Received: Apr 10, 2022 **Revised:** Aug 30, 2022 **Accepted:** Sep 6, 2022

กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

DIRECT POWER CONTROL STRATEGY FOR LCL-FILTERED VOLTAGE SOURCE INVERTERS FOR CONNECTED TO THE THREE-PHASE GRID

กำจัด ใจตรง[1] ปิยะนัฐ ใจตรง[2]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี
Kumjat Jaitrong[1] Piyanat Jaitrong[2]
[1]Electrical Technology and Automatic Control System Faculty of Engineering and Technology
Siam Technology College
[2]Electrical Engineering Faculty of Engineering Thonburi University
E-mail: nat.jai.007@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงที่นำเสนอนี้เป็นการควบคุมลูปกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าโดยตรง ส่วนลูปกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัว รวมทั้งยังมีกลยุทธ์ในการลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานพบว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลและใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบได้ 30 kW ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในเวลาประมาณ 0.025 s ส่วนค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.92% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันมีค่าลดลงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 26.21% และ 3.30% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ ส่งผลให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

คำสำคัญ: การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง, อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน, กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

Abstract

The objective of this research is to apply the direct power control strategy for LCL-filtered voltage source inverters for the balanced three-phase connected grid. The proposed direct power control method is a power loop control to direct the power supply to the balanced three-phase grid of electricity. The current loop to control the electric current for a fast response to steady state. An active oscillation reduction strategy is also included for the LCL-filter to reduce the harmonics of the output current connected to the balanced three-phase grid of electricity. The simulation results showed that direct power control for voltage source inverter with the LCL-filter and using the active oscillation reduction connected to the balanced three-phase grid of Electricity at a voltage of 380 V at a frequency of 50 Hz with a power supply of 30 kW to the system. The PI power regulator can accurately control the

power supply to the balanced three-phase grid and accurate in approximately 0.025 s, the harmonic distortion of current and voltage is averaged 1.92% and 0.1% respectively. The harmonic distortion were 26.21% and 3.30% respectively, compared to the absence of an active oscillator. As a result, the harmonic currents are fully subject to the requirements of the IEC1000-3-2 standard.
Keywords: Direct power control, Voltage source inverters, The balanced three-phase grid of electricity

บทนำ

การควบคุมพลังงานโดยตรงเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดี เช่น การตอบสนองแบบไดนามิกที่รวดเร็ว เป็นต้น ในทางกลับกันความถี่ในการสวิตช์และสเปกตรัมการแพร่กระจายนั้นเป็นข้อเสียของวิธีการควบคุมพลังงานโดยตรงแบบดั้งเดิม แต่ถ้าหากสามารถควบคุมความถี่ในการสวิตช์ให้คงที่ได้ จะทำให้วิธีการควบคุมพลังงานโดยตรงไม่สูญเสียข้อดีนั้นไป ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของการควบคุมพลังงานโดยตรงคือการควบคุมโดยตรงของกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอกทีฟโดยไม่มีลูปการควบคุมภายในอย่างใด อย่างไรก็ตามในด้านกริดที่มีความเหนี่ยวนำต่ำมาก(สูงสุด 5%) ซึ่งเป็นเรื่องยากมากที่จะทำให้ได้ตามข้อกำหนดของ IEEE519 ที่ไม่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล โดยตัวกรองแบบแอลซีแอลสามารถลดระดับความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตที่ความถี่สวิตชิ่งให้ต่ำลงได้ แต่ในทางกลับกันตัวกรองแบบแอลซีแอลอาจทำให้เกิดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตที่ความถี่เรโซแนนท์ขึ้นทั้งในสภาวะไดนามิกและคงที่ได้ ส่วนวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสและการกำจัดฮาร์มอนิกที่ไม่ต้องการ ทำให้ประสิทธิภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น (L. A. Serpa, J. W. Kolar, S. Ponnaluri and P. M. Barbosa, 2005: 565-571) อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลจะทำให้การควบคุมอินเวอร์เตอร์ซับซ้อนและความไวต่อฮาร์มอนิกส์ (E. Twining and D. G. Holmes, 2003: 888-895) การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถละเลยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีโหลดไม่เชิงเส้นและโหลดอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับกริด นอกจากนี้หากแรงดันไฟฟ้าของกริดนั้นบิดเบี้ยวอาจทำให้อินเวอร์เตอร์สร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมา ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมเรโซแนนซ์เพื่อเลือกค่าชดเชยฮาร์มอนิก (Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang, 2012: 1407-1417) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เชื่อมต่อกับกริดและลดผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เข้ามารบกวน โดยใช้วิธีการลดการแกว่งแบบอาร์ซีเสมือน ซึ่งวิธีการลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์ซีแบบแอกทีฟขนานกับตัวกรองแบบซีของตัวกรองแบบแอลซีแอลแบบพาสซีฟ (Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang, 2015: 4726-4737) และวิธีการลดการแกว่งแบบอาร์แอลซีเสมือนเป็นวิธีลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟแทนการใช้ตัวกรองด้านเข้าอาร์แอลซีแบบพาสซีฟมีผลทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่งและทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น (Vladimir Blasko and Vikram Kaura, 1997: 542-550) อีกทั้งยังสามารถลดการแกว่งแบบแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยใช้กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่จะเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (กำจัด ใจตรง, 2563: 27-37)

งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงที่นำเสนอนี้เป็นการควบคุมลูปกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าโดยตรง ส่วนลูปกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัว รวมทั้งยังมีกลยุทธ์ในการลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยที่กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

วิธีดำเนินการวิจัย

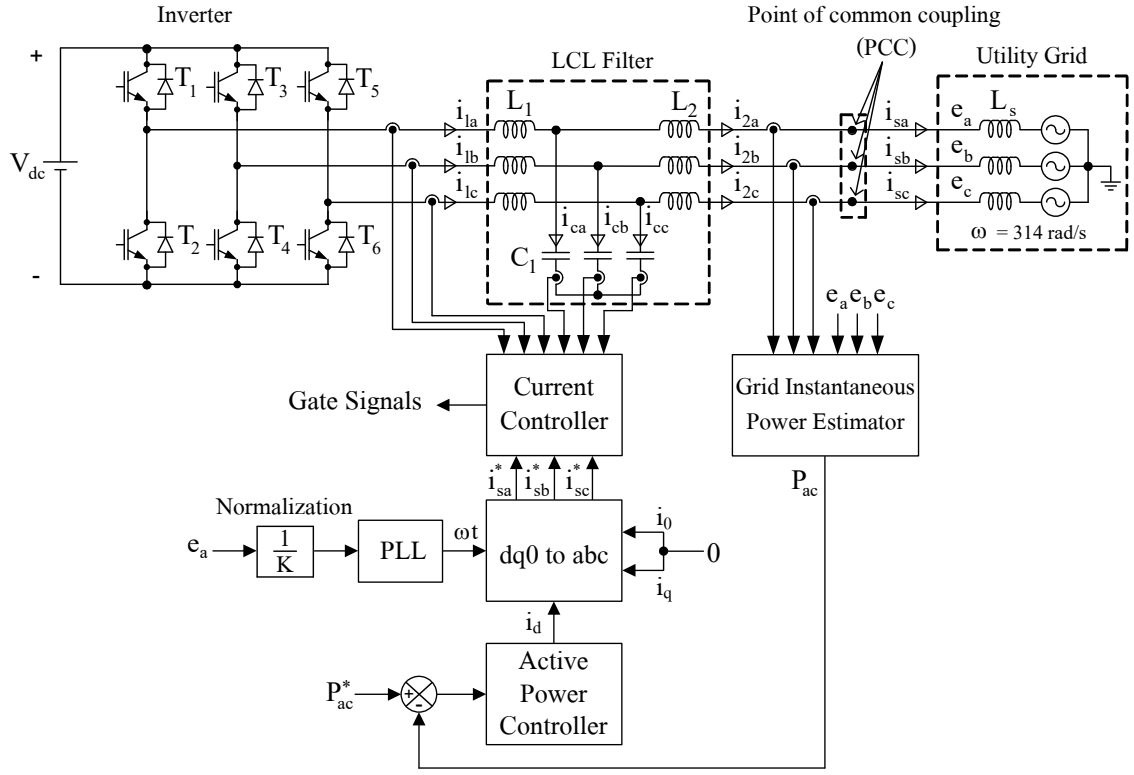
งานวิจัยนี้สามารถแสดงระบบในภาพรวมได้ดังแสดงในภาพที่ 1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้ เมื่อ

e เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า i_s เป็นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า และ P_{ac} เป็นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มจะสวิตช์ให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีเฟสตามแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ในขณะเดียวกันจะมีการควบคุมให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีค่าคงที่ โดยเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด ค่าความแตกต่างจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อให้ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการคงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวคูณกับเฟสของแรงดันที่ได้จากเฟสล็อคลูปจะได้กระแสไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์รวมกับผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองแบบตัวเก็บประจุกับค่าตัวลดการแกว่งแบบแอกทีฟจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบสไลดิ้งโหมด เพื่อสร้างพัลส์พีดับบลิวเอ็มไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าติดตามกระแสที่กำหนด ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 1

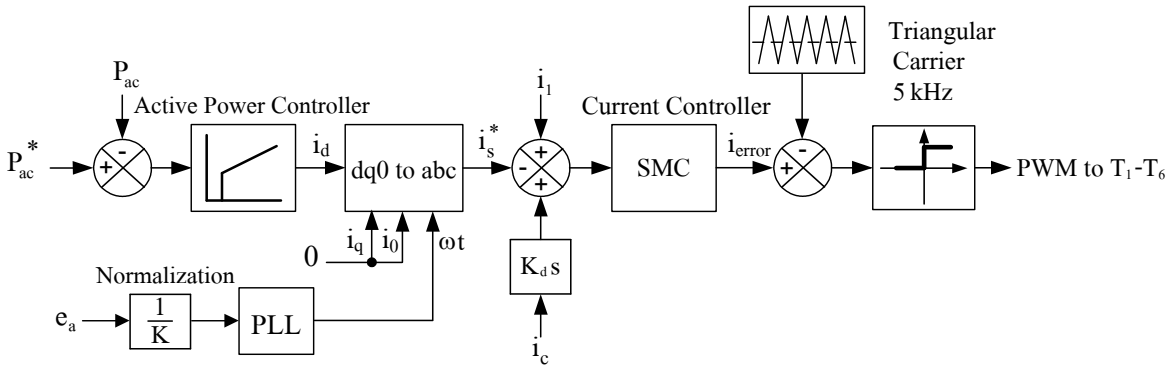
$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos\theta_1 + \sum_{h=2}^{n} V_h I_h \cos\theta_h}{\sqrt{V_1^2 + \sum_{h=2}^{n} V_h^2} \times \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{n} I_h^2}} \quad (1)$$

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



ภาพที่ 1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

การวิเคราะห์ระบบควบคุม



ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*

จากภาพที่ 2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน* สามารถแบ่งตามการควบคุมได้ดังนี้

ตัวควบคุมระดับกำลังไฟฟ้า

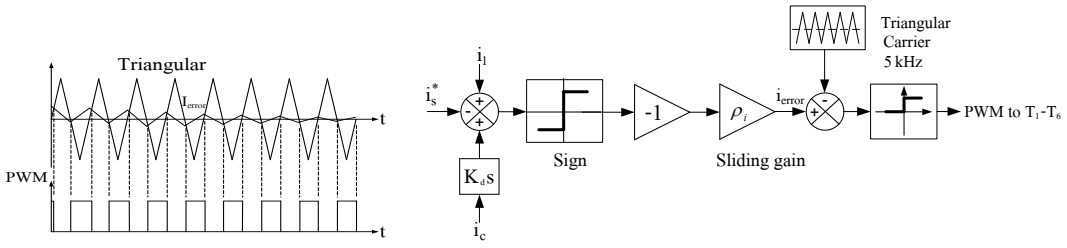
การทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน* จำเป็นต้องควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเข้ามาควบคุมความแตกต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d(s) = (K_P + \frac{K_I}{s})(P_{ac}^*(s) - P_{ac}(s)) \quad (2)$$

เมื่อ P_{ac}^* และ P_{ac} เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดและค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าตามลำดับ โดยที่ K_P และ K_I คืออัตราขยายเทอมสัดส่วนและอัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะนำเอาสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมกระแส(I_{error}) จากการควบคุมแบบสไลดิ้งโหมดของความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์รวมกับสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟไปมอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้เกิดจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน* ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก)



(ก) (ข)

ภาพที่ 3 (ก) หลักการทำงานของการควบคุมสไลดิ้งโหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม
(ข) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมสไลดิ้งโหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 3 (ข) เป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมสไลดิ้งโหมด โดยกฎการควบคุมของสไลดิ้งโหมดเป็นไปตามสมการที่ 3 หรือ 4 ซึ่งแสดงใน (ทวีศักดิ์ ทองแสน ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง และณัฐวุฒิ สุวรรณทา, 2558: 18-31)

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

หรือ

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

โดยที่ ρ_i คือการขยายสัญญาณสไลดิ้งของกระแสไฟฟ้า $\operatorname{sgn}(.)$ คือซิกนัมหรือฟังก์ชั่นเครื่องหมาย และ *s(x,t)* คือฟังก์ชั่นสวิตช์

$$s(x,t) = e_i \quad (5)$$

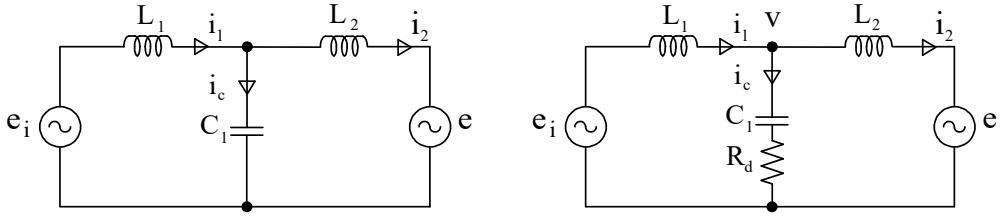
โดย e_i คือ ค่าผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า และ *x* คือ สภาวะของระบบ

ส่วนการกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจากการควบคุมแบบสไลดิ้งโหมดกับกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 5 kHz ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ความถี่ 5 kHz เพื่อไปขับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*

การวิเคราะห์ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟ

ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเป็นแนวคิดของตัวต้านทานเสมือนดังที่แสดงใน (P.A. Dahono, 2002:1630-1635) การวิเคราะห์ตัวกรองแบบแอลซีแอลและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อหาความสัมพันธ์ในการลดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนท์ โดยในการควบคุมจะสร้างตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟขึ้นมา ซึ่งสามารถพิจารณาจากวงจรสมมูลแบบเฟสเดียวดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) โดยที่ e คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า e_i คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของ

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน และ L_1, L_2, C_1 คือ* ตัวกรองแบบแอลซีแอล *ส่วน*การวิเคราะห์ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะต้องวิเคราะห์วงจรในภาพที่ 4 (ข) เป็นแนวคิดของตัวควบคุมการแกว่งแบบพาสซีฟ (L. A. Serpa, J. W. Kolar, S. Ponnaluri and P. M. Barbosa, 2005: 565-571) โดยการวิเคราะห์สามารถเริ่มต้นจากการหาความสัมพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งแบบพาสซีฟกับแบบแอกทีฟ ซึ่งแสดงใน (กำจัด ใจตรง, 2547: 509-512)



(ก) ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอล (ข) ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลและตัวลดการแกว่งแบบพาสซีฟ

ภาพที่ 4 วงจรสมมูลแบบเฟสเดียวของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*

จากภาพที่ 4 (ข) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์เพื่อหากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (i_s) โดยใช้หลักการวิเคราะห์ของสมการโนด (Node equation) จะได้

$$\frac{V-e}{sL_2} + \frac{V-e_i}{sL_1} + \frac{V}{R_d+\frac{1}{sC_1}} = 0 \tag{6}$$

แก้สมการที่ 6 เพื่อหาค่า V จะได้

$$V = \frac{L_2C_1R_ds+L_2}{L_1L_2C_1s^2+C_1R_d(L_1+L_2)s+(L_1+L_2)}e_i + \frac{L_1C_1R_ds+L_1}{L_1L_2C_1s^2+C_1R_d(L_1+L_2)s+(L_1+L_2)}e \tag{7}$$

จากวงจรในภาพที่ 4 (ข) สามารถหาค่า i_s ได้ในสมการที่ 8

$$i_S = \frac{Ai_S^*-Be}{Cs^4+Ds^3+Es^2+Fs+K_IK_fK} \tag{8}$$

เมื่อ

$A = C_1R_dKK_Ps^2+(C_1R_dK+KK_P)s+KK_I$

$B = L_1C_1s^3+C_1R_ds^2+s$

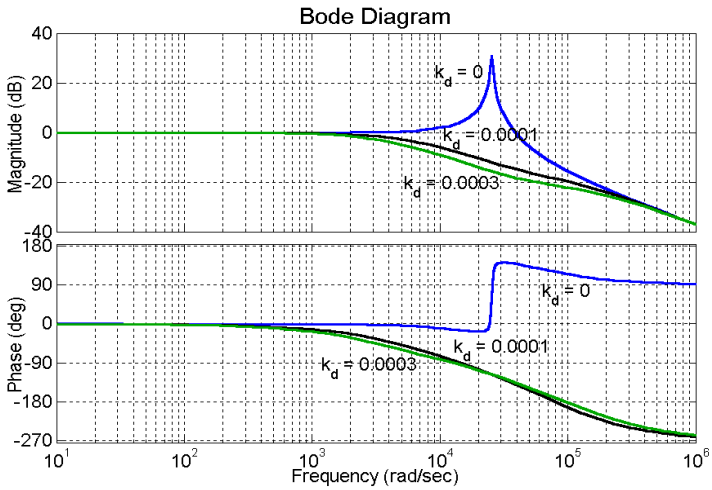
$C = L_1L_2C_1$

$D = C_1R_dL_1+C_1R_dL_2+K_PK_dKC_1R_d$

$E = L_1+L_2+K_PK_dK+C_1R_dKK_P+C_1R_dKK_dK_I$

$F = C_1R_dK_IK+K_PK+K_dK_IK$

สมการของระบบตามสมการที่ 8 การปรับตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการปรับค่า k_d แทนการเพิ่มค่า R_d โดยเมื่อปรับค่า k_d เพิ่มขึ้น มีผลทำให้อัตราขยายของกระแสอินพุตที่ความถี่สูงลดลง ส่งผลทำให้ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสลดลงด้วย ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสเฟอร์ฟังชั่นของกระแสอินพุตดังสมการที่ 8 เมื่อ k_d เปลี่ยน

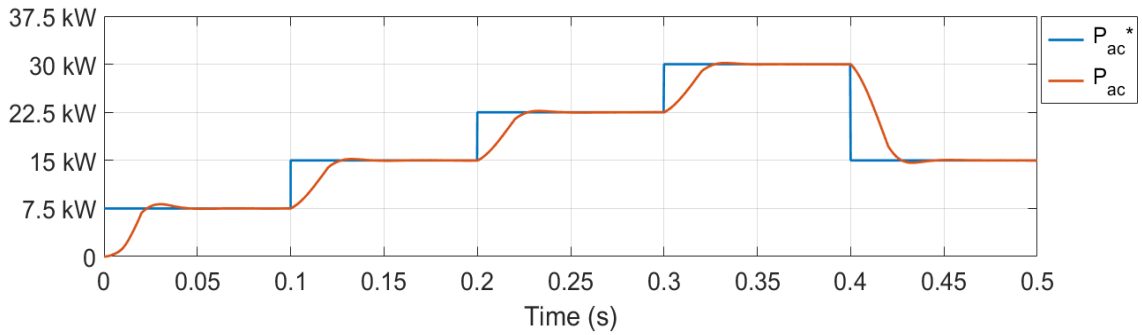
ผลการวิจัย

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอจากการจำลองการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 1 ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 1

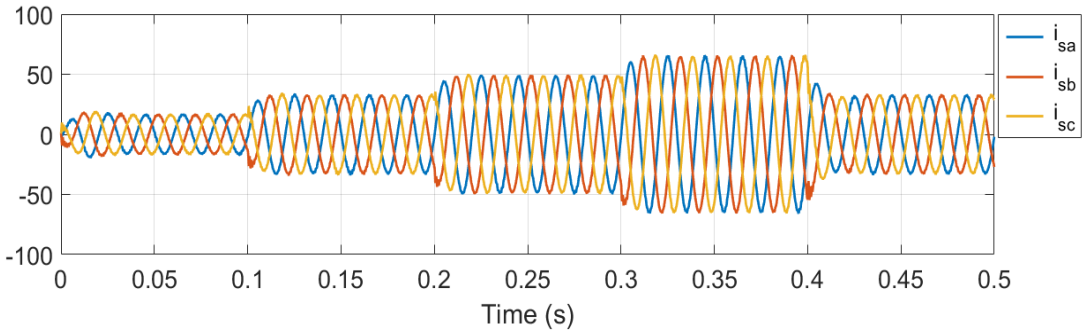
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*และตัวกรองแบบแอลซีแอล

ตัวแปร	ค่าที่ใช้	ตัวแปร	ค่าที่ใช้
พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาท์พุต	30 kW	ความถี่ในการสวิตช์ (f_s)	5 kHz
แรงดันไฟฟ้า	220 $V_{L\text{-}N}$	อัตราขยายเทอมอนุพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ (K_d)	0.0003
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	900 V_{dc}	อัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า (K_P)	25
ตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์ (L_1)	2 mH	อัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า (K_I)	5000
ตัวเหนี่ยวนำด้านกริดการไฟฟ้า (L_2)	2 mH	การขยายสัญญาณสไลดิ้งของกระแสไฟฟ้า (ρ_i)	1
ตัวกรองแบบตัวเก็บประจุ (C_1)	10 μF		

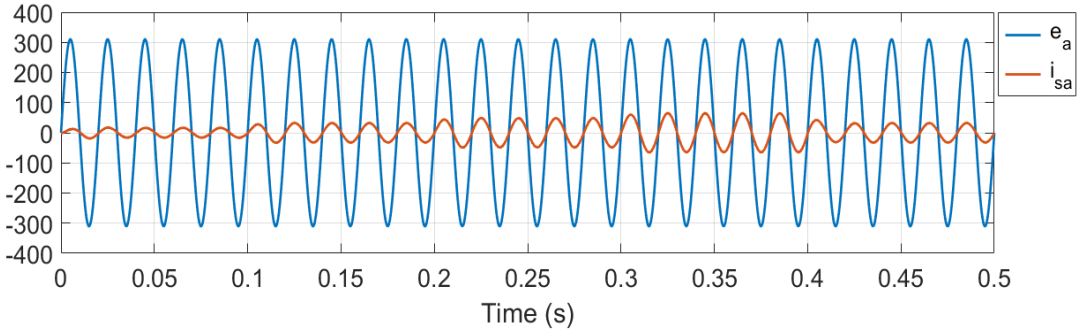
ผลการจำลองการทำงานดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7 ส่วนภาพที่ 8 และ 9 เป็นผลที่ได้จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน



(ก)



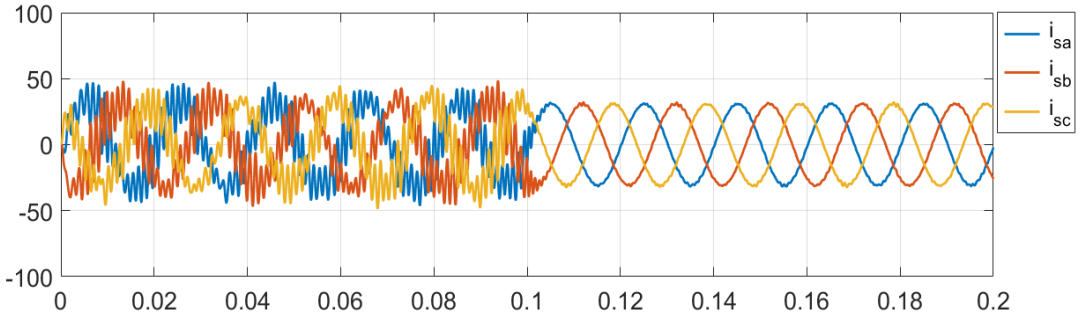
(ข)



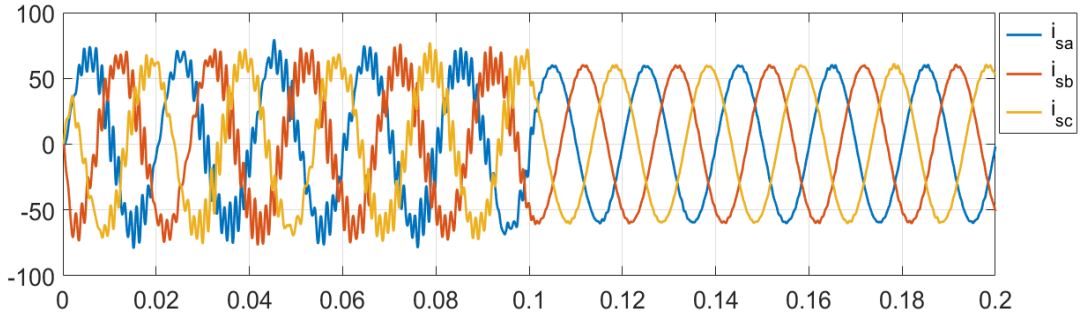
(ค)

ภาพที่ 6 (ก) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า
(ข) กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า
(ค) กระแสที่จ่ายให้กริดสามเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

จากภาพที่ 6 (ก) เป็นผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า เมื่อตั้งค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันจาก 7.5 kW ไปจนถึง 30 kW เพิ่มขึ้นครั้งละ 7.5 kW ที่เวลา 0.1 s , 0.2 s และ 0.3 s ส่วนที่เวลา 0.4 s ลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าลงอย่างฉับพลันจาก 30 kW เป็น 15 kW โดยตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในเวลาประมาณ 0.025 s ส่วนกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าจะแปรผันตามกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยตัวควบคุมกระแสแบบสไลดิ้งโหมดจะควบคุมให้กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังแสดงในภาพที่ 6 (ข) และกระแสที่จ่ายให้กริดสามเฟสอินเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 6 (ค)



(ก) จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าขนาด 15 kW



(ข) จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าขนาด 30 kW

ภาพที่ 7 กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ (K_d) ที่เวลา 0.1 s

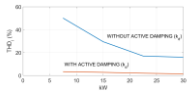
จากภาพที่ 7 เมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่เวลา 0.1 s จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลง จากการจำลองการทำงานเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 2 ส่วนผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

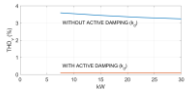
กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (kW)	I_S (A)	THD_I (%)	V_S (V)	THD_V (%)	P.F
7.5	11.57	50.12	220	3.59	0.73
15.0	23.44	29.50	220	3.44	0.75
22.5	35.64	16.98	220	3.32	0.77
30.0	46.94	15.92	220	3.24	0.77

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (kW)	I_S (A)	THD_I (%)	$V_{S,(L-N)}$ (V)	THD_V (%)	P.F
7.5	10.55	2.76	220	0.1	1.00
15.0	22.17	2.19	220	0.1	1.00
22.5	31.35	1.65	220	0.1	1.00
30.0	42.04	1.08	220	0.1	1.00



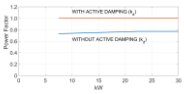
(ก)



(ข)

ภาพที่ 8 เปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่โหลดต่างๆ กัน
(ก) ผลต่อค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแส (ข) ผลต่อค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของแรงดัน

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 เมื่อนำไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่โหลดต่างๆ กัน พบว่าเมื่อไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28.13% และ 3.40% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.92% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันลดลง ดังแสดงในภาพที่ 8 สำหรับค่าตัวประกอบกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟทำให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่มีต่อตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่โหลดต่างๆ กัน

ตารางที่ 4 ข้อมูลค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลขณะวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟและกรณีใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

มาตรฐาน IEC1000-3-2		ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ				ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ			
ฮาร์มอนิก	IEC1000-3-2	โหลด				โหลด			
ลำดับที่	Class A	7.5 kW	15 kW	22.5 kW	30 kW	7.5 kW	15 kW	22.5 kW	30 kW
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	2.300	1.27	3.68	0.79	1.67	0.16	0.14	0.08	0.04
5	1.140	0.76	3.14	2.45	1.29	0.37	0.36	0.18	0.13
7	0.770	1.30	3.09	3.94	0.75	0.14	0.12	0.11	0.09
9	0.400	1.17	4.08	1.83	1.16	0.15	0.09	0.09	0.08
11	0.330	2.02	5.43	0.74	2.17	0.32	0.32	0.12	0.04
13	0.210	0.42	5.67	3.07	3.88	0.20	0.20	0.16	0.10
15	0.150	2.56	5.94	5.73	2.84	0.15	0.15	0.15	0.15
17	0.130	2.98	14.21	5.85	3.35	0.12	0.12	0.10	0.10
19	0.120	4.69	6.73	2.50	0.56	0.12	0.12	0.11	0.10

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 เนื่องจากมีบางฮาร์มอนิกลำดับที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้กลยุทธ์การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงที่นำเสนอนี้เป็นการควบคุมลูปกำลังไฟฟ้าแบบพีไอเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าโดยตรง ส่วนลูปกระแสไฟฟ้าควบคุมแบบสไลดิ้งโหมดเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการเข้าสู่สภาวะคงตัว กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับ

กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานพบว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลและใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบได้ 30 kW ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในเวลาประมาณ 0.025 s ส่วนค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันเมื่อไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28.13% และ 3.40% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.92% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกันพบว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าลดลง 26.21% และ 3.30% ตามลำดับ สำหรับตัวประกอบกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่ง*จ่ายแรงดัน*ที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกันพบว่าค่าตัวประกอบกำลังหลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าสูงขึ้น 0.24 และค่ากระแสฮาร์มอนิกได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

[1] Twining, E. and Holmes, D. G. (2003). Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter. *IEEE Transactions on Power Electronics, 18(3),* 888-895.

[2] Serpa, L.A., Kolar, J.W., Ponnaluri, S. and Barbosa, P.M. (2005). A modified direct power control strategy allowing the connection of three-phase inverter to the grid through LCL filters. *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 1,* 565-571.

[3] P.A. Dahono. (2002). A control method to damp oscillation in the input LC-filter. *Proceedings Power Electronics Specialist Conference, 4,* 1630-1635.

[4] Vladimir Blasko and Vikram Kaura. (1997). A Novel Control to Actively Damp Resonance in the Input LC Filter of Three-phase Voltage Source Converter. *IEEE Transactions on Industry Applications, 33(2),* 542-550.

[5] Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang. (2012). Synthesis of variable harmonic impedance in inverter-interfaced distributed generation unit for harmonic damping throughout a distribution network. *IEEE Transactions on Industry Applications, 48(4),* 1407-1417.

[6] Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang. (2015). Virtual RC Damping of LCL-Filtered Voltage Source Converters with Extended Selective Harmonic Compensation. *IEEE Transactions on Power Electronics, 30(9),* 4726-4737.

[7] กำจัด ใจตรง. (2547). *วิธีควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟด้านเข้าตัวกรองแบบแอล-ซีของวงจรเร็กติฟายเออร์สามเฟสแบบพีดับบลิวเอ็ม*. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27.

[8] กำจัด ใจตรง และปิยะนัฐ ใจตรง. (2563). การลดการแกว่งแบบแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี, 4(2*), 27-37.

[9] ทวีศักดิ์ ทองแสน ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง และณัฐวุฒิ สุวรรณทา.(2558). การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลดิ้งโหมดสำหรับอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็ว. *วารสารวิจัย มข, 15(1),* 18-31.