



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีพีคิวเอฟร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

Harmonic detection using PQF with fundamental positive sequence voltage detector for co-phase AC electric railway systems

ธวิน อุดมกิจปัญญา ทศพร ณรงค์ฤทธิ์*

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Twin Udomkitpanya Tosaporn Narongrit*

Power Electronics, Energy, Machines and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: tosaporn@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4402

วันที่รับบทความ 6 ธันวาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 4 กรกฎาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ 16 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีพีคิวเอฟ (PQF) ร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (Fundamental Positive Sequence Voltage Detector : FPSVD) สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม วิธีการที่นำเสนอนี้ใช้สำหรับคำนวณหากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter : SAPF) ทั้งในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิก การทดสอบตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม จะประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit โดยผลการจำลองสถานการณ์ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องและยืดหยุ่นกว่าวิธี PQ แบบดั้งเดิม ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (percentage of total harmonic distortion : %THD) ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสซึ่งเป็นจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) มีค่าน้อยกว่า 0.42% ส่วนในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกพบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD มีสมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการใช้เพียงวิธี PQF ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีค่า %THD ภายหลังการชดเชยมีค่าน้อยกว่า 0.86% นอกจากนี้ค่า %THD ภายหลังการชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่ายมีค่าลดลงอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Standard 519-2014

คำสำคัญ

การตรวจจับฮาร์มอนิก การตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน ตัวควบคุมพีไอ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the harmonic detection using PQF in combination with the fundamental positive sequence voltage detector (Fundamental Positive Sequence Voltage Detector : FPSVD) for co-phase AC railway systems. The

proposed method is used to calculate the reference current for harmonic compensation of the shunt active power filter (Shunt Active Power Filter : SAPF), both in cases where the voltage source of the railway system is a pure sinusoidal waveform and in cases where the voltage source of the railway system is distorted due to harmonics. Harmonic detection tests in co-phase AC railway systems apply hardware in the loop simulation techniques using Simulink/MATLAB software with the TMS320C2000TM Experimenter Kit DSP board. The simulation results for the case where the voltage source of the railway systems is a pure sinusoidal waveform found that harmonic detection using the PQF method can calculate the reference current more accurately and flexibly than the conventional PQ method. As a result, the percentage of total harmonic distortion (%THD) after compensation at the three-phase power system, which is the Point of Common Coupling (PCC) is less than 0.42%. In cases where the voltage supply of the railway systems is distorted. It was found that harmonic detection by the PQF method combined with the FPSVD method has better performance than using only the PQF method, resulting in the shunt active power filter effectively removing harmonics in co-phase AC railway systems, and %THD after compensation at the PCC point is less than 0.86%. Moreover, the % THD after compensation of the source current decreases within the framework of IEEE Standard 519-2014.

Keywords

active power filter; fundamental positive sequence voltage detector; harmonic detection; PI controller; power quality improvement

1. คำนำ

ปัจจุบันมีการใช้งานระบบรางไฟฟ้าในระบบขนส่งเป็นจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นการขนส่งสินค้าหรือขนส่งมวลชนเนื่องจากเป็นระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพ และความปลอดภัยสูงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบขนส่งประเภทอื่น ๆ การขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการใช้งานโหลดที่สำคัญ คือ มอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วของรถไฟไฟฟ้า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการใช้งานโหลดอำนวยความสะดวกอื่น ๆ บนรถไฟไฟฟ้าอีกด้วย เช่น โหลดแสงสว่าง และโหลดเครื่องปรับอากาศ ซึ่งโหลดดังกล่าวมีพฤติกรรมการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิก ขึ้นในระบบรางไฟฟ้าและก่อให้เกิดผลเสียต่าง ๆ ตามมา เช่น การเกิดสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสาร ระบบอาณัติสัญญาณ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ [1] เกิดการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันและรีเลย์ ตัวเก็บประจุ และอุปกรณ์แสงสว่างมีอายุการใช้งานสั้นลง [2] การเกิดกำลังสูญเสียที่สายส่ง [3,4] เกิดกำลังสูญเสียและความร้อนขึ้นที่มอเตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า [5] นอกจากนี้ยังส่งผลเสียถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้าอีกด้วย [6] ดังนั้นการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างมาก ปัจจุบันมีวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยมใช้อยู่ 3 วิธี ได้แก่ การใช้วงจรกรองกำลังแบบพาสซีฟ (passive power

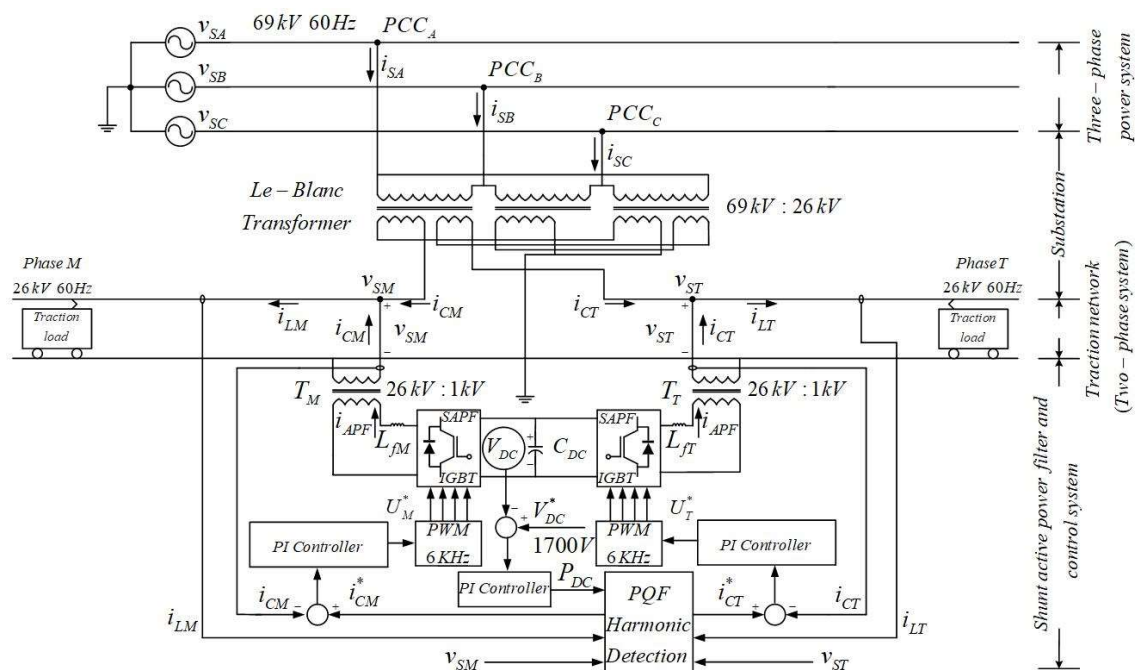
filter) [7] การใช้วงจรกรองกำลังแบบแอ็กทีฟ (active power filter) [8] และการใช้วงจรกรองกำลังแบบไฮบริด (hybrid power filter) [9] โดยในบทความนี้จะเลือกใช้วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter : SAPF) เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความยืดหยุ่นในการทำงานเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ และไม่ประสบปัญหาการเกิดเรโซแนนซ์แบบกรณีของวงจรกรองกำลังพาสซีฟ [10]

การตรวจจับฮาร์มอนิกเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF โดยมีหน้าที่ในการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจร SAPF โดยปกติแล้วการตรวจจับฮาร์มอนิกจะสามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องได้ก็ต่อเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ แต่ในกรณีที่ฮาร์มอนิกปะปนที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบจะส่งผลให้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกเกิดความผิดพลาดซึ่งส่งผลเสียต่อการกำจัดฮาร์มอนิกโดยตรง บทความนี้จะนำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีพีคิวเอฟ (PQF) สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีทฤษฎีกำลังรีแอ็กทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม [11] และนำเสนอการใช้วิธี PQF ร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน

(Fundamental Positive Sequence Voltage Detector : FPSVD) [12] เพื่อแก้ไขปัญหาการตรวจจับสนามอนิกผิดพลาดในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบบางมีฮาร์โมนิกปะปนโดยระบบบางไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในการทดสอบการตรวจจับสนามอนิก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม (co-phase power supply systems) ที่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสผ่านหม้อแปลงเลอร์บลองค์ (Le-Blanc transformer) และส่วนที่ 2 คือ วงจร SAPF และระบบควบคุม (control systems) โดยในบทความนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) [13,14] เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผลทั้งในระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงเนื่องจากตัวควบคุม

ดังกล่าวมีการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อนและให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีเพียงพอ

สำหรับการนำเสนอของบทความนี้ประกอบด้วย หัวข้อที่ 2 จะอธิบายขั้นตอนการคำนวณตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม หัวข้อที่ 3 จะอธิบายขั้นตอนการคำนวณตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม หัวข้อที่ 4 จะอธิบายขั้นตอนการคำนวณตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม หัวข้อที่ 5 จะอธิบายการออกแบบระบบควบคุมของวงจร SAPF หัวข้อที่ 6 จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบบางไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป หัวข้อที่ 7 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกและการอภิปรายผล หัวข้อที่ 8 คือ การสรุปผลของบทความ และในหัวข้อที่ 9 คือข้อเสนอแนะ



รูปที่ 1 ระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมที่พิจารณากำจัดฮาร์โมนิก

2. การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม เป็นการประยุกต์ใช้วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous Reactive Power

Theory) [15,16] ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของระบบบางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมพร้อมกันทั้งสองเฟส โดยมีขั้นตอนในการคำนวณทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แปลงแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_{SM}, v_{ST}) และกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ของ

ระบบรางไฟฟ้าเป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($v_{S\alpha}, v_{S\beta}$) และกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_{S\alpha} \\ v_{S\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{SM} \\ v_{ST} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{LM} \\ i_{LT} \end{bmatrix} \quad (2)$$

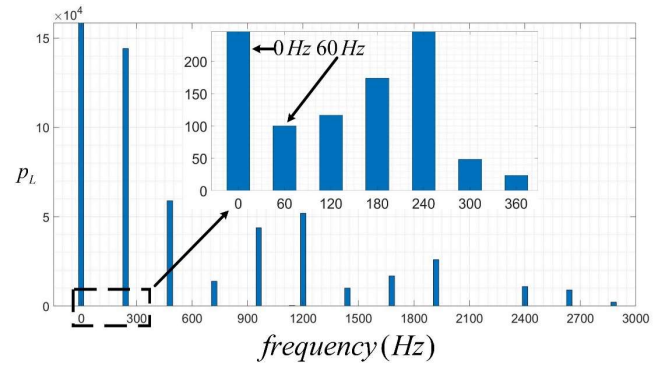
ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟและค่ากำลังรีแอกทีฟที่โหลด (p_L, q_L) โดยใช้สมการที่ (3)

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{SM} & v_{ST} \\ -v_{ST} & v_{SM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{LM} \\ i_{LT} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 3 แยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ($\tilde{p}_L$) ด้วยวงจรกรองแบบต่ำผ่าน (Low Pass Filter : LPF) ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อพิจารณากราฟสเปกตรัมของกำลังแอกทีฟที่โหลด (p_L) ดังรูปที่ 3 พบว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐานปรากฏ ($\bar{p}_L$) ที่ค่าความถี่ 0 Hz และค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิก ($\tilde{p}_L$) อันดับต่ำที่สุดปรากฏที่ค่าความถี่ 60 Hz ในบทความนี้จะเลือกใช้วงจรกรองอันดับ 2 ที่มีค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency) เท่ากับ 50 Hz ซึ่งอยู่ระหว่างความถี่ที่ปรากฏค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟมูลฐาน และกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกอันดับต่ำที่สุด



รูปที่ 2 การแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ด้วยวงจรกรองแบบต่ำผ่าน (LPF) [17]



รูปที่ 3 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการชดเชย ($\tilde{p}_C$) โดยใช้สมการที่ (4) และคำนวณค่ากระแสชดเชยบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{C\alpha}, i_{C\beta}$) โดยใช้สมการที่ (5)

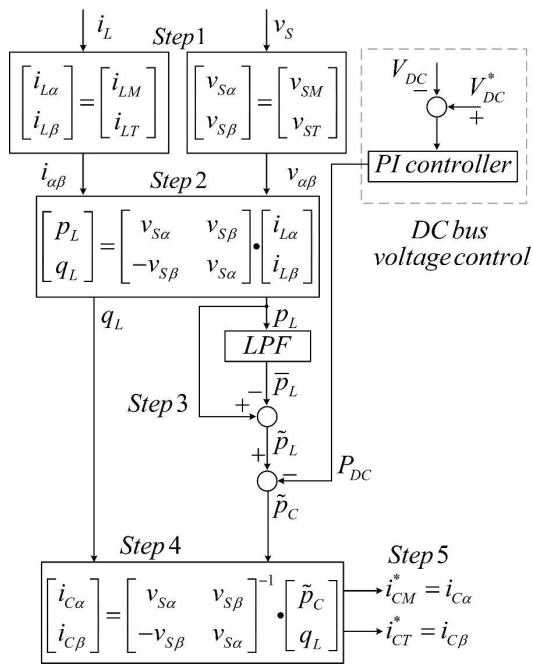
$$\tilde{p}_C = \tilde{p}_L - P_{DC} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{SM} & v_{ST} \\ -v_{ST} & v_{SM} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_C \\ q_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้กระแสอ้างอิงของเฟส M (i_{CM}^*) มีค่าเท่ากับ $i_{C\alpha}$ และกระแสอ้างอิงของเฟส T (i_{CT}^*) มีค่าเท่ากับ $i_{C\beta}$ ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$\begin{bmatrix} i_{CM}^* \\ i_{CT}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

จากขั้นตอนทั้งหมดในข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ได้ดังรูปที่ 4 โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้ากระแสตรง (P_{DC}) คือ ค่าเอาต์พุตที่ได้จากส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ของวงจร SAPF



รูปที่ 4 แผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQ

3. การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมนั้นมีขั้นตอนในการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกเช่นเดียวกันกับวิธี PQ ในหัวข้อที่ผ่านมาแต่ในขั้นตอนที่ 3 ของการแยกองค์ประกอบฮาร์โมนิกของ กำลังแอกทีฟ ($\bar{p}_L$) จะประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบ วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis : SWFA) [18] แทนการใช้วงจร LPF ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5

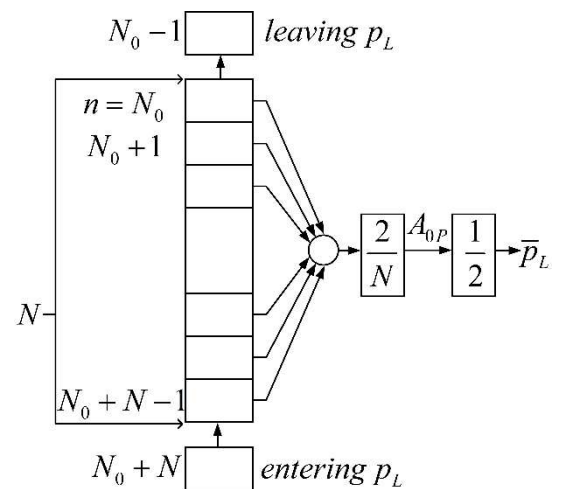


รูปที่ 5 การใช้วิธี SWFA แยกปริมาณฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟ [17]

ปริมาณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ องค์ประกอบกระแสตรง (DC component) และ องค์ประกอบกระแสสลับ (AC component) ดังแสดงในสมการที่ (7) โดยการใช้วิธี SWFA ในการแยกปริมาณฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟจะอาศัยการคำนวณค่าองค์ประกอบกระแสตรงซึ่งเป็นปริมาณมูลฐานของกำลัง

แอกทีฟ ($\bar{p}_L$) จากนั้นจะนำมาหักลบกับค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p_L) เพื่อให้ได้ค่า $\tilde{p}_L$ โดยกระบวนการในการคำนวณหา $\bar{p}_L$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6

$$p_L(kT_s) = \underbrace{\frac{A_{0p}}{2}}_{\text{DC Component}} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_{hp} \cos(h\omega kT_s) + B_{hp} \sin(h\omega kT_s)]}_{\text{AC Component}} \quad (7)$$



รูปที่ 6 การคำนวณค่า $\bar{p}_L$ [17]

จากรูปที่ 6 ในการคำนวณหา $\bar{p}_L$ จะเริ่มจากการเก็บข้อมูล p_L มา 1 คาบเวลา ซึ่งกำหนดให้มีจำนวน N ข้อมูล ($n = N_0 : N_0 + N - 1$) เพื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_{0p} โดยใช้สมการที่ (8) และนำค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมาคำนวณค่า $\bar{p}_L$ โดยใช้สมการที่ (9) จากนั้นนำค่า $\bar{p}_L$ ที่ได้หักลบออกจากค่า p_L เพื่อคำนวณค่า $\tilde{p}_L$ ดังสมการที่ (10)

สำหรับการคำนวณในรอบถัดไปจะทำการดึงค่า p_L ที่ตำแหน่ง $n = N_0$ ออกจากชุดข้อมูล N โดยจะกำหนดให้เป็นข้อมูลที่ตำแหน่ง $n = N_0 - 1$ ในขณะเดียวกันจะรับค่าข้อมูลค่าใหม่จาก p_L ที่ตำแหน่ง $n = N_0 + N$ มาเก็บไว้ในชุดข้อมูล N ซึ่งจะกลายเป็นข้อมูลที่ตำแหน่ง $n = N_0 + N - 1$ แทน จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ A_{0p} ค่าใหม่เพื่อใช้คำนวณค่า $\bar{p}_L$ และ $\tilde{p}_L$ ค่าใหม่สำหรับใช้คำนวณค่ากระแสอ้างอิง i_{CM}^* และ i_{CT}^* ในขั้นตอนที่ 4 และ 5 ตามวิธี PQ ต่อไป

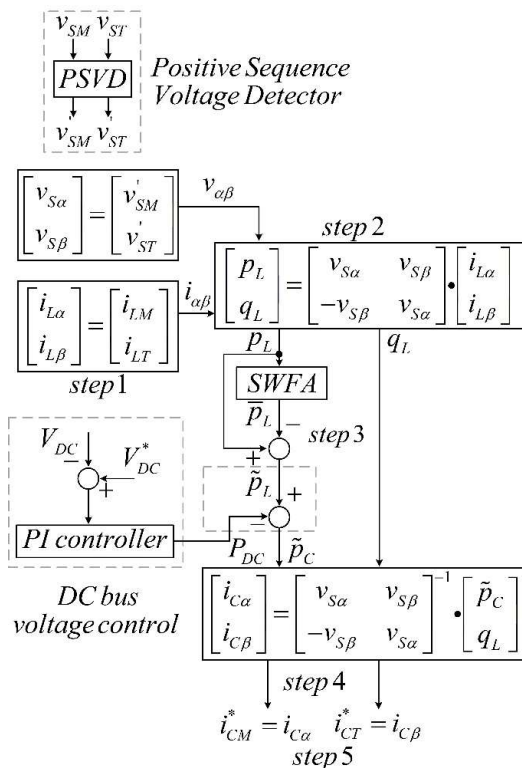
$$A_{0P} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_L(nT_s) \quad (8)$$

$$\bar{p}_L = \frac{A_{0P}}{2} \quad (9)$$

$$\tilde{p}_L = p_L - \bar{p}_L \quad (10)$$

4. การตรวจจับสนแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการตรวจจับสนแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน หรือ FPSVD ซึ่งวิธีดังกล่าวจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการคำนวณตรวจจับสนฮาร์มอนิกผิดพลาดในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังมีสัญญาณไม่เป็นรูปไซน์บริสุทธิ์เนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปน โดย FPSVD จะใช้ในการคำนวณตรวจจับสนแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของระบบรางไฟฟ้า (v'_{SM}, v'_{ST}) จากนั้นจะนำค่าแรงดันไฟฟ้างี้ไปใช้ในการคำนวณตรวจจับสนฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การคำนวณตรวจจับสนฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD

FPSVD มีขั้นตอนในการคำนวณตรวจจับสนแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_s) เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ (v_α, v_β) ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s(\theta_{v_s}) \\ v_s(\theta_{v_s} - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่ามุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า (θ_{v_s}) ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสด้วยวงจรเฟสล็อกกลูป (Phase Lock Loop : PLL) [19]

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่ากระแสบนแกน $\alpha\beta$ (i'_α, i'_β) โดยใช้สมการที่ (12)

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sin \theta_{v_s} \\ -\cos \theta_{v_s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสนับสนุน (auxiliary instantaneous power) (p', q') โดยใช้สมการที่ (13)

$$\begin{bmatrix} p' \\ q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha \cdot i'_\alpha + v_\beta \cdot i'_\beta \\ v_\beta \cdot i'_\alpha - v_\alpha \cdot i'_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

ขั้นตอนที่ 5 แยกองค์ประกอบมูลฐานของกำลังไฟฟ้าสนับสนุน ($\tilde{p}', \tilde{q}'$) ออกจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าสนับสนุน ($\tilde{p}', \tilde{q}'$) โดยใช้วงจร LPF

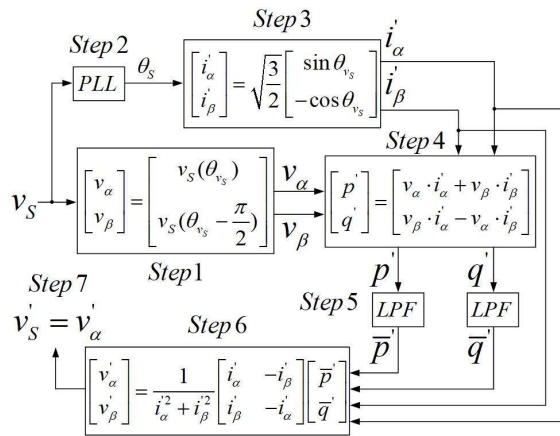
ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ (v'_α, v'_β) โดยใช้สมการที่ (14)

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha'^2 + i_\beta'^2} \begin{bmatrix} i'_\alpha & -i'_\beta \\ i'_\beta & -i'_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}' \\ \tilde{q}' \end{bmatrix} \quad (14)$$

ขั้นตอนที่ 7 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าลำดับเฟสบวกมูลฐานของระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v'_s) มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบนแกน α (v'_α) ดังแสดงในสมการที่ (15)

$$\begin{bmatrix} v'_s \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'_\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

จากขั้นตอนทั้งหมดในข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานได้ดังรูปที่ 8 โดยเป็นการอธิบายการคำนวณ v'_s สำหรับเฟสเดียวเท่านั้น ดังนั้นจะต้องใช้การคำนวณทั้งหมด 2 ชุด เพื่อคำนวณหา v'_s ของเฟส M และเฟส T ของระบบแรงไฟฟ้า (v'_{sM}, v'_{sT})



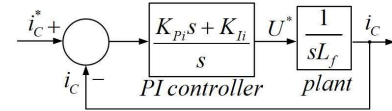
รูปที่ 8 แผนภาพการคำนวณ FPSVD

5. การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟแบบขนาน

5.1 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI controller) สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 9 โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจะใช้วิธีการประมาณ [20] โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (closed loop transfer function) ของบล็อกไดอะแกรมดังกล่าวแสดงในสมการที่ (16) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังแสดงในสมการที่ (17) จากการเปรียบเทียบ

สัมประสิทธิ์จะสามารถหาค่า K_{Pi} และ K_{fi} ของตัวควบคุมกระแสชดเชยได้ดังสมการที่ (18) และ (19) ตามลำดับ



รูปที่ 9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

$$\frac{i_C}{i_C^*} = \frac{\left(\frac{K_{Pi}s + K_{fi}}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{Pi}}{L_f} \right)s + \frac{K_{fi}}{L_f}} \quad (16)$$

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta s\omega_n + \omega_n^2} \quad (17)$$

$$K_{Pi} = 2\zeta_i\omega_{ni}L_f \quad (18)$$

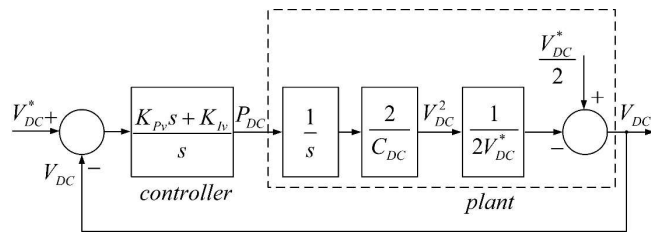
$$K_{fi} = \omega_{ni}^2L_f \quad (19)$$

โดยที่ ζ_i คือ อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) ของการควบคุมกระแสชดเชยโดยบทความนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.707 ส่วน ω_{ni} คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของการควบคุมกระแสชดเชยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $2\pi \times 3000$ rad/s (พิจารณาการจัดฮาร์โมนิกอันดับสูงสุดที่ 50 ซึ่งมีความถี่ 3000 Hz เนื่องจากฮาร์โมนิกตั้งแต่อันดับที่ 51 เป็นต้นไปจะถือว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) และไม่ถูกนำมาคำนวณค่า %THD) และ L_f คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำ ของวงจร SAPF กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.15 mH จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะสามารถคำนวณออกแบบค่า K_{Pi} และ K_{fi} ได้เท่ากับ 4 และ 53,300 ตามลำดับ [11]

5.2 การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 10 โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะใช้

วิธีการประมาณ [20] เช่นเดียวกันกับตัวควบคุมกระแสชดเชย โดยผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอน วงปิดของบล็อกไดอะแกรมดังสมการที่ (20) กับพจน์พหุนาม ลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (17) จะสามารถหาค่า K_{pv} และ K_{iv} ของตัว ควบคุมพีไอได้ดังสมการที่ (21) และ (22) ตามลำดับ



รูปที่ 10 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัว ควบคุมพีไอ

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{1}{2} \frac{s^2 + \frac{2K_{pv}s + 2K_{iv}}{C_{DC}V_{DC}^*}}{s^2 + \frac{K_{pv}s + K_{iv}}{C_{DC}V_{DC}^*}} \quad (20)$$

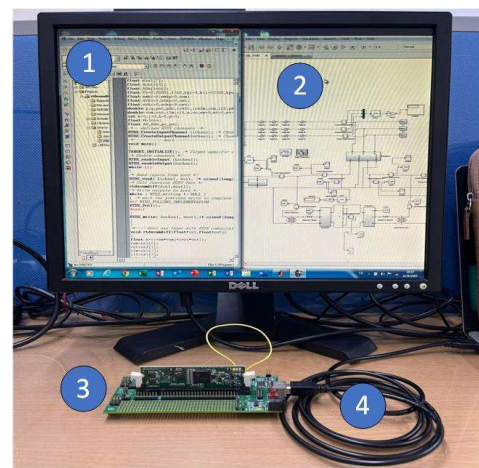
$$K_{pv} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_{DC} V_{DC}^* \quad (21)$$

$$K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_{DC} V_{DC}^* \quad (22)$$

โดยที่ ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วงของการควบคุมแรงดัน บัสไฟตรงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.707 ส่วน ω_{nv} คือ ค่าความถี่ ธรรมชาติ (Natural frequency) ของการควบคุมแรงดันบัส ไฟตรงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{4}{T_s \zeta}$ (กรณีพิจารณาให้ค่าความ ผิดพลาดในสถานะคงตัวมีค่าเท่ากับ $\pm 2\%$) [21] และ T_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.05 s สำหรับ C_{DC} คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจร SAPF กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 80 mF และ V_{DC} คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง โดยได้ออกแบบให้มีค่าเท่ากับ 1,700 V จากค่าพารามิเตอร์ ดังกล่าวสามารถคำนวณค่า K_{pv} และ K_{iv} ได้เท่ากับ 21,760 และ 1,741,325.88 ตามลำดับ [11]

6. การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิค ฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิค ฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in the loop : HIL) [22] ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ (Software) คือ โปรแกรม Simulink/ MATLAB และ ส่วนที่เป็น ฮาร์ดแวร์ (Hardware) คือ บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ซึ่งอาศัยการควบคุมผ่านโปรแกรม CCStudio V3.3 โดยทั้งสองส่วนจะเชื่อมต่อกันผ่านสาย USB JTAG emulator ดังแสดงในรูปที่ 11

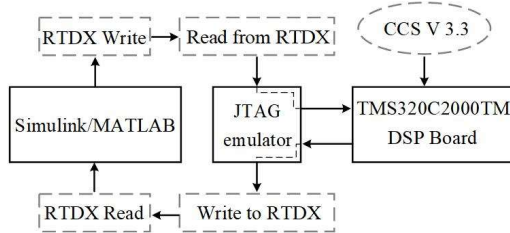


1. CCStudio v3.3 2. Simulink program
3. TMS320c2000™ Experimenter Kit
4. JTAG emulator

รูปที่ 11 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

แผนภาพกระบวนการทำงานของระบบจำลองสถานการณ์ ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 โดยเริ่ม จากบล็อก RTDX Write บนโปรแกรม Simulink จะทำการส่ง ข้อมูลอินพุตผ่านสาย USB JTAG emulator ไปยังบอร์ด DSP ในขณะที่เดียวกันบอร์ด DSP จะรับข้อมูลอินพุตด้วยคำสั่ง Read from RTDX ซึ่งมีการเขียนโค้ดคำสั่งด้วยโปรแกรม CCStudio V3.3 จากนั้นบอร์ด DSP จะคำนวณหรือประมวลผลตาม โปรแกรม และส่งข้อมูลเอาต์พุตด้วยคำสั่ง Write to RTDX ไป ยังโปรแกรม Simulink ผ่านสาย USB JTAG emulator ในขณะที่เดียวกันโปรแกรม Simulink จะรับข้อมูลเอาต์พุตด้วย บล็อก RTDX Read โดยกระบวนการทำงานในข้างต้นเป็น

กระบวนการทำงาน 1 รอบของช่วงเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) สำหรับการคำนวณในรอบต่อ ๆ ไปจะดำเนินการเช่นเดิมแต่ข้อมูลอินพุตจะเปลี่ยนไปตามเวลา ที่จำลองสถานการณ์



รูปที่ 12 แผนภาพกระบวนการทำงานของระบบจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

จากระบบในรูปที่ 1 ส่วนของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม และวงจร SAPF จะถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม Simulink/MATLAB โดยใช้บล็อกไฟฟ้ากำลัง (Simscape/Power System) ในขณะที่ส่วนของการคำนวณตรวจสอบฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ หรือวิธี PQF การคำนวณแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานด้วย FPSVD ระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะถูกโปรแกรมสร้างขึ้นที่บอร์ด DSP (สามารถดูสรุปค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานและระบบควบคุมได้ดังตาราง ที่ 1) ในส่วนของข้อมูลอินพุตที่ส่งให้กับบอร์ด DSP ประกอบไปด้วยค่ากระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_{SM}, v_{ST}) ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) และค่ากระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ในส่วนของข้อมูลเอาต์พุตจากบอร์ด DSP คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (U_M^*, U_T^*) โดยค่าแรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (triangular carrier) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในการควบคุมสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีที (IGBT) แบบอุดมคติของวงจร SAPF เพื่อฉีดกระแส

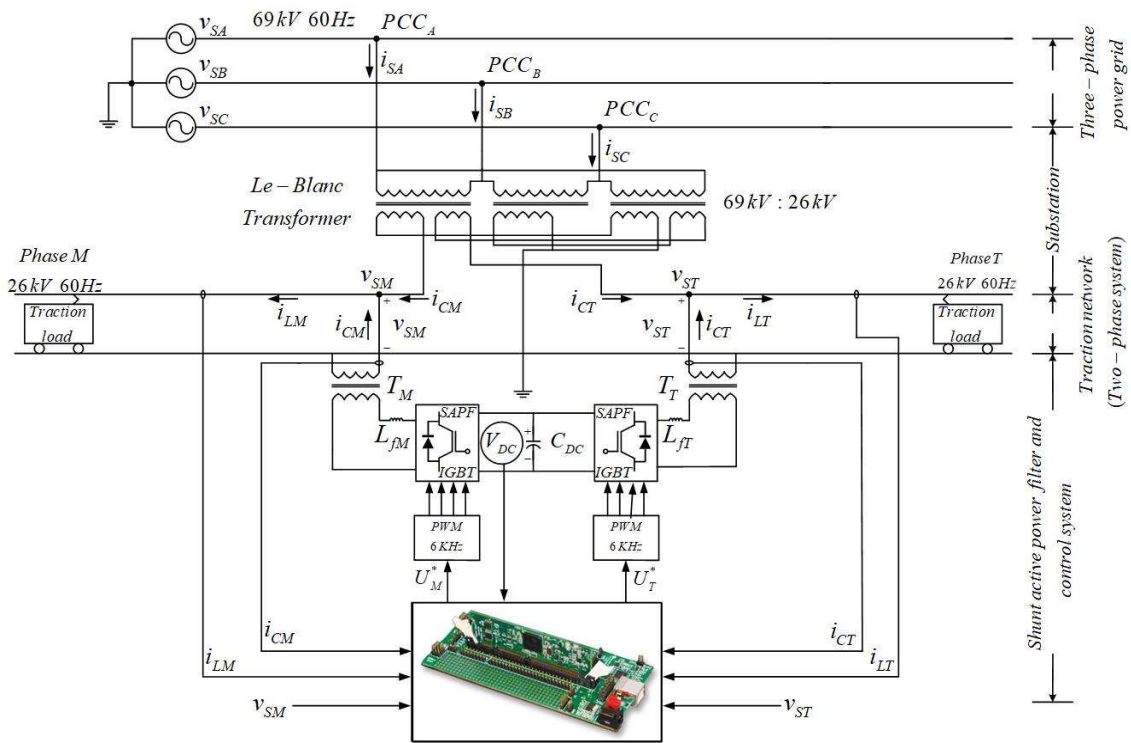
ชดเชยกำลังฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมบนโปรแกรม Simulink ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 13

ตารางที่ 1 สรุปค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง SAPF และระบบควบคุม

ส่วนที่พิจารณาออกแบบ	ค่าพารามิเตอร์
วงจร SAPF	$L_f = 0.15 \text{ mH}$ $C_{DC} = 80 \text{ mF}$ $V_{DC} = 1,700 \text{ V}$
ระบบควบคุมกระแสชดเชย (PI Controller)	$K_{Pi} = 4$ $K_{Ii} = 53,300$
ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (PI Controller)	$K_{Pv} = 21,760$ $K_{Iv} = 1,741,325.88$

7. ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

ระบบการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13 โดยจะใช้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิผลซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (23) การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางมีฮาร์มอนิกปะปน โดยในการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวจะพิจารณาแทนโหลดรถไฟ (traction load) ของระบบรางไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน [23]

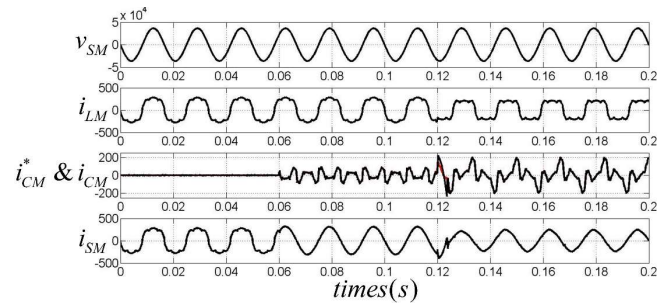


รูปที่ 13 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

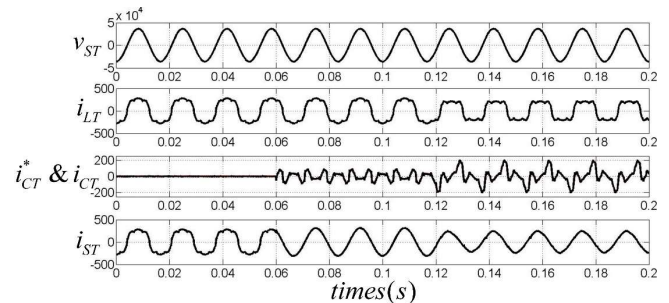
$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (23)$$

โดยที่ I_1 คือ ค่ากระแสที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz

I_h คือ ค่ากระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับ 2 ถึง 50



(ก) เฟส M

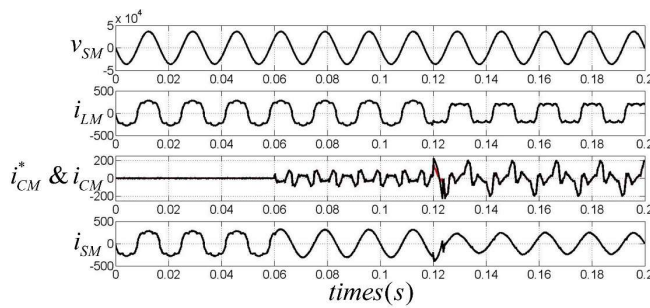


(ข) เฟส T

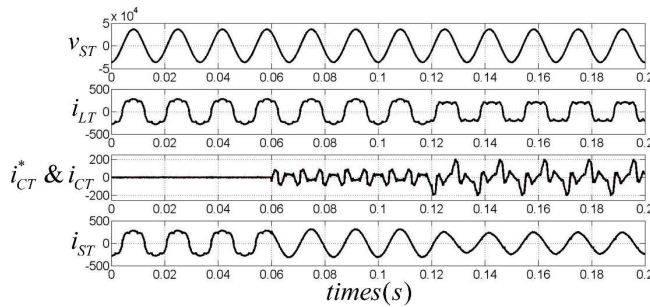
7.1 กรณีที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบแรงเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าดังรูปที่ 13 กรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบแรงเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์จะนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF โดยผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ใช้วิธี PQ ของเฟส M และเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ใช้วิธี PQF ของเฟส M และเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15 และสามารถดูสรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสและที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของระบบแรงได้ดังตารางที่ 2

รูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้วิธี PQ



(ก) เฟส M



(ข) เฟส T

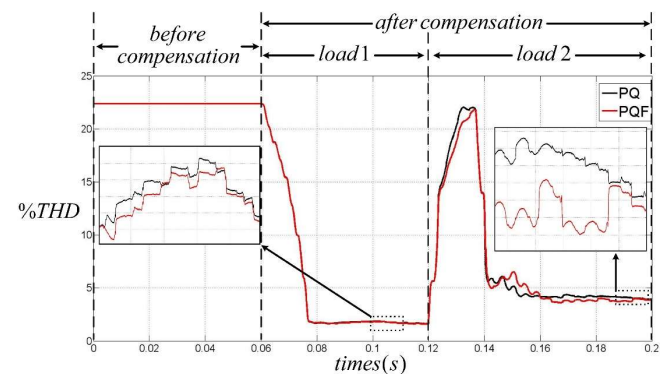
รูปที่ 15 ผลการจำลองสถานการณ์การนำวิธี PQF

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงดันไฟฟ้าของเฟส M และเฟส T ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของระบบแรงดันในเฟส M และเฟส T (v_{SM}, v_{ST}) มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และเมื่อพิจารณาตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.06 วินาที หรือช่วงก่อนการชดเชย สังเกตได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่ายของทั้งสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ทุกประการซึ่งสามารถวัดค่า %THD ของเฟส M และเฟส T ได้เท่ากับ 22.39% และ 22.40% ตามลำดับเฟส ต่อมาตั้งแต่เวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไปหรือช่วงภายหลังการชดเชยสังเกตได้ว่าวงจร SAPF ร่วมกับระบบควบคุมสามารถลดกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ที่มีลักษณะคล้ายตามกับกระแสอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ (รูปที่ 14) และวิธี PQF (รูปที่ 15) ส่งผลให้ i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้นและมีค่า %THD ลดลง โดยในช่วงเวลา 0.06 ถึง 0.12 วินาที หรือช่วงโหลดปกติ (load 1) กรณีใช้วิธี PQ วัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส M และเฟส T ได้ค่าเท่ากับ 1.62% เท่ากันทั้งสองเฟส ส่วนกรณีที่ใช้วิธี PQF วัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายได้ค่าเท่ากับ

1.60% และ 1.59% ตามลำดับเฟส ต่อจากนั้นในช่วงเวลา 0.12 วินาทีเป็นต้นไปกำหนดให้โหลดของระบบแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (load 2) พบว่า กรณีใช้วิธี PQ วัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายของเฟส M และเฟส T ได้เท่ากับ 4.27% และ 4.08% ตามลำดับเฟส ส่วนกรณีที่ใช้วิธี PQF วัดค่า %THD ได้เท่ากับ 3.70% และ 3.81% ตามลำดับเฟส

จากผลค่า %THD ดังตารางที่ 2 พบว่าในช่วงโหลดปกติค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายหลังการชดเชย กรณีที่ใช้วิธี PQ และกรณีที่ใช้วิธี PQF จะมีค่าใกล้เคียงกัน (1.62% และ 1.59% ตามลำดับ) สำหรับกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพบว่ากรณีที่ใช้วิธี PQF จะให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 3.75% ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่วิธี PQ ที่ให้ค่า %THD เท่ากับ 4.17% (มีค่าน้อยกว่า 0.42%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธี PQF มีสมรรถนะในการคำนวณตรวจจับที่ดีกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากวิธี SWFA มีความยืดหยุ่น และมีสมรรถนะในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่ดีกว่าวงจร LPF

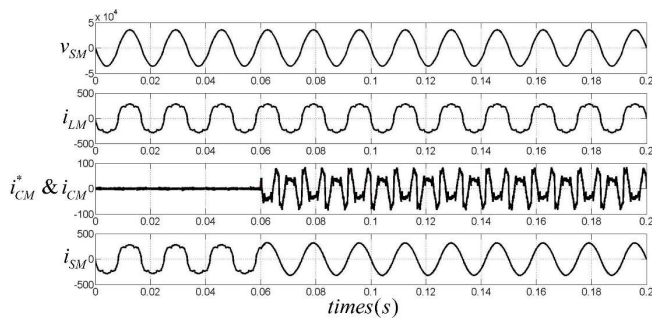
โดยผลการเปรียบเทียบค่า %THD เฉลี่ยที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสซึ่งเป็นจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) หลังการชดเชยที่ได้จากวิธี PQ และวิธี PQF ทุกช่วงเวลาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 16 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าวิธี PQF สามารถให้ผลค่า %THD หลังการชดเชยน้อยกว่าวิธี PQ แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง



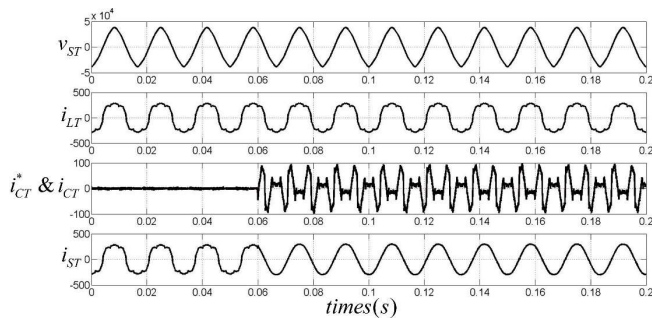
รูปที่ 16 ค่า %THD เฉลี่ยที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์

ตารางที่ 2 สรุปผลค่า %THD กรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์

วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก	%THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย						
	ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (i_{SM}, i_{ST})			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (i_{SA}, i_{SB}, i_{SC})			
	M	T	เฉลี่ย	A	B	C	เฉลี่ย
ก่อนการชดเชย							
-	22.39	22.40	22.40	22.38	22.38	22.37	22.38
หลังการชดเชยช่วงโหลดปกติ							
PQ	1.62	1.62	1.62	1.62	1.61	1.62	1.62
PQF	1.60	1.59	1.60	1.59	1.56	1.63	1.59
หลังการชดเชยช่วงโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง							
PQ	4.27	4.08	4.18	4.26	4.14	4.10	4.17
PQF	3.70	3.81	3.76	3.70	3.71	3.84	3.75



(ก) เฟส M



(ข) เฟส T

รูปที่ 17 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้วิธี PQF

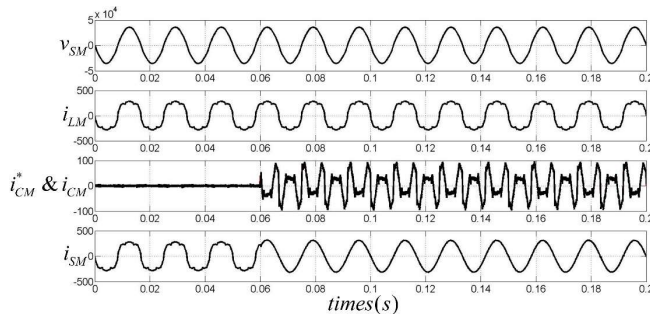
7.2 กรณีที่ 2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระบบรางมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิก

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าดังรูปที่ 13 กรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระบบรางมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกจะนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQF และวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD โดยผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ใช้วิธี

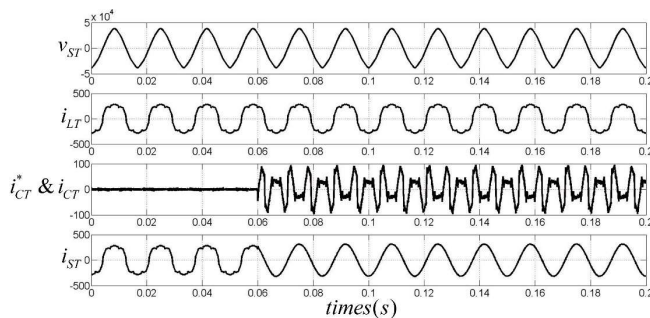
PQF ของเฟส M และเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 17 ส่วนผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ใช้วิธี PQF ร่วมกับ FPSVD ของเฟส M และเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 18 และสามารถดูสรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสและที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของระบบรางได้ดังตารางที่ 3

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของเฟส M และเฟส T ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18 จะสังเกตว่าแรงดันไฟฟ้าของเฟส M และเฟส T (v_{SM}, v_{ST}) มีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์เนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปนที่ค่า %THD เท่ากับ 3.20% โดยผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF และวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD มีลักษณะคล้ายกัน คือ ช่วงก่อนการชดเชยตั้งแต่วเวลา 0 ถึง 0.06 วินาที กระแสที่แหล่งจ่าย (i_{SM}, i_{ST}) ทั้งสองเฟสจะมีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ทุกประการซึ่งสามารถวัดค่า %THD ของเฟส M และเฟส T ได้เท่ากับ 22.34% และ 22.09% ตามลำดับเฟส ต่อมาตั้งแต่วเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจร SAPF ร่วมกับระบบควบคุมทำการฉีดกระแสชดเชยที่มีลักษณะคล้ายตามกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF (รูปที่ 17) และวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD (รูปที่ 18) ส่งผลให้ i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้นและมีค่า %THD ลดลงโดยกรณีที่ใช้วิธี PQF วัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายของเฟส M และ

เฟส T ได้ค่าเท่ากับ 2.48 % และ 2.58% ตามลำดับเฟส ส่วนกรณีที่ใช้วิธี PQF ร่วมกับ FPSVD วัดค่า %THD ได้เท่ากับ 1.74 % และ 1.59 % ตามลำดับเฟส



(ก) เฟส M



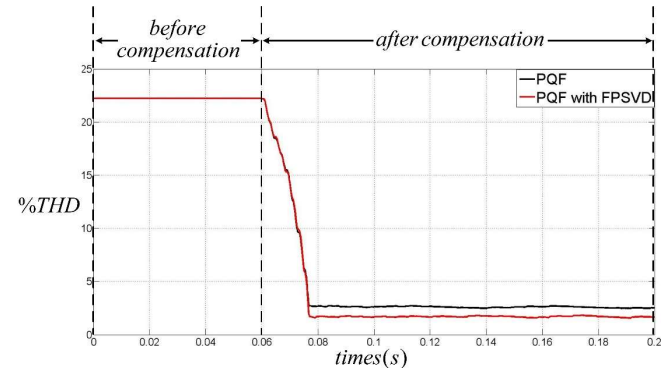
(ข) เฟส T

รูปที่ 18 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้วิธี PQF ร่วมกับ FPSVD

จากตารางที่ 3 พบว่าวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD สามารถให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 1.66% ซึ่งน้อยกว่าวิธี PQF ที่มีค่าเท่ากับ 2.52% (มีค่าน้อยกว่า 0.86%) จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้ FPSVD ร่วมในการคำนวณตรวจจับสนามอนิกกับวิธี PQF สามารถช่วยลดปัญหาการคำนวณตรวจจับสนามอนิกที่ผิดพลาดเนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปนที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางได้จึงส่งผลให้วงจร SAPF สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากรณีที่ใช้วิธี PQF เพียงอย่างเดียว

โดยผลการเปรียบเทียบค่า %THD เฉลี่ยที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสซึ่งเป็นจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) หลังการชดเชยที่ได้จากวิธี PQF และวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD ทุกช่วงเวลาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 19

ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD สามารถให้ค่า %THD ที่น้อยกว่าอย่างชัดเจนในช่วงเวลาหลังการชดเชย



รูปที่ 19 ค่า %THD เฉลี่ยที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิก

8. สรุป

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับการตรวจจับสนามอนิกด้วย FPSVD สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยการทดสอบสมรรถนะการคำนวณตรวจจับสนามอนิกได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระบบรางเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระบบรางมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิก ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในชิปในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ พบว่าการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQF สามารถให้สมรรถนะในการตรวจจับสนามอนิกที่ดี และยืดหยุ่นกว่าวิธี PQ ส่วนในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกพบว่าวิธี PQF ร่วมกับ FPSVD สามารถคำนวณตรวจจับสนามอนิกได้อย่างถูกต้องและแม่นยำกว่าการใช้วิธี PQF ส่งผลให้วงจร SAPF สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพและค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2014 [24] อย่างไรก็ตามผลการทดสอบการตรวจจับสนามอนิกที่ได้นำเสนอในบทความนี้เป็นเพียงการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในชิปด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP

รุ่น TMS320C2000TM ซึ่งมีความแตกต่างจากการใช้งานจริงในระบบฮาร์ดแวร์ เนื่องจากระบบฮาร์ดแวร์มีความซับซ้อนมากกว่า และมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้พิจารณาในการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป เช่น ความแม่นยำของ

เครื่องมือวัด สมรรถนะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบฮาร์ดแวร์ หรือสัญญาณรบกวนต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลต่อการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีที่นำเสนอ

ตารางที่ 3 สรุปผลค่า %THD กรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบจริงมีความเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิก

วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก	%THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย						
	ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (i_{SM}, i_{ST})			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (i_{SA}, i_{SB}, i_{SC})			
	M	T	เฉลี่ย	A	B	C	เฉลี่ย
ก่อนการชดเชย							
-	22.34	22.09	22.22	22.32	22.14	22.13	22.20
ภายหลังการชดเชย							
PQF	2.48	2.58	2.53	2.48	2.66	2.43	2.52
PQF ร่วมกับ FPSVD	1.74	1.59	1.66	1.74	1.59	1.66	1.66

9. ข้อเสนอแนะ

บทความนี้พิจารณาศึกษาการตรวจจับฮาร์มอนิก รวมไปถึงการชดเชยฮาร์มอนิกเฉพาะในสถานะอยู่ตัว (Steady states) เป็นหลัก ในกรณีที่มีผลตอบสนองพลวัต (dynamic responds) อาจมีการศึกษาวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame : SRF) [25] เพื่อปรับความสมดุลเฟสประกอบการศึกษาในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย รวมถึงขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Staples CE. Electrification: its effect on signaling and communications. in *IEEE Transactions on Industry Applications*.1972; IA-8(4): 491-498.
- [2] Ho JM, Liu CC. The effects of harmonics on differential relay for a transformer. *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1:* Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ No. 482), Amsterdam, Netherlands. 2001, pp. 5.
- [3] Rice DE. Adjustable speed drive and power rectifier harmonics-their effect on power systems components. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1986; IA-22(1): 161-177.
- [4] Staples CE. Electrification: its effect on signaling and communications. *IEEE Transactions on Industry Applications*.1972; IA-8 (4):491-498.
- [5] Wagner VE, Balda J, Griffith DC, McEachern A, Barnes TM, et al. Effects of harmonics on equipment, *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1993; 8(2): 672-680.
- [6] Shu Z, Xie S, Li Q. 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*. 2011; 26(2): 334 -343.
- [7] Hu H, He Z, Gao S. Passive filter design for china high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015; 30(1): 505-514.

- [8] Cirrincione M, Pucci M, Vitale G, Miraoui A. Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(8):3128-3143.
- [9] Tan PC, Loh PC, Holmes DG. A robust multilevel hybrid compensation system for 25 kV electrified railway applications. *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003, PESC '03., Acapulco, Mexico*. 2003. p. 1020-1025.
- [10] Izhar M, Hadzer CM, Syafrudin, Taib MS, Idris S. Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system. *PECon 2004, Proceedings of National Power and Energy Conference, 2004. , Kuala Lumpur, Malaysia*. 2004. p. 104-108.
- [11] Udomkitpanya T, Narongrit T. Harmonic detection using instantaneous reactive power theory for co-phase AC electric railway systems. *Proceeding of the 7th TNI Academia Conference 2021*. 2021. p. 397-402.
- [12] Zhiqiang W, Jing B, Yawei W, Guofeng Li. A novel algorithm of fundamental positive sequence voltage detector under unbalanced and distorted voltages. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*. 2013; 9(3): 61-66.
- [13] Angelico BA, Campanhol LBG, Oliveira da silva SA. P-I/P-I-D tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. *IET Power Electron*. 2014; 7: 2647–2659.
- [14] Ghosh SK, Roy TK, Pramanik MAH, Mahmud MA. Design of nonlinear backstepping double-integral sliding mode controllers to stabilize the DC-bus voltage for DC–DC converters feeding CPLs. *Energies*. 2021; 14(20): 6753.
- [15] Peng FZ, Lai JS. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1996; 45(1): 293-297.
- [16] Sanjan PS, Yamini NG, Gowtham N. Performance comparison of single - phase SAPF using PQ theory and SRF theory. *International Conference for Emerging Technology (INCET), 2020, Belgaum, India*. 2020, pp. 1-6.
- [17] Tiyyarachakun S, Areerak K, Areerak K. Instantaneous power theory with Fourier and optimal predictive controller design for shunt active power filter. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2014; 23-23.
- [18] El- Habrouk M, Darwish MK. Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs. *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*. 2001; 148(1): 21-28.
- [19] Kaura V, Blasko V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1997; 33(1): 58-63.
- [20] Rahmani S, Mendalek N, Al- Haddad K. Experimental design of a nonlinear control technique for three-phase shunt active power filter. *IEEE Transection on Industrial Electronics*. 2010; 57: 3364–3375.
- [21] Bert C. An improved approximation for settling time of second- order linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1986; 31(7): 642-643.
- [22] Narongrit T, Areerak K, Areerak K. A new design approach of fuzzy controller for shunt active power filter. *Electric Power Components and Systems*. 2015; 43(6): 685-694.
- [23] Huang S-R, Chen B-N. Harmonic study of the LeBlanc transformer for Taiwan railway' s electrification system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2002; 17(2): 495–499.

- [24] IEEE Standard. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System. IEEE Standard 519-2014, 27 March 2014.
- [25] Zhang B. (1999, July). The method based on a generalized dq/sub k/coordinate transform for current detection of an active power filter and power system. In *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No. 99CH36321) Charleston, SC, USA, 1999*, pp. 242-248.