

Received: Nov 15, 2022

Revised: Mar 31, 2023

Accepted: Apr 24, 2023

การควบคุมแบบสไลด์โหมดสำหรับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรเรียงกระแส
สามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล
SLIDING MODE CONTROL FOR POWER FACTOR IMPROVEMENT OF THREE-PHASE
PWM RECTIFIER WITH LCL-FILTER

กัจจาด ใจตรง¹ ปิยะนัฐ ใจตรง²¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรีKumjat Jaitrong¹ Piyanat Jaitrong²¹Electrical Technology and Automatic Control System, Faculty of Engineering and Technology,
Siam Technology College²Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

E-mail: nat.jai.007@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟและวิธีการควบคุมกระแสแบบสไลด์โหมดที่ให้ประสิทธิภาพการติดตามที่ดีและความทนทานเมื่อเทียบกับรูปแบบพารามิเตอร์รวมทั้งใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz ขณะวงจรจ่ายแรงดันได้เท่ากับ 700 V คงที่ที่โหลดเท่ากับ 3,553 W ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.50 % และ 0 % ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยลดลง 29.39% และ 4.63% ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1.0 และกระแสฮาร์โมนิกได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

คำสำคัญ: การควบคุมแบบสไลด์โหมด, วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม, ตัวกรองแบบแอลซีแอล

Abstract

The objective of this research is to develop a control strategy for a three-phase PWM rectifier with a LCL- filter is to reduce current and voltage harmonic distortion and to improve the power factor correction nearly to unity power factor. This action is accomplished by using active RLC high-frequency harmonics filters and a sliding mode current control method that provides good tracking performance and robustness with respect to parameter variations including uses a PI controller to regulate the DC voltage. The simulation results showed that the LCL-filter connected to three-phase PWM rectifier with the balanced three-phase grid of Electricity at the voltage of 380 V at a frequency of 50 Hz with 700 V constant voltage supply as the same 3,553 W load. The harmonic distortion of current and voltage is averaged 2.50% and 0% respectively, with an average decrease of 29.39% and 4.63% respectively. Affecting to raise the power factor was equal to 1 and the harmonic current was in accordance with IEC1000-3-2 all requirements.

Keywords: sliding mode control, three-phase PWM rectifier, LCL-filter

บทนำ

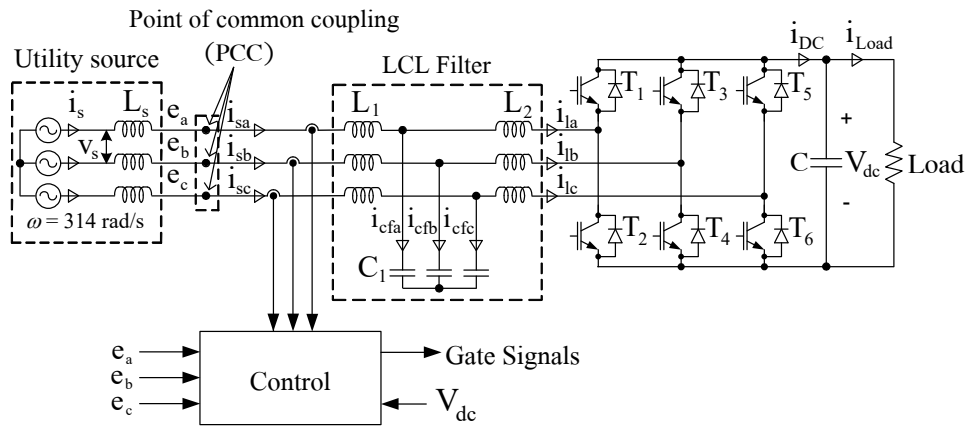
การควบคุมพลังงานไฟฟ้าหรือการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็น ซึ่งการแปลงพลังงานไฟฟ้าเหล่านั้นจะใช้คอนเวอร์เตอร์กำลังเป็นตัวแปลงพลังงาน โดยใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มเป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ ซึ่งการแปลงพลังงานดังกล่าวจะเกิดฮาร์มอนิกขึ้นเพื่อลดผลกระทบจำเป็นต้องใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟเป็นที่นิยมมากในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มเพื่อลดฮาร์มอนิกเมื่อมีการเชื่อมต่อกับกริด อย่างไรก็ตามตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟแอคส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ปะปนกับกระแสรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งการควบคุมกระแสเพื่อลดความถี่เรโซแนนซ์ สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform และระบุความถี่ของฮาร์มอนิกรวมของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็ม (Dekka Udhaya Bhanu and Ch. Venkata Rao, 2020: 3757-3762) การลดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้น สามารถทำได้ด้วยการต่อตัวต้านทานอนุกรมกับตัวกรองแบบซี (Qianqian Zhang, Bo Fan, Zhengxin Zhao, Shuaihui Gu, 2021: 471-483) อย่างไรก็ตามการใช้ฮัลกอริทึมตามแนวทางของการควบคุมแบบสไลดิงโหมด ทำให้ประสิทธิภาพการติดตามที่ดีและความทนทานเมื่อเทียบกับรูปแบบพารามิเตอร์อื่นทั้งยังมีการใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นและอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (D. Biel, A. D'oria-Cerezo and E. Fossas, 2013) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้เชื่อมต่อกับกริดและลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้เทคนิคพีดับลิวเอ็มและใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ รวมทั้งใช้การควบคุมสวิตซ์ในวงจรเพื่อปรับปรุงคลื่นกระแสให้เข้าใกล้รูปคลื่นไซน์อ้างอิง (กำจัด ใจตรง, ฉัตรชัย เขียวหิรัญ และปิยะนัฐ ใจตรง, 2562: 15-24) และยังมีการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟด้านเข้าตัวกรองแบบแอคทีฟของวงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบูสต์เพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้เทคนิคพีดับลิวเอ็มและใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟรวมทั้งใช้การควบคุมสวิตซ์ในวงจรเพื่อปรับปรุงคลื่นกระแสให้เข้าใกล้รูปคลื่นไซน์อ้างอิง อีกทั้งยังมีวิธีการลดการแกว่งแบบอาร์แอลซีเสมือนเป็นวิธีลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟแทนการใช้ตัวกรองด้านเข้าอาร์แอลซีแบบพาสซีฟ มีผลทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่งและทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น (กำจัด ใจตรง และปิยะนัฐ ใจตรง, 2562: 1-10)

งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอคทีฟแอลเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟและวิธีการควบคุมกระแสแบบสไลดิงโหมดที่ให้ประสิทธิภาพการติดตามที่ดีและความทนทานเมื่อเทียบกับรูปแบบพารามิเตอร์รวมทั้งใช้ตัวควบคุมพีโอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะสามารถแสดงระบบในภาพรวมได้ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอคทีฟแอล มีดังต่อไปนี้ เมื่อ e_a , e_b และ e_c เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า i_a , i_b และ i_c เป็นกระแสไฟฟ้าของโหลดซึ่งเกิดจากความผิดเพี้ยนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ควบคุมแบบพีดับลิวเอ็มจะสวิตซ์ให้กระแสไฟฟ้าที่รับจากกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีเฟสตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันจะมีการควบคุมให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ โดยเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมตัวเก็บประจุกับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่กำหนด ค่าความแตกต่างจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีโอ เพื่อให้ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการคงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมตัวเก็บประจุ เมื่อกระแสไฟฟ้าง่ายกล่าวคือกับแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าจะได้กระแสไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าที่รับจากกริดสามเฟสแบบสมดุล

ของการไฟฟ้าที่ป้อนกลับจะถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดเพื่อสร้างพัลส์พีดีบีลิวเอ็มไปควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่รับจากกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าติดตามกระแสไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่รับจากกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีความมูฟตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า



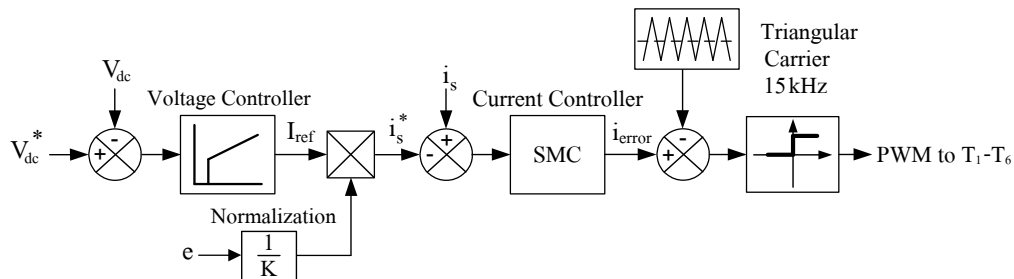
ภาพที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดีบีลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล

ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดีบีลิวเอ็ม ดังแสดงในสมการที่ 1

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{h=2}^n V_h I_h \cos \theta_h}{\sqrt{V_1^2 + \sum_{h=2}^n V_h^2} \times \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2}} \quad (1)$$

- โดยที่ V_1 แทน แรงดันอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่หลักมูลหรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 1 (V)
- V_h แทน แรงดันอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (V)
- I_1 แทน กระแสอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่หลักมูลหรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 1 (A)
- I_h แทน กระแสอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (A)
- θ_1 แทน มุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความถี่หลักมูลหรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 1 (องศา)
- θ_h แทน มุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (องศา)
- h แทน ลำดับฮาร์มอนิกใดๆ
- n แทน จำนวนลำดับฮาร์มอนิกใดๆ

การวิเคราะห์ระบบควบคุม



ภาพที่ 2 ระบบควบคุมวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดีบีลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล

จากภาพที่ 2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล แบ่งตามการควบคุมได้ดังนี้
ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Controller)

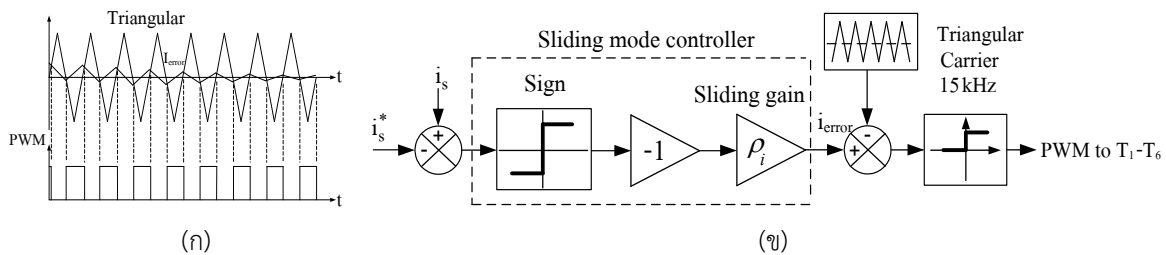
การทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล จำเป็นต้องควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุให้มีค่าที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเข้ามาควบคุมความแตกต่างระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุ ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{ref}(s) = (K_p + \frac{K_i}{s})(V_{dc}^*(s) - V_{dc}(s)) \tag{2}$$

เมื่อ V_{dc}^* และ V_{dc} คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดและค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมตัวเก็บประจุ โดยที่ K_p และ K_i คืออัตราขยายเทอมสัดส่วนและอัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ

การควบคุมสไลด์โหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะนำเอาสัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมกระแส (i_{error}) จากการควบคุมแบบสไลด์โหมดของความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มไปมอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่เกิดจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งเป็นตัวกำหนดการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก)



ภาพที่ 3 (ก) หลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่มีการควบคุมแบบสไลด์โหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม
 (ข) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 3 (ข) เป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมสไลด์โหมด โดยกฎการควบคุมของสไลด์โหมดเป็นไปตามสมการที่ 3 หรือ 4 ซึ่งแสดงใน (ทวิศักดิ์ ทองแสน ธีรยุทธ ชาติชนะยีนยง และ ณีรัฐวุฒิ สุวรรณทา, 2558: 18-31)

$$i_{error}(t) = -\rho_i \operatorname{sgn}(s(x,t)) \tag{3}$$

หรือ

$$i_{error}(t) = \begin{cases} -\rho_i & \text{if } s(x,t) > 0 \\ \rho_i & \text{if } s(x,t) < 0 \end{cases} \tag{4}$$

โดยที่ ρ_i คือการขยายสัญญาณสไลด์โหมดของกระแสไฟฟ้า $\operatorname{sgn}(\cdot)$ คือซิกนัมหรือฟังก์ชันเครื่องหมาย และ $s(x,t)$ คือฟังก์ชันสวิตช์

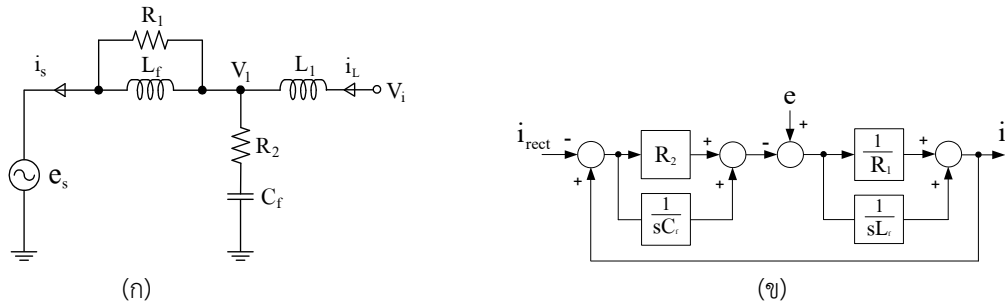
$$s(x,t) = e_i \tag{5}$$

โดย e_i คือ ค่าผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า และ x คือ สภาวะของระบบ

ส่วนการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่มาจากควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดกับกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 15 kHz ทำให้ได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มความถี่ 15 kHz เพื่อไปขับสวิทช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม

การวิเคราะห์ตัวกรองแอลซีแบบแอกทีฟและตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเป็นแนวคิดของตัวต้านทานเสมือนดังที่แสดงใน (P.A. Dahono, 2002:1630-1635) การวิเคราะห์ตัวกรองแบบแอลซีและตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อหาความสัมพันธ์ในการลดกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่เรโซแนนท์ โดยในการควบคุมจะสร้างตัวกรองแอลซีแบบแอกทีฟทำงานร่วมกับตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อลดการใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์วงจรมูลแบบเฟสเดียวดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) และเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้ในการสร้างเป็นตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟได้ดังแสดงในภาพที่ 4 (ข)



ภาพที่ 4 (ก) วงจรมูลแบบเฟสเดียวทางด้านเอซีของวงจรเรียงกระแสสามเฟส
(ข) บล็อกไดอะแกรมของวงจรมูลแบบเฟสเดียวทางด้านเอซีของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

จากภาพที่ 4 (ก) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์เพื่อหากระแสที่จ่ายให้วงจรเรียงกระแสสามเฟส (กำจัด ใจตรง ฉัตรชัย เจริญศิริ และปิยะนัฐ ใจตรง, 2562:15-24) โดยใช้สมการโนดวิเคราะห์ได้ผลดังนี้

$$V_1(s) = \frac{((R_1+L_f s)(R_2 C_f s+1)L_1)E(s) + (R_1 L_f (R_2 C_f s+1))V_i(s)}{(R_1+R_2)L_1 L_f C_f s^2 + ((R_1 R_2 C_f (L_1+L_f)) + L_1 L_f)s + R_1(L_1+L_f)} \tag{6}$$

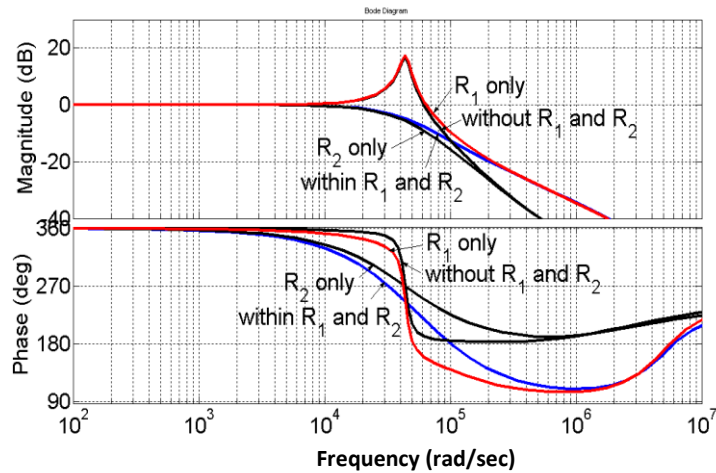
จากวงจรในภาพที่ 4(ก) สามารถหาค่า $I_s(s)$ ได้เป็น

$$I_s(s) = \frac{(L_f C_f R_2 s^2 + (C_f R_1 R_2 + L_f)s + R_1)V_i(s)}{(R_1+R_2)L_1 L_f C_f s^2 + ((R_1 R_2 C_f (L_1+L_f)) + L_1 L_f)s + R_1(L_1+L_f)s} - \frac{(L_1 L_f C_f s^3 + (L_1 C_f R_1 + L_f C_f R_2)s^2 + (C_f R_1 R_2 + L_f)s + R_1)E(s)}{(R_1+R_2)L_1 L_f C_f s^2 + ((R_1 R_2 C_f (L_1+L_f)) + L_1 L_f)s + R_1(L_1+L_f)s} \tag{7}$$

แทนค่า $V_i(s) = K(I_s^*(s) - I_s(s))$ ในสมการที่ 7 จะได้

$$I_s(s) = \frac{A I_s^*(s) - B E_s(s)}{C} \tag{8}$$

โดยที่ $A = R_2 L_f C_f K s^2 + K(R_1 R_2 C_f + L_f)s + R_1 K$
 $B = L_1 L_f C_f s^3 + (R_1 L_1 C_f + R_2 L_f C_f)s^2 + (R_1 R_2 C_f + L_f)s + R_1$
 $C = L_1 L_f C_f (R_1 + R_2)s^3 + (R_1 R_2 C_f (L_1 + L_f) + L_1 L_f + R_2 L_f C_f K)s^2 + (R_1(L_1 + L_f) + (R_1 R_2 C_f + L_f)K)s + R_1 K$
 จากสมการที่ 8 การปรับตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟทำได้โดยการปรับค่า R_1 และ R_2 ในภาพที่ 4 (ข) ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จากการปรับค่า R_1 และ R_2 ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของกระแสอินพุต ดังสมการที่ 8

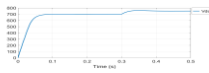
สรุปผลการวิจัย

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอจะจำลองการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างดังในภาพที่ 1 ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานดังแสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล

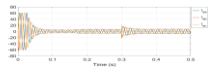
ตัวแปร	ค่าที่ใช้	ตัวแปร	ค่าที่ใช้
พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	3,553 W	อัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (K_p)	10
แรงดันไฟฟ้า	220 V _{L-N}	อัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (K_i)	1000
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	700 V _{dc}	อัตราขยายสัญญาณสไลด์ของกระแสไฟฟ้า (ρ_i)	2
ตัวเหนี่ยวนำด้านกริดการไฟฟ้า (L_1)	0.2 mH	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงแอลแบบแอกทีฟ (L_f)	1mH
ตัวเหนี่ยวนำด้านวงจรเรียงกระแสสามเฟส (L_2)	0.5 mH	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงซีแบบแอกทีฟ (C_f)	1uF
ตัวกรองแบบตัวเก็บประจุ (C_1)	5 μ F	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แบบแอกทีฟ (R_1)	1
ตัวเก็บประจุ (C_{dc})	2,000 μ F	ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แบบแอกทีฟ (R_2)	0.5
ความถี่ในการสวิตช์ (f_s)	15 kHz		

ผลการจำลองการทำงานสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะชั่วคราว เมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ (L_f, C_f, R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 6 ถึง ภาพที่ 9 และส่วนกรณีที่ 2 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ (L_f, C_f, R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ทั้งหมดเทียบกับการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 10 และภาพที่ 11

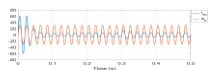
กรณีที่ 1 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะชั่วคราว เมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ (L_f, C_f, R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ทั้งหมด



(ก)



(ข)



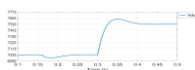
(ค)

ภาพที่ 6 (ก) แรงแดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด

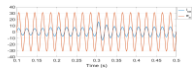
(ข) กระแสไฟฟ้าสามเฟสจากกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

(ค) กระแสไฟฟ้าจากกริดสามเฟสกับแรงแดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

จากภาพที่ 6 (ก) เป็นผลการจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มในช่วงเวลา 0 - 0.5 s โดยผลตอบสนองของแรงแดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด เมื่อเพิ่มโหลดอย่างฉับพลันจาก 2,450 W เป็น 3,267 W ที่เวลา 0.16 s และปรับเพิ่มแรงแดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 700 V เป็น 750 V ที่เวลา 0.3 s ในส่วนของกระแสไฟฟ้าสามเฟสจาก กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าจากกริดสามเฟสกับแรงแดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่มีค่ามุมเฟสตรงกันดังแสดงในรูปที่ 6 (ค) โดยในแต่ละช่วงเวลาสามารถแสดงเป็นส่วนๆได้ดังแสดงในภาพที่ 7 ถึงภาพที่ 9



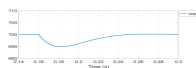
(ก)



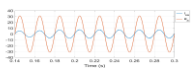
(ข)

ภาพที่ 7 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด

(ข) กระแสไฟฟ้าจากกริดสามเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า



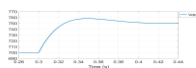
(ก)



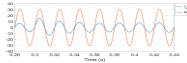
(ข)

ภาพที่ 8 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด

(ข) กระแสไฟฟ้าจากกริดสามเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า



(ก)



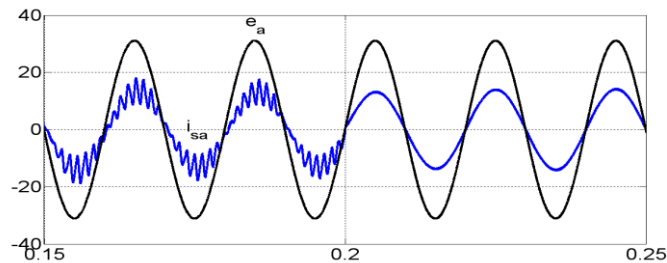
(ข)

ภาพที่ 9 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด

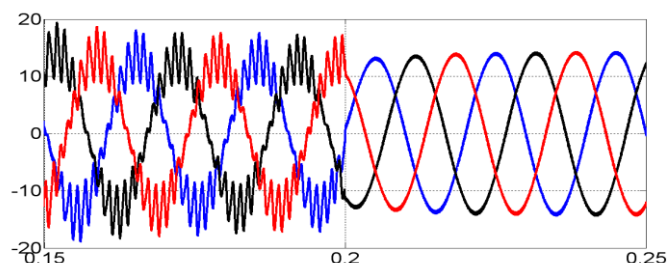
(ข) กระแสไฟฟ้าจากกริดสามเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

จากภาพที่ 7 เป็นผลการจำลองการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดีบีลิวเอ็มในช่วงเวลา 0.1 - 0.5 s โดยผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าสามเฟสจากกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า เมื่อเพิ่มโหลดอย่างฉับพลันจาก 2,450 W เป็น 3,267 W ที่เวลา 0.16 s จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) ลดลง ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เข้าสู่สภาวะเดิมได้ในเวลาประมาณ 90 ms โดยตัวควบคุมจะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าจากกริดสามเฟส ($I_{s,abc}$) เพิ่มขึ้น เพื่อให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 8 และเมื่อปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก 700 V เป็น 750 V ที่เวลา 0.3 s จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) เพิ่มขึ้น ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เข้าสู่สภาวะเดิมได้ในเวลาประมาณ 110 ms ดังแสดงในภาพที่ 9

กรณีที่ 2 ผลการจำลองการทำงานของเมื่อใช้ตัวกรองแบบฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) กับตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดเทียบกับการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 10 กระแสอินพุต (i_{sa} : 10A/div) และแรงดันอินพุต (e_a : 200V/div) ที่โหลดขนาด 2,450 W เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดและใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) ที่เวลา 0.2 s



ภาพที่ 11 กระแสอินพุต (i_{sabc} : 10A/div) ที่โหลดขนาด 2,450 W เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) ที่เวลา 0.2 s

จากภาพที่ 10 เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟที่เวลา 0.2 s จะเห็นว่ากระแสอินพุตและแรงดันอินพุตมีความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลง ส่วนกระแสอินพุตสามเฟสมีความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลงเช่นกันดัง

แสดงในภาพที่ 11 จากการจำลองการทำงานเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 2 ส่วนผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟ

โหลด (W)	I_s (A)	THD _i (%)	V_s (V)	THD _v (%)	P.F	P_{in} (W)	P_{loss} (W)	η (%)
2,450	6.47	32.13	380	4.68	0.74	3,150	700	77.78
3,267	8.73	31.82	380	4.62	0.74	4,250	983	76.87
3,553	9.44	31.71	380	4.60	0.74	4,600	1047	77.24

ตารางที่ 3 ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ และใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ิงโหมด

โหลด (W)	I_s (A)	THD _i (%)	V_s (V)	THD _v (%)	P.F	P_{in} (W)	P_{loss} (W)	η (%)
2,450	3.778	2.85	380	0	1.00	2,487	37	98.51
3,267	5.052	2.74	380	0	1.00	3,325	58	98.26
3,553	5.515	1.92	380	0	1.00	3,630	77	97.88

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟ จะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 31.89% และ 4.63% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.50% และ 0% ตามลำดับ สำหรับตัวประกอบกำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.74 หลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 และเมื่อเพิ่มโหลดขึ้นค่ากำลังสูญเสียในวงจรเพิ่มขึ้นด้วยค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟ มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 77.30% หลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ ทำให้ค่ากระแสอินพุตลดลงเป็นผลให้ค่ากำลังสูญเสียลดลงด้วยส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 98.22%

ตารางที่ 4 ผลการจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ และใช้ตัวควบคุมกระแสแบบพีโอ (กำจัด ใจตรง, ฉัตรชัย เขียวหิรัญ และ ปิยะนัฐ ใจตรง, 2562: 15-24)

โหลด (W)	I_s (A)	THD _i (%)	V_s (V)	THD _v (%)	P.F	P_{in} (W)	P_{loss} (W)	η (%)
2,450	3.890	2.95	380	0.25	1.00	2,560	110	95.70
3,267	5.200	2.83	380	0.24	1.00	3,420	153	95.53
3,553	5.680	2.57	380	0.24	1.00	3,740	187	95.00

จากผลการจำลองการทำงานวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟในตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ิงโหมดให้ผลที่ดีกว่า โดยค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสมีค่าต่ำกว่า ค่ากำลังสูญเสียในวงจรมีค่าต่ำกว่า และค่าประสิทธิภาพมีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมกระแสแบบพีโอ

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการจำลองวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟกับแบบที่ใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟ

มาตรฐาน IEC1000-3-2		ตัวกรองแอลซีแบบพาสซีฟ			ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟและใช้ตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ			ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟและใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ิงโหมด		
ฮาร์โมนิกลำดับที่	IEC1000-3-2 Class A	โหนด			โหนด			โหนด		
		2,450 W	3,267 W	3,553 W	2,450 W	3,267 W	3,553 W	2,450 W	3,267 W	3,553 W
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	2.300	0.37	0.39	0.28	0.11	0.35	0.44	0.11	0.03	0.02
5	1.140	1.34	0.56	0.64	0.23	0.50	0.22	0.57	0.39	0.31
7	0.770	0.07	0.44	0.23	0.16	0.40	0.41	0.16	0.06	0.11
9	0.400	0.08	0.25	0.16	0.08	0.11	0.03	0.07	0.02	0.03
11	0.330	0.49	0.27	0.08	0.11	0.04	0.06	0.27	0.16	0.05
13	0.210	0.27	0.12	0.09	0.03	0.05	0.06	0.06	0.01	0.03
15	0.150	0.26	0.39	0.18	0.10	0.05	0.03	0.02	0.04	0.06
17	0.130	0.51	0.44	0.28	0.10	0.11	0.06	0.12	0.12	0.12
19	0.120	0.21	0.45	0.20	0.09	0.10	0.03	0.11	0.10	0.10

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟมีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์โมนิกที่ลำดับใดๆต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 เนื่องจากมีบางฮาร์โมนิกลำดับที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟและใช้การควบคุมกระแสแบบสไลด์ิงโหมดหรือใช้การควบคุมกระแสแบบพีไอ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์โมนิกที่ลำดับใดๆต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

อภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาการควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิดับลิวเอ็มที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟ (L_f , C_f , R_1 และ R_2) และวิธีการควบคุมกระแสแบบสไลด์ิงโหมดที่ให้ประสิทธิภาพการติดตามที่ดีและความทนทานเมื่อเทียบกับรูปแบบพารามิเตอร์รวมทั้งใช้ตัวควบคุมพีไอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 31.89% และ 4.63% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.50% และ 0% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับพบว่า ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสและแรงดันหลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟจะมีค่าลดลง 29.39% และ 4.63% ตามลำดับ สำหรับตัวประกอบกำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.74 หลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับพบว่าค่าตัวประกอบกำลังหลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟจะมีค่าสูงขึ้น 0.26 สำหรับประสิทธิภาพจากการทดสอบจะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพิดับลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 77.30% หลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 98.22% ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับพบว่าประสิทธิภาพหลังจากที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซี

แบบแอคทีฟจะมีค่าสูงขึ้น 20.92% และกระแสฮาร์โมนิกได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ จากผลการจำลองการทำงานวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็มที่มีการใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอคทีฟ เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าการใช้ตัวควบคุมกระแสแบบสไลด์ดิ้งโหมดให้ผลที่ดีกว่า โดยค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์โมนิกของกระแสมีค่าต่ำกว่า ค่ากำลังสูญเสียในวงจรมีค่าต่ำกว่า และค่าประสิทธิภาพมีค่าสูงกว่า การใช้ตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ

เอกสารอ้างอิง

- กำจัด ใจตรง, ฉัตรชัย เขียรศิริ, และ ปิยะนัฐ ใจตรง. (2562). กลยุทธ์การควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟด้านเข้าตัวกรองแบบแอลซีของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม*, 6(1), 15-24.
- กำจัด ใจตรง และ ปิยะนัฐ ใจตรง. (2562). วงจรเรียงกระแสบริดจ์เฟสเดียวที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบูสต์. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 3(2), 1-10.
- ทวีศักดิ์ ทองแสน, ชีรยุทธ ซาติชนะยืนยง, และ ณัฐวุฒิ สุวรรณทา.(2558). การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดสำหรับอุปกรณ์กักเก็บแรงดันพลวัตเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุลแรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็ว. *วารสารวิจัย มข*, 15(1), 18-31.
- Biel, D., D'oria-Cerezo, A., & Fossas, E. (2013). Sliding mode control of a single-phase LCL full-bridge rectifier. *Proc. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- Bhanu, D. U., & Rao, Ch. V. (2020). Interconnection of Voltage Source Converter to Utility Grid with LCL Filter using Resonance Damping Controllers. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(9), 3757-3762.
- Zhang, Q., Fan, B., Zhao, Z., & Gu, S. (2021). The PWM rectifier with LCL filter direct power control based on power damping feedback. *Journal of Vibro engineering*, 23(2), 471-483.

Translated Thai References

- Jaitrong, K., Dhienhirun, C., & Jaitrong, P. (2019). A Control Strategy to Actively Damp Oscillation in the Input LC Filter of Three-Phase PWM Rectifier. *Journal of Energy and Environment Technology*, 6(1), 15-24.
- Jaitrong, K., & Jaitrong, P. (2019). Single Phase Bridge Rectifier Circuit with Power Factor Correction of Boost Converter. *Journal of Thonburi University (Science and Technology)*, 3(2), 1-10.
- Thongsan, T., Chatchanayuenyong, T., & Suwanta, N. (2015). An Application of Sliding Mode Control for a Dynamic Voltage Restorer to Correct Unbalanced Voltage, Voltage Sags and Voltage Swells in Three-Phase System Using Rapid Algorithm. *KKU Research Journal*, 15(1), 18-31.