



บทความวิจัย

การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับจ่ายรถไฟฟ้า

ชาคริต ปานแป้น

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จิรวรรณ หอมจันทร์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จิตติมา วระกุล และ วรวัฒน์ ลวนนท์

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 2484 9047 อีเมล: jeerawan@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.04.003

รับเมื่อ 13 ธันวาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2565 ตอรับเมื่อ 17 มีนาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 4 เมษายน 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุล โดยใช้การคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรองกำลังแอกทิฟด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าเพื่อยืนยันการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้นำเสนอ อาศัยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ด eZdsp™ F28335 และโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าที่ได้นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีในการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรองกำลังแอกทิฟ โดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดสมรรถนะคุณภาพไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า ประกอบด้วย ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก (%THD), ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) และค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลของกระแส (%CUF) ภายหลังการชดเชยมีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Standard 519-2014

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ระบบรางไฟฟ้า วงจรองกำลังแอกทิฟ ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

การอ้างอิงบทความ: ชาคริต ปานแป้น, จิรวรรณ หอมจันทร์, จิตติมา วระกุล และ วรวัฒน์ ลวนนท์, “การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับจ่ายรถไฟฟ้า,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 1, หน้า 1-12, เลขที่บทความ 241-015676, ม.ค.-มี.ค. 2567.



Reference Current Calculation with Instantaneous Power Theory for Current Quality Improvement in Railway Electrification System

Chakrit Panpean

PEMC Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Jeerawan Homjan*

School of Mechatronics Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Jittima Varagul and Worawat Lawanont

School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 2484 9047 , E-mail: jeerawan@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.04.003

Received 13 December 2021; Revised 21 February 2022; Accepted 17 March 2022; Published online: 4 April 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper proposes the current quality improvement in electric railway systems using the instantaneous power theory (PQ) for calculating reference currents of Active Power Filters (APF). This paper focuses on the harmonic elimination, power factor correction, and load balancing of the source currents for current quality improvement. The Hardware in the Loop (HIL) technique was applied to confirm the performance of proposed reference current calculation. The eZdsp™ F28335 board was used in combination with the MATLAB/Simulink program for HIL simulation. The testing results indicated that the reference current calculation with the PQ theory for current quality improvement in electric railway systems can provide an excellent for performance calculating reference currents of APF. This can be considered by the performance indices for current quality improvement (total harmonic current distortion: %THD_i, power factor: PF, and current unbalanced factor: %CUF) after compensation that follow the IEEE Standard 519-2014.

Keywords: Current Quality Improvement, Electric Railway Systems, Active Power Filter, Instantaneous Power Theory

Please cite this article as: C. Panpean, J. Homjan, J. Varagul, and W. Lawanont, "Reference current calculation with instantaneous power theory for current quality improvement in railway electrification system," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, pp. 1–12, ID. 241-015676, Jan.-Mar. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

การขนส่งทางระบบรางสามารถขนส่งผู้โดยสารและสินค้าได้เป็นจำนวนมากภายในระยะเวลาอันสั้น ถือเป็นระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ อีกทั้งประเทศไทยมีแผนที่จะดำเนินการสร้างระบบขนส่งทางรางให้ครอบคลุมทั่วประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ของรัฐบาล ซึ่งการสร้างระบบขนส่งทางรางส่วนหนึ่งเป็นระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านระบบรางไฟฟ้าด้วยงานวิจัยจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาประเทศไทยในอนาคต

ระบบรางไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้า และโหลดรถไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า การใช้งานโหลดรถไฟฟ้าส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าขึ้นในระบบรางไฟฟ้า ประกอบด้วย กระแสฮาร์มอนิก โหลดไม่สมดุล และค่าตัวประกอบกำลังต่ำ เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อระบบรางไฟฟ้าหลายประการ เช่น ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง และหม้อแปลงกำลังที่สถานีขับเคลื่อนรถไฟฟ้า [1], [2] เกิดการรบกวนต่อระบบสื่อสารและระบบอัตโนมัติสัญญาณสำหรับควบคุมรถไฟฟ้า [3], [4] เกิดปัญหาการรับแรงดันไฟฟ้าที่แหวนรับไฟฟ้า [5], [6] เกิดการรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าขณะใช้งาน [7] อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาดและทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง [8] การแก้ไขปัญหเหล่านี้ จึงเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับงานวิจัยทางการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าวในระบบรางไฟฟ้า คือ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (APF) [9]–[11] ดังนั้น ในบทความนี้จึงมุ่งเน้นการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบด้วย โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การคำนวณกระแส

อ้างอิง ระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ในบทความนี้ให้ความสำคัญในการพิจารณาการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง [12] วิธีการตรวจจับซิงโครนัส [13] วิธีแกนหมุนดีควหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธีการบออ้างอิงซิงโครนัส [14] ซึ่งแต่ละวิธีได้นำเสนอมีจุดเด่นและจุดด้อยในการคำนวณกระแสอ้างอิงที่แตกต่างกัน วิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งมีจุดเด่นในเรื่องการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชยโดยตรง และมีขั้นตอนในการคำนวณน้อย ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชยมีความแม่นยำและใช้เวลาในการคำนวณที่รวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวจะมีสมรรถนะที่ดีเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ สำหรับวิธีการตรวจจับซิงโครนัสมีจุดเด่นในด้านรูปแบบการชดเชยที่หลากหลาย เช่น การพิจารณา กำลังไฟฟ้าเท่ากัน การพิจารณากระแสไฟฟ้าเท่ากัน และการพิจารณาอิมพีแดนซ์เท่ากัน แต่วิธีดังกล่าวจะต้องพิจารณากับระบบไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงตัวและมีตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้า ในส่วนของวิธีแกนหมุนดีควหรือวิธีการบออ้างอิงซิงโครนัสมีจุดเด่นในเรื่องของการหมุนแกนดีควเพื่อให้ระบบที่พิจารณามีค่าคงตัว เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อน แต่วิธีการดังกล่าวมีการคำนวณที่ซับซ้อนและจะต้องทำการตรวจจับมุมของระบบ ในบทความนี้มุ่งเน้นการกำจัดฮาร์มอนิกร่วมกับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายให้มีลักษณะสมดุล จึงให้ความสำคัญในส่วนของการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชยที่แม่นยำ และความรวดเร็วในการคำนวณ โดยใช้วิธีที่มีความซับซ้อนน้อย แต่ให้สมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงที่ดี จึงนำวิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (PQ) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

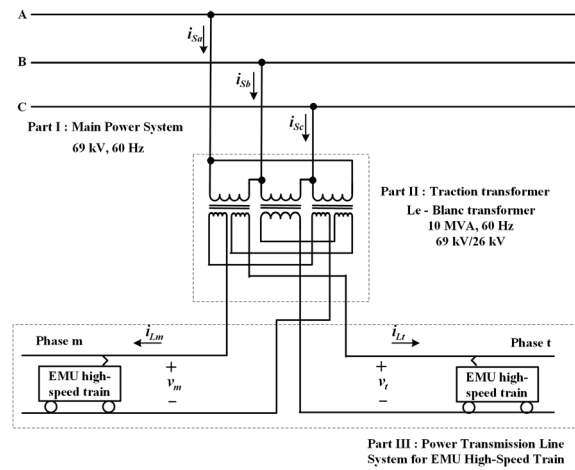
การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ ประกอบด้วย ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.1 ในหัวข้อที่ 2.2 นำเสนอขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิง สำหรับหัวข้อที่ 2.3 เป็นการนำเสนอการทดสอบด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (HIL) ผลการทดสอบ รวมทั้งการอภิปรายผลที่เกิดขึ้น ในส่วนของ

หัวข้อที่ 4 ได้นำเสนอการสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และ กิตติกรรมประกาศสำหรับขอบคุณผู้สนับสนุนงานวิจัยได้นำเสนอไว้เป็นหัวข้อสุดท้าย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

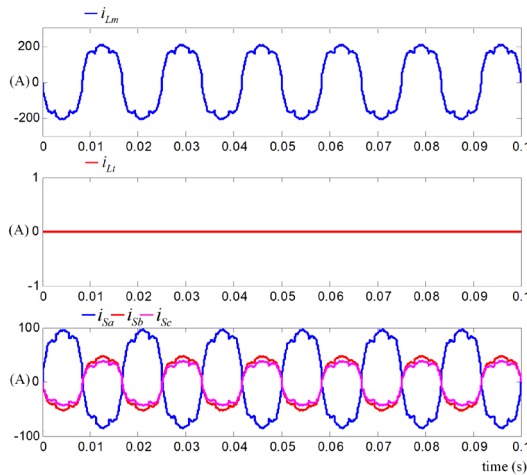
2.1 ระบบรางไฟฟ้า

ระบบรางไฟฟ้าที่มีระยะทางการเดินรถมากที่สุดในโลก คือ ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส พิกัดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 25–27.5 กิโลโวลต์ และมีความถี่ 50–60 เฮิร์ตซ์ ตามระบบการผลิตไฟฟ้าของแต่ละประเทศ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้างดงกล่าวมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ส่งผลให้สถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟมีพิสัยการจ่ายไฟฟ้าได้ไกล ซึ่งเหมาะกับรถไฟที่มีระยะการเดินทางไกล ระบบดังกล่าวจึงนิยมใช้งานกับรถไฟความเร็วสูง โดยระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ประกอบด้วยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ แสดงได้ดังรูปที่ 1 ในบทความนี้ได้พิจารณากระบวนส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูงของประเทศได้หวัน [15] ซึ่งมีข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้ตั้งต้นในการท้าววิจัย เช่น พิกัดระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ พิกัดระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ และข้อมูลองค์ประกอบของกระแสมูลฐานและกระแสฮาร์มอนิกของโหลดรถไฟที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้า โดยสถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟของระบบดังกล่าวรับแรงดันไฟฟ้าสามเฟส พิกัด 69 กิโลโวลต์ 60 เฮิร์ตซ์ จากกระบวนส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าตอผ่านหม้อแปลงกำลังชนิดเลอบลองค์ (Le Blanc Transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 69 กิโลโวลต์ เป็น 26 กิโลโวลต์ และแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม (Co-phase System) การใช้หม้อแปลงเลอบลองค์เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีขับเคลื่อนรถไฟเป็นการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าทางด้านระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ (ด้านเฟสรวม) [16] การขับเคลื่อนรถไฟใช้แรงดันไฟฟ้าพิกัด



รูปที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า

26 กิโลโวลต์ 60 เฮิร์ตซ์ แบบเฟสรวม (เฟส m และ เฟส t) ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนือศีรษะ โดยรถไฟความเร็วสูงจะใช้แขนรับไฟหรือสายลี (Pantograph) สัมผัสกับสายส่งเพื่อรับไฟฟ้าเข้าสู่ตัวรถไฟความเร็วสูง ภายในรถไฟความเร็วสูงจะมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม และส่งจ่ายไปยังส่วนต่างๆ เพื่อขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูง โดยพิจารณาคุณลักษณะขององค์ประกอบกระแสมูลฐานและองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงของรถไฟความเร็วสูงของประเทศได้หวัน [15] แสดงได้ดังรูปที่ 2 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ระบบที่พิจารณามีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงเฉพาะเฟส m เท่านั้น ซึ่งรูปสัญญาณกระแสโหลดเฟส m (i_{Lm}) มีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ ส่วนรูปสัญญาณกระแสโหลดเฟส t (i_{Lt}) มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากไม่จ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงที่เฟส t ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) มีรูปสัญญาณผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ และมีลักษณะไม่สมดุล โดยมีค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งค่าเหล่านี้สูงกว่าค่ามาตรฐาน IEEE Standard 519-2014 [17] ดังนั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรองกำลังแอกทิฟด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าดังกล่าวให้มีค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้าเป็นไปตาม



รูปที่ 2 รูปสัญญาณกระแสโหลดและกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา

ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE Standard 519-2014 โดยพิจารณากระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} เป็นสำคัญ

ตารางที่ 1 ดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้า

เฟส a	%THDi		%CUF	PF
	เฟส b	เฟส c		
21.46	19.62	23.67	99.25	0.67

2.2 การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

การคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังอิเล็กทรอนิกส์โดยตรงต่อสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ซึ่งทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Akagi และคณะ [12] โดยการคำนวณกำลังไฟฟ้าด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง จะทำการแบ่งกำลังไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนคือ กำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟ (p) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด และกำลังไฟฟ้รีแอ็กทีฟ (q) ที่เป็นการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าระหว่างเฟส โดยปราศจากการ

ถ่ายโอนกำลังงาน ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองส่วนในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{cases} p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ v_α, v_β คือ แรงดันไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและบีตา

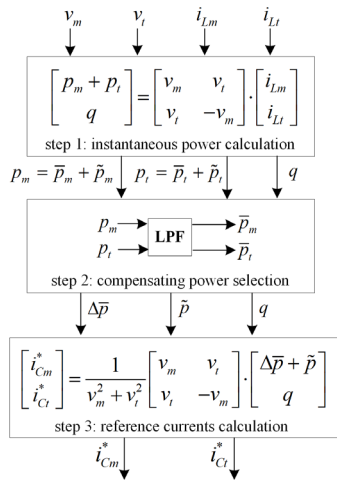
i_α, i_β คือ กระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและบีตา

เมื่อพิจารณาระบบรางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าระบบรางไฟฟ้ามีการแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสร่วมที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งเปรียบเสมือนการแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนแอลฟาและบีตา ดังนั้น จึงสามารถนิยามได้ว่า แรงดันและกระแสไฟฟ้าเฟส m มีค่าเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟา รวมทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าเฟส t มีค่าเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าบนแกนบีตา นอกจากนี้ การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าทำได้โดยการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling; PCC) ทางด้านเฟสร่วม ดังนั้น ขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t สำหรับวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ (i_{cm}^*, i_{ct}^*) แสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ดังสมการในบล็อก "Instantaneous Power Calculation" ซึ่งประกอบด้วย ค่ากำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟของเฟส m และเฟส t (p_m, p_t) กำลังไฟฟ้รีแอ็กทีฟของระบบ (q) ซึ่งค่า p_m และ p_t ประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟสัญญาณตรง (DC Component) ของเฟส m และเฟส t (\bar{p}_m และ \bar{p}_t ตามลำดับ) และค่ากำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟสัญญาณสลับ (AC Component) ของเฟส m และเฟส t (\tilde{p}_m และ \tilde{p}_t ตามลำดับ) แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{cases} p = p_m + p_t = v_m i_{Lm} + v_t i_{Lt} \\ q = v_t i_{Lm} - v_m i_{Lt} \end{cases} \quad (2)$$

ขั้นที่ 2 เลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชย เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยการเลือกค่า



รูปที่ 3 แผนภาพโตแอมแกรมการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

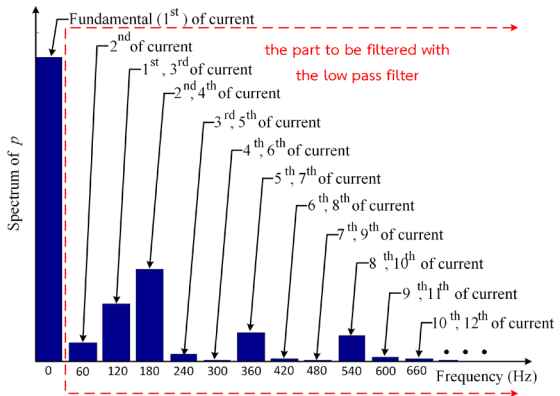
กำลังไฟฟ้างกล่าวข้างต้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 2 บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชยตามวัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าคือ กำลังไฟฟ้าแอมทิฟสัญญาณสลับ (\tilde{p}) กำลังไฟฟารีแอมทิฟ (q) และผลต่างของกำลังไฟฟ้าแอมทิฟสัญญาณตรง ($\Delta\bar{p}$) การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชยแสดงได้ดังสมการที่ (3)–(5) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้า

กรณี	วัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชย
1	กำจัดกระแสฮาร์มอนิก	\tilde{p} และ \tilde{q}
2	ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	\tilde{q}
3	ชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล	$\Delta\bar{p}$

$$\tilde{p} = (p_m - \bar{p}_m) + (p_t - \bar{p}_t) \quad (3)$$

$$q = \tilde{q} + \tilde{q} \quad (4)$$



รูปที่ 4 สเปกตรัมของค่ากำลังไฟฟ้าแอมทิฟ

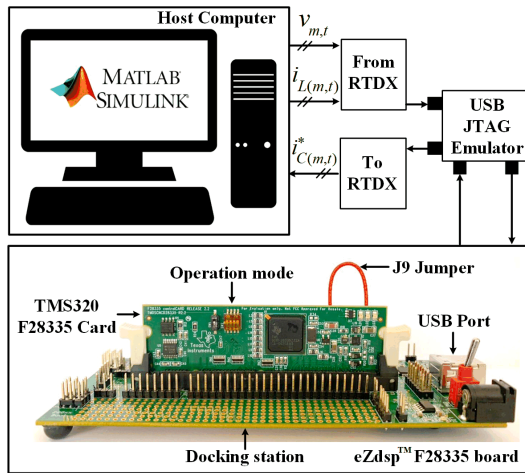
$$\Delta\bar{p} = |\bar{p}_m - \bar{p}_t| \quad (5)$$

การแยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้าแอมทิฟสัญญาณตรงเฟส m และเฟส t (\bar{p}_m, \bar{p}_t) ออกจากกำลังไฟฟ้า p_m และ p_t ตามลำดับ จะใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass Filter; LPF) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยพิจารณาความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ (Cutoff Frequency; f_c) จากสเปกตรัมค่ากำลังไฟฟ้าแอมทิฟ ดังแสดงในรูปที่ 4 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ จะต้องมิต่ำ $0 < f_c < 60$ เฮิรตซ์ เพื่อให้สามารถแยกกำลังไฟฟ้า \bar{p}_m และ \bar{p}_t ออกจากกำลังไฟฟ้า p_m และ p_t ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงกำหนดค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำให้มีค่าเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ ในส่วนของกำลังไฟฟารีแอมทิฟไม่ได้ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำ ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับารชดเชยตามวัตถุประสงค์

ขั้นที่ 3 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t สำหรับวงจรกรองกำลังแอมทิฟ (i_{Cm}^*, i_{Ct}^*) แสดงได้ดังสมการในบล็อก “Reference Currents Calculation”

2.3 การทดสอบด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

การทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้า นี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์



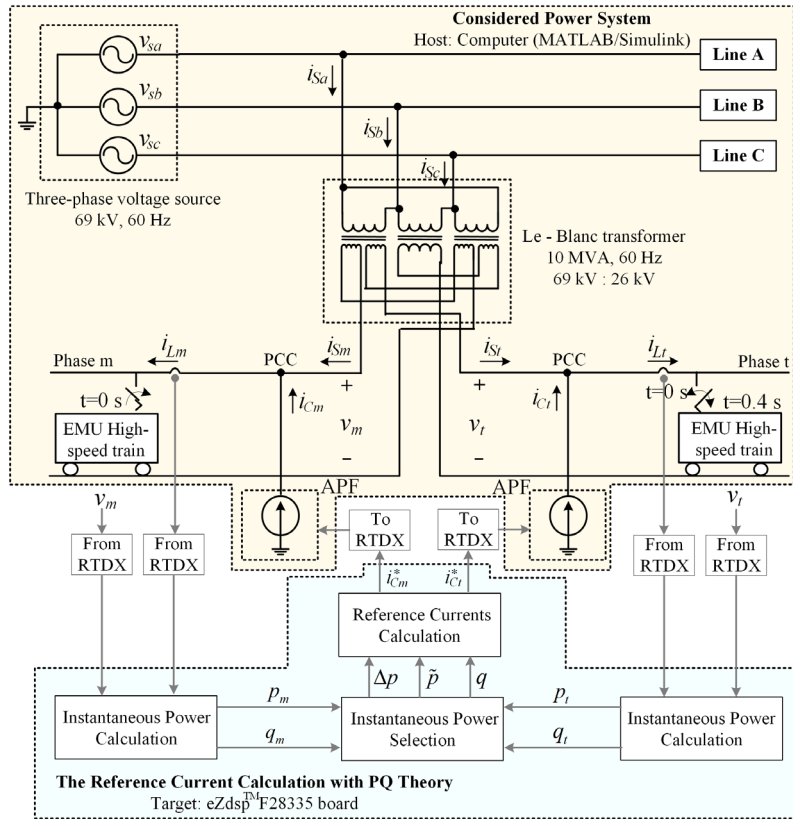
รูปที่ 5 การทดสอบด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

ในลูป (Hard Ware in the Loop; HIL) ซึ่งเป็นเทคนิคการจำลองสถานการณ์ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP โดยมีจุดเด่นหลายประการ เช่น ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริง สามารถคาดการณ์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นก่อนการทดสอบกับระบบฮาร์ดแวร์จริงในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้วิจัย และความเสียหายของอุปกรณ์ กระบวนการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งถูกเขียนด้วยชุดคำสั่งภาษาซีผ่านโปรแกรม CCStudio ลงบนบอร์ด eZdsp™ F28335 ส่วนระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ทำการจำลองขึ้นบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางพอร์ต USB ด้วย JTAG (Joint Test Action Group) ซึ่งมีการรับส่งข้อมูลระหว่างกันผ่านบล็อก RTDX (Real-Time Data Exchange) แสดงได้ดังรูปที่ 5 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่าการทำงานของเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า มีการส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าเฟส m (v_m) แรงดันไฟฟ้าเฟส t (v_t) กระแสโหลดเฟส m (i_{Lm}) และกระแสโหลดเฟส t (i_{Lt}) จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ให้กับบอร์ด eZdsp™ F28335 จากนั้น บอร์ด eZdsp™ F28335 จะทำการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้า

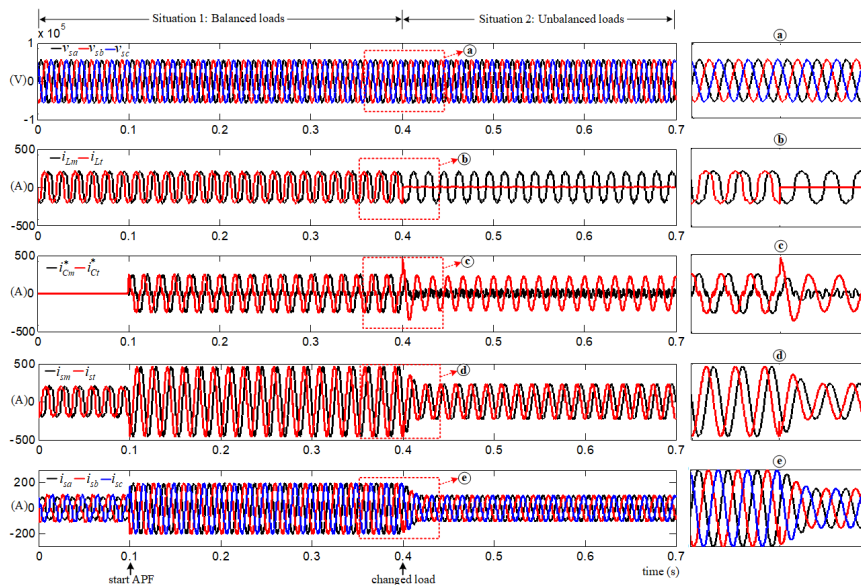
ขณะหนึ่งตามชุดคำสั่งภาษาซีที่ถูกโปรแกรมไว้ตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอ และทำการส่งข้อมูลกระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแก็กทิว (i_{Cm}^* , i_{Ct}^*) ให้กับโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า โดยกำหนดให้มีช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Time) เท่ากับ 1×10^{-5} วินาที โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{Sa} , v_{Sb} , v_{Sc}) ส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามหานครไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงลดแรงดันที่แปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม (v_m , v_t) และยังทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าอีกด้วย โดยแรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าไปยังโวลตรถไฟความเร็วสูง ในบทความนี้มุ่งเน้นการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง โดยไม่พิจารณาผลกระทบจากปัจจัยอื่น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติเป็นโครงสร้างของวงจรรองกำลังแก็กทิวทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบอย่างสมบูรณ์ ทำให้ค่ากระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) ตามลำดับ

3. ผลการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแก็กทิวด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป จะพิจารณาการจ่ายโวลตรถไฟความเร็วสูงแบ่งออกเป็น 2 สถานการณ์ คือ ช่วงเวลา 0–0.4 วินาที มีการจ่ายโวลตแบบสมดุล และช่วงเวลา 0.4–0.7 วินาที มีการจ่ายโวลตแบบไม่สมดุล โดยกำหนดให้เริ่มฉีดกระแสชดเชย และเข้าสู่จุดต่อร่วม (PCC) ที่เวลา 0.1 วินาที ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งสังเกตได้ว่ารูปสัญญาณแรงดัน v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ส่วนรูปสัญญาณกระแสโวลตรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้า (i_{Lm} , i_{Lt}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์

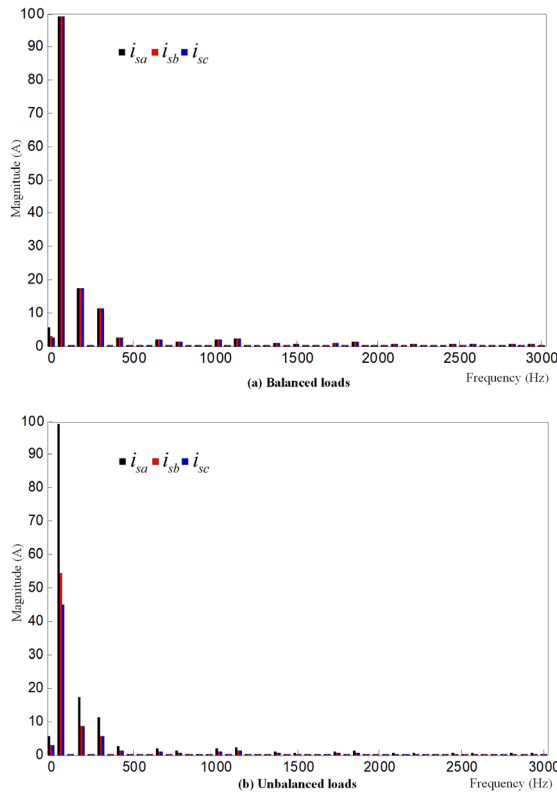


รูปที่ 6 ระบบทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี PQ ของวงจรรอกกำลังอิเล็กทรอนิกส์ในระบบรางไฟฟ้า



รูปที่ 7 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังอิเล็กทรอนิกส์

ชาคริต ปานแป้น และคณะ, “การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับจ่ายรถไฟฟ้า.”



รูปที่ 8 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยในกรณีการจ่ายโหลดแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล

ส่งผลให้ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0–0.1 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยมีค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าเกินกรอบของมาตรฐาน IEEE Standard 519-2014 ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงสเปกตรัมของกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ก่อนการชดเชยในกรณีการจ่ายโหลดแบบสมดุลและแบบไม่สมดุลดังรูปที่ 8

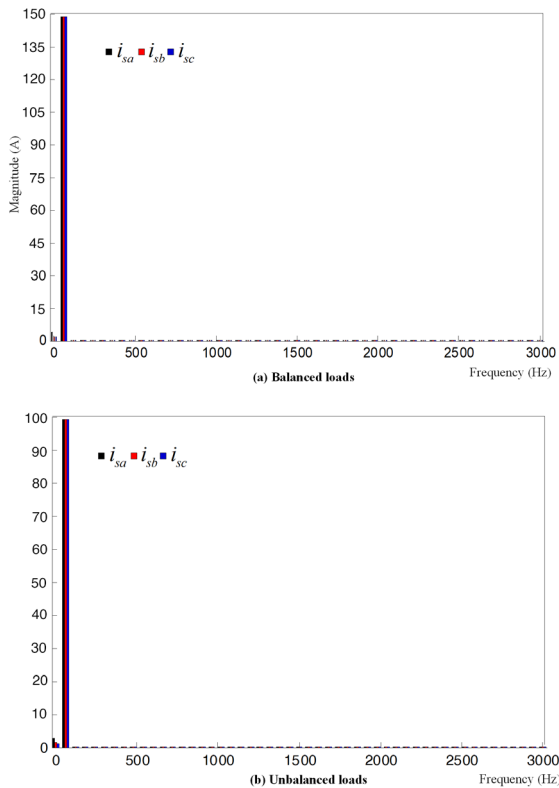
เมื่อพิจารณาภายหลังการฉีดกระแสชดเชยที่เวลา 0.1 วินาที เป็นต้นไป พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทิฟทำการฉีดกระแส i_{cm} และ i_{ct} เข้าสู่ระบบที่จุด PCC ทำให้รูปสัญญาณกระแสที่จุด PCC (i_{sm} , i_{st}) กลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ เป็นผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าอยู่ภายใต้

กรอบของมาตรฐาน IEEE Standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 3 และที่เวลา 0.4 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดตรงไฟความเร็วสูงแบบทันทีทันใดจากโหลดสมดุลเป็นโหลดไม่สมดุล โดยมีการจ่ายโหลดตรงไฟความเร็วสูงเฉพาะเฟส m ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Lm} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ และรูปสัญญาณกระแส i_{Li} มีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ก่อนการชดเชยรูปสัญญาณกระแส i_{Lm} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ และรูปสัญญาณกระแส i_{Li} มีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ก่อนการชดเชยรูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์และไม่สมดุล และเมื่อพิจารณาภายหลังการชดเชย สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ มีขนาดสมดุล และมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} กลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และสมดุล โดยมีค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE Standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงสเปกตรัมของกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ภายหลังการชดเชยในกรณีการจ่ายโหลดแบบสมดุลและแบบไม่สมดุลดังรูปที่ 9

ตารางที่ 3 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า

สถานะ กระแสโหลด	%THDi			%CUF	PF
	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
ก่อนการชดเชย					
สมดุล	21.46	21.46	21.46	0.00	0.97
ไม่สมดุล	21.46	19.62	23.67	99.25	0.67
ภายหลังการชดเชย					
สมดุล	0.51	0.49	0.49	0.00	1.00
ไม่สมดุล	1.02	0.94	0.99	0.73	0.99

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดตรงไฟความเร็วสูงแบบทันทีทันใดสามารถยืนยันได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งที่น่าเสนอมีผลตอบสนองในช่วงพลวัตที่รวดเร็ว เนื่องจากการคำนวณมีความซับซ้อนน้อย



รูปที่ 9 สเปกตรัมของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย
ในกรณีการจ่ายโหลดแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล

ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณและการประมวลผลบนบอร์ด eZdspTM F28335 ทำได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งให้ผลการคำนวณกระแสอ้างอิงที่ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งพิจารณาได้จากสมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

4. อภิปรายผลและสรุป

จากงานวิจัยก่อนหน้า [18], [19] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัส ตามลำดับ ในระบบรางไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดแบบสมดุล โดยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสที่นำเสนอมีการคำนวณทั้งหมด 4 ขั้นตอน และจะต้องมีการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเติมอีกด้วย ส่วนวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัสมีการคำนวณทั้งหมด 5 ขั้นตอน และมีการ

ตรวจวัดมุมของระบบเพิ่มเติม อีกทั้งวิธีการดังกล่าว ไม่มีการพิจารณาการปรับปรุงกระแสที่แหล่งจ่ายให้กลับมามีลักษณะสมดุล การเพิ่มขึ้นของกระบวนกรคำนวณจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่เพิ่มขึ้น และการตรวจวัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ใช้ทรัพยากรในการสร้างระบบฮาร์ดแวร์ที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้น ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้นำเสนอในบทความนี้ จึงให้สมรรถนะที่ดีกว่าในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า เนื่องจากสามารถกำจัดกระแสฮาร์โมนิก ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายให้กลับมามีลักษณะสมดุล โดยมีดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Standard 519-2014

ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอ็กทิฟ โดยเป็นวิธีที่มีสมรรถนะดีวิธีการหนึ่ง และวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้กับระบบรางไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบสมดุลและไม่สมดุล โดยพิจารณาได้จากผลตอบสนองที่รวดเร็วในช่วงพลวัตของการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด และพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าภายหลังการชดเชย ประกอบด้วย %THD, %CUF และ PF มีค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE Standard 519-2014 โดยทำการทดสอบภายใต้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป แต่อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวจะมีสมรรถนะที่ดีภายใต้ระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ และไม่มีปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกปะปน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวที่ได้นำเสนอจะได้รับการพัฒนาและนำไปทดสอบกับองค์ประกอบส่วนอื่นๆ ของวงจรกรองกำลังแอ็กทิฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Weijun, W. Qinghao, L. Jingzhong, L. Chenyang, L. Zhitong, W. Yi, and Z. Xiangqun, "Research on transmission line power losses effected by harmonics," in *Proceedings 2016 China*



- International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Xian, China, Aug. 2016.
- [2] W. Song, J. Fang, Z. Jiang, M. Staines, and R. Badcock, "AC loss effect of high-order harmonic currents in a single-phase 6.5 MVA HTS traction transformer," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 5, 2019, Art. no. 5501405.
- [3] F. Foley, "The impact of electrification on railway signalling systems," in *Proceedings 5th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure & Systems (REIS)*, 2011, pp. 146–153.
- [4] H. Zhengyou, Z. Zheng, and H. Haitao, "Power quality in high-speed railway systems," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 4, no. 2, pp. 71–97, 2016.
- [5] L. Guo, X. Gao, Q. Li, W. Huang, and Z. Shu, "Online Antiicing technique for the catenary of the high-speed electric railway," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1569–1576, 2015.
- [6] Y. Song, Z. Liu, A. Rønquist, P. Nåvik, and Z. Liu, "Contact wire irregularity Stochastics and effect on high-speed railway pantograph–catenary interactions," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 10, pp. 8196–8206, 2020.
- [7] C. Charalambous, A. Demetriou, A. Lazari, and A. Nikolaidis, "Effects of electromagnetic interference on underground pipelines caused by the operation of high voltage AC traction systems: The impact of harmonics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 2664–2672, 2018.
- [8] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519–1992, 1993.
- [9] Z. Shu, Sh. Xie, and Q. Li, "Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 653–661, 2011.
- [10] 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," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 10, pp. 2844–2856, 2011.
- [11] S. Gazafardi, A. Langerudy, E. Fuch, and K. Al-Haddad, "Power quality issues in railway electrification: A comprehensive perspective," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3081–3090, 2015.
- [12] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," in *Proceeding International Conference on Power Electronics*, 1983, pp. 483–490.
- [13] C. Chen, C. Lin, and C. Huang, "Reactive and harmonic current compensation for unbalanced three-phase systems using the synchronous detection method," *Electric Power Systems Research*, vol. 26, no. 3, pp. 163–170, 1993.
- [14] M. Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto, and T. Aritsuka, "Harmonic current and reactive power compensation with an active filter," presented at the PESC '88 Record., 19th Annual IEEE Power



- Electronics Specialists Conference, Kyoto, Japan, Apr. 1988.
- [15] S-R. Huang and B-N. Chen, "Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 495-499, 2002.
- [16] C. Shi-Lin, R. Li, and H. Pao-Hsiang, "Traction system unbalance problem analysis methodologies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1877-1883, 2004.
- [17] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519, 2014.
- [18] C. Panpean, K-L Areerak, P. Santiprapan, K-N Areerak, and S. S. Yeoh, "Harmonic mitigation in electric railway systems using improved model predictive control," *Energies*, vol. 14, no. 7, 2021.
- [19] T. Trongjai, T. Narongrit, and K-L Areerak, "The comparison of shunt active power filter structure for the harmonic elimination in AC-electric railway systems," *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 38-51, 2018 (in Thai).