

การเปรียบเทียบสมรรถนะเทคนิคการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์หลายระดับจาก
ผลกระทบที่มีการฉีดฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิงบนอินเวอร์เตอร์
5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

Performance Comparison of Multi-Level Carrier Signaling Techniques
from the Effect of Third-Order Harmonics Injection in the Reference
Signal on a Five- Level Inverter Flying-Capacitor

สทิติย์พร เกตุสกุล

Satitporn Ketsakoon

สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

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

Email: satitporn123g@gmail.com

Received: April 01, 2022; Revised: June 22, 2022; Accepted: July 01, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะเทคนิคการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์หลายระดับจากผลกระทบที่มีการฉีดฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิงบนอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เทคนิคการที่ดับลิ่วเอ็ม ที่นำมาเปรียบเทียบ คือ ACPO IPD POD และ APOD โดยทดสอบบนอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ขณะจ่าย โหลด ซึ่งการทดสอบจะดำเนินการจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้นำมาคำนวณและแสดงค่า ผลรวมฮาร์โมนิกของแรงดันด้านออกโดยมุ่งศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการจัดเรียงแคเรียร์หลายระดับจากผลกระทบที่มีการฉีด ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 เข้าในสัญญาณอ้างอิง ซึ่งเทคนิคที่ดับลิ่วเอ็มแคเรียร์เลื่อนระดับเฟสตรง ให้ผลรวมฮาร์โมนิกของแรงดัน ต่ำที่ 16.81% และ 14.46% ในการฉีดฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 เข้าในสัญญาณอ้างอิง

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ, ที่ดับลิ่วเอ็ม, ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3

Abstract

This paper present performance comparison of multi-level carrier signaling techniques from the effect of third-order harmonics injection in the reference signal on a five-level inverter flying-capacitor, The PWM techniques to be compared are: ACPO IPD POD and APOD. All of process are simulate with computer program. The result of simulation has shown value of total harmonic distortion output voltage, focus on comparison of multi-level carrier signaling techniques, from the effect of third-order harmonics injection modulation (HIPWM). In-Phase disposition carrier signaling techniques generate a minimum of total harmonic distortion at 16.84%, and 14.46% in third-order harmonics injection modulation.

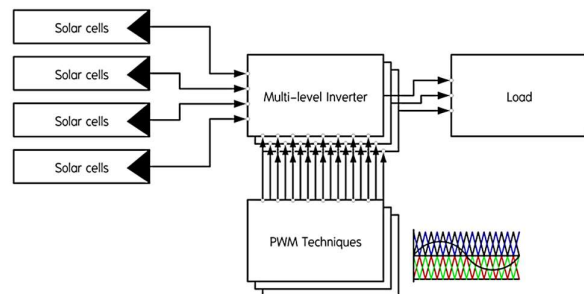
Keywords: Five-level inverter, Pulse width modulation, Third-order harmonics

1. บทนำ

ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งอุปกรณ์แปลงผันพลังงานจึงมีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้งานเพิ่มขึ้น รูปที่ 1 เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์หลายระดับจึงเป็นตัวเลือกในการศึกษาวิจัยในปัจจุบันอย่างต่อเนื่อง ด้วยสมบัติที่ดีหลายประการโดยอินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้ในการศึกษาและวิจัยมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ DCI (Diode clamped inverter) CMI (Cascade multi-cell inverter) หรือ HBC (H-Bridge cell) และ FCI (Flying capacitor inverter) ซึ่งที่ผ่านมา Miao Chang-xin [1] ได้ทำการศึกษาพัฒนาเทคนิคการพิดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแรงดันด้านออกและการรักษาสมดุลของแรงดันที่ ตัวเก็บประจุอย่างต่อเนื่อง ต่อมา Harin.M.Mohan [2] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคการพิดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (3 ระดับ) ด้วยการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการพิดับบลิวเอ็มชนิด PDPWM และ PODPWM ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบว่าเทคนิค PDPWM มีความเพี้ยนของแรงดัน %THDv เท่ากับ 36.00% และ PODPWM เท่ากับ 41.10% จากนั้น S.Narendiran [3] ได้ทำการศึกษาอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยการนำเทคนิค MCPWM (Multi-carrier pluse width modulation) มาทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลการศึกษาด้วยเทคนิค POD (Phase opposition disposition), APOD (Alternate phase opposition disposition) และแบบ CO (Carrier overlapping) โดยทำการทดสอบที่ค่ามอดูเลตต่างๆ ผลที่ได้ทราบว่าเทคนิค CO ให้ผลของความเพี้ยนของแรงดันต่ำกว่าเทคนิคอื่นในช่วงการ มอดูเลตสูงเท่านั้น จากนั้น Wanchai Subsingha [4] ได้นำเทคนิคการฉีดฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 เข้ามาทดสอบในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ โดยทำการเปรียบเทียบผลกระทบบจากการฉีดฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 เข้าไปในสัญญาณอ้างอิง กับเทคนิคการพิดับบลิวเอ็ม PD POD และ APOD ซึ่งที่ได้คือเทคนิค PD ให้ผลด้าน THDv ต่ำที่สุด จากนั้น Marcos Vinicius Bressan [5] ทำการศึกษาการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับประเภทฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FC

Inverter) เปรียบเทียบการทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์แบบผสมผสานสวิตช์กำลัง (SMC) ซึ่งทั้งสองแบบทำการศึกษาเกี่ยวกับความถี่การสวิตช์กำลังที่ 2 kHz และ 4 kHz ผลการศึกษาทำให้ทราบว่าความถี่การสวิตช์กำลังสูงจะให้ผลดีกว่าในทุกช่วงการมอดูเลต และ Omar Bouamrane [6] ได้ทำการศึกษา FCMLI (Flying capacitor multilevel inverter) โดยศึกษารูปแบบการควบคุมสัญญาณขับสวิตช์กำลังเพื่อควบคุมการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์โดยการกำหนดรูปแบบล่งหน้า โดยนำเทคนิคในการควบคุมสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และ 5 ระดับมาประยุกต์ใช้ในอินเวอร์เตอร์ 17 ระดับ ผลการวิจัยด้านสเปกตรัมฮาร์โมนิกต่ำมากเนื่องด้วยจำนวนระดับของแรงดันใกล้เคียงสัญญาณมูลฐาน

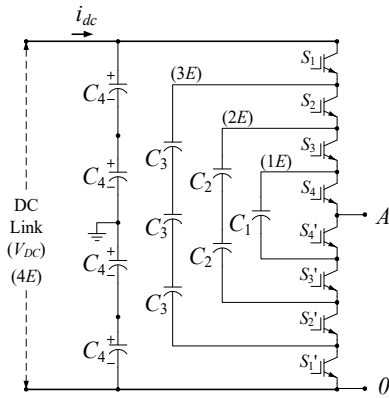
ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้า [7] ทำให้ทราบว่าเทคนิค LSPWM มีจุดที่ต้องปรับปรุงด้านการเปลี่ยนการทำงานของสวิตช์กำลังเพื่อรักษาระดับพลังงานของตัวเก็บประจุ (ฟลายอิงคาปาซิเตอร์) ผู้วิจัยจึงได้ทำการดัดแปลงเทคนิคของ COPWM [7] แกะไขเป็นเทคนิค APCO ที่ผู้วิจัยนำเสนอเป็นการจัดเรียงสัญญาณให้แบบเลื่อนระดับแต่ทับซ้อนสัญญาณแคเรียร์ร่วมกับการกลับเฟสสัญญาณให้มีลักษณะโดยรวมของสัญญาณแคเรียร์คล้ายกันกับเทคนิคการเลื่อนเฟสตามข้างต้นซึ่งผู้วิจัยคาดหวังผลด้านการสวิตช์กำลังเฉลี่ยและผล THDv เพื่อนำมาการจำลองกับอินเวอร์เตอร์ที่ได้มาเปรียบเทียบผลร่วมกับเทคนิค LSPWM แบบต่างๆ รวมไปถึงนำเทคนิคการฉีดฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิงมารวมในการทดสอบเพื่อดูแนวโน้มผลที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการทำงานโดยรวมของระบบ

2. โครงสร้างฟลายอิงคาปาซิเตอร์อินเวอร์เตอร์

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ หรือเรียกว่า คาปาซิเตอร์แคลมป์ แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วน คือ ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์สวิตช์กำลัง โดยตัวเก็บประจุขนาดสุดเรียกว่า คอมมอนดีซีลิงค์เป็นตัวสะสมพลังงาน ขณะที่ตัวเก็บประจุตัวอื่นๆ เรียกว่า ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ เป็นตัวสร้างแรงดันระดับต่างกัน โดยแรงดันที่ได้ในแต่ละระดับ เกิดจากผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์แต่ละตัว ที่ต่ออนุกรมกันตามสถานะการสวิตช์นั้น ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ฟลายอิงค์ในแต่ละตัว คือ $1E$ โดยอินเวอร์เตอร์ที่ศึกษาในบทความนี้เป็นอินเวอร์เตอร์ประเภท 5 ระดับ ($m = 5$) ซึ่งสมการของวงจรสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2 อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 1 กิ่ง

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

$$C = \frac{(m - 1) \times (m - 2)}{2} \quad (2)$$

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

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

หากเลือกการขับเคลื่อนสวิตช์กำลังจำนวน 3 ตัวจากทั้งหมด 4 ตัว แรงดันทางด้านออกจะได้เท่ากับ 3 ใน 4 ของแรงดันดีซีลิงค์ หากเลือกการขับเคลื่อนสวิตช์กำลังจำนวน 1 ตัวจากทั้งหมด 4 ตัว แรงดันทางด้านออกจะได้เท่ากับ 1 ใน 4 ของแรงดันดีซีลิงค์ โดยรูปแบบการสวิตช์กำลังสามารถทำได้หลายรูปแบบ แล้วแต่ลักษณะการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์ ซึ่งรูปแบบการสวิตช์กำลังจะทำให้เกิดแรงดันด้านออกที่มีคุณภาพสูงหรือต่ำได้ และยังมีผลต่อการรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ (ฟลายอิงคาปาซิเตอร์) อีกด้วย ตารางที่ 1 แสดงรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 1 รูปแบบการสวิตช์กำลังและการสร้างแรงดันอินเวอร์เตอร์

สวิตช์กำลัง				สมการแรงดันด้านออก	แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์
S1	S2	S3	S4		
1	1	1	1	4E	4E (DC-link)
1	1	1	0	4E-1E	3E
1	1	0	1	4E-2E+1E	
1	0	1	1	4E-3E+2E	
0	1	1	1	3E	
1	1	0	0	4E-2E	2E
1	0	0	1	4E-3E+1E	
0	0	1	1	2E	
0	1	1	0	3E-1E	
1	0	1	0	4E-3E+2E-1E	
0	1	0	1	3E-2E+1E	
1	0	0	0	4E-3E	1E
0	1	0	0	3E-2E	
0	0	1	0	2E-1E	
0	0	0	1	1E	
0	0	0	0	0	0

หากต้องการเลือกกระดบแรงดันเท่ากับดีซีลิงค์ จะต้องเลือกการขับเคลื่อนสวิตช์กำลัง S_1 ถึง S_4 รวมทั้งหมด 4 ตัว (ด้าน High) หากต้องการแรงดันทางด้านออกจะได้เท่ากับ 1 ใน 4 ของแรงดันดีซีลิงค์ จะต้องเลือกการขับเคลื่อนสวิตช์กำลัง S_4 เพียงตัวเดียวเท่านั้น ซึ่งอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีข้อจำกัดในการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์หรือรูปแบบการสวิตช์กำลังเฉลี่ยทำได้ยาก เนื่องจากรูปแบบการสวิตช์ไม่ยืดหยุ่นจึงทำให้ส่งผลต่อการรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุด้วย

3. เทคนิคพีดับลิแวม

เทคนิคพีดับลิแวมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นสามารถทำได้ โดยอาศัยพื้นฐานการสร้างสัญญาณพีดับลิแวมของวงจรถับแบบ 2 ระดับ เพียงแต่จะเพิ่มจำนวนของแคเรียร์ขึ้นตามจำนวนของสวิตช์กำลัง สำหรับในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ จะใช้สวิตช์กำลังจำนวน 4 ตัว จึงใช้สัญญาณแคเรียร์จำนวน 4 แคเรียร์ ในการมอดูเลตเพื่อสร้างสัญญาณเกตในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างการสร้างสัญญาณเกตของเทคนิคการพีดับลิแวมแบบเลื่อนระดับหลายแคเรียร์ที่ใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบสมการที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการพีดับลิแวม

จากข้างต้นความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ส่งผลโดยตรงต่อการปรากฏของประมาณฮาร์มอนิกในแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์โดยจะปรากฏขึ้นรอบๆ m_f

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

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

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

$$m_f = \frac{f_{cr}}{f_m} \quad (7)$$

- 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

ในการสร้างสัญญาณ PWM แบบฮาร์มอนิกนั้น จะพิจารณาในสัญญาณอ้างอิงซึ่งความถี่ของสัญญาณอ้างอิงต้องเหมือนกับความถี่เอาต์พุตที่ต้องการ และสัญญาณอ้างอิงประกอบไปด้วยองค์ประกอบความถี่พื้นฐานและความถี่ฮาร์มอนิกตามสมการต่อไปนี้ [4]

$$v_{mA}(t) = V_m \{ \sin(\omega_0 t + 0^\circ) + k \cdot \sin(3\omega_0 t) \} \quad (8)$$

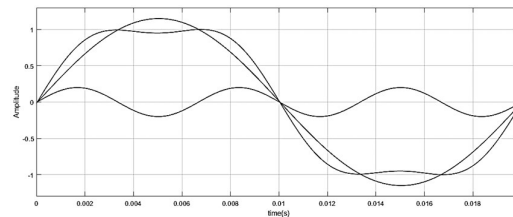
$$v_{mB}(t) = V_m \{ \sin(\omega_0 t + 120^\circ) + k \cdot \sin(3\omega_0 t) \} \quad (9)$$

$$v_{mC}(t) = V_m \{ \sin(\omega_0 t + 240^\circ) + k \cdot \sin(3\omega_0 t) \} \quad (10)$$

$$v_{mk}(t) = k \cdot \sin(3\omega_0 t) \quad (11)$$

เมื่อ $v_{mA}(t)$ คือ แรงดันสัญญาณอ้างอิง เฟส A, V
 $v_{mB}(t)$ คือ แรงดันสัญญาณอ้างอิง เฟส B, V
 $v_{mC}(t)$ คือ แรงดันสัญญาณอ้างอิง เฟส C, V
 $v_{mk}(t)$ คือ แรงดันสัญญาณฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, V
 V_m คือ แรงดันยอดคลื่นของสัญญาณอ้างอิง, V
 ω_0 คือ ความถี่เชิงมุม, rad
 k คือ อัตราส่วนแรงดันยอดคลื่นฮาร์มอนิกอันดับที่ 3

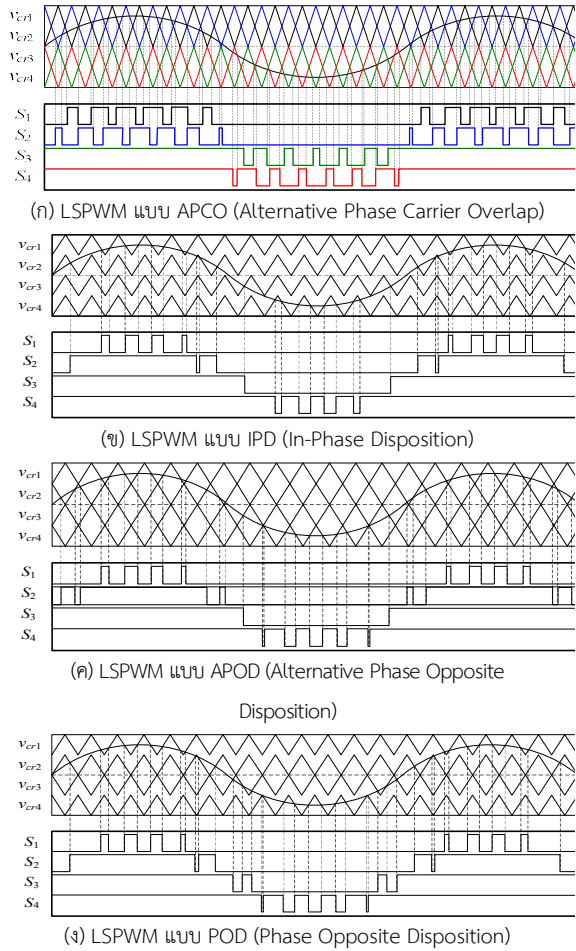
แรงดันยอดคลื่นของ k ระหว่าง 0.15 และ 0.2 ซึ่งผลที่ได้ของสัญญาณอ้างอิงที่ได้แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลจากการฉีดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 เข้าในสัญญาณอ้างอิง [4]

ตารางที่ 2 กำหนดการทำงานของอินเวอร์เตอร์

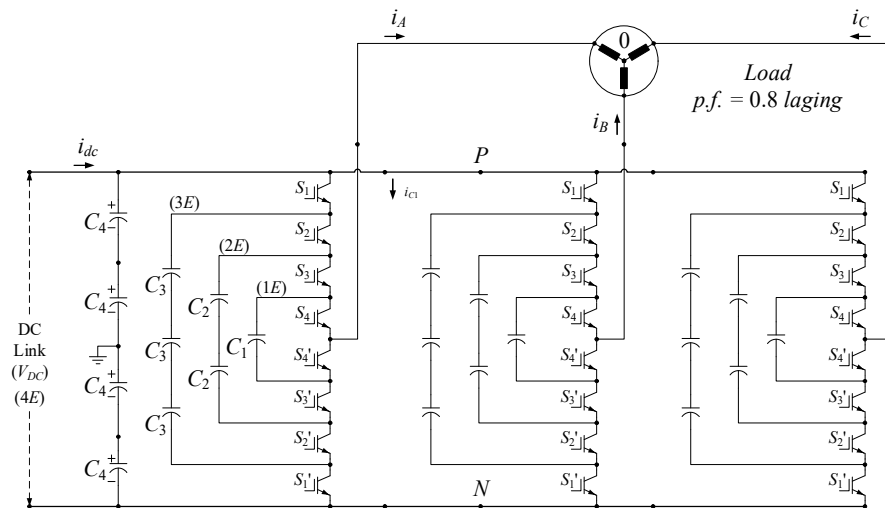
พารามิเตอร์	ปริมาณ
แรงดันดีซีลิงค์	400 V
ความถี่ของสัญญาณด้านออก	50 Hz
อัตราส่วนความถี่แคเรียร์ต่อมูลฐาน	60
ความถี่สัญญาณแคเรียร์	3 kHz
การมอดูเลต	1.0
ตัวเก็บประจุ	4,700 μ F
โหลดตัวต้านทานต่อเฟส	40 Ω
โหลดตัวเหนี่ยวนำต่อเฟส	0.0955 H
ตัวประกอบกำลัง	0.8 lagging



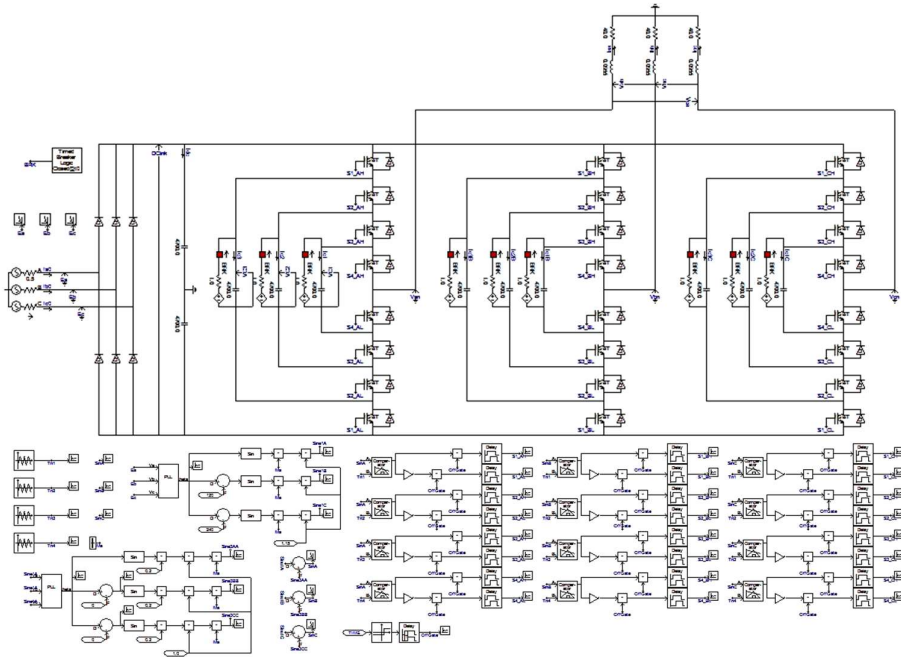
4. ผลการจำลอง

ในการจำลองทางไฟฟ้าได้ใช้แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ตามที่แสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ภาพจากโปรแกรมจำลอง กำหนดขนาดของโหลดในการจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 เทคนิคการมอดูเลชันที่ใช้ในบทความนี้ คือ APCO IPD APOD และ POD [2] จะขอเรียกว่าเทคนิค LSPWM ในการจำลองผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบต่างๆ ตามข้างต้น ในการจำลองปรับค่านมอดูเลตสัญญาณตั้งแต่ $0.1 \leq m_o \leq 1.0$ ในแต่ละเทคนิคการพีดับบลิวเอ็ม ทำการบันทึกผลการจำลอง รูปที่ 7 และรูปที่ 8 เป็นผลการจำลองสัญญาณขับเคลื่อนทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ จากนั้นนำผลจากการจำลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ความเพี้ยนของแรงดันทางด้านออกด้วยการคำนวณ THDv โดยพิจารณาฮาร์มอนิกถึงอันดับที่ 100^{th} รูปที่ 9 (ผลจากเทคนิค LSPWM) ในส่วนของ HIPWM เป็นการจำลองโดยเพิ่มเทคนิคการฉีดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิง และรูปที่ 10 (ผลจากเทคนิค HIPWM) ในการจำลองปรับค่านมอดูเลตสัญญาณตั้งแต่ $0.1 \leq m_o \leq 1.0$ ในแต่ละเทคนิคการพีดับบลิวเอ็มเช่นกัน

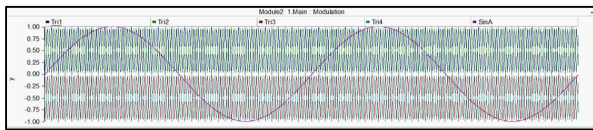
รูปที่ 4 ตัวอย่างพีดับบลิวเอ็มชนิดเลื่อนระดับแบบหลายแคเรียร์



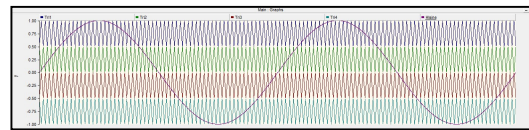
รูปที่ 5 แบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์



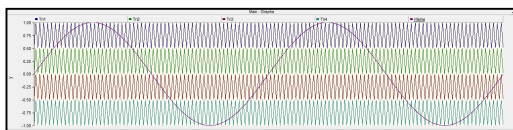
รูปที่ 6 ภาพจากโปรแกรมจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์



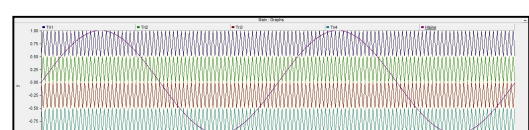
(ก) LSPWM แบบ APCO (Alternative Phase Carrier Overlap)



(ค) LSPWM แบบ APOD (Alternative Phase Opposite Disposition)

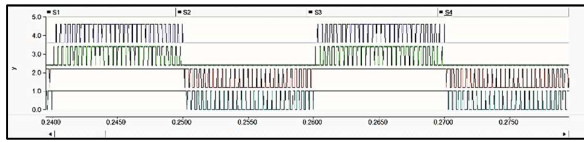
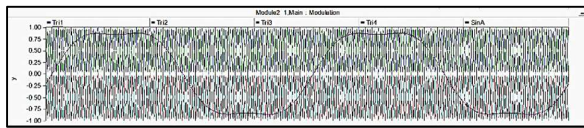


(ข) LSPWM แบบ IPD (In-Phase Disposition)

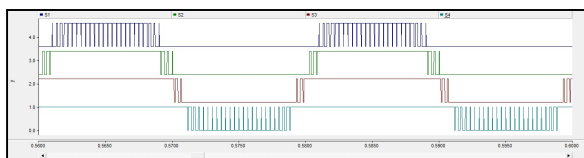
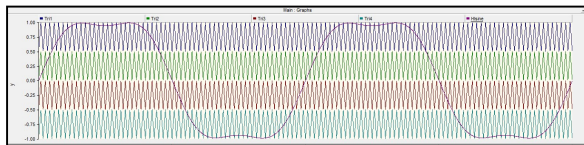


(ง) LSPWM แบบ POD (Phase Opposite Disposition)

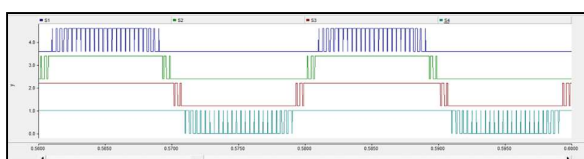
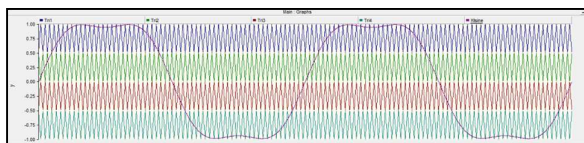
รูปที่ 7 ผลจำลองการสัญญาณขับเคลื่อนด้วยเทคนิค LSPWM



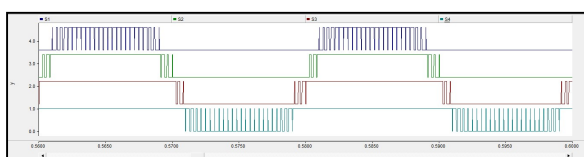
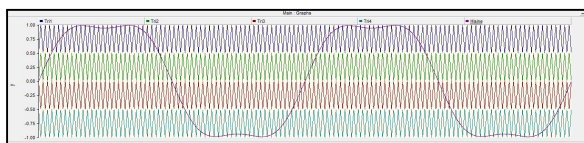
(ก) HIPWM แบบ APCO (Alternative Phase Carrier Overlap)



(ข) HIPWM แบบ IPD (In-Phase Disposition)

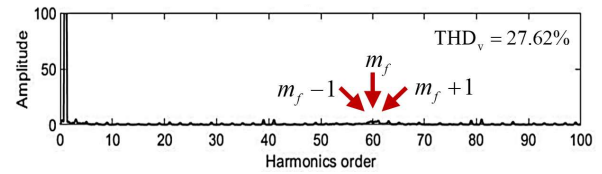
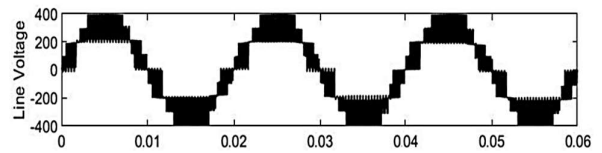


(ค) LSPWM แบบ APOD (Alternative Phase Opposite Disposition)

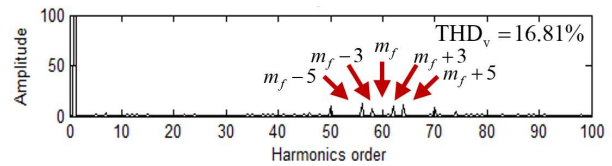
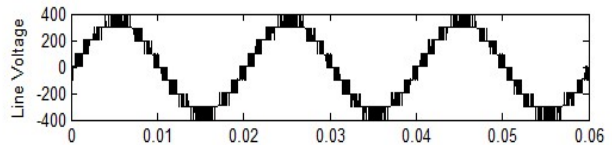


(ง) LSPWM แบบ POD (Phase Opposite Disposition)

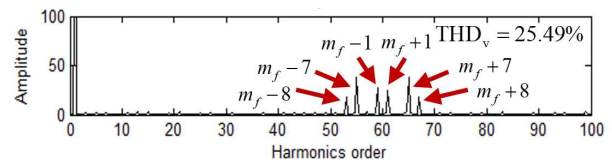
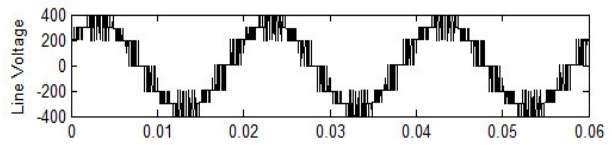
รูปที่ 8 ผลจำลองการสัญญาณขับเคลื่อนด้วยเทคนิค LSPWM



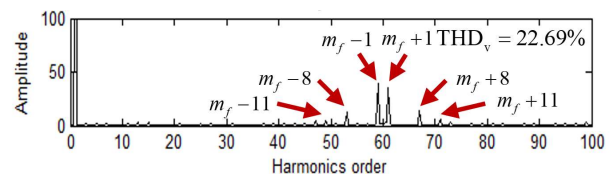
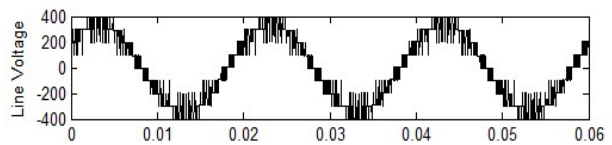
(ก) LSPWM แบบ APCO (Alternative Phase Carrier Overlap)



(ข) LSPWM แบบ IPD (In-Phase Disposition)

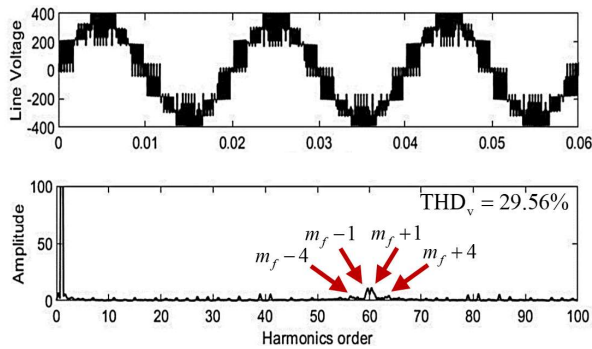


(ค) LSPWM แบบ APOD (Alternative Phase Opposite Disposition)

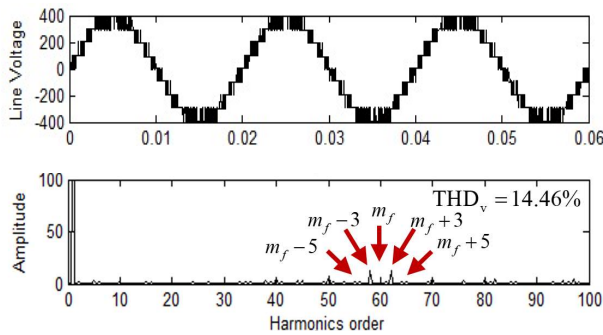


(ง) LSPWM แบบ POD (Phase Opposite Disposition)

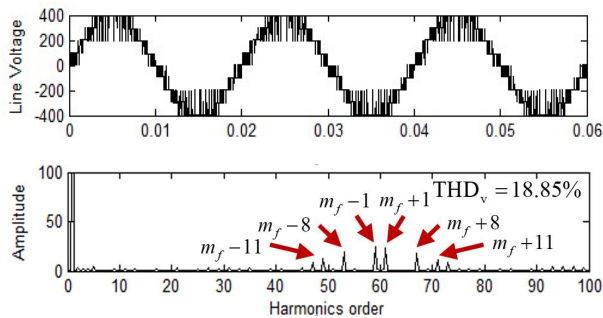
รูปที่ 9 ผลจำลองสเปกตรัมฮาร์มอนิกจากเทคนิค LSPWM



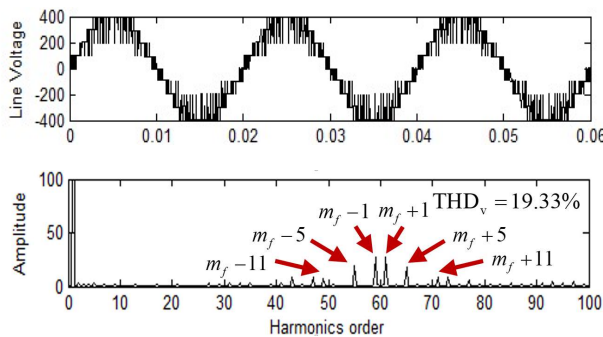
(ก) HIPWM แบบ APCO (Alternative Phase Carrier Overlap)



(ข) HIPWM แบบ IPD (In-Phase Disposition)



(ค) HIPWM แบบ APOD (Alternative Phase Opposite Disposition)



(ง) HIPWM แบบ POD (Phase Opposite Disposition)

รูปที่ 10 ผลจำลองสเปกตรัมฮาร์มอนิกจากเทคนิค HIPWM

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบ THDv ของแรงดันด้านออก

Type of PWM	LSPWM (Fundamental)	HIPWM (Third Harmonic)
APCO	27.62%	29.56%
IPD	16.81%	14.46%
APOD	25.49%	18.85%
POD	22.69%	19.33%

5. สรุป

จากตารางที่ 3 ผลการจำลองเปรียบเทียบการจัดเรียงสัญญาณแคเรียร์หลายระดับ (APCO, IPD, APOD และ POD) ร่วมกับผลกระทบที่มีการฉีดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิง บนอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ อินเวอร์เตอร์ในสถานะจ่ายโหลด 3 HP ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง พบว่าการฉีดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิง ส่งผลดีในแง่ของ %THDv ของแรงดันด้านออกระหว่างสาย ดีขึ้นในหลายเทคนิค PWM โดยต่ำที่สุดที่ 14.46% (IPD)

เทคนิค APCO ที่ผู้วิจัยนำเสนอให้ผล THDv ภาพรวมแยกลงที่ 27.62% และลดลงอีก 2% หากทำงานร่วมกับเทคนิคการฉีดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิง ในด้านการรักษาระดับพลังงานดีขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากอัตราการเฉลี่ยสวิตช์กำลัง S1 S2 มีการทำงานเฉลี่ยทำให้ตัวเก็บประจุ C3 C4 มีอัตราการคายประจุสูงโดยเฉลี่ยและ S3 S4 มีการทำงานเฉลี่ยทำให้ตัวเก็บประจุ C1 C2 มีอัตราการอัดประจุสูงโดยเฉลี่ย

ดังนั้นเทคนิค LSPWM แบบ IPD ให้ผลดีที่สอดคล้องตลอดช่วงการมอดูเลต ในแง่ของ THDv และให้ผลดีเพิ่มขึ้นอีก 2% ด้วยการเพิ่มเทคนิคการฉีดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ในสัญญาณอ้างอิง แต่ยังคงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการเฉลี่ยการทำงานของสวิตช์กำลัง เพื่อให้สามารถคงสภาพการสมดุลระดับพลังงานที่ตัวเก็บประจุ เช่น เทคนิคการหมุนวนสัญญาณเกต (Plus rotation)

เอกสารอ้างอิง

[1] M.Chang-xin, S.Li-ping, W.Tai-xu and C.Cheng-bao, "Flying capacitor multilevel inverters with novel PWM method" *Research Journal of Elsevier Ltd., Procedia Earth and Planetary Science 1*, pp. 1554-1560, 2009.

- [2] M. Mohan Harina V.Vanitha and M.Jayakumar, "Comparison of PWM Techniques for a three level Modular Multilevel Inverter" *Research Journal of Elsevier Ltd., Energy Procedia 117*, pp. 666-673, March. 2017.
- [3] S. Narendiran and S. Kumar Sahoo, "A Single Phase Reduced Device Count Multilevel Inverter Topology Using MCPWM for Renewable Energy Systems" *Research Journal of Elsevier Ltd., Energy Procedia 117*, pp. 244-251, March. 2017.
- [4] W.Subsingha, "A Comparative study of sinusoidal PWM and third harmonic injected PWM reference signal on five level diode clamp inverter," *Research Journal of Elsevier Ltd., Energy Procedia 89 (2016)* , pp.137 – 148, 2016.
- [5] M.Vinicius Bressan, C.Rech and A.Luiz Batschauer, "Design of flying capacitors for n-level FC and n-level SMC," *Research Journal of Elsevier Ltd., Electrical Power and Energy Systems 113*, pp.220-228, 2019.
- [6] O.Bouamrane, T.Khalili, I.Tyass, M.Rafik, A.Raihani, L.Bahati and B.Benhala, "Flying capacitor multilevel inverter: architecture, control and active balancing" *International Conference on Energy and Green Computing ICEGC'2021, 2022*, pp.1 – 7.
- [7] S. Ketsakoon, S. Prakobkit and C. Tongchoi, " 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" *The Journal of Thepsatri ITECH*, vol. 14, no.1, pp.17-24, 2020 (in Thai).