

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

สุทธิณี ว้าวสูงเนิน¹ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์^{2*} กองพล อารีรักษ์³

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

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : tosaporn@sut.ac.th

รับต้นฉบับ: 27 เมษายน 2564; รับบทความฉบับแก้ไข: 29 เมษายน 2564; ตอรับบทความ: 1 มิถุนายน 2564

เผยแพร่ออนไลน์: 25 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) สำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) สำหรับใช้ควบคุมการผิดกระแสของวงจร การออกแบบได้ประยุกต์ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อน การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้ออกแบบจะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยผลการจำลองสถานการณ์ยืนยันว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะการทำงานที่ดี สามารถผิดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่พิจารณาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงและเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std 519-2014

คำสำคัญ : การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การตรวจจับฮาร์มอนิก การกำจัดฮาร์มอนิก การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

Design of a Shunt Active Power Filter for Single-Phase Power Systems

Sutthinee Waosungnern¹ Tosaporn Narongrit^{2*} Kongpol Areerak³

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

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

Received: 27 April 2021; Revised: 29 April 2021; Accepted: 1 June 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

This paper presents the design of a shunt active power filter (SAPF) for harmonic elimination in single-phase power systems. The parameters of the shunt active power filter and PI controllers for the compensating current injection control are considered to design. The conventional design method depended on an easy and uncomplicated calculation is applied for this paper. The MATLAB/Simulink program is used to simulate the harmonic elimination system for the performance testing of SAPF. The simulation results confirm that the SAPF and PI controllers designed by the proposed method can provide good performance to inject the compensating current for harmonic elimination in single-phase power system. Moreover, the total harmonic current distortion percentage (%THD_i) of the source current after compensation is reduced and satisfied under the IEEE std 519-2014.

Keywords: Active power filter design, Active power filter, Harmonic detection, Harmonic elimination, Improve power quality

1) บทนำ

ปัจจุบันระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสในโรงงานอุตสาหกรรม สถานประกอบการ และที่พักอาศัย ได้มีการใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Loads) จำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ วงจรเรียงกระแส อุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบอาร์ก หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น [1] ซึ่งการใช้งานโหลดประเภทดังกล่าวเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบและส่งผลเสียหลายประการ เช่น เกิดสัญญาณรบกวนในวงจรสื่อสาร อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด [2] เกิดความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลง [3] เป็นต้น จากผลเสียดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดฮาร์มอนิกให้หมดหรือลดลงเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี คือ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter) การใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Active Power Filter) และการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ (Hybrid Power Filter) อย่างไรก็ตามบทความนี้ได้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ซึ่งเป็นวิธีกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบและไม่ก่อให้เกิดปัญหาจากสถานะเรโซแนนซ์ซึ่งพบในวิธีกำจัดฮาร์มอนิกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟ [4], [5] การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 1 โดยระบบควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอคทีฟจะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญสำหรับส่วนแรกคือ การตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic Detection) ใช้คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกอ้างอิงในการชดเชยซึ่งในบทความนี้เลือกใช้วิธีซิงโครนัส (Synchronous Detection: SD) [6] เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับและมีรูปแบบการคำนวณที่ง่าย ส่วนที่สองคือ การควบคุมกระแสชดเชย (Compensating Current Control) สำหรับควบคุมวงจรกรองกำลังแอคทีฟให้สามารถชดเชยได้ตามลักษณะตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงและส่วนสุดท้ายคือ การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟให้มีค่าคงที่ตามค่าแรงดันอ้างอิงที่ออกแบบไว้เพื่อให้วงจรมีพลังงานในการชดเชย

เข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยในบทความนี้การควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน สามารถออกแบบได้ง่าย และให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีเพียงพอ [5], [7] นอกจากนี้เพื่อให้การกำจัดฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพที่ดีจำเป็นต้องออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (ค่า V_{DC} , ค่า L_f และค่า C_{DC}) และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_p และ K_i) ของระบบควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสม [8]–[10] ในบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยประยุกต์ใช้วิธีการดั้งเดิมซึ่งสามารถดูรายละเอียดวิธีการออกแบบทั้งหมดได้จากหัวข้อที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

การนำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วยหัวข้อที่ 3 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง หัวข้อที่ 5 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล และหัวข้อสุดท้าย คือ การสรุปผลของบทความ

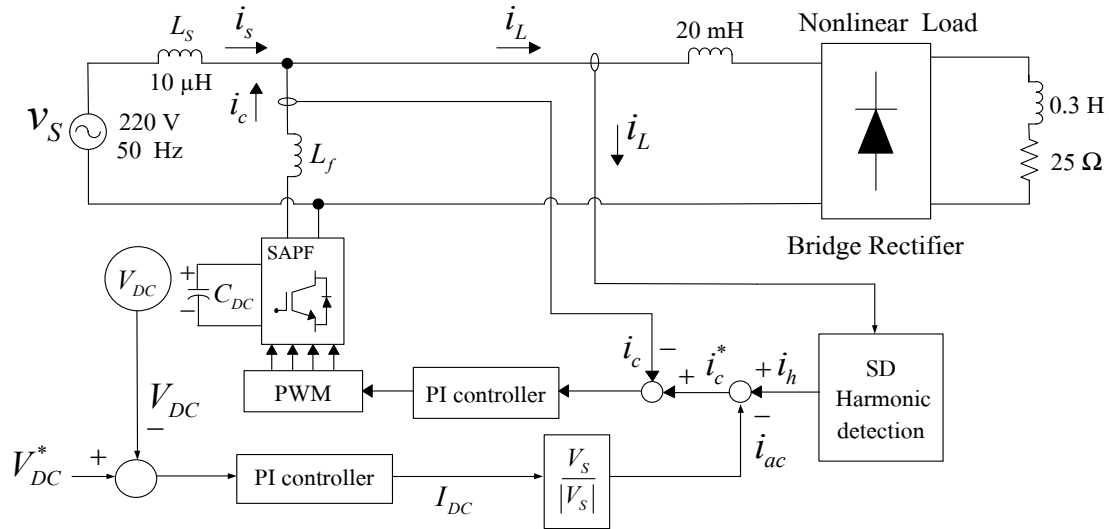
2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ความรู้ด้านการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส
2. เพื่อศึกษาองค์ความรู้วิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส
3. เพื่อจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB

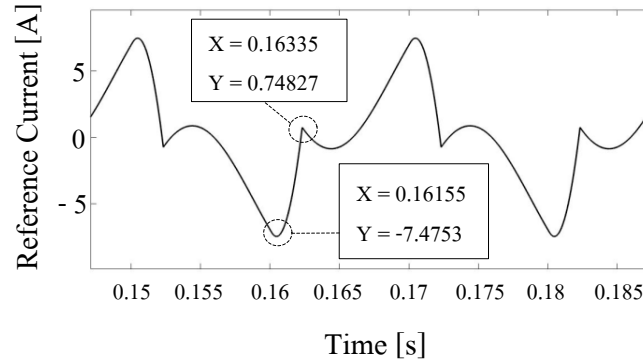
- 3) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

3.1) การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานจะใช้วิธีการของ Ingram และ Round [8], [9] ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบจะได้ขอบเขตขนาด ตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,max}$) จากนั้นจึงเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 1 ระบบการกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสอ้างอิงกับเวลา

ที่เหมาะสมที่มีขนาดไม่เกิน $L_{f,max}$ โดยรายละเอียดการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุดเทียบกับเวลา ($\max(di_c^*/dt)$) ซึ่งสามารถประมาณได้จากความชันสูงสุดของรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับด้วยวิธี SD [6] ดังสมการที่ (1)

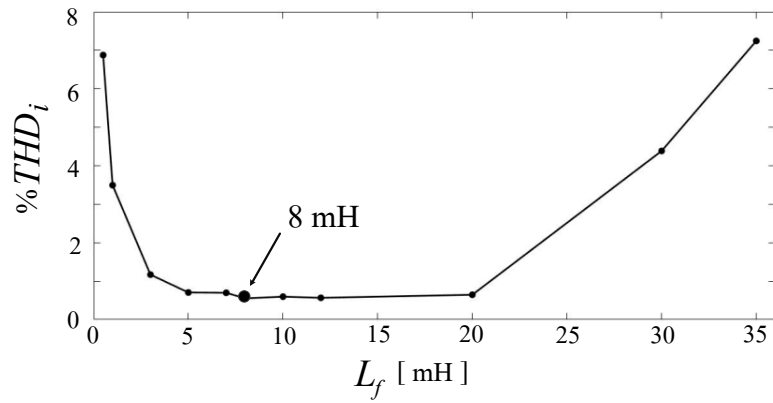
$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) \approx \max\left(\frac{\Delta i_c^*}{\Delta t}\right) \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) เมื่อพิจารณารูปสัญญาณของกระแสอ้างอิง (i_c^*) ของระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 2 จะสามารถประมาณหาค่า $\max(di_c^*/dt)$ ได้เท่ากับ 4568.65 A/s ดังนี้

$$\max\left(\frac{\Delta i_c^*}{\Delta t}\right) = \frac{0.74827 - (-7.4753)}{0.16335 - 0.16155} = 4568.65 \text{ A/s}$$

ขั้นที่ 2 คำนวณหาตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,max}$) โดยใช้สมการที่ (2)

$$L_{f,max} = \frac{V_{DC} - V_{PCC}}{\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)} \quad (2)$$



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า L_f และค่า %THD_i

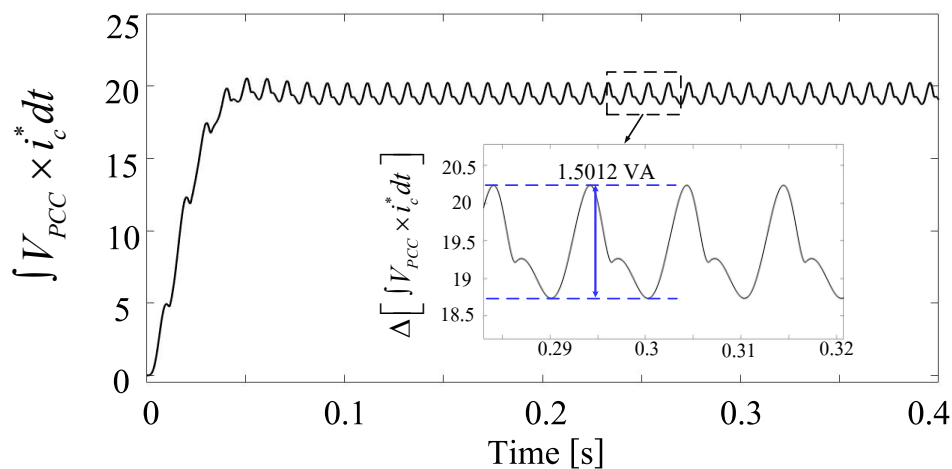
โดยที่ V_{PCC} คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC

V_{DC} คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

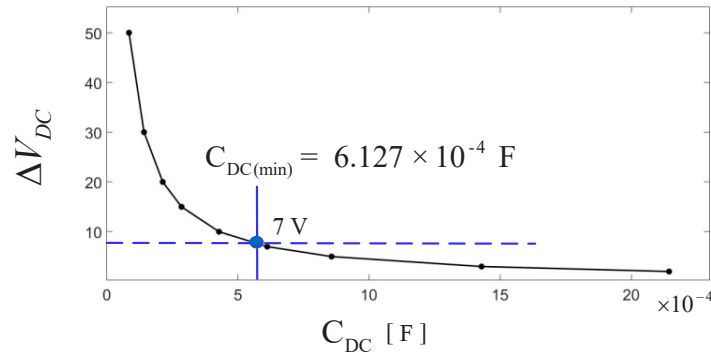
จากสมการที่ (2) V_{PCC} ของระบบที่พิจารณามีค่าเท่ากับ $\sqrt{2} (220) \text{ V}$ และค่า V_{DC} ควรออกแบบให้มีค่ามากกว่าค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC สำหรับบทความนี้ได้ออกแบบให้ V_{DC} มีค่าเท่ากับ 350 V ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า $L_{f,max}$ ได้เท่ากับ 8.51 mH ดังนี้

$$L_{f,max} = \frac{350 - (\sqrt{2} \times 220)}{4594.173} = 8.51 \text{ mH}$$

ขั้นที่ 3 กำหนดเลือกใช้ค่า L_f ที่มีขนาดไม่เกิน $L_{f,max}$ ซึ่งบทความนี้ใช้วิธีการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า L_f ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อเลือกค่า L_f ที่เหมาะสมโดยใช้ค่า %THD_i หลังการชดเชยเป็นตัวชี้วัด ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยพบว่าค่า L_f ที่ส่งผลให้วงจรรบกวนกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบได้ดีที่สุดหรือให้ค่า %THD_i ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 8 mH ดังนั้นบทความนี้จึงเลือกใช้ค่า L_f เท่ากับ 8 mH



รูปที่ 4 การคำนวณหาค่า $\Delta[\int V_{PCC} \times i_c^* dt]$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{DC} และค่า ΔV_{DC}

3.2) การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (C_{DC}) สำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานเพื่อจ่ายแรงดันให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะใช้วิธีการออกแบบของ Thomas [8], [10] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบจะเป็นค่าขอบเขตที่ต่ำสุดของตัวเก็บประจุ ($C_{DC,min}$) จากนั้นจึงดำเนินการเลือกค่า C_{DC} ที่เหมาะสมภายใต้ขอบเขตของ $C_{DC,min}$ อีกครั้ง โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุต่ำที่สุด ($C_{DC,min}$) จากสมการที่ (3)

$$C_{DC,min} = \frac{\Delta \left[\int V_{PCC} \times i_c^* dt \right]}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} \quad (3)$$

โดยที่ V_{DC}^* ได้จากการออกแบบเท่ากับ 350 V และกำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดัน (ΔV_{DC}) เท่ากับ 7 V และค่า $\Delta \left[\int V_{PCC} \times i_c^* dt \right]$ คือ ค่าขนาดการกระเพื่อมของทอมปริพันธ์ผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (V_{PCC}) กับกระแสอ้างอิง (i_c^*) ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังรูปที่ IV ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.5012 VA ดังนั้นจากสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณหาค่า $C_{DC,min}$ ได้เท่ากับ 0.6127 mF ดังนี้

$$C_{DC,min} = \frac{1.5012}{7 \times 350} = 0.6127 \text{ mF}$$

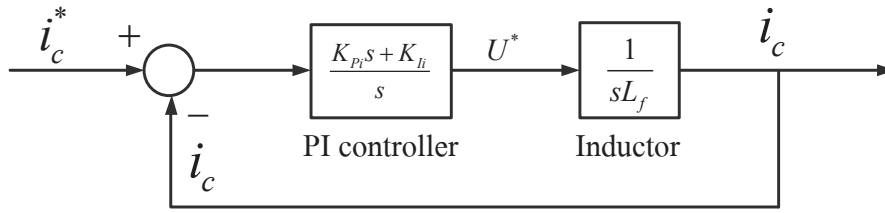
ขั้นที่ 2 กำหนดเลือกใช้ค่า C_{DC} ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มากกว่าค่า $C_{DC,min}$ ซึ่งบทความนี้ใช้วิธีการทดสอบ

ปรับเปลี่ยนค่า C_{DC} ที่ขนาดต่าง ๆ เทียบกับค่า ΔV_{DC} และเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ V ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อปรับค่า C_{DC} เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ΔV_{DC} จะลดลง และในบทความนี้เลือกใช้ค่า C_{DC} เท่ากับ 1.5 mF เนื่องจากคำนึงถึงสมรรถนะการลดกระแสชดเชยของวงจร SAPF ระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวของค่า V_{DC} และค่าแรงดันกระแสเพื่ออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยไม่เกิน 7 V (2%)

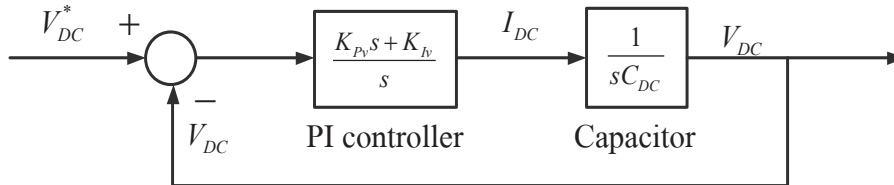
4) การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

4.1) การออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชย

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ เป็นวิธีที่ได้ประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี และง่ายต่อการออกแบบ [7], [8] โดยการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอจะต้องมีการทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อสร้างพัลส์ควบคุมการสวิตช์อุปกรณ์ IGBT ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6 จากรูปดังกล่าว ผลต่างระหว่างค่ากระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับค่ากระแสชดเชย (i_c) ที่ฉีดโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะถูกป้อนเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ และกำหนดให้เอาต์พุตเป็นค่าแรงดันอ้างอิง (U^*) สำหรับนำไปผ่านพลาเน็ต (Plant) ตัวเหี่ยววนาเพื่อจำลองค่ากระแสชดเชย (i_c) ทางฝั่งเอาต์พุต



รูปที่ 6 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสขดเคย์



รูปที่ 7 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด (Closed-loop transfer function) แสดงได้ดังสมการที่ (4) การออกแบบตัวควบคุมพีไอจะใช้วิธีการประมาณโดยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมดังสมการที่ (4) กับฟังก์ชันถ่ายโอนมาตรฐานอันดับสองดังสมการที่ (5) ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังกล่าวจะทำให้ได้สมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_{pi} และ K_{li} ของตัวควบคุมพีไอแสดงดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$\frac{i_c}{i_c^*} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{li}}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pi}}{L_f} \right)s + \frac{K_{li}}{L_f}} \quad (4)$$

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta s\omega_n + \omega_n^2} \quad (5)$$

$$K_{pi} = 2\zeta_i \omega_{ni} L_f \quad (6)$$

$$K_{li} = \omega_{ni}^2 L_f \quad (7)$$

โดยที่ ζ_i คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูกระแส (damping ratio)

ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของกระแสขดเคย์ (natural frequency)

จากสมการที่(6) และ (7) สำหรับการออกแบบค่า ω_{ni} จะพิจารณาจากค่าความถี่ฮาร์โมนิกอันดับสูงสุดที่ต้องการกำจัด ($f_{h,max}$) ซึ่งบทความนี้พิจารณาจำกัดฮาร์โมนิกสูงสุดที่อันดับ 50 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 2500 Hz ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า ω_{ni} ตามสมการที่ (8) ได้เท่ากับ $2\pi \times 2500$ rad/s และสำหรับค่า ζ_i จะกำหนดให้เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ เนื่องจากต้องการให้การควบคุมกระแสขดเคย์มีผลการตอบสนองที่รวดเร็วและไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ที่สูงเกินไป

$$\omega_{ni} = 2\pi f_{h,max} \quad (8)$$

จากค่า ω_{ni} และค่า ζ_i ดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า K_{pi} ได้เท่ากับ 177.688 และ K_{li} ได้เท่ากับ 1973920.88

4.2) การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรง

การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีโอแสดงในรูปที่ 1 สามารถแสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 7 ผลต่างระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าตรงอ้างอิง (V_{DC}^*) กับค่าแรงดันไฟฟ้าตรงตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (V_{DC}) จะถูกป้อนเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีโอ เพื่อให้ได้ค่ากระแสไหลผ่านพลาต (Plant) ตัวเก็บประจุ C_{DC} เพื่อจำลองเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตรง (V_{DC}) ทางฝั่งเอาต์พุตจากระบบดังกล่าวสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (9) ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนมาตรฐานอันดับสอง (สมการที่ (5)) เพื่อหาสมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_{Pv} และค่า K_{Iv} ของตัวควบคุมพีโอ [7], [8] โดยผลการเปรียบเทียบบ่งชี้ว่าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{\left(s + \frac{K_{Pv}}{K_{Iv}}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{Pv}}{C_{DC}}\right)s + \frac{K_{Iv}}{C_{DC}}} \quad (9)$$

$$K_{Pv} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_{DC} \quad (10)$$

$$K_{Iv} = \omega_{nv}^2 C_{DC} \quad (11)$$

โดยที่ ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วงของรูปทรง

ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติของแรงดันไฟฟ้าตรง

จากสมการที่ (10) และ (11) พิจารณาออกแบบค่า ω_{nv} จาก $\omega_{nv} = 4/T_{Sv}$ โดยกำหนดให้ช่วงเวลาเข้าที่ (setting time ; T_{Sv}) มีค่า 0.05 s และค่า ζ_v กำหนดให้เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า K_{Pv} และค่า K_{Iv} ของตัวควบคุมพีโอรูปทรงได้เท่ากับ 0.24 และ 19.206

จากผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร SAPF และค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 และ 4 สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังในตารางที่ 1

5) ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

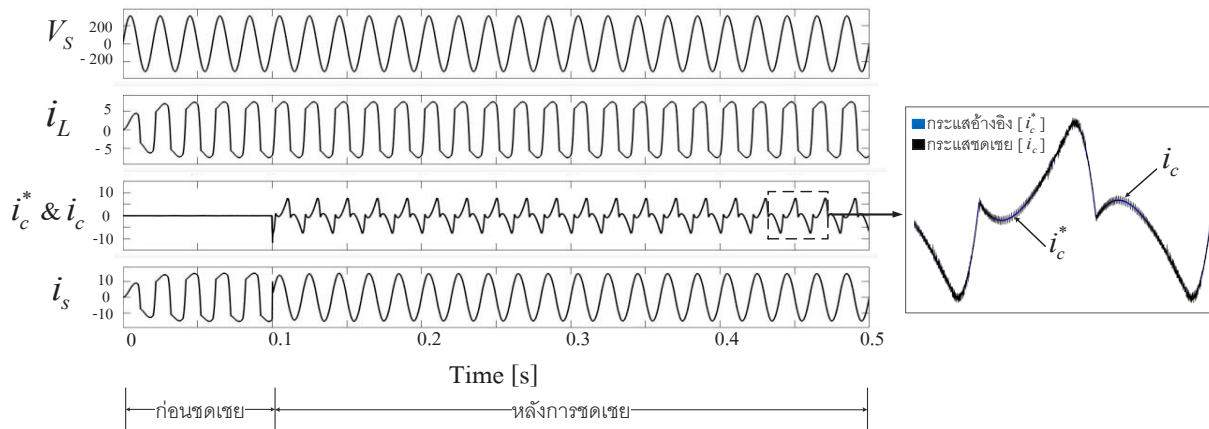
การจำลองสถานการณ์ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสในรูปที่ 1 ด้วยค่าพารามิเตอร์ของวงจร SAPF และ

ตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบไว้ดังตารางที่ 1 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 8 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าก่อนทำการฉีดกระแสชดเชย (i_c) ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที รูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ ลักษณะสัญญาณเหมือนกับกระแสโหลด โดยวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 27.9% ต่อมาเมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟพร้อมกับตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบทำการฉีดกระแสชดเชยตามลักษณะของกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากวิธี SD [6] เข้าสู่ระบบไฟฟ้าตั้งแต่เวลา 0.1 วินาทีเป็นต้นไป สังเกตได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่ายสามารถกลับมาเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยได้เท่ากับ 1.865% นอกจากนี้ผลการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีโอของวงจร SAPF สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 9 โดยสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบ มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตรงให้มีความเท่ากับแรงดันไฟฟ้าตรงอ้างอิง 350 V ในช่วงเข้าสถานะคงตัว (Steady State) พบว่าค่า ΔV_{DC} มีค่าเท่ากับ 3.3 V ซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตของแรงดันกระแสเพื่อที่ได้ออกแบบไว้ (7 V)

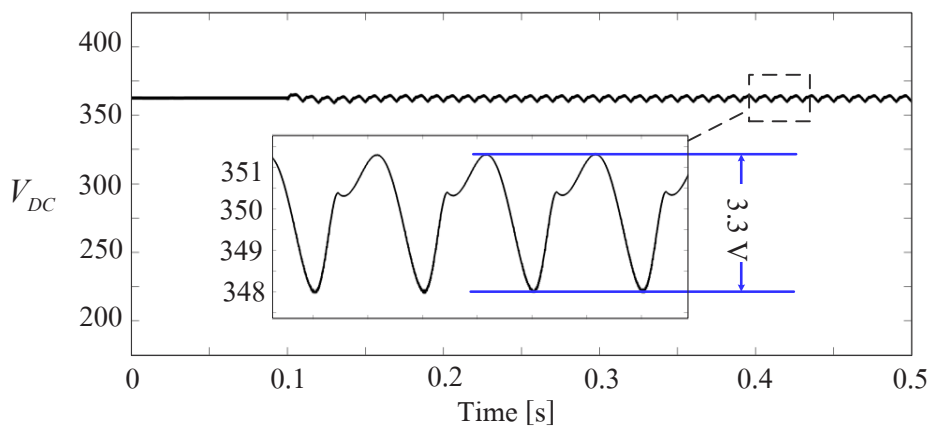
จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก ส่งผลทำให้ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าน้อยลง

6) สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอ สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันไฟฟ้าตรง ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่พิจารณาพบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมที่ได้ออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะการทำงานที่ดีสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลง และอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std 519-2014



รูปที่ 8 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส



รูปที่ 9 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ	$L_f = 8 \text{ mH}$ $V_{DC} = 350 \text{ V}$ $C_{DC} = 1.5 \text{ mF}$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชย	$K_{pi} = 177.688$ $K_{ii} = 1973920.88$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	$K_{pv} = 0.24$ $K_{hv} = 19.206$

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ
กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการ
ควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงสถานที่และเครื่องมือ
ต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

REFERENCES

- [1] V. E. Wagner, "Effects of harmonic on equipment" *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672–680, Apr. 1993.
- [2] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standard 519, Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, Jun. 2014.
- [3] D. M. Said and K. M. Nor, "Effects of harmonic on distribution transformers," in *2008 Australasian Universities Power Engineering Conf.*, Sydney, NSW, Australia, Dec. 14–17, 2008, pp. 1–5.
- [4] 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. National Power and Energy Conf.*, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 29–30, 2004, pp. 104–108.
- [5] A. Zouidi, F. Fnaiech, and K. Al-Haddad, "Voltage source inverter based three- phase shunt active Power filter: Topology, modeling and control strategies," in *2006 IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, Montreal, QC, Canada, Jul. 9–13, 2006, pp. 785–790.
- [6] T. Narongrit, P. Santiprapan, and S. Janpong, "A Synchronous detection with fourier analysis for single-phase shunt active power filters," in *2018 5th Int. Conf. Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, Kitakyushu, Japan, Apr. 23–25, 2018, pp. 1–6.
- [7] S. Rahmani, N. Mendlek, and K. Al-Haddad, "Experimental design of a nonlinear control technique for three - phase shunt active power filter," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no.10, pp. 3364–3375, Oct. 2010.
- [8] T. Trongjai, T. Narongrit, and K. Areerak. "Design of a shunt active power filter for harmonic elimination in electric railway systems," (in Thai), *UBU Engineering Journal*, vol. 13, no.1, pp. 29–41, 2019.
- [9] D. M. E. Ingram and S. D. Round, "A novel digital hysteresis current controller for an active power filter," in *Proc. 2nd Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, May 26–29, 1997, vol. 2, pp. 744–749.
- [10] T. Thomas, K. Haddad, G. Joos, and A. Jaafari, "Design and performance of active power filters," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no.5, pp. 38–46, 1998.