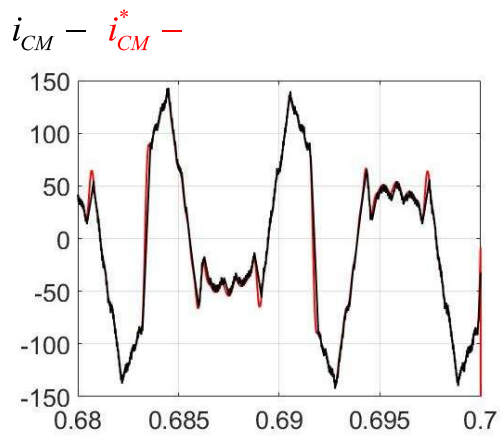
รูปที่ 7.11 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส M กรณีกระแสโหนดมีการเปลี่ยนแปลง



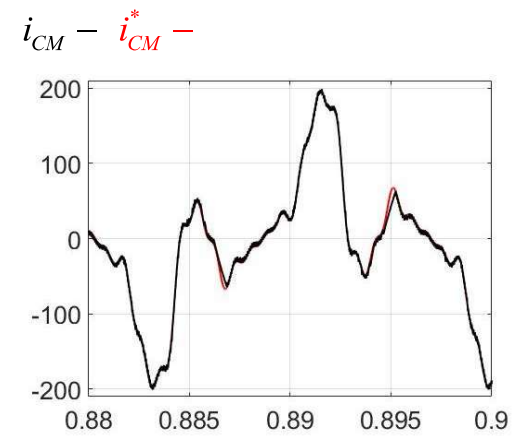
(ก) กรณีกระแสไหลตปกติ



(ข) กรณีกระแสไหลตมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

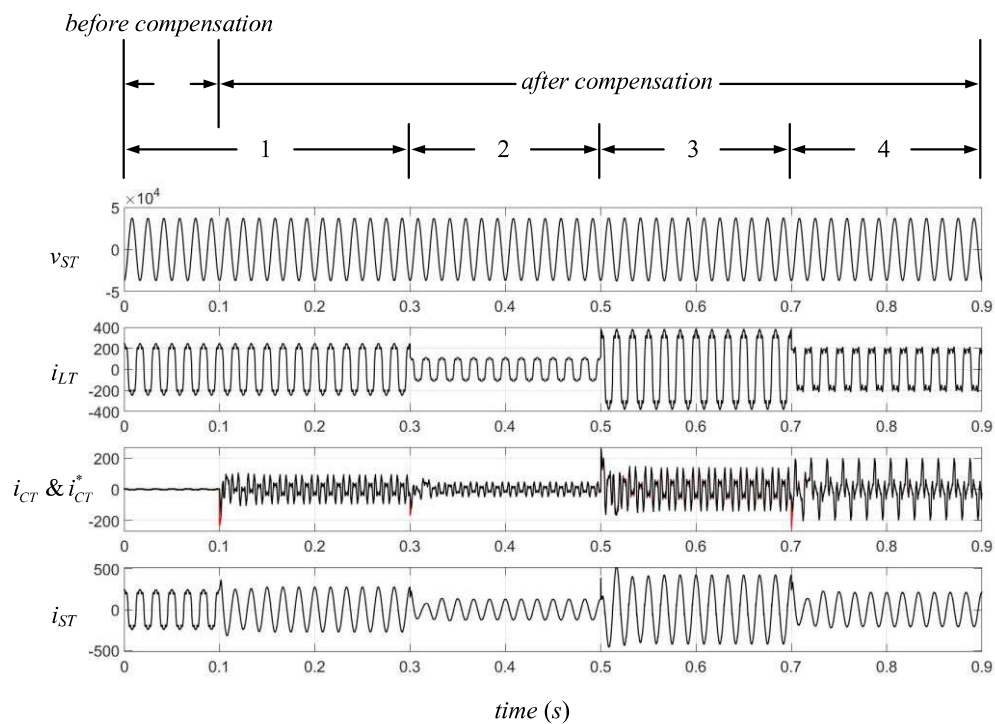


(ค) กรณีกระแสไหลตมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด

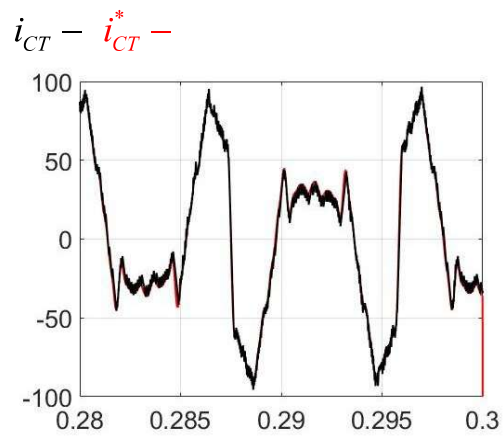


(ง) กรณีกระแสไหลตมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

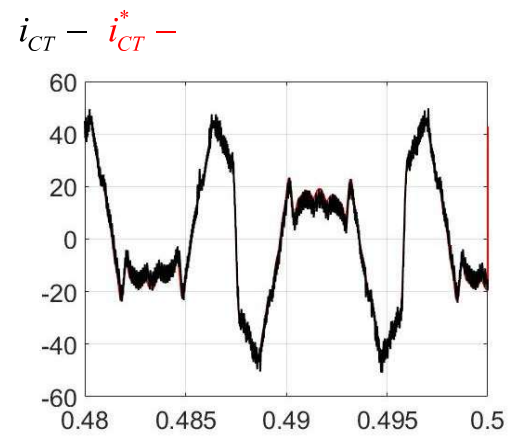
รูปที่ 7.12 ผลการเปรียบเทียบ i_{CM} และ i_{CM}^* ของเฟส M กรณีกระแสไหลตมีการเปลี่ยนแปลง



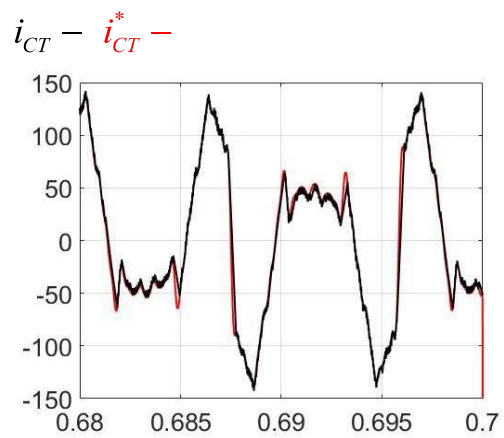
รูปที่ 7.13 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ตแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



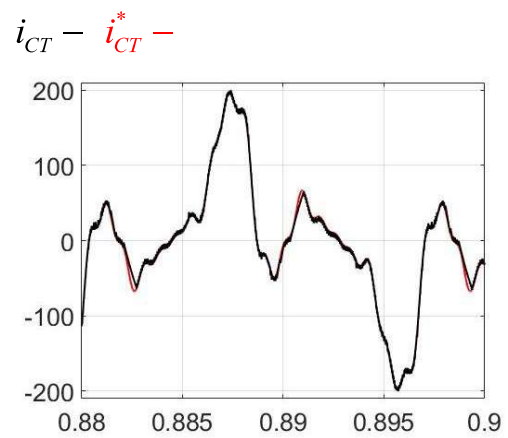
(ก) กรณีกระแสโหลดปกติ



(ข) กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด

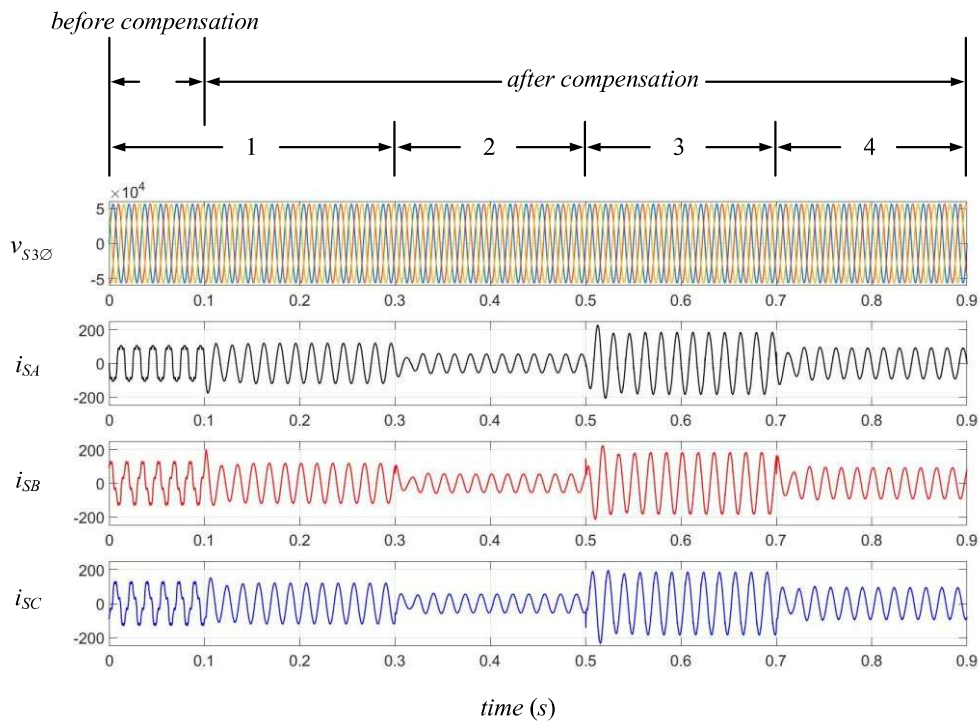


(ค) กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด

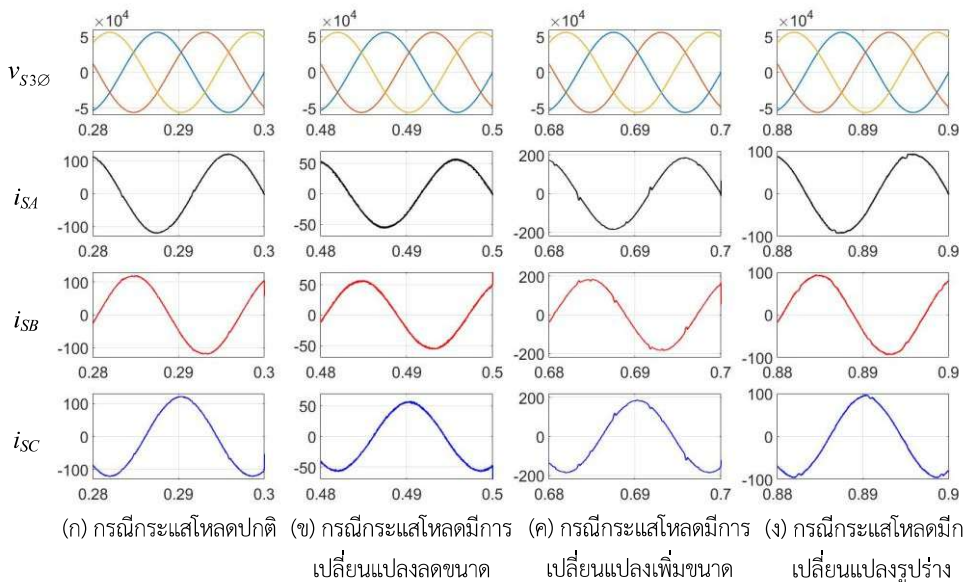


(ง) กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รูปที่ 7.14 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบของเฟส T
กรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 7.15 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง



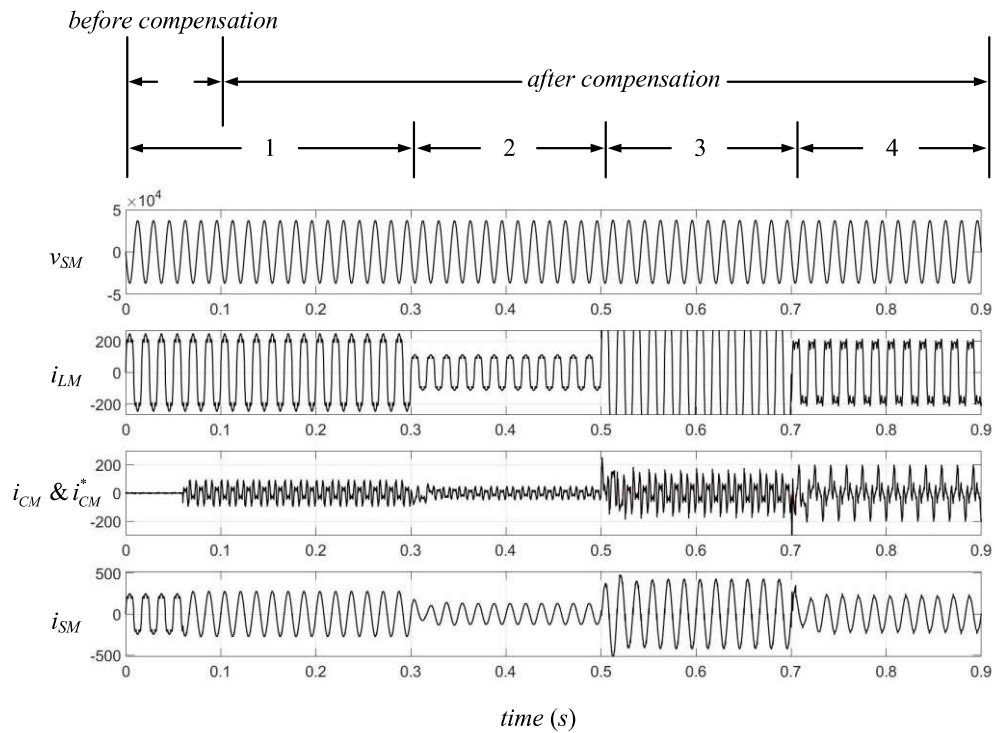
รูปที่ 7.16 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบบแบบขยายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาของเฟส M และ T ดังรูปที่ 7.11 และ 7.13 ตามลำดับเฟส พบว่า ในช่วงเวลาช่วงก่อนการชดเชย (before

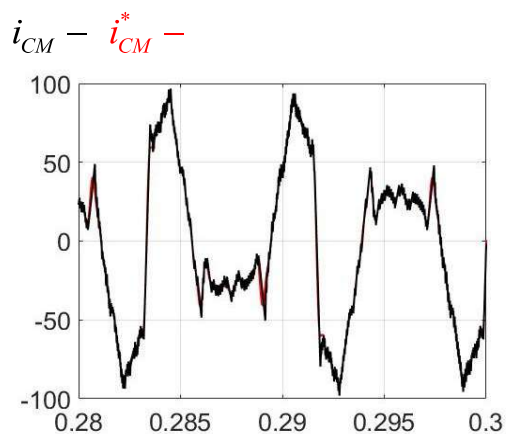
compensation) ที่ 0 ถึง 0.1 วินาที กระแสที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) มีลักษณะสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) และวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายได้เท่ากับ 22.16% เท่ากันทั้งสองเฟส ต่อมาในช่วงเวลา 0.1 วินาทีเป็นต้นไป ภายหลังจากชดเชย (after compensation) วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุมพีชซีลอจิกทำการฉีดกระแสชดเชย (i_C) ที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_C^*) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ส่งผลให้กระแส i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยแบ่งช่วงเวลาที่พิจารณาออกเป็น 4 ช่วง ประกอบด้วยช่วงที่ 1 ที่เวลา 0.1 ถึง 0.3 วินาที เป็นช่วงที่กระแสโหลดปกติ สามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยของเฟส M และ T ได้เท่ากับ 1.52% และ 1.42% ตามลำดับเฟส ช่วงที่ 2 ที่เวลา 0.3 ถึง 0.5 วินาทีเป็นช่วงที่กระแสโหลดจะมีขนาดลดลง สามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยของเฟส M และ T ได้เท่ากับ 2.64% และ 2.65% ตามลำดับเฟส ช่วงที่ 3 ที่เวลา 0.5 ถึง 0.7 วินาที เป็นช่วงที่กระแสโหลดจะมีขนาดเพิ่มขึ้น สามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยของเฟส M และ T ได้เท่ากับ 2.96% และ 2.69% ตามลำดับเฟส และช่วงที่ 4 ที่เวลา 0.7 ถึง 0.9 วินาทีเป็นช่วงที่กระแสโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สามารถวัดค่า %THD ของกระแส ที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยของเฟส M และ T ได้เท่ากับ 2.43% และ 2.37% ตามลำดับเฟส สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสดังรูปที่ 7.15 พบว่าในช่วงก่อนการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสซึ่งประกอบไปด้วย i_{SA} , i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะรูปสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ และวัดค่า %THD ได้เท่ากับ 22.14% เท่ากันทุกเฟส ต่อมาในช่วงภายหลังจากชดเชยเมื่อมีการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส ส่งผลให้ i_{SA} , i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยในช่วงโหลดปกติวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยได้เท่ากับ 1.51%, 1.44% และ 1.44% ในช่วงโหลดมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาดวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยได้เท่ากับ 2.65%, 2.70% และ 2.61% ในช่วงโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยได้เท่ากับ 2.97%, 2.78% และ 2.74% ตามลำดับเฟส และในช่วงโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากชดเชยได้เท่ากับ 2.44%, 2.26% และ 2.36% ตามลำดับเฟส

นอกจากนี้ในหัวข้อนี้ยังนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปดังรูปที่ 7.8 กรณีที่ใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีโอเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมทั้งสองชนิด โดยผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.17 และสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบ i_{CM}^* และ i_{CM} ได้ดังรูปที่ 7.18 สำหรับเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.19 และสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบ i_{CT}^* และ i_{CT} ได้ดังรูปที่ 7.20 และสำหรับที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของเฟส A B และ C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.21 และสามารถแสดงรายละเอียดของ i_{SA} , i_{SB} และ i_{SC} ได้ดังรูปที่ 7.22

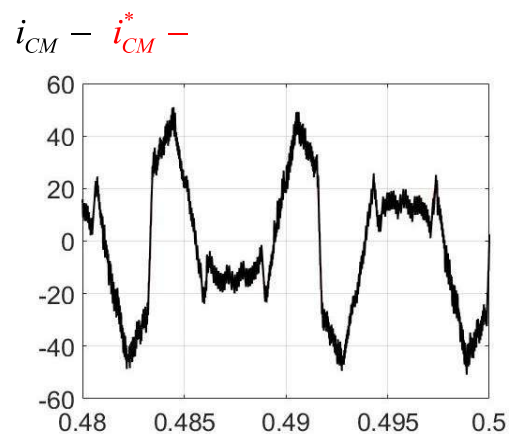
สำหรับผลการเปรียบเทียบสรุปค่า %THD ภายหลังจากชดเชยของกรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีชซี ลอจิก และตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.5



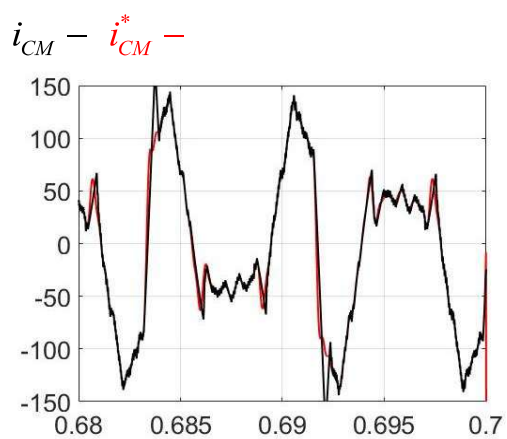
รูปที่ 7.17 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบของเฟส T กรณี กระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ)



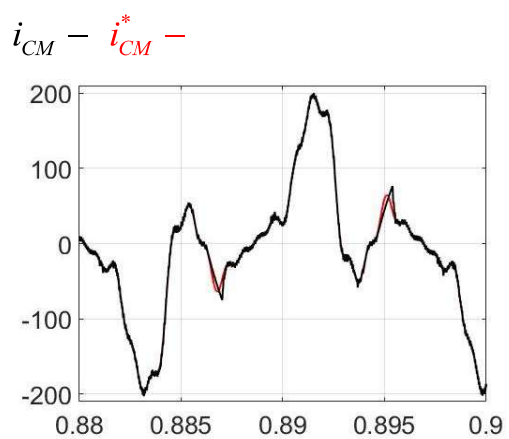
(ก) กรณีกระแสไหลตปกติ



(ข) กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด

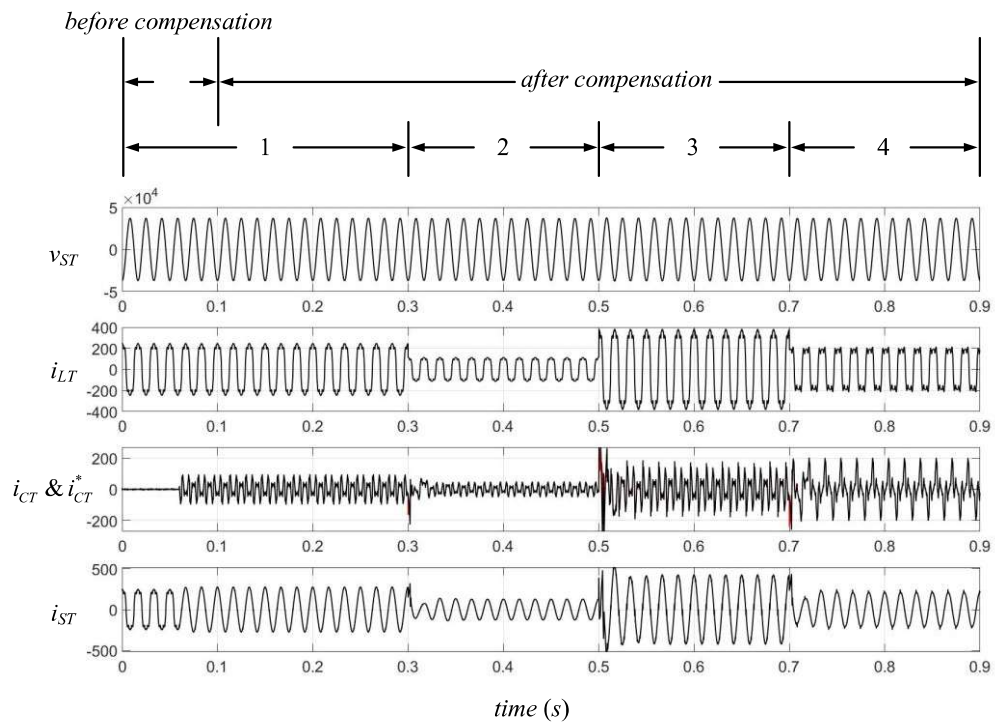


(ค) กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด



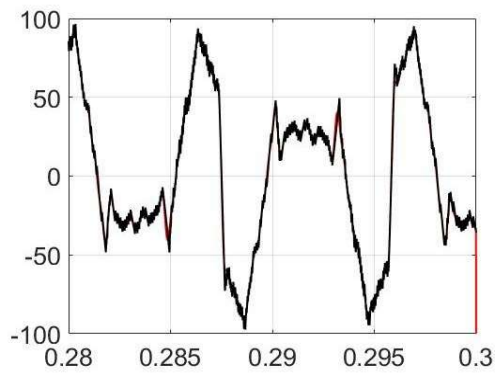
(ง) กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รูปที่ 7.18 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบของเฟส T กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ)



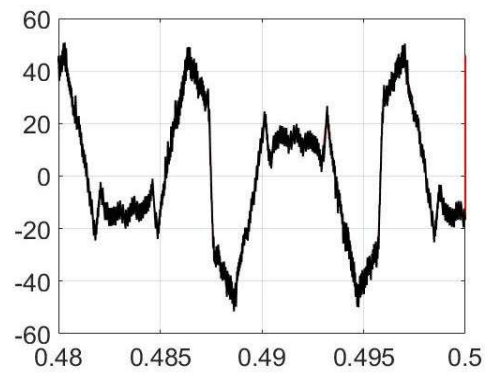
รูปที่ 7.19 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณี กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ)

$$i_{CT} - i_{CT}^*$$



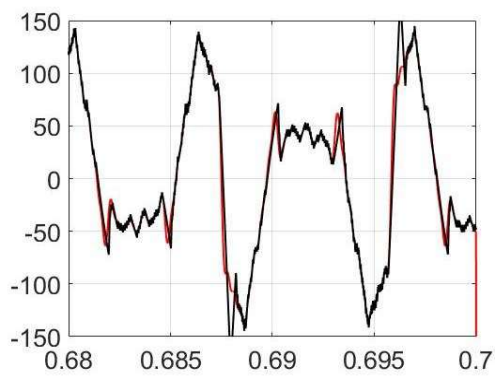
(ก) กรณีกระแสไหลผิดปกติ

$$i_{CT} - i_{CT}^*$$



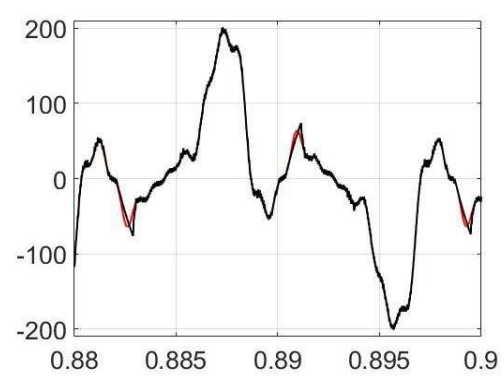
(ข) กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด

$$i_{CT} - i_{CT}^*$$



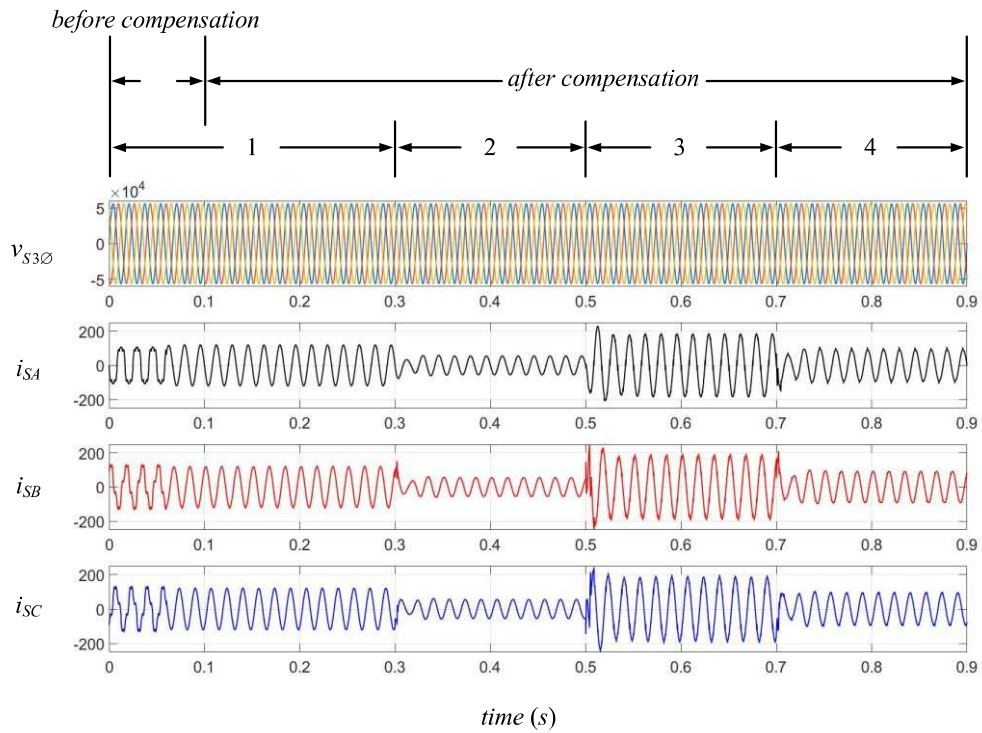
(ค) กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด

$$i_{CT} - i_{CT}^*$$

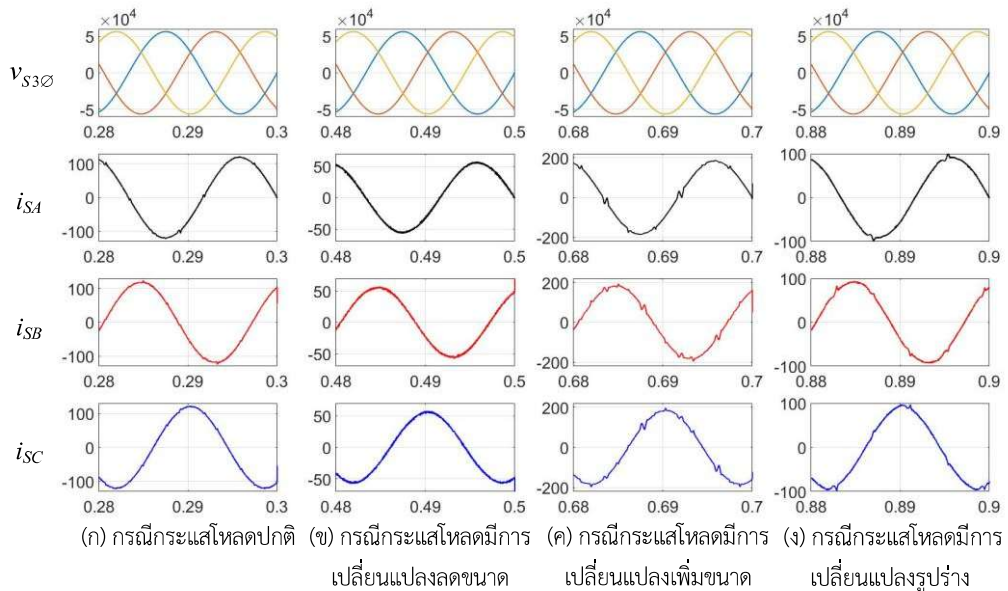


(ง) กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รูปที่ 7.20 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T กรณีกระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ)



รูปที่ 7.21 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ)



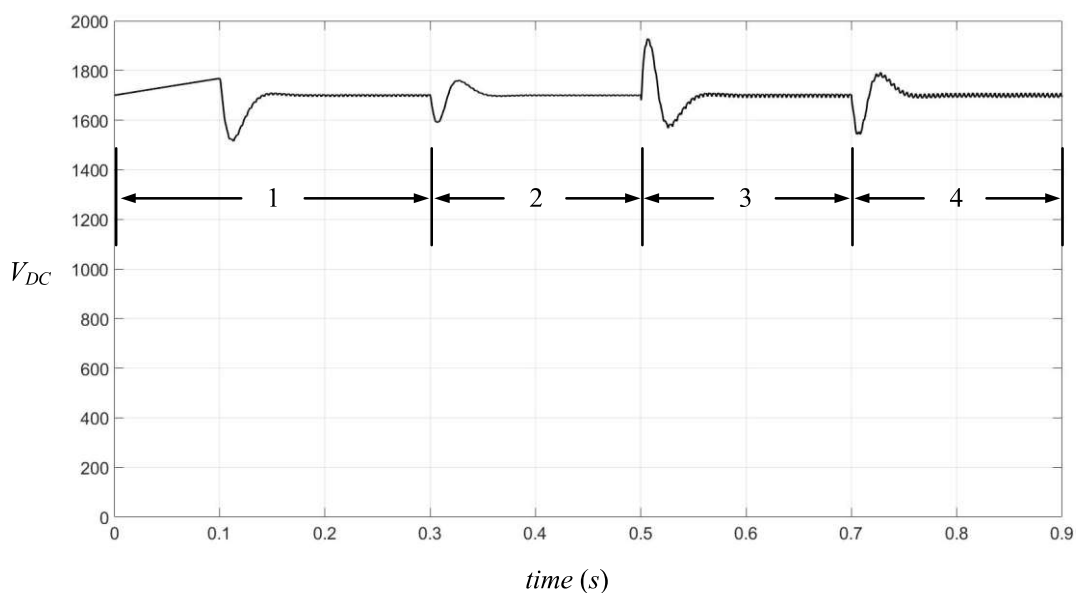
รูปที่ 7.22 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปแบบขยายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A, B, C) กรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง (ตัวควบคุมพีไอ)

ตารางที่ 7.5 สรุปผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการจำลองสถานการณ์ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์กระแสไหลที่มีการเปลี่ยนแปลง

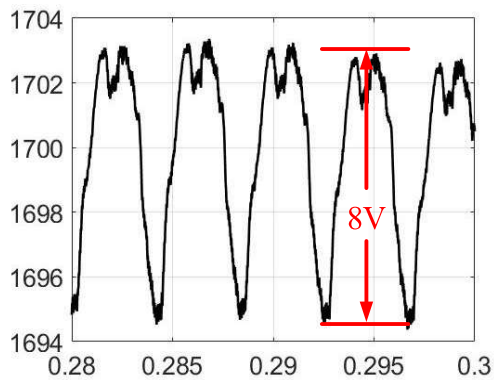
กรณีโหลด	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย						
	ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส			
	i_{SM}	i_{ST}	เฉลี่ย	i_{SA}	i_{SB}	i_{SC}	เฉลี่ย
ระบบควบคุมกระแสชดเชยตัวควบคุมพีซีลอจิก							
โหลดปกติ	1.52	1.42	1.47	1.51	1.44	1.44	1.46
โหลดมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด	2.64	2.65	2.64	2.65	2.70	2.61	2.65
โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด	2.96	2.69	2.82	2.97	2.78	2.74	2.83
โหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	2.43	2.27	2.35	2.44	2.26	2.36	2.35
ระบบควบคุมกระแสชดเชยตัวควบคุมพีไอ							
โหลดปกติ	1.99	1.73	1.86	1.99	1.81	1.79	1.86
โหลดมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด	2.87	2.87	2.87	2.87	2.84	2.90	2.87
โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด	4.30	4.64	4.47	4.30	4.53	4.59	4.47
โหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	3.22	2.71	2.97	3.22	2.82	2.87	2.97

จากตารางที่ 7.5 พบว่า ในช่วงภายหลังการชดเชยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมพีซีลอจิกที่ได้ ออกแบบไว้ในบทที่ 6 มีค่าลดลงและอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ทั้งในกรณี โหลดปกติ (ช่วงที่ 1) โหลดมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด (ช่วงที่ 2) โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด (ช่วงที่ 3) และโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ช่วงที่ 4) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการควบคุม กระแสชดเชยที่ดีแม้กระแสโหลดของระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาจะเกิดการเปลี่ยนแปลง และจากการ เปรียบเทียบค่าค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยตัวควบคุมพีไอ พบว่า การใช้ตัว ควบคุมพีซีลอจิกที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 6 ให้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย ที่น้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอทุกกรณีโหลด

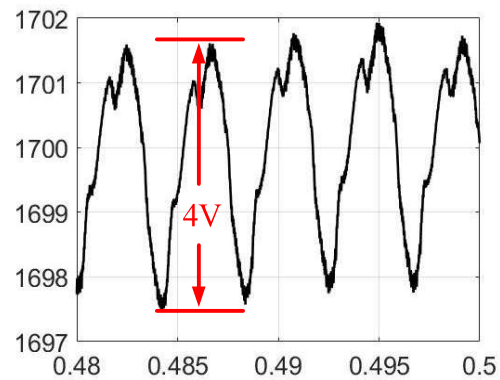
สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.23 จากรูปดังกล่าว พบว่า ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอยังคงมีสมรรถนะในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ดีแม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยสามารถคงค่าแรงดันบัสไฟตรงไว้ได้เท่ากับ 1,700 V ตามที่ได้ออกแบบไว้ และมีการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงในกรณีโหลดปกติ (ช่วงที่ 1) โหลดมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด (ช่วงที่ 2) โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด (ช่วงที่ 3) และโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ช่วงที่ 4) เท่ากับ 8 V 4 V 10 V และ 18 V ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 7.24 โดยค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงในแต่ละกรณีโหลดมีค่าไม่เกิน 2% ของค่า V_{DC} ($\Delta V_{DC} = 34$ V)



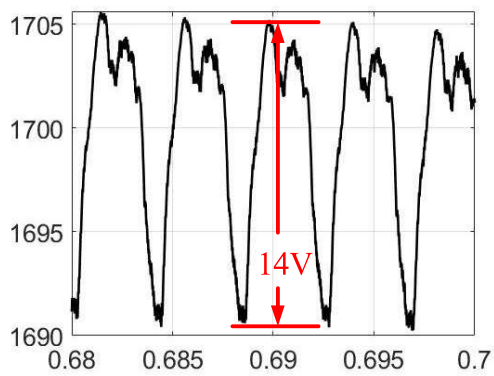
รูปที่ 7.23 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปรณี กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



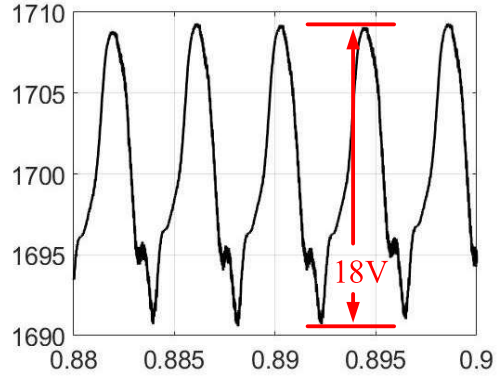
(ก) กรณีกระแสไหลตกปกติ



(ข) กรณีกระแสไหลตกมีการเปลี่ยนแปลงลดขนาด



(ค) กรณีกระแสไหลตกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด



(ง) กรณีกระแสไหลตกมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รูปที่ 7.24 การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงกรณีกระแสไหลตกมีการเปลี่ยนแปลง

7.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ โดยจะนำเสนอกระบวนการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ รวมไปถึงการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบทั้งในกรณีโหนดปกติและกรณีที่โหนดมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงลดขนาด การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกระแสไหลตก โดยผลจากการจำลองสถานการณ์ พบว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยควบคุมฟuzzy logic ที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 6 มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดี ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้กระแสไหลตกของระบบแรงดันไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบทั้งในกรณีโหนดปกติและกรณีที่โหนดมีการเปลี่ยนแปลง มีค่าลดลงอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-2022