

Received: Jul 30, 2020

Revised: Oct 12, 2020

Accepted: Oct 20, 2020

การลดการแกว่งแบบแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอล เพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

ACTIVE DAMPING OF LCL-FILTERED VOLTAGE SOURCE INVERTERS FOR CONNECTED TO THE THREE-PHASE GRID OF ELECTRICITY

กำจัต ใจตรง¹ ปิยะนัฐ ใจตรง²¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรีKumjat Jaitrong¹ Piyanut Jaitrong²¹ Electrical and Electronics Technology Faculty of Engineering and Technology Siam Technology College²Electrical Engineering Faculty of Engineering Thonburi University

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยใช้กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่จะเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานพบว่าอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลและใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบได้ 30 kW ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าลดลงโดยมีผลต่าง 25.76% และ 3.30% ตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

คำสำคัญ: การลดการแกว่งแบบแอกทีฟ, อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน, กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

Abstract

The objective of this research is to apply the active damping of LCL-filtered voltage source inverters for the balanced three-phase connected grid. By using the active damping strategy for the LCL-filter to reduce the harmonics of the output current that is connected to the balanced three-phase grid of electricity. The simulation results found that the LCL-filter with the active oscillation reduction connected to voltage source inverter with balanced three-phase grid of Electricity at the voltage of 380 V at a frequency of 50 Hz with 30 kW of power input into the system. The current and voltage harmonic distortion would be reduced to 25.76% and 3.30% differences respectively. Affecting the harmonic current was under IEC1000-3-2 all requirements.

Keywords: active damping, voltage source inverter, the balanced three-phase grid of electricity

บทนำ

ตัวกรองแบบแอลซีแอลถูกใช้อย่างกว้างขวางกับการเชื่อมต่อกับกริด ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลจะสามารถลดริบเบิลของกระแสได้ดีกว่าการใช้ตัวกรองแบบแอลเพียงอย่างเดียว (M. Liserre, F. Blaabjerg and S. Hansen, 2005 : 1281-1291) อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลจะทำให้การควบคุมอินเวอร์เตอร์ซับซ้อนและไวต่อฮาร์มอนิก (E. Twining and D. G. Holmes, 2003: 888-895) การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถละเลยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีโหลดไม่เชิงเส้นและโหลดอเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับกริด นอกจากนี้หาก

แรงดันไฟฟ้าของกริดนั้นบิดเบี้ยวอาจทำให้อินเวอร์เตอร์สร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมา ซึ่งจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมเรโซแนนซ์เพื่อเลือกค่าชดเชยฮาร์มอนิก (Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang, 2012: 1407-1417) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เชื่อมต่อกับกริดและลดผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เข้ามาบริเวณโดยใช้วิธีการลดการแกว่งแบบอาร์ซีเอเสมือน ซึ่งวิธีการลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์ซีเอแบบแอคทีฟขนานกับตัวกรองแบบซีของตัวกรองแบบแอคทีฟแบบพาสซีฟ (Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang, 2015: 4726-4737) และวิธีการลดการแกว่งแบบอาร์แอลซีเอเสมือนเป็นวิธีลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีเอแบบแอคทีฟแทนการใช้ตัวกรองด้านเข้าอาร์แอลซีเอแบบพาสซีฟ มีผลทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงหนึ่งและทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสูงขึ้น (Vladimir Blasko and Vikram Kaura, 1997: 542-550)

งานวิจัยนี้นำเสนอการลดการแกว่งแบบแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอคทีฟแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยใช้กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอคทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอคทีฟแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่จะเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยที่กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะสามารถแสดงระบบในภาพรวมได้ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอคทีฟแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้ เมื่อ e เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า i_s เป็นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า และ P_{ac} เป็นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ควบคุมแบบพีดีบีลิวเอ็มจะสวิตช์ให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีเฟสตามแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ในขณะเดียวกันจะมีการควบคุมให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีค่าคงที่โดยเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด ค่าความแตกต่างจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อให้ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการคงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าง่ายดังกล่าวคูณกับเฟสของแรงดันที่ได้จากเฟสล็อกคลุ๊ปจะได้กระแสไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ร่วมกับผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองแบบตัวเก็บประจุกับค่าตัวลดการแกว่งแบบแอคทีฟจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อสร้างพีดีบีลิวเอ็มไปควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าติดตามกระแสที่กำหนด ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีค่ามูฟเฟสตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันมีผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอคทีฟแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า 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)

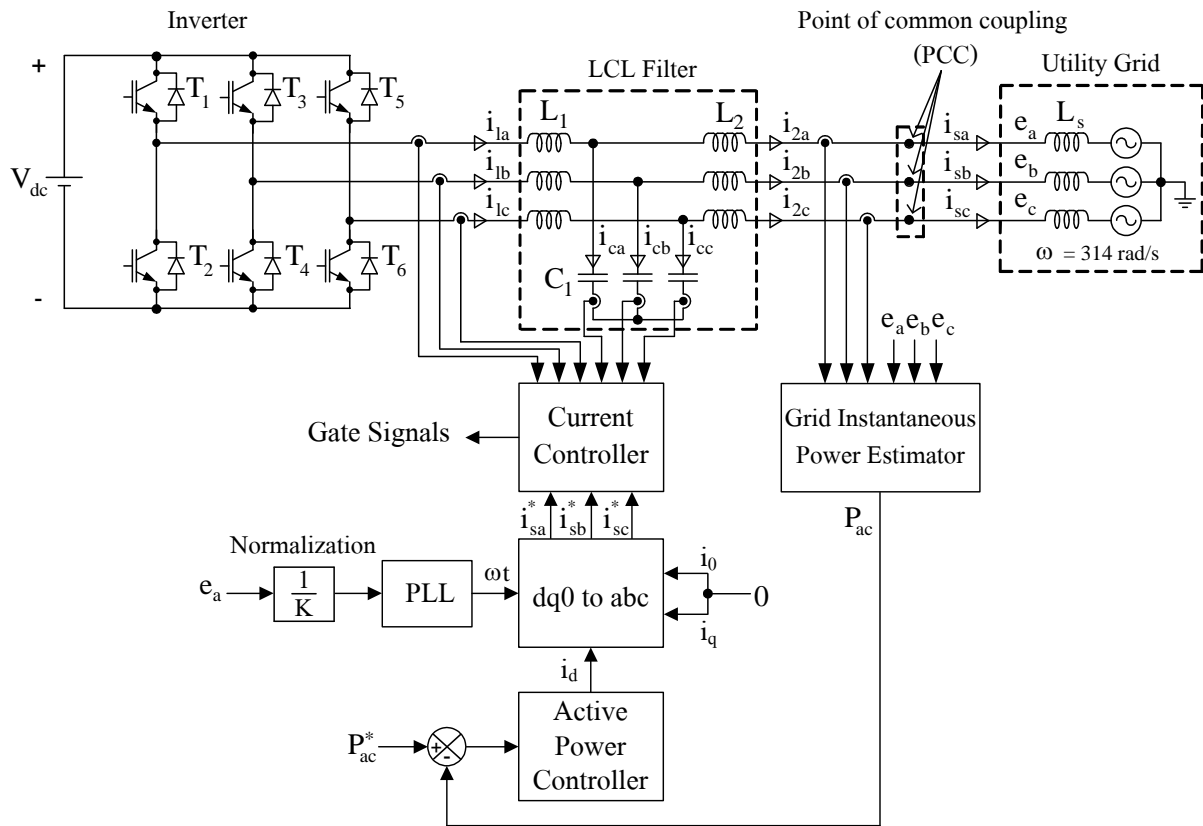
I_h แทน กระแสอาร์เอ็มเอสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (A)

θ_1 แทน มุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความถี่หลักมูลหรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 1 (องศา)

θ_h แทน มุมต่างเฟสระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความถี่ลำดับฮาร์มอนิก h ใดๆ (องศา)

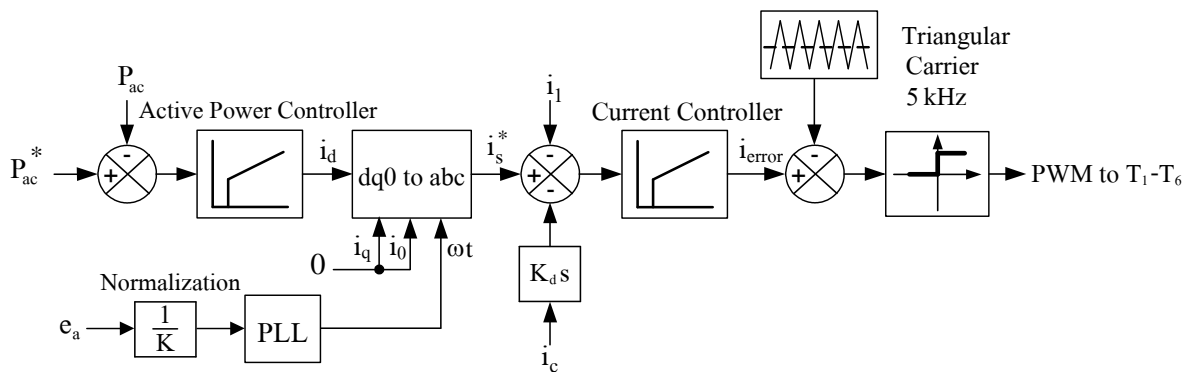
h แทน ลำดับฮาร์มอนิกใดๆ

n แทน จำนวนลำดับฮาร์มอนิกใดๆ



ภาพที่ 1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า

2.1 การวิเคราะห์ระบบควบคุม



ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

จากภาพที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน สามารถแบ่งตามการควบคุมได้ดังนี้

2.1.1 ตัวควบคุมระดับกำลังไฟฟ้า

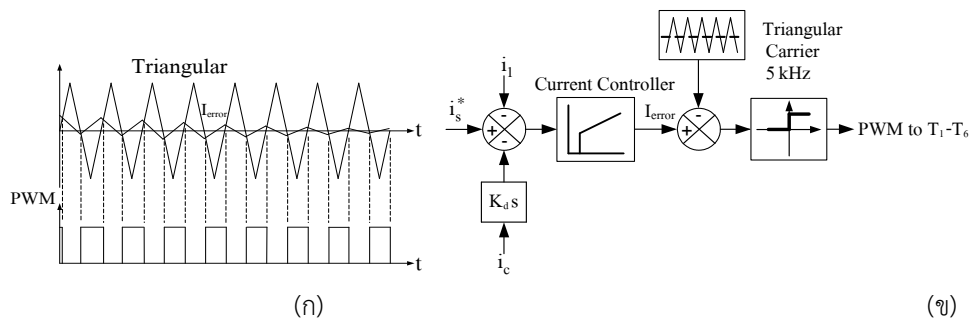
การทำงานของวงจรมินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน จำเป็นต้องควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเข้ามาควบคุมความแตกต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d(s) = (K_{pp} + \frac{K_{ip}}{s})(P_{ac}^*(s) - P_{ac}(s)) \tag{2}$$

เมื่อ P_{ac}^* และ P_{ac} คือค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดและค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าตามลำดับ โดยที่ K_{pp} และ K_{ip} คืออัตราขยายเทอมสัดส่วนและอัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

2.1.2 ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะนำเอาสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมกระแส (I_{error}) จากการควบคุมแบบพีโอของความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ร่วมกับสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟไปมอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง สัญญาณพีดับลิเวียมที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการทำงานของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก)



ภาพที่ 3 (ก) หลักการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม
(ข) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 3 (ข) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

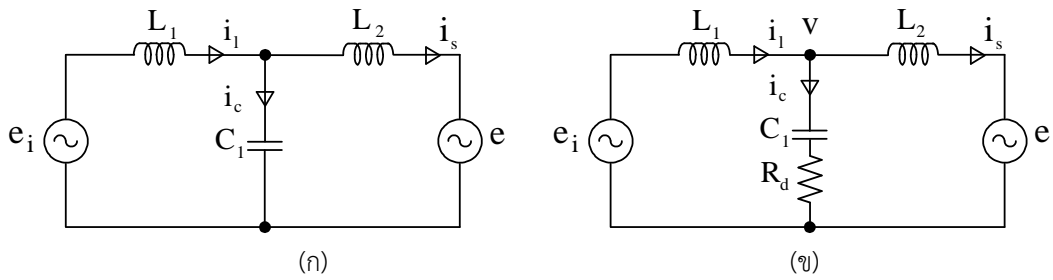
$$I_{error}(s) = (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s})(i_s^*(s) - i_1(s) - K_d s i_c(s)) \tag{3}$$

เมื่อ i_s^* , i_1 และ i_c คือค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนด ค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองแบบตัวเก็บประจุตามลำดับ โดยที่ K_{pi} และ K_{ii} คืออัตราขยายเทอมสัดส่วนและอัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกระแสตามลำดับ และ K_d คืออัตราขยายเทอมดิฟเฟอเรนเชียลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

ส่วนการกำเนิดสัญญาณพีดับลิเวียม ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจากการควบคุมแบบพีโอกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่ความถี่ 5 kHz ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ความถี่ 5 kHz เพื่อขับสวิตช์ของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

2.1.3 การวิเคราะห์ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟ

ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเป็นแนวคิดของตัวต้านทานเสมือนดังที่แสดงใน (P.A. Dahono, 2002:1630-1635) การวิเคราะห์ตัวกรองแบบแอลซีแอลและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อหาความสัมพันธ์ในการลดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่รีโซแนนท์ โดยในการควบคุมจะสร้างตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟขึ้นมา ซึ่งสามารถพิจารณาจากวงจรมอดูเลตเฟสเดียวดังแสดงในรูปที่ 4(ก) โดยที่ e คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า e_r คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน และ L_1, L_2, C_1 คือ ตัวกรองแบบแอลซีแอล ส่วนการวิเคราะห์ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะต้องวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 4(ข) เป็นแนวคิดของตัวควบคุมการแกว่งแบบพาสซีฟ (L. A. Serpa, J. W. Kolar, S. Ponnaluri and P. M. Barbosa, 2005: 565-571) โดยการวิเคราะห์สามารถเริ่มต้นจากการหาความสัมพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งแบบพาสซีฟกับแบบแอกทีฟ



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลแบบเฟสเดียวของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (ก) ไม่มีตัวลดการแกว่งแบบพาสซีฟ (ข) มีตัวลดการแกว่งแบบพาสซีฟ

ภาพที่ 4(ข) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (i_s) โดยใช้หลักการวิเคราะห์ของสมการโนด (Node equation) จะได้

$$\frac{V-e}{sL_2} + \frac{V-e_i}{sL_1} + \frac{V}{R_d + \frac{1}{sC_1}} = 0 \tag{4}$$

แก้สมการที่ 4 เพื่อหาค่า V จะได้

$$V = \frac{L_2 C_1 R_d s + L_2}{L_1 L_2 C_1 s^2 + C_1 R_d (L_1 + L_2) s + (L_1 + L_2)} e_i + \frac{L_1 C_1 R_d s + L_1}{L_1 L_2 C_1 s^2 + C_1 R_d (L_1 + L_2) s + (L_1 + L_2)} e \tag{5}$$

จากวงจรรูปที่ 4(ข) สามารถหาค่า i_s ได้ในสมการที่ 6

$$i_s = \frac{V-e}{sL_2} \tag{6}$$

แทนค่า V ลงไปในสมการที่ 6 เพื่อหา i_s ในสมการที่ 7 จะได้

$$i_s = \frac{C_f R_f s + 1}{L_1 L_f C_f s^3 + C_f R_f (L_1 + L_f) s^2 + (L_1 + L_f) s} e_i + \frac{L_1 C_f s^2 + C_f R_f s + 1}{L_1 L_f C_f s^3 + C_f R_f (L_1 + L_f) s^2 + (L_1 + L_f) s} e \tag{7}$$

แทนค่า e_i = K(K_{pi} + $\frac{K_{ii}}{s}$)(i_s*(s)-i₁(s)-K_dsi_c(s)) ในสมการที่ 7 จะได้

$$i_s = \frac{A i_s^* - B e}{C s^4 + D s^3 + E s^2 + F s + K_{ii} K} \tag{8}$$

เมื่อ

$$A = C_1 R_d K K_{pi} s^2 + (C_1 R_d K + K K_{pi}) s + K K_{ii}$$

$$B = L_1 C_1 s^3 + C_1 R_d s^2 + s$$

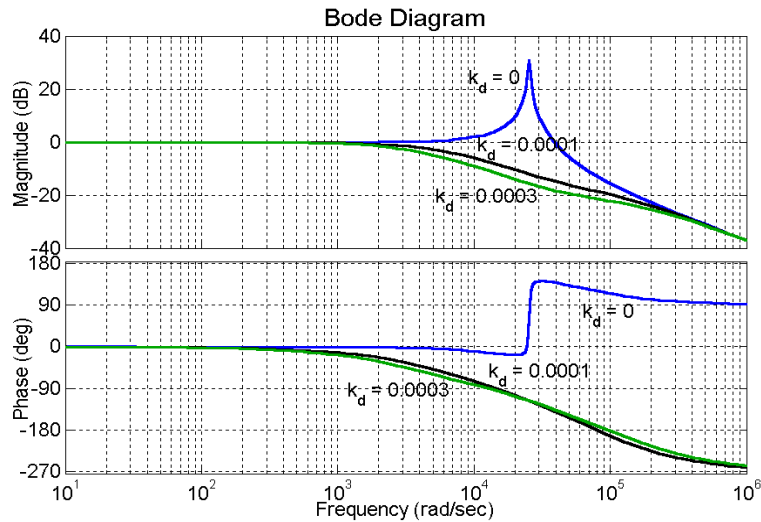
$$C = L_1 L_2 C_1$$

$$D = C_1 R_d L_1 + C_1 R_d L_2 + K_{pi} K_d K C_1 R_d$$

$$E = L_1 + L_2 + K_{pi} K_d K + C_1 R_d K K_{pi} + C_1 R_d K K_d K_{ii}$$

$$F = C_1 R_d K_{ii} K + K_{pi} K + K_d K_{ii} K$$

สมการของระบบตามสมการที่ 8 การปรับตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสที่จะเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการปรับค่า k_d แทนการเพิ่มค่า R_d โดยเมื่อปรับค่า k_d เพิ่มขึ้นมีผลให้อัตราขยายของกระแสอินพุตที่ความถี่สูงลดลง ส่งผลทำให้ความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสลดลงด้วย ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระแสอินพุตดังสมการที่ 8 เมื่อ k_d เปลี่ยน

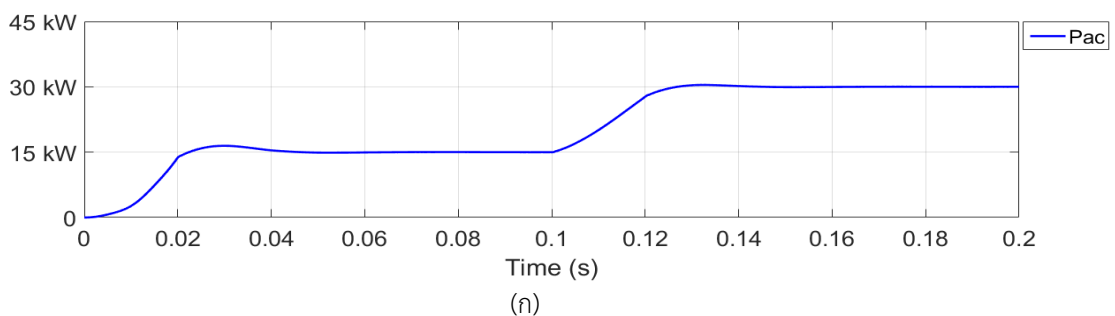
ผลการวิจัย

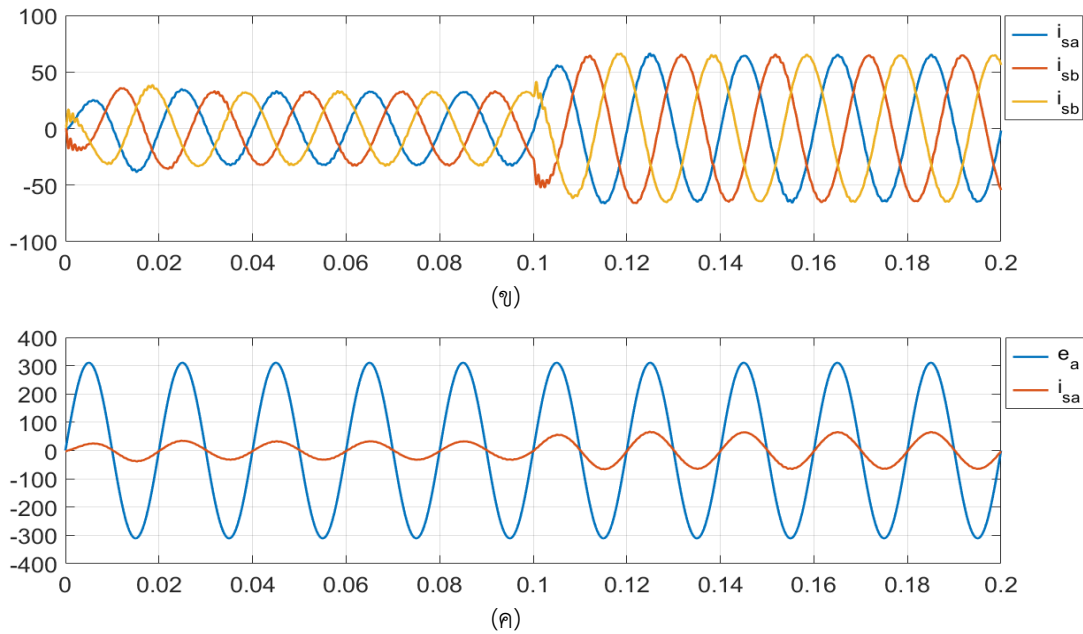
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอจะจำลองการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างดังในรูปที่ 1 ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันและตัวกรองแบบแอลซีแอล

| ตัวแปร | ค่าที่ใช้ | ตัวแปร | ค่าที่ใช้ |
|---|----------------------|--|-----------|
| พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต | 30 kW | ความถี่ในการสวิตช์ (f_s) | 5 kHz |
| แรงดันไฟฟ้า | 220 V _{L-N} | อัตราขยายเทอมอนุพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ (K_d) | 0.0003 |
| แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง | 900 V _{dc} | อัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า (K_{pp}) | 25 |
| ตัวเหนี่ยวนำด้านอินเวอร์เตอร์ (L_1) | 2 mH | อัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกำลังไฟฟ้า (K_{ip}) | 5000 |
| ตัวเหนี่ยวนำด้านกริดการไฟฟ้า (L_2) | 2 mH | อัตราขยายเทอมสัดส่วนของตัวควบคุมกระแส (K_{pi}) | 1 |
| ตัวกรองแบบตัวเก็บประจุ (C_1) | 10 μ F | อัตราขยายเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมกระแส (K_{ii}) | 5 |

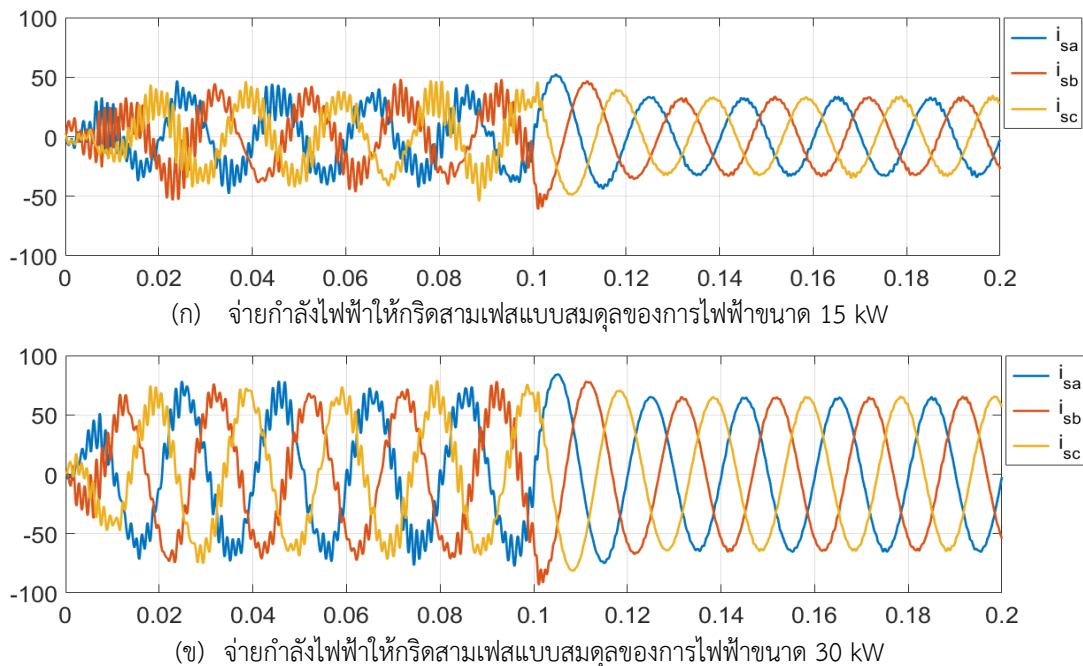
ผลการจำลองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ส่วนรูปที่ 8 และ 9 เป็นผลที่ได้จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน





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

จากภาพที่ 6(ก) เป็นผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันจาก 15 kW เป็น 30 kW ที่เวลา 0.1 s กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 6(ข) และกระแสที่จ่ายให้กริดสามเฟสอินเฟสกับแรงดันเฟสที่กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้างดแสดงในภาพที่ 6(ค)



ภาพที่ 7 กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ (K_d) ที่เวลา 0.1 s

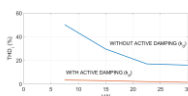
จากภาพที่ 7 เมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่เวลา 0.1 s จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกลดลง จากการจำลองการทำงานเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่แสดงผลที่ได้ในตารางที่ 2 ส่วนผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ ดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

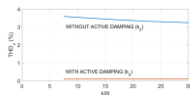
| กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (kW) | I_s (A) | THD _i (%) | V _s (V) | THD _v (%) | P.F |
|---|-----------|----------------------|--------------------|----------------------|------|
| 7.5 | 11.57 | 50.12 | 220 | 3.59 | 0.73 |
| 15.0 | 23.44 | 29.50 | 220 | 3.44 | 0.75 |
| 22.5 | 35.64 | 16.98 | 220 | 3.32 | 0.77 |
| 30.0 | 46.94 | 15.92 | 220 | 3.24 | 0.77 |

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

| กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า (kW) | I_s (A) | THD _i (%) | V _{S(L-N)} (V) | THD _v (%) | P.F |
|---|-----------|----------------------|-------------------------|----------------------|------|
| 7.5 | 11.46 | 3.33 | 220 | 0.1 | 1.00 |
| 15.0 | 22.74 | 2.74 | 220 | 0.1 | 1.00 |
| 22.5 | 31.35 | 1.98 | 220 | 0.1 | 1.00 |
| 30.0 | 45.63 | 1.41 | 220 | 0.1 | 1.00 |



(ก)

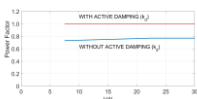


(ข)

ภาพที่ 8 เปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่โหลดต่างๆ กัน

(ก) ผลต่อค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแส (ข) ผลต่อค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของแรงดัน

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 เมื่อนำไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่โหลดต่างๆ กัน พบว่าเมื่อไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28.13% และ 3.40% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.37% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันลดลง ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับค่าตัวประกอบกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟทำให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบผลของตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่มีต่อตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่โหลดต่างๆ กัน

ตารางที่ 4 ข้อมูลค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟและกรณีใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

| มาตรฐาน IEC1000-3-2 | | ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ | | | | ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ | | | |
|---------------------|---------------------|----------------------------------|-------|---------|-------|-------------------------------|-------|---------|-------|
| ฮาร์มอนิกลำดับที่ | IEC1000-3-2 Class A | โหลด | | | | โหลด | | | |
| | | 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 | 0.14 | 0.45 | 0.30 | 0.03 |
| 5 | 1.140 | 0.76 | 3.14 | 2.45 | 1.29 | 0.09 | 0.31 | 0.16 | 0.34 |
| 7 | 0.770 | 1.30 | 3.09 | 3.94 | 0.75 | 0.30 | 0.04 | 0.27 | 0.21 |
| 9 | 0.400 | 1.17 | 4.08 | 1.83 | 1.16 | 0.19 | 0.17 | 0.05 | 0.15 |
| 11 | 0.330 | 2.02 | 5.43 | 0.74 | 2.17 | 0.28 | 0.16 | 0.22 | 0.25 |
| 13 | 0.210 | 0.42 | 5.67 | 3.07 | 3.88 | 0.19 | 0.19 | 0.17 | 0.07 |
| 15 | 0.150 | 2.56 | 5.94 | 5.73 | 2.84 | 0.13 | 0.06 | 0.08 | 0.15 |
| 17 | 0.130 | 2.98 | 14.21 | 5.85 | 3.35 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.04 |
| 19 | 0.120 | 4.69 | 6.73 | 2.50 | 0.56 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.10 |

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 เนื่องจากมีบางฮาร์มอนิกลำดับที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆ ต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

อภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า โดยใช้กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่จะเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28.13% และ 3.40% ตามลำดับ หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.37% และ 0.1% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับพบว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจะมีค่าลดลงโดยมีผลต่าง 25.76% และ 3.30% ตามลำดับ สำหรับตัวประกอบกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสแบบสมดุลของการไฟฟ้าที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 หลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 ซึ่งเมื่อนำเปรียบเทียบกับพบว่า ค่าตัวประกอบกำลังหลังจากที่มีการใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าสูงขึ้น 0.24 และกระแสฮาร์มอนิกได้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Twining and D. G. Holmes. (2003). Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3:888-895.
- [2] L. A. Serpa, J. W. Kolar, S. Ponnaluri and P. M. Barbosa. (2005). A modified direct power control strategy allowing the connection of three-phase inverter to the grid through LCL filters. *Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference.* Vol. 1:565-571
- [3] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen. (2005). Design and control of an LCL filter-based three-phase active rectifiers. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.41, no. 5:1281-1291
- [4] P.A. Dahono. (2002). A control method to damp oscillation in the input LC-filter. in *Proceedings Power Electronics Specialist Conference.* vol. 4:1630-1635
- [5] 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.* vol. 33. no. 2:542-550
- [6] 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 Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 4 :1407-1417
- [7] 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