Received: Nov 24, 2023 Revised: Dec 28, 2023 Accepted: Dec 29, 2023

แบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

MODELING OF SOLID OXIDE FUEL CELL FOR VOLTAGE SOURCE INVERTERS WITH LCL-FILTERS FOR CONNECTING TO THE THREE-PHASE GRID OF ELECTRICITY

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

E-mail: kumjatj@siamtechno.ac.th

[2]Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

E-mail: piyanat@thonburi-u.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า ในโหมดการใช้ประโยชน์อย่างต่อเนื่องได้ปรับเปลี่ยนสำหรับการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง โดยการป้อนกลับกระแสไฟฟ้าเพื่อปรับอัตราการไหลของอินพุตไฮโดรเจน โดยรูปแบบที่นำเสนอนี้ใช้เพื่อศึกษาการทำงานแบบไดนามิกของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า ในการควบคุมเพื่อปรับให้เข้ากับการตอบสนองที่รวดเร็วลูปกำลังไฟฟ้าใช้งานจะใช้การควบคุมแบบพีไอและลูปกระแสไฟฟ้าจะใช้การควบคุมแบบสไลดิ้งโหมด ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาค่าแรงดันไฟฟ้าให้คงที่และติดตามการเปลี่ยนแปลงโหลดแม่นยำ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลและใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟเชื่อมต่อกับกริด สามเฟสของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบได้ 50 kW ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันเท่ากับ 0.92% และ 0.1% ตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ทุกประการ

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง, การควบคุมแบบสไลดิ้งโหมด, อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน, เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

Abstract

The objective of this research is to apply the dynamic model of solid oxide fuel cell for voltage source inverters with LCL-filter for connecting to the three-phase grid of Electricity. A constant utilization mode has been adapted for the operation of a solid oxide fuel cell using current feedback to adjust the hydrogen input flow rate. The proposed model is used to study the dynamic operation of the solid oxide fuel cell for electric power to the voltage source inverter with LCL-filter to connect to the three-phase grid of Electricity. In the control to adjust the fast response, the active power loop uses the PI control and the current loop uses the sliding mode control. The simulation results show that the dynamic model of the developed solid oxide fuel cell can maintain a constant voltage and also the follow load changes accurately. The voltage source inverter with the LCL filter and using an active damping is connected to the three-phase grid of Electricity at a voltage of 380 V at a frequency of 50 Hz by providing power to the system 50 kW. The current and voltage harmonic distortion equal to 0.92% and 0.1% respectively. Affecting the harmonic current was following IEC 61000-3-2 all requirements.

Keywords: solid oxide fuel cell, sliding mode control, voltage source inverters, connected to the three-phase grid of electricity

บทนำ

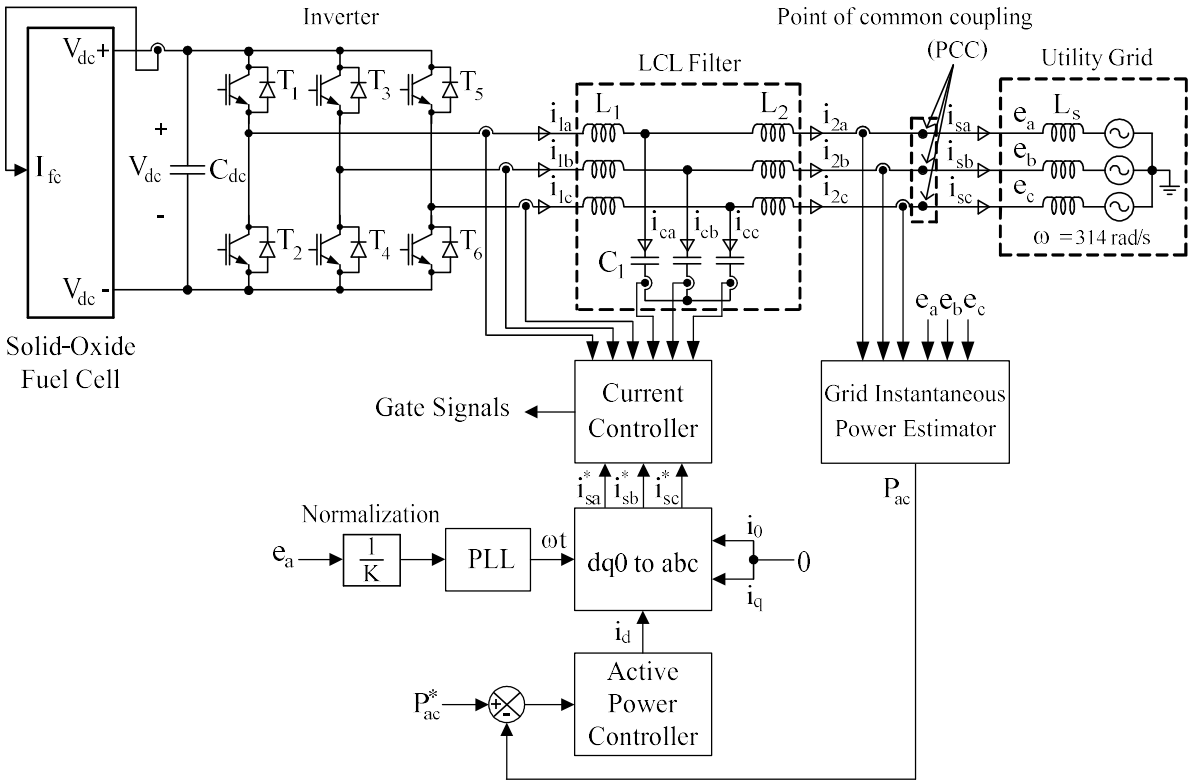
ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีภายในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และที่สำคัญการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจะไม่เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ไม่ได้ใช้กระบวนการเผาไหม้ มีเพียงน้ำและความร้อนเป็นผลพลอยได้ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้โลหะออกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โครงสร้างของเซลล์เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งทั้งหมด ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนของเซลล์และการแพร่ของเชื้อเพลิงจากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งเหมือนเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารละลายหรือใช้เยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถดำเนินงานได้ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส จึงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง (50-60 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ (ญาณีพร พัชรวรโชติ และ อมรชัย อาภรณ์วิชานพ, 2016: 50-54). ส่วนการใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดสามเฟสและมีการเปลี่ยนแปลงโหลด เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดสามเฟสได้ (Birendra Kumar Singh, Dattataraya N. Gaonkar, Radhakrishna S. Aithal and Govind Sharma, 2011: 123-134) ส่วนการเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า ตัวกรองแบบแอลซีแอลถูกใช้อย่างกว้างขวางกับการเชื่อมต่อกับกริด ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลจะสามารถลดริบเปิ้ลของกระแสได้ดีกว่าการใช้ตัวกรองแบบแอลเพียงอย่างเดียว (M. Liserre, F. Blaabjerg and S. Hansen, 2005 : 1281-1291) อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลจะทำให้การควบคุมอินเวอร์เตอร์ซับซ้อนและความไวต่อฮาร์มอนิกส์ (E. Twining and D. G. Holmes, 2003: 888-895) การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถละเลยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีโหลดไม่เชิงเส้นและโหลดอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับกริด นอกจากนี้หากแรงดันไฟฟ้าของกริดนั้นบิดเบี้ยว อาจทำให้อินเวอร์เตอร์สร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมา ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้ตัว

ควบคุมเรโซแนนซ์เพื่อเลือกค่าชดเชยฮาร์มอนิก (Wang Xiongfei, Blaabjerg Frede and Loh Poh Chiang, 2012: 1407-1417) ดังนั้นการลดการแกว่งแบบอาร์แอลซีเสมือนเพื่อลดความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันด้วยการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่สูงอาร์แอลซีแบบแอกทีฟแทนการใช้ตัวกรองด้านเข้าอาร์แอลซีแบบพาสซีฟ (Vladimir Blasko and Vikram Kaura, 1997: 542-550)

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า วิธีการควบคุมเพื่อปรับให้เข้ากับการตอบสนองที่รวดเร็วลูปกำลังไฟฟ้าใช้งานจะใช้การควบคุมแบบพีไอและลูปกระแสไฟฟ้าจะใช้การควบคุมแบบสไลดิ้งโหมด นอกจากนี้ยังใช้กลยุทธ์การลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่จะเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า โดยที่กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ทุกประการ

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะสามารถแสดงระบบในภาพรวมได้ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้ เมื่อ e เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสที่กริดสามเฟสของการไฟฟ้า i_s เป็นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้า และ P_{ac} เป็นกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มเพื่อจะสวิตช์ให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้ามีเฟสตามแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสของการไฟฟ้า ในขณะเดียวกันจะมีการควบคุมให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้ามีค่าคงที่ โดยเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด ค่าความแตกต่างจะถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบพีไอเพื่อให้ได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการคงค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวคูณกับเฟสของแรงดันที่ได้จากเฟสล็อคลูป จะได้กระแสไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์รวมกับผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองแบบตัวเก็บประจุกับค่าตัวลดการแกว่งแบบแอกทีฟจะถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบสไลดิ้งโหมด เพื่อสร้างพัลส์พีดับบลิวเอ็มไปควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้าติดตามกระแสที่กำหนด ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้าอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสของการไฟฟ้า



ภาพที่ 1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

แบบจำลองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่แปลงพลังงานเคมีภายในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีดังแสดงในภาพที่ 2 เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งแสดงใน (Birendra Kumar Singh, Dattataraya N. Gaonkar, Radhakrishna S. Aithal and Govind Sharma, 2011: 123-134) เซลล์เชื้อเพลิงทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วแอโนดและแคโทดที่ถูกแยกด้วยอิเล็กโทรไลต์ สามารถสร้างไฟฟ้า โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดแต่ละด้าน เชื้อเพลิงหลักที่ใช้คือก๊าซไฮโดรเจน (H2) จะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนด ส่วนก๊าซออกซิเจนจะเข้าทางขั้วแคโทดทำหน้าที่เป็นสารออกซิแดนท์และใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงหลักไฮโดรเจน ผลของปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของอิเล็คตรอน (e-) ที่หลุดออกมาจากอะตอมของไฮโดรเจน (H2) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง คือ ไฟฟ้ากระแสตรง,ความร้อน และน้ำบริสุทธิ์

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีดังนี้

ที่ขั้วแอโนด

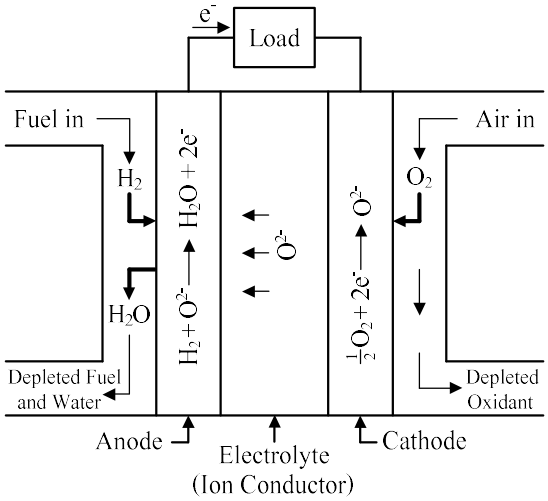
$$H_2 + \frac{1}{2}O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^- \quad (1)$$

ที่ขั้วแคโทด

$$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-} \quad (2)$$

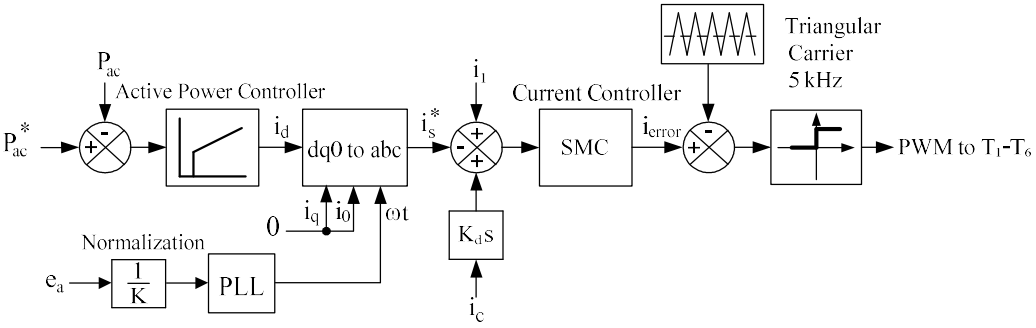
ปฏิกิริยาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งโดยรวมที่เกิดขึ้นคือ

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad (3)$$



ภาพที่ 2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ระบบควบคุม



ภาพที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

จากภาพที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน สามารถแบ่งตามการควบคุมได้ดังนี้

ตัวควบคุมระดับกำลังไฟฟ้า

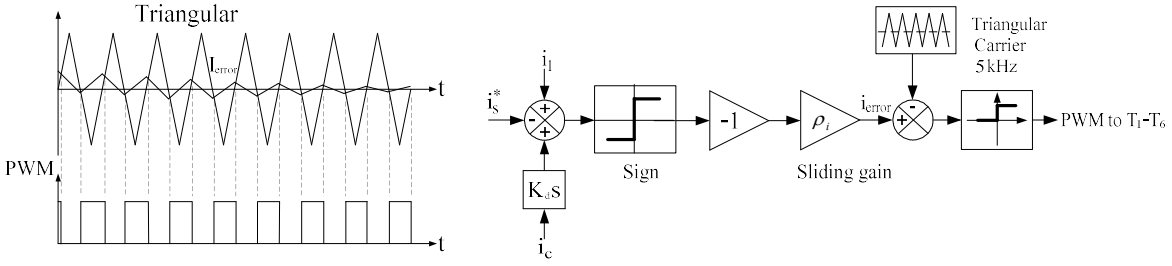
การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน จำเป็นต้องควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ตามค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนด โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเข้ามาควบคุมความแตกต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d(s) = (K_P + \frac{K_I}{s})(P_{ac}^*(s) - P_{ac}(s)) \quad (4)$$

เมื่อ P_{ac}^* และ P_{ac} เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่กำหนดและค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้าตามลำดับ โดยที่ K_P และ K_I คืออัตราขยายเทอมสัดส่วน และเทอมอินทิกรัลของตัวควบคุมค่ากำลังไฟฟ้า

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะนำเอากระแสไฟฟ้าที่ผิดพลาด(I_{error}) จากการควบคุมแบบสไลดิ้งโหมดของความแตกต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าที่กำหนดกับกระแสไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์รวมกับผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวกรองแบบตัวเก็บประจุกับค่าแอกทีฟแดมปิ้งไปมอดูเลตกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้เกิดจากการเปรียบเทียบจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก)



(ก) (ข)

ภาพที่ 4 (ก) หลักการทำงานของการควบคุมสไลดิ้งโหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม
(ข) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมสไลดิ้งโหมดแบบเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 4 (ข) เป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมสไลดิ้งโหมด โดยกฎการควบคุมของสไลดิ้งโหมดเป็นไปตามสมการที่ 5 หรือ 6 ซึ่งแสดงใน (ทวีศักดิ์ ทองแสน ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง และณัฐวุฒิ สุวรรณทา, 2558: 18-31)

$$i_{error}(\mathrm{t}) = -\rho_i \,\mathrm{sgn}\,(\mathrm{s(x,t)}) \tag{5}$$

หรือ

$$i_{error}(t) = \begin{cases} -\rho_i & if\ \ s(x,t) > 0 \\ \rho_i & if\ \ s(x,t) < 0 \end{cases} \tag{6}$$

โดยที่ ρ_i คืออัตราขยายสัญญาณสไลดิ้งของกระแสไฟฟ้า $\mathrm{sgn}(.)$ คือซิกนัมหรือฟังก์ชันเครื่องหมาย และ *s(x,t)* คือฟังก์ชันสวิตช์

$$s(x,t) = e_i \tag{7}$$

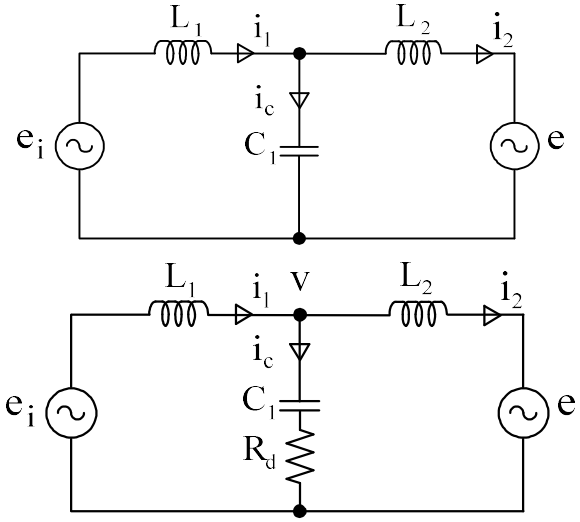
โดย e_i คือ ค่าผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า และ *x* คือ สภาวะของระบบ

ส่วนการกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่มาจากการควบคุมแบบสไลดิ้งโหมดกับกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 5 kHz ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ความถี่ 5 kHz เพื่อไปขับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

การวิเคราะห์ตัวกรองแอลซีแอลแบบพาสซีฟและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟ

ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟเป็นแนวคิดของตัวต้านทานเสมือนดังที่แสดงใน (P.A. Dahono, 2002:1630-1635) การวิเคราะห์ตัวกรองแบบแอลซีแอลและการลดการแกว่งแบบแอกทีฟเพื่อหาความสัมพันธ์ในการลดกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนท์ โดยในการควบคุมจะสร้างตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟขึ้นมา ซึ่งสามารถพิจารณาจากวงจรสมมูล

แบบเฟสเดียวดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) โดยที่ e คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า e_i คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน และ L_1, L_2, C_1 คือ ตัวกรองแบบแอลซีแอล ส่วนการวิเคราะห์ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะต้องวิเคราะห์วงจรในภาพที่ 5 (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) (ข)

ภาพที่ 5 วงจรสมมูลแบบเฟสเดียวของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน
(ก) ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอล (ข) ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลและตัวลดการแกว่งแบบพาสซีฟ

จากภาพที่ 5 (ข) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์เพื่อหากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า โดยใช้หลักการวิเคราะห์ของสมการโนด (Node equation) จะได้

$$\frac{V-e}{sL_2} + \frac{V-e_i}{sL_1} + \frac{V}{R_d + \frac{1}{sC_1}} = 0 \tag{8}$$

แก้สมการที่ 8 เพื่อหาค่า V จะได้

$$V = \frac{L_2C_1R_ds+L_2}{L_1L_2C_1s^2+C_1R_d(L_1+L_2)s+(L_1+L_2)}e_i + \frac{L_1C_1R_ds+L_1}{L_1L_2C_1s^2+C_1R_d(L_1+L_2)s+(L_1+L_2)}e \tag{9}$$

จากวงจรภาพที่ 5 (ข) สามารถหาค่า i_s ได้ในสมการที่ 10

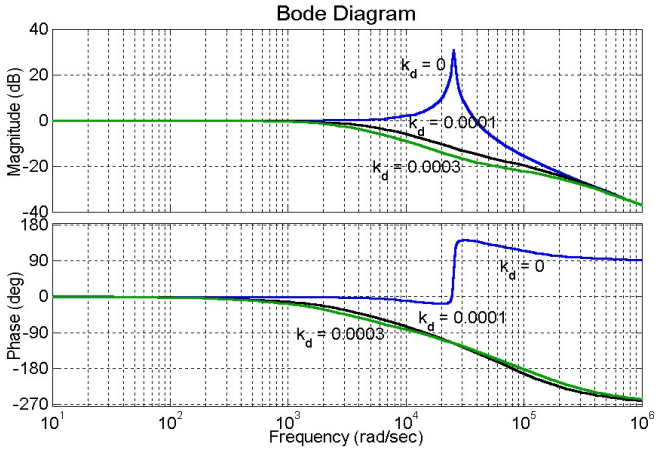
$$i_S = \frac{Ai_S^*-Be}{Cs^4+Ds^3+Es^2+Fs+K_IK_fK} \tag{10}$$

เมื่อ

$A= C_1R_dKK_Ps^2+(C_1R_dK+KK_P)s+KK_I$, $B= L_1C_1s^3+C_1R_ds^2+s$, $C=L_1L_2C_1$, $D= C_1R_dL_1+C_1R_dL_2+K_PK_dKC_1R_d$

$E= L_1+L_2+K_pK_dK+C_1R_dKK_p+C_1R_dKK_dK_I$, $F= C_1R_dK_IK+K_pK+K_dK_IK$

จากสมการของระบบตามสมการที่ 10 ในการปรับ Damping factor สามารถทำได้โดยการปรับค่า k_d แทนการเพิ่มค่า R_d ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลตอบสนองทางความถี่ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระแสอินพุตดังสมการที่ 10 เมื่อ k_d เปลี่ยน

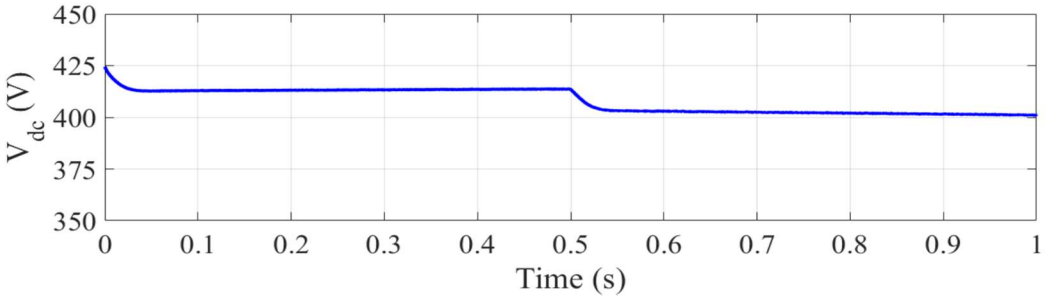
สรุปผลการวิจัย

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแนวคิดที่ได้นำเสนอจะจำลองการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างดังในภาพที่ 1 ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานดังแสดงในตารางที่ 1

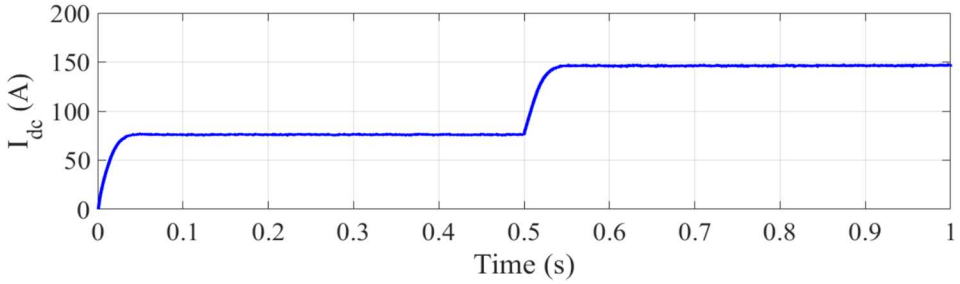
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันและตัวกรองแบบแอลซีแอล

ตัวแปร	ค่าที่ใช้	ตัวแปร	ค่าที่ใช้
พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาท์พุต	3,553 W	ตัวเก็บประจุ (C_{dc})	1,000 µF
แรงดันไฟฟ้า	220 V_{L-N}	ความถี่ในการสวิตช์ (f_s)	5 kHz
แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิง	400 V_{dc}	ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ (K_d)	0.0003
ตัวเหนี่ยนำด้านอินเวอร์เตอร์ (L_1)	0.2 mH	ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนของผลต่างของกำลังไฟฟ้า (K_P)	10
ตัวเหนี่ยนำด้านกริดการไฟฟ้า (L_2)	0.5 mH	ตัวควบคุมอินทิเกรตของผลต่างของกำลังไฟฟ้า (K_I)	5000
ตัวกรองแบบตัวเก็บประจุ (C_1)	5 µF	การขยายสัญญาณสไลดิ้งของกระแสไฟฟ้า (ρ_i)	1

ผลการจำลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งดังแสดงในภาพที่ 7 ส่วนภาพที่ 8 เป็นผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า

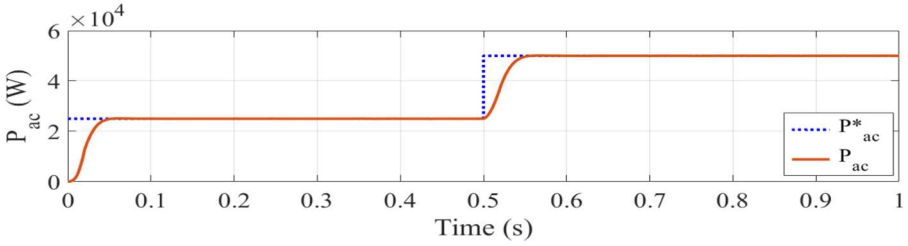


(ก)

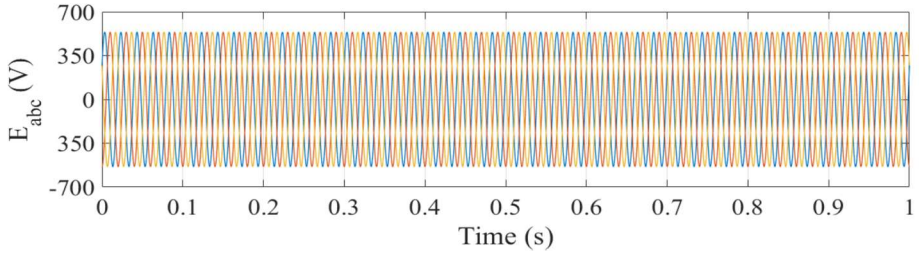


(ข)

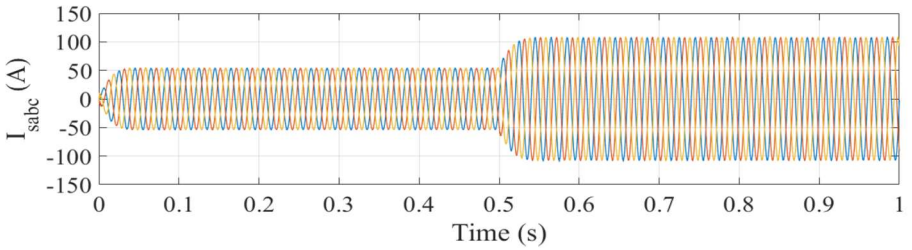
ภาพที่ 7 (ก) แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 0.5 s (ข) กระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 0.5 s



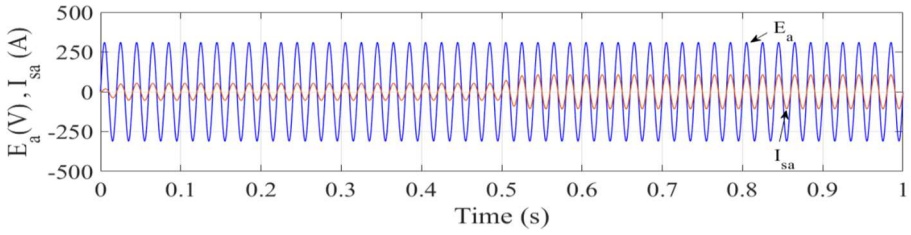
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 8 (ก) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้า (ค) กระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้า (ง) กระแสที่จ่ายให้กริดสามเฟสกับแรงดันเฟสของการไฟฟ้าที่กริดสามเฟส

จากภาพที่ 7(ก) เป็นผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเมื่ออินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสเพิ่มขึ้นจาก 25 kW เป็น 50 kW ที่เวลา 0.5 s พบว่าแรงดันไฟฟ้าลดลงเมื่ออินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7(ข)

จากภาพที่ 8(ก) เป็นผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้า เมื่ออินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กริดสามเฟสเพิ่มขึ้นจาก 25 kW เป็น 50 kW ที่เวลา 0.5 s ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีไอจะควบคุมให้จ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 0.05 s ส่วนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้าจะรักษาระดับแรงดันให้คงที่ดังแสดงในภาพที่ 8(ข) ในส่วนกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้าจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในภาพที่ 8(ค) และกระแสที่จ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้าจะอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่กริดสามเฟสของการไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 8(ง)

จากการจำลองการทำงานเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้ากรณีที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ

กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กริดสามเฟสของการไฟฟ้า (kW)	I_S (A)	THD_I (%)	$V_{S,(L-N)}$ (V)	THD_V (%)	P.F
12.5	19.11	1.22	220	0.1	1.00
25.0	38.04	1.03	220	0.1	1.00
37.5	57.08	0.82	220	0.1	1.00
50.0	75.98	0.60	220	0.1	1.00

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.92% และ 0.1% ตามลำดับ สำหรับตัวประกอบกำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์

แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.0

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า เมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟที่โหลดต่างๆ กัน

กระแสฮาร์มอนิกมาตรฐาน IEC 61000-3-2		ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่โหลด (A)			
ฮาร์มอนิกลำดับที่	ค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงสุด (A)	12.5 kW	25 kW	37.5 kW	50 kW
3	2.300	0.04	0.04	0.04	0.04
5	1.140	0.10	0.09	0.08	0.01
7	0.770	0.12	0.10	0.05	0.03
9	0.400	0.03	0.03	0.03	0.03
11	0.330	0.22	0.20	0.12	0.10
13	0.210	0.05	0.02	0.03	0.05
15	0.150	0.12	0.10	0.10	0.04
17	0.130	0.08	0.06	0.09	0.13
19	0.120	0.07	0.06	0.08	0.10

จากผลการจำลองการทำงานในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ตัวกรองแบบแอลซีแอลเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวควบคุมการแกว่งแบบแอกทีฟ มีค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับใดๆต่อกระแสอินพุตที่ความถี่หลักมูลอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ทุกประการ

อภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า การควบคุมเพื่อปรับให้เข้ากับการตอบสนองที่รวดเร็ว โดยลูปกำลังไฟฟ้าใช้งานใช้การควบคุมแบบพีไอและลูปกระแสไฟฟ้าใช้การควบคุมแบบสไลดิ้งโหมด และใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟสำหรับตัวกรองแบบแอลซีแอลเพื่อลดฮาร์มอนิกของกระแสเอาต์พุตที่เชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้า ผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาค่าแรงดันไฟฟ้าให้คงที่และติดตามการเปลี่ยนแปลงโหลดแม่นยำ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีตัวกรองแบบแอลซีแอลและใช้การลดการแกว่งแบบแอกทีฟเชื่อมต่อกับกริดสามเฟสของการไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 380 V ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบได้ 50 kW ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันเท่ากับ 0.92% และ 0.1% ตามลำดับ ส่งผลให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

กำจัด ใจตรง. (2562). วิธีควบคุมการแกว่งแบบแอคทีฟด้านเข้าตัวกรองแบบแอล-ซีของวงจรเร็กติฟายเออร์สามเฟสแบบ

พีดับบลิวเอ็ม. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27*, 509-512.

ญาณีพร พัชรวรโชติ และ อมรชัย อาภรณ์วิชานพ. (2016). พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง. *วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี,* 42(245), 50-54.

ทวีศักดิ์ ทองแสน, ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง, และ ณัฐวุฒิ สุวรรณทา. (2558). การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบสไลดิ้งโหมดสำหรับอุปกรณ์กู้คืนแรงดันพลวัตเพื่อแก้ไขแรงดันไม่สมดุลแรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะในระบบไฟฟ้าสามเฟสโดยใช้อัลกอริทึมแบบเร็ว. *วารสารวิจัย มข,* 15(1), 18-31.

Singh, B.K., Gaonkar, D. N., Aithal, R. S., & Sharma, G. (2011). Modeling and Performance Analysis of Solid Oxide Fuel Cell Based Distributed Generation System. *International Energy Journal*. 12, 123-134.

Twining, E., & 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.

Serpa, L. A., Kolar, J. W., Ponnaluri, S., & 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.

Liserre, M., Blaabjerg, F., & Hansen, S. (2005). Design and Control of an LCL Filter-Based Three-Phase Active Rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 41(5), 1281-1291.

Dahono, P. A. (2002). A Control Method to Damp Oscillation in the Input LC-Filter. *Proceedings Power Electronics Specialist Conference,* 4, 1630-1635.

Blasko, V., & Kaura, V. (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.

Xiongfei, W., Frede, B., & Chiang, L. P. (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.

Translated Thai References

Jaitrong., K. (2004). A Control Method to Actively Damp Oscillation in the Input LC Filter of Three-phase PWM Rectifier. *The 27th Electrical Engineering Conference,* 509-512.

Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop, A. (2017). Electrical Power from Solid Oxide Fuel Cells. *Technology Promotion and Innomag Magazine,* 42(245), 50-54.

Thongsan, T., Chatchanayuenyong, T., & Suwanta, N. (2015). An Application of Sliding Mode Control for a Dynamic Voltage Restorer to Correct Unbalance Voltage, Voltage Sags and Voltage Swells in Three-Phase System Using Rapid Algorithm. *KKU Research Journal,*15(1), 18-31.