

การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

The Reference Current Calculation with Instantaneous Power Theory for Power Quality Improvement in Electric Railway Systems

ชาคริต ปานแป้น กองพล อารีรักษ์* และ กองพัน อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี kongpol@sut.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าโดยใช้การคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าเพื่อยืนยันการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้ นำเสนออาศัยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างบอร์ด eZdsp™ F28335 และ โปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าที่ได้ นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีในการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดสมรรถนะคุณภาพไฟฟ้า (%THD_i, %CUF และ PF) ภายหลังจากชดเชยมีค่าอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE std. 519-2014

คำสำคัญ: การคำนวณกระแสอ้างอิง ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ฮาร์ดแวร์ในรูป การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า ระบบรางไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the power quality improvement in electric railway systems using the instantaneous power theory (PQ) for calculating reference currents of active power filters (APF). The hardware in the loop (HIL) technique is applied to confirm the performance of proposed reference current calculation. The eZdsp™ F28335 board cooperates with the MATLAB/Simulink program for HIL simulation. The testing results indicated that the reference current calculation with the PQ theory for power quality improvement in electric railway systems can provide an excellent performance calculating reference currents of APF. Moreover, the performance index (%THD_i, %CUF and PF) after compensation can follow within the IEEE std.519-2014.

Keywords: Reference current calculation, Instantaneous power theory, Hardware in the loop, Power quality improvement, Electric railway systems

1. บทนำ

การขนส่งทางระบบรางสามารถขนส่งผู้โดยสารและสินค้าได้เป็นจำนวนมากภายในระยะเวลาอันสั้น ถือเป็นระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ อีกทั้งประเทศไทยมีแผนที่จะดำเนินการสร้างระบบขนส่งทางรางให้ครอบคลุมทั่วประเทศ ซึ่งการสร้างระบบขนส่งทางรางส่วนหนึ่งเป็นระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านระบบรางไฟฟ้าด้วยงานวิจัยจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ระบบรางไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า การใช้งานรถไฟไฟฟ้าส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าขึ้นในระบบรางไฟฟ้า ประกอบด้วย กระแสฮาร์มอนิก โหลดไม่สมดุล และค่าตัวประกอบกำลังต่ำ เป็นต้น [1] ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อระบบรางไฟฟ้าหลายประการ [2 - 3] ดังนั้นประเด็นสำคัญสำหรับการศึกษา คือการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยในบทความนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสกรณีโหลดไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (APF) สมรรถนะการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบด้วย การคำนวณกระแสอ้างอิง โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ในบทความนี้ให้ความสำคัญในการพิจารณาการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งมีหลากหลายวิธี แต่ละวิธีมีการคำนวณกระแสอ้างอิงที่แตกต่างกัน [4-6] ในบทความนี้ได้นำวิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (PQ) มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมี

The manuscript received July 12, 2020; revised November 1, 2020; accepted December 21, 2020; available online August 31, 2021.

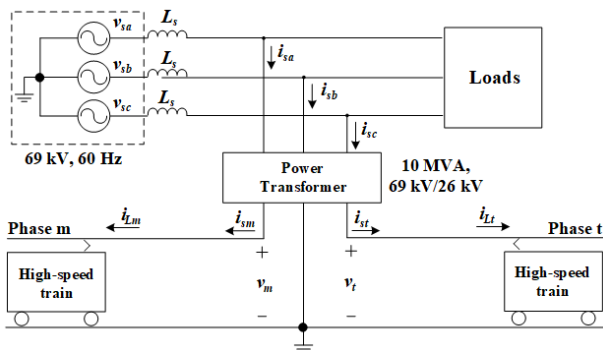
*Corresponding author: รองศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์, กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา (E-mail: kongpol@sut.ac.th)

สมรรถนะที่ดี และมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนในการคำนวณกระแสอ้างอิง [7]

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ ประกอบด้วย ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2 ในหัวข้อที่ 3 นำเสนอขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิง สำหรับหัวข้อที่ 4 เป็นการนำเสนอการทดสอบด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป (HLL) ผลการทดสอบ รวมทั้งการอภิปรายผลที่เกิดขึ้น ในส่วนของหัวข้อที่ 5 ได้นำเสนอการสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และกิตติกรรมประกาศสำหรับขอบคุณผู้สนับสนุนงานวิจัย ได้นำเสนอไว้เป็นหัวข้อสุดท้าย

2. ระบบรางไฟฟ้า

ระบบรางไฟฟ้าที่มีระยะทางการเดินรถมากที่สุดในโลก คือ ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยมีสัดส่วนถึง 38 เปอร์เซ็นต์ของโครงสร้างระบบรางไฟฟ้าทั้งหมด [8] มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 25 - 27.5 กิโลโวลต์ และมีความถี่ 50 - 60 เฮิร์ตซ์ ตามระบบการผลิตไฟฟ้าของแต่ละประเทศ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายังกล่าวมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ส่งผลให้สถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามียุติการจ่ายไฟฟ้าได้ไกล ซึ่งเหมาะกับการไฟฟ้าที่มีระยะการเดินรถระยะทางไกล ระบบดังกล่าวจึงนิยมใช้งานกับรถไฟความเร็วสูง โดยระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ประกอบด้วย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งสังเกตได้ว่า สถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟรับแรงดันไฟฟ้าสามเฟส ทิศัก 69 กิโลโวลต์ 60 เฮิร์ตซ์ จากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อผ่านหม้อแปลงกำลังเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 69 กิโลโวลต์ เป็น 26 กิโลโวลต์ และแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม (เฟส m และ เฟส t) โดยมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ทำการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนื่อศีรษะผ่านแหวนรับไฟ (pantograph) เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟ โดยพิจารณาคูณลักษณะของโหลดรถไฟเป็นองค์ประกอบกระแสมูลฐาน และองค์ประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจริงของรถไฟความเร็วสูง [9]



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า

3. การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

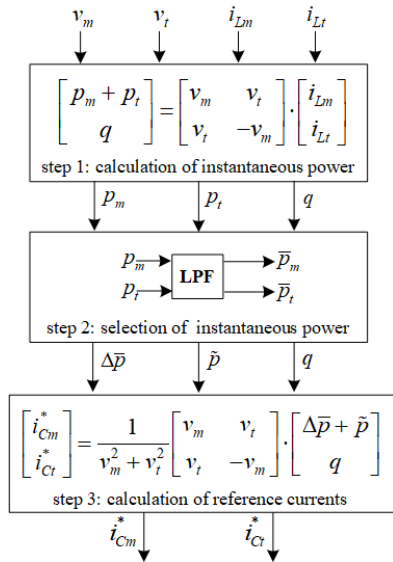
การคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า เนื่องจากการคำนวณดังกล่าวเป็นการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังนั้น ในบทความนี้จึงได้นำเสนอ การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ซึ่งทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Akagi และคณะ [10] การคำนวณกำลังไฟฟ้าด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง แบ่งกำลังไฟฟ้าออกเป็นสองส่วน คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (q) ที่เป็นการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าระหว่างเฟส โดยปราศจากการถ่ายโอนกำลังงาน ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (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 แรงดันไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า

i_α, i_β คือ กระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า

เมื่อพิจารณาระบบรางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า ระบบรางไฟฟ้ามีการแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งเปรียบเสมือนการแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนแอลฟาและเบต้า ดังนั้น จึงสามารถนิยามได้ว่า แรงดันและกระแสไฟฟ้าบนเฟส m มีค่าเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟา รวมทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าเฟส t มีค่าเท่ากับแรงดันและกระแสไฟฟ้าบนแกนเบต้า นอกจากนี้ การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าทำได้โดยการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วมทางด้านเฟสรวม ดังนั้น ขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (i_{Cm}^*, i_{Ct}^*) แสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง สามารถอธิบายได้ดังนี้



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

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

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

การแยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณตรงเฟส m และเฟส t (\bar{p}_m, \bar{p}_t) ออกจากค่า p_m และ p_t ตามลำดับ โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (low-pass filter : LPF) ดังรูปที่ 2 ในส่วนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไม่ได้ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการชดเชยตามวัตถุประสงค์

ขั้นที่ 3 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (i_{Cm}^*, i_{Ct}^*) แสดงได้ผังสมการในบล็อก “calculation of reference currents”

รูปที่ 2 แผนภาพโอะแกรมการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง
ขั้นที่ 1 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ดังสมการในบล็อก “calculation of instantaneous power” ซึ่งประกอบด้วย ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟของเฟส m และเฟส t (p_m, p_t) และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบ (q) แสดงได้ผังสมการที่ (2)

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

ขั้นที่ 2 เลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชย เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยการเลือกค่ากำลังไฟฟ้าดังกล่าวขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์การชดเชย

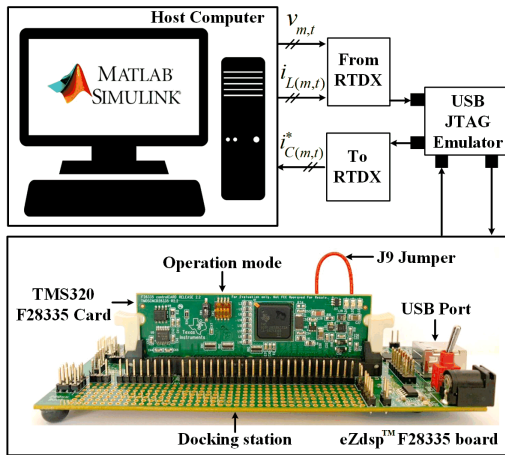
กรณี	วัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชย
1	กำจัดกระแสฮาร์มอนิก	\tilde{p} และ \tilde{q}
2	ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	\bar{q}
3	ชดเชยกระแสกรณีโหลดไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล	$\Delta \bar{p}$

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และชดเชยกระแสกรณี โหลดไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชยตามวัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณสลับ (\tilde{p}) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (\tilde{q}) และผลต่างของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณตรง ($\Delta \bar{p}$) การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชยแสดงได้ผังสมการที่ (3) – (5) ตามลำดับ

4. การทดสอบและอภิปรายผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

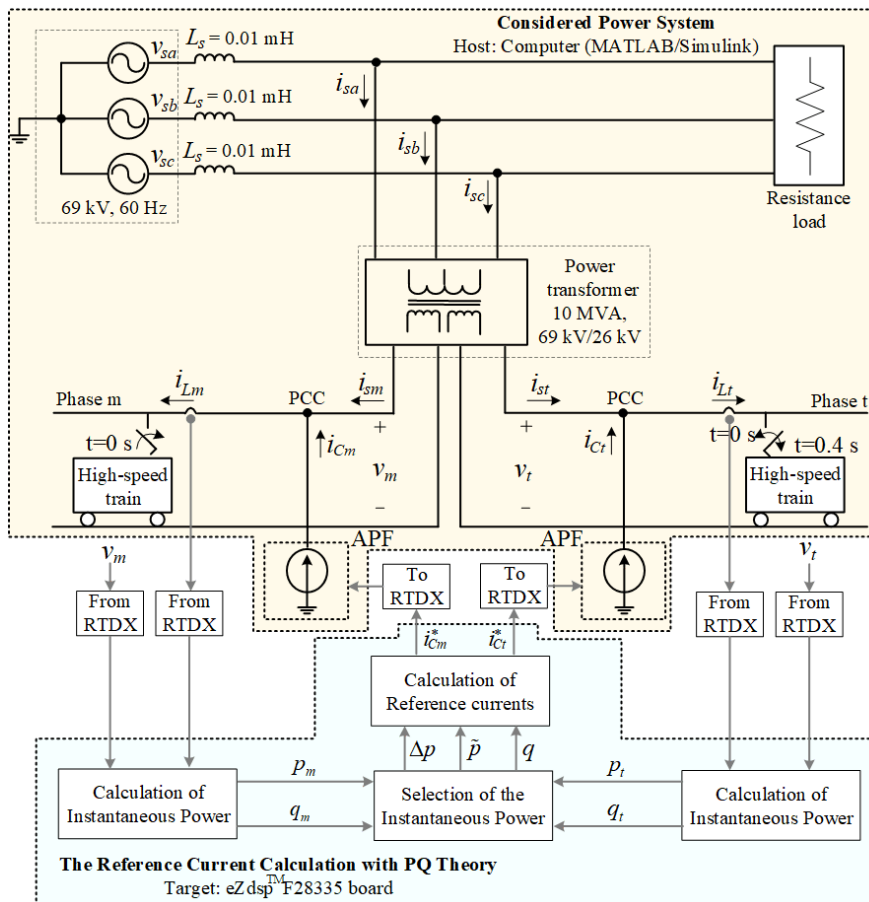
การทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้านี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป เพื่อยืนยันผลการศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบฮาร์ดแวร์ โดยกระบวนการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งถูกเขียนด้วยชุดคำสั่งภาษาซีผ่าน โปรแกรม CCStudio ลงบนบอร์ด eZdsp™ F28335 ส่วนระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ทำการจำลองขึ้นบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink มีการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และบอร์ด eZdsp™ F28335 ผ่านทางพอร์ต USB ด้วย JTAG (Joint Test Action Group) ซึ่งมีการรับส่งข้อมูลระหว่างกันผ่านบล็อก RTDX (Real-Time Data Exchange) แสดงได้ผังรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า การทำงานของเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า มีการส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าเฟส m (v_m) แรงดันไฟฟ้าเฟส t (v_t) กระแสโหลดเฟส m (i_{Lm}) และกระแสโหลดเฟส t (i_{Lt}) จาก โปรแกรม MATLAB/Simulink ให้กับบอร์ด eZdsp™ F28335 จากนั้น บอร์ด eZdsp™ F28335 จะทำการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งตามชุดคำสั่งภาษาซีที่ถูกโปรแกรมไว้บนบอร์ด eZdsp™ F28335 และทำการส่งข้อมูลกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (i_{Cm}^*, i_{Ct}^*) ให้กับ โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า



รูปที่ 3 แผนภาพไดอะแกรมการทดสอบด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

แบบเฟสร่วม ($v_{m,t}$) และยังทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าอีกด้วย โดยแรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสร่วมจะเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังรถไฟความเร็วสูง การใช้งานโพลครดไฟความเร็วสูงดังกล่าวก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าด้านสามเฟส ($i_{s(a,b,c)}$) ในบทความนี้มุ่งเน้นการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง โดยไม่พิจารณาผลกระทบจากปัจจัยอื่น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติเป็นโครงสร้างของวงจรองกำลังแอกทิฟเพื่อทำหน้าที่ลดกระแสชดเชยให้กับระบบอย่างสมบูรณ์ ทำให้ค่า i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) ตามลำดับ

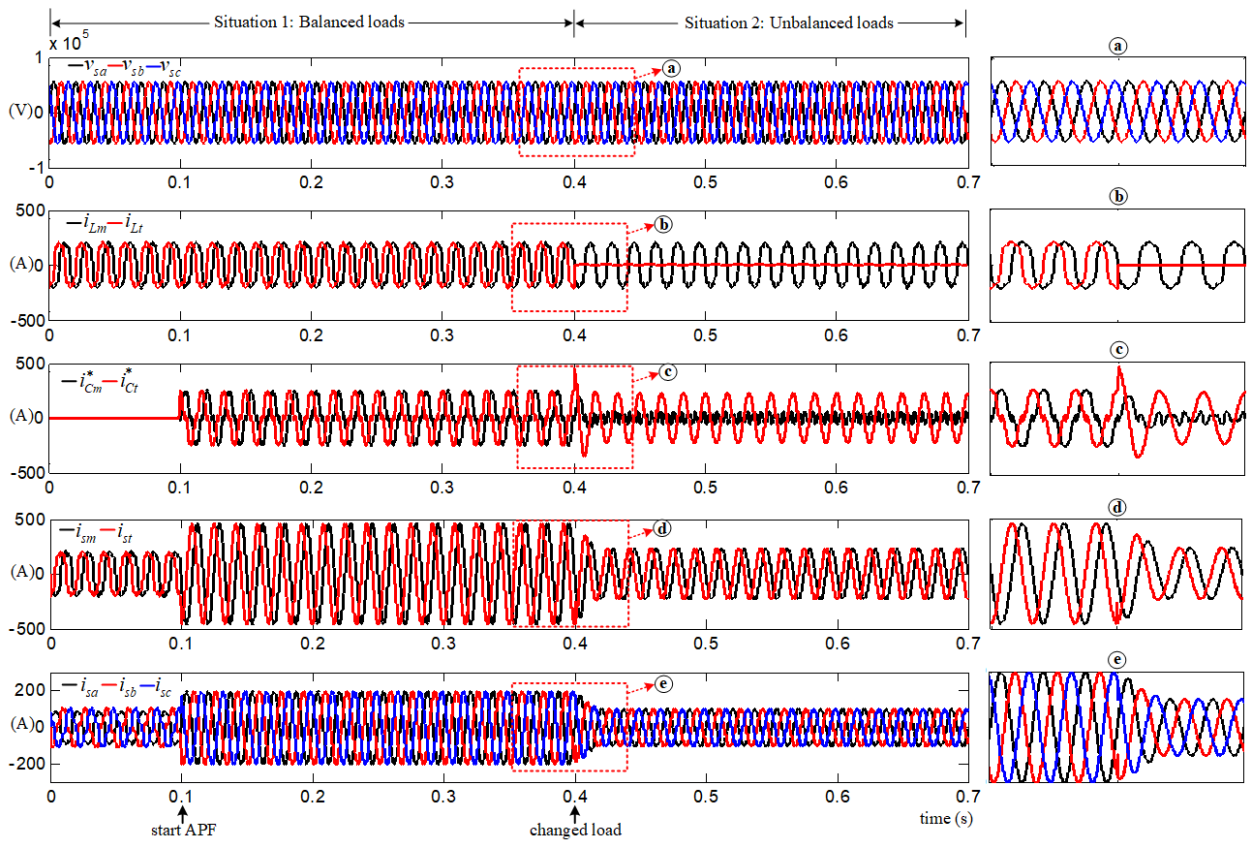
4.2 อภิปรายผลการทดสอบ



รูปที่ 4 โครงสร้างการทดสอบด้วยเทคนิค HIL บนบอร์ด eZdsp™ F28335 และ โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับระบบที่พิจารณา

โครงสร้างของระบบที่พิจารณาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากการไฟฟ้า ($v_{s(a,b,c)}$) ต่อกับตัวเหนี่ยวนำทางด้านแหล่งจ่าย (L_s) จากนั้นส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟที่มีหม้อแปลงกำลังทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบแรงไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรองกำลังแอกทิฟ ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป จะพิจารณาการจ่ายโพลครดไฟความเร็วสูงแบ่งออกเป็น 2 สถานการณ์คือ ช่วงเวลา 0 - 0.4 วินาที มีการจ่ายโพลครดแบบสมดุล และช่วงเวลา



รูปที่ 5 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

0.4 – 0.7 วินาที มีการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุล โดยกำหนดให้เริ่มฉีดกระแสชดเชย i_{Cm} และ i_{Ct} เข้าสู่จุดต่อร่วม (PCC) ที่เวลา 0.1 วินาที ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งสังเกตได้ว่า รูปสัญญาณ $v_{s(a,b,c)}$ มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ส่วนรูปสัญญาณกระแสโหลดครดไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้า ($i_{L(m,t)}$) มีรูปสัญญาณผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ส่งผลให้ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 - 0.1 วินาที รูปสัญญาณ $i_{s(a,b,c)}$ มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย ภายหลังจากการชดเชยที่เวลา 0.1 วินาที วงจรกรองกำลังแอกทีฟทำการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} เข้าสู่ระบบที่จุด PCC ทำให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่จุด PCC ($i_{s(m,t)}$) มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ เป็นผลให้รูปสัญญาณ $i_{s(a,b,c)}$ มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย และที่เวลา 0.4 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดครดไฟความเร็วสูงแบบทันทีทันใดจากโหลดสมดุลเป็นโหลดไม่สมดุล โดยมีการจ่ายโหลดครดไฟความเร็วสูงเฉพาะเฟส m ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{Lm} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ และรูปสัญญาณ i_{Lt} มีค่าเท่ากับศูนย์ ก่อนการชดเชย รูปสัญญาณ $i_{s(a,b,c)}$ มีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์และไม่สมดุล ภายหลังจากการชดเชยที่เวลา 0.4 วินาที ปรากฏว่า รูปสัญญาณ $i_{s(m,t)}$ มีลักษณะ

ใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และสมดุล ส่งผลให้รูปสัญญาณ $i_{s(a,b,c)}$ กลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และสมดุล จากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดครดไฟความเร็วสูงแบบทันทีทันใด สามารถยืนยันได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งที่น่าเสนอมีผลตอบสนองในช่วงพลวัตที่รวดเร็ว เนื่องจากการคำนวณมีความซับซ้อนน้อย ทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณและการประมวลผลไม่มากนัก นอกจากนี้ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย $\%THD_i$, $\%CUF$ และ PF ทั้งสองสถานการณ์แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า

สถานะของกระแสโหลด	ก่อนการชดเชย			ภายหลังการชดเชย		
	$\%THD_i$	$\%CUF$	PF	$\%THD_i$	$\%CUF$	PF
สมดุล	22.16%	0.00%	0.97	0.49%	0.00%	1.00
ไม่สมดุล	22.48%	96.16%	0.71	0.95%	0.73%	0.99

5. สรุป

ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยเป็นวิธีที่มีสมรรถนะดีวิธีการหนึ่ง ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ดีกับระบบรางไฟฟ้าที่มีการจ่าย

โหลดรถไฟแบบสมดุลและไม่สมดุล โดยพิจารณาได้จากผลตอบสนองที่รวดเร็วในช่วงพลวัตของการเปลี่ยนแปลงโหลด และพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าภายหลังการชดเชย ประกอบด้วย $\%THD_1$, $\%CUF$ และ PF มีค่าอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE std.519-2014 โดยทำการทดสอบภายใต้เทคนิคฮาร์ตแวร์ในรูป โดยกระบวนการดังกล่าวที่ได้นำเสนอจะได้รับการพัฒนาและนำไปทดสอบกับองค์ประกอบส่วนอื่น ๆ ของวงจรรองกำลังแอคทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เลขที่ PHD/0019/2560

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Gazafrudi, A. Langerudy, E. Fuchs, and K. Al-Haddad, "Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3081-3090, 2015.
- [2] S. Midya, D. Bormann, T. Schutte, and R. Thottappillil, "DC Component From Pantograph Arcing in AC Traction System Influencing Parameters, Impact, and Mitigation Techniques," *IEEE Trans. Electro. Com.*, vol. 53, no. 1, pp. 18-27, 2011.
- [3] 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 Trans. App. Super.*, vol. 29, no. 5, pp. 5501405, 2019.
- [4] C. Chen, C. Lin, and C. Huang, "An active filter for unbalanced three-phase system using synchronous detection method," in *Prof PESC'94. Conf.*, 1994.
- [5] S. Sujitjorn, K.-L. Areerak, and T. Kulworawanichpong, "The DQ Axis with Fourier (DQF) Method for Harmonic Identification," *IEEE Trans. Power. Del.*, vol. 21, no. 1, pp. 737 - 739, 2007.
- [6] C. Wu, A. Luo, J. Shen, F. Ma, and S. Peng, "A Negative Sequence Compensation Method Based on a Two-Phase Three-Wire Converter for a High-Speed Railway Traction Power Supply System," *IEEE Trans. Power. Electro.*, vol. 27, no. 2, pp. 706 - 717, 2012.
- [7] O. Abdelkhalik, and C. Benachaiba, "Sensitivity Assessment of PQ Theory and Synchronous Detection Identification Methods of Current Harmonics Under Non-Sinusoidal Condition for Shunt

Active Power Filter," *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 801-807, 2009.

- [8] นคร จันทสร (2554). ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [9] S.Huan, and B.-N. Chen, "Harmonic Study of the Le-Blanc Transformer for Taiwan Railway's Electrification System," *IEEE Trans. Power. Del.*, vol. 17, no. 2, pp. 495-499, 2002.
- [10] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," In *Proc. Int. Power Electronics Conference*, 1983, pp. 1375-1386.