

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้า ที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว

Harmonic Elimination using Active Power Filter for Non-Sinusoidal Voltage Source System

ชาคริต ปานแป้น กองพล อารีรักษ์* และกองพัน อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Chakrit Panpean Kongpol Areerak* and Kongpan Areerak

Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,

Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000

*Corresponding author: Email: kongpol@sut.ac.th

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยวมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ การตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้วิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งซึ่งประยุกต์ใช้งานร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน เพื่อรองรับการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าบิดเบี้ยว ระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยตัวควบคุมดังกล่าวจะทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์พีดีบีเอ็ม นอกจากนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้โปรแกรม Matlab Simulink ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว พบว่า ระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอให้สมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว และทุกสภาวะโหลดที่ทำการทดสอบ โดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้วยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย อีกทั้งค่า %THD หลังการชดเชยดังกล่าวยังอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std.519 -2014 และ IEEE std.1459 – 2010

คำสำคัญ: วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง การตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน ฮาร์มอนิก

ABSTRACT

This paper presents harmonic elimination using active power filter for non-sinusoidal voltage source system. The instantaneous power theory (PQ) with positive sequence voltage detector (PSVD) is used for harmonic detection to calculate the reference current. The PI-controller is applied for compensating current control and DC bus voltage control. This controller is used with PWM switching technique. Moreover, the Matlab Simulink is applied for simulation in the paper. The simulation results show that the active power filter with PI-controller can provide the good performance to eliminate the

harmonic for all loads in non-sinusoidal voltage source system. In the paper, the performance index is %THD of source current after compensation. In addition, the %THD after compensation can follow the IEEE Std.519 – 2014 and IEEE std.1459 – 2010.

Keyword: Active power filter, Instantaneous power theory, Positive sequence voltage detector, Harmonic

1. บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านต่าง ๆ ในปัจจุบันส่วนใหญ่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้ได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิต ส่งผลให้พฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ทำงานกันในครัวเรือน สำนักงาน สถานที่ราชการ สถานที่ท่องเที่ยว หรือแม้กระทั่งในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่แล้วมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เช่น หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ คอมพิวเตอร์ ชุดขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น การใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นมลพิษในระบบไฟฟ้า จึงเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบในหลายประการ เช่น ทำให้มิเตอร์วัดไฟฟ้าทำงานผิดพลาด [1-2] เกิดกำลังงานสูญเสียทำให้ต้องออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่กว่าปกติในการใช้งานจริง [3] เกิดความร้อนต่ออุปกรณ์ขณะใช้งาน [4] อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาด และทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง [5] การแก้ไขปัญหาลักษณะนี้เป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับงานวิจัยด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ตัวการที่สำคัญของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น คือ กระแสฮาร์มอนิก การแก้ไขปัญหakerแสฮาร์มอนิกให้หมดไปหรือลดน้อยลง จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพกำลังไฟฟ้าดีขึ้น จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม พบว่า การกำจัดฮาร์มอนิกมีหลากหลายวิธี [6] โดยวิธีการหนึ่ง คือ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ [7-9] เนื่องจาก วงจรดังกล่าวสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กระแสนิวทรัล และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังได้ บทความนี้จะมุ่งเน้นการกำจัดฮาร์มอนิก โดยทำการศึกษา

ระบบควบคุมและการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter : SAPF) สำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่อุดมคติ กล่าวคือ แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีลักษณะบิดเบี้ยวผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ผิดพลาดจนกระทั่งนำไปสู่สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟลดลง

จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า สมรรถนะการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิก โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ภาพรวมของระบบควบคุมและกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 1 จากรูปดังกล่าวสามารถอธิบายในแต่ละส่วนได้ดังนี้

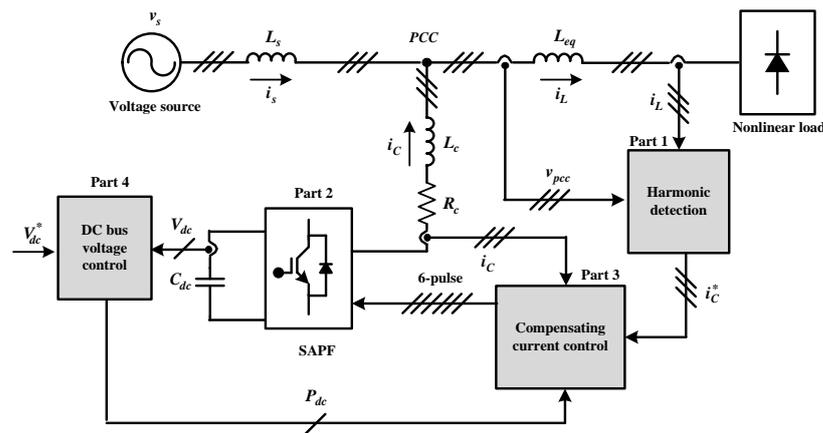
ส่วนที่หนึ่ง คือ การตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง [10] วิธีแกนหมุนตติวิ [11] และวิธีกรองอ้างอิงสามเฟส [12] เป็นต้น ซึ่งในบทความนี้ได้นำวิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน [13] มาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับฮาร์มอนิก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว และมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน [14]

ส่วนที่สอง คือ โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่นิยมใช้มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์

ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage - Source Inverter : VSI) [15] และโครงสร้างวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ชนิดกระแส (Current - Source Inverter : CSI) [16] บทความนี้ได้เลือกใช้โครงสร้างวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวสามารถควบคุมการผิดกระแสชดเชยได้ง่าย มีขนาดเล็ก

เนื่องจากตัวควบคุมพีไอให้ผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ดีตรงตามวัตถุประสงค์

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2 สำหรับหัวข้อที่ 3 เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในส่วนของหัวข้อที่ 4 ได้นำเสนอการ



รูปที่ 1 ภาพรวมระบบควบคุมและกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

และมีราคาที่ถูกกว่าโครงสร้างแบบ CSI [17-18]

ส่วนที่สาม คือ การควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิก ตัวควบคุมที่ใช้ในควบคุมกระแสชดเชยมีหลายชนิด เช่น ตัวควบคุมพีไอ [19] ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส [20] และตัวควบคุมพีซี [21] เป็นต้น สำหรับบทความนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจากตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีและเพียงพอต่อการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ส่วนที่สี่ คือ การควบคุมแรงดันบัลไฟตรง การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ส่งผลให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงไม่คงตัวตามจุดการทำงานที่เหมาะสม ผลกระทบดังกล่าวทำให้สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกลดลง ด้วยเหตุนี้การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงจึงมีความสำคัญในการกำจัดฮาร์มอนิก บทความนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ [22]

จำลองสถานการณ์และอภิปรายผล และการสรุปผลดำเนินการของบทความนี้ได้นำเสนอไว้เป็นหัวข้อสุดท้าย

2. การตรวจจับฮาร์มอนิก

การตรวจจับฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชย โดยในบทความนี้จะนำเสนอ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง หรือเรียกว่า วิธี PQ ซึ่งวิธีดังกล่าวได้ถูกคิดค้นขึ้นโดย Akagi, Kannazawa, and Nabae [23] ข้อดีของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ คือ มีสมรรถนะที่ดีในการตรวจจับฮาร์มอนิกและการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติด้านการคำนวณที่รวดเร็วและไม่ซับซ้อน การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามสายด้วยทฤษฎี PQ สามารถแบ่งค่ากำลังไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนจากแหล่งจ่าย

ไปยังโหลด และกำลังไฟฟ้านี้ออกที่พ (q) ที่เป็นการแลกเปลี่ยนกำลังงานระหว่างเฟส โดยปราศจากการถ่ายโอนกำลังงาน ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับพิจารณาในระบบสามเฟสสามสาย แสดงได้ดังสมการที่ (1)

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

การคำนวณกำลังไฟฟ้าด้วยทฤษฎี PQ เริ่มจากแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC บนแกนสามเฟส (v_a, v_b, v_c) และค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนสามเฟส (i_a, i_b, i_c) จะถูกแปลงให้อยู่บนแกนแอลฟาและเบต้า ($\alpha\beta$) ซึ่งเรียกการแปลงดังกล่าวว่า “การแปลงของคาร์ก (Clarke transformation)” ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC บนแกนแอลฟาและเบต้า (v_α, v_β) และค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนแอลฟาและเบต้า (i_α, i_β) ถูกใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าในสมการที่ (1)

2.1 การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้ เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสามสาย จึงไม่พิจารณากระแสที่นิวทรัล ดังนั้นขั้นตอนการตรวจจับสนามอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยรายละเอียดการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง ($i_{Ca}^*, i_{Cb}^*, i_{Cc}^*$) เป็นดังนี้

ขั้นที่ 1 : แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลดจากปริมาณ 3 เฟสเป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า โดยใช้สมการตามบล็อกของ “Clark transformation” ดังรูปที่ 2

ขั้นที่ 2 : คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้านี้ออกที่พ โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า ตามบล็อกของ “instantaneous powers calculation” ดังรูปที่ 2 ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟที่ได้จากการคำนวณ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนที่บ่งบอกถึงปริมาณมูลฐาน (\bar{p}, \bar{q}) หรือเรียกว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณตรง และส่วนที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิก (\tilde{p}, \tilde{q}) หรือเรียกว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณสลับ แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (2)$$

ขั้นที่ 3 : เลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชย โดยการเลือกค่าดังกล่าวในขั้นนี้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการชดเชย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 1

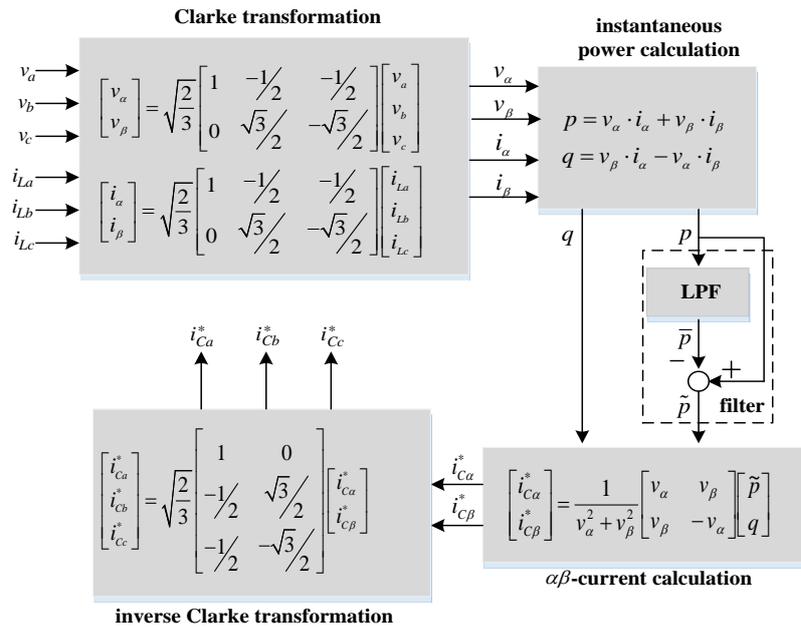
ตารางที่ 1 การระบุค่ากำลังไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์การชดเชย

กรณี	วัตถุประสงค์การชดเชย	กำลังไฟฟ้าที่ชดเชย
1	กำจัดกระแสฮาร์มอนิก	\tilde{p} และ \tilde{q}
2	ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	\bar{q}
3	กำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	\tilde{p} และ q

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง จึงเลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ชดเชยตามกรณีที่ 3 คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณสลับ (\tilde{p}) และกำลังไฟฟ้านี้ออกที่พ ดังนั้น จะต้องแยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณตรง (\bar{p}) ออกจากค่า p โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (low-pass filter : LPF) แสดงได้จากบล็อก “filter” ดังรูปที่ 2 ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ (f_c) ผู้วิจัยได้กำหนดเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ ในส่วนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไม่ได้ผ่านวงจร LPF ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการชดเชยตามวัตถุประสงค์

ขั้นที่ 4 : คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนแอลฟาและเบต้า (i_{Ca}^*, i_{Cb}^*) ตามบล็อกของ “ $\alpha\beta$ - current calculation” ดังรูปที่ 2

ขั้นที่ 5 : คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนสามเฟส ($i_{Ca}^*, i_{Cb}^*, i_{Cc}^*$) ด้วยกฎการแปลงเมตริกซ์คลาร์กผกผัน ตามบล็อกของ “inverse Clark transformation” ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

2.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน

การตรวจจับฮาร์มอนิกจะยังสามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ อย่างไรก็ตาม การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1 เมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิก (บิดเบี้ยว) จะเกิดการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ผิดพลาด จนกระทั่งนำไปสู่สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟลดลง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (Positive Sequence Voltage Detector : PSVD) มาใช้งานร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โครงสร้างการทำงานของ PSVD แสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นที่ 1 : แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC จากปริมาณ 3 เฟส เป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า

ขั้นที่ 2 : คำนวณค่ามุมของแรงดันที่จุด PCC ด้วยวิธีเฟสล็อกลูป (Phase Locked Loop : PLL)

ขั้นที่ 3 : ค่ามุม θ_{PCC} ที่ได้จาก PLL จะถูกนำมาใช้สำหรับคำนวณค่า i_α' และ i_β'

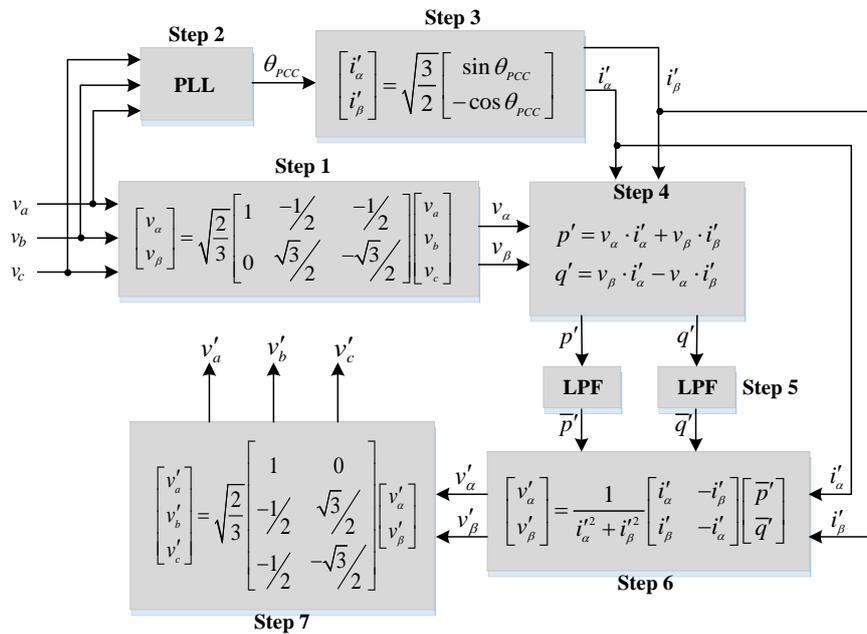
ขั้นที่ 4 : คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p') และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (q')

ขั้นที่ 5 : แยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณตรง (\bar{p}') ออกจากค่า (p') รวมทั้งแยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสัญญาณตรง (\bar{q}') ออกจากค่า (q') โดยใช้วงจร LPF ความถี่ตัดเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งกระบวนการในขั้นนี้จะทำให้มีเฉพาะค่ากำลังไฟฟาลำดับเฟสบวกมูลฐานเท่านั้น

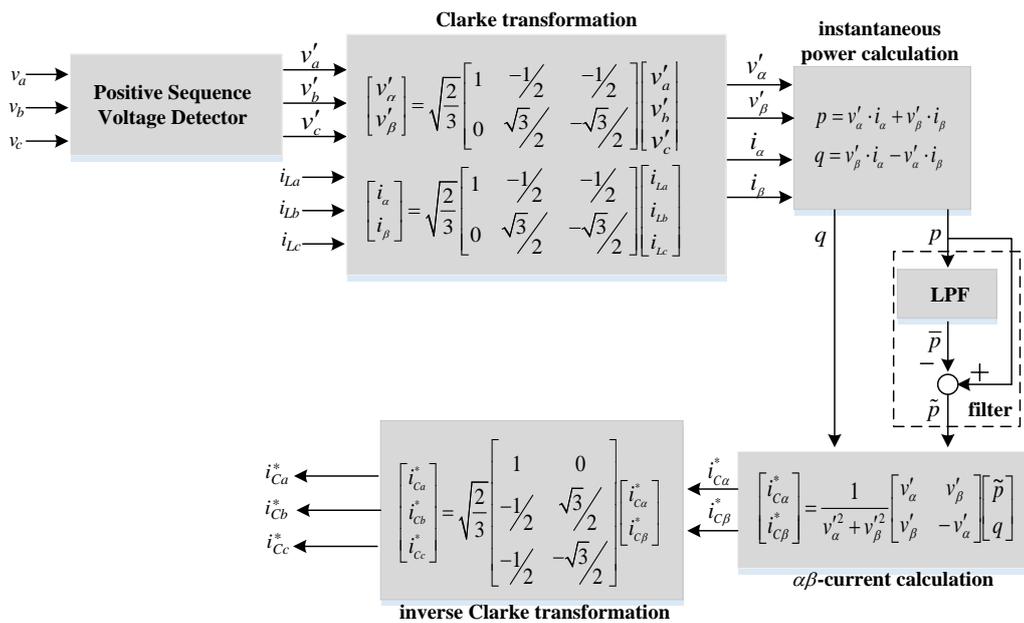
ขั้นที่ 6 : คำนวณค่าแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานบนแกนแอลฟาและเบต้า (v'_α, v'_β) โดยใช้ค่า \bar{p}' และ \bar{q}' ที่ได้จากขั้นที่ 5

ขั้นที่ 7 : คำนวณค่าแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานบนแกนสามเฟส (v'_a, v'_b, v'_c) ด้วยกฎการแปลงเมตริกซ์คลาร์กผกผัน ค่า v'_a, v'_b และ v'_c ที่ได้จะถูกนำไปใช้งานร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ต่อไป

ค่าแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานที่ได้จากวิธี PSVD จะถูกนำไปใช้งานร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ซึ่งสามารถเรียกรวมวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกดังกล่าวได้ว่า “การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (PQ+PSVD)” โดยมีกระบวนการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง แสดงได้ดังรูปที่ 4



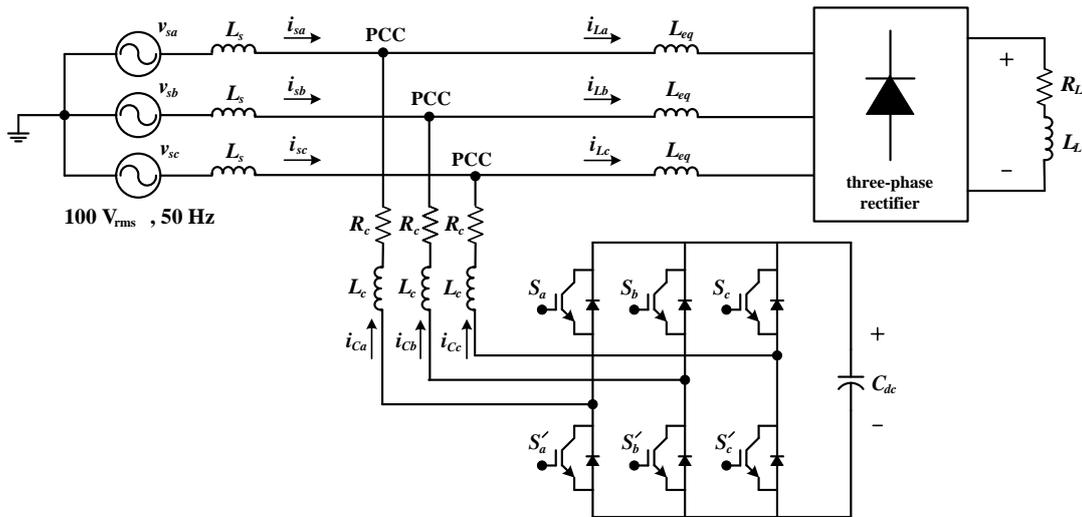
รูปที่ 3 โครงสร้างการทำงานของ PSVD



รูปที่ 4 กระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD

3. การออกแบบระบบควบคุมของวงจรถูกกำลังแอกทีฟ
 ระบบกึ่งตัวนำฮาร์มอนิกด้วยวงจรถูกกำลังแอกทีฟ
 แบบขนานที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5 โดย
 มีลักษณะโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่าย
 แรงดัน ที่ใช้ไอจีบีที ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางด้าน
 อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรดังกล่าวเชื่อมต่อยู่ระหว่าง

แหล่งจ่ายแรงดันและโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่จุด PCC ผ่าน
 ตัวเหนี่ยวนำ (L_c) และตัวต้านทาน (R_c) ทั้งสามเฟส
 โดยมีการฉีดกระแสชดเชย (i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc}) จาก SAPF
 ไปยังจุด PCC ค่ากระแสดังกล่าวถูกนำไปหักลบกับ
 ค่ากระแสที่โหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) เพื่อลดทอนกระแส
 ฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ให้น้อยลง แสดงได้



รูปที่ 5 ระบบกำจัดอาร์มอนิกด้วยวงจรกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ดังสมการที่ (3) การพิจารณาวงจรทางด้านดีซีที่เป็นแหล่งจ่ายของ SAPF พบว่า มีตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานเพื่อใช้สำหรับการฉีดกระแสชดเชย

$$i_{s,k} = i_{L,k} - i_{C,k} ; k = a, b, c \quad (3)$$

3.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

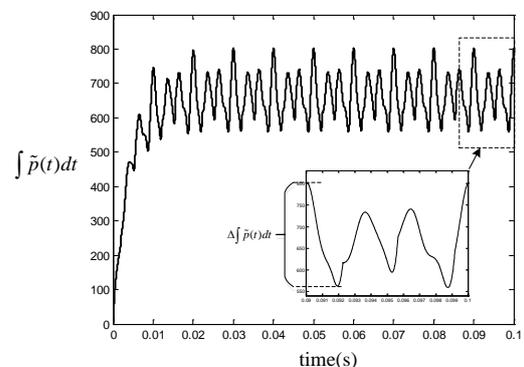
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟประกอบด้วย ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}^*) ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) และค่าความเหนี่ยวนำ (L_c) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีวิธีการดังต่อไปนี้

การออกแบบค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}^*) จะใช้วิธีการเลือกค่าแรงดันที่มีขนาดมากกว่า 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดันที่จุด PCC (ค่ายอดแรงดันที่จุด PCC มีค่าประมาณ 142 V) เนื่องจากต้องการให้ทิศทางการไหลของกระแสชดเชยจาก SAPF ไปยังจุด PCC ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 430 V

ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ที่ใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจร SAPF สามารถออกแบบโดยใช้วิธีการของ Thomas และคณะ [24] ที่ได้นำเสนอขอบเขตค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ($C_{dc,min}$) การเลือกค่า C_{dc} สำหรับวงจร SAPF จะต้องมีค่ามากกว่า $C_{dc,min}$ ซึ่งค่า $C_{dc,min}$ คำนวณ

ได้ดังสมการที่ (4) การออกแบบตามสมการดังกล่าวพิจารณาจากค่ากระแสที่เพิ่มของผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ($\Delta \int \tilde{p}(t) dt$) ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 242.7 นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ ΔV_{dc} มีค่าเท่ากับ 6 โวลต์ (ไม่เกิน 1.5% ของค่าแรงดันบัสไฟตรง) จากผลการออกแบบในสมการที่ (4) ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) เท่ากับ 100 mF

$$C_{dc,min} = \frac{\Delta \int \tilde{p}(t) dt}{\Delta V_{dc} \times V_{dc}^*} = \frac{242.7}{6 \times 430} = 94 \text{ mF} \quad (4)$$



รูปที่ 6 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_c) จะใช้วิธีการของ Ingram และ Round [25] ซึ่งผลการออกแบบค่า L_c ด้วยวิธีดังกล่าว จะได้ขอบเขตความเหนี่ยวนำที่มีขนาดไม่เกินค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{c,max}$) ค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

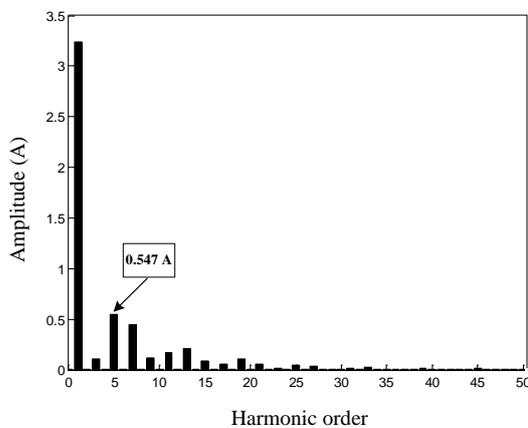
$$L_{c,max} = \frac{V_{dc}^* - V_m}{\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)} \quad (5)$$

โดยที่ V_m คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V)

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = 2\pi f_h I_{h,max}$$

คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดต่อเวลา (A/s)

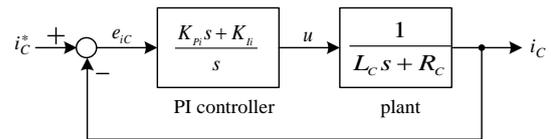
โครงสร้างของวงจร SAPF ที่พิจารณามีค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 430 โวลต์ และค่ายอดแรงดันที่จุด PCC เท่ากับ 142 โวลต์ ในส่วนของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดต่อเวลา สามารถพิจารณาได้จากสเปกตรัมขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า กระแสโพลฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ($f_h = 250$ Hz) มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.547 แอมแปร์ เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (5) จะได้ว่า ค่า $L_{c,max}$ มีค่าเท่ากับ 0.34 เฮนรี ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ L_c เท่ากับ 18 มิลลิเฮนรี



รูปที่ 7 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

3.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานมีด้วยกัน 2 วัตถุประสงค์ คือ การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงแผนภาพไดอะแกรมของระบบได้ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพไดอะแกรมในรูปที่ 8 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน ($T_i(s)$) ของระบบควบคุมกระแสชดเชยได้ดังสมการที่ (6) เมื่อพิจารณาการออกแบบค่า K_{pi} และ K_i โดยใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอน $T_i(s)$ กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ดังสมการที่ (7) ผลการเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า K_{pi} และ K_i สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการที่ (8) และ (9) สามารถคำนวณได้ว่า $K_{pi} = 399.7991$ และ $K_i = 4.4413 \times 10^6$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบที่พิจารณา

$$T_i(s) = \frac{i_c}{i_c^*} = \frac{K_{pi}}{K_i} \left[\frac{s + \frac{K_i}{K_{pi}}}{s^2 + \left(\frac{R_c + K_{pi}}{L_c}\right)s + \frac{K_i}{L_c}} \right] \quad (6)$$

$$G(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (7)$$

$$K_{pi} = 2\zeta\omega_{ni}L_c - R_c \quad (8)$$

$$K_i = \omega_{ni}^2L_c \quad (9)$$

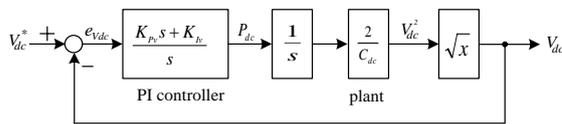
โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{\sqrt{2}}{2}$
 ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของตัวควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi f_{h,\max}$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะทำการออกแบบโดยอาศัยสมการพลังงานที่ตัวเก็บประจุ (E_{dc}) ของวงจร VSI แสดงได้ดังสมการที่ (10) จากสมการดังกล่าว สามารถพิจารณาค่าแรงดันบัสไฟตรงได้ดังสมการที่ (11)

$$E_{dc} = \int p_{dc}(t) dt = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \quad (10)$$

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{2}{C_{dc}} \int p_{dc}(t) dt} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) สามารถนำไปเขียนแผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

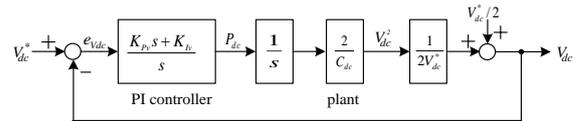
จากรูปที่ 9 สังเกตได้ว่า ภายในแผนภาพไดอะแกรมมีส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น คือ บล็อกการหาค่ารากที่สองของค่า x ใด ๆ ดังนั้น เพื่อให้ระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบเชิงเส้น จึงใช้การประมาณการหาค่ารากที่สองด้วยการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ [26] ดังสมการที่ (12)

$$\sqrt{x} \approx \frac{\sqrt{x_0}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} x \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) การหาค่ารากที่สองของ V_{dc}^2 ทำได้โดยแทนค่า $\sqrt{x_0}$ เท่ากับ V_{dc}^* และค่า x เท่ากับ V_{dc}^2

แสดงได้ดังสมการที่ (13) จากสมการดังกล่าวสามารถนำมาเขียนแผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ได้ใหม่ดังรูปที่ 10

$$V_{dc} \approx \frac{V_{dc}^*}{2} + \frac{1}{2V_{dc}^*} V_{dc}^2 \quad (13)$$



รูปที่ 10 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยการประมาณค่ารากที่สองด้วยอนุกรมเทย์เลอร์

จากแผนภาพไดอะแกรมในรูปที่ 10 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน ($T_v(s)$) ของระบบได้ดังสมการที่ (14)

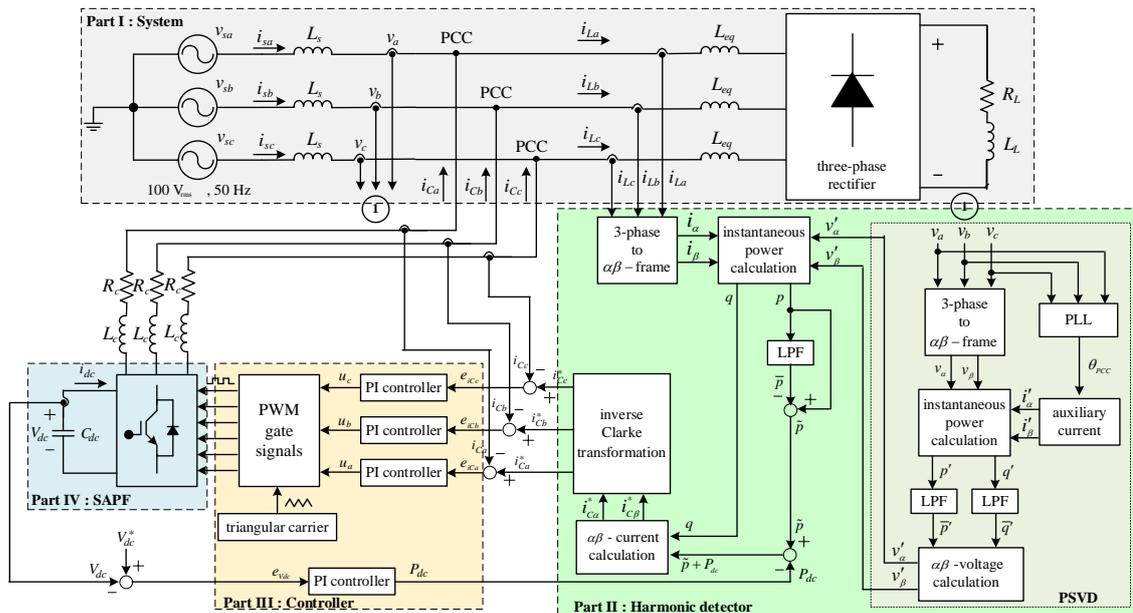
$$T_v(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \left[\frac{\frac{s^2}{2} + AK_{pv}s + AK_{iv}}{s^2 + AK_{pv}s + AK_{iv}} \right]; A = \frac{1}{C_{dc} V_{dc}^*} \quad (14)$$

การออกแบบค่า K_{pv} และ K_{iv} ของตัวควบคุมพีไอ จะใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอน $T_v(s)$ กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังสมการที่ (7) โดยผลการเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า K_{pv} เท่ากับ 114.6667 และ K_{iv} เท่ากับ 152.9351 สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

$$K_{pv} = \frac{2\zeta\omega_n}{A} = 2\zeta\omega_n C_{dc} V_{dc}^* \quad (15)$$

$$K_{iv} = \frac{\omega_n^2}{A} = \omega_n^2 C_{dc} V_{dc}^* \quad (16)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{\sqrt{2}}{2}$



รูปที่ 11 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{4}{T_s \zeta}$ เมื่อพิจารณาให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ สถานะอยู่ตัว (e_{ss}) มีค่าเท่ากับ $\pm 2\%$

T_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 3 วินาที

4. การจำลองสถานการณ์และอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาในบทความนี้ จะใช้โปรแกรม Matlab Simulink โดยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 11 จากรูปดังกล่าวประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ สามารถปรับค่ายอด ความถี่ และมุมเฟสได้ ทำให้สามารถกำหนด $\%THD_{v,av}$ ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายได้ตามความต้องการ โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้ามีขนาด $100 V_{rms}$ ความถี่ 50 Hz เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าง่ายดังกล่าวมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างระบบฮาร์ดแวร์ในอนาคต นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าและ

ความถี่ไม่มีผลต่อการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD ระบบไฟฟ้าง่ายดังกล่าวต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีภาระโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส (ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน) เนื่องจาก ในบทความนี้พิจารณาการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน จึงเลือกใช้โหลดทางไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 การตรวจจับฮาร์มอนิก ทำหน้าที่คำนวณค่ากระแสอ้างอิง ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ด้วยวิธี PQ+PSVD

ส่วนที่ 3 ระบบควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้แก่ การควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรง โดยใช้ตัวควบคุมพีโอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM

ส่วนที่ 4 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 11 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการออกแบบตามที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3 ผลการจำลองสถานการณ์

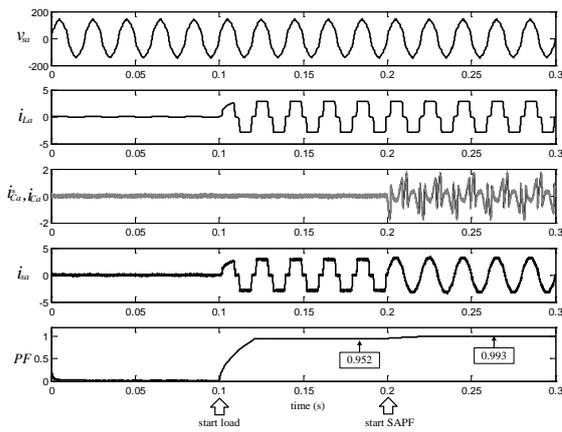
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
1. ระบบไฟฟ้า	$v_s = 100 \text{ V}_{\text{rms}}$, 50 Hz $L_s = 0.01 \text{ mH}$ $L_{eq} = 3 \text{ mH}$
2. โหลดวงจรเรียงกระแส	$R_L = 62, 80, 120 \ \Omega$ $L_L = 300 \text{ mH}$
3. วงจรรอกำลังแกกทีฟ	$V_{dc}^* = 430 \text{ V}$ $C_{dc} = 100 \text{ mF}$ $L_C = 18 \text{ mH}$
4. ความถี่การสวิตช์	$f_{sw} = 5 \text{ kHz}$
5. ตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย	$K_{pi} = 399.7991$ $K_{fi} = 4.4413 \times 10^6$
6. ตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	$K_{pv} = 114.6667$ $K_{iv} = 152.9351$

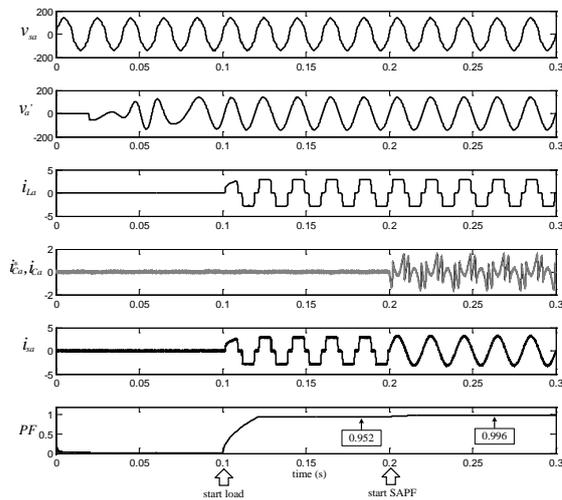
การกำจัดฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 12 และ 13 จากรูปดังกล่าวได้ยกตัวอย่างระบบไฟฟ้าในเฟส a ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 12 เป็นกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ไม่มีอัลกอริทึม PSVD ส่วนรูปที่ 13 เป็นกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD โดยใช้โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีภาระโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน จากผลจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณี สังเกตได้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ โดยมีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 10% ในช่วงแรกตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที ไม่มีการต่อโหลด ทำให้ไม่มีกระแสฮาร์มอนิกเกิดขึ้น ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.1 ถึง 0.2 วินาที มีการต่อโหลดเข้าสู่ระบบ เรียกว่า “ช่วงก่อนการชดเชย” รูปสัญญาณ i_{sa} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากคลื่นรูปไซน์เช่นเดียวกับรูปสัญญาณ i_{La} โดยที่ $\%THD_{i,av}$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับ 26.90% และค่า PF เท่ากับ 0.952 อย่างไรก็ตามภายหลังการต่อ SAPF เข้าสู่ระบบ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.3 วินาที หรือเรียกว่า “ช่วงหลังการชดเชย” ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแสชดเชย i_{ca} ให้มีค่าใกล้เคียงกับ i_{ca}^* แสดง

ได้จากรูปสัญญาณ i_{ca} มีลักษณะคล้ายตาม i_{ca}^* ดังรูปที่ 14 ซึ่งสัญญาณ i_{ca} จะถูกฉีดเข้าสู่จุด PCC ดังนั้นสัญญาณ i_{sa} ภายหลังการชดเชยจึงมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย โดยที่ $\%THD_{i,av}$ ของกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ไม่มีอัลกอริทึม PSVD มีค่าเท่ากับ 6.61% ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าข้อกำหนดของ IEEE Std.519 -2014 และค่า PF เท่ากับ 0.993 ในส่วนของกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD มีค่า $\%THD_{i,av}$ ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 2.91% และค่า PF เท่ากับ 0.996 จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณี แสดงให้เห็นว่า ค่า $\%THD_{i,av}$ ภายหลังการชดเชยจะมีค่ามากหรือน้อย มีปัจจัยหลักจากผลทางด้านกระบวนการคำนวณค่า i_{ca}^* ซึ่งในกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ไม่มีอัลกอริทึม PSVD ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการคำนวณ i_{ca}^* เนื่องจากการคำนวณกระแสอ้างอิงได้นำแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะบิดเบี้ยวมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น การแก้ไขจุดบกพร่องสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ จึงมีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับอัลกอริทึม PSVD ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ไม่บิดเบี้ยว แสดงได้ดังรูปสัญญาณ v_a' จากรูปสัญญาณดังกล่าวสังเกตได้ว่า เมื่อใช้อัลกอริทึม PSVD จะส่งผลให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_a', v_b', v_c') ที่ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ไม่บิดเบี้ยว การแปลงค่า v_a', v_b', v_c' จากปริมาณสามเฟสเป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกนแอลฟาเบต้า (v_α', v_β') จึงไม่มีผลกระทบจากความบิดเบี้ยวของแรงดันแหล่งจ่าย ส่งผลให้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD มีการคำนวณกระแสอ้างอิงที่มีความถูกต้อง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแกกทีฟแบบขนาน ผลของการแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าวทำให้ $\%THD_{i,av}$ มีค่าลดลง จาก 6.61% เป็น 2.91% และค่าดังกล่าวเป็นค่าที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ IEEE Std.519 -2014

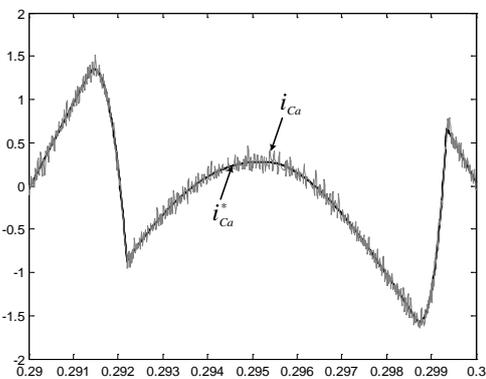
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2562



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่มีอัลกอริทึม PSVD

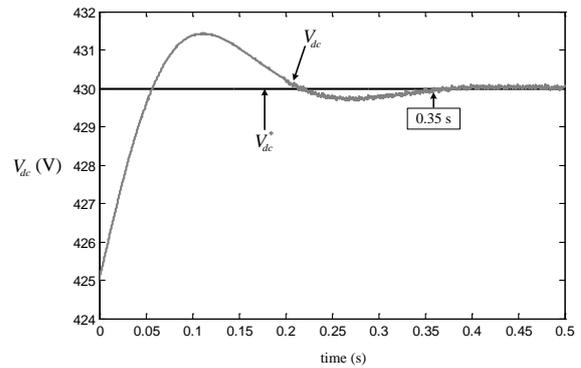


รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับอัลกอริทึม PSVD



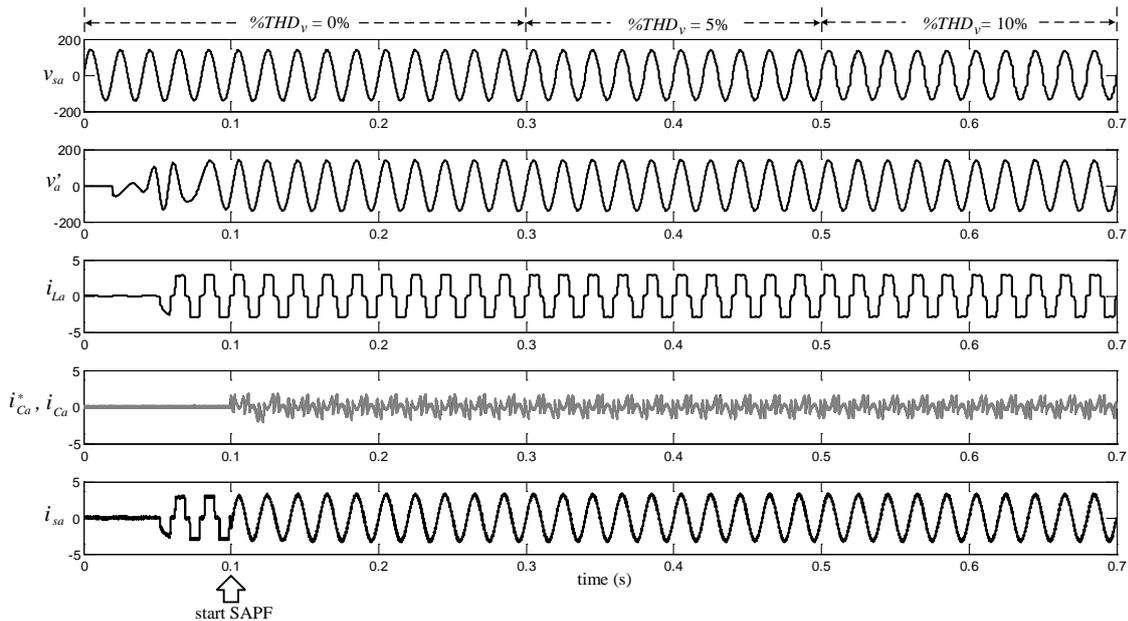
รูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมกระแสชดเชย

นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ในรูปที่ 15 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่า V_{dc} ให้ตรงตามค่า V_{dc}^* ที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เวลาลู่เข้าประมาณ 0.35 วินาที



รูปที่ 15 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

การยืนยันสมรรถนะตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในบทความนี้ได้ทำการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะความบิดเบี้ยวของรูปสัญญาณ โดยแบ่งการจำลองสถานการณ์เป็นสามช่วง ได้แก่ ช่วงแรกตั้งแต่วเวลา 0 ถึง 0.3 วินาที คือ ช่วงที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสมีลักษณะไม่บิดเบี้ยว มีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0% ช่วงที่สองตั้งแต่วเวลา 0.3 ถึง 0.5 วินาที คือ ช่วงที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสมีลักษณะบิดเบี้ยว โดยมีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 5% และช่วงสุดท้ายตั้งแต่วเวลา 0.5 ถึง 0.7 วินาที คือ ช่วงที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสมีลักษณะบิดเบี้ยวมากขึ้น ซึ่ง $\%THD_{v,av}$ มีค่าเท่ากับ 10% โดยยังคงใช้โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีภาระโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณาตั้งตารางที่ 2 ดั้งเดิม ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 16 จากรูปดังกล่าว พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD ที่นำเสนอสามารถคำนวณ

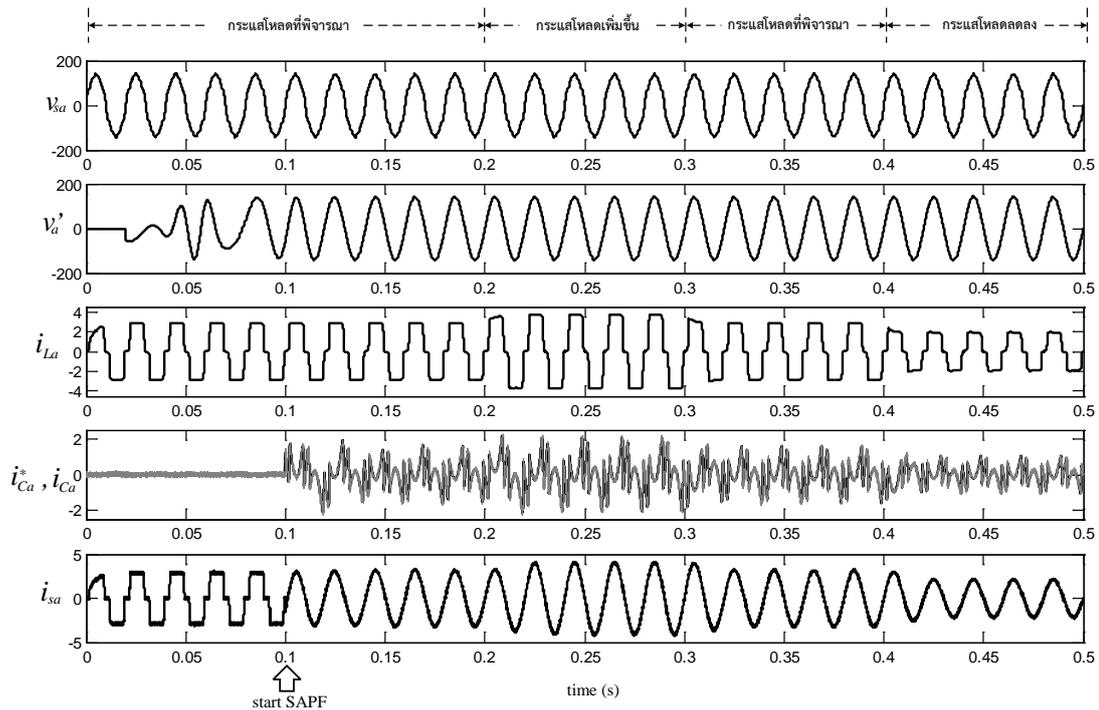


รูปที่ 16 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก เมื่อ $\%THD_{v,av}$ ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง

ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้ถูกต้อง ทั้งสามช่วงของการจำลองสถานการณ์ โดยพิจารณาจากรูปสัญญาณ v'_a มีลักษณะเป็นรูปไซน์ถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลง $\%THD_{v,av}$ ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และพิจารณาจากรูปสัญญาณ i_{sa} ที่มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย ทุกช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลง $\%THD_{v,av}$ โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ ของกระแสที่แหล่งจ่าย ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยทั้งสามช่วงของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเท่ากับ 2.89% 2.87% และ 2.91% ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นำเสนอข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD มีสมรรถนะที่ดีในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันมีลักษณะบิดเบี้ยว แม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันจะมี $\%THD_{v,av}$ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง

การยืนยันสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในบทความนี้ได้ทำการทดสอบสมรรถนะในกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยแบ่งการทดสอบเป็นสามช่วง ได้แก่

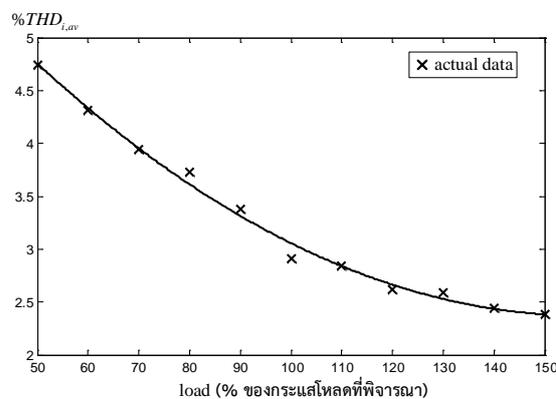
ช่วงที่หนึ่ง ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.2 วินาที คือ ช่วงกระแสโหลดที่พิจารณา ($R_L = 80 \Omega$) ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.2 ถึง 0.3 วินาที คือ ช่วงที่มีการเพิ่มกระแสโหลด ($R_L = 62 \Omega$) และช่วงที่สามตั้งแต่เวลา 0.4 ถึง 0.5 วินาที คือ ช่วงที่มีการลดกระแสโหลด ($R_L = 120 \Omega$) โดยใช้ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว มีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 10% และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณาดังตารางที่ 2 ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 17 ซึ่งสังเกตได้ว่า ทั้งสามช่วงของการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแสชดเชย i_{Ca} ให้มีค่าใกล้เคียงกับ i_{Ca}^* ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{sa}) เป็นคลื่นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ ของทั้งสามช่วงการทดสอบภายหลังการชดเชยเท่ากับ 3.29% ซึ่งลดลงจากก่อนการชดเชยที่มีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 27.79% นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดตั้งแต่ 50% ถึง 150% ของกระแสโหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว มีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 10% และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 2 ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

จากรูปดังกล่าว พบว่า เมื่อกระแสโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา วงจรกรองกำลังแอกทีฟยังสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้ ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย โดย $\%THD_{i_{av}}$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีค่าต่ำกว่า 5% ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE Std.519-2014

จากผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยการจำลองสถานการณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้นำเสนอ มีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว ถึงแม้ว่ากระแสโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น หรือลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณาก็ตาม



รูปที่ 18 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 50% ถึง 150% ของกระแสโหลดที่พิจารณา

5. สรุป

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD เป็นวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งสำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ดีกับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปสัญญาณไซน์ หรือบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ แต่การใช้งานการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย PQ+PSVD ควรออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา เนื่องจากความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ มีผลต่อสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของระบบ การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่นำเสนอ

อาศัยจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Matlab Simulink ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ปรากฏว่า วงจรกรองกำลัง แอกทีฟแบบขนานที่ได้นำเสนอ มีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว ถึงแม้ว่ากระแสโพลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากกระแสโพลต์ที่พิจารณา โดยพิจารณาจากค่า $\%THD_{i,av}$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย และค่า $\%THD_{i,av}$ ภายหลังการชดเชยดังกล่าวยังอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std.519-2014 และ IEEE std.1459-2010

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Indrajit, and J. S. Paul, "Effect of Harmonic on Power Measurement," *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*, 1989, pp. 129-132.
- [2] B. M. Elham, L. W. Clarence, and A. G. Adly, "A Harmonic Analysis of the Induction watt-hour Meter's Registration Error," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 7, pp. 1080-1088, July 1992.
- [3] D. E. Rice, "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics – Their Effect on Power Systems Components," *IEEE Transaction on Industrial*, vol. 22, pp. 161-177, Jan 1986.
- [4] V. E. Wagner, "Effects of Harmonics on Equipment," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, Apr 1993.
- [5] J. M. Ho, and C. C. Liu, "The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer," *IEE International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Amsterdam, Netherlands, 2001.
- [6] B. Singh, K. A. Haddad, and A. Chandra, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, Oct 1999.
- [7] C. A. Quinn, and N. Mohan, "Active Filtering of Harmonic Currents in Three-phase, Four-Wire Systems with Three-phase and Single-phase Non-Linear Loads," *IEEE-APEC'92 Appl. Power Electronics Conference*, 1992, pp. 829-836.
- [8] H. Akagi, "New Trends in Active Filters," *In EPE'95-European Conference Power Electronics Appl.*, Sevilla, Spain, 1995, pp. 17-26.
- [9] H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination of Radial Power Distribution Line," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 35, no. 3, pp. 638-645, May 1999.
- [10] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, May 1984.
- [11] M. Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto, and T. Aritsuka, "Harmonic Current and Reactive power compensation with an Active filter," *19th Annual IEEE Power Electronics*

- Specialists Conference*, Kyoto, Japan, 1988, pp. 1174-1179.
- [12] G. W. Chang, S. K. Chen, and M. Chu, "An Efficient a-b-c Reference Frame-Based Compensation Strategy for Three-Phase Active Power Filter Control," *Electric Power Systems Research*, vol. 60, pp. 161-166, Jan 2002.
- [13] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. John Wiley & Sons, 2007.
- [14] O. Abdelkhalek, 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.
- [15] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, Nov 1984.
- [16] Y. Hayachi, N. Sato, and K. Takahashi, "A Novel Control of a Current Source Active Filter for AC Power System Harmonic Compensation," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 27, no. 2, pp. 380-384, Aug 2002.
- [17] A. Zouidi, F. Fnaiech, and K. Al-Haddad, "Voltage source Inverter Based three-phase shunt active Power Filter: Topology, Modeling and Control Strategies," *IEEE-ISIE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 785-790, 2006.
- [18] M. Routimo, M. Salo, and H. Tuusa, "Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 636-643, 2007.
- [19] P. Santiprapan, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "Mathematical Model and Control Strategy on DQ Frame for Shunt Active Power Filters," *World Academy of Science Engineering and Technology*, vol. 60, pp. 353-361, 2001.
- [20] T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "Optimal Design of Shunt Active Power Filters Using a Particle Swarm Optimization," *International Review on Modelling & Simulations*, vol. 4, pp. 2871-2878, 2011.
- [21] T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "Adaptive Fuzzy Control for Shunt Active Power Filters," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, no. 6, pp. 646-657, 2016.
- [22] S. Rahmani, N. Mendalek, and K. Al-Haddad, "Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 3364-3375, Jan 2010.
- [23] 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.
- [24] T. Thomas, K. Haddad, G. Joos, and A. Jaafari, "Design and Performance of Active Power Filters," *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 4, pp. 38-46, Sep 1998.

- [25] D. M. E. Ingram, and S. D. Round, "A Novel Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter," *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, 1997, vol. 2, pp. 744-749.
- [26] J. Eakburanawat, P. Darapong, U. Yangyuen, and S. Po-ngam, "A Simple Control Scheme of Single Phase Universal Active Filter for Power Quality Improvement," *In 2004 IEEE Region 10 Conference TENCN*, Chiang Mai, Thailand, 2004, pp. 248-251.