

การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคพิตับลิวเอ็มแบบหลายสัญญาณแคเรียร์ระหว่างแบบ
สัญญาณแคเรียร์ซ้อนกันและแบบสัญญาณแคเรียร์เลื่อนระดับตรงกันสำหรับ
อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์

A Comparative Study of Multi-Carrier in Sinusoidal Pulse Width
Modulation between Carrier Overlapping and In-Phase Disposition
Methods for Five Level Diode Clamped Inverter

สถิตย์พร เกตุสกุล^{1*}, สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ² และ ไชยวัฒน์ ทองซ้อย³
Satitporn Ketsakoon^{1*}, Surasit Prakrobkit² and Chaiwat Tongchoi³

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

³สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

¹Department of Industrial Education, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

³Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University

*Email: satitporn123g@gmail.com

Received: October 17, 2018; Revised: December 07, 2018; Accepted: June 30, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์ด้วยเทคนิคพิตับลิวเอ็มแบบหลายแคเรียร์ (MCPWM) ระหว่างพิตับลิวเอ็มแบบสัญญาณแคเรียร์ซ้อนกัน (COPWM) และเทคนิคพิตับลิวเอ็มแบบสัญญาณแคเรียร์เลื่อนระดับตรงกัน (IPDPWM) จำลองบนอินเวอร์เตอร์ไดโอดแคลมป์ (DCI) ขณะจ่ายโหลด R-L ซึ่งการจำลองจะดำเนินการจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ผลที่ได้นำมาคำนวณและแสดงค่าฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (THDv) และฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (THDi) ของแรงดันด้านออกระหว่างสายและกระแสโหลด การศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคพิตับลิวเอ็มแบบหลายสัญญาณแคเรียร์ (MCPWM) สิ่งนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ของการใช้สองพารามิเตอร์ที่กำหนดเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาอินเวอร์เตอร์ในการเลือกเทคนิคพิตับลิวเอ็ม (PWM) ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน DCI

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ, พิตับลิวเอ็มแบบหลายสัญญาณแคเรียร์, พิตับลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับตรงกัน, พิตับลิวเอ็มแบบสัญญาณแคเรียร์ซ้อนกัน, ฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน, ฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส

Abstract

This paper presents a comparative study of five-level diode clamped inverter (DCI) based on multi-carrier pulse width modulation (MCPWM), between carrier overlapping (COPWM) and in-phase disposition (IPDPWM) technique terminated by a R-L load. To examine the circuit's performance, the well-known simulation software, i.e. PSCAD/EMTDC, is utilized. After exploring the number of results, IPDPWM method shows lower figures of the calculated total harmonic distortion for both line-line output voltage Total

harmonics distortion of voltage (THDv) and load current total harmonics distortion of current (THDi) compared to that of Multi-Carrier in Sinusoidal Pulse Width Modulation (MCPWM) technique. This implies the possibility of using two given parameters as a guide for inverter development in selecting the right pulse width modulation (PWM) technique for DCI applications.

Keywords : Five-level inverter, Level-shifted multi-carrier, Carrier overlapping PWM, Total harmonics distortion of voltage, Total harmonics distortion of current.

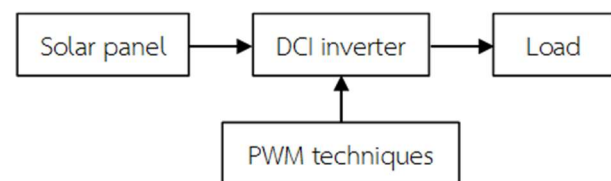
1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการประยุกต์ใช้พลังงานสะอาดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นซึ่งอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์มีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้งานเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้โดยทั่วไปจะเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ระดับ ซึ่งมีคุณภาพของแรงดันด้านออกมีความเพี้ยนสูงเนื่องจากผลของแรงดัน dv/dt มีค่าสูงส่งผลให้ความเพี้ยนของกระแสสูงตามไปด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีการศึกษาสมรรถนะด้านการนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนกำลังสูงในอุตสาหกรรมเพื่อทำหน้าที่แทนวงจรขับเคลื่อนแบบ 2 ระดับ ด้วยคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ทำให้ได้รับความสนใจศึกษาและวิจัยมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ อินเวอร์เตอร์ชนิดไดโอดแคลมป์ (DCI) ชนิดอินเวอร์เตอร์คาบเคสมีลติเซล (CMI) หรือเอชบริดเซล (HBC) และชนิดอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCI) ซึ่ง Manasa S. [1] ได้ทำการออกแบบและการจำลองอินเวอร์เตอร์ชนิด CMI เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ และ 7 ระดับด้วยการจำลองผลฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (THDv) จะแปรผันตามจำนวนระดับของแรงดันทางด้านออก ต่อมา Anil D. Matkar [2] ทำการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิค PWM สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด DCI เป็นการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทคนิคพีดับลิวเอ็ม (PWM) ที่นำมาใช้จำลองแบ่งเป็นไซน์พีดับลิวเอ็ม (SPWM) และสเปซ-เวกเตอร์พีดับลิวเอ็ม (SVPWM) เปรียบเทียบเทคนิคการควบคุมบนอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ DCI

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับกันอย่างต่อเนื่อง และเนื่องด้วยอินเวอร์เตอร์ประเภทดังกล่าวมีจำนวนสวิตช์กำลังจำนวนมากทำให้ความซับซ้อนในการควบคุมมีมาก

ตามไปด้วยเทคนิคพีดับลิวเอ็มจึงถูกนำมาประยุกต์จำลองร่วมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับและศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย โดย S. Narendiran [3] ได้ทำการศึกษาอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยการนำเทคนิคพีดับลิวเอ็มแบบหลายแคเรียร์ (MCPWM) มาทำการจำลองและเปรียบเทียบผลการศึกษาดูด้วยเทคนิคการกำจัดเฟสที่ตรงกันข้าม (POD) ทางเลือกเฟสการจัดการตรงข้าม (APOD) และแคเรียร์ซ้อนกัน (CO) โดยทำการจำลองที่ค่ามอดูเลตต่างๆ ผลที่ได้ทราบว่าเทคนิค CO ให้ผลของความเพี้ยนของแรงดันต่ำกว่าเทคนิคอื่นในช่วงการมอดูเลตสูงเท่านั้น

ในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคในกลุ่ม MCPWM ระหว่างพีดับลิวเอ็มแบบสัญญาณแคเรียร์ซ้อนกัน (COPWM) และเทคนิคพีดับลิวเอ็มแบบสัญญาณแคเรียร์เลื่อนระดับตรงกัน (IPDPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิด DCI ด้วยโปรแกรมจำลองทางไฟฟ้า โดยผลการจำลองเพื่อเปรียบเทียบความเพี้ยนของแรงดันและกระแสด้านออกที่ค่ามอดูเลตต่างๆ

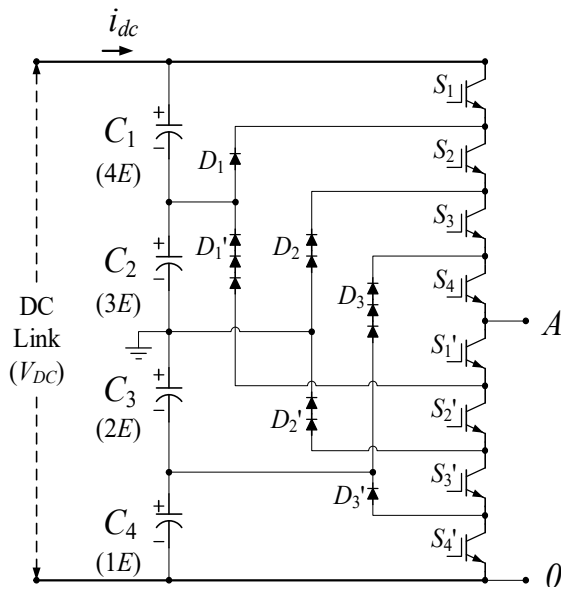


รูปที่ 1 ไดอะแกรมการทำงานโดยรวม

2. โครงสร้างของไดโอดแคลมป์อินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับไดโอดแคลมป์หรือเรียกว่า นิวทรัลพอยท์อินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วน คือ ตัวเก็บประจุไดโอด และอุปกรณ์สวิตช์กำลัง โดยตัวเก็บประจุวงนอกสุด

เรียกว่า คอมมอนดีซีลิงเป็นตัวยกแรงดัน ซึ่งตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยกัน 4 ตัว หรือ 4 ระดับแรงดัน โดยแรงดันที่ได้ในแต่ละระดับทางด้านออกจะเกิดจากเลือกการสวิตช์โดยกำหนดทิศทางไหลของกระแสด้วยไดโอดแคลมป์ ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวคือ 1E เช่นกัน



รูปที่ 2 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดไดโอดแคลมป์ 1 กิ่ง

ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุแต่ละตัวที่ต่ออนุกรมกันตามสถานะการสวิตช์ขึ้น ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุหลายอันในแต่ละตัว คือ 1E โดยอินเวอร์เตอร์ที่ศึกษาในบทความนี้เป็นอินเวอร์เตอร์ประเภท 5 ระดับ ($m = 5$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (1) – (3)

$$SW = (m-1) \times 2 \quad (1)$$

$$C = (m-1) \quad (2)$$

$$m = \frac{SW}{2} + 1 \quad (3)$$

เมื่อ SW คือ จำนวนสวิตช์กำลัง, Each
 C คือ จำนวนตัวเก็บประจุที่ใช้, Each
 m คือ ระดับแรงดัน, Level

หากต้องการเลือกแรงดันต้นเท่ากับดีซีลิง จะต้องเลือกการขับเคลื่อนสวิตช์กำลัง S_1 ถึง S_4 รวมทั้งหมด 4 ตัว (ด้าน High) หากต้องการแรงดันทางด้านออกจะได้เท่ากับ 1 ใน 4 ของแรงดัน ดีซีลิง จะต้องเลือกการขับเคลื่อนสวิตช์กำลัง S_4 เพียงตัวเดียวเท่านั้น ซึ่งอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีข้อจำกัดในการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์หรือรูปแบบการสวิตช์กำลังเฉลี่ยทำได้ยาก เนื่องจากรูปแบบการสวิตช์ไม่ยืดหยุ่นจึงทำให้ส่งผลต่อการรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุด้วย

3. เทคนิคพีดับลิแอม

เทคนิคพีดับลิแอมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นสามารถทำได้ โดยอาศัยพื้นฐานการสร้างสัญญาณพีดับลิแอมของวงจรขับแบบ 2 ระดับ เพียงแต่จะเพิ่มจำนวนของแคเรียร์ขึ้นตามจำนวนของสวิตช์กำลัง สำหรับในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จะใช้สวิตช์กำลังจำนวน 4 ตัว จึงใช้สัญญาณแคเรียร์จำนวน 4 แคเรียร์ ในการมอดูเลตเพื่อสร้างสัญญาณเกตในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นตัวอย่างการสร้างสัญญาณเกตสำหรับเทคนิค COPWM ที่ใช้ในการศึกษาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) – (6)

จากข้างต้นความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณฮาร์มอนิกสในแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยจะเกิดขึ้นรอบๆ m_f ซึ่งหากจำนวน ฮาร์มอนิกอันดับยิ่งมากความถี่ของแรงดันก็จะยิ่งต่ำรวมไปถึงด้านความถี่นกระแสก็จะต่ำตามด้วย

$$m_a = \frac{V_m}{V_{cr}(m-1)} \quad \text{สำหรับ } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (4)$$

$$f_{sw,dev} = \frac{f_{cr}}{(m-1)} \quad (5)$$

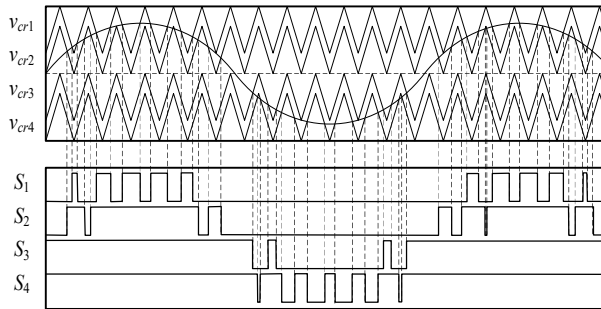
$$f_{sw,inv} = (m-1)f_{sw,dev} \quad (6)$$

เมื่อ f_m คือ ความถี่ของสัญญาณมูลฐาน, Hz
 f_{cr} คือ ความถี่ของสัญญาณแคเรียร์, Hz
 $f_{sw,dev}$ คือ ความถี่ของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง, Hz
 $f_{sw,inv}$ คือ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์, Hz
 m_f คือ อัตราส่วนความถี่การมอดูเลต (f_{cr}/f_m)

- m_a คือ ค่าการมอดูเลตสัญญาณ
- m คือ ระดับแรงดัน, Level
- V_m คือ แรงดันยอดคลื่นสัญญาณมูลฐาน, V
- V_{cr} คือ แรงดันยอดคลื่นสัญญาณแคเรียร์, V

โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคระหว่าง COPWM และ IPDPWM ซึ่งได้กำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำหนดการทำงานของอินเวอร์เตอร์

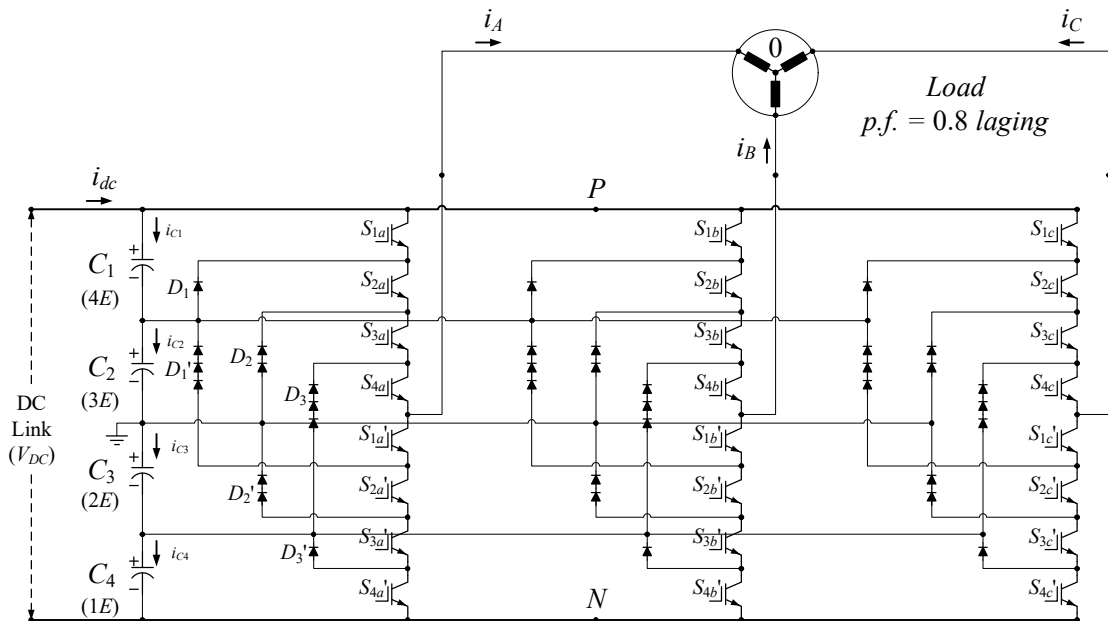


รูปที่ 3 ตัวอย่างเทคนิค COPWM

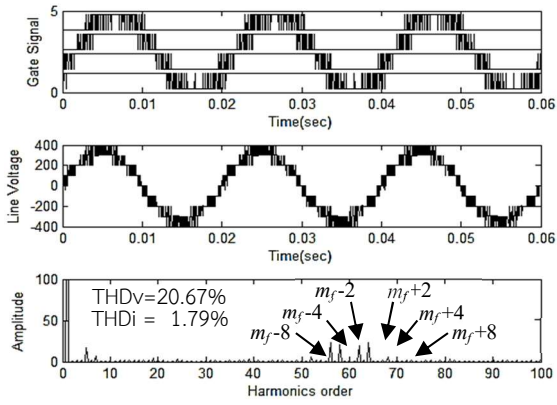
พารามิเตอร์	ปริมาณ
แรงดันดีซีลิง	400 V
ความถี่ของสัญญาณด้านออก	50 Hz
อัตราส่วนความถี่แคเรียร์ต่อมูลฐาน	60
ความถี่สัญญาณแคเรียร์	3 kHz
การมอดูเลต	1.0
ตัวเก็บประจุ	4,700 μ F
โหลดตัวต้านทานต่อเฟส	40 Ω
โหลดตัวเหนี่ยวนำต่อเฟส	0.0955 mH
ตัวประกอบกำลัง	0.8 lagging

4. การจำลองและผลการจำลอง

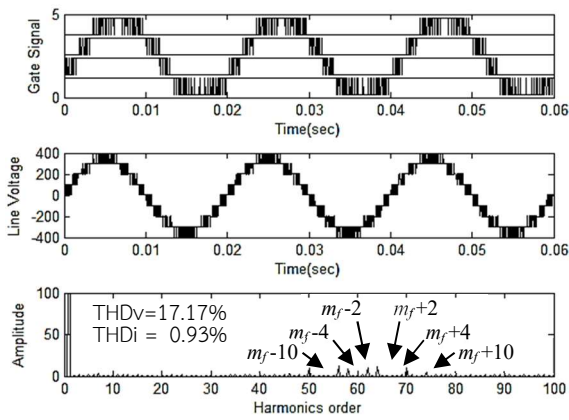
แบบจำลองทางไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองเปรียบเทียบกับสมรรถนะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิด DCI แสดงดังรูปที่ 4



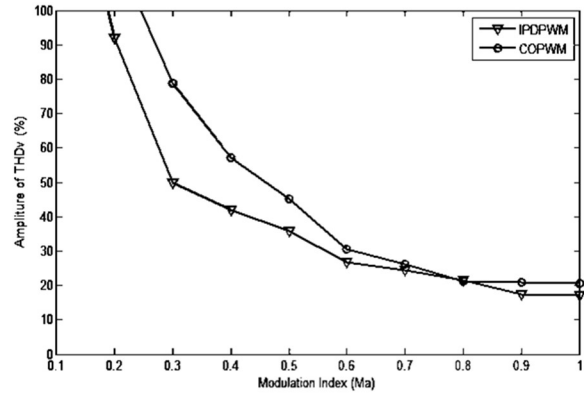
รูปที่ 4 แบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดไดโอดแคลมป์ 3 เฟส



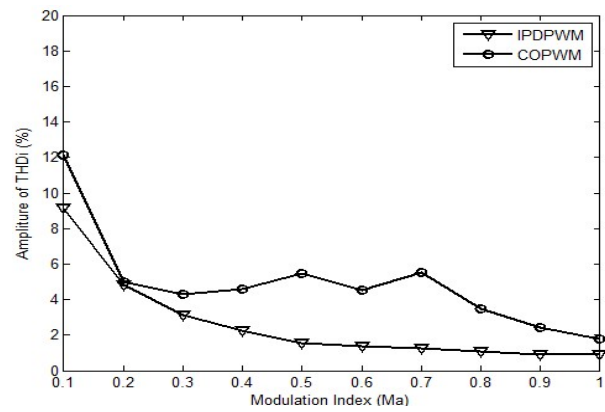
รูปที่ 5 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิค COPWM



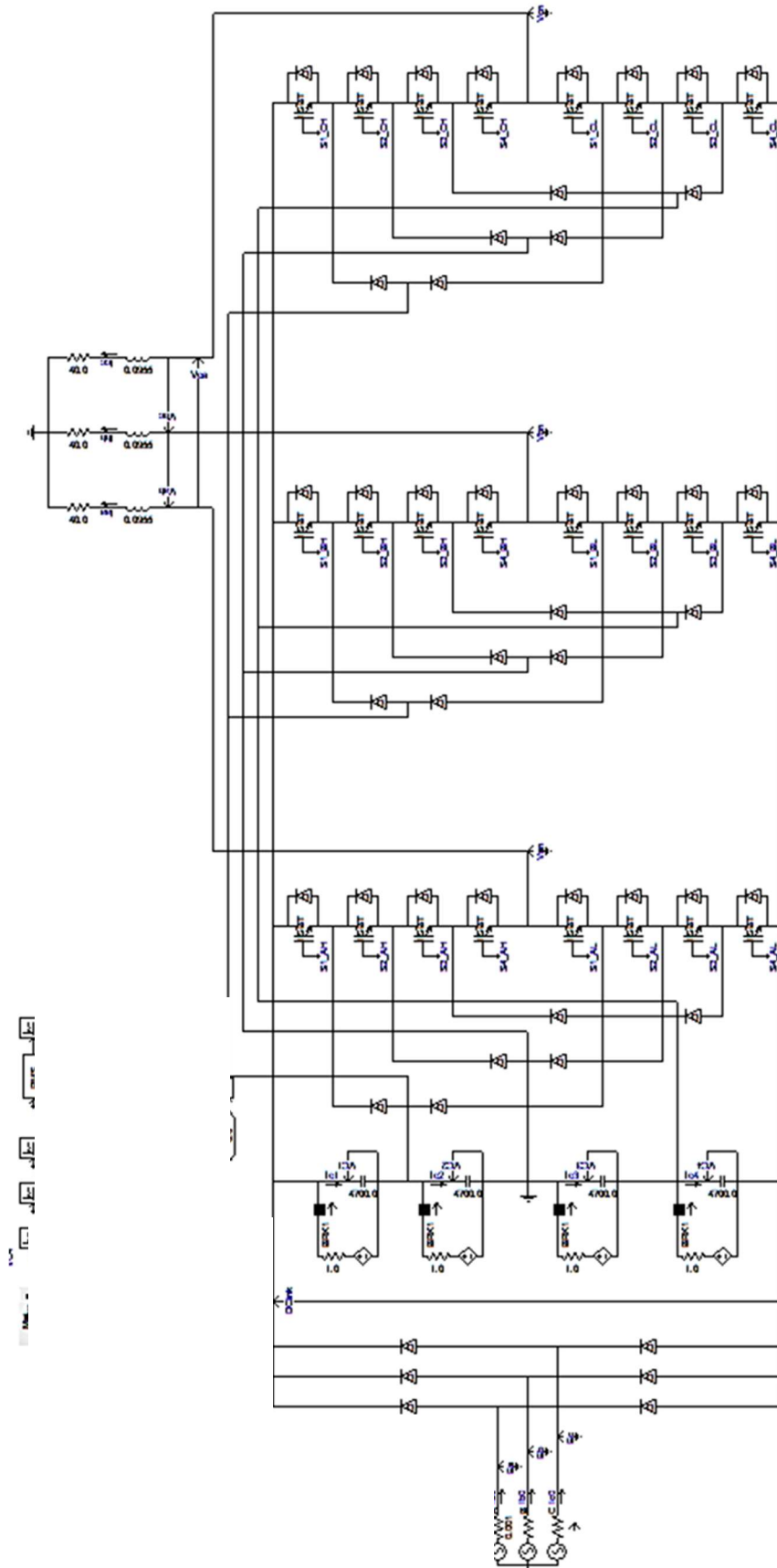
รูปที่ 6 ผลการจำลองอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิค IPD PWM



รูปที่ 7 สรุปผล THDv ที่มอดูเลตค่าต่าง ๆ



รูปที่ 8 สรุปผล THDi ที่มอดูเลตค่าต่าง ๆ



รูปที่ 9 แบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดไดโอดแคลมป์ 3 เฟส

4.1 ผลการจำลองด้านคุณภาพแรงดันด้านโหลด

เมื่อนำผลการจำลองทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ มาทำการคำนวณโดยพิจารณาอาร์มอนิกส์ถึงอันดับที่ 100th รูปที่ 5 ผลการจำลองด้วยเทคนิค COPWM และรูปที่ 6 ผลการจำลองด้วยเทคนิค IPDPWM จากผลการจำลองที่ได้ของอินเวอร์เตอร์ชนิด DCI ซึ่งผลที่จากทั้ง 2 เทคนิคให้ผลคล้ายกันมากมีความเพี้ยนด้านออกของแรงดันต่ำสุดโดยประมาณ 20% หรือใกล้เคียงสัญญาณไซน์มาก เมื่อนำผลการจำลองในทุกค่ามอดูเลตตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 นำมาสรุปรวมพล็อตกราฟเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าเทคนิค IPDPWM ยังคงเป็นเทคนิคที่ดีที่สุดสืบเนื่องจากผลการวิจัยก่อนหน้า [4-6]

4.2 ผลการจำลองด้านคุณภาพกระแสด้านโหลด

กรณีผลการจำลองด้านความเพี้ยนกระแสด้านโหลดของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ ด้วยคุณสมบัติของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์มี dv/dt ต่ำส่งผลดีต่อระบบเนื่องด้วยโหลดที่ทำการจำลองนั้นกำหนดให้เป็นโหลดประเภท RL ทำให้ความเพี้ยนกระแสด้านโหลดต่ำตลอดช่วงการมอดูเลตในทุกช่วง ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งการจำลองวงจรทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดไดโอดแคลมป์ แสดงในรูปที่ 9 ด้วยเทคนิคสัญญาณพีดีบี- บลิวเอ็มที่นำเสนอ

5. สรุป

จากผลการจำลองในแง่ของคุณภาพของแรงดันด้านออกพบว่าอินเวอร์เตอร์ให้ THDv ต่ำสุดโดยประมาณ 20% โดยให้ผลดีใกล้เคียงกันตลอดช่วงการมอดูเลต และด้วยคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ตามที่นำเสนอในบทความข้างต้น แรงดันด้านออกมีความใกล้เคียงสัญญาณมูลฐาน แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นจึงมีความผิดเพี้ยนน้อย ด้านกระแสด้านออกจึงมีความผิดเพี้ยนน้อยมากตามด้วย โดยเฉพาะในช่วงค่ามอดูเลตสูงมีค่า THDi น้อยกว่า 2.00% และเนื่องด้วย dv/dt ต่ำ ทำให้แรงดันตกคร่อมที่สวิตช์กำลังแต่ละตัวมีค่าต่ำ เป็นผลมาจากการนำสวิตช์กำลังหลายตัวมาต่ออนุกรมกันส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นกับสวิตช์กำลังลดต่ำลง จึงส่งผลให้ประหยัดพลังงานมากขึ้น โดยที่อินเวอร์เตอร์ยังคงประสิทธิภาพในการทำงานไว้ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำงาน สิ่งอำนวยความสะดวกในการศึกษาค้นคว้า ข้อมูลวิจัย และขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม- ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับความร่วมมือนักวิจัยระหว่างสถาบัน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Manasa, Balaji Ramakrishna, S. Madhura and H. M. Mohan, "Design and Simulation of Three Phase Five Level and Seven Level Inverter Fed Induction Motor Drive with Two Cascaded H-Bridge Configuration," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEET)*, vol. 1, no. 4, 2012. pp. 25-30.
- [2] Anil D. Matkar and Prasad M. Joshi, "COMPARATIVE STUDY OF PWM TECHNIQUES FOR DIODECLAMPED MULTILEVEL-INVERTER," *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, vol. 3, no. 6, June. 2015, pp. 73-77.
- [3] S.Narendiran and Sarat Kumar Sahoo, "A Single Phase Reduced Device Count Multilevel Inverter Topology Using MCPWM for Renewable Energy Systems," in *First International Conference on Power Engineering Computing and CONTROL (PECCON-2017)*, India, Mar. 2-4, 2017, pp. 244-251.
- [4] S. Ketsakoon, S. Prakrobkit and T. Comedang, "Performance Comparison Diode-clamped and Flying-capacitor in Five-level Inverter with Level-shift Multi-carrier PWM Schemes Technique," in *13th Conference on energy network of Thailand*, May 30-Jun. 2, 2017, pp. 469-473. (in Thai)
- [5] M. Mohan Harin, V. Vanitha and M.Jayakumar, "Comparison of PWM Techniques for a three level Modular Multilevel Inverter," in *First*

International Conference on Power Engineering Computing and CONTROL (PECCON-2017), India, Mar. 2-4, 2017, pp.666-673.

- [6] S. Ketsakoon and S. Polmai. “Comparison Between Phase- and Level-Shifted PWM Schemes for Flying Capacitor Multilevel Inverter,” in *Proceeding of The 2007 ECTI International Conference (ECTI-CON2007), Thailand, May. 9-12, 2007, pp.370-373.*