

การปรับปรุงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี สำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

สุทธิณี ว้าวสูงเนิน¹ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์^{2*} กองพล อารีรักษ์³

^{1,2,3}กลุ่มวิจัย PEMC สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : tosaporn@sut.ac.th

รับต้นฉบับ : 13 มีนาคม 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 31 สิงหาคม 2566; ตอบรับบทความ : 28 กันยายน 2566

เผยแพร่ออนไลน์ : 27 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี (SDF) เพื่อใช้คำนวณหากระแสอ้างอิงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยการปรับปรุงดังกล่าวจะประยุกต์ใช้วิธีการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (PSVD) ร่วมกับวิธีฟูริเยร์เอสดีเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณกระแสอ้างอิงในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนของรูปคลื่น โดยทั้งนี้มียัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส การทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกจะใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น Experimenter Kit เพื่อจำลองผลระบบกำจัดฮาร์มอนิก โดยการจำลองดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนของรูปคลื่นเนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปน ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีรวมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (SDF + PSVD) สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยลดลงโดยในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์มีค่าเท่ากับ 3.07% และในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนของรูปคลื่นมีค่าเท่ากับ 2.00% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เฉพาะวิธีฟูริเยร์เอสดี (SDF) และวิธีการตรวจจับเชิงโคโรนัส (SD) จากผลดังกล่าวยืนยันได้ว่าวิธีฟูริเยร์เอสดีรวมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานมีสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่า จึงส่งผลให้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถชดเชยกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std. 519-2022 ด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ : วงจรรอกำลังแอกทีฟ การตรวจจับฮาร์มอนิก การกำจัดฮาร์มอนิก การตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน วิธีฟูริเยร์เอสดี

Improvement of Harmonic Detection Using SDF for Shunt Active Power Filter in Single-phase Power Systems

Sutthinee Waosungnern¹ Tosaporn Narongrit^{2*} Kongpol Areerak³

^{1,2*,3}PEMC Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: tosaporn@sut.ac.th

Received: 13 March 2023; Revised: 31 August 2023; Accepted: 28 September 2023

Published online: 27 December 2023

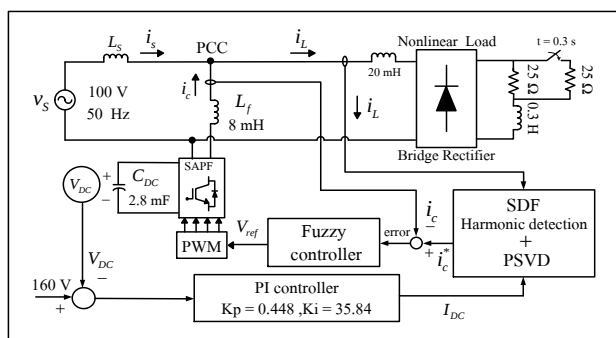
Abstract

This paper presents the performance improvement of harmonic detection using the Synchronous Detection with Fourier analysis (SDF) method to calculate the reference current of a shunt active power filter (SAPF) for single-phase power systems. The Positive Sequence Voltage Detector (PSVD) is applied to the SDF method to improve the accuracy of the reference current calculation in the case of a distorted voltage source. Where the objective is to enhance the effectiveness of harmonic elimination for single-phase power systems. For the harmonic detection testing, the hardware-in-the-loop simulation technique of the Simulink/MATLAB program and the TMS320C2000TM Experimenter Kit DSP board are used to simulate the harmonic elimination system. The simulation is divided into two cases of voltage sources: a pure sinusoidal waveform and a distorted waveform caused by harmonics. The simulation results show that harmonic detection using SDF in cooperation with the PSVD method (SDF+PSVD) can reduce the percentage of the total harmonic distortion (%THD) value of the source current to 3.07% for the case of a pure sinusoidal voltage waveform and to 2.00% for the case of a distorted voltage waveform. These %THD values are lower when compared with the SDF method and synchronous detection (SD). From the result, it confirms that the SDF cooperated with the PSVD method can provide better performance for harmonic detection. Therefore, the shunt active power filter can effectively eliminate current harmonics in the single-phase power system. Moreover, %THD of the source current after compensation is also satisfied under the IEEE std. 519-2022.

Keywords: Active power filter, Harmonic detection, Harmonic elimination, Positive sequence voltage detector, Synchronous detection with Fourier analysis

1) บทนำ

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงาน อาคาร ที่พักอาศัย ที่ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส มีการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สำรองไฟฟ้า วงจรสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย [1] วงจรชาร์จแบตเตอรี่รถไฟฟ้า [2] วงจรซัพพลายจากแผงโซลาร์เซลล์ [3] เป็นต้น ทำให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งฮาร์มอนิกส่งผลเสียต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและผลเสียอื่น ๆ หลายประการ เช่น เกิดความร้อนและเกิดกำลังสูญเสียที่สายส่ง กำลังสูญเสียที่หม้อแปลง อุปกรณ์ป้องกัน เบรกเกอร์ ฟิวส์ ทำงานผิดพลาด และอุปกรณ์ไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้นลง เป็นต้น [1]–[5] ดังนั้นเพื่อเพิ่มคุณภาพกำลังไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องกำจัดฮาร์มอนิกหรือทำให้ลดลงอยู่ภายในมาตรฐาน ปัจจุบันมีวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ ได้แก่ วงจรรอกกำลังแอคทีฟ (Active Power Filter: APF) วงจรรอกกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) และวงจรรอกกำลังไฮบริด (Hybrid Power Filter: HPF) [6] โดยบทความนี้ได้เลือกใช้วงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: APF) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิก สามารถยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า และไม่ทำให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ [7], [8]



รูปที่ 1 : ระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกดังรูปที่ 1 [9], [10] นอกจากนี้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ การตรวจจับฮาร์มอนิกและระบบควบคุม [11] โดยการตรวจจับฮาร์มอนิกจะทำหน้าที่คำนวณหากระแสฮาร์มอนิกสำหรับใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ดังนั้นการตรวจจับฮาร์มอนิกจึงจำเป็นต้องมีความถูกต้องแม่นยำในการคำนวณ โดยในอดีตที่

ผ่านมาได้มีการนำเสนอเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกของวิธีการตรวจจับซิงโครนัส (Synchronous Detection: SD) กับวิธีฟูริเยร์เอสดี (Synchronous Detection with Fourier analysis: SDF) ซึ่งการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีถูกพัฒนามาจากวิธีการตรวจจับซิงโครนัส ด้วยการนำการเทคนิคการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis: SWFA) มาทำหน้าที่แทนการใช้ตัวกรอง LPF ในขั้นตอนที่ 3 ดังนั้นจึงมีรูปแบบการคำนวณที่ง่ายและมีขั้นตอนการคำนวณขั้นอื่น ๆ เหมือนกัน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าวิธีฟูริเยร์เอสดีมีสมรรถนะในการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกที่ถูกต้องแม่นยำกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส [12] ดังนั้นบทความนี้จะเลือกใช้วิธีฟูริเยร์เอสดี อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดการคำนวณในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีแรงดันที่แหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ [13], [14] ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องในการตรวจจับฮาร์โมนิกลดลง ด้วยเหตุนี้บทความจึงนำเสนอการปรับปรุงการตรวจจับฮาร์โมนิก ด้วยการนำวิธีการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (Positive Sequence Voltage Detector: PSVD) [15]–[17] มาทำงานร่วมกับวิธีฟูริเยร์เอสดีเพื่อให้การคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกหรือการคำนวณกระแสอ้างอิงมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้วงจรรอกกำลังแอคทิฟแบบขนานมีประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้น สำหรับระบบควบคุมการทำงานของวงจรรอกกำลังแอคทิฟแบบขนานจะประกอบไปด้วย ระบบควบคุมกระแสขดลวดทำหน้าที่ควบคุมกระแสขดลวดให้คล้อยตามกระแสอ้างอิง ซึ่งบทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีซี เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสขดลวด [18], [19] และระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันให้มีค่าคงที่ตามค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้ออกแบบไว้ โดยบทความนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีเพียงพอในการควบคุมค่าแรงดันกระแสตรง [20]

สำหรับการนำเสนอของบทความนี้จะประกอบไปด้วย ใน
หัวข้อที่ 2 จะนำเสนอการตรวจจหารมอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดี
หัวข้อที่ 3 จะนำเสนอการปรับปรุงการตรวจจหารมอนิกด้วยวิธีฟูรี
เยร์เอสดีที่ทำงานร่วมกับวิธี PSVD หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอการ
ควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีชซี หัวข้อที่ 5 จะนำเสนอ
การจำลองสถานการณ์การก่จัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์
ในรูป หัวข้อที่ 6 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการ

2) การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดีหรือวิธี SDF เป็นวิธีที่สามารถคำนวณหากระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และมีรูปแบบการคำนวณที่ง่าย ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้ [12]–[14]

ขั้นที่ 1 : แปลงแรงดันที่แหล่งจ่าย (V_s) และกระแสโหลด (i_L) จากแกนเฟสเป็นแรงดันที่แหล่งจ่ายบนแกน $\alpha\beta$ ($V_{s,\alpha}, V_{s,\beta}$) และกระแสโหลดบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L,\alpha}, i_{L,\beta}$) แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} V_{s,\alpha} \\ V_{s,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s(\theta) \\ V_s(\theta - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L,\alpha} \\ i_{L,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\theta) \\ i_L(\theta - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ขั้นที่ 2 : คำนวณค่ากำลังแอกทีฟ (p) แสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$p = V_{s,\alpha} i_{L,\alpha} + V_{s,\beta} i_{L,\beta} \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 : เนื่องจากค่ากำลังแอกทีฟประกอบด้วยปริมาณกำลังแอกทีฟมูลฐาน (P_{dc}) และปริมาณกำลังแอกทีฟฮาร์มอนิก (P_{ac}) แสดงดังสมการที่ (4) จึงนำค่ากำลังแอกทีฟมาทำการแยกปริมาณ P_{dc} ออกจากปริมาณ P_{ac} ด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (SWFA) [12]

$$p = P_{dc} + P_{ac} \quad (4)$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ายอดกระแสที่แหล่งจ่ายมูลฐาน (I_s) แสดงดังสมการที่ (5)

$$I_s = \left[\frac{P_{dc}}{V_s} \right] + I_{DC} \quad (5)$$

โดยที่ V_s คือ ค่ายอดแรงดันที่แหล่งจ่าย

I_{DC} คือ ค่ากระแสตรงที่ได้จากเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC})

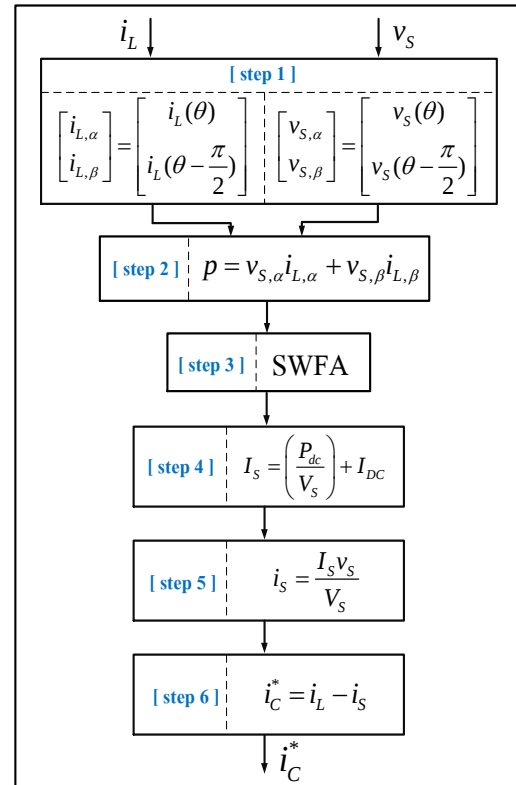
ขั้นที่ 5 คำนวณค่ากระแสที่แหล่งจ่ายมูลฐาน (i_s) ด้วยสมการที่ (6)

$$i_s = \frac{I_s V_s}{V_s} \quad (6)$$

ขั้นที่ 6 คำนวณหากระแสอ้างอิง (i_c^*) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน แสดงดังสมการที่ (7)

$$i_c^* = i_L - i_s \quad (7)$$

จากขั้นตอนการคำนวณหากระแสอ้างอิงของวิธี SDF ในข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 : แผนภาพการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SDF

3) การปรับปรุงการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์เอสดี

การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SDF เป็นวิธีที่สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามวิธี SDF ยังมีข้อจำกัดในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ามีสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ ซึ่งจะทำให้การตรวจจับสนามอนิกไม่ถูกต้องและจะส่งผลต่อการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ด้วยเหตุนี้จึงทำการปรับปรุงการตรวจจับสนามอนิกด้วยการนำวิธีการตรวจจับสนามอนิกลำดับเฟสบนมูลฐานหรือวิธี PSVD มาทำงานร่วมกับวิธี SDF เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยสามารถแสดงรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณของวิธี PSVD [15]–[17] ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 : แปลงแรงดันที่แหล่งจ่าย (V_s) จากแกนเฟสให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ($V_{s,\alpha}, V_{s,\beta}$) แสดงดังสมการที่ (1)

ขั้นที่ 2 : คำนวณค่ามุมของแรงดันที่แหล่งจ่าย (θ_{V_s}) ด้วยวงจรเฟสล็อกลูป (Phase Lock Loop: PLL) [16]

ขั้นที่ 3 : คำนวณค่ากระแสบนแกน $\alpha\beta$ (i_α, i_β) ด้วยสมการที่ (8)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sin \theta_{v_s} \\ -\cos \theta_{v_s} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ขั้นที่ 4 : คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า (p', q') ตามสมการที่ (9)

$$\begin{bmatrix} p' \\ q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s,\alpha} \cdot i_\alpha & v_{s,\beta} \cdot i_\beta \\ v_{s,\beta} \cdot i_\alpha & v_{s,\alpha} \cdot i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

ขั้นที่ 5 : เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าประกอบด้วยปริมาณกำลัง
มูลฐาน (p'_{dc}, q'_{dc}) และปริมาณกำลังฮาร์มอนิก (p'_{ac}, q'_{ac})
จึงทำการแยกปริมาณ p'_{dc} และ q'_{dc} ออกจากปริมาณ p'_{ac}
และ q'_{ac} ด้วยการใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (Low Pass Filter: LPF)

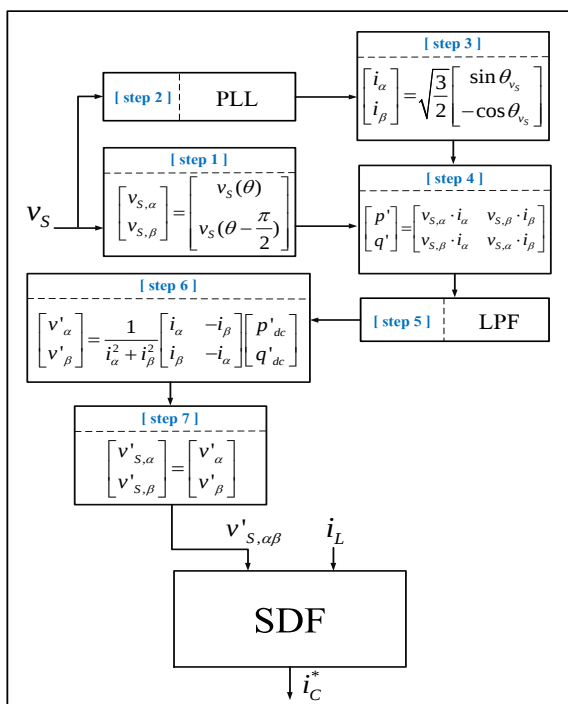
ขั้นที่ 6 : คำนวณหาค่าแรงดันสำหรับอ้างอิงที่อยู่บนแกน
 $\alpha\beta$ (v'_α, v'_β) ด้วยสมการที่ (10)

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p'_{dc} \\ q'_{dc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ขั้นที่ 7 : กำหนดค่า $v'_{s,\alpha}$ และ $v'_{s,\beta}$ มีค่าเท่ากับ v'_α และ
 v'_β ตามลำดับ ดังสมการที่ (11) เพื่อนำไปใช้เป็นอินพุตแทนค่า
 $v_{s,\alpha}, v_{s,\beta}$ ในขั้นตอนแรกของการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิง
ด้วยวิธี SDF ต่อไป

$$\begin{bmatrix} v'_{s,\alpha} \\ v'_{s,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

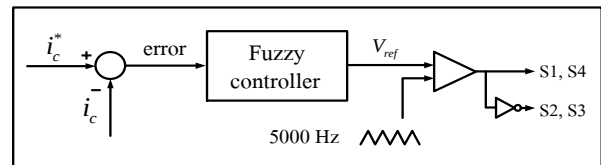
จากขั้นตอนการคำนวณวิธี PSVD ในข้างต้นสามารถสรุปเป็น
แผนภาพการตรวจจับสนามฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ร่วมกับวิธี PSVD
(SDF + PSVD) แสดงได้ดังรูปที่ 3



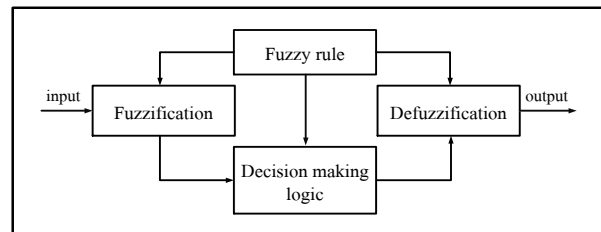
รูปที่ 3 : แผนภาพการตรวจจับสนามฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ร่วมกับวิธี PSVD
(SDF + PSVD)

4) การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฟัซซี

การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฟัซซีซึ่งเป็นตัวควบคุม
ที่สามารถทำงานในระบบที่มีความคลุมเครือเหมาะสมสำหรับควบคุม
กระแสด้วยตัวควบคุมฟัซซีที่มีลักษณะสัญญาณเป็นฮาร์มอนิกโดยบล็อกไดอะแกรม
ตัวควบคุมฟัซซีสามารถแสดงดังรูปที่ 4 จากรูปดังกล่าวพบว่า
สัญญาณอินพุต คือ ค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิง (i_c^*) กับ
กระแส (i_c) หรือค่าความผิดพลาด (error) และสัญญาณ
เอาต์พุต คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) สำหรับเป็นอินพุตให้กับ
เทคนิคการสวิตช์แบบ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อ
สร้างพัลส์ควบคุมการทำงานของสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) ของวงจร
กรองกำลังแอคทีฟแบบขนานต่อไป [19]



รูปที่ 4 : แผนภาพบล็อกระบบควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฟัซซี



รูปที่ 5 : กระบวนการของตัวควบคุมฟัซซี

ตัวควบคุมฟัซซีมีกระบวนการควบคุมดังรูปที่ 5 โดยสามารถ
อธิบายการออกแบบส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้ [18]

4.1) การทำฟัซซี (Fuzzification) บทความนี้ออกแบบให้ตัว
แปรภาษาของฟังก์ชันสมาชิกอินพุตเป็นค่า error ที่มีค่าเชิง
ภาษา 3 ค่า ได้แก่ “neg” (มีค่าเป็นลบ) “zero” (มีค่าเป็นศูนย์)
และ “pos” (มีค่าเป็นบวก) โดยขอบเขตฟังก์ชันสมาชิกอินพุต
กำหนดให้เท่ากับ 0.1 A ดังในแสดงรูปที่ 6 และออกแบบฟังก์ชัน
สมาชิกของเอาต์พุตเป็นค่า V_{ref} ที่มีค่าเชิงภาษา 3 ค่า ได้แก่
“dec” (มีค่าลดลง) “cons” (มีค่าคงที่) และ “inc” (มีค่า
เพิ่มขึ้น) โดยกำหนดขอบเขตฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตกำหนดให้
เท่ากับ 160 V ตามค่า V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 7

4.2) กฎฟัซซี (Fuzzy Rules) ได้ทำการออกแบบกฎฟัซซีสำหรับ
ควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฟัซซี 3 ข้อดังนี้

กฎข้อที่ 1 IF error = neg THEN voltage = dec

กฎข้อที่ 2 IF error = zero THEN voltage = cons

กฎข้อที่ 3 IF error = pos THEN voltage = inc

4.3) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (Decision Making Logic) เลือกใช้

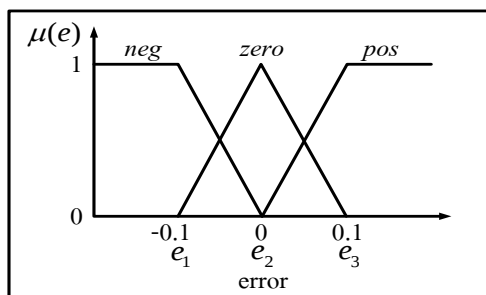
การอนุมานแบบ Mamdani

4.4) การทำดีฟัซซี่ (Defuzzification) ได้เลือกใช้วิธีหาจุดศูนย์กลาง (Center of Gravity: COG) ซึ่งสามารถคำนวณค่า V_{ref} ได้จากสมการที่ (12)

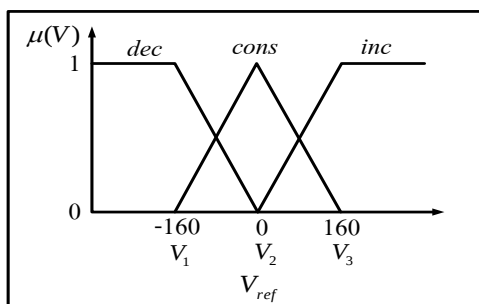
$$V_{ref} = \frac{\sum_{x=a}^b \mu(V_x) V_x}{\sum_{x=a}^b \mu(V_x)} \quad (12)$$

โดยที่ $\mu(V_x)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตสมาชิก x ใด ๆ

a, b คือ ขอบเขตฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต



รูปที่ 6 : ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต error

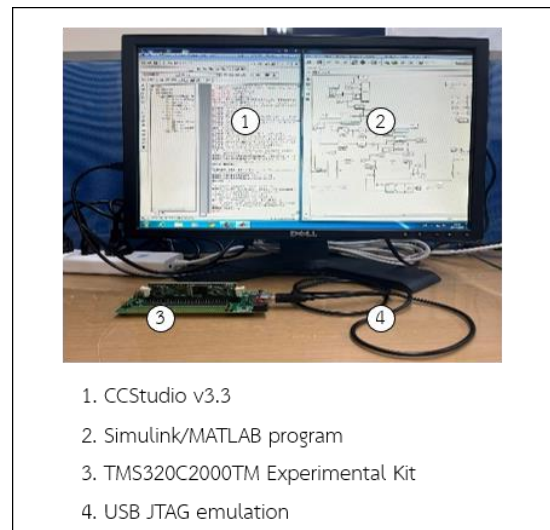


รูปที่ 7 : ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต V_{ref}

5) การจำลองสถานการณ์การกำจัดการรบกวนด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

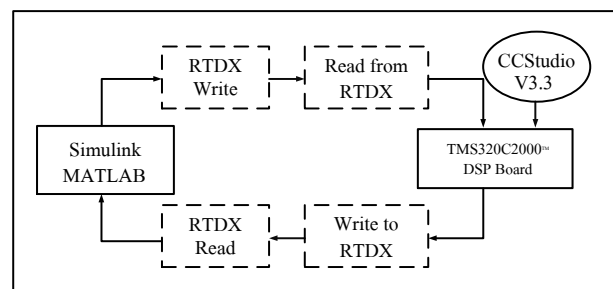
การจำลองสถานการณ์การกำจัดการรบกวนของวงจรกรองกำลัง แยกทีฟแบบขนานด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป (Hardware In Loop: HIL) เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Simulink/MATLAB และบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimental Kit

โดยแลกเปลี่ยนข้อมูลผ่านสาย USB JTAG emulation ดังแสดงในรูปที่ 8



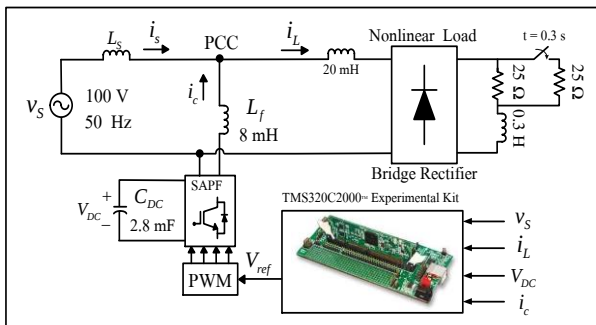
รูปที่ 8 : การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink/MATLAB กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimental Kit

กระบวนการการทำงานของเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 9 โดยโปรแกรม Simulink/MATLAB จะส่งข้อมูลผ่านบล็อก RTDX Write ไปยังบอร์ด DSP ขณะเดียวกันบอร์ด DSP สามารถรับข้อมูลด้วยคำสั่ง Read from RTDX จากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปคำนวณตามโปรแกรมที่เขียนลงใน CCStudio V3.3 และส่งข้อมูลออกจากบอร์ด DSP ผ่านคำสั่ง Write to RTDX ซึ่งโปรแกรม Simulink/MATLAB สามารถรับข้อมูลด้วยบล็อก RTDX Read จากกระบวนการดังกล่าว คือ การคำนวณครบหนึ่งรอบช่วงเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) และจะทำงานวนซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ ตลอดระยะเวลาที่กำหนดจำลองสถานการณ์



รูปที่ 9 : แผนภาพการทำงานของระบบฮาร์ดแวร์ในรูป

ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 1 สามารถสร้างเป็นระบบจำลองด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปได้ดังรูปที่ 10 โดยส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการควบคุมกระแสชดเชยจะถูกโปรแกรมลงบนบอร์ด DSP ส่วนระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส และวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน จะถูกสร้างจากชุดบล็อกบนโปรแกรม Simulink/MATLAB โดยที่ข้อมูลอินพุตของบอร์ด DSP คือ ค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย (v_s) ค่ากระแสโหลด (i_L) ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) และค่ากระแสชดเชย (i_C) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และข้อมูลเอาต์พุตของบอร์ด DSP คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) สำหรับส่งไปยังเทคนิค PWM บนโปรแกรม Simulink/MATLAB เพื่อสร้างพัลส์ควบคุมสวิตช์ไอจีบีที (IGBT) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 10 : ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยฮาร์ดแวร์ในรูป

6) ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปดังรูปที่ 10 เพื่อทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD วิธี SDF และการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ปรับปรุงขึ้นเรียกว่าวิธี SDF + PSVD จะแบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ และกรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปน โดยการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกจะพิจารณาโหลดในสภาวะปกติ และสภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงด้วยการเพิ่มขนาดกระแส

กรณีที่ 1 กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ ผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD สามารถแสดงดังรูปที่ 11 วิธี SDF สามารถแสดงดังรูปที่ 12 และที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF + PSVD แสดงดังรูปที่ 13 จากทั้งสามรูปดังกล่าวในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 0.1 s เป็นช่วงเวลา

ก่อนการฉีดกระแสชดเชย (i_C) พบว่ากระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) มีลักษณะสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับสัญญาณของกระแสโหลด (i_L) เมื่อคำนวณค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายดังกล่าวพบว่ามีค่าเท่ากับ 26.9% จากนั้นเมื่อทำการชดเชยฮาร์มอนิกตั้งแต่เวลา 0.1 s เป็นต้นไป จะเห็นได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้ตัวควบคุม พืชสามารถฉีดกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_C^*) ได้ ทำให้สัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่ายกลับมาเป็นรูปไซน์ โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD (รูปที่ 11) ในสภาวะโหลดปกติ (ช่วงเวลา 0.1 ถึง 0.3 s) มีค่าเท่ากับ 4.04% และในสภาวะโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด (ช่วงเวลา 0.3 ถึง 0.5 s) มีค่าเท่ากับ 5.51% สำหรับที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF (รูปที่ 12) ในสภาวะโหลดปกติ มีค่าเท่ากับ 1.89% และในสภาวะโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด มีค่าเท่ากับ 3.08% และผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF + PSVD (รูปที่ 13) พบว่าค่า %THD ในสภาวะโหลดปกติเท่ากับ 1.88% และในสภาวะโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 3.07%

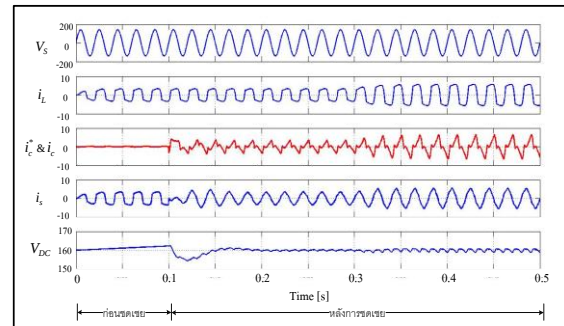
กรณีที่ 2 กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปนโดยมีค่า %THD เท่ากับ 9.11% [10] ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD สามารถแสดงดังรูปที่ 14 วิธี SDF สามารถแสดงดังรูปที่ 15 และที่ใช้วิธี SDF + PSVD แสดงได้ดังรูปที่ 16 ซึ่งพบว่าในช่วงเวลาก่อนการฉีดกระแสชดเชย (ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.1 s) กระแสที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนที่ค่า %THD เท่ากับ 29.08% แต่เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุม พืชทำการฉีดกระแสชดเชย (ตั้งแต่เวลา 0.1 s เป็นต้นไป) พบว่าค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD (รูปที่ 14) ในสภาวะโหลดปกติ และโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด มีค่าเท่ากับ 11.32% และ 13.52% ตามลำดับ ส่วนเมื่อใช้วิธี SDF (รูปที่ 15) ในสภาวะโหลดปกติ และโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาด มีค่าเท่ากับ 10.87% และ 12.25% ตามลำดับ และวิธี SDF + PSVD (รูปที่ 16) พบว่าค่า %THD ที่โหลดปกติ และโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดมีค่าเท่ากับ 2.34% และ 2.00% ตามลำดับ โดยสามารถแสดงสรุปผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายได้ดังตารางที่ 1

นอกจากนี้ จากรูปที่ 11 ถึง 16 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอ มีสมรรถนะที่สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 160 V

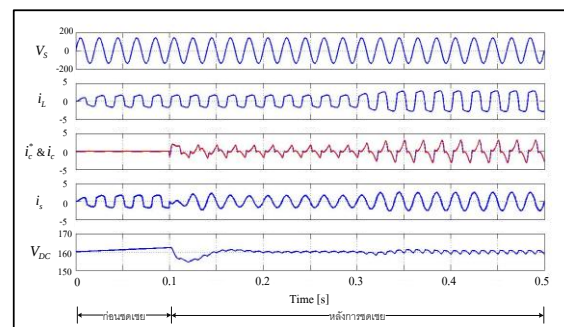
ตารางที่ 1 : ผลการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยฮาร์ดแวร์ในรูป

การตรวจจับฮาร์มอนิก	แรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์		แรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน	
	%THDi	%THDv	%THDi	%THDv
ก่อนกระแสชดเชย				
วิธี SD	26.9%	0%	29.08%	9.11%
วิธี SDF				
วิธี SDF+PSVD				
หลังกระแสชดเชย กรณีโหลดปกติ				
วิธี SD	4.04%	0%	11.32%	9.11%
วิธี SDF	1.89%		10.87%	
วิธี SDF+PSVD	1.88%		2.34%	
หลังกระแสชดเชย กรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลง				
วิธี SD	5.51%	0%	13.52%	9.11%
วิธี SDF	3.08%		12.25%	
วิธี SDF+PSVD	3.07%		2.00%	

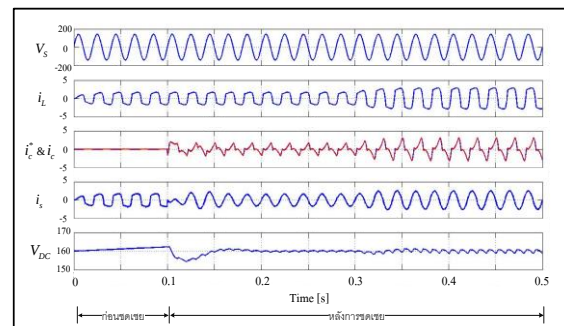
จากตารางที่ 1 ในกรณีการทดสอบแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์พบว่าค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD โหลดมีการเปลี่ยนแปลงมีค่าเกินมาตรฐาน IEEE std. 519-2022 ($< 5\%$) ส่วนวิธี SDF และวิธี SDF + PSVD มีค่าประมาณเท่ากันและอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE ทั้งช่วงโหลดปกติและโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าวิธี SDF และวิธี SDF + PSVD มีสมรรถนะการคำนวณหากระแสอ้างอิงที่ดีกว่าวิธี SD แบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตามในกรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน พบว่าการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี SDF + PSVD สามารถคำนวณได้ถูกต้องแม่นยำมากกว่าที่ใช้วิธี SD และวิธี SDF โดยพิจารณาจากค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายที่มีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายใต้มาตรฐานในทุกช่วงโหลด



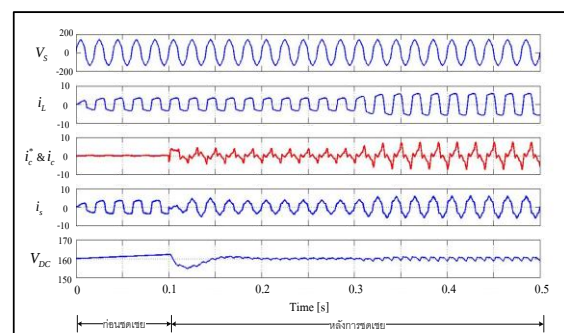
รูปที่ 11 : ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์



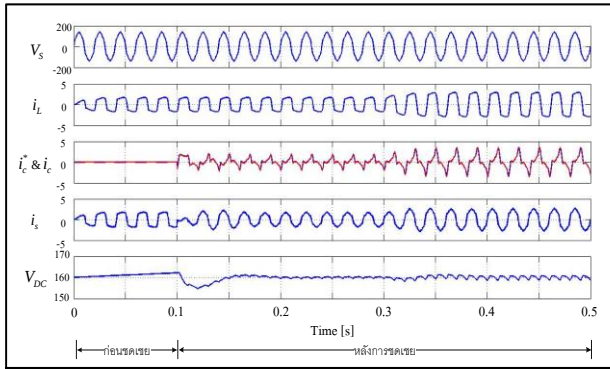
รูปที่ 12 : ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์



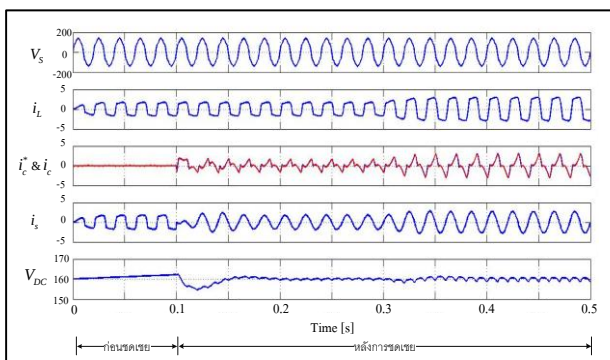
รูปที่ 13 : ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF + PSVD กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์



รูปที่ 14 : ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SD กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน



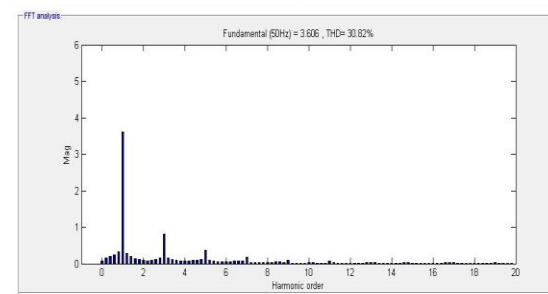
รูปที่ 15 : ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน



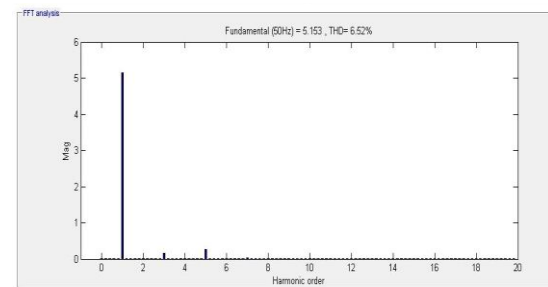
รูปที่ 16 : ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธี SDF + PSVD กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ FFT ของรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) ในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ดังรูปที่ 17 พบว่าสเปกตรัมของรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชย (รูปที่ 17 (ก)) มีปริมาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5 และ 7 ปรากฏอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามภายหลังการชดเชยพบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี SD (รูปที่ 17 (ข)) วิธี SDF (รูปที่ 17 (ค)) และวิธี SDF + PSVD (รูปที่ 17 (ง)) มีปริมาณฮาร์มอนิกลดน้อยลงมากโดยปรากฏเหลือสเปกตรัมอันดับ 3 และ 5 เพียงเล็กน้อย ส่วนในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปนสามารถแสดงสเปกตรัมของรูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 18 โดยก่อนการชดเชย (รูปที่ 18 (ก)) ปรากฏปริมาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 5 และ 7 ส่วนภายหลังการชดเชยพบว่ากรณีใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD (รูปที่ 18 (ข)) และวิธี SDF (รูปที่ 18 (ค)) ยังคงพบปริมาณฮาร์มอนิกอันดับ 3 5 และ 7 เหลืออยู่ในขณะที่วิธี SDF + PSVD (รูปที่ 18 (ง)) แทบไม่ปรากฏ

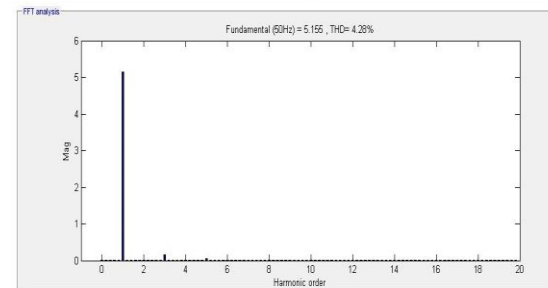
ปริมาณฮาร์มอนิก ซึ่งหมายความว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกทั้ง 3 วิธีมีประสิทธิภาพที่ดีในระบบที่แรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์ ส่วนในกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน วิธี SDF + PSVD สามารถลดความผิดพลาดการคำนวณหากระแสอ้างอิงได้ทำให้มีความแม่นยำมากกว่าวิธี SD และวิธี SDF ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า



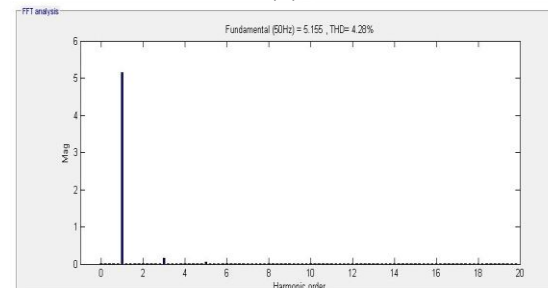
(ก)



(ข)

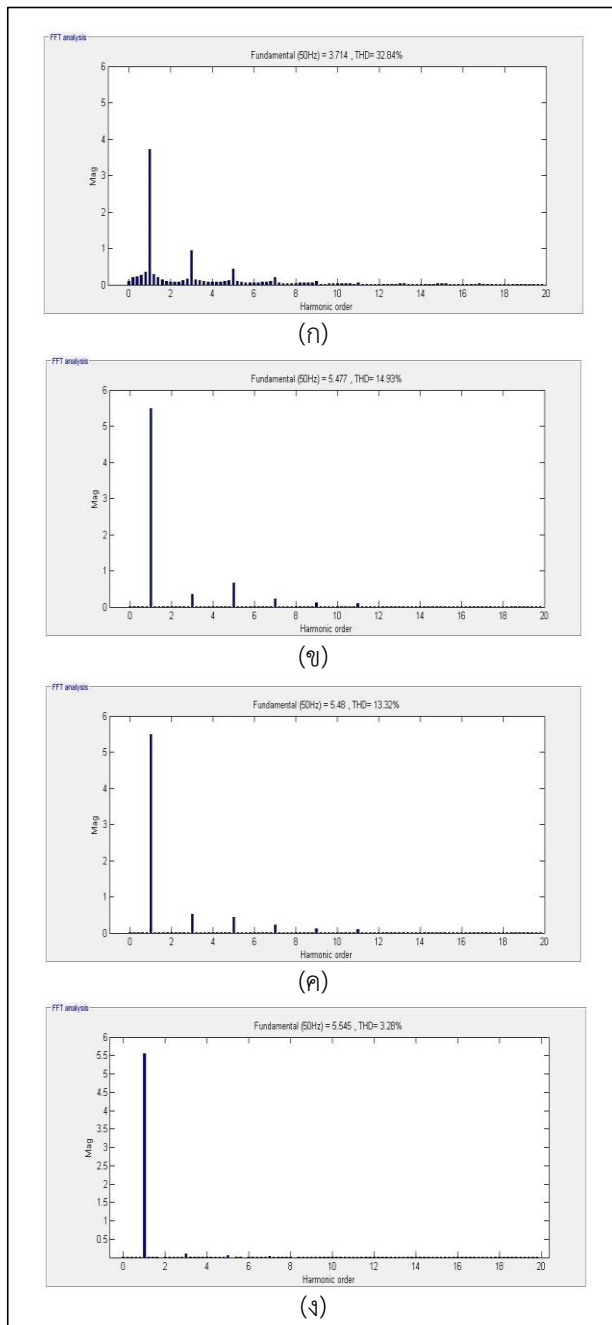


(ค)



(ง)

รูปที่ 17 : ผลการวิเคราะห์ FFT กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ (ก) ก่อนการชดเชย (ข) วิธี SD (ค) วิธี SDF (ง) วิธี SDF+PSVD



รูปที่ 18 : ผลการวิเคราะห์ FFT กรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน
(ก) ก่อนการชดเชย (ข) วิธี SD (ค) วิธี SDF (ง) วิธี SDF+PSVD

7) สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงการตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี SDF ด้วยการนำวิธี PSVD เข้ามาช่วยคำนวณแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวกเพื่อใช้เป็นอินพุตในการคำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสสำหรับกรณีที่แรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน เพื่อให้การคำนวณหากระแสอ้างอิงมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปพบว่า การตรวจจับ

ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SDF ร่วมกับวิธี PSVD สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธี SD และวิธี SDF ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในกรณีแรงดันที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์และมีฮาร์มอนิกปะปน โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงและอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE std. 519-2022

REFERENCES

- [1] V. E. Wagner *et al.*, "Effects of harmonics on equipment," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 2, pp. 672–680, Apr. 1993, doi: 10.1109/61.216874.
- [2] L. Li, B. Wang, and Y. Deng, "Model establishment and harmonic analysis of electric vehicle charger," in *Proc. 13th IEEE Conf. Ind. Electron. and Appl. (ICIEA)*, Wuhan, China, 2018, pp. 2204–2209, doi: 10.1109/ICIEA.2018.8398076.
- [3] D. Schwanz, T. Busatto, M. Bollen, and A. Larsson, "A stochastic study of harmonic voltage distortion considering single-phase photovoltaic inverters," in *Proc. 18th Int. Conf. Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, Slovenia, May 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378889.
- [4] G. C. Jaiswal, M. S. Ballal, D. R. Tutakne, and H. M. Suryawanshi, "Impact of power quality on the performance of distribution transformers: A fuzzy logic approach to assessing power quality," *IEEE Ind. App. Mag.*, vol. 25, no. 5, pp. 8–17, 2019, doi: 10.1109/MIAS.2018.2875207.
- [5] D. M. Said and K. M. Nor, "Effects of harmonics on distribution transformers," in *Proc. Australasian Universities Power Eng. Conf.*, Sydney, Australia, 2008, pp. 1–5.
- [6] D. Li, T. Wang, W. Pan, X. Ding, and J. Gong, "A comprehensive review of improving power quality using active power filters," *Electric Power Syst. Res.*, vol. 199, pp. 1–15, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107389.
- [7] L. Motta and N. Faúndes, "Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends," in *Proc. 17th Int. Conf. Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 657–662, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783319.
- [8] M. Izhar, C. M. Hadzer, M. Syafrudin, S. Taib, and S. Idris, "Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system," in *Proc. Nat. Power and Energy Conf. (PECon)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 2004, pp. 104–108, doi: 10.1109/PECON.2004.1461625.

- [9] S. Waosungnern, T. Narongrit, and K. Areerak, "Design of a shunt active power filter for single-phase power systems," (in Thai), *TNI J. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 27–36, 2021.
- [10] D. C. Bhonsle and R. B. Kelkar, "Design and simulation of single phase shunt active power filter using MATLAB," in *Proc. Int. Conf. Recent Advancements in Elect., Electron. and Control Eng.*, Sivakasi, India, 2011, pp. 237–241, doi: 10.1109/ICONRAEeCE.2011.6129786.
- [11] R. Griñó, R. Costa-Castelló, and E. Fossas, "Digital repetitive control of a single-phase current active filter," in *Proc. Euro. Control Conf. (ECC)*, Cambridge, U.K., Sep. 2003, pp. 3494–3497, doi: 10.23919/ECC.2003.7086583.
- [12] S. Waosungnern, T. Narongrit, and K. Areerak, "Harmonic detection using synchronous detection with fourier analysis for shunt active power filter in single - phase power systems," (in Thai), in *Proc. 45th Elect. Eng. Conf.*, Nakhon Nayok, Thailand, Nov. 2022, pp. 142–145.
- [13] M. P. Kumar *et al.*, "Power quality improvement using shunt active power filter with synchronous detection method," *Complexity Int. J.*, vol. 25, no. 2, pp. 1637–1645, 2021.
- [14] M. A. Kabir and U. Mahbub, "Synchronous detection and digital control of shunt active power filter in power quality improvement," in *Proc. IEEE Power and Energy Conf.*, Urbana, IL, USA, 2011, pp. 1–5, doi: 10.1109/PECI.2011.5740499.
- [15] C. Panpean, K. Areerak, and P. Santiprapan, "A harmonic voltage elimination in electric railway system using series active power filter," in *Proc. 25th Int. Conf. Elect. Machines and Syst. (ICEMS)*, Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983452.
- [16] V. Kaura and V. Blasko, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 33, no. 1, pp. 58–63, 1997.
- [17] Y. G. Jung, "The current synchronous detection method combined with positive sequence detector for active power filters" *J. Elect. Eng. Technol.*, vol. 18, pp. 431–440, 2023.
- [18] S. Waosungnern, T. Narongrit, K. Areerak, and A. Srikaew, "The compensating current control using fuzzy logic for shunt active power filter in single-phase power systems," (in Thai), in *Proc. 44th Elect. Eng. Conf.*, Nan, Thailand, Nov. 2021, pp. 517–520.
- [19] A. Srikaew, *Fuzzy Logic: Computational Intelligence*. Bangkok, Thailand: Charansanitwong Printing (in Thai), 2009.
- [20] N. A. Kedar, A. P. Yadav, and V. B. Saruk, "Space vector modulation based control technique for shunt active power filter," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 8, pp. 70–77, 2020.