การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบสองอินพุตสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

บัญชา หิรัญสิงห์[1] เฉลิมชนม์ ตั้งวชิรพันธุ์[2] โยษิตา เจริญศิริ[3*]

Received : May 3, 2022
Revised : August 30, 2022
Accepted : August 30, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบสองอินพุต โดยการมอดูเลทแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถลดและเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเอาต์พุท โดยไม่ต้องใช้วงจรทบระดับแรงดันให้ยุ่งยากซับซ้อน และลดสัญญาณรบกวนจากการแทรกสอดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ชุดขับเกทไม่จำเป็นต้องมีวงเดดไทม์ จึงทำให้ไม่สูญเสียพลังงานในช่วงนั้นไป วงจรควบคุมสามารถลดความยุ่งยากซับซ้อนโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่เพิ่มวงจรโครงข่ายอิมพีแดนซ์ ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากันต่อไขว้กันด้านอินพุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จากจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มโดยใช้บอร์ด Arduino MEGA 2560 ที่ดัดแปลงเพิ่มช่วงเวลาลัดวงจรจากรูปแบบดั้งเดิมของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน แสดงให้เห็นว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบใหม่นี้สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเอาต์พุทได้โดยไม่ต้องใช้วงจรทบระดับแรงดัน และเหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

คำสำคัญ: โครงข่ายอิมพีแดนซ์ แหล่งจ่ายพลังงานทดแทนอินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม อีเมล: bancha@webmail.npru.ac.th

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม อีเมล: shalerm123@gmail.com

[3] อาจารย์ ดร. สาขาอิเล็กทรอนิกส์สื่อสารและคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี อีเมล: yosita.cha@vru.ac.th

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: yosita.cha@vru.ac.th*

THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE TWO-INPUT IMPEDANCE POWER INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES

Bancha Hiransing[1] Shalerm Tangwachirapan[2] Yosita Charoensiri[3*]

Abstract

This paper presents the design and implementation of the two-input impedance inverter circuit by using PWM modulation. The PWM modulation properties' had the ability to reduce as well as increase the AC voltage on the output side without using a complicated voltage of compounding circuits, and also had the ability to reduce interference from electromagnetic. The gate drive did not need a dead-time loop, so there was no power loss during the time. The control circuit can be simplified by using an inverter circuit that increases the impedance network circuit, which consisted of inductors and capacitors of the same size crossed on the input side of a full-bridge inverter circuit. The circuit implementation was applied by the simulation's operation of a single-phase inverter using the program MATLAB/Simulink, controlled the operation with PWM signal using Arduino MEGA 2560 board that modified to increase the short-circuit time from the original form of the voltage source inverter circuit. The simulation showed that the new inverter circuit can increase the AC voltage level on the output side without using a voltage compounding circuit and suitable for use with renewable energy sources.

Keywords: Impedance Network Circuit, Renewable Energy sources, Impedance Inverter

[1]Associate Professor, Electrical Engineering Program, Faculty of Science and Technology Nakhon Pathom Rajabhat University, e-mail: bancha@webmail.npru.ac.th

[2] Associate Professor, Electrical Engineering Program., Faculty of Science and Technology Nakhon Pathom Rajabhat University, e-mail: shalerm123@gmail.com

[3] Dr., Electronic Communication and Computer Program, Faculty of Indutrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage, e-mail: yosita.cha@vru.ac.th

** Corresponding Author, e-mail: yosita.cha@vru.ac.th*

บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนเข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากพลังงานสิ้นเปลือง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ นับวันจะหมดไป พลังงานทดแทนถือว่าเป็นพลังงานสะอาดและมีต้นทุนการผลิตต่ำเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Photo voltaic) กังหันลม (Wind turbine) กังหันน้ำ (Water turbine) และเชลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) แต่พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานเหล่านี้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ตลอดเวลาได้ กล่าวคือ การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสง (Light intensity) และอุณหภูมิ ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ โดยเฉพาะในตอนกลางคืนและปัญหาแสงแดดถูกบดบัง (Shading problem) ส่วนการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมน้ำ จะมีปัญหาเรื่องความเร็วและความแรงของลม ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้เช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ (Z–source inverter) จากพลังงานหมุนเวียนสองแหล่งจ่าย ให้สามารถรักษาระดับและยกระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้คงที่

งานวิจัยที่นำเสนอนี้ใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ เป็นตัวแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายอินพุตสองแหล่งคือ พลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบฟลั๊กซ์แม่เหล็กตามแนวแกน (Axial-Flux Permanent Magnet Generator: AFPMG) เพื่อจ่ายให้กับบ้านที่มีโหลดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระบบที่สามารถเชื่อมต่อพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนจากหลาย ๆ แหล่งแปลงผันเป็นพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้อย่างมีคุณภาพและมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

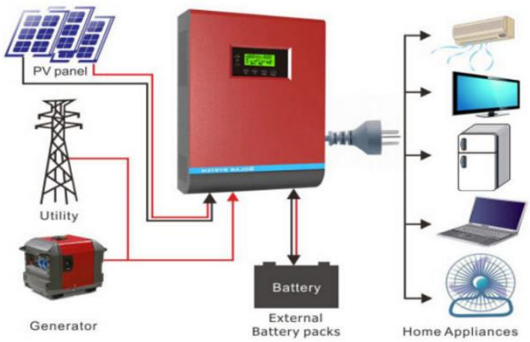
1. เพื่อออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบสองอินพุต
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ที่มีแหล่งจ่ายพลังงานแบบสองอินพุต

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องต้นแบบในส่วนของแหล่งจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวแกน สร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ระบบควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยไอซีโดยใช้ DSP Board บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3 หลังจากนั้นทำการทดสอบชุดควบคุม ชุดทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์และทำการวัดค่าปริมาณกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าในจุดต่าง ๆ ของวงจร สรุปผลและทดสอบการหาประสิทธิภาพเชิงเทคนิค

ทฤษฎีโครงสร้างและการออกแบบแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริดจ์ (PV hybrid system) (ชาติชาย โสบุญ ปุณยภัทร ภูมิภาค และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, 2558) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบลูกผสม ซึ่งมีข้อดีกว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริด และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบออนกริดคือ เมื่อเกิดกรณีไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฯ ดับระบบยังจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ อาคารที่พักอาศัยยังคงมีไฟฟ้าใช้งานได้ ระบบยังสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงหรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้โดยที่พลังงานไฟฟ้าไม่สามารถไหลเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าฯ ทำให้ไม่ต้องขออนุญาตการไฟฟ้า ฯ หรือกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแบบไฮบริดจ์ล้มเหลว ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ ระบบยังสวิตช์ไปใช้ระบบไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฯ ได้แต่ระบบต้องใช้แบตเตอรี่เพื่อสำรองพลังงานในการใช้งานตอนกลางคืน นอกจากนั้นระบบผลิตไฟฟ้าถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าด้านขาเข้าจากแหล่งอื่น ๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันลมผลิตไฟฟ้า กังหันน้ำผลิตไฟฟ้า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าชีวะมวล เป็นต้น โดยไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้สามารถไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ 230 Vac และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า ฯ ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริดจ์ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริดจ์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบฟลั๊กซ์แม่เหล็กตามแนวแกนเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน (Farzad Sedaghati & Ebrahim Babaei, 2011; Gajanayake, C. J., & Mahinda Vilathgamuwa, D., 2005) โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกน มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 โรเตอร์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแผ่นเหล็กวงกลมทั้งสองแผ่นสำหรับติดตั้งแม่เหล็กถาวรส่วนที่ 2 สเตเตอร์ เป็นโครงสร้างที่ยึดขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature-winding) การคำนวณความเร็วรอบของเพลากังหันความเร็วรอบที่ใช้ฉุดเพลาและอัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ คำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2)

$$n = \frac{60\lambda V_o}{2\pi R} \quad (1)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{80}{B}} \quad (2)$$

เมื่อ n คือ ความเร็วรอบเพลาโรเตอร์ของกังหัน (rpm)

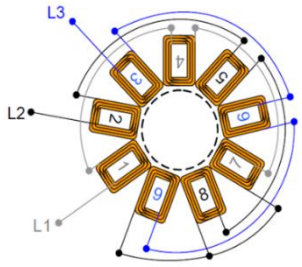
λ คือ อัตราส่วนความเร็วที่ปลายใบ

V_o คือ ความเร็วน้ำที่ใช้หมุนใบพัด (m/s)

R คือ ความกว้างที่ปลายใบพัด

B คือ จำนวนใบพัด

การประกอบชุดโรเตอร์กับชุดสเตเตอร์ที่สร้างขึ้นชุดสเตเตอร์เป็นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ ประกอบไปด้วยชุดขดลวดพัน n รอบจำนวน 9 ขด ถูกหล่อเข้าด้วยกันด้วยเรซิ่นและผสมผงทัลคัมเพื่อช่วยในการรระบายความร้อน ยึดติดกับโครงสร้างอยู่ตรงกลางระหว่างชุดอาร์เมเจอร์ การออกแบบในส่วนนี้จะใช้เหล็กฉากและเหล็กท่อกลมเป็นส่วนประกอบหลักทำหน้าที่ยึดชุดสเตเตอร์และชุดโรเตอร์ ชุดสเตเตอร์ที่ออกแบบจากชุดขดลวดตัวนำ 9 ชุด นำมาวางเรียงกันในองศาที่เท่ากัน แล้วนำไปหล่อขึ้นรูปด้วยเรซิ่น เมื่อนำปลายสายของขดลวดทั้ง 9 ชุดมาต่อกันแบบสตาร์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสและเรียงกระแส 3 เฟส แสดงดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3

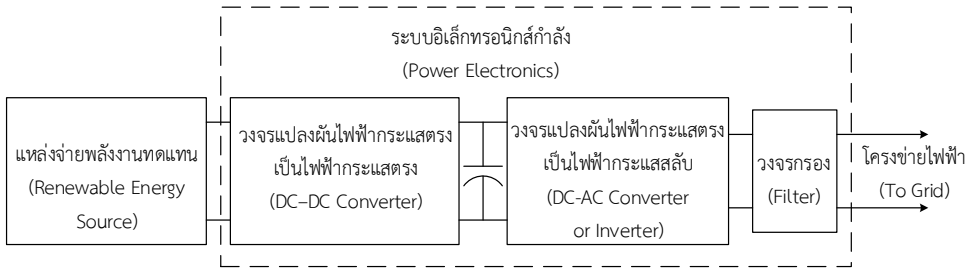


ภาพที่ 2 ชุดสเตเตอร์จากการออกแบบ

ภาพที่ 3 ชุดสเตเตอร์ที่สร้างจริง

ระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับพลังงานทดแทน (Loh, P. C., Vilathgamuwa, D. M., Lai, Y. S., Chua G. T., & Li, Y., 2005) ระบบที่มีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงวางอยู่ส่วนหน้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหรืออินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อสามารถนำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือโหลดทางไฟฟ้าที่ส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานนั้นจะต้องมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ส่วนหน้าของระบบเพื่อทำหน้าที่ยกระดับ

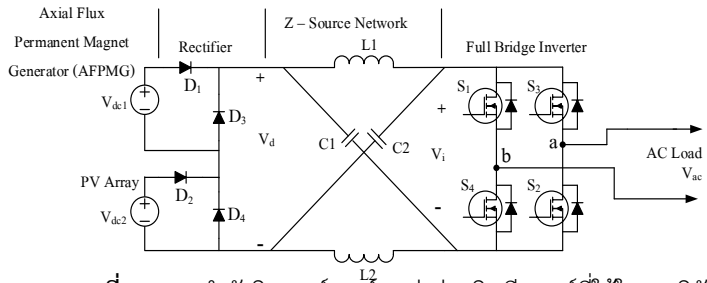
แรงดันไฟฟ้าให้สูงพอสำหรับอินเวอร์เตอร์ในการจ่ายแรงดันและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้คงที่ในกรณีที่แหล่งจ่ายพลังงานทดแทนมีการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ด้านขาเข้า บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างของระบบแสดงดังภาพที่ 4



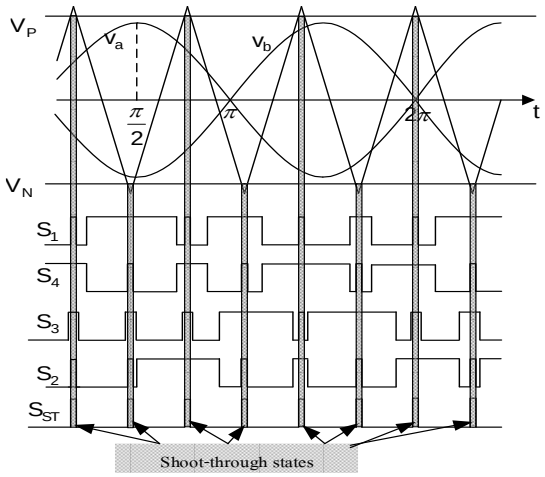
ภาพที่ 4 การแปลงผันกำลังไฟฟ้าร่วมกับพลังงานทดแทนที่มีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์เป็นวงจรที่พัฒนามาจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมซึ่งมีข้อเสียคือ ไม่สามารถบูสต์แรงดันไฟตรงและผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกได้ยืดหยุ่นมากพอได้ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงทบระดับแรงดันเข้ามาช่วยจึงเป็นอีกทางเลือกที่สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

วงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แสดงดังภาพที่ 5 และสัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ดังภาพที่ 6 ซึ่งจากสัญญาณจะเห็นว่ามีการดัดแปลงจากสัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมคือ เพิ่มสัญญาณเส้นตรงสองเส้นคือเส้นบน (Upper) และเส้นล่าง (Lower) แล้วนำไปมอดูเลชั่นกับสัญญาณสามเหลี่ยมเดิม [8], [10] จากนำมาเข้ากระบวนการลอจิกในการผสมสัญญาณให้เกิดเป็นสัญญาณลัดวงจร (Shoot-Through) เพื่อนำไปขับนำสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ให้สวิตช์ในกิ่งกระแสเดียวกันสามารถนำกระแสพร้อมกันได้อันเป็นผลมาจากการเก็บพลังงานและคายพลังงานของวงจรโครงข่ายอิมพีแดนซ์ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ นอกจากนั้นช่องสัญญาณลัดวงจรยังสามารถเพิ่มลดค่าได้แล้วมีผลต่อการเพิ่มลดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้าอินเวอร์เตอร์และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออก



ภาพที่ 5 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 6 สัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

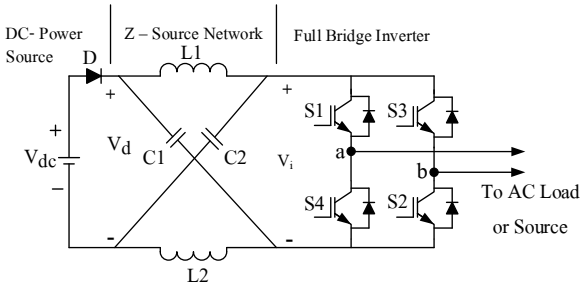
จากภาพที่ 6 สัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แสดงโครงสร้างของสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจรคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบสองอินพุต (Huang, Y., Shen M., Peng, F. Z., & Wang, J., 2003; Jung, J. W., Min Dai & Ali Keyhani, 2005) แบ่งออกเป็น 4 โหมด ตามสถานะการทำงานของแหล่งจ่ายทั้ง 2 แหล่ง โดยแหล่งจ่ายทั้งสองสามารถถ่ายโอนพลังงานไปยังด้านโหลดทีละแหล่งหรือทั้งสองแหล่งพร้อมกัน เมื่อแหล่งจ่ายแหล่งใดแหล่งหนึ่งจ่ายให้โหลด วงจรคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบสองอินพุตจะทำงานเป็นวงจรพีดับเบิลยูเอ็มคอนเวอร์เตอร์ ตารางแสดงการทำงานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์แบบสองอินพุต

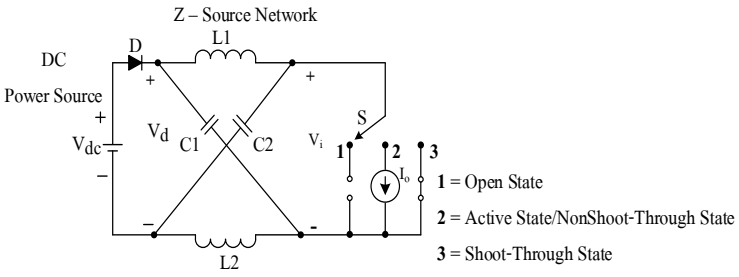
สถานะ	สถานะแหล่งจ่าย		สถานะสวิตช์				V_{in}
	V_{dc1}	V_{dc2}	D_1	D_2	D_3	D_4	
1	ทำงาน	ทำงาน	นำกระแส	นำกระแส	ไม่นำกระแส	ไม่นำกระแส	$V_{dc1}+V_{dc2}$
2	ทำงาน	ไม่ทำงาน	นำกระแส	ไม่นำกระแส	ไม่นำกระแส	นำกระแส	V_{dc1}
3	ไม่ทำงาน	ทำงาน	ไม่นำกระแส	นำกระแส	นำกระแส	ไม่นำกระแส	V_{dc2}
4	ไม่ทำงาน	ไม่ทำงาน	ไม่นำกระแส	ไม่นำกระแส	นำกระแส	นำกระแส	0

โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power source) จากแหล่งพลังงานทดแทนที่ระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม วงจรโครงข่ายอิมพีแดนซ์ (Z-Networks Peng, F.Z., 2003; Peng, F. Z., Shen, M., & Qian, Z., 2005) ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างละสองตัวค่าเท่ากันต่อในลักษณะไขว้กันเหมือนตัวเอ็กซ์ (X-Shape) ที่มีความสมมาตร และวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันเฟสเดียว แสดงจากภาพที่ 7

จากภาพที่ 8 เป็นการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจร ได้ 3 สถานะคือ สถานะเปิดวงจร (Open state) คือสภาวะที่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันอยู่ในสภาวะเปิดวงจรให้ไม่มีพลังงานไฟฟ้าถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายด้านขาเข้าไปยังด้านขาออก สถานะเปิดวงจร (Active state) เป็นสถานะที่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันทำงานตามปกติทำให้มีพลังงานไฟฟ้าถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายด้านขาเข้า (Input) ไปยังด้านขาออก (Output) และสถานะลัดวงจร (Shoot-Through state) เป็นสภาวะที่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันอยู่ในสภาวะลัดวงจร โดยสวิตช์ S_1 –S_2 หรือสวิตช์ S_2 –S_3 นำกระแสทำให้ไม่มีพลังงานไฟฟ้าถ่ายโอนจากแหล่งจ่ายด้านขาเข้าไปยังด้านขาออก ในโหมดการทำงานนี้ไดโอด D รีเวอร์สไบอัส (Reverse-Bias) ทำให้พลังงานถูกถ่ายโอนจากตัวเก็บประจุ C_1 ไปยังตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวเก็บประจุ C_2 ไปยังตัวเหนี่ยวนำ L_2



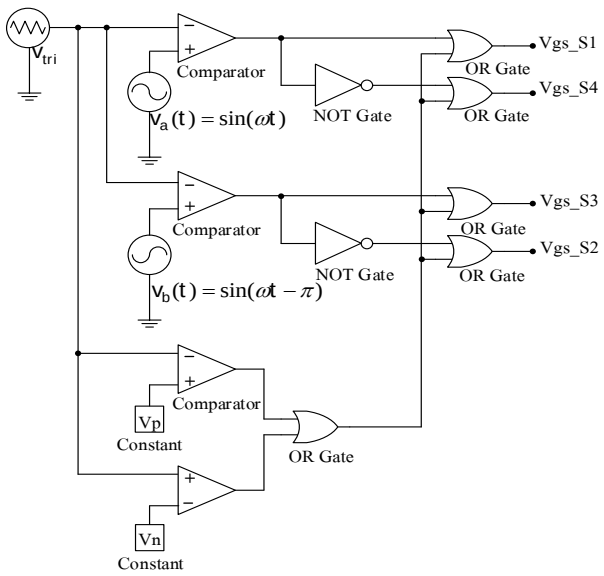
ภาพที่ 7 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์



ภาพที่ 8 สถานการณ์ทำงานวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

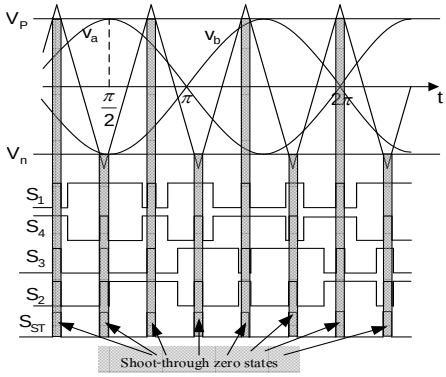
ส่วนวงจรควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ใช้วิธีการควบคุมแบบซิมเปิลบูสต์ (Simple Boost control) โดยการควบคุมด้วยวิธีการซิมเปิลบูสต์นั้น ค่าแอมปลิจูดของสองเส้นตรงเป็นค่าสูงสุดของรูปคลื่นการมอดูเลชั่น ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดูเลชั่น และอัตราส่วนเวลาการลัดวงจร (Shoot-Through Ratio: T_{ST} / T)

ภาพที่ 9 แสดงแผนผังวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้ในการควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มโดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมจำนวนสองสัญญาณมาทำการมอดูเลชั่นกับสัญญาณไซน์โดยใช้เครื่องมือการเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator) ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำให้ได้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสองสัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณแต่ละตัวมากลับเฟสสัญญาณเพื่อนำไปขับเกทของอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ทั้งสี่ตัว ในส่วนของสัญญาณช่วงลัดวงจรนั้นใช้สัญญาณเส้นตรงมามอดูเลชั่นโดยการใช้เครื่องมือการเปรียบเทียบสัญญาณกับสามเหลี่ยมแล้วนำมารวมสัญญาณ (Combine) โดยใช้ออร์เกต (OR gate) แสดงดังภาพที่ 10 แสดงสัญญาณควบคุมแบบซิมเปิลบูสต์ที่ได้จากการออกแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ที่เป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (Sine PWM: SPWM) ที่มีช่องสัญญาณลัดวงจรเพื่อใช้ขับนำขาเกทของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ส่วนภาพที่ 11 แสดงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ที่ในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ชนิดซิมเปิลบูสต์ เพื่อใช้ขับนำขาเกทของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์

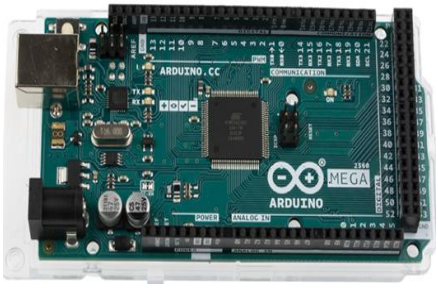


ภาพที่ 9 แผนผังวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

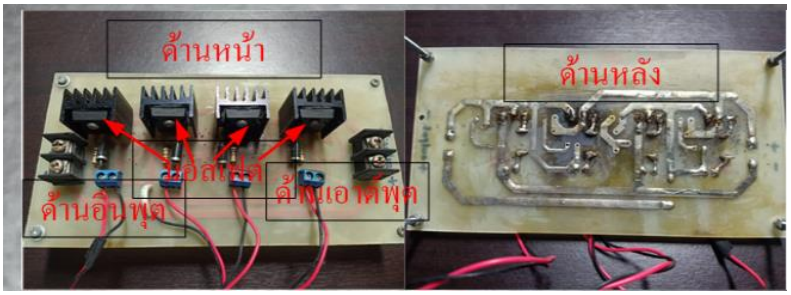
ในส่วนงานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีวงจรขับนำขาเกทของสวิตช์ เนื่องจากต้องป้องกันความเสียหายอันที่จะเกิดกับบอร์ดควบคุมจากแผงวงจรกำลัง อีกทั้งยังปรับขนาดแรงดันให้เหมาะสมต่อการขับนำด้วยวงจรขับเกทที่ออกแบบโดยใช้ไอซี 6n136 บนแผง PCB วงจรขับเกทโดยใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จากภาพที่ 12 แสดงแผ่น PCB วงจรภาคกำลังทั้งด้านหน้าและด้านหลังของงานวิจัยที่ออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วยมอสเฟตกำลัง 4 ตัวต่อกันเป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 10 สัญญาณควบคุมแบบชิมเปิลบูสต์



ภาพที่ 11บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560



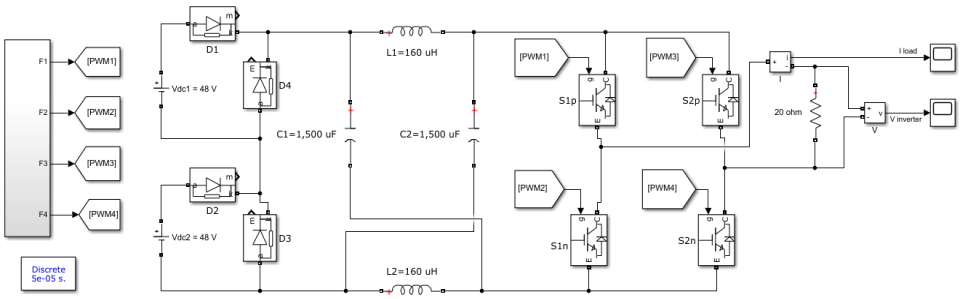
ภาพที่ 12 แผง PCB วงจรวงจรฟลูบริดจ์อินเวอร์เตอร์จากการออกแบบ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การจำลองและทดลองการทำงานของวงจรเพื่อรองรับทฤษฎีที่กล่าวถึงในข้างต้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และทดลองจากวงจรต้นแบบเปรียบเทียบกันเพื่อแสดงผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการจำลองและการทดลองดังตารางที่ 2 และ ภาพที่ 13 แสดงวงจรการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองและการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์	ค่า	หมายเหตุ
Input voltage: Vdc1, Vdc2	$48\ \text{V} + 48\ \text{V}$	
Z-source Inductor: L1=L2=L	$160\ \mu\text{H}$	
Z-source Capacitor: C1=C2=C	$1{,}500\ \mu\text{F}$	
Shoot-Through Duty Cycle: $T_{ST}\ /\ T$	0.35	
Modulation Index: M	0.8	
Switching frequency: f_s	$1{,}000\ \text{Hz}$	



ภาพที่ 13 วงจรการจำลองโดยใช้ MATLAB/Simulink

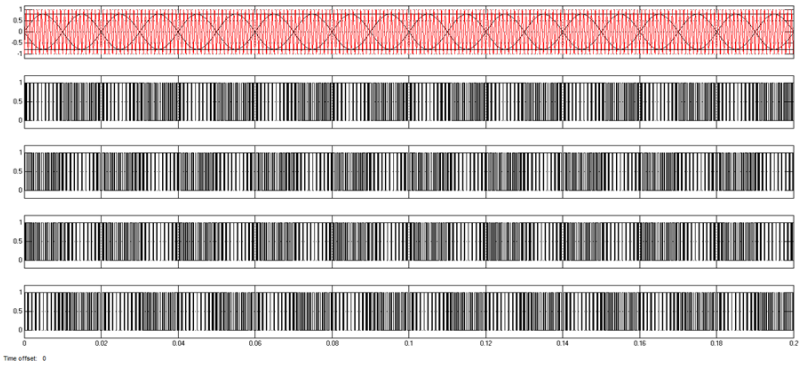
เมื่อแทนค่าอัตราส่วนเวลาลัดวงจรเท่ากับ $T_{ST}\ /\ T = 0.35$ จะได้ค่าตัวประกอบการบูสต์ B แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุของโครงข่ายอิมพีแดนซ์ $V_{C1} = V_{C2} = V_C$ และแรงดันค่ายอดด้านขาออก $\hat{v}_{ac}$ ดังสมการที่ (3), (4) และ (5) ตามลำดับดังนี้

$$B = \frac{T}{T_{Active} - T_{ST}} = \frac{1}{1 - 2\left(\frac{T_{ST}}{T}\right)} = 3.33 \tag{3}$$

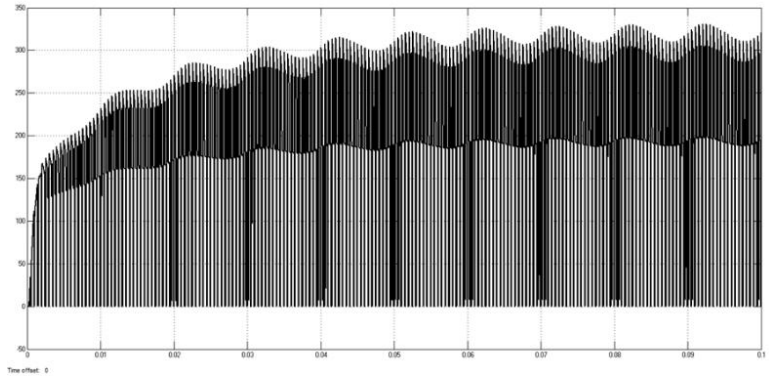
$$V_{C1} = V_{C2} = V_C = \frac{1 - \frac{T_{ST}}{T}}{1 - 2\frac{T_{ST}}{T}} V_{dc} = 2.16 \times 96 = 208\ \text{V} \tag{4}$$

$$\hat{v}_{ac} = MB\frac{V_{dc}}{2} = 0.8 \times 3.33 \times 48 = 127.87\ \text{V} \tag{5}$$

จากทฤษฎีวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ สมการที่เกี่ยวข้องต่างๆ และค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบที่คำนวณได้ นำมาจำลองการทำงาน (Simulation) โดยใช้ MATLAB/Simulink ดังภาพที่ 14 จะได้ผลการจำลองสัญญาณควบคุม ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณรูปคลื่นไซน์ สัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณเส้นตรง นำมามอดูเลทและผสมสัญญาณแบบลอจิก ทำให้ได้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มออกมา 4 สัญญาณเพื่อนำไปขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมตัวเก็บประจุโครงข่ายอิมพีแดนซ์จากการจำลอง

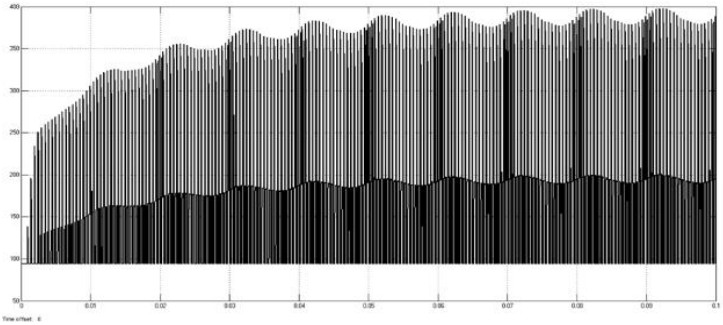


ภาพที่ 14 รูปคลื่นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

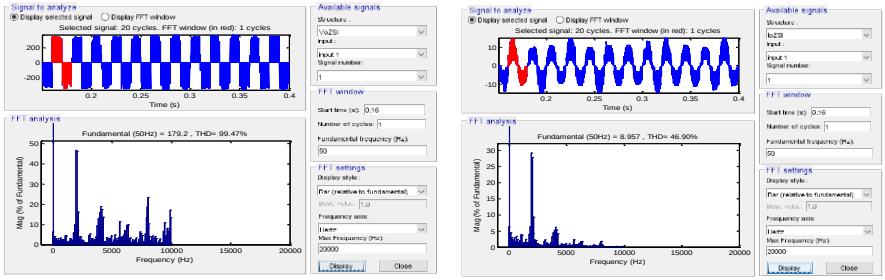


ภาพที่ 15 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมตัวเก็บประจุโครงข่ายอิมพีแดนซ์จากการจำลอง

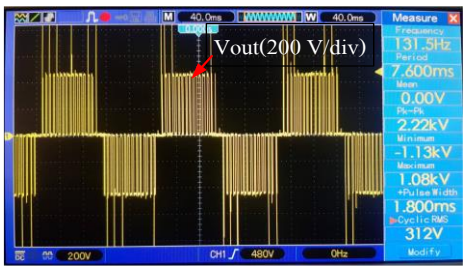
จากภาพที่15 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมตัวเก็บประเก็บโครงข่ายอิมพีแดนซ์จากการจำลอง จากรูปคลื่นผลการจำลองจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสมีค่าประมาณ 200 V ซึ่งค่า $V_{C1}=V_{C2}=208$ V จากรูปคลื่นจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสมีระลอกคลื่นเข้ามาปะปนจำนวนมาก และภาพที่ 16 แสดงแรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (DC-Link) ตกคร่อมอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ $\hat{v}_i$ จากการจำลอง ซึ่งจากรูปคลื่นผลการจำลองจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสมีระลอกคลื่นเข้ามาปะปนจำนวนมากคล้ายๆ รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมตัวเก็บประเก็บโครงข่ายอิมพีแดนซ์



ภาพที่ 16 แรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงตกคร่อมอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์จากการจำลอง



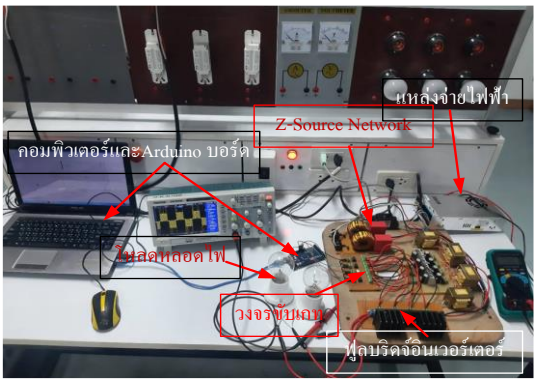
ภาพที่ 17 รูปคลื่นความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากการจำลอง



ภาพที่ 18 แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการทดลอง

จากภาพที่ 17 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกไฟฟ้ากระแสสลับจากการจำลอง จากรูปคลื่นผลการจำลองดังกล่าวมีค่ายอด (Peak) ประมาณ 200 V และมีฮาร์มอนิกปะปนจำนวนมาก ต้องใช้วงจรกรองเพื่อเข้าช่วยกรองก่อนจ่ายให้กับโหลดภาระทางไฟฟ้าหรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ส่วนภาพที่ 18 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จากการทดลองเครื่องต้นแบบ จากรูปคลื่นผลการทดลองดังกล่าวมีค่ายอด (Peak) ประมาณ 400 V (200 V/div) ซึ่งจากการคำนวณจากสมการที่ (4) ได้เท่ากับ $\hat{v}_{ac} = 128.87v$ ซึ่งพบว่าเกิดค่าผิดผลาดบ้างเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลจากกระบวนการทดลอง การตั้งค่าพารามิเตอร์ และค่าความผิดผลาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 19 แสดงวงจรต้นแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์สองอินพุต ที่สร้างขึ้นใช้ในการทดลอง วงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสำเร็จรูปสองขั้วต่อ โดยต่อเข้าด้านขาเข้าของวงจรโครงข่ายอิมพีแดนซ์ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว และด้านขาออกใช้โหลดภาระทางไฟฟ้าเป็นหลอดไฟฟ้าขนาด 200 W ส่วนของวงจรควบคุมใช้การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มออกมา 4 สัญญาณจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ประมวลผลลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3 แล้วผ่านวงจรขับเกท เพื่อขับนำสวิตช์มอสเฟตของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์



ภาพที่ 19 วงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นใช้ในการทดลอง

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์จากพลังงานหมุนเวียนสองแหล่งจ่าย สามารถรักษาระดับและยกระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกให้คงที่ โดยการยกระดับแรงดันไฟฟ้านั้น ไม่ต้องใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาเพิ่มหรือไม่ต้องใช้หม้อแปลงยกระดับแรงดันเข้ามาเพิ่มให้ยุ่งยาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ซึ่งเป็นข้อดีของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ แต่พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งพลังงานเหล่านี้ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ตลอดเวลาได้ อาทิเช่น การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิ ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ โดยเฉพาะในตอนกลางคืนและปัญหาแสงแดดถูกบดบัง ส่วนการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมน้ำ จะมีปัญหาเรื่องความเร็วและความแรงของลม ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ งานวิจัยได้นำเสนอการออกแบบวงจรภาคกำลัง วงจรควบคุมที่สามารถ ควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์ให้สามารถนำไปใช้กับโหลดที่เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ มีการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายอิมพีแดนซ์และผลการทดลองจากวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้น พบว่าวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ตามทฤษฎีและอาจมีความคลาดเคลื่อนในระดับที่ยอมรับได้

ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาสมรรถนะวงจรโครงข่ายอิมพีแดนซ์ (Z-Source Network) เช่น ต่อตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด เข้าไปเพื่อเพิ่มตัวประกอบการบูสต์ (Boost Factor) ให้สูงขึ้นจะสามารถทำให้งานวิจัยมีสมรรถนะดีขึ้น

2. ใช้ทฤษฎีระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) และการควบคุมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Logic Control) เข้ามาช่วยในการควบคุมระบบให้มีความฉลาด สามารถวิเคราะห์ คิดและตัดสินใจโดยใช้ข้อมูลเป็นฐานในการติดสินใจได้

เอกสารอ้างอิง

ชาติชาย โสบุญ, ปุณยภัทร ภูมิภาค, และอนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. (2558). **การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นทะเล**. การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38, หน้า 161–164.

Farzad Sedaghati,. & Ebrahim Babaei. (2011). **Double Input Z-Source DC-DC Converter**. The 2nd Power Electronics, Drive System and Technologies Conference, (pp. 581-586.)

Gajanayake, C. J., & Mahinda Vilathgamuwa, D. (2005). **Modeling and design of multi-loop closed loop controller of Z-Source Inverter for distribution generation**. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, (pp.1-7).

Huang, Y., Shen M., Peng, F. Z., & Wang, J. (2003). Z-Source Inverter for Residential Photovoltaic Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, 21(6), 1776-1782.

Jung, J. W., Min Dai & Ali Keyhani. (2005). **Modeling and Control of a Fuel Cell Based Z-source Inverter**. IEEE.Conf, (pp.1112 -1118).

Loh, P. C., Vilathgamuwa, D. M., Lai, Y. S., Chua G. T., & Li, Y. (2005). Pulse-Width Modulation of Z-source Inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 20(6), 1346 -1355.

Peng, F. Z. (2003). Z-Source Inverter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 39(2), 504 -510.

Peng, F. Z., Shen, M., & Qian, Z. (2005). Maximum Boost Control of the Z-Source Inverter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 20(4), 833-838.