SWU Engineering Journal (2018) 13(2), 38-51 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

การเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

The Comparison of Shunt Active Power Filter Structure for the Harmonic Elimination in AC-Electric Railway Systems

ฐานันดร์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์* กองพล อารีรักษ์
กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Thanan Trongjai Tosaporn Narongrit* and Kongpol Areerak
Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
*Corresponding author: Email: tosaporn@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม โดยการเปรียบเทียบจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THD$_I$) ค่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง ($\%\Delta V_{DC(ripple)}$) และผลตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) ของแรงดันบัสไฟตรงในช่วงที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้าง การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้คำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างจะใช้วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (วิธี SRF) ระบบควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม การจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าในบทความนี้ จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างให้ประสิทธิผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีใกล้เคียงกัน โดยค่า %THD$_I$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 นอกจากนี้ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ผลค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงที่มีขนาดน้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดมากขึ้น

คำสำคัญ: วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การกำจัดฮาร์มอนิก ระบบรางไฟฟ้า การตรวจจับฮาร์มอนิก ระบบฮาร์ดแวร์ในลูป

ABSTRACT

This paper presents the performance comparison of harmonic elimination in electric railway systems with two shunt active power filter (SAPF) structures: split capacitor structure and joint capacitor structure. The indicators of the comparison for the two SAPF structures are the total current harmonic distortion (%THD$_I$), the ripple of DC bus voltage ($\%\Delta V_{DC(ripple)}$) and the dynamic response of DC bus voltage during load changes. The harmonic detection,

synchronous reference frame (SRF method) is used for calculating the reference current of both SAPF structures. The conventional PI controllers are used to control the compensating current and regulate the DC bus voltage of SAPF. The hardware in the loop (HIL) simulation technique which process by Simulink/MATLAB program and TMS320C2000™ Experimenter Kit board is applied to simulate harmonic elimination in AC-electric railway systems. The simulation results show that both SAPF structures can provide good performance for harmonic elimination and the $\%THD_I$ of source current after compensation are satisfied under the IEEE std 519-2014. Furthermore, the SAPF with joint capacitor structure gives less ripple of DC bus voltage than the split capacitor structure. However, the split capacitor structure has better dynamic response than the joint capacitor structure when loads in the system have been changed and greatly increased.

Keyword: Active power filter, harmonic elimination, railway systems, Harmonic detection, Hardware in the loop

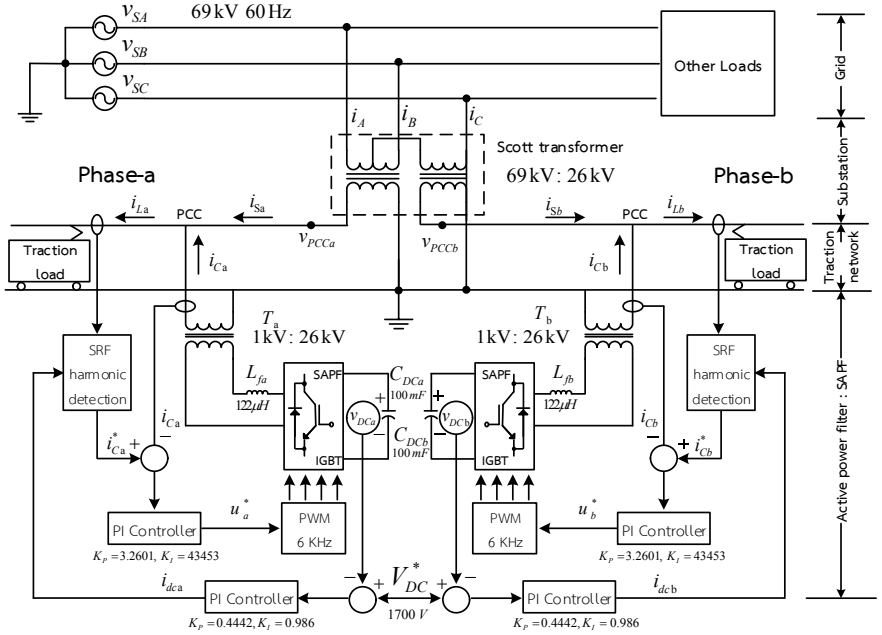
1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งด้วยระบบรางไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานในหลายประเทศทั่วโลก เนื่องจากการขนส่งด้วยระบบดังกล่าวเป็นการขนส่งที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับการขนส่งด้วยระบบอื่นๆ ระบบรางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถไฟฟ้า ซึ่งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางที่มีระยะทางไกลหรือรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่ใช้ในหลายประเทศ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดใช้งานในช่วง 25-27.5 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ทั้งนี้เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าดังกล่าวมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ทำให้มีพิสัยการจ่ายไฟฟ้าที่ไกล และส่งผลให้รถไฟฟ้าสามารถวิ่งด้วยความเร็วที่สูงกว่าระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [1] ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางจะเริ่มต้นจาก สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation) รับไฟฟ้าแรงสูงตั้งแต่พิกัดแรงดัน 69 kV ขึ้นไปจากสายส่งของผู้ผลิตไฟฟ้า จากนั้นจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าของระบบราง (Traction Transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาที่ระดับแรงดันในช่วง 25-27.5 kV ก่อนส่งจ่ายให้กับโหลดรถไฟฟ้า (Traction Load) ในอดีตที่ผ่านมาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางจะเป็นระบบหนึ่งเฟส (Single-phase Power Supply Systems) ซึ่งนิยมใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (Single-Phase Linear Transformer) เนื่องจากหม้อแปลงดังกล่าวมีต้นทุนการผลิตต่ำและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามระบบส่งจ่ายแบบหนึ่งเฟสดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลขึ้นที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [4] จากปัญหาเฟสไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจึงมีการใช้งานระบบหนึ่งเฟสแบบ 2 ชุด หรือ 2 เฟสจากหนึ่งสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย เรียกว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (Co-phase Power Supply Systems) [5] โดยระบบนี้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันจากระบบสามเฟสให้เป็นระบบสองเฟสซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาเฟสไม่สุมดุลของกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิได้เมื่อโหลดของรถไฟฟ้าทั้งสองเฟสทางฝั่งทุติยภูมิมีขนาดเท่ากัน หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสมดุล (balance transformer) ที่นิยมใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วมมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต (Scott Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองซ์ (Le-blanc Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ (Woodbridge Transformer) เป็นต้น [3-5] อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะพิจารณาใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทดังกล่าวเป็น

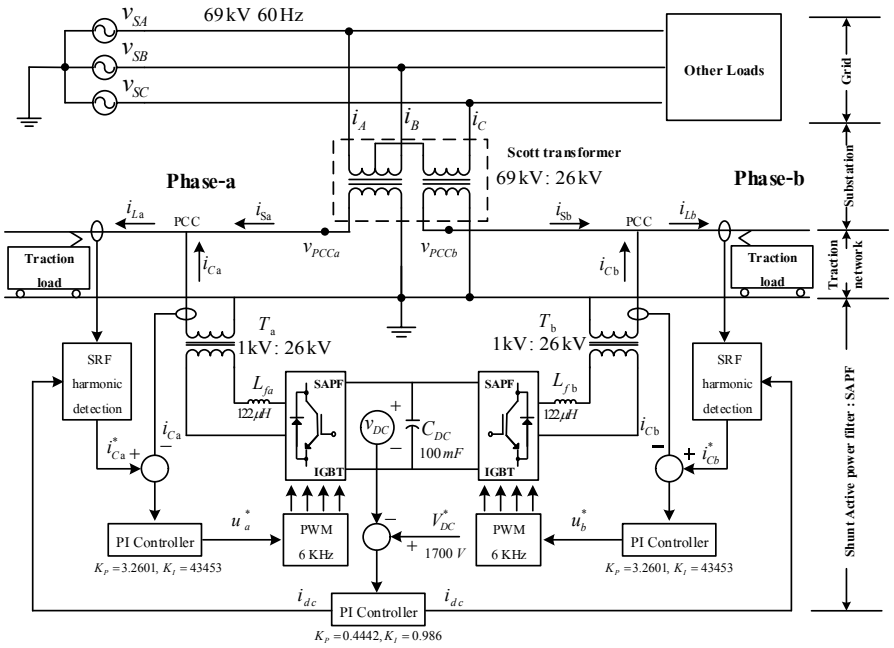
หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิน้อย และมีพิกัดใช้งานอยู่ในย่านเดียวกับข้อมูลของระบบรางไฟฟ้าที่นำมาใช้พิจารณาในกรณีศึกษานี้ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่อร่วมทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกด้วย [4]

โดยทั่วไปโหลดของระบบรางไฟฟ้านั้นประกอบด้วยชุดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ รวมถึงโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในขบวนรถไฟ เช่น อุปกรณ์แสงสว่าง พัดลม และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ซึ่งการใช้งานโหลดดังกล่าวจะก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้าส่งผลให้เกิดผลเสียหลายประการต่อระบบรางไฟฟ้า เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลัง ทำให้ความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลง [4] เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ระบบสื่อสารและระบบอาณัติสัญญาณทำงานผิดพลาด [4] เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าให้หมดไปหรือลดน้อยลง การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) [10] การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter) [6] รวมถึงการนำวงจรทั้งสองมาใช้งานร่วมกันเรียกว่าวงจรไฮบริดจ์ (Hybrid Filter) [7] โดยบทความนี้จะนำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shut Active Power Filter: SAPF) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิผลสูงในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบไฟฟ้าได้ดี อีกทั้งยังสามารถชดเชยค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบไฟฟ้าได้ด้วย [6]

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสร่วมด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจำเป็นต้องใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจำนวน 2 ชุด เพื่อให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้ทั้งสองเฟสของระบบรางไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกดังแสดงในรูปที่ 1 และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจากรูประบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญเหมือนกัน 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 คือ การตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งจะใช้สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้สามารถ



รูปที่ 1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 2 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

ฉีดกระแสชดเชยได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิผล ซึ่งปัจจุบันการตรวจจับฮาร์มอนิกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous reactive power theory: PQ) [2] วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame: SRF) [2] วิธีฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis:SWFA) [8] และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neuron Network: NN) [6] เป็นต้น แต่ในบทความนี้จะเลือกใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความถูกต้องในการตรวจจับฮาร์มอนิก และสามารถทำงานได้ดีทั้งกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์และในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน รวมถึงเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ [2] ในส่วนที่ 2 คือ ระบบควบคุมกระแสชดเชย ทำหน้าที่ควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ [9] ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวถือเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่ให้ประสิทธิผลในการควบคุมที่ดี และง่ายต่อการออกแบบ สำหรับส่วนที่ 3 คือ ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง มีหน้าที่ควบคุมให้แรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีค่าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในบทความนี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอ [9] เช่นกัน เนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีเพียงพอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง [9]

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ประกอบไปด้วยในหัวข้อที่ 2 จะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม หัวข้อที่ 3 คือ การอธิบายทบทวนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอเทคนิคการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปที่จะใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ส่วนหัวข้อที่ 5 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการจำกัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้าง และในหัวข้อสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความนี้

2. โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า

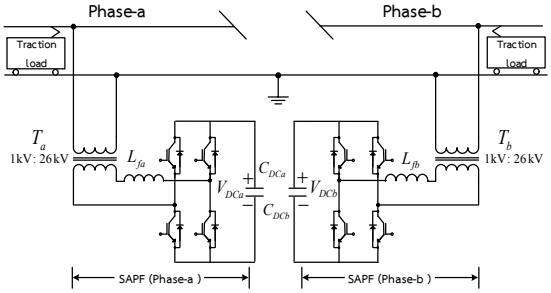
2.1. โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าวประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจำนวน 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว ต่อกันเป็นวงจรบริดจ์ นอกจากนี้ยังมีตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_{fa}, L_{fb}) จำนวน 2 ตัว และตัวเก็บประจุ (C_{DCa},C_{DCb}) จำนวน 2 ตัว โดยหลักการทำงานของวงจรดังกล่าวจะเริ่มจากตัวเก็บประจุที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานแต่ละชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยมีอุปกรณ์สวิตช์ทำหน้าที่เปิดและปิดวงจรตามสัญญาณพัลส์ที่ได้จากส่วนของการควบคุมกระแสชดเชยร่วมกับเทคนิค PWM เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ จากนั้นตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจะทำหน้าที่แปลงค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้เป็นค่ากระแสชดเชยก่อนต่อเข้ากับจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC สูง จึงทำให้จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (T_a, T_b) ลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC [3] ให้มีค่าเหมาะสม [1kV : 26 kV] ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส [4] ดังที่ปรากฏในรูปที่ 3

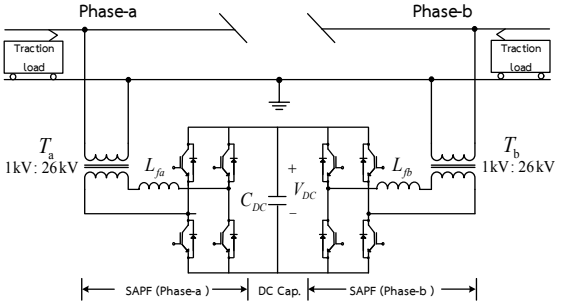
2.2. โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 โครงสร้างวงจรดังกล่าวจะมีส่วนประกอบที่เหมือนกับโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกทุกประการ แต่กรณีของโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้ตัวเก็บประจุ (C_{DC}) เพียง 1 ตัว ร่วมกันทั้งสองชุดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังปรากฏในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตาม หลักการทำงานของวงจรยังคงเหมือนกับกรณีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างสามารถสรุปเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละโครงสร้างแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้จำนวนตัวเก็บประจุน้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก 1 ตัว ดังนั้น หากพิจารณาถึงการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ตัวเก็บประจุ จะพบว่า โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้ชุดควบคุมที่น้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3 SAPF โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 4 SAPF โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 2 โครงสร้าง

ชนิดอุปกรณ์	จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้	
	SAPF แบบตัวเก็บประจุแยก	SAPF แบบตัวเก็บประจุร่วม
1. ตัวเก็บประจุ	2	1
2. ตัวเหนี่ยวนำ	2	2
3. อุปกรณ์สวิตช์	8	8
4. หม้อแปลงไฟฟ้า	2	2

3. การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

การตรวจจับฮาร์มอนิกถือเป็นส่วนที่สำคัญใช้สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้สามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง โดยในบทความนี้จะอธิบายการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส หรือวิธี SRF ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L) ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) โดยใช้สมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยค่า $i_{L\alpha}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนแอลฟา

$i_{L\beta}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนเบตา

ขั้นที่ 2 แปลงค่ากระแสที่โหลดบนแกน $\alpha\beta$ ให้อยู่บนแกนหมุน DQ (i_{Ld}, i_{Lq}) โดยใช้สมการที่ (2) ซึ่งค่า θ ได้จากการใช้เทคนิคเฟสล็อคลูป (Phase-locked loop: PLL) ที่หมุนด้วยมุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่จุดต่อร่วม (v_{PCC}) ของระบบที่พิจารณา

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยค่า i_{Ld} คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนดี

i_{Lq} คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนคิว

จากสมการที่ (2) ค่า i_{Ld} จะประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นสัญญาณกระแสตรง ($\bar{i}_{Ld}$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณมูลฐาน และสัญญาณกระแสสลับ ($\tilde{i}_{Ld}$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิกดังแสดงในสมการที่ (3)

$$i_{Ld} = \bar{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld} \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 ใช้วงจรกรอง (filter) แยกปริมาณมูลฐาน $\bar{i}_{Ld}$ ออกจากปริมาณฮาร์มอนิก $\tilde{i}_{Ld}$ (สำหรับบทความนี้เลือกใช้วงจรกรองผ่านต่ำ Low pass filter: LPF อันดับ 1 ความถี่ตัดเท่ากับ 15 Hz)

ขั้นที่ 4 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{C\alpha}, i_{C\beta}$) โดยใช้สมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} (\bar{i}_{Ld} - i_{dc}) \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยค่า $i_{C\alpha}$ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนแกนแอลฟา

$i_{C\beta}$ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนแกนเบตา

i_{dc} คือ ปริมาณกระแสตรงที่ได้จากส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

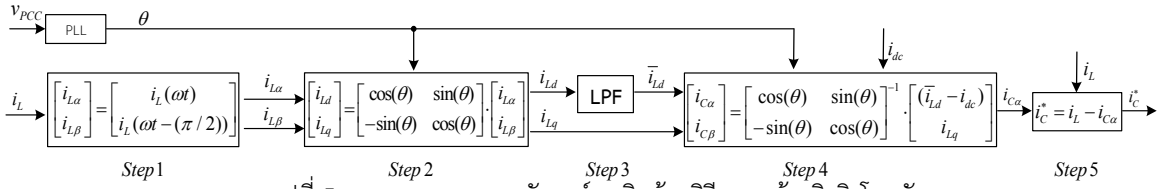
ขั้นที่ 5 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_C^*) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้จากสมการที่ (5)

$$i_C^* = i_L - i_{C\alpha} \quad (5)$$

จากขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ทั้ง 5 ขั้นตอนข้างต้น สามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 5

4. การจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

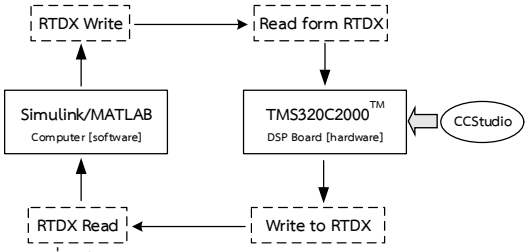
การจำลองสถานการณ์ของบทความนี้จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop: HIL) ที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit โดยมีไดอะแกรมการทำงานของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยส่วนของซอฟแวร์ (software) คือ โปรแกรม Simulink/MATLAB บนคอมพิวเตอร์ และส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (hardware) บอร์ด DSP ที่ทำงานร่วมกับโปรแกรม Code Composer Studio (CCStudio) การส่งและรับข้อมูลระหว่างซอฟแวร์และฮาร์ดแวร์ดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบของ Real-time data exchange (RTDX) ซึ่งในโปรแกรม Simulink จะใช้บล็อก RTDX Write สำหรับส่งข้อมูลไปยังบอร์ด DSP และใช้บล็อก RTDX Read สำหรับรับข้อมูลจากบอร์ด DSP ในขณะที่บอร์ด DSP จะใช้การโปรแกรมด้วยคำสั่ง Read From RTDX สำหรับรับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink และใช้



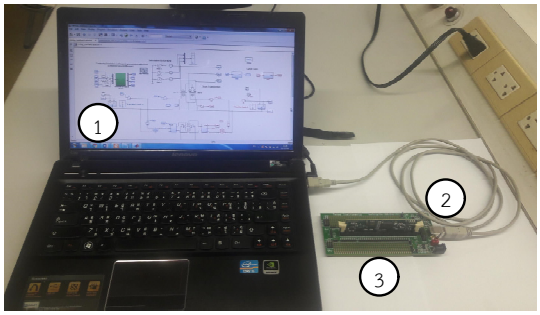
รูปที่ 5 แผนภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

คำสั่ง Write to RTDX สำหรับส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink [11] ซึ่งกระบวนการการเชื่อมต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด DSP ดังกล่าวจะเชื่อมต่อกันผ่านสาย (USB JTAG emulation) ดังแสดงในรูปที่ 7

จากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 เมื่อใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถแสดงใหม่ได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ส่วนของระบบรางไฟฟ้าและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะถูกสร้างขึ้นด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SimPowerSystem blockset) ในโปรแกรม Simulink ในขณะที่ส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกสร้างขึ้นบนบอร์ด DSP จากระบบจำลองสถานการณ์รูปที่ 8 ข้อมูลอินพุตที่ถูกส่งให้กับบอร์ด DSP ประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (v_{PCCa}, v_{PCCb}) ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DCa}, V_{DCb}) ค่ากระแสโหลด (i_{La}, i_{Lb}) และค่ากระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (i_{Ca}, i_{Cb}) ส่วนระบบจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ามีข้อมูลอินพุตที่แตกต่างจากระบบในรูปที่ 8 คือ มีค่าแรงดันบัสไฟตรงเพียงชุดเดียว (V_{DC}) โดยข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด DSP ของทั้งสองระบบจำลองสถานการณ์ คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (u_a^*, u_b^*) ที่จะถูกส่งไปยังโปรแกรม Simulink เพื่อไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม (triangular carrier) ตามวิธีการของเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM จากนั้นจะนำสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าซึ่งสร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink ต่อไป

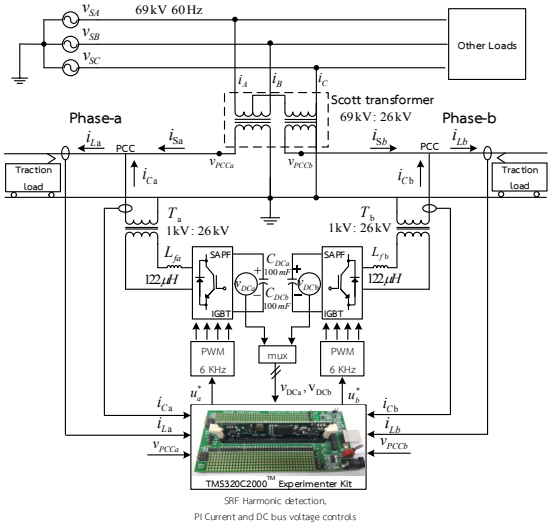


รูปที่ 6 ไดอะแกรมการทำงานของระบบฮาร์ดแวร์ในลูป

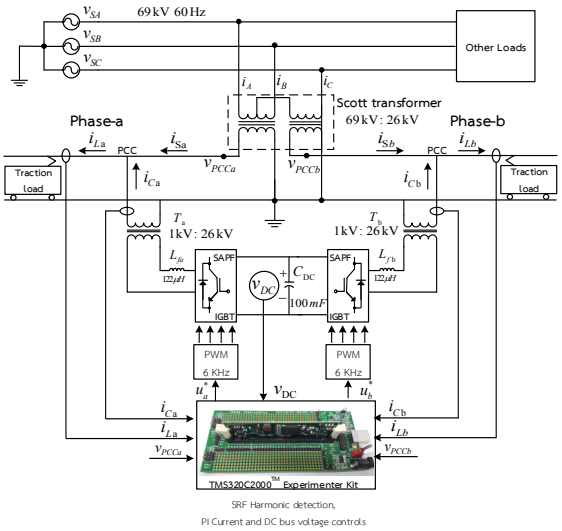


1. SimPowerSystem™ Simulink 2. JTAG emulator
3. TMS320C2000™ Experimenter Kit

รูปที่ 7 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMS320F28335



รูปที่ 8 ระบบ HIL กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 9 ระบบ HIL กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

5. ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปราย

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปดังระบบในรูปที่ 8 และ 9 จะพิจารณาแทนโหลดรถไฟฟ้า (Traction Load) ด้วยแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้า [3] โดยกรณีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก (รูปที่ 8) และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม (รูปที่ 9) จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ปรากฏในระบบรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ จากระบบการจำลองสถานการณ์จะกำหนดการเปลี่ยนแปลงจำนวนขบวนของโหลดรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่เฟสของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (เฟส a และเฟส b) ตามช่วงเวลาการเดินรถไฟฟ้าสมมุติที่พิจารณาในกรณีศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึงเวลา 0.25 วินาที จะกำหนดให้มีโหลดรถไฟฟ้าเพียงเฟส a เท่านั้น ส่วนช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึงเวลา 0.5 วินาที กำหนดให้ขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากเฟส a ไปยังเฟส b ส่งผลให้เฟส b มีโหลดรถไฟฟ้า 1 ขบวน และเฟส a ไม่มีโหลด ต่อมาช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาทีถึงเวลา 0.75 วินาที กำหนดให้มีโหลดรถไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาที่เฟส a ทำให้ทั้งเฟส a และเฟส b มีโหลดรถไฟฟ้าเฟสละ 1 ขบวน และสุดท้ายช่วงเวลาที่ 4 ตั้งแต่เวลา 0.75 วินาทีถึงเวลา 1 วินาที จะพิจารณาให้มีโหลดรถไฟฟ้าเพิ่มเป็นเฟสละ 2 ขบวน โดยผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในแต่ละช่วงเวลาของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างสามารถดูได้ต่อจากนี้

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาการเดินรถไฟฟ้าสมมุติ

โหลดระบบราง	จำนวนโหลดรถไฟฟ้า (ขบวน)			
	ช่วงเวลาที่ 1	ช่วงเวลาที่ 2	ช่วงเวลาที่ 3	ช่วงเวลาที่ 4
เฟส a	1	ไม่มี	1	2
เฟส b	ไม่มี	1	1	2

กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกของเฟส a และเฟส b กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 จากรูปดังกล่าว ในช่วงเวลาที่ 1 ที่มีโหลดรถไฟฟ้าเฉพาะเฟส a จำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 0.1 วินาที ซึ่งยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิก รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส a (i_{Sa}) และกระแสที่โหลดเฟส a (i_{La}) มีลักษณะเหมือนกันคือบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยวัดค่า $\%THD_I$ ได้เท่ากับ 22.16% จากนั้นตั้งเวลา 0.1 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a ฉีดกระแสชดเชย (i_{Ca}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า พบว่า รูปสัญญาณของ i_{Sa} กลับมาเป็นรูปคลื่นไซน์มากขึ้นโดยค่า $\%THD_I$ ลดลงเหลือ 2.26% ในขณะที่เฟส b ยังไม่มีโหลดรถไฟฟ้า จึงไม่มีการชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกที่เฟสดังกล่าว

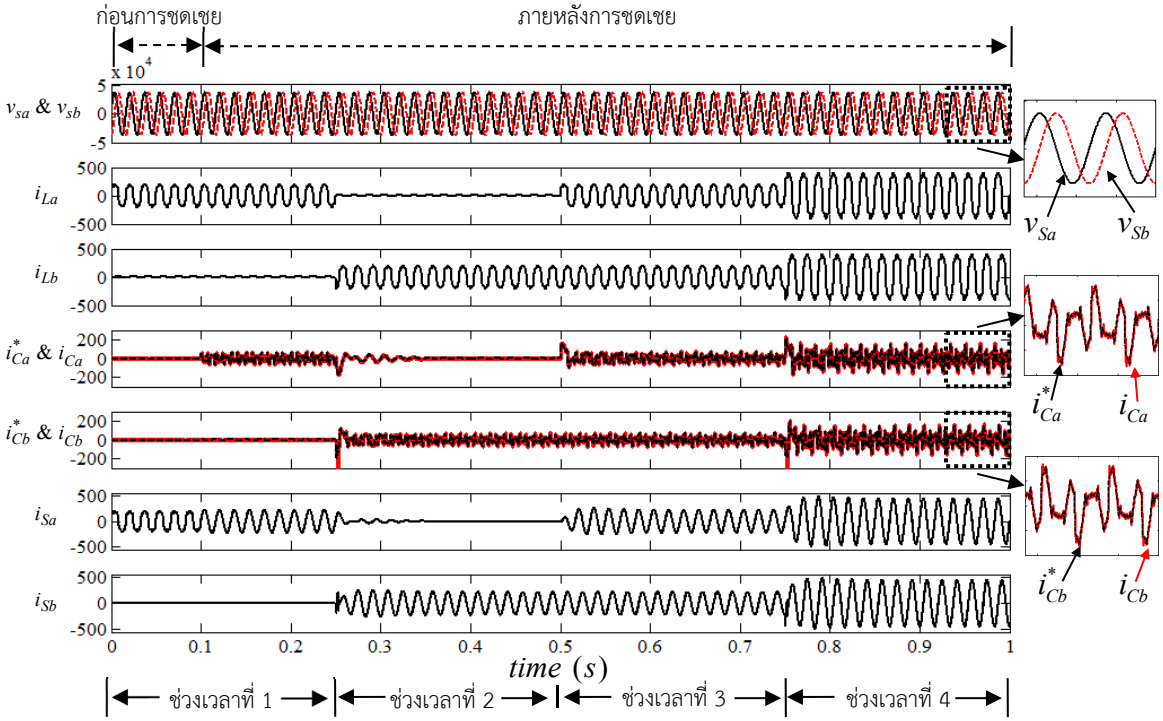
ในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึง 0.5 วินาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดรถไฟฟ้าคือ เฟส a ไม่มีโหลด ส่วนเฟส b มีโหลดรถไฟฟ้าจำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a หยุดฉีดกระแสชดเชย

ในขณะที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส b สามารถทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเฟส b (i_{Cb}) กำจัดฮาร์มอนิกได้ โดยค่า %THD$_I$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส b (i_{Sb}) ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.22% (ก่อนการชดเชยค่า %THD$_I$ ของ i_{Sb} สำหรับช่วงเวลานี้มีค่าเท่ากับ 22.16%)

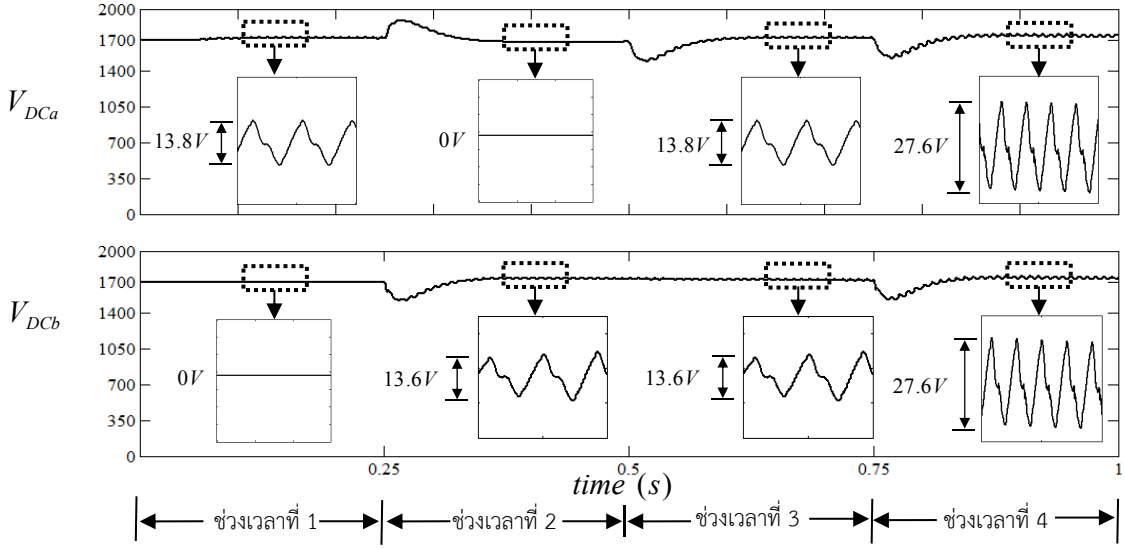
ต่อมาในช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที ถึง 0.75 วินาที ทั้งเฟส a และเฟส b มีโหลดรถไฟฟ้าเฟสละ 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองเฟสสามารถฉีดกระชดเชยได้พร้อมกันส่งผลให้ค่า %THD$_I$ ของ i_{Sa} และ i_{Sb} หลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.25% และ 2.22% ตามลำดับเฟส

สำหรับช่วงเวลาที่ 4 ตั้งเวลา 0.75 วินาที เป็นต้นไป เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นเฟสละ 2 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองเฟสยังคงสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้ โดยที่ค่า %THD$_I$ ของ i_{Sa} และ i_{Sb} ภายหลังการชดเชยสำหรับกรณีโหลดนี้มีค่าเท่ากับ 2.47 % และ 2.44 % ตามลำดับ จากผลดังกล่าวหมายความว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกร่วมกับตัวควบคุมพีไอ (K_p=3.26, K_i=43453) [9] ที่ใช้สำหรับควบคุมค่ากระแสชดเชย มีสมรรถนะการทำงานและควบคุมที่ดีตลอดทุกช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของโหลดรถไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเฟส a และเฟส b ดังแสดงในรูปที่ 11 จะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอ (K_p=9.4442, K_i=0.986) [9] มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่ากับค่าอ้างอิงที่ 1700 V ที่ได้ออกแบบไว้ ได้ทุกช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงโหลดรถไฟฟ้า จากผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง ($\%\Delta V_{DC(ripple)}$) โดยใช้สมการที่ (6) พบว่า ในกรณีของเฟส a จะมีค่า $\%\Delta V_{DC(ripple)}$ ในแต่ละช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงโหลดเท่ากับ 0.81%, 0%, 0.81% และ 1.62% ตามลำดับ ส่วนในกรณีของเฟส b มีค่าเท่ากับ 0%, 0.81%, 0.80% และ 1.62% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) ของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกเฟส a และเฟส b กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 11 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเฟส a และเฟส b กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ครั้งแรกที่เวลา 0.25 วินาทีสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงเฟส a มีค่าแรงดันพุ่งเกินสูงสุดเท่ากับ 1890 V ในขณะที่แรงดันบัสไฟตรงเฟส b มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1515 V โดยทั้งสองเฟสใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สถานะคงตัวที่ค่าแรงดัน 1700 V (Setting time: T_S) ประมาณเท่ากับ 0.12 วินาที ต่อมาในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สองที่เวลา 0.5 วินาที สังเกตได้ว่า แรงดันบัสไฟตรงเฟส a มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1500 V และใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 0.13 วินาที ในขณะที่แรงดันบัสไฟตรงเฟส b มีค่าคงทีเท่ากับ 1700 V (เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เฟส b) และในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สามที่เวลา 0.75 วินาที สังเกตได้ว่า ทั้งค่าแรงดันบัสไฟตรงเฟส a และเฟส b มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากันประมาณเท่ากับ 1520 V โดยทั้งสองเฟสใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สถานะคงตัวประมาณเท่ากับ 0.12 วินาที

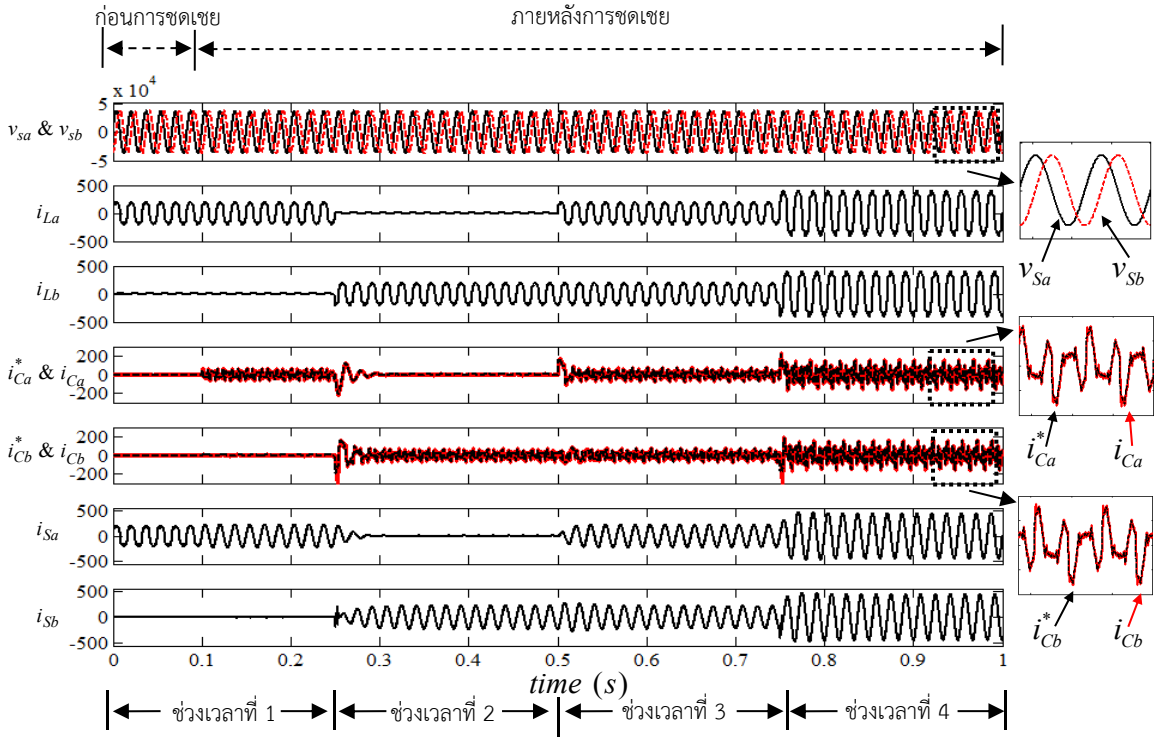
$$\%\Delta V_{DC(ripple)} = \frac{\Delta V_{DC}}{V_{DC}^{*}} \times 100 \qquad (6)$$

กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

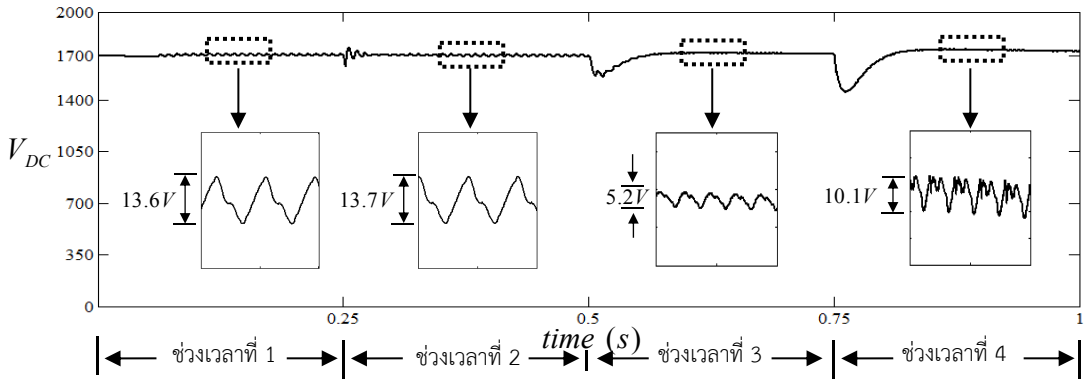
ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกของเฟส a และเฟส b กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 จากรูปดังกล่าวในช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.25 วินาที ที่มีโหลดรถไฟฟ้าเฉพาะเฟส a พบว่า เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a ทำการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที เป็นต้นไป จะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณของ i_{Sa} มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยวัดค่า $\%THD_I$ ของ i_{Sa} ได้เท่ากับ 2.24% (เฟส b ไม่มีโหลดรถไฟฟ้าจึงไม่มีการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิก)

ต่อมาในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึง 0.5 วินาที เมื่อเฟส a ไม่มีโหลดรถไฟฟ้า ในขณะที่เฟส b มีโหลดรถไฟฟ้าจำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a ได้ทำการหยุดฉีดกระแสชดเชย ส่วนวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส b ได้ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบรางไฟฟ้า โดยวัดค่า $\%THD_I$ หลังการชดเชยของ i_{Sb} ได้ค่าเท่ากับ 2.23%

สำหรับในช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที ถึง 0.75 วินาที เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดรถไฟฟ้าเฟสละ 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสกำจัดฮาร์มอนิกได้ทั้งเฟส 2 เฟสพร้อมกัน โดยวัด $\%THD_I$ ของ i_{Sa} และ i_{Sb} ได้เท่ากับ 2.20% และ 2.21% ตามลำดับ



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกเฟส a และเฟส b กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม



รูปที่ 13 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

และในช่วงเวลาที่ 4 เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดรถไฟฟ้าเพิ่มเป็นเฟสละ 2 ขบวน พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมยังคงสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกให้กับระบบรางไฟฟ้าทั้งสองเฟสได้เช่นเดิม โดยวัดค่า %THD$_I$ ของ i_{Sa} และ i_{Sb} ได้เท่ากับ2.32% และ 2.31% ตามลำดับ จากผลดังกล่าว หมายความว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมร่วมกับตัวควบคุมพีไอ (K_p=3.26, K_I=43453) [9] สามารถให้ประสิทธิผลการกำจัดฮาร์มอนิกดีตลอดทุกช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของโหลดรถไฟฟ้า

ผลการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถแสดงในรูปที่ 13 โดยจะเห็นได้ว่า

การใช้ตัวควบคุมพีไอเพียง 1 ชุด สามารถควบคุมให้ค่า V_{DC} มีค่าเท่ากับ 1700 V ได้ทุกช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงโหลดของทั้งสองเฟสโดยวัดค่า $\%\Delta V_{DC(ripple)}$ ในแต่ละช่วงเวลา ได้ค่าเท่ากับ 0.8%, 0.79%, 0.30% และ 0.58% ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัตของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งแรกที่เวลา 0.25 วินาที สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีการกวัดแกว่งเล็กน้อยที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 1755 V และต่ำสุดเท่ากับ 1630 V จากนั้นสามารถลู่เข้าสู่สถานะคงตัวที่ค่าแรงดัน 1700 V ได้โดยใช้เวลาประมาณเท่ากับ 0.03 วินาที ต่อมาในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สองที่เวลา 0.5 วินาที สังเกตได้ว่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1560 V โดยใช้เวลาในการลู่เข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 0.07 วินาที และในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สามที่เวลา 0.75 วินาที สังเกตได้ว่า ทั้งค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าตกลงต่ำสุดประมาณเท่ากับ 1450 V โดยในกรณีนี้ใช้เวลาการลู่เข้าสู่สถานะคงตัวประมาณเท่ากับ 0.19 วินาที

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้าง เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้ค่า $\%THD_I$ ค่า $\%\Delta V_{DC(ripple)}$ และผลตอบสนองทางพลวัตของค่าแรงดันบัสไฟตรงในช่วงที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3 ถึง 5 ตามลำดับ จากตารางที่ 3 พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมให้ค่า $\%THD_I$ ของเฟส a และเฟส b ในแต่ละช่วงเวลาดีใกล้เคียงกัน โดยโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมให้ค่า $\%THD_I$ ดีกว่าเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่า $\%\Delta V_{DC(ripple)}$ ในตารางที่ 4 พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ค่า $\%\Delta V_{DC(ripple)}$ น้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกในทุกช่วงเวลา นอกจากนี้ ถ้าเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองทางพลวัตของค่าแรงดันบัสไฟตรงในช่วงเวลาที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ค่าแรงดันตกต่ำสุด ค่าแรงดันพุ่งเกินสูงสุด และค่าเวลาในการลู่เข้าสู่สถานะคงตัว (T_S) ดังตารางที่ 5 จะพบว่า ในช่วงการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เวลา 0.25 วินาที และที่เวลา 0.5 วินาที วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก แต่เมื่อโหลดรถไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นเฟสละ 2 ขบวน ที่เวลา 0.75 วินาที พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกจะให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม ทั้งนี้เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากันจึงทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมที่มีตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งตัวมีการสูญเสียพลังงานมากกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกที่มีตัวเก็บประจุ 2 ตัว

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่า $\%THD_I$

โครงสร้าง SAPF	ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2		ช่วงเวลาที่ 3		ช่วงเวลาที่ 4	
	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b
$\%THD_I$ ก่อนการชดเชย								
ไม่มีวงจร SAPF	22.16%	ไม่มี	ไม่มี	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%
$\%THD_I$ ภายหลังการชดเชย								
แบบตัวเก็บประจุแยก	2.25%	ไม่มี	ไม่มี	2.22%	2.25%	2.22%	2.47%	2.44%
แบบตัวเก็บประจุร่วม	2.24%	ไม่มี	ไม่มี	2.23%	2.20%	2.21%	2.32%	2.31%

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่า $\%\Delta V_{DC(ripple)}$

โครงสร้าง SAPF	$\%\Delta V_{DC(ripple)}$							
	ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2		ช่วงเวลาที่ 3		ช่วงเวลาที่ 4	
	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b
แบบตัวเก็บประจุแยก	0.81%	ไม่มี	ไม่มี	0.81%	0.81%	0.80%	1.62%	1.62%
แบบตัวเก็บประจุร่วม	0.8%		0.79%		0.30%		0.58%	

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัต

โครงสร้าง SAPF	ผลการตอบสนองทางพลวัต	การเปลี่ยนแปลงโหลด					
		ที่เวลา 0.25 s		ที่เวลา 0.5 s		ที่เวลา 0.75 s	
		เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b
แบบตัวเก็บประจุแยก	แรงดันตกต่ำสุด	-	1515 V	1500 V	-	1520 V	1524 V
	แรงดันพุ่งเกิน	1890 V	-	-	-	-	-
	T_s	0.12 s	0.12 s	0.13 s	-	0.12 s	0.12 s
แบบตัวเก็บประจุร่วม	แรงดันตกต่ำสุด	1630 V		1560 V		1450 V	
	แรงดันพุ่งเกิน	1775 V		-		-	
	T_s	0.03 s		0.07 s		0.19 s	

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม โดยผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างสามารถให้ประสิทธิผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีทั้งคู่ ซึ่งค่า %THD$_i$ ภายหลังการชดเชยอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 อย่างไรก็ตาม วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมมีข้อดีกว่าโครงสร้างแบบประจุแยก คือ สามารถให้สมรรถนะการทำงานของวงจรที่ดีกว่าโดยมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงที่น้อยกว่า อีกทั้งยังใช้ตัวเก็บประจุและตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงน้อยที่น้อยกว่า แต่โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมมีข้อเสีย คือ เมื่อขนาดของโหลดรถไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะเกิดผลของค่าแรงดันตกที่ลดลงมากกว่า และใช้เวลาลู่เข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่นานกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] นคร จันทศร. “ช่างรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ”. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระบบขนส่งทางรางแห่งชาติ. หน้า 229-243, (2559).

[2] ฐานันดร์ ตรงใจ, กองพล อารีรักษ์ และ ทศพร ณรงฤทธิ์, “การเปรียบเทียบวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัสสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส,” การประชุมวิชาการทางวิศกรรมไฟฟ้า eecon ครั้งที่ 40, พัทยา, โรงแรม เดอะ ซายน์, 16 พ.ย. 2560, หน้า 218-221

[3] Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen, “Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 2, pp. 495-499, April 2002.

[4] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai and F. Ma, “Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 10, pp. 2844-2856, Oct. 2011.

[5] Z. Shu, S. Xie and Q. Li, “Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 2, pp. 334-343, Feb. 2011.

[6] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui, “Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering,”

in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 8, pp. 3128-3143, Aug. 2009.

[7] Pee-Chin Tan, Poh Chiang Loh and D. G. Holmes, “A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1043-1052, July 2004.

[8] M. El-Habrouk and M. K. Darwish, “Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs,” in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 148, no. 1, pp. 21-28, Jan. 2001.

[9] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol and S. A. Oliveira da Silva, “P-I/P-I-D tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram,” IET Power Electron, vol. 7, pp. 2647–2659, Oct 2014.

[10] H. Hu, Z. He and S. Gao, “Passive Filter Design for China High-Speed Railway With Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 505-514, Feb. 2015.

[11] T. Narongrit, K-L. Areerak and K-N. Areerak “A New Design Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active Power Filter,” Electric Power Components and Systems, vol. 43, pp. 685–694, Mar 2015.