



## การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรงอกกำลังแอกทีฟด้วยฟังก์ชันเลียปูนอฟ

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

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรงอกกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบสามเฟสสมดุล โดยมุ่งเน้นการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงของวงจรงอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนอาศัยฟังก์ชันเลียปูนอฟในการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขของอสมการสำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ การยืนยันสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนอาศัยการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการจำลองสถานการณ์สามารถยืนยันได้ว่า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียปูนอฟ ให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรงอกกำลัง โดยพิจารณาได้จากคุณสมบัติการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงที่คล้อยตามรูปสัญญาณอ้างอิง และค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่มีค่าใกล้เคียงศูนย์

**คำสำคัญ:** วงจรงอกกำลังแอกทีฟ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ฟังก์ชันเลียปูนอฟ

การอ้างอิงบทความ: นธิวัฒน์ เศรษฐวงค์, กองพล อารีรักษ์, พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, ธิดารัตน์ อารีรักษ์ และ ชาคริต ปานแป้น, “การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรงอกกำลังแอกทีฟด้วยฟังก์ชันเลียปูนอฟ,” 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

© 2024 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).

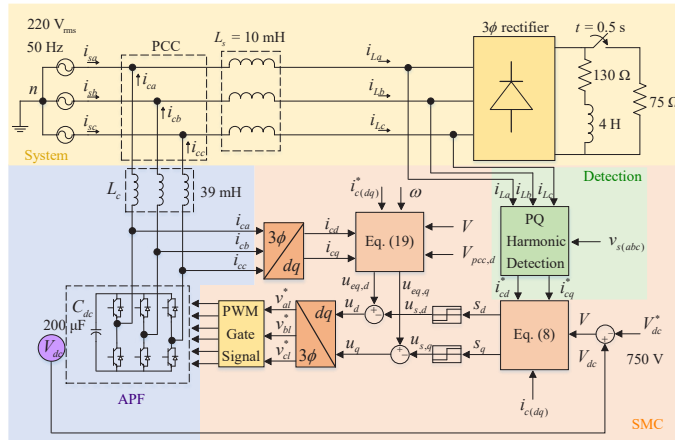
## 1. บทนำ

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] การใช้งานวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter; APF) [5] และการใช้งานวงจรกรองกำลังไฮบริด (Hybrid Power Filter; HPF) [6] ซึ่งแต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ในบทความนี้ นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ทุกอันดับ มีความยืดหยุ่นในการใช้งานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า และหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาโรแนนซ์ได้ เมื่อเทียบกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบที่ซับซ้อนน้อยกว่าวงจรกรองกำลังไฮบริด การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การตรวจจับฮาร์มอนิก ระบบควบคุมกระแสขดลวดระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสม จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกมีด้วยกันหลายวิธี เช่น ทฤษฎีกำลังขณะหนึ่ง (Instantaneous Power Theory; PQ) [7] วิธีแกนหมุนดีคว (DQ Axis; DQ) [8] หรือการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis; SWFA) [9] ซึ่งแต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ในบทความนี้เลือกใช้วิธี PQ สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิก เนื่องจากจุดเด่นในด้านการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนให้การคำนวณกระแสอ้างอิงที่ถูกต้องแม่นยำ และมีการ

คำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับรูปค่าตัวประกอบกำลัง [7] ในส่วนของการควบคุมกระแสขดลวดและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงพบว่า มีการใช้ตัวควบคุมพีไอ [10] ตัวควบคุมพีซี [11] และตัวควบคุมโหมดการเคลื่อน [12] เป็นต้น บทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนสำหรับการควบคุมกระแสขดลวดและแรงดันบัลไฟตรง เนื่องจากมีความสามารถในการควบคุมการฉีดกระแสขดลวดและควบคุมแรงดันบัลไฟตรงได้พร้อมกัน [13] การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสขดลวดและแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิก การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนในบทความนี้พิจารณาด้วยเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ การระบุขอบเขตพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนตามเงื่อนไขของอสมการจึงมีความสำคัญ ซึ่งบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อน เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวให้เหมาะสมกับระบบอื่น ๆ ที่พิจารณาได้

โครงสร้างการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นระบบสามเฟสสมดุลที่มีการจ่ายโหลดดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งมีพฤติกรรมการทำงานแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสทำหน้าที่ในการฉีดกระแสขดลวดเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกระบบดังกล่าวถูกใช้สำหรับยืนยันผลการควบคุมกระแสขดลวดและแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมโหมดการเคลื่อน ที่ได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยใช้อสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ 1 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ กรณีที่ 2 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการแต่ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลด กรณีที่ 3 การใช้ค่าพารามิเตอร์จากกรณีที่ 2 และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลด และกรณีที่ 4 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตาม



รูปที่ 1 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

เงื่อนไขของอสมการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด

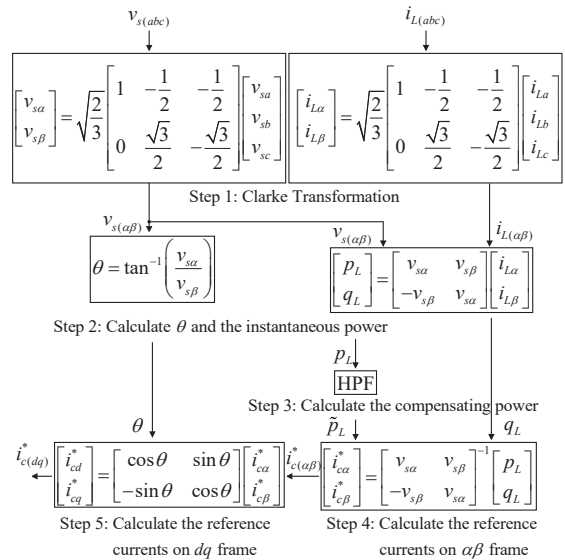
การนำเสนอในบทความนี้ ประกอบด้วย หัวข้อที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย เป็นการกล่าวถึงวิธีการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยเริ่มจากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.1 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยใช้ฟังก์ชันเลียบูโนฟ ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.2 และในหัวข้อที่ 2.3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

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิก การควบคุมการผิดกระแสชดเชย การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

### 2.1 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

การตรวจจับฮาร์มอนิกทำหน้าที่ในการคำนวณกระแส



รูปที่ 2 กระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

อ้างอิง  $(i_{c(dq)}^*)$  ให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งวิธี PQ มีจุดเด่นในด้านการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนทำให้มีการคำนวณที่รวดเร็ว ให้การคำนวณกระแสอ้างอิงที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถปรับปรุ้งค่าตัวประกอบกำลังได้พร้อมกันกับการกำจัดฮาร์มอนิก 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  $\theta$  กำลังแอกทีฟ ( $p_L$ ) และกำลังรีแอกทีฟ ( $q_L$ ) โดยค่า  $p_L$  และ  $q_L$  ประกอบด้วย ปริมาณกระแสตรง ( $\bar{p}_L, \bar{q}_L$ ) และปริมาณกระแสสลับ ( $\tilde{p}_L, \tilde{q}_L$ ) แสดงได้ดังสมการที่ (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 ในบทความนี้พิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิก และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ดังนั้น จึงใช้ค่า  $\tilde{p}_L$  และ  $q_L$  [7] การแยก  $\tilde{p}_L$  ออกจาก  $p_L$  ทำได้โดยใช้ตัวกรองผ่านสูง (High Pass Filter; HPF) ที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 5 เฮิรตซ์

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

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

## 2.2 ตัวควบคุมโหมตการเลื่อน

การออกแบบตัวควบคุมโหมตการเลื่อน อาศัยฟังก์ชันเลียบูโนฟ [12] ในการกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อนภายใต้เงื่อนไขของสมการสำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ จากการพิจารณาระบบควบคุมบนแกนดีควิ ซึ่งมีเวกเตอร์ควบคุมโหมตการเลื่อนในรูปแบบทั่วไป ดังสมการที่ (3)

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

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 เวกเตอร์ควบคุมโหมตการเลื่อน ประกอบด้วย 2 เวกเตอร์ควบคุม คือ เวกเตอร์ควบคุมสมมูลบนแกนดีควิ ( $\mathbf{u}_{eq,dq}$ ) และเวกเตอร์ควบคุมพื้นผิวการเลื่อนบนแกนดีควิ ( $\mathbf{u}_{s,dq}$ ) ซึ่งเป็นเวกเตอร์ควบคุมตัวแปรสถานะของระบบให้เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวที่กำหนด

การพิจารณาสมการเวกเตอร์พื้นผิวการเลื่อนแสดงได้ดังสมการที่ (4) โดยที่  $\mathbf{K}$  คือ เมทริกซ์พารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อน  $\mathbf{x}^*$  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) ลงในสมการที่ (4) จะได้ดังสมการที่ (8) ซึ่งเป็นสมการของเวกเตอร์พื้นผิวการเลื่อนที่ปรากฏค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อน  $k_{ic}$ ,  $k_{vd}$  และ  $k_{vq}$  โดยเงื่อนไขการทำงานของเวกเตอร์ควบคุมโหมตการเลื่อนบนแกนดีควิ แสดงได้สมการที่ (9) เมื่อ  $\text{sgn}(x)$  คือ ฟังก์ชันเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ มีนิยามดังสมการที่ (10)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันเลียปูนอฟ

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

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

จากเงื่อนไขความมีเสถียรภาพของฟังก์ชันเลียปูนอฟ ดังสมการที่ (24) พิจารณาร่วมกับสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชันเลียปูนอฟ จะได้สมการการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบวงปิด ดังสมการที่ (25)

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

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

โดยที่  $\mathbf{s} \neq 0$

จากสมการที่ (25) พิจารณาพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่งของเวกเตอร์พื้นผิวการเคลื่อนในสมการที่ (26) จากนั้นแทนค่าสมการปริภูมิสถานะของระบบ โดยพิจารณาความมีเสถียรภาพของระบบ ด้วยการตรวจสอบจากเวกเตอร์ควบคุมโหมดการเคลื่อน จึงกำหนดให้  $\mathbf{u}$  เท่ากับ  $\mathbf{u}_{dq}$  ดังสมการที่ (27) เมื่อแทนค่า  $\mathbf{u}_{dq}$  ลงในสมการที่ (27) สามารถจัดรูปสมการใหม่ ดังแสดงในสมการที่ (28)

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

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

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

การกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อน เพื่อให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพ ทำได้โดยการแทนพจน์  $\mathbf{u}_{eq,dq}$  จากสมการที่ (19) ลงในสมการที่ (28) ดังแสดงในสมการที่ (29) จากนั้นทำการจัดรูปสมการใหม่ ได้ดังสมการที่ (30) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

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

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

การออกแบบค่าพารามิเตอร์  $k_{ic}$ ,  $k_{vd}$  และ  $k_{vq}$  อาศัยสมการที่ (30) ซึ่งสมการดังกล่าวมีค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ( $L_c$ ) ตัวเก็บประจุ ( $C_{dc}$ ) แรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) และค่ายอดของกระแสอ้างอิงบนแกนดีและแกนคว ( $|i_{dc}|$ ,  $|i_{cq}|$ ) สำหรับใช้ในการออกแบบ

## 2.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

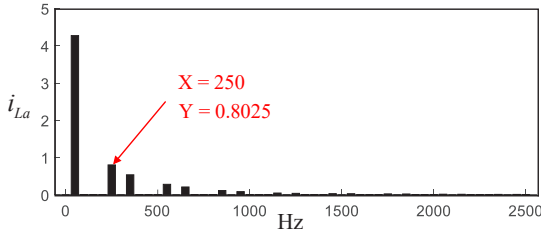
### 2.3.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ ( $L_c$ ) ใช้วิธีการของ Ingram และ Round [14] โดยการออกแบบค่าเหนี่ยวนำต้องออกแบบให้มีค่าไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ( $L_{c(\max)}$ ) 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 ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดต่อเวลา (แอมแปร์ต่อวินาที)

การออกแบบค่า  $V_{dc}^*$  ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดันไฟฟ้า 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

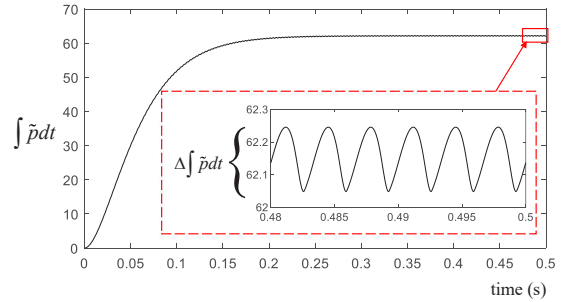
$f$  คือ ความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่มีขนาดกระแสสูงสุด

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

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  $\Delta V_{dc}$  คือ ค่าแรงดันกระแสเพื่อมของแรงดัน  $V_{dc}$  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

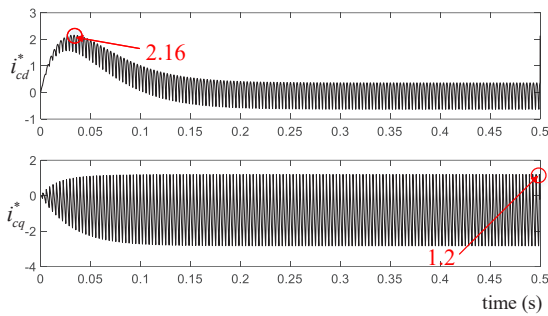
การพิจารณาสัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงบนแกนดีคิว กรณีที่โหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง และกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแสดงได้ในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า ค่า  $|i_{cd}^*|$  มีค่าเท่ากับ 2.16 และ 9.17 ตามลำดับ ส่วน  $|i_{cq}^*|$  มีค่าเท่ากับ 1.2 และ 1.2 ตามลำดับ เมื่อนำค่าดังกล่าวแทนลงในสมการที่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

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

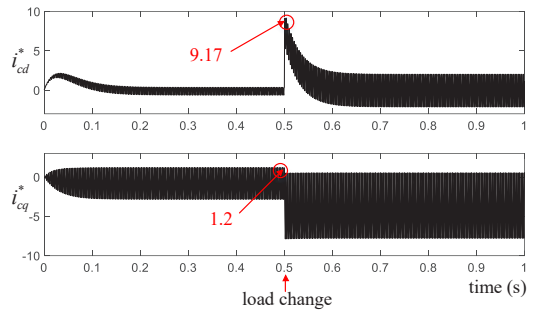
$$\frac{k_{vd} + k_{vq}}{k_{ic}} < 0.37 \quad (36)$$

การยืนยันสมรรถนะระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยนำเสนอการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ ( $k_{ic}$ ,  $k_{vd}$ ,  $k_{vq}$ ) เป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ กรณีที่ 2 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ กรณีที่ 3 การใช้ค่า

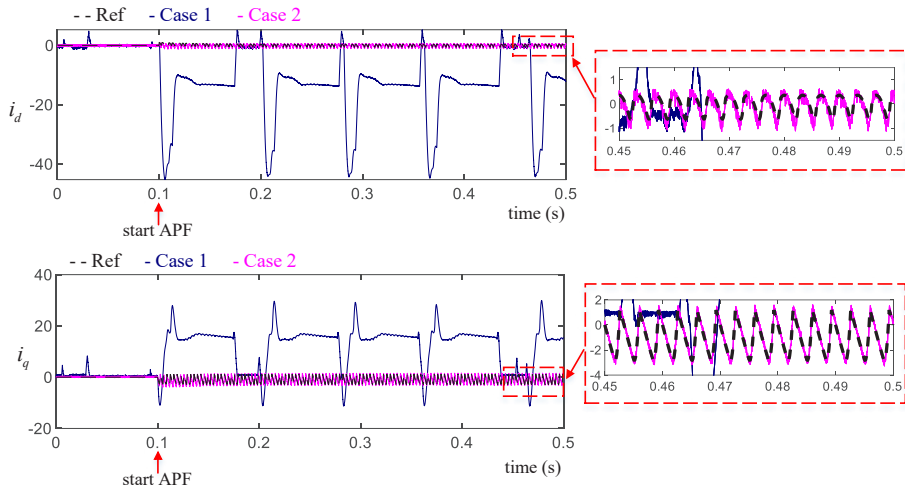




รูปที่ 5 สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงบนแกนดิวกรณิโหลต ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6 สัญญาณกระแสชดเชยอ้างอิงบนแกนดิวกรณิโหลต มีการเปลี่ยนแปลง



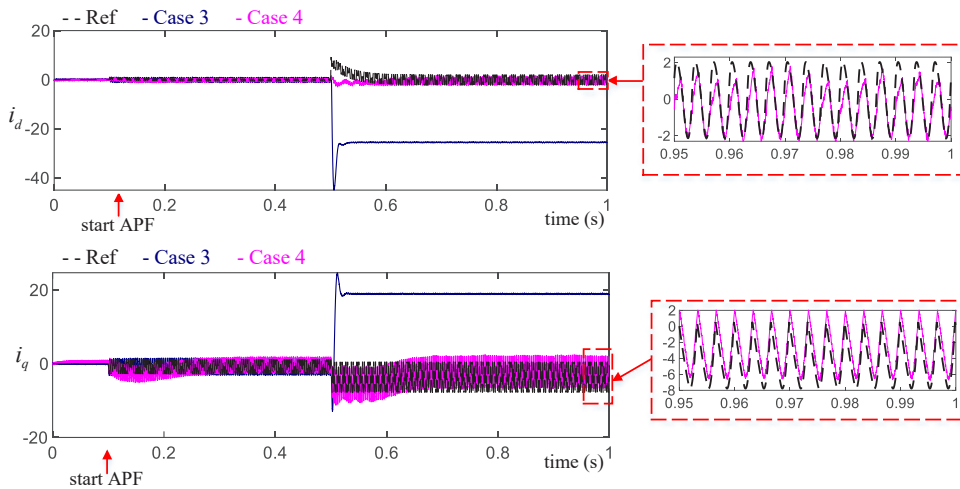
รูปที่ 7 สัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดิวและบนแกนคิว กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2

พารามิเตอร์ในกรณีที่ 2 แต่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ โหลด ซึ่งทำให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ของอสมการเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงและกรณีที่ 4 การสุ่มค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ เมื่อ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโหลด แสดงได้ดังตารางที่ 1

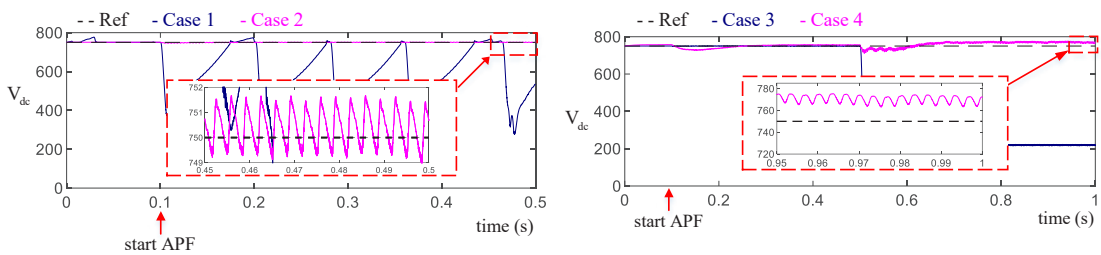
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

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 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนทั้ง 4 กรณี ปรากฏว่าในกรณี โหลดไม่เปลี่ยนแปลงและโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แสดง ได้ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ จากรูปที่ 7 พบว่า ในกรณีที่ 1 (กรณีที่ 1) เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเลื่อนไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ รูปสัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดิวและบนแกนคิว มีลักษณะไม่คล้ายตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ส่วนใน กรณีที่ 2 (กรณีที่ 2) เมื่อค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเลื่อนเป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการ รูป สัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดิวและบนแกนคิว มีลักษณะ



รูปที่ 8 สัญญาณกระแสชดเชยบนแกนดีและบนแกนควิ กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2



รูปที่ 9 สัญญาณแรงดันบัสไฟตรงทั้ง 4 กรณี

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

รูปที่ 9 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงทั้ง 4 กรณีพบว่า ในกรณีที่ 1 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ในกรณีที่ 2 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ ในกรณีที่ 3 สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้เฉพาะสภาวะที่โหลดไม่เปลี่ยนแปลงและในกรณีที่ 4 ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ทุกสภาวะโหลด จากผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงทั้ง 4 กรณีพบว่า มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีและแกนควิ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในช่วง 0.05 วินาทีสุดท้ายของผลการจำลองสถานการณ์ซึ่งประกอบด้วยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของกระแสชดเชยบนแกนดี ( $|\delta_{ic,d}|$ ) บนแกนควิ ( $|\delta_{ic,q}|$ ) และแรงดันบัสไฟตรง ( $|\delta_{v,dc}|$ )

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 กรณีที่นำเสนอข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า 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

#### 4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ การยืนยันผลการออกแบบมุ่งเน้นพิจารณาสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟตามเงื่อนไขของอสมการ โดยทำการจำลองสถานการณ์ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ค่าพารามิเตอร์

ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ซึ่งพบว่า ระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงให้ใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงได้ ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อค่าพารามิเตอร์เป็นไปตามเงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ปรากฏว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงให้ใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงได้ ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ผลการจำลองสถานการณ์ที่นำเสนอสามารถยืนยันได้ว่า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของอสมการจากฟังก์ชันเลียบูโนฟ ทำให้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

#### 5. 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.