



การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยฟังก์ชันเลียปูนอฟ

นิธิวัฒน์ เศรษฐวงค์ และ กองพล อารีรักษ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ธิดารัตน์ อารีรักษ์

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และภูมิสารสนเทศ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชาคริต ปานแป้น

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมืองัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1208 2873 อีเมล: kongpol@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.018

รับเมื่อ 1 มีนาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 24 พฤษภาคม 2567 ตอรับเมื่อ 30 พฤษภาคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 24 กันยายน 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบสามเฟสสมดุล โดยมุ่งเน้นการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนอาศัยฟังก์ชันเลียปูนอฟในการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขของสมการสำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ การยืนยันสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนอาศัยการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการจำลองสถานการณ์สามารถยืนยันได้ว่า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของสมการจากฟังก์ชันเลียปูนอฟ ให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลัง โดยพิจารณาได้จากคุณสมบัติการชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงที่คล้อยตามรูปสัญญาณอ้างอิง และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่มีค่าใกล้เคียงศูนย์

คำสำคัญ: วงจรรอกกำลังแอกทีฟ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ฟังก์ชันเลียปูนอฟ

การอ้างอิงบทความ: นิธิวัฒน์ เศรษฐวงค์, กองพล อารีรักษ์, พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, ธิดารัตน์ อารีรักษ์ และ ชาคริต ปานแป้น, “การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยฟังก์ชันเลียปูนอฟ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 3, หน้า 1-12, เลขที่บทความ 253-067473, ก.ค.-ก.ย. 2568.



Design of a Sliding Mode Control for an Active Power Filter Using the Lyapunov Function

Nithiwat Setthawong and Kongpol Areerak*

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

Phonsit Santiprapan

Department of Electrical Engineering and Biomedical, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

Tidarat Areerak

School of Mathematical Sciences and Geoinformatics Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

Chakrit Panpean

Department of Instrumentation and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1208 2873 , E-mail: kongpol@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.018

Received 1 March 2024; Revised 24 May 2024; Accepted 30 May 2024; Published online: 24 September 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents the design of an Active Power Filter (APF) for harmonic elimination in a balanced three-phase system. This work focuses on the design of the control system for compensating current and DC bus voltage using the sliding mode controller. An inequality from the Lyapunov function under system stability conditions is applied to the design of the parameters of the sliding mode controller. The performance of the current compensation control and DC bus voltage control is confirmed using the MATLAB/Simulink program. The results show that the parameters of the sliding mode controller under the conditions of the inequality from the Lyapunov function provide good performance for compensating current control and DC bus voltage control of the APF. It can be observed from the waveform of compensating current and DC bus voltage tracking the reference waveform. In addition, the absolute error values are close to zero.

Keywords: Active Power Filter, Sliding Mode Control, Lyapunov Function

Please cite this article as: N. Setthawong, K. Areerak, P. Santiprapan, T. Areerak, and C. Panpean, "Design of a sliding mode control for an active power filter using the Lyapunov function," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 3, pp. 1–12, ID. 253-067473, Jul.-Sep. 2025 (in Thai).

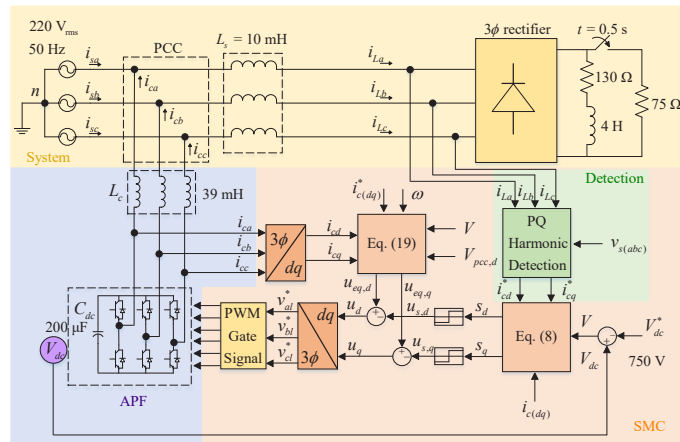
1. บทนำ

การใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นในโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงาน หรือบ้านพักอาศัยมีลักษณะการทำงานแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น การใช้งานโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าว ส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น กำลังงานสูญเสียที่สายส่ง และภายในอุปกรณ์ไฟฟ้า [1] อุปกรณ์ป้องกันและตรวจวัดทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาด [2] อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีอายุการใช้งานสั้นลง [3] เป็นต้น ผลกระทบดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการกำจัดหรือบรรเทาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter; PPF) [4] การใช้งานวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ (Active Power Filter; APF) [5] และการใช้งานวงจรกรองกำลังไฮบริด (Hybrid Power Filter; HPF) [6] ซึ่งแต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ในบทความนี้ นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ทุกอันดับ มีความยืดหยุ่นในการใช้งานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า และหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาเรโซแนนซ์ได้ เมื่อเทียบกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบที่ซับซ้อนน้อยกว่าวงจรกรองกำลังไฮบริด การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟมีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การตรวจจับฮาร์มอนิก ระบบควบคุมกระแสขดลวดระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟที่เหมาะสม จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกมีด้วยกันหลายวิธี เช่น ทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (Instantaneous Power Theory; PQ) [7] วิธีแกนหมุนดีคิว (DQ Axis; DQ) [8] หรือการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis; SWFA) [9] ซึ่งแต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ในบทความนี้เลือกใช้วิธี PQ สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิก เนื่องจากจุดเด่นในด้านการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนให้การคำนวณกระแสอ้างอิงที่ถูกต้องแม่นยำ และมีการ

คำนวณค่ากำลังรีแอ็กทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง [7] ในส่วนของการควบคุมกระแสขดลวดและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงพบว่า มีการใช้ตัวควบคุมพีไอ [10] ตัวควบคุมพีซี [11] และตัวควบคุมโหมตการเลื่อน [12] เป็นต้น บทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมโหมตการเลื่อนสำหรับการควบคุมกระแสขดลวดและแรงดันบัลไฟตรง เนื่องจากมีความสามารถในการควบคุมการฉีดกระแสขดลวดและควบคุมแรงดันบัลไฟตรงได้พร้อมกัน [13] การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อนมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสขดลวดและแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิก การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อนในบทความนี้พิจารณาด้วยเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ การระบุขอบเขตพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อนตามเงื่อนไขของอสมการจึงมีความสำคัญ ซึ่งบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อน เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวให้เหมาะสมกับระบบอื่น ๆ ที่พิจารณาได้

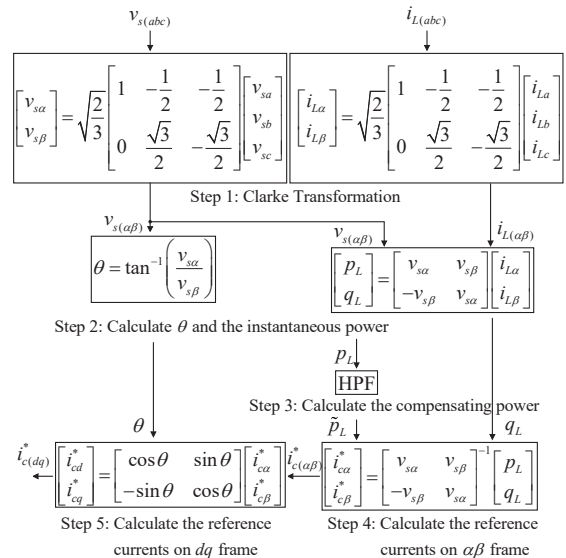
โครงสร้างการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสำหรับระบบที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นระบบสามเฟสสมดุลที่มีการจ่ายโหลดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งมีพฤติกรรมการทำงานแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสทำหน้าที่ในการฉีดกระแสขดลวดเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกระบบดังกล่าวถูกใช้สำหรับยืนยันผลการควบคุมกระแสขดลวดและแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมโหมตการเลื่อน ที่ได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยใช้สมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ 1 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ กรณีที่ 2 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการแต่ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลด กรณีที่ 3 การใช้ค่าพารามิเตอร์จากกรณีที่ 2 และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลด และกรณีที่ 4 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตาม



รูปที่ 1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

เงื่อนไขของสมการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

การนำเสนอในบทความนี้ ประกอบด้วย หัวข้อที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย เป็นการกล่าวถึงวิธีการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยเริ่มจากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.1 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยใช้ฟังก์ชันเลียบูโนฟ ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.2 และในหัวข้อที่ 2.3 เป็นการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาสำหรับหัวข้อที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผล เป็นการกล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์และอภิปรายผลการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และส่วนสุดท้ายเป็นบทสรุปของบทความ



รูปที่ 2 กระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิก การควบคุมการฉีดกระแสชดเชย การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

การตรวจจับฮาร์มอนิกทำหน้าที่ในการคำนวณกระแส

อ้างอิง $(i_{c(dq)}^*)$ ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งวิธี PQ มีจุดเด่นในด้านการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนทำให้มีการคำนวณที่รวดเร็ว ให้การคำนวณกระแสอ้างอิงที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้พร้อมกันกับการกำจัดฮาร์มอนิก ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยมีขั้นตอนการคำนวณ ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 แปลงปริมาณแรงดันสามเฟสที่แหล่งจ่าย $(v_{s(abc)})$ และกระแสที่โหลด $(i_{L(abc)})$ ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ด้วยวิธี

การแปลงของคลาร์ก (Clarke Transformation)

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ามุม θ กำลังแกนทีฟ (p_L) และ กำลังรีแอกทีฟ (q_L) โดยค่า p_L และ q_L ประกอบด้วย ปริมาณ กระแสตรง ($\bar{p}_L, \bar{q}_L$) และปริมาณกระแสสลับ ($\tilde{p}_L, \tilde{q}_L$) แสดง ได้ดังสมการที่ (1)–(3) ตามลำดับ

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{s\alpha}}{v_{s\beta}} \right) \quad (1)$$

$$p_L = \bar{p}_L + \tilde{p}_L \quad (2)$$

$$q_L = \bar{q}_L + \tilde{q}_L \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 กำหนดวัตถุประสงค์การชดเชย ในบทความนี้ พิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิก และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ดังนั้น จึงใช้ค่า $\tilde{p}_L$ และ q_L [7] การแยก $\tilde{p}_L$ ออกจาก p_L ทำได้ โดยใช้ตัวกรองผ่านสูง (High Pass Filter; HPF) ที่มีความถี่ ตัดเท่ากับ 5 เฮิร์ตซ์

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta(i_{ca}^*, i_{cb}^*)$ โดยใช้ค่า $\tilde{p}_L$ และ q_L ตามวัตถุประสงค์การชดเชย

ขั้นที่ 5 แปลงกระแส i_{ca}^* และ i_{cb}^* ไปเป็นกระแสอ้างอิง บนแกนดีคิว (i_{cd}^*, i_{cq}^*)

2.2 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน อาศัยฟังก์ชัน เลียนูโนฟ [12] ในการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนภายใต้เงื่อนไขของสมการสำหรับการ ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ จากการพิจารณาระบบ ควบคุมบนแกนดีคิว ซึ่งมีเวกเตอร์ควบคุมโหมดการเลื่อนใน รูปทั่วไป ดังสมการที่ (3)

$$\mathbf{u}_{dq} = \mathbf{u}_{eq,dq} + \mathbf{u}_{s,dq} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{u}_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_{eq,dq} = \begin{bmatrix} u_{eq,d} \\ u_{eq,q} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_{s,dq} = \begin{bmatrix} u_{s,d} \\ u_{s,q} \end{bmatrix}$$

จากสมการรูปทั่วไป เวกเตอร์ควบคุมโหมดการ เลื่อน ประกอบด้วย 2 เวกเตอร์ควบคุม คือ เวกเตอร์ ควบคุมสมมูลบนแกนดีคิว ($\mathbf{u}_{eq,dq}$) และเวกเตอร์ควบคุม พื้นผิวการเลื่อนบนแกนดีคิว ($\mathbf{u}_{s,dq}$) ซึ่งเป็นเวกเตอร์ควบคุม ตัวแปรสถานะของระบบให้เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวที่กำหนด

การพิจารณาสมการเวกเตอร์พื้นผิวการเลื่อนแสดงได้ ดังสมการที่ (4) โดยที่ $\mathbf{K}$ คือ เมทริกซ์พารามิเตอร์ของตัว ควบคุมโหมดการเลื่อน $\mathbf{x}^*$ คือ เวกเตอร์สถานะของระบบ และ $\mathbf{x}$ คือ เวกเตอร์ของตัวควบคุม แสดงได้ดังสมการที่ (5)–(7) ตามลำดับ

$$\mathbf{s} = \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{ic} & 0 & k_{vd} \\ 0 & k_{ic} & k_{vq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ x_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \\ V_{dc}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

จัดรูปสมการโดยแทนสมการที่ (5)–(7) ลงในสมการ ที่ (4) จะได้ดังสมการที่ (8) ซึ่งเป็นสมการของเวกเตอร์พื้นผิว การเลื่อนที่ปรากฏค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการ เลื่อน k_{ic} , k_{vd} และ k_{vq} โดยเงื่อนไขการทำงานของเวกเตอร์ ควบคุมโหมดการเลื่อนบนแกนดีคิว แสดงได้สมการที่ (9) เมื่อ $\text{sgn}(x)$ คือ ฟังก์ชันเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ มีนิยามดัง สมการที่ (10)

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_d \\ s_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ic}(i_{cd} - i_{cd}^*) + k_{vd}(V_{dc} - V_{dc}^*) \\ k_{ic}(i_{cq} - i_{cq}^*) + k_{vq}(V_{dc} - V_{dc}^*) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u_{s,d} &= -\text{sgn}(s_d) \\ u_{s,q} &= -\text{sgn}(s_q) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ 1 & \text{if } x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

พิจารณาเวกเตอร์ $\mathbf{u}_{eq,dq}$ ด้วยสมการปริภูมิสถานะของระบบ ดังสมการที่ (11) จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกที่พบบนแกนดีคิวในสมการที่ (12) โดยทำการจัดรูปสมการที่ (12) ให้สอดคล้องกับสมการปริภูมิสถานะและพิจารณามุมการหมุนบนแกนดี ซึ่งส่งผลให้สัญญาณการสวิตช์บนแกนคิว (d_q) เท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (13) ดังนั้นเมทริกซ์ $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}(\mathbf{X})$, $\mathbf{G}$ และ $\mathbf{u}$ แสดงได้ดังสมการที่ (14)–(17) ตามลำดับ เวกเตอร์การควบคุม $\mathbf{u}$ เป็นสัญญาณการสวิตช์ของไอจีบีทีที่พิจารณาบนแกนดีคิว (d_d , d_q)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{G} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega & \frac{d_d}{L_c} \\ -\omega & -\frac{R_c}{L_c} & \frac{d_q}{L_c} \\ -\frac{d_d}{C_{dc}} & -\frac{d_q}{C_{dc}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_c} \begin{bmatrix} V_{pcc,d} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R_c}{L_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L_c} & 0 \\ 0 & \frac{V_{dc}}{L_c} \\ -\frac{i_{cd}}{C_{dc}} & -\frac{i_{cq}}{C_{dc}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{V_{pcc,d}}{L_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}} \quad (13)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R_c}{L_c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L_c} & 0 \\ 0 & \frac{V_{dc}}{L_c} \\ -\frac{i_{cd}}{C_{dc}} & -\frac{i_{cq}}{C_{dc}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\frac{V_{pcc,d}}{L_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \quad (17)$$

พิจารณาสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของพื้นผิวการเลื่อนให้ค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อแสดงว่าระบบอยู่ในโหมดการเคลื่อนดังสมการที่ (18) จากนั้น ทำการแทนค่าสมการปริภูมิสถานะของระบบ ด้วยสมการที่ (11) โดยกำหนดให้ $\mathbf{u}$ เท่ากับ $\mathbf{u}_{eq,dq}$ และทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการเวกเตอร์ควบคุมสมมูลบนแกนดีคิว แสดงได้ดังสมการที่ (19)

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{K}(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}^*) = 0 \quad (18)$$

$$\mathbf{u}_{eq,dq} = (\mathbf{K}\mathbf{B}(\mathbf{x}))^{-1} \cdot (\mathbf{K}(\dot{\mathbf{x}}^* - \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{G})) \quad (19)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนด้วยวิธีการสุ่ม จะพิจารณาจากเสถียรภาพของระบบแบบวงปิด โดยใช้ฟังก์ชันเลียปูนอฟเพื่อหาขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ส่งผลทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพ ดังสมการที่ (20) โดยมีสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อน แสดงได้ดังสมการที่ (21) โดยที่ $\mathbf{s}$ และ $\dot{\mathbf{s}}$ เป็นเวกเตอร์หลักที่มีจำนวนสมาชิกเท่ากัน

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} > 0 \quad (20)$$

$$\dot{U} = \frac{1}{2}(\mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} + \dot{\mathbf{s}}^T \mathbf{s}) \quad (21)$$

จากนิยามของเมทริกซ์สามารถจัดรูปสมการที่ (21) ได้ดังสมการที่ (22) จากนั้นจัดรูปสมการดังกล่าวใหม่ ได้สมการที่ (23) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชัน เลียบูโนฟ

$$\dot{U} = \frac{1}{2}(\mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}}) \quad (22)$$

$$\dot{U} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} \quad (23)$$

จากเงื่อนไขความมีเสถียรภาพของฟังก์ชันเลียบูโนฟ ดังสมการที่ (24) พิจารณาร่วมกับสมการอนุพันธ์ อันดับหนึ่งของฟังก์ชันเลียบูโนฟ จะได้สมการการตรวจสอบ เสถียรภาพของระบบวงปิด ดังสมการที่ (25)

$$\dot{U} < 0 \quad (24)$$

$$\mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} < 0 \quad (25)$$

โดยที่ $\mathbf{s} \neq 0$

จากสมการที่ (25) พิจารณาพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่ง ของเวกเตอร์พื้นผิวการเคลื่อนในสมการที่ (26) จากนั้นแทน ค่าสมการปริภูมิสถานะของระบบ โดยพิจารณาความมี เสถียรภาพของระบบ ด้วยการตรวจสอบจากเวกเตอร์ควบคุม โหมดการเคลื่อน จึงกำหนดให้ $\mathbf{u}$ เท่ากับ $\mathbf{u}_{dq}$ ดังสมการที่ (27) เมื่อแทนค่า $\mathbf{u}_{dq}$ ลงในสมการที่ (27) สามารถจัดรูปสมการใหม่ ดังแสดงในสมการที่ (28)

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{K}(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}^*) \quad (26)$$

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{K}(\mathbf{Ax} + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{u}_{dq} + \mathbf{G} - \dot{\mathbf{x}}^*) \quad (27)$$

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{K}(\mathbf{Ax} + \mathbf{B}(\mathbf{x})(\mathbf{u}_{eq,dq} + \mathbf{u}_{s,dq}) + \mathbf{G} - \dot{\mathbf{x}}^*) \quad (28)$$

การกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเคลื่อน เพื่อให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพ ทำได้ โดยการแทนพจน์ $\mathbf{u}_{eq,dq}$ จากสมการที่ (19) ลงในสมการ ที่ (28) ดังแสดงในสมการที่ (29) จากนั้นทำการจัดรูป สมการใหม่ ได้ดังสมการที่ (30) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ใน การกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเคลื่อนของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

$$\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{KB}(\mathbf{x})(\text{sgn}(\mathbf{s}_{dq})) \quad (29)$$

$$\frac{L_c}{C_{dc}} \cdot (k_{vd} + k_{vq}) \cdot (|i_{cd}| + |i_{cq}|) < k_{ic} V_{dc} \quad (30)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ k_{ic} , k_{vd} และ k_{vq} อาศัย อสมการที่ (30) ซึ่งอสมการดังกล่าวมีค่าพารามิเตอร์ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L_c) ตัวเก็บประจุ (C_{dc}) แรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) และค่ายอดของกระแสอ้างอิงบนแกนดีและแกนคิว ($|i_{cd}|$, $|i_{cq}|$) สำหรับใช้ในการออกแบบ

2.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

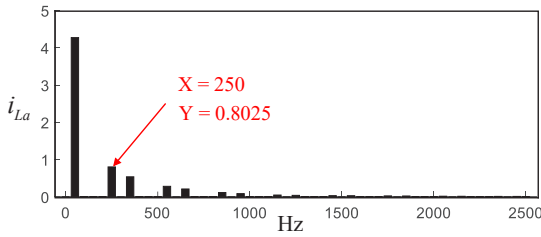
2.3.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_c) ใช้วิธีการของ Ingram และ Round [14] โดยการออกแบบค่าเหนี่ยวนำ ต้องออกแบบให้มีค่าไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{c(\max)}$) โดยคำนวณได้ดังสมการที่ (31)

$$L_{c(\max)} = \frac{V_{dc}^* - v_m}{\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)} \quad (31)$$

โดยที่ v_m คือ ค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า $\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)$ คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส อ้างอิงสูงสุดต่อเวลา (แอมแปร์ต่อวินาที)

การออกแบบค่า V_{dc}^* ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่า ยอดแรงดันไฟฟ้า บทความนี้จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)$ 750 โวลต์ สำหรับค่า คำนวณได้จากองค์ประกอบของกระแส



รูปที่ 3 สเปกตรัมกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบที่พิจารณา

ฮาร์โมนิกของระบบที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 3 โดยค่าดังกล่าวคำนวณได้ดังสมการที่ (32)

จากรูปที่ 3 กระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ (ฮาร์โมนิกลำดับที่ 5) มีแอมพลิจูดสูงสุด เท่ากับ 0.8025 แอมแปร์ ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด แสดงได้ดังสมการที่ (33)

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = A(2\pi)f \quad (32)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูดของลำดับกระแสฮาร์โมนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด

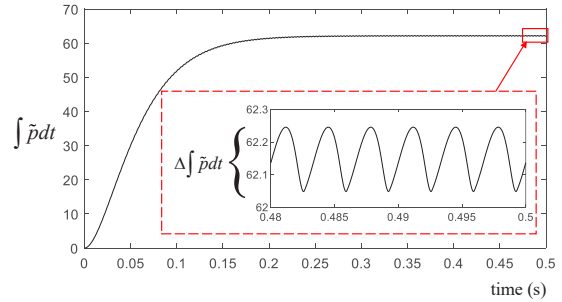
f คือ ความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด

$$L_{c(\max)} = \frac{750 - (\sqrt{2} \times 220)}{0.8025 \times (2\pi) \times 250} = 0.3482 \text{ H} \quad (33)$$

บทความนี้จึงเลือกใช้ L_c เท่ากับ 39 มิลลิเฮนรี และ V_{dc}^* เท่ากับ 750 โวลต์

2.3.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ใช้วิธีการของ Thomas [15] โดยเป็นการออกแบบขอบเขตต่ำสุดของค่าตัวเก็บประจุ ($C_{dc,\min}$) สำหรับเป็นแหล่งสะสมพลังงานเพื่อจ่ายแรงดันให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแสดงได้ดังสมการที่ (34) ซึ่งค่า ΔV_{dc} คือ ค่าแรงดันกระแสฟีดแบ็กของแรงดัน V_{dc} กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 3 โวลต์ V_{dc}^* คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง และ $\Delta \int p(t)dt$ คือ ขนาดการกระเพื่อมของปริพันธ์กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4 ดังนั้นบทความนี้เลือกใช้ C_{dc} เท่ากับ 200 ไมโครฟารัด



รูปที่ 4 ปริพันธ์กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของระบบที่พิจารณา

$$C_{dc,\min} = \frac{\Delta \int p(t)dt}{\Delta V_{dc} \times V_{dc}^*} = \frac{0.2}{3 \times 750} = 88.89 \mu\text{F} \quad (34)$$

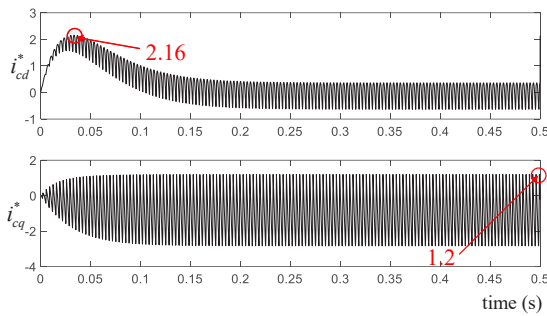
2.3.3 ค่ายอดของกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว

การพิจารณาสัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงบนแกนดีคิว กรณีที่โหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง และกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแสดงได้ในรูปแบบที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า ค่า $|i_{cd}^*|$ มีค่าเท่ากับ 2.16 และ 9.17 ตามลำดับ ส่วน $|i_{cq}^*|$ มีค่าเท่ากับ 1.2 และ 1.2 ตามลำดับ เมื่อนำค่าดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (30) จะได้สมการสำหรับกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนกรณีที่โหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง และกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง แสดงได้ดังสมการที่ (35) และ (36) ตามลำดับ

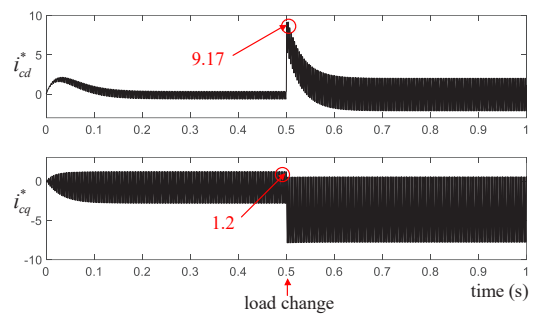
$$\frac{k_{vd} + k_{vq}}{k_{ic}} < 1.14 \quad (35)$$

$$\frac{k_{vd} + k_{vq}}{k_{ic}} < 0.37 \quad (36)$$

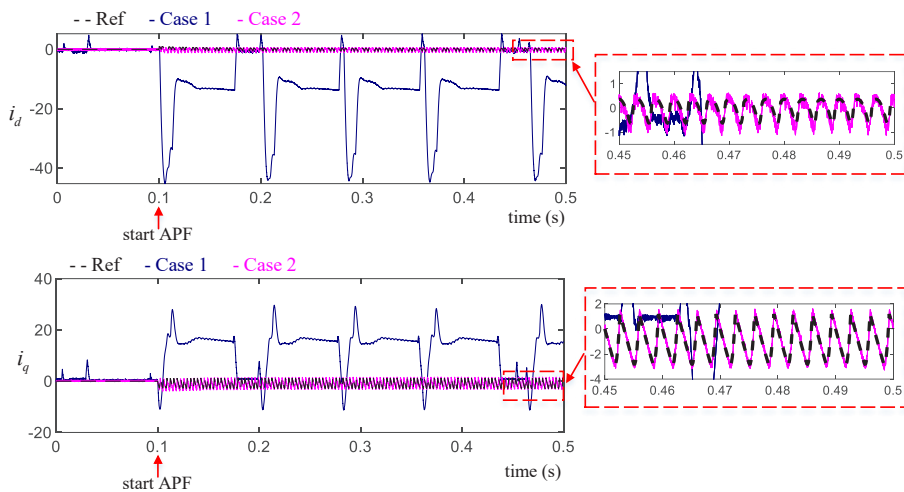
การยืนยันสมรรถนะระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยนำเสนอการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (k_{ic} , k_{vd} , k_{vq}) เป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ กรณีที่ 2 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ กรณีที่ 3 การใช้ค่า



รูปที่ 5 สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงบนแกนดักวกรณีนีโหลด ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6 สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงบนแกนดักวกรณีนีโหลด มีการเปลี่ยนแปลง



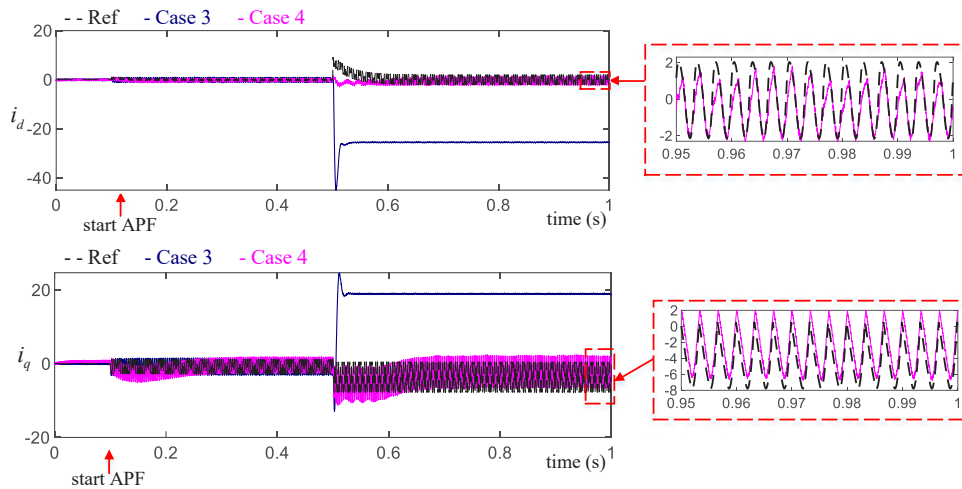
รูปที่ 7 สัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดักและบนแกนคว กรณีสี่ 1 และกรณีสี่ 2

พารามิเตอร์ในกรณี 2 แต่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ โหลด ซึ่งทำให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ของอสมการเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงและกรณี 4 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ เมื่อ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลด แสดงได้ดังตารางที่ 1

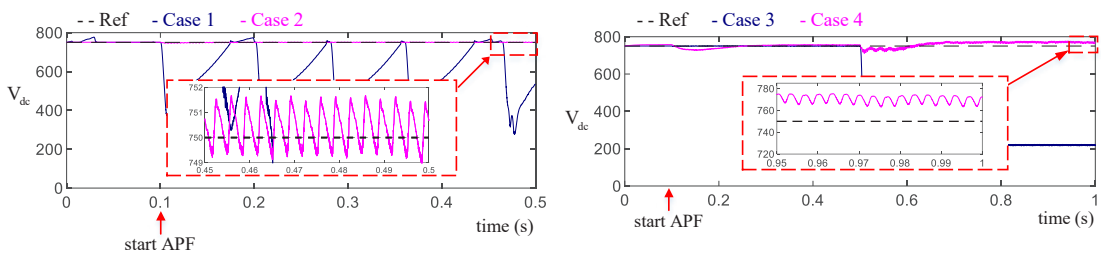
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

กรณี	k_{ic}	k_{vd}	k_{vq}
กรณีที่ 1	7	13	25
กรณีที่ 2	100	50	19
กรณีที่ 3	100	50	19
กรณีที่ 4	250	3	22

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมของ วงจรกรองกำลังแอคทีฟ เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนทั้ง 4 กรณี ปรากฏว่าในกรณี โหลดไม่เปลี่ยนแปลงและโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แสดง ได้ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ จากรูปที่ 7 พบว่า ในกรณีที่ 1 (กรณีที่ 1) เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเลื่อนไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ รูปสัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดักและบนแกนคว มีลักษณะไม่คล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ส่วนใน กรณีที่ 2 (กรณีที่ 2) เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเลื่อนเป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ รูป สัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดักและบนแกนคว มีลักษณะ



รูปที่ 8 สัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดีและบนแกนคว กรณีสี่ 1 และกรณีสี่ 2



รูปที่ 9 สัญญาณแรงดันบัสไฟตรงทั้ง 4 กรณี

คล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 8 พบว่า ในกรณีที่ 3 (กรณีที่ 3) เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ ในสภาวะที่โหลดเปลี่ยนแปลง รูปสัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดีและบนแกนควในช่วงที่โหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง มีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง แต่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง รูปสัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดีและบนแกนคว มีลักษณะไม่คล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง และในกรณีที่ 4 (กรณีที่ 4) เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการทุกสภาวะโหลด รูปสัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดีและบนแกนคว มีลักษณะคล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ถึงแม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง แสดงได้ดัง

รูปที่ 9 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปสัญญาณแรงดัน

บัสไฟตรงทั้ง 4 กรณีพบว่า ในกรณีที่ 1 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ในกรณีที่ 2 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ ในกรณีที่ 3 สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้เฉพาะสภาวะที่โหลดไม่เปลี่ยนแปลงและในกรณีที่ 4 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ทุกสภาวะโหลด จากผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงทั้ง 4 กรณีพบว่า มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีและแกนคว นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในช่วง 0.05 วินาทีสุดท้ายของผลการจำลองสถานการณ์ซึ่งประกอบด้วยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของกระแสชดเชยบนแกนดี ($|\delta_{ic,d}|$) บนแกนคว ($|\delta_{ic,q}|$) และแรงดันบัสไฟตรง ($|\delta_{vdc}|$)

สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 โดยกรณีที่ 2 และกรณีที่ 4 เป็นกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนอยู่ภายใต้เงื่อนไขของอสมการ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ $|\delta_{ic,d}|$, $|\delta_{ic,q}|$ และ $|\delta_{vdc}|$ มีค่าใกล้เคียงศูนย์ บ่งบอกว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ แต่ถ้าค่าพารามิเตอร์ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของอสมการ ระบบควบคุมจะไม่สามารถควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ซึ่งค่า $|\delta_{ic,d}|$, $|\delta_{ic,q}|$ และ $|\delta_{vdc}|$ มีค่าไม่ใกล้เคียงศูนย์และมีค่าสูงอย่างเห็นได้ชัด ค่าดังกล่าวสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7-9 จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 กรณีที่นำเสนอข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนตามเงื่อนไขของอสมการตามฟังก์ชันเลียบูโนฟมีผลโดยตรงต่อระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตตามเงื่อนไขอสมการของฟังก์ชันเลียบูโนฟจะให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 กรณี

กรณี	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
$ \delta_{ic,d} $	3.76	0.51	5.05	0.74
$ \delta_{ic,q} $	3.44	0.39	4.83	1.30
$ \delta_{vdc} $	14.58	0.82	23.04	4.51

3. สรุป

บทความนี้ได้เสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ การยืนยันผลการออกแบบมุ่งเน้นพิจารณาสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟตามเงื่อนไขของอสมการโดยทำการจำลองสถานการณ์ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ค่าพารามิเตอร์

ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ซึ่งพบว่า ระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงให้ใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงได้ ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อค่าพารามิเตอร์เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ปรากฏว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงให้ใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงได้ ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ผลการจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอสามารถยืนยันได้ว่า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ทำให้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

4. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทําวิจัย รวมถึงสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทําวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.E. Rice, "Adjustable speed drive and power rectifier harmonics – Their effect on power systems components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 1, pp. 161-177, 1986.
- [2] I. Purkayastha and P. J. Savoie, "Effect of harmonic on power measurement," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, no. 5, pp. 944-946, 1990.
- [3] J.M. Ho and C.C. Liu, "The effects of harmonics on differential relay for a transformer," *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, 2001.
- [4] H. Hu, Z. He and S. Gao, "Passive filter



- design for China High-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 505–514, 2015.
- [5] 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,” in *APEC’92 Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1992, pp. 829–836.
- [6] S. Visawa, P. Dhanadhorn, S. Sujitjorn, and K-L. Areerak, “Harmonic elimination for an AC drive via hybrid method,” *Research and Development Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 58–66, 2010 (in Thai).
- [7] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3 pp. 625–630, 1984.
- [8] 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*, pp. 1174–1179, 1988.
- [9] M. El-Habrouk and M. K. Darwish, “Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs,” *IEEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 148, no. 1, pp. 21–28, 2001.
- [10] 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, no. 10, pp. 3364–3375, 2010.
- [11] T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Are erak, “Adaptive fuzzy control for shunt active power filters,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 40, no. 6, pp. 646–657, 2016.
- [12] N. Setthawong, C. Panpean, K-L Areerak, K-N Areerak, and P. Santiprapan, “Gain tuning technique based on sliding mode control for shunt active power filter,” *2022 International Electrical Engineering Congress*, 2022.
- [13] N. Mendalek, K. Al-Haddad, F. Fnaiech, and L. A. Dessaint, “Sliding mode control of 3-Phase shunt active filter in the dq frame,” *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, no. 369–375, 2002.
- [14] D. M. E. Ingram and S. D. Round, “A novel digital hysteresis current controller for an active power filter,” *Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 744–749, 1997.
- [15] 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.