

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟ ขณะหนึ่งในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

ศุภกฤต ศิริสุกุล ทศพร ณรงค์ฤทธิ์* และ กองพล อารีรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 4039 4826 อีเมล: tosaporn@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.06.002

รับเมื่อ 25 มิถุนายน 2568 แก้ไขเมื่อ 6 ตุลาคม 2568 ตอรับเมื่อ 28 มกราคม 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 9 มิถุนายน 2569

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับกรองฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟในขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous Reactive Power Theory) หรือวิธี PQ เพื่อคำนวณกระแสฮาร์มอนิกสำหรับใช้เป็นกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในการฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านใช้การจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยแบ่งเป็นกรณีการทดสอบเลือกค่าความถี่ตัดพบว่าค่าความถี่ตัดที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงกึ่งกลางระหว่าง 0 เฮิรตซ์ และค่าความถี่ฮาร์มอนิกอันดับแรกของกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้เพื่อยืนยันสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ได้มีการจำลองการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware-in-the-loop; HIL) ผลการจำลองสถานการณ์ยืนยันว่าการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่นำเสนอสามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟฉีดกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) มีค่าเท่ากับ 3.51% 3.53% และ 3.54% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

คำสำคัญ: การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การกำจัดฮาร์มอนิก ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส



Low-Pass Filter Design for Harmonic Detection Based on the Instantaneous Reactive Power Theory in AC Electric Railway Systems

Sooppakit Sirasugol, Tosaporn Narongrit* and Kongpol Areerak

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 4039 4826, E-mail: tosaporn@sut.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.06.002

Received 25 June 2025; Revised 6 October 2025; Accepted 28 January 2026; Published online: 9 June 2026

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper presents the design of a Low-Pass Filter (LPF) for extracting the harmonic component of active power in the harmonic detection process based on instantaneous reactive power theory (PQ theory). The objective is to accurately compute the harmonic current to be used as a reference current for Active Power Filters (APFs), which inject compensating currents to eliminate harmonics in AC electric railway systems. The performance of the proposed LPF is evaluated through MATLAB/Simulink simulations, with test cases classified according to the selected cutoff frequency. The simulation results indicate that the appropriate cutoff frequency should be selected within the mid-range between 0 Hz and the frequency of the first harmonic order of active power. Furthermore, to validate the harmonic detection performance of the PQ theory, this study conducts Hardware-in-the-Loop (HIL) simulations for harmonic mitigation in AC electric railway systems. The results confirm that harmonic detection based on PQ theory, combined with the LPF designed using the proposed method, can accurately compute the reference current. Consequently, the APF can effectively inject compensating currents to mitigate harmonics. The Total Harmonic Distortion (THD) values of the three-phase source currents (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) are 3.51%, 3.53%, and 3.54%, respectively, which are all below the 5% limit specified in IEEE Std. 519-2022.

Keywords: Harmonic Detection Based on the Instantaneous Reactive Power Theory, Active Power Filter, Harmonic Elimination, Hysteresis Controller

Please cite this article as: S. Sirasugol, T. Narongrit, and K. Areerak, "Low-pass filter design for harmonic detection based on the instantaneous reactive power theory in AC electric railway systems," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 3, pp. 1–14, Jul.–Sep. 2026 (in Thai), Art. no. 263-018173, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.06.002.

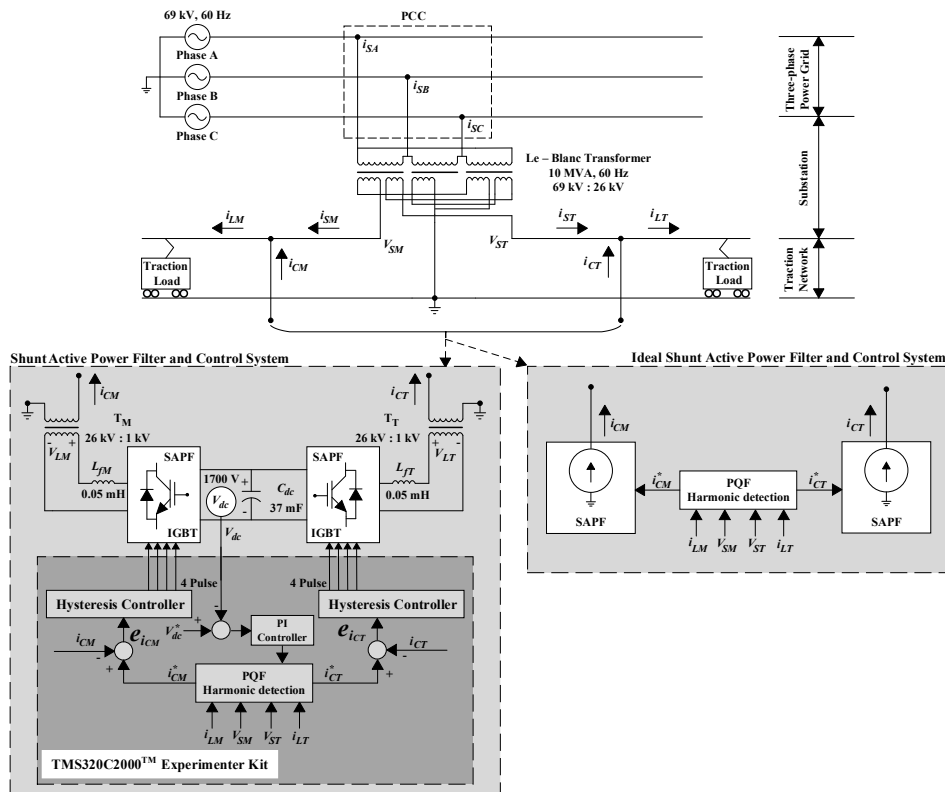
1. บทนำ

ปัจจุบันระบบรางไฟฟ้าได้รับความนิยมทั้งในภาคขนส่งสาธารณะและภาคอุตสาหกรรม การใช้งานระบบรางไฟฟ้านี้ส่งผลให้ความต้องการด้านความมีเสถียรภาพของระบบเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามโหลดของระบบรางไฟฟ้า เช่น โหลดชุดควบคุมมอเตอร์ โหลดวงจรแปลงผันกำลัง และโหลดซึ่งเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกภายในรถไฟไฟฟ้า เป็นต้น โหลดเหล่านี้ต่างแสดงลักษณะการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าอันส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบและก่อให้เกิดผลเสียในหลายด้าน เช่น กำลังงานสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า การรบกวนสัญญาณในระบบสื่อสารของรถไฟไฟฟ้า เกิดความไม่แม่นยำในการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า และความผิดพลาดในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบกำลังไฟฟ้า เป็นต้น [1]–[3]

โดยในปัจจุบันมีแนวทางในการกำจัดฮาร์มอนิกหลายวิธีที่ได้รับการเสนอในงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ได้แก่ การใช้วงจรกรองกำลังแบบพาสซีฟ (Passive Power Filter) [4] การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter) [5] และการใช้วงจรกรองกำลังแบบไฮบริด (Hybrid Power Filter) [6] ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter; SAPF) หรือวงจร SAPF ในการกำจัดฮาร์มอนิก เนื่องจากมีความยืดหยุ่นต่อความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในระบบ และไม่เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ [7] สำหรับระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ในส่วนที่หนึ่งคือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Substation) โดยจะรับกำลังไฟฟ้าจากกริดระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (Three-phase Power Grid) ที่พิกัดแรงดัน 69 กิโลโวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ จากนั้นจะถูกแปลงผ่านหม้อแปลงเลอบลองก์ (Le-Blanc Transformer) ให้เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสพิกัดแรงดัน 26 กิโลโวลต์ ที่ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับระบบรางไฟฟ้า แบบเฟสร่วม (Co-phase Electric Railway System) ซึ่งประกอบด้วยเฟส T และเฟส M สำหรับ

ป้อนให้กับโหลดรถไฟ (Traction Load)

ในส่วนที่สองคือ ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Active Power Filter and Control System) ประกอบด้วยวงจรระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสจำนวนสองวงจร และถูกติดตั้งผ่านหม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส (T_r , T_{tr}) ที่มีพิกัดแรงดัน 26 กิโลโวลต์/กิโลโวลต์ เพื่อฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า สำหรับระบบควบคุมของวงจรระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ การตรวจจับฮาร์มอนิก การควบคุมแรงดันบัลไฟตรง และการควบคุมกระแสชดเชย โดยส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกทำหน้าที่คำนวณกระแสอ้างอิง (i_c^*) ของวงจรระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งในบทความได้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous Reactive Power Theory) หรือเรียกว่าวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง [8] เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีในการตรวจจับฮาร์มอนิก อีกทั้งยังสามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังส่วนการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) [9] เพื่อคงค่าแรงดันไฟตรงตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ให้มีค่าเท่ากับ 1,700 โวลต์ และสำหรับส่วนการควบคุมกระแสชดเชย (i_c) ให้มีลักษณะตรงตามกระแสอ้างอิงในบทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมฮิสเทรีซิส (Hysteresis Controller) [10] เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมกระแสสำหรับการชดเชย โดยมีโครงสร้างของตัวควบคุมที่เรียบง่าย สะดวกต่อการออกแบบใช้งาน และมีกระบวนการควบคุมที่รวดเร็ว อย่างไรก็ตามการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งถือเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า เนื่องจากความแม่นยำในการตรวจจับฮาร์มอนิกส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแต่วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ยังคงมีปัญหาสำคัญคือการเลือกค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency; f_c) ของวงจร



รูปที่ 1 ระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้า

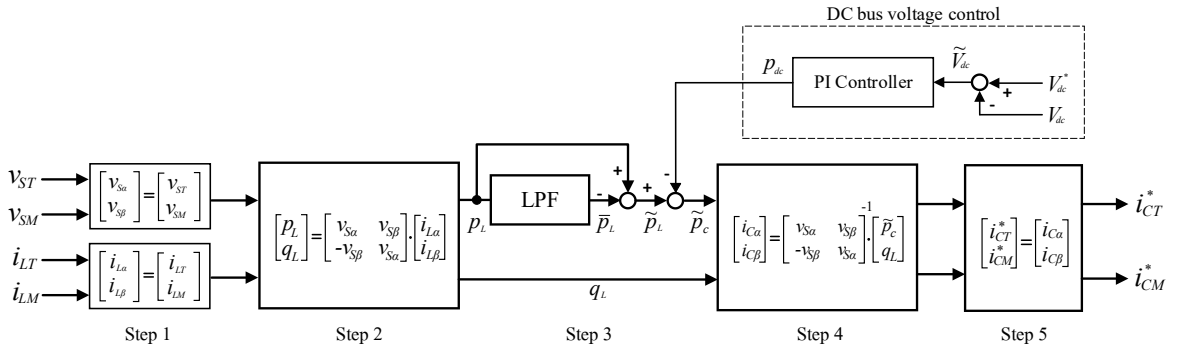
กรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter; LPF) ที่ใช้กรองปริมาณฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟในขั้นตอนการตรวจจับฮาร์โมนิกงานวิจัยที่ผ่านมา [11], [12] ได้นำเสนอผลกระทบของการเลือกค่าความถี่ตัดที่ไม่เหมาะสม และมีการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีแนวทางที่ชัดเจนในการเลือกค่าความถี่ตัดที่เหมาะสม ซึ่งการเลือกค่าความถี่ตัดที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์โมนิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้ บทความนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์และขอบเขตการออกแบบค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่เหมาะสมสำหรับระบบแรงไฟฟ้า โดยการตรวจสอบจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งวงจรระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทางอุดมคติ (Ideal SAPF) เพื่อความเหมาะสมในขั้นตอนการ

ศึกษาออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop; HIL) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์แบบผสมผสานระหว่างโปรแกรม MATLAB/Simulink และบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experimenter Kit เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอ การนำเสนอเนื้อหาในบทความประกอบด้วยหัวข้อที่ 2 นำเสนอวิธีการทดลอง หัวข้อที่ 3 นำเสนอผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง และในหัวข้อที่ 4 คือ สรุปผลการทดลอง

2. วิธีการทดลอง

2.1 การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ



รูปที่ 2 การตรวจจับสนาร์มอิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

ขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ [8] ถูกใช้คำนวณกระแสฮาร์มอิกในระบบรางไฟฟ้า และกำหนดเป็นกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรระบบก่้างจับสนาร์มอิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน เพื่อลดกระแสชดเชยก่้างจับสนาร์มอิกในระบบรางไฟฟ้า โดยการตรวจจับสนาร์มอิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง สำหรับระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสร่วมแบ่งการคำนวณได้ 5 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่าย (v_{ST} , v_{SM}) และกระแสทางด้านโหลด (i_{LT} , i_{LM}) เป็นปริมาณแรงดันและกระแสบนแกน $\alpha\beta$ ($v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$ และ $i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$)

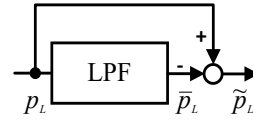
ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง (p_L) และกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q_L) ด้วยสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟที่ต้องการชดเชย ($\tilde{p}_C$) จากสมการที่ (2) โดยที่ p_{dc} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าดีซี (DC Power) ซึ่งเป็นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอที่ได้จากส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรง แสดงได้ดังรูปที่ 2 และ $\bar{p}_L$ คือ ปริมาณฮาร์มอิกของกำลังแอกทีฟซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ (3)

$$\tilde{p}_C = \tilde{p}_L - p_{dc} \quad (2)$$

$$\tilde{p}_L = p_L - \bar{p}_L \quad (3)$$



รูปที่ 3 การกรองค่า $\bar{p}_L$ ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากสมการที่ (3) ปริมาณมูลฐานของกำลังแอกทีฟ ($\bar{p}_L$) สามารถหาได้จากการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF) ดังแสดงในรูปที่ 3

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณกระแสสำหรับชดเชยบนแกน ($i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$) โดยใช้สมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_L \\ q_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้กระแสอ้างอิงของเฟส T (i_{CT}^*) เท่ากับค่ากระแส $i_{c\alpha}$ และกำหนดให้กระแสอ้างอิงของเฟส M (i_{CM}^*) เท่ากับค่ากระแส $i_{c\beta}$

ค่ากระแส i_{CT}^* และ i_{CM}^* จะถูกใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรระบบก่้างจับสนาร์มอิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน สำหรับก่้างจับสนาร์มอิกในระบบรางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการตรวจจับสนาร์มอิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในขั้นตอนที่ 3 ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่เหมาะสมสำหรับระบบรางไฟฟ้าซึ่งมีการนำเสนอไว้อย่างชัดเจนในหัวข้อที่ 2.3

2.2 สมการกำลังแอกทีฟในรูปทั่วไป

2.2.1 การวิเคราะห์หาสมการของกำลังแอกทีฟในรูปทั่วไป

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งมีความจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์หาค่ากำลังแอกทีฟที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา โดยเริ่มต้นจากการกำหนดให้แรงดันที่แหล่งจ่าย และกระแสทางด้านโหลดเป็นปริมาณแรงดันและกระแสบนแกน $\alpha\beta$ ($v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$ และ $i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$) และสามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการทั่วไปที่แสดงทั้งส่วนประกอบของปริมาณมูลฐาน และปริมาณฮาร์มอนิกได้ดังสมการที่ (5)–(8)

$$v_{s\alpha} = V_m \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$v_{s\beta} = V_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (6)$$

$$i_{L\alpha} = I_{m,1} \sin(\omega t) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{m,h} \sin(h\omega t) \quad (7)$$

$$i_{L\beta} = I_{m,1} \sin(\omega t - 90^\circ) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{m,h} \sin(h\omega t - h90^\circ) \quad (8)$$

โดยที่ V_m คือ แอมพลิจูดแรงดันไฟฟ้า $I_{m,1}$ คือ แอมพลิจูดกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน $I_{m,h}$ คือ แอมพลิจูดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h และ ω คือ ความถี่เชิงมุมที่ความถี่มูลฐานของระบบ ($\omega = 2\pi f$) โดยแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันทั้งเฟส T และเฟส M

จากนั้นพิจารณาคำนวณค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง (p) ตามสมการที่ (9) ซึ่งเมื่อแทนค่าแรงดัน $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$ และกระแส $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ จากสมการที่ (5)–(8) สามารถแสดงผลลัพธ์ของกำลังแอกทีฟในรูปทั่วไปได้ดังสมการที่ (10) โดยจากสมการดังกล่าวจะพบว่าค่ากำลังแอกทีฟประกอบด้วยส่วนของปริมาณมูลฐาน ($\bar{p}$) และปริมาณฮาร์มอนิก ($\bar{p}$)

$$p = v \cdot i = v_{s\alpha} i_{L\alpha} + v_{s\beta} i_{L\beta} \quad (9)$$

$$p = V_m I_{m,1} + \sum_{h=2}^{\infty} V_m I_{m,h} [x - y + z] \quad (10)$$

โดยที่ $x = \sin(\omega t) \sin(h\omega t)$

$$y = \cos(\omega t) \sin(h\omega t) \cos(h90^\circ)$$

$$z = \cos(\omega t) \cos(h\omega t) \sin(h90^\circ)$$

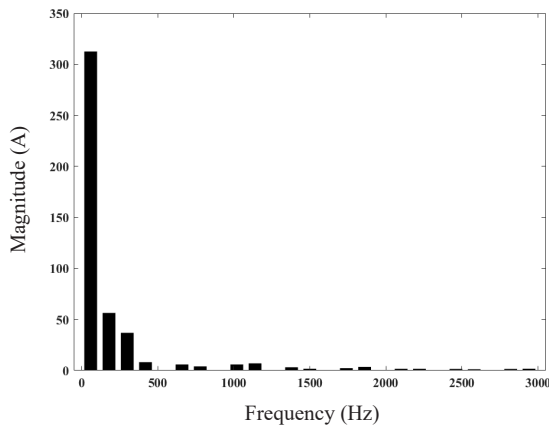
2.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของสมการกำลังแอกทีฟรูปทั่วไป

กระบวนการยืนยันความถูกต้องของสมการกำลังแอกทีฟที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.2.1 ดังสมการที่ (10) จะทำการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปของโปรแกรม Simulink/MATLAB โดยการทดสอบจะกำหนดพิจารณาเฉพาะอันดับฮาร์มอนิก (h) ที่ 3 และ 5 ($h = 3, 5$) ซึ่งเป็นอันดับฮาร์มอนิกที่มีนัยสำคัญจากสมการที่ (10) เมื่อแทนอันดับฮาร์มอนิกดังกล่าวจะสามารถแสดงสมการกำลังแอกทีฟได้ใหม่ดังสมการที่ (11) จากนั้นกำหนดใช้ข้อมูลกระแสโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าได้หวั่น [13] ดังแสดงสเปกตรัมในรูปที่ 4 ซึ่งจากข้อมูลกระแสโหลดดังกล่าวเมื่อพิจารณาแทนค่ากระแสมูลฐานที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ ($I_{m,1} = 312.54$ แอมแปร์) และแทนค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 และ 5 ($I_{m,3} = 56.43$ แอมแปร์, $I_{m,5} = 36.93$ แอมแปร์) และค่าพิດแรงดันของระบบรางไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม ($V_m = 26 \times \sqrt{2}$ กิโลโวลต์) ลงในสมการที่ (11) สามารถแสดงผลลัพธ์ของค่ากำลังแอกทีฟได้ดังสมการที่ (12)

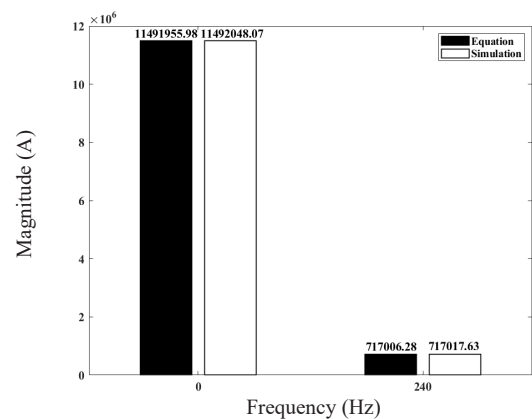
$$p = V_m I_{m,1} + [(-V_m I_{m,3}) + (V_m I_{m,5})] \cos(4\omega t) \quad (11)$$

$$p = 11491955.98 - 717006.28 \cos(2\pi(240)t) \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) สังเกตได้ว่าค่ากำลังแอกทีฟที่คำนวณจากกระแสโหลดที่ความถี่มูลฐาน (60 เฮิรตซ์) มีขนาดเท่ากับ 11,491,955.98 วัตต์ ที่ความถี่ 0 เฮิรตซ์ และค่ากำลังแอกทีฟที่คำนวณจากกระแสฮาร์มอนิกอันดับ 3 (180 เฮิรตซ์) และ 5 (300 เฮิรตซ์) มีขนาดเท่ากับ 717,006.28 วัตต์ ที่ความถี่เท่ากับ 240 เฮิรตซ์ เมื่อนำผลการคำนวณโดยใช้สมการ



รูปที่ 4 สเปกตรัมกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบแรงไฟฟ้า [13]



รูปที่ 5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของสมการกำลังแอกทีฟ

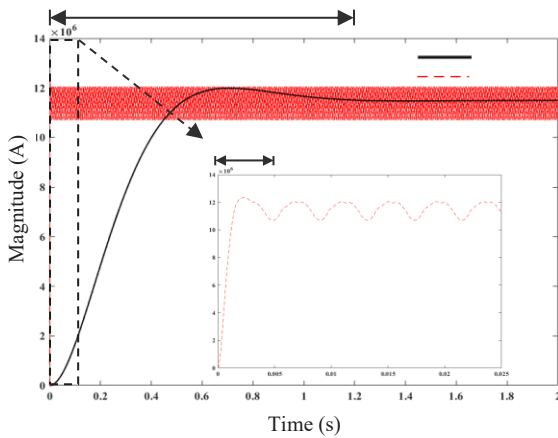
(Equation) ดังกล่าวไปพล็อตกราฟสเปกตรัมเพื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (Simulation) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยจะเห็นได้ว่าทั้งขนาดและความถี่ของกำลังแอกทีฟที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จึงยืนยันได้ว่าสมการคำนวณกำลังแอกทีฟตามสมการที่ (10) มีความถูกต้องและสามารถนำมาใช้อธิบายปริมาณกำลังแอกทีฟฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบแรงไฟฟ้าได้ และจะถูกประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำต่อไป

2.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

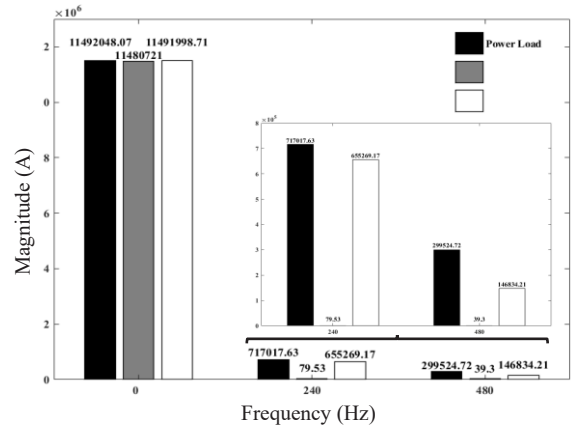
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หรือ LPF เป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อความแม่นยำในการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอแนวทางการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยเลือกใช้วงจรกรองชนิด Butterworth เนื่องจากมีผลตอบสนองทางความถี่ที่แม่นยำ [14] สำหรับอันดับของวงจรกรองในบทความนี้เลือกใช้วงจรกรองอันดับสองซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่ไม่ซับซ้อนส่งผลให้ระยะเวลาในการประมวลผลลดลง และส่วนการออกแบบค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ในหัวข้อนี้จะนำเสนอแนวทางการเลือกค่า f_c ภายในช่วงขอบเขตที่สามารถเลือกใช้ได้ โดยมีช่วงความถี่

ระหว่าง ค่าความถี่ต่ำสุด (0 เฮิรตซ์) ถึงค่าความถี่ของฮาร์โมนิกลำดับแรกของกำลังแอกทีฟ ทั้งนี้ค่าความถี่ของฮาร์โมนิกลำดับแรกของกำลังแอกทีฟสามารถระบุได้จากการพิจารณาปริมาณฮาร์โมนิกของกระแสโหลดคู่อันดับแรกที่เกิดขึ้นในระบบแรงไฟฟ้าพิจารณา ได้แก่ อันดับ 3 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4 และดำเนินการคำนวณค่ากำลังแอกทีฟโดยใช้สมการที่ (10) ซึ่งทำให้สามารถระบุค่าความถี่ของฮาร์โมนิกลำดับแรกของกำลังแอกทีฟที่แสดงในสมการที่ (12) เท่ากับ 240 เฮิรตซ์ ดังนั้นช่วงความถี่ที่สามารถใช้พิจารณาเลือกค่า f_c ได้คือ 0–240 เฮิรตซ์

แนวทางการเลือกค่า f_c ในช่วง 0–240 เฮิรตซ์ ในที่นี้จะยกตัวอย่างการเลือกค่า f_c ทั้งหมด 4 กรณี ได้แก่ 1 เฮิรตซ์ 120 เฮิรตซ์ 230 เฮิรตซ์ และ 360 เฮิรตซ์ เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการออกแบบค่า f_c ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยเกณฑ์ในการพิจารณาประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่เหมาะสมคือ ปริมาณมูลฐานของกำลังแอกทีฟที่ความถี่ 0 เฮิรตซ์ หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ต้องมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณมูลฐานของกำลังแอกทีฟก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และในขณะเดียวกันปริมาณฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟ (p_L) หลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านควรมีค่าน้อยที่สุดเพื่อควบคุม %THD ให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน IEEE Std. 519-2022



รูปที่ 6 กำลังแอกทีฟหลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

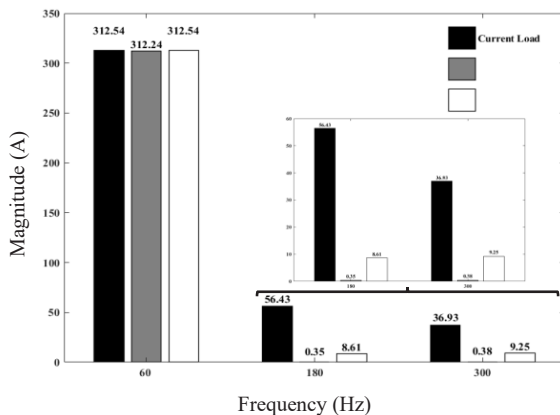


รูปที่ 7 ขนาดของกำลังแอกทีฟ

กำหนดไว้ โดยการทดสอบวัดประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะอาศัยการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งวงจรระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในอุดมคติ ซึ่งสามารถฉีดกระแสชดเชยที่ตรงตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งทุกประการ ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมในขั้นตอนการศึกษาออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของโครงสร้างวงจรที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์และระบบควบคุม ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยค่า %THD และค่าเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (T_s) จากตารางสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเลือกใช้ค่า f_c ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกลดลง โดยค่า %THD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวของกำลังแอกทีฟ (T_s) จะลดลง นอกจากนี้เพื่อเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงยกตัวอย่างผลการกรองกำลังแอกทีฟหลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และขนาดของกำลังแอกทีฟเฉพาะ 2 กรณี ได้แก่ กรณี f_c มีค่าต่ำมาก (1 เฮิร์ตซ์) และกรณี f_c มีค่าสูง (360 เฮิร์ตซ์) ผลการกรองดังกล่าวแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ สำหรับผลการกรองกำลังแอกทีฟจะแสดงทั้งในส่วนประกอบปริมาณมูลฐาน และปริมาณฮาร์มอนิกในสองอันดับแรกที่เกิดขึ้น

ในระบบรางไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากเป็นอันดับฮาร์มอนิกที่มีขนาดมากที่สุด และจะพิจารณาแสดงผลการกรองกำลังแอกทีฟเฉพาะเฟส T เท่านั้น (สำหรับในเฟส M จะมีลักษณะที่เหมือนกัน)

จากรูปที่ 6 พบว่าการเลือกค่า f_c ที่ต่ำมาก ส่งผลให้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของ $\bar{p}_L$ มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีค่า f_c ที่สูง และจากรูปที่ 7 พบว่าปริมาณ $\bar{p}_L$ ที่ความถี่เท่ากับ 0 เฮิร์ตซ์ ในกรณีค่า f_c ต่ำมีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับค่าก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Power Load) แต่ในกรณีค่า f_c สูง พบว่าปริมาณ $\bar{p}_L$ มีค่าใกล้เคียงกับก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน นอกจากนี้ที่ความถี่เท่ากับ 240 เฮิร์ตซ์ และ 480 เฮิร์ตซ์ หากเลือกใช้ค่า f_c ต่ำ ปริมาณ $\bar{p}_L$ จะมีขนาดลดลงเหลือน้อยมาก ในขณะที่ค่า f_c สูงมีขนาดคงเหลือที่มากเมื่อเทียบกับกรณีก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่งผลให้เมื่อวงจรระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า พบว่าขนาดกระแสที่แหล่งจ่ายของเฟส T ดังแสดงในรูปที่ 8 ส่วนประกอบความถี่มูลฐานที่ 60 เฮิร์ตซ์ ในกรณีเลือกใช้ค่า f_c ต่ำจะมีขนาดลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ค่า f_c สูงจะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของส่วนเดียวกันในกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้า (Current Load) และส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ 180 เฮิร์ตซ์ และ 300 เฮิร์ตซ์ ในกรณีค่า f_c ต่ำ จะมีขนาดน้อยมาก ในขณะที่กรณีค่า f_c สูงปริมาณ



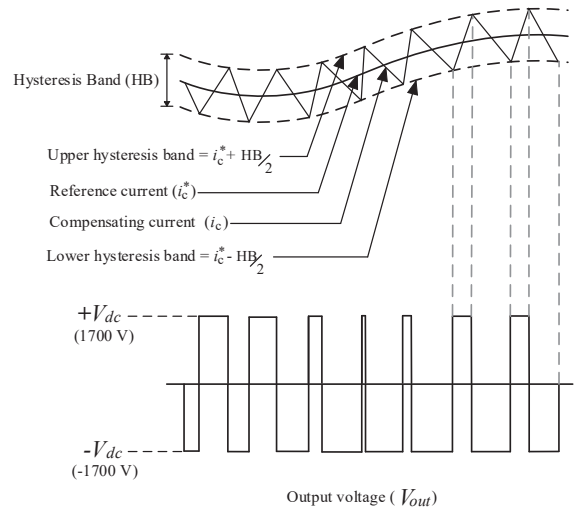
รูปที่ 8 ขนาดของกระแส

ของส่วนประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ดังกล่าวจะมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดในกระแสไหลของระบบแรงไฟฟ้า ส่งผลให้ค่า %THD เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการแทนค่า f_c

ค่าความถี่ตัด	%THD (เฟส T)	%THD (เฟส M)	ช่วงเวลา T_s
1 Hz	0.29%	0.29%	1.2 s
120 Hz	1.12%	1.12%	0.012 s
230 Hz	3.03%	3.03%	0.0075 s
360 Hz	4.15%	4.15%	0.0067 s

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านการเลือกใช้ค่า f_c พบว่าการเลือกใช้ค่า f_c มีค่าสูงโดยเฉพาะกรณี 230 เฮิร์ตซ์ ซึ่งอยู่ใกล้กับขอบเขตของช่วงความถี่ที่สามารถเลือกใช้ได้ (0-240 เฮิร์ตซ์) จะทำให้ค่า %THD เพิ่มขึ้น และหากเลือกค่า f_c ที่สูงกว่าขอบเขตดังกล่าว เช่น 360 เฮิร์ตซ์ จะยิ่งส่งผลให้ค่า %THD เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้ามการเลือกค่า f_c ที่มีค่าต่ำแม้จะช่วยลดค่า %THD ได้แต่กลับทำให้ระยะเวลา ก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวของกำลังแอกทีฟหลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพิ่มขึ้น ดังนั้นบทความนี้จึงเลือกใช้ค่า



รูปที่ 9 การควบคุมกระแสชดเชยแบบฮิสเตอร์ซิส

ความถี่ตัด (f_c) เป็นค่ากลางของขอบเขตความถี่ที่สามารถเลือกใช้ได้ เท่ากับ 120 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมทั้งในด้านการเข้าสู่สภาวะคงตัว และค่า %THD

2.4 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส [10] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยแถบฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis Band; HB) คือ ขอบเขตการสวิงของกระแสชดเชย ซึ่งประกอบด้วย 2 ขอบเขต ได้แก่ ขอบเขตฮิสเตอร์ซิสบน (Upper Hysteresis Band) และขอบเขตฮิสเตอร์ซิสล่าง (Lower Hysteresis Band) ซึ่งกระแสชดเชยจะเพิ่มขึ้นและลดลงภายในแถบฮิสเตอร์ซิสตามค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสองระดับแรงดันคือ $+V_{dc}$ และ $-V_{dc}$ โดยการควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 if $i_c \leq i_c^* - HB/2$ then $V_{out} = +V_{dc}$

กรณีที่ 2 if $i_c \geq i_c^* + HB/2$ then $V_{out} = -V_{dc}$

กรณีที่ 3 if $i_c^* - HB/2 < i_c < i_c^* + HB/2$ then $V_{out} = V_{out,old}$

โดยที่ $V_{out,old}$ คือ แรงดันเอาต์พุตจากกรณีก่อนหน้า

สำหรับการออกแบบค่า HB จะพิจารณาออกแบบภายใต้ค่าแถบฮิสเตอร์ซิสสูงสุด (HB_{max}) [15] ตามสมการที่ (13)

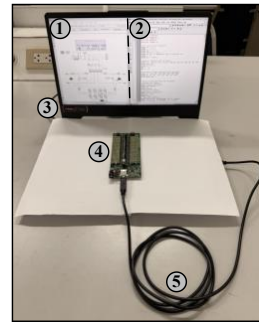
$$HB_{\max} = \frac{V_{dc}^2}{2f_{sw} \cdot L_f \cdot V_{dc}} \quad (13)$$

เมื่อพิจารณาเลือกพิกัดความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์ IGBT (f_{sw}) เท่ากับ 100 กิโลเฮิรตซ์ และแทนค่าพารามิเตอร์ของวงจรระบบกักเก็บประจุด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานตามตารางที่ 2 จะสามารถคำนวณค่า $HB_{\max}$ ตามสมการที่ (13) ได้เท่ากับ 170 แอมแปร์และในบทความนี้ได้เลือกใช้ค่า HB เท่ากับ 10 แอมแปร์

2.5 ขั้นตอนการทดลองจำลองสถานการณ์

ระบบกักเก็บประจุในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 1 จะถูกจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware-in-the-loop; HIL) [16] ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์แบบผสมผสานระหว่างโปรแกรม MATLAB/Simulink (Host) และบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit (Target) ที่ดำเนินการโปรแกรม CCStudio V3.3 และสามารถแสดงการเชื่อมต่อได้ดังรูปที่ 10 โดยใช้การเชื่อมต่อผ่านสาย USB JTAG Emulator ซึ่งใช้ระบบการสื่อสารแบบ RTDX (Real-Time Data eXchange)

จากรูปที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าและวงจรระบบกักเก็บประจุด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานถูกสร้างบนโปรแกรม Simulink/MATLAB (Host) ในขณะที่ส่วนการตรวจจับสนิทด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ส่วนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกโปรแกรมบนบอร์ด DSP (Target) ซึ่งบอร์ด DSP จะรับข้อมูลอินพุตจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ประกอบด้วยแรงดันที่แหล่งจ่าย กระแสทางด้านโหลดกระแสชดเชย และแรงดันบัสไฟตรง และให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ควบคุมสวิตช์อุปกรณ์ IGBT ที่สร้างโดยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ให้มีดีกระแสชดเชยกักเก็บประจุในระบบรางไฟฟ้า



รูปที่ 10 การเชื่อมต่อระหว่าง MATLAB/Simulink และบอร์ด DSP

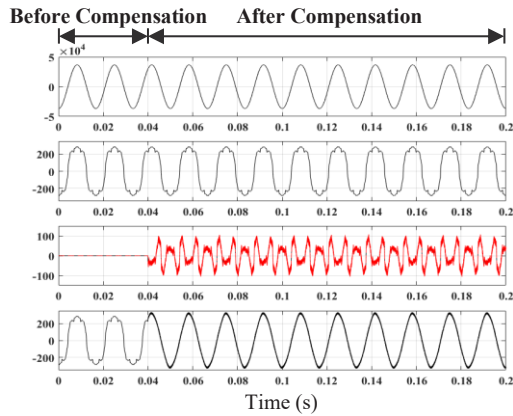
การจำลองสถานการณ์การกักเก็บประจุในระบบรางไฟฟ้าด้วยเทคนิค HIL ดังรูปที่ 1 จะพิจารณาแทนโหลดรถไฟฟ้ (Traction Load) ด้วยแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติที่กำหนดตามข้อมูลกระแสโหลดจริงของระบบรางไฟฟ้าในได้หวั่น [13] และค่าพารามิเตอร์ของวงจรระบบกักเก็บประจุด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ตัวควบคุมและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรระบบกักเก็บประจุด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และตัวควบคุม

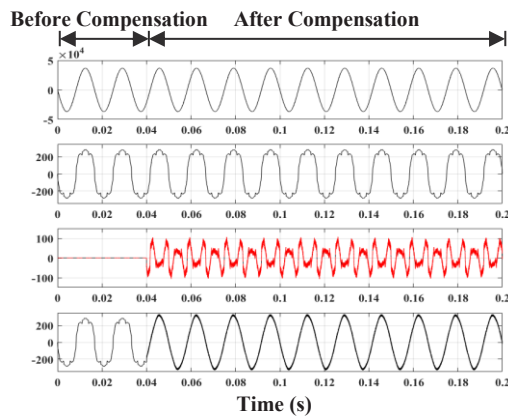
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
ค่าตัวเหนี่ยวนำ	L_f	0.05 mH
ค่าตัวเก็บประจุดีซี	C_{dc}	37 mF
ค่าแรงดันบัสไฟตรง	K_p	1700 V
ตัวควบคุมพีไอ	K_I	10064
		805363
ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส	HB	10 A
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	f_c	120 Hz

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการจำลองสถานการณ์การกักเก็บประจุในระบบรางไฟฟ้า T และ M ของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดัง



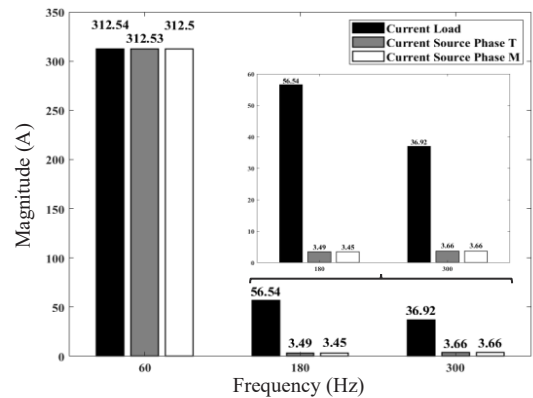
(ก) เฟส T



(ข) เฟส M

รูปที่ 11 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

รูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า ในช่วงก่อนการชดเชย (Before Compensation) ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.04 วินาที สังเกตได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมของระบบรางไฟฟ้ามีรูปคลื่นไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกับที่พบในกระแสโหลดทุกประการ โดยก่อนการชดเชยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับ 22.16% อย่างไรก็ตามเมื่อวงจรระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเริ่มจ่ายกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าที่เวลา 0.04 วินาที เป็นต้นไป พบว่า ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะสอดคล้องกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับ



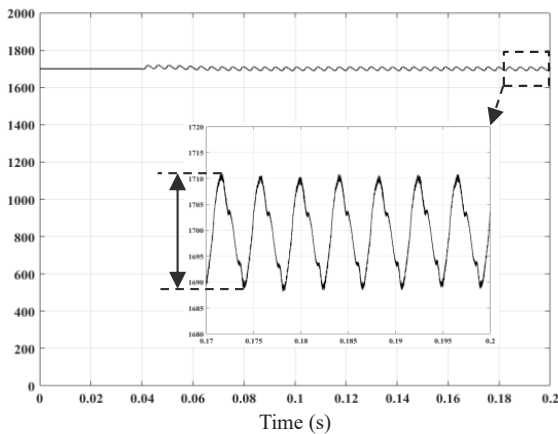
รูปที่ 12 ขนาดกระแสที่โหลดและกระแสที่แหล่งจ่าย

ฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ เป็นผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมของระบบรางไฟฟ้า (i_{ST} , i_{SM}) กลับมาเป็นรูปไซน์ภายหลังการชดเชย โดยที่ค่า %THD มีค่าลดลงเท่ากับ 3.53% และ 3.52% สำหรับเฟส T และเฟส M ตามลำดับ จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่เฟสรวมดังกล่าวเป็นผลให้ค่า %THD ที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) ลดลงด้วยเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 3.51% 3.53% และ 3.54% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ตามมาตรฐานของ IEEE Std. 519-2022 ซึ่งสามารถแสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย

ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม		ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส		
เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C
ก่อนการชดเชย				
22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%
หลังการชดเชย				
3.53%	3.52%	3.51%	3.53%	3.54%

จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกในข้างต้นเมื่อนำข้อมูลกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าไปพล็อตกราฟสเปกตรัม



รูปที่ 13 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอ

เปรียบเทียบกับผลของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ได้จากการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก (Current Source) โดยพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกของกระแสโหลดคู่อันดับที่มีปริมาณมากที่สุดที่เกิดในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาคืออันดับ 3 และ 5 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่ายที่มีความถี่มูลฐานเท่ากับ 60 เฮิร์ตซ์ มีปริมาณเท่ากับกระแสโหลด และปรากฏปริมาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ 180 เฮิร์ตซ์ และ 300 เฮิร์ตซ์ น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของกระแสโหลดทั้งในเฟส T และเฟส M ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการออกแบบความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ค่า 120 เฮิร์ตซ์ ให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก

จากผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 13 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยใช้ตัวควบคุมพีโอสามารถควบคุมแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแรงดันบัสไฟตรงมีค่าคงที่ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงที่ 1700 โวลต์ และมีค่าการกระเพื่อม (ΔV_{dc}) เพียง 23 โวลต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิน 2% ของแรงดันอ้างอิง

แนวทางการออกแบบค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่นำเสนอ แสดงให้เห็นกระบวนการเลือกค่าความถี่ตัดที่มีความชัดเจนและให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตพบว่ายังไม่มีแนวทางที่ชัดเจนในการกำหนดค่า

ความถี่ตัดที่เหมาะสม โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะอาศัยการประยุกต์ใช้เทคนิคหรือเครื่องมือเพิ่มเติมร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เช่น การใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ย (Average Filter) ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน [17] หรือการนำสมการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการปรับค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงาน [18] ซึ่งแนวทางดังกล่าวเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแต่อาจนำไปสู่โครงสร้างของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับใช้กรองปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟภายในขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ การทดสอบได้แบ่งเป็น 4 กรณี ของการเลือกค่าความถี่ตัด ผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าควรออกแบบค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในช่วงกลางระหว่างค่าความถี่มูลฐาน 0 เฮิร์ตซ์ และค่าความถี่ฮาร์มอนิกอันดับแรกของกำลังแอกทีฟ เพื่อความเหมาะสมทั้งในด้านความเร็วในการตอบสนองของระบบและประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก นอกจากนี้ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าได้แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถให้สมรรถนะที่ดีในการกรองปริมาณกำลังแอกทีฟ ส่งผลให้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง มีความถูกต้องแม่นยำ และทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีค่าเท่ากับ 3.51% 3.53% และ 3.54% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนความรู้ต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. K. Nishad, A. N. Tiwari, S. Khalid, and S. Gupta, "Power quality solutions for rail transport using AI-based unified power quality conditioners," *Discover Applied Sciences*, vol. 6, no. 12, pp. 651, Nov. 2024, doi: 10.1007/s42452-024-06372-5.
- [2] Z. Li and S. Liu, "Interference mechanism analysis and mitigation measures with railway signalling equipment from harmonics in the traction system," *Transportation Safety and Environment*, vol. 2, no. 4, pp. 271–282, Dec. 2020, doi: 10.1093/tse/tdaa023.
- [3] C. Panpean, N. Mangkhala, and K. Areerak, "The harmonic mitigation for heavy rail systems using shunt active power filter," *2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Mar. 2024, doi: 10.1109/iEECON60677.2024.10537974.
- [4] A. Elhussiny, S. H. E. A. Aleem, E. E. El-Kholy, A. F. Zobaa, and A. M. Zobaa, "Bi-Level multi-objective optimization of harmonic filters for PV penetration and harmonics mitigation in power distribution using Autism-based optimizer," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 16, no. 8, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.asej.2025.103479.
- [5] C. Panpean, K. Areerak, P. Santiprapan, K. Areerak, and S. Shen Yeoh, "Harmonic mitigation in electric railway systems using improved model predictive control," *Energies*, vol. 14, no. 7, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14072012.
- [6] C. Che, B. He, Z. Gao, Q. Lu, Y. Chen, Z. Wang, J. Guo, and Y. Wang, "Analysis, design and control of a hybrid railway power conditioner considering power rating reduction," *Electric Power Systems Research*, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.eprsr.2023.109895.
- [7] S. Xie and F. Zhong, "A novel harmonic resonance prevention measure for railway power conditioner–network–train interaction system," *Railway Engineering Science*, vol. 33, no. 2, pp. 290–310, 2025, doi: 10.1007/s40534-024-00357-1.
- [8] H. Hingol, V. Deshpande, and A. V. Sant, "Modified symmetrical sinusoidal integrator and instantaneous reactive power theory-based control of shunt active filter," *Energy Reports*, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.08.151.
- [9] S. Sirasugol, T. Domkitpanya, T. Narongrit, and K. Areerak, "Harmonic elimination of AC electric railway systems using shunt active power filters," *12th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Mar. 2024, doi: 10.1109/iEECON60677.2024.10537979.
- [10] S. Handoko and B. Winardi, "Comparison of conventional and adaptive hysteresis current control methods for power quality improvement using active filters," *Advance Sustainable Science Engineering and Technology*, vol. 7, no. 4, Aug. 2025, doi: 10.26877/asset.v7i4.1981.
- [11] C. M. Thuyen, "Improved p-q harmonic detection method for hybrid active power filter," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 8, no. 5, pp. 2910–2919, Oct. 2018.
- [12] D. Wang, L. Yang, and L. Ni, "Performance and harmonic detection algorithm of phase locked Loop for parallel APF," *Energy Inform*, vol. 7, no. 25, Apr. 2024, doi: 10.1186/s42162-024-00325-3.



- [13] S. R. Huang and B. N. Chen, "Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 495–499, Apr. 2002, doi: 10.1109/61.997925.
- [14] B. Wang, "Signal processing based on butterworth filter: Properties, design, and applications," *Highlights in Science, Engineering and Technology*, vol. 97, pp. 72–77, May. 2024.
- [15] A. Koduah, G. Svinkunas, A. Bandza, and S. O. Fobi, "Investigations into higher-frequency hysteresis current controller for supraharmonic hybrid active filters," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 5, Feb. 2024, doi: 10.3390/app14051713.
- [16] J. Sarawut, K. Areerak, and K. Areerak, "Harmonic detection for shunt active power filter using ADALINE neural network," *Energies*, vol. 14, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144351.
- [17] Z. Yao and G. Gao, "Improved harmonic detection method based on ip-iq theory," *E3S Web of Conferences*, vol. 261, pp. 01028, May 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202126101028.
- [18] X. Ding, H. Shi, Y. Wang, Y. Zhuang, G. Yuan, and S. Zhu, "Research on harmonic management of single-phase AC charging pile based on active filtering," *Energies*, vol. 16, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16062817.