

อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ผลิตไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบอิสระจากเซลล์แสงอาทิตย์ Standalone Single-Phase Five Level Inverter from Photovoltaic Cells

ณัฐพงษ์ ประพฤติ^{1*} เจษฎา อำพันธุ์¹ เทพพนม โสกาเพิ่ม¹ และ วิจิตร กิมเรศ²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

nuttapong@mut.ac.th*, jessadaampan@gmail.com, theppanom@mut.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง vijit.ki@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระด้วยอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ หนึ่งเฟสจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำลองการทำงานโดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบยกระดับคลื่นพาห์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นนำผลการจำลองมาออกแบบและพัฒนาอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ ต่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D ของบริษัท Texas Instrument ในการประมวลผลเพื่อทำการควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด จากผลการทดลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ที่ค่าดัชนีมอดูเลต 1.0 เมื่อต่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ 220 V และภาระทางไฟฟ้าได้ 300 W และเมื่อต่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ 180 V และภาระทางไฟฟ้าได้ 50 W ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาสามารถใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ได้

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับ, คาสเคดเอชบริดจ์, การสวิตช์แบบยกระดับคลื่นพาห์, ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This paper presents a standalone single-phase five-level inverter from photovoltaic (PV) cells. The inverter operation was simulated using the Level-Shifted Pulse Width Modulation (LSPWM) technique in MATLAB/Simulink. Based on the simulation results, a five-level Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI) was designed and developed to operate with both DC power sources and PV cells. The system control was implemented using a Texas Instruments C2000 microcontroller, model TMS320F28379D. Experimental results show that, at a modulation index of 1.0, the inverter can deliver an output voltage of 220 V and a load of 300 W when supplied by a DC source, and 180 V with a load of 50 W when supplied by PV cells, respectively. These results demonstrate that the designed five-level inverter can effectively operate with both DC and photovoltaic power sources.

Keywords: Multilevel Inverter, Cascaded H-Bridge, Level-Shifted PWM, Microcontrollers

1. บทนำ

ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter; MLI) ได้รับความสนใจและนิยมกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตคุณภาพสูง ลดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion; THD) และลดการสูญเสียการสวิตช์ เหมาะอย่างยิ่งสำหรับงานแรงดันสูงและกำลังสูง ซึ่งอินเวอร์เตอร์สองระดับแบบปกติไม่สามารถรองรับได้ โดยทั่วไปหลักแล้วอินเวอร์เตอร์หลายระดับมี 3 รูปแบบ ตามโครงสร้างการต่อวงจร ดังนี้ [1-2]

- วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบจุดนิวตรอนร่วม (Neutral-Point Clamped Inverter; NPC-MLI) โครงสร้างหลักใช้ไดโอดคั่นระดับแรงดัน หรือเรียกอีกอย่างว่า (Diode-Clamped Multilevel Inverter; DC-MLI) เพื่อสร้างจุดนิวตรอนร่วมของแรงดันทำให้แรงดันเอาต์พุตหลายระดับ เหมาะกับใช้งานแรงดันสูงและกำลังสูง

- วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบตัวเก็บประจุอนุกรม (Flying-Capacitor Multilevel Inverter; FYC-MLI) โครงสร้างหลักใช้ตัวเก็บประจุต่อพ่วงระหว่างสวิตช์ สามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตหลายระดับโดยไม่ต้องใช้ไดโอดเยาะเหมือน DC-MLI และปรับสมดุลได้ง่าย เหมาะกับใช้งานแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง

- วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบคาสเคด (Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter; CHB-MLI) โครงสร้างหลักประกอบด้วย H-Bridge Inverter ต่ออนุกรมกัน อินพุตใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแยกอิสระ ส่วนเอาต์พุตของแต่ละ H-Bridge Inverter จะต่อเข้าด้วยกันเพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตหลายระดับ เหมาะกับใช้งานแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูง และเหมาะใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่

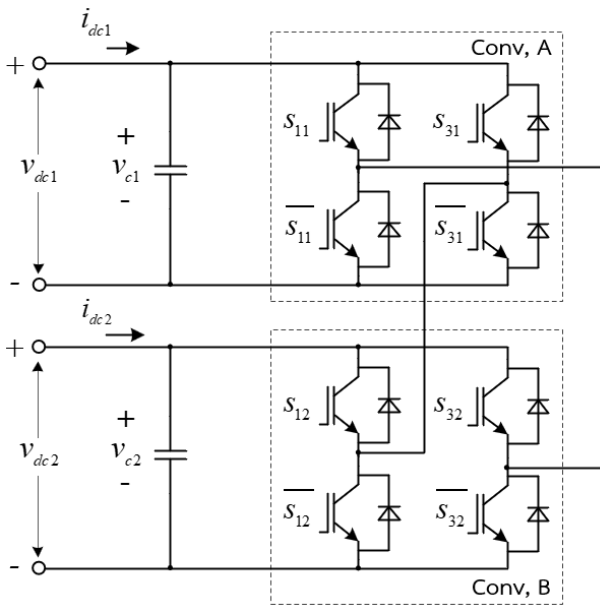
ในบรรดาโครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ อินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ (CHB-MLI) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังและแบบอิสระ ด้วยข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป [3-4] เช่น ลดความเครียดสนามไฟฟ้าของสวิตช์ ลดแรงดันตกคร่อมสวิตช์แต่ละตัว มีโครงสร้างแบบโมดูลาร์สามารถขยายจำนวนระดับแรงดันได้ง่าย และการต่ออนุกรมหลาย H-Bridge ทำให้สามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตแบบขั้นบันไดที่ใกล้เคียงกับสัญญาณไซน์ ส่งผลให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมทั้งของแรงดันและกระแสมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับแบบโพลาร์ และสามารถปรับแบบยูนิโพลาร์

อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ (CHB-MLI) เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของวงจรจะเห็นว่าต้องใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแยกอิสระในแต่ละ H-Bridge ซึ่งเป็นข้อด้อยของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ แต่หากนำมาใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์หรือแบตเตอรี่ ก็สามารถลดข้อด้อยของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ลงได้

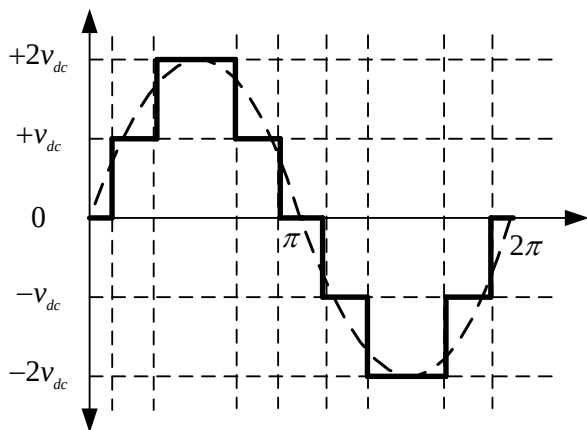
ดังนั้น งานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดแคสเคดเอชบริดจ์ (CHB-MLI) โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ ยกระดับคลื่นพาห์ (Level-Shifted PWM; LSPWM) ควบคุมการทำงานของ ระบบให้มีความเสถียรภาพด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D สำหรับการต่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงและแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์

2. ระบบที่นำเสนอ

การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เอาต์พุตมีรูปคลื่นแรงดันเฟส 5 ระดับ จำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์ จำนวน 2 เซลล์ โครงสร้าง และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดแคสเคดเอชบริดจ์ (CHB-MLI) ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ [5]



รูปที่ 1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดแคสเคดเอชบริดจ์



รูปที่ 2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดแคสเคดเอชบริดจ์

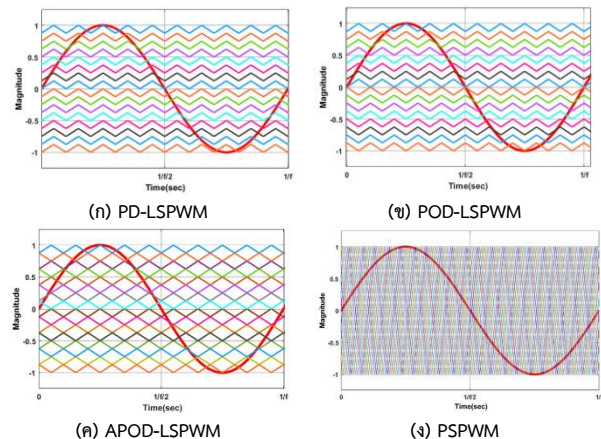
จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับผลรวมแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ในแต่ละเซลล์รวมกัน โดยสามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ดังสมการที่ (1)

$$V_o = V_{dc1} + V_{dc2} \quad (1)$$

และจากรูปที่ 2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดแคสเคดเอชบริดจ์ มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดแบบ สมมาตรใกล้เคียงสัญญาณไซน์ หากเพิ่มระดับของอินเวอร์เตอร์จะทำให้ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตยิ่งเข้าใกล้สัญญาณไซน์มากขึ้น ส่งผลให้ลด ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันไฟฟ้า และลดค่าความสูญเสีย กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์สวิตช์ในรูปของพลังงานความร้อน

เทคนิคการสวิตช์แบบยกระดับคลื่นพาห์ (Level-Shifted Pulse Width Modulation) เป็นเทคนิคที่ใช้งานง่ายและนิยมใช้ในอินเวอร์เตอร์ หลายระดับ โดยอาศัยการเปรียบเทียบระหว่าง คลื่นพาห์ (Carrier Waveforms) หลายรูปที่ถูกจัดเรียงในแนวตั้ง (Level-Shifted) กับ สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) เพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตแบบ ขั้นบันได (Stepped Output Voltage) เมื่อสัญญาณอ้างอิงถูกเปรียบ เทียบกับคลื่นพาห์ แต่ละช่วงเวลาจะได้สัญญาณ PWM ที่ควบคุมให้สวิตช์ ทำงานตามลำดับ เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตเป็นหลายระดับตามที่ออกแบบไว้ อีกทั้งช่วยกระจายสเปกตรัมของฮาร์มอนิก ให้รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต ใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากขึ้น โดยใช้ความถี่ในการสวิตช์ต่ำ และลดความ ผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD) ในแรงดันเอาต์พุตเมื่อเทียบกับ PWM แบบเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคนิคการสวิตช์แบบยกระดับคลื่นพาห์ แสดงดังรูปที่ 3 และสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

- PD-LSPWM (Phase Disposition) คลื่นพาห์ทั้งหมดอยู่ในเฟส เดียวกัน ต่างกันเพียงตำแหน่งการจัดเรียงในแนวตั้ง เหมาะสำหรับลด ฮาร์มอนิกในแรงดันเอาต์พุต
- POD-LSPWM (Phase Opposition Disposition) คลื่นพาห์ ด้านบวกทั้งหมดมีเฟสตรงข้าม (180°) กับคลื่นพาห์ด้านลบ เหมาะสำหรับ ปรับสมดุลของแรงดันเอาต์พุต
- APD-LSPWM (Alternate Phase Opposition Disposition) คลื่นพาห์ถูกจัดเรียงสลับกันโดยแต่ละเส้นมีเฟสตรงข้าม (180°) กับเส้น ถัดไป เหมาะสำหรับกระจายฮาร์มอนิกไปย่านความถี่สูงมากขึ้น



(ก) PD-LSPWM (ข) POD-LSPWM (ค) APD-LSPWM (ง) PSPWM

รูปที่ 3 เทคนิคการสวิตช์แบบยกระดับคลื่นพาห์ (LSPWM) และแบบเลื่อนเฟสคลื่นพาห์ (PSPWM) [6]

3. การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนที่สองเป็นวงจรสำหรับการสร้างสัญญาณมอดูเลตแบบ PWM ส่วนที่สามเป็นวงจรสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนสุดท้ายเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดแคตเคดเอชบริดจ์ ส่วนของวงจรกำลังจะออกแบบโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์มาต่ออนุกรมกัน 2 วงจร เพื่อให้มีระดับแรงดัน 5 ระดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ IGBT รุ่น RJH60D7ADPK ขนาดพิกัด 600 V, 50 A จำนวน 4 ตัว ในแต่ละเซลล์ของวงจร แสดงดังรูปที่ 4

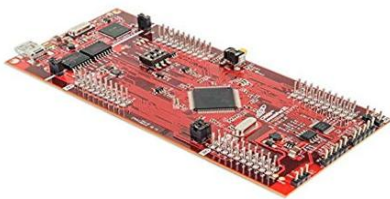


รูปที่ 4 IGBT รุ่น RJH60D7ADPK ขนาดพิกัด 600 V, 50 A

โดยที่ขาเกตของ IGBT แต่ละตัวจะต่อกับวงจรขับเกตที่ได้รับสัญญาณมาจากสัญญาณควบคุม วงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ออกแบบให้มีการทำงานในการสวิตช์เพื่อนำกระแสแบบพัลส์เป็นหนึ่ง (Active HIGH) ดังนั้นจึงได้เลือกใช้งานไอซีเบอร์ TLP250 ที่มีหลักการทำงานเช่นเดียวกันกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เพื่อแยกการควบคุมสัญญาณขับเกตในการส่งสัญญาณโดยแยกอุปกรณ์วงจรกำลังและวงจรควบคุมออกจากกัน

3.2 วงจรสำหรับการสร้างสัญญาณมอดูเลตแบบ PWM

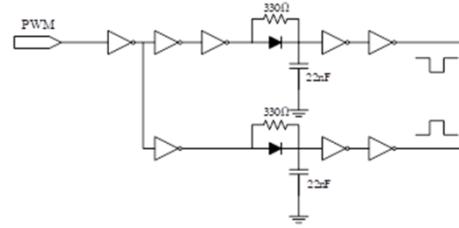
การสร้างสัญญาณมอดูเลตแบบ PWM ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เบอร์ TMS320F28379D

โดยเขียนคำสั่งลงในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อปรับตั้งสัญญาณผ่านหน้าต่างการแสดงผลในโปรแกรม Code Composer Studio ที่ทำงานร่วมกับ MATLAB/Simulink และเพื่อป้องกันการลัดวงจรในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์ สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนส่งสัญญาณเข้าที่ขาเกตของ IGBT ในส่วนที่ 3.1 นั้น ต้องผ่านวงจรประวิงเวลา ก่อน แสดงดังรูปที่ 6 โดยสามารถคำนวณหาตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ได้จากสมการ Dead time (t_d) ดังสมการที่ (2)

$$t_d = R \times C \times \ln(2) \quad (2)$$



รูปที่ 6 วงจรประวิงเวลาที่ออกแบบสร้าง

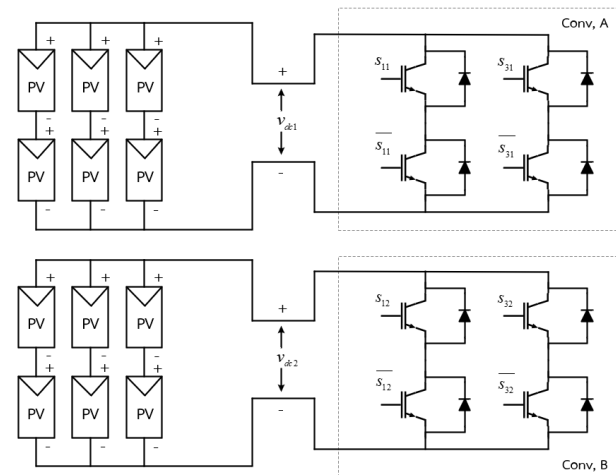
3.3 วงจรสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ของ BSC รุ่น BS40 ต่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ที่ด้านอินพุตทั้ง 2 เซลล์ที่แยกอิสระจากกัน สำหรับค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ BSC รุ่น BS40

Parameter	Rated
Nominal Power	40 W
Open circuit voltage	62.2 V
Short- circuit current	1.14 A
Operating voltage	44.8 V
Current at rated Operating voltage	0.93 A

ต้องการออกแบบให้อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ 220 V และภาระทางไฟฟ้าได้ 300 W ดังนั้น จากตารางที่ 1 ต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกัน 2 แผงต่อหนึ่งสตริง และต่อขนานกันทั้งหมด 3 สตริง สำหรับอินเวอร์เตอร์ในแต่ละเซลล์ แสดงดังรูปที่ 7



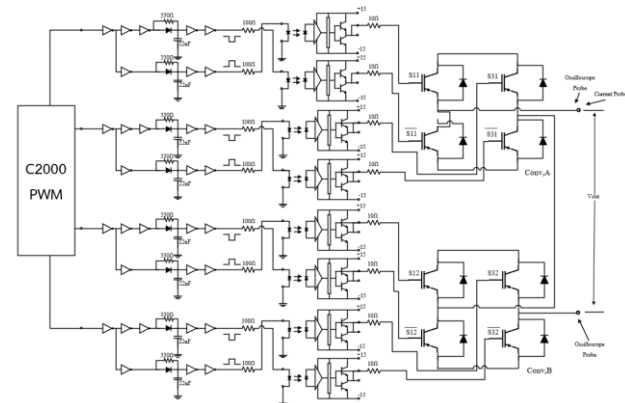
รูปที่ 7 ลักษณะการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์

3.4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและหม้อแปลงไฟฟ้า

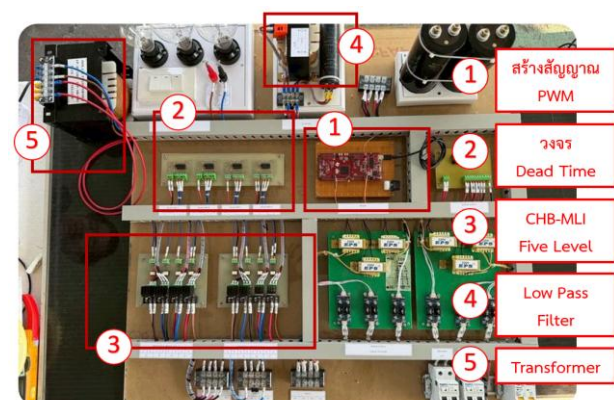
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองเพื่อลดทอนความถี่สูงในระบบพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอินเวอร์เตอร์ที่สร้างรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตแบบหลายระดับ (CHB-MLI) มักมีฮาร์มอนิกสูงที่ต้องถูกกำจัดออก จากงานวิจัย [7] การออกแบบความถี่ตัดผ่านควรมีค่าประมาณ 0.1 เท่าของความถี่การสวิตช์ ดังนั้นหากต้องการออกแบบให้มีความถี่ตัดผ่านอยู่ที่ 500 Hz จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ ขนาดพิกัด 10 mH และตัวเก็บประจุ ขนาดพิกัด 16 μ F เชื่อมต่อด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

สำหรับส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าเลือกใช้โดยคำนึงถึงความสามารถของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถสร้างแรงดันสูงสุดได้ประมาณ 120 V จึงเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอัตราส่วน 1:2 เพื่อเพิ่มแรงดันด้านออกให้ได้พิกัดแรงดันที่ต้องการ

การออกแบบและพัฒนานินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดแคสเคดเอชบริดจ์ มีวงจรและชิ้นงานจริงที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ

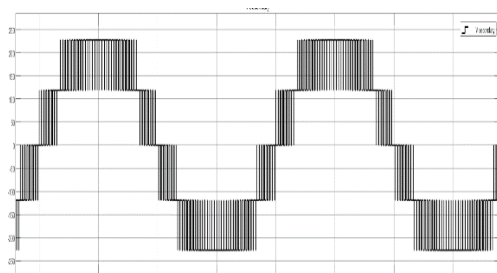


รูปที่ 8 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

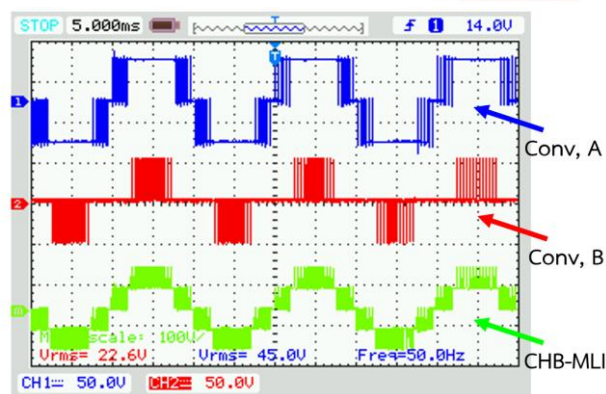


รูปที่ 9 ชิ้นงานจริงที่ใช้ในการทดลอง

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จากการจำลองด้วย MATHLAB/Simulink เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ แสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จากการจำลองด้วย MATHLAB/Simulink



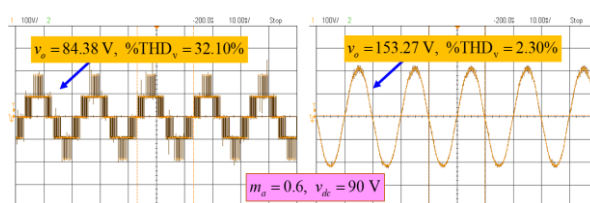
รูปที่ 11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จากการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดแคสเคดเอชบริดจ์ ที่ได้ทำการออกแบบสร้างขึ้นบรรลุและเป็นไปตามวัตถุประสงค์งานวิจัย จึงได้แบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

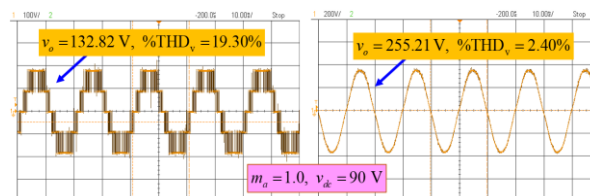
4.1 การทดลองต่อร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

การทดลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ต่อร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง อาศัยการปรับดัซิมมอดูเลต ตั้งแต่ 0.2 – 1.0 (เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.2) ผ่านตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ และควบคุมแรงดันไฟฟ้าอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ตั้งแต่ 30 V – 90 V (เพิ่มขึ้นครั้งละ 15 V) ทั้ง 2 เซลล์ของอินเวอร์เตอร์ให้ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล C2000 เพื่อสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบยกระดับคลื่นพาห์ (PD-LSPWM) ผ่านวงจร Dead Time (4 วงจร) เพื่อสร้างสัญญาณทั้งหมด 8 สัญญาณ ไปยังวงจรขับเคลื่อน IGBT ทั้ง 8 ตัว เมื่อสัญญาณขับเคลื่อนมีสถานะเป็น 1 สัญญาณจะถูกส่งไปขับเคลื่อน IGBT ที่แรงดัน 15 V_{dc} ของอินเวอร์เตอร์ ผลการทดลองต่อร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 12 ถึง รูปที่ 16 ตามลำดับ



(ก) ไม่ต่อ LPF+Transformer

(ข) ต่อ LPF+Transformer

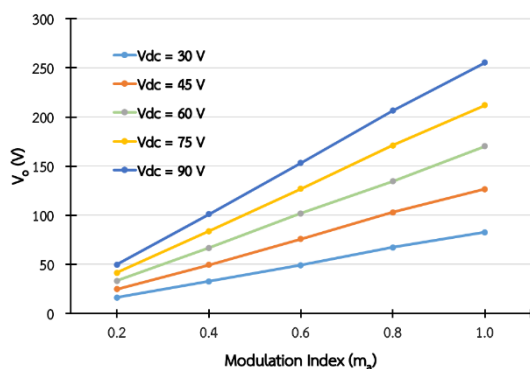


(ค) ไม่ต่อ LPF+Transformer

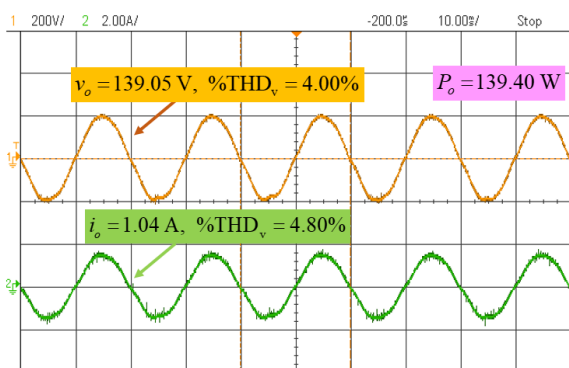
(ง) ต่อ LPF+Transformer

รูปที่ 12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (No-load)

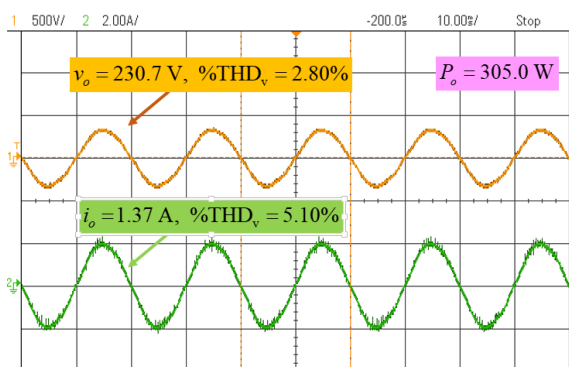
จากรูปที่ 12 ขณะไม่มีโหลด พบว่าเมื่อค่าดัชนีมอดูเลต (m_a) เพิ่มขึ้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) ของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงของแรงดันไฟฟ้าอินพุต (v_{dc}) ความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 13 และจะเห็นได้ว่า **กรณีต้องจรรองความถี่ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า** แรงดันมีขนาดเพิ่มขึ้นและรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) ใกล้เคียงสัญญาณไซน์ ส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตลดลง (%THD_v) เมื่อเทียบกับ **กรณีไม่ต้องจรรองความถี่ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า**



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับดัชนีมอดูเลต **กรณีต้องจรรองความถี่ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า (No-load)**

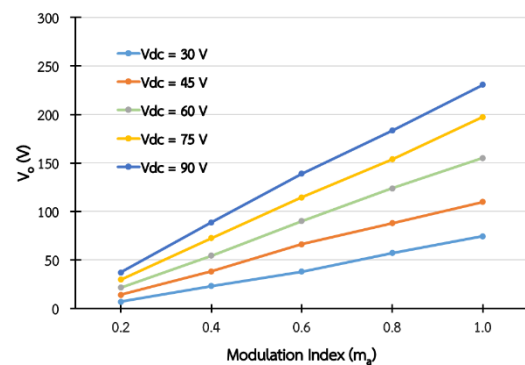


รูปที่ 14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ที่ค่า $m_a = 0.6$, $v_{dc} = 90$ V (On-load)



รูปที่ 15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ที่ค่า $m_a = 1.0$, $v_{dc} = 90$ V (On-load)

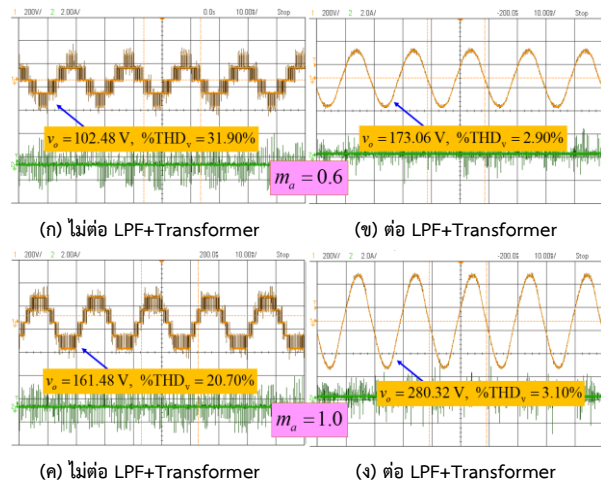
จากรูปที่ 14 และรูปที่ 15 ขณะทดลองกับโหลดหลอดไฟ พบว่าอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ สามารถดึงกำลังไฟฟ้าของแต่ละวงจรได้อย่างสมดุลสูงกว่างานวิจัยที่เคยทำก่อนหน้านี้ [5] ลักษณะรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (i_o) ใกล้เคียงสัญญาณไซน์ ส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของทั้งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (%THD_v) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (%THD_i) มีค่าน้อย และจะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับขณะไม่มีโหลดในรูปที่ 13 ในทุกช่วงของการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับดัชนีมอดูเลต **กรณีต้องจรรองความถี่ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า (On-load)**

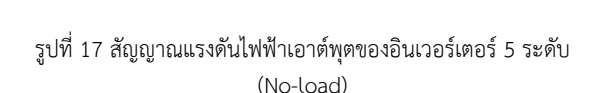
4.2 การทดลองต่อร่วมกับแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์

ทำการทดลองเหมือนกับหัวข้อ 4.1 แต่เปลี่ยนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์แทน โดยที่ความเข้มแสงขณะทำการทดลองประมาณ 800 W/m² ผลการทดลองต่อร่วมกับแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 17 ถึง รูปที่ 20 ตามลำดับ



(ก) ไม่ต่อ LPF+Transformer

(ข) ต่อ LPF+Transformer

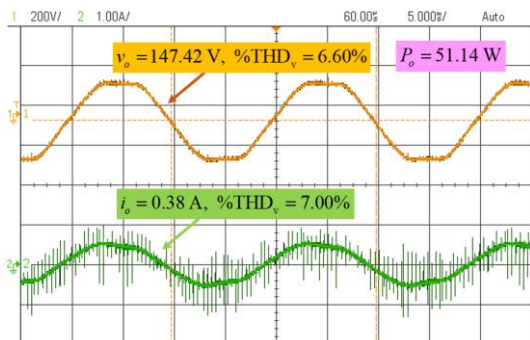


(ค) ไม่ต่อ LPF+Transformer

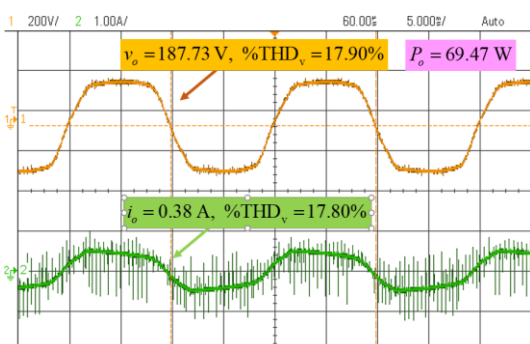
(ง) ต่อ LPF+Transformer

รูปที่ 17 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ (No-load)

จากรูปที่ 17 ขณะไม่มีโหลด พบว่าเมื่อค่าดัชนีมอดูเลต (m_a) เพิ่มขึ้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) ของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ มีค่าเพิ่มขึ้นและจะเห็นได้ว่า **กรณีต้องจรรองความถี่ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า** แรงดันมีขนาดเพิ่มขึ้นและรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (v_o) ใกล้เคียงสัญญาณไซน์ ส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตลดลง (%THD_v) เมื่อเทียบกับ **กรณีไม่ต้องจรรองความถี่ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า**

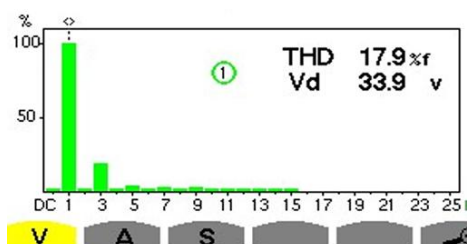


รูปที่ 18 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ที่ค่า $m_a = 0.6$ (On-load)



รูปที่ 19 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ที่ค่า $m_a = 1.0$ (On-load)

จากรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ขณะทดลองกับโหลดหลอดไฟ พบว่าอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ สามารถดึงกำลังไฟฟ้าของแต่ละวงจรได้ โดยที่ $m_a = 0.6$ ได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เท่ากับ 51.14 W และที่ $m_a = 1.0$ ได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เท่ากับ 69.47 W ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับต่อร่วมกับแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะมีโหลดค่าความผิดพลาดรวมของทั้งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (%THD_v) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (%THD_i) มีค่าสูงกว่า ในขณะที่ไม่มีโหลดพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชุดมีค่าไม่เท่ากัน ต่างกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากันก่อนจ่ายให้กับทั้ง 2 เซลล์ของอินเวอร์เตอร์ได้ และอาจเกิดจากการออกแบบวงจร Low-Pass Filter ที่มีประสิทธิภาพไม่มากพอ จากรูปที่ 19 เมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต พบว่ามีฮาร์มอนิกเลขคี่ (3, 5, 7, ...) เพิ่มขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 ฮาร์มอนิกสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ที่ค่า $m_a = 1.0$ (On-load)

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระด้วยอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ หนึ่งเฟสจากเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ที่ค่าดัชนีมอดูเลต 1.0 เมื่อต่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ 220 V และภาระทางไฟฟ้าได้ 300 W และเมื่อต่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ 180 V และภาระทางไฟฟ้าได้ 50 W แสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาสามารถใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ขอขอบคุณ นักศึกษาโครงการวิศวกรรมเครื่อง การศึกษาอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ สำหรับผลิตไฟฟ้าหนึ่งเฟสแบบอิสระจากเซลล์แสงอาทิตย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมและอิเล็กทรอนิกส์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศักดาวิมล บุญดี, “การควบคุมกระแสแบบเวกเตอร์สำหรับระบบเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยวงจรเซมิคอนดักเตอร์ 5 ระดับ,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2562
- [2] Jih-Sheng Lai and F. ZhengPeng, “Multilevel converters-a new breed of power converters,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 3, pp. 509-517, May-June 1996.
- [3] P. Panagis, F. Stergiopoulos, P. Marabeas and S. Manias, “Comparison of state of the art multilevel inverters,” *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 15-19 June 2008, pp.4296-4301.
- [4] S. Rathore, M. Kuresh Kirar and S. K. Bhaopal, “Simulation of Cascades H-Bridge Multilevel using PD, POD, APD Technique,” *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECCI)*, vol. 4, no. 3, pp. 27-41, 2015.
- [5] เทพพนม โสภะเพิ่ม, ณัฐพงษ์ ประพฤติ และ วิจิตร กิณเรศ, “อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดแคสเคดเอชบริดจ์”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47*, 13-15 พฤศจิกายน 2567, หน้า 257-260
- [6] N. Mohan, T.M. Undeland and W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. Wiley, 2003.
- [7] V. Ramu, P. Satish Kumar and G.N. Srinivas, “LSPWM, PSPWM and NLCPWM on multilevel inverters with reduced number of switches”, *Material Today: Proceedings*, vol. 54, part 3, pp. 710-727, 2022.