

อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ

ไพโรจน์ ทองประศรี^{1*}
pairote@eng.src.ku.ac.th^{1*}

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

Received	: 8-Aug-2019
Revised	: 18-Sep-2019
Accepted	: 17-Oct-2019

บทคัดย่อ

การออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ดีต้องให้รูปคลื่นแรงดันด้านออกมีระดับขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ ผลที่เกิดขึ้นความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีระดับสูงเมื่อถูกควบคุมด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ รูปคลื่นแรงดันออกที่ระดับขั้นบันไดสูงจะอยู่บนกรุปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ ส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูง บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ควบคุมด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์แบบปรับตำแหน่งเวกเตอร์ เพื่อให้แรงดันระดับขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ เวกเตอร์ถูกปรับจากแบบดั้งเดิม 18 ตำแหน่ง ตำแหน่งของเวกเตอร์ทำให้ทราบแรงดันดีซีลิงค์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้สำหรับออกแบบ โดยมีตำแหน่งมุมของการสวิตช์ทั้งหมด 54 สภาวะ ผลการทดลองเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ที่นำเสนอขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว พิกัด $\frac{1}{4}$ แรงม้า ผลเกิดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสอยู่ที่ 4.1% และ 1.1% ตามลำดับ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม สเปซเวกเตอร์ แรงดันขั้น รูปคลื่นไซน์

3-phase 19-level T-type Multilevel Inverter Based Low Total Harmonic Distortion

Pairote Thongprasri^{1*}
pairote@eng.src.ku.ac.th^{1*}

^{1*} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University
Sriracha Campus

Received	: 8-Aug-2019
Revised	: 18-Sep-2019
Accepted	: 17-Oct-2019

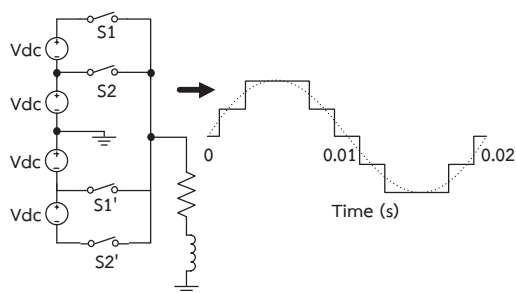
Abstract

A good multilevel inverter design, the output voltage waveform must be a staircase waveform that the step voltage is on the sinusoidal waveform referenced at all levels. As a result is a low total harmonic distortion. Multilevel inverter with high levels is controlled by a space vector method. The output waveform at the high staircase level is outside the sinusoidal waveform referenced resulting in a high harmonic distortion. This paper presents a 3-phase 19-level T-type multilevel inverter which is controlled by adjusting vector position of a space vector method. In order to control the step voltage to be on the sinusoidal waveform referenced at all levels; the vector has been adjusted 18 positions from the original position. The position of the vector indicates the DC link voltage of the 3-phase inverter used for the design which has the position of the switching angle of all 54 switches. The experimental results, a 3-phase induction motor with 4 poles rated ¼ HP is driven by the proposed 3-phase 19-level T-type multilevel inverter. The multilevel inverter produces the total harmonic distortion of the voltage and current at 4.1% และ 1.1%, respectively.

Keywords: multilevel inverter, total harmonic distortion, space vector, step voltage and sinusoidal waveform

1. บทนำ

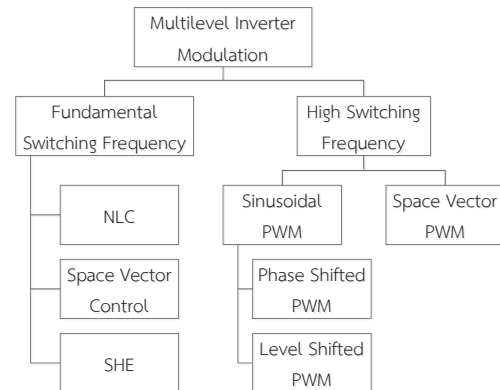
อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter : MLI) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถสร้างให้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงได้ สัญญาณด้านนอกใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonics Distortion : THD) ไม่สูงมาก หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับคือ การควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงกระแสตรงหรือแรงดันดีซีลิงค์ (DC-link voltage : V_{dc}) เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นขั้นบันไดตามสัญญาณรูปคลื่นไซน์ เปรียบเทียบควบคุมด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตัวอย่างพื้นฐานโครงสร้างและสัญญาณด้านออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ 1 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างและสัญญาณด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ 5 ระดับ 1 เฟส [1]

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้รับความนิยมมีหลายแบบ [2] ได้แก่ แบบเอชบริดจ์ (H-bridge) แบบไดโอดคลัมป์ (diode-clamped) แบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (flying capacitor) และแบบที (T-type) เป็นต้น การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ และความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม การสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์สามารถแบ่งตามความถี่ของการสวิตช์ [3] คือ ความถี่การสวิตช์แบบมูลฐาน (fundamental switching

frequency) และความถี่การสวิตช์แบบสูง (high switching frequency) โดยสามารถแบ่งวิธีควบคุมการสวิตช์ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีการควบคุมการสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ [2]

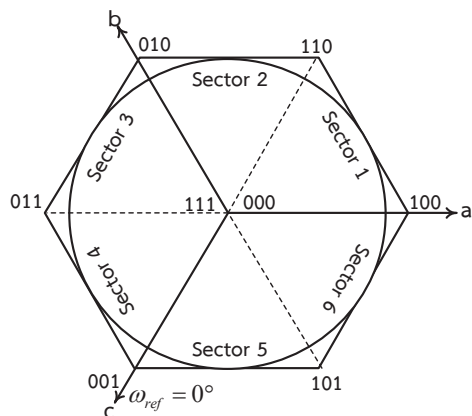
พิจารณาเฉพาะการสวิตช์ความถี่แบบมูลฐาน ซึ่งมีข้อดีคือมีค่าความสูญเสียของการสวิตช์ต่ำ [4] การสวิตช์ความถี่แบบมูลฐานในรูปที่ 2 แบ่งได้ 3 แบบ คือแบบ nearest level switching control (NLC) มีข้อดีคือสัญญาณด้านออกขั้นบันไดทุกระดับอยู่บนรูปคลื่นไซน์ เปรียบเทียบ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ ข้อจำกัดคือไม่สามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด 3 เฟสได้ เนื่องจากโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบต้องสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงกระแสตรงพร้อมกันในทุกสถานะของการสวิตช์ [5] แบบ space vector switching control (SVC) มีข้อดีคือจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์น้อยกว่าแบบ NLC แต่ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูงกว่าแบบ NLC [6] และแบบ selective harmonic elimination (SHE) เป็นวิธีการที่เลือกกำจัดฮาร์มอนิกที่ต้องการ แต่มีวิธีการที่ซับซ้อนต้องใช้สมการแบบไม่เชิงเส้นในการวิเคราะห์ [7]

อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที เป็นหนึ่งในโครงสร้างที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้กับ

แรงดันไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อควบคุมความถี่การสวิตช์แบบมูลฐาน มีค่าการสูญเสียในการสวิตช์ต่ำ [8] การสวิตช์แบบ SVC สัญญาณด้านออกแบบขั้นบันไดของอินเวอร์เตอร์ที่ระดับสูงกว่า 13 ระดับ จะเริ่มไม่อยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูง บทความนี้นำเสนอโครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส การออกแบบมีความสัมพันธ์กับการควบคุมการสวิตช์ให้ได้สัญญาณด้านออกแบบขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ วิธีการควบคุมการสวิตช์ประยุกต์มาจากการสวิตช์แบบ SVC ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมต่ำ

2. หลักการควบคุมการสวิตช์แบบ SVC

พื้นฐานการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบที่ 3 ระดับ 3 เฟส ควบคุมการสวิตช์แบบ SVC ดังแสดงในรูปที่ 3

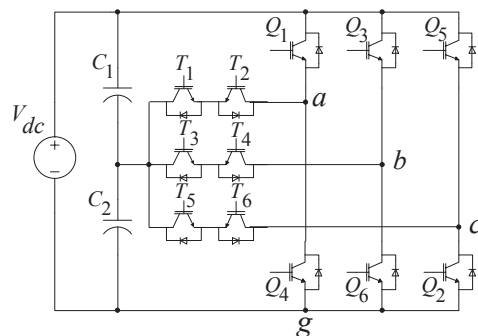


รูปที่ 3 แผนภาพ SVC ควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

ตำแหน่งบนเซกเตอร์หกเหลี่ยม คือจำนวนสถานะของการสวิตช์ (switching state : ss) ใน 1 วงจักร มีจำนวนทั้งหมด 6 สถานะสามารถหาได้จากสมการที่ (1) วงกลมในเซกเตอร์ 6 เหลี่ยม คือขนาดแรงดันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ

$$ss = 3(m - 1) \quad (1)$$

โดยที่ m คือจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



รูปที่ 4 อินเวอร์เตอร์แบบที่ 3 ระดับ 3 เฟส [9]

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบที่ 3 ระดับ 3 เฟส ดังรูปที่ 4 สามารถหาแรงดันระหว่างสายและแรงดันเฟสได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ [10]

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่

V_{ab} คือแรงดันระหว่างสาย a และ b
 V_{bc} คือแรงดันระหว่างสาย b และ c
 V_{ca} คือแรงดันระหว่างสาย c และ a
 V_{an} คือแรงดันเฟส a เทียบกับ n
 V_{bn} คือแรงดันเฟส b เทียบกับ n
 V_{cn} คือแรงดันเฟส c เทียบกับ n

V_{ag} คือแรงดันชั่ว a เทียบกับ g

V_{bg} คือแรงดันชั่ว b เทียบกับ g

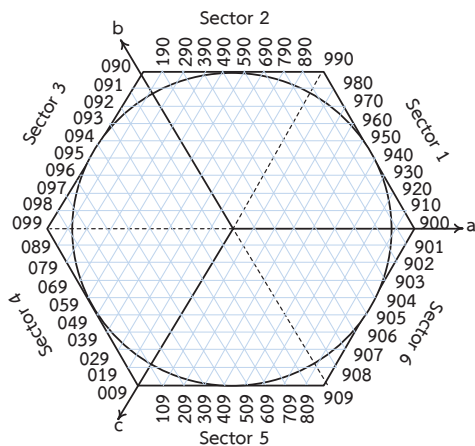
V_{cg} คือแรงดันชั่ว c เทียบกับ g

เลข 3 ตัวที่ตำแหน่งต่างๆ บนเซกเตอร์ คือแรงดันดีซีลิงค์ต่อหน่วยหรือแรงดันต่อหน่วย ที่ชั่ว a, b, c เทียบกับจุด g เช่น ตำแหน่ง เซกเตอร์ที่ 180 องศา คือ $V(110)$ ดังนั้น

$$V_{ag} = 1V_{dc}, V_{bg} = 1V_{dc} \text{ และ } V_{cg} = 0V_{dc}$$

หลักการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ชนิด 3 เฟส ให้มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ ต้องกำหนดตำแหน่งต่างๆ บนเซกเตอร์ให้อยู่ใกล้กับวงกลมมากที่สุด ผลที่ได้คือแรงดันด้านออกขึ้นบันไดของอินเวอร์เตอร์จะอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ

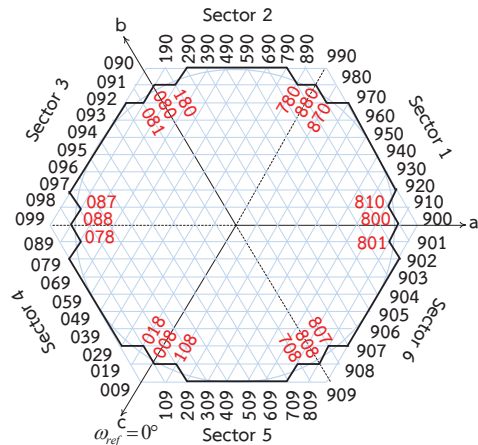
แผนภาพ SVC ในรูปที่ 5 สำหรับใช้ควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 19 ระดับ จำนวนสภาวะของการสวิตช์ มีค่าเท่ากับ ตำแหน่งบนเซกเตอร์หกเหลี่ยมใน 1 วัฏจักร หาได้จากสมการที่ (1) มีจำนวนทั้งหมด 54 สภาวะ



รูปที่ 5 แผนภาพ SVC ควบคุมอินเวอร์เตอร์ 19 ระดับ

เพื่อที่จะออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ให้มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ ตำแหน่งเซกเตอร์ที่ต้องการทำการเปลี่ยนเพื่อให้อยู่ใกล้วงกลมมากที่สุด

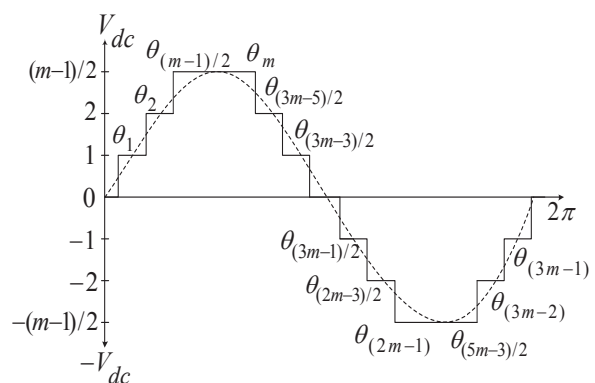
สามารถเปลี่ยนตำแหน่งเซกเตอร์ได้ 18 เซกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยประกอบไปด้วยเซกเตอร์ $V(008) V(108) V(708) V(808) V(807) V(801) V(800) V(810) V(870) V(880) V(780) V(180) V(080) V(081) V(087) V(088) V(078)$ และ $V(018)$



รูปที่ 6 แผนภาพ SVC สำหรับอินเวอร์เตอร์ 19 ระดับ เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งเซกเตอร์

ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งเซกเตอร์ทำให้ทราบแรงดันดีซีลิงค์หรือแรงดันชั่วของอินเวอร์เตอร์ โดยจะถูกนำไปออกแบบในลำดับถัดไป

3. โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส



รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันขึ้นบันได m ระดับ

ระดับแรงดันขั้นบันไดของสัญญาณด้าน
ออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสัมพันธ์กับมุม
ของการสวิตช์ (θ_i) โดยรูปที่ 7 แสดงสัญญาณ
ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ m ระดับ โดยมุมของ
การสวิตช์ในช่วง $0-2\pi$ มีค่า $\theta_1, \theta_2, \theta_3,$
 $\dots \theta_{3(m-1)}$

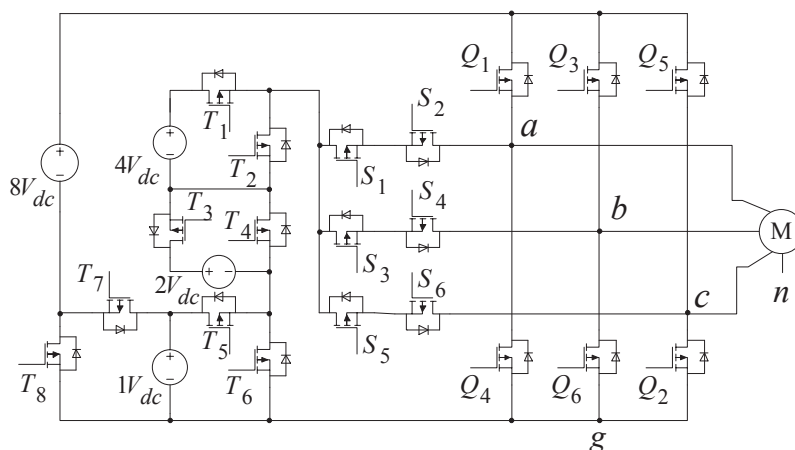
โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่
19 ระดับ 3 เฟส ที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 8
ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคืออินเวอร์เตอร์
3 เฟส ($Q_1 - Q_6$) แต่ละกิ่งจะถูกต่อกับสวิตช์
แบบ 2 ทิศทาง ($S_1 - S_6$) มีลักษณะคล้ายรูปตัว
T ถูกหมุนไป 90 องศา โครงสร้างสวิตช์ 2
ทิศทางจะมีไดโอดบล็อกกิ้งสำหรับควบคุมทิศ

ทางการไหลของกระแส ส่วนที่สองคือส่วน
ควบคุมแรงดันดีซีลิงค์ ($T_1 - T_8$) สำหรับจ่าย
ให้กับอินเวอร์เตอร์แบบที่ ในช่วงคาบเวลา $0-2\pi$
จะมีสภาวะการสวิตช์มีทั้งหมด 54 สภาวะ
ดังแสดงในภาคผนวกรูปที่ 1(ผ)

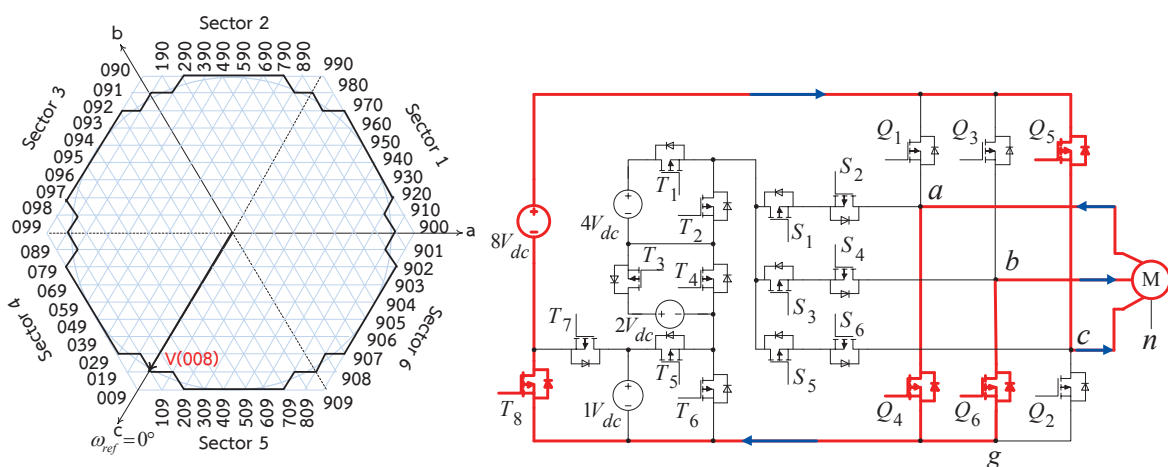
มุมของการสวิตช์แต่ละสภาวะสามารถ
หาได้จาก

$$\theta_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{360}{3(m-1)}\right) \quad (4)$$

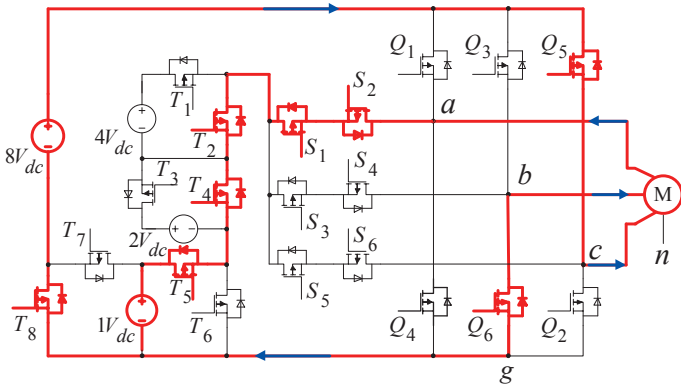
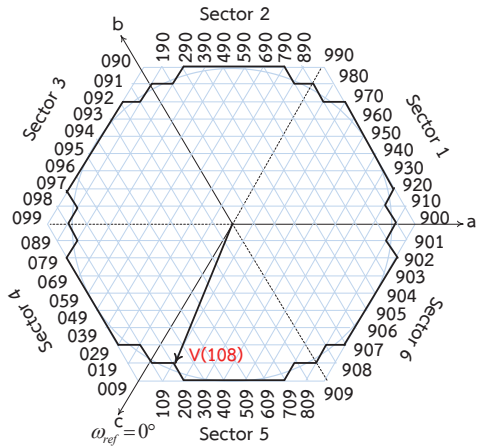
โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots 3(m-1)$



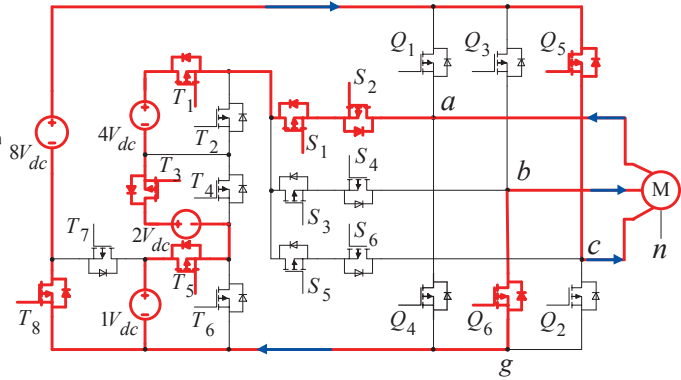
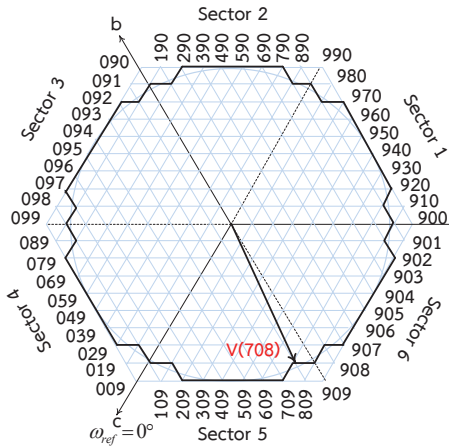
รูปที่ 8 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส



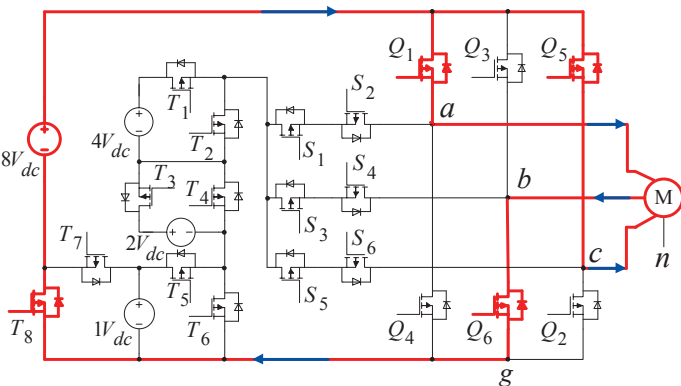
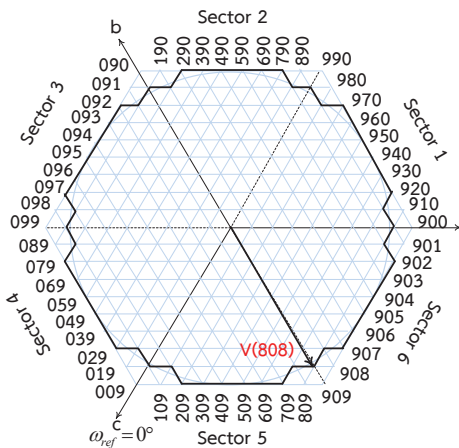
(ก) สภาวะ 1: ($V_{ag} = 0, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8)V_{dc}$ และ ($V_{ab} = 0, V_{bc} = -8, V_{ca} = 8)V_{dc}$



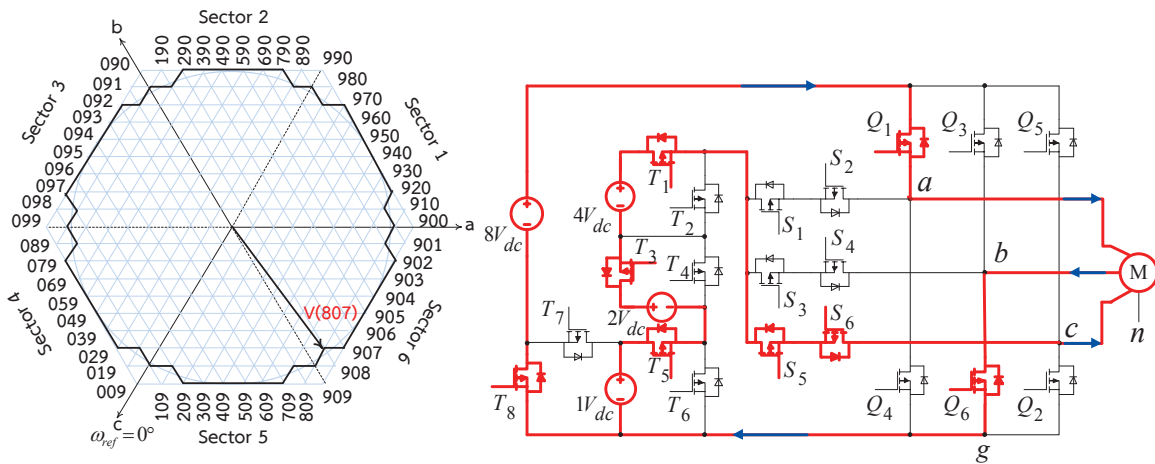
(ข) สภาวะ 2: ($V_{ag} = 1, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 1, V_{bc} = -8, V_{ca} = 7$) V_{dc}



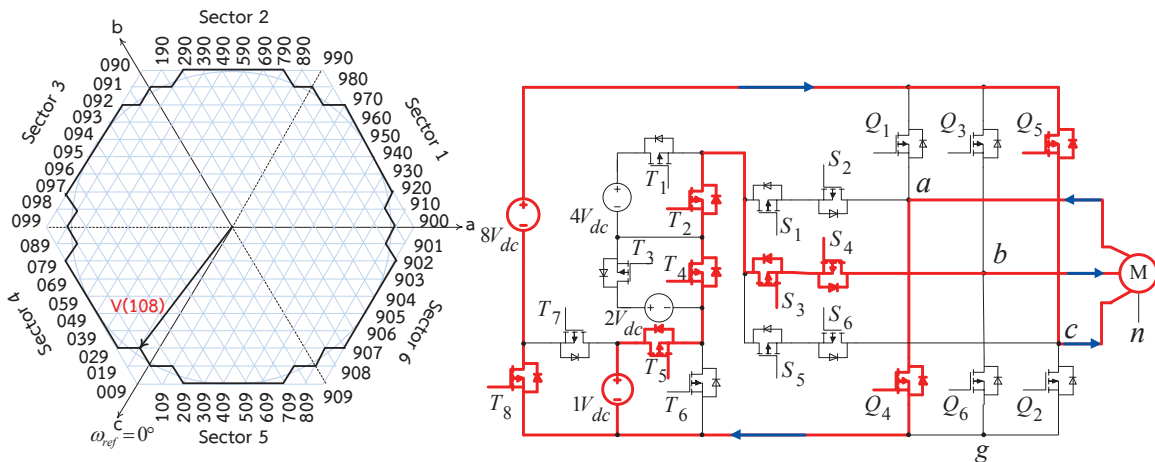
(ค) สภาวะ 9: ($V_{ag} = 7, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 7, V_{bc} = -8, V_{ca} = 1$) V_{dc}



(ง) สภาวะ 10: ($V_{ag} = 8, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 8, V_{bc} = -8, V_{ca} = 0$) V_{dc}



(จ) สภาวะ 11: ($V_{ag} = 8, V_{bg} = 0, V_{cg} = 7$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 8, V_{bc} = -7, V_{ca} = -1$) V_{dc}



(ข) สภาวะ 54: ($V_{ag} = 0, V_{bg} = 1, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = -1, V_{bc} = -7, V_{ca} = 8$) V_{dc}

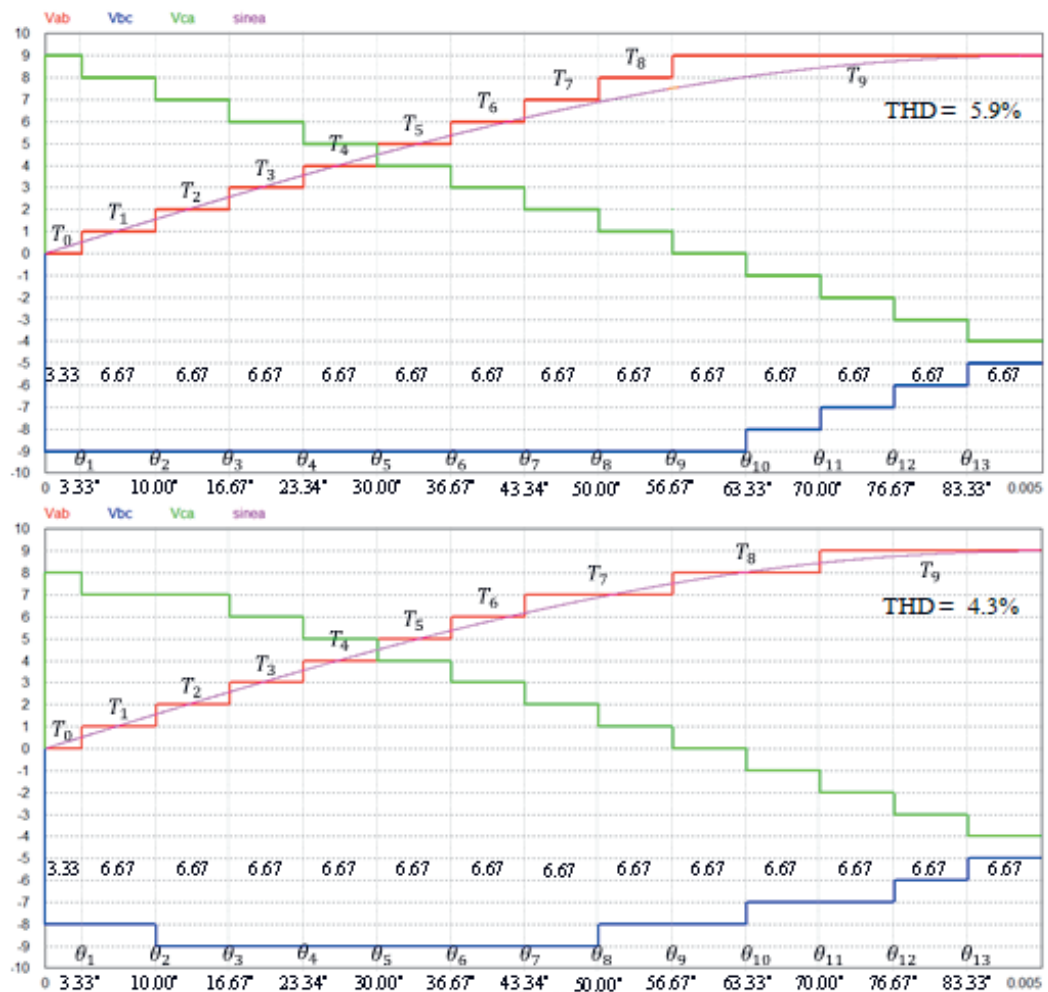
รูปที่ 9 การสวิตช์ที่ตำแหน่งเวกเตอร์ของสภาวะที่ 1 2 9 10 11 และ 54

ตัวอย่างการควบคุมสวิตช์ที่ตำแหน่งเวกเตอร์ของสภาวะที่ 1 2 9 10 11 และสภาวะที่ 54 โดยมีทิศทางการไหลของกระแส และค่าแรงดันระหว่างสายซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2) ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก)-(ข) ตามลำดับ

พิจารณารูปคลื่นแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ในรูปที่ 10 เมื่อควบคุมการสวิตช์แบบ SVC จะพบว่าระดับแรงดันขึ้นบันไดไม่ได้อยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ ($T_7 - T_9$ อยู่ นอก รูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ) แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเวกเตอร์ 18 ตำแหน่ง ผลที่ได้คือระดับแรงดันขึ้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์

เปรียบเทียบทุกระดับ โดยมุมของการสวิตช์ (θ_i) แต่ละสภาวะสามารถหาได้จากสมการ (2) โดยแต่ละสภาวะมีช่วงเวลาห่างกัน 6.67°

ผลจำลองการทำงานพบว่าแรงดันระหว่างสายด้านออกมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ที่ 5.9% เมื่ออินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมการสวิตช์แบบเวกเตอร์ดั้งเดิม แต่เมื่อมีการปรับตำแหน่งเวกเตอร์ใหม่ 18 ตำแหน่งดังที่ได้นำเสนอ ผลค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมลดลงอยู่ที่ 4.3% ผลที่ได้ยืนยันความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันด้านออก: ควบคุมแบบ SVC (บน) ปรับตำแหน่งเวกเตอร์ (ล่าง)



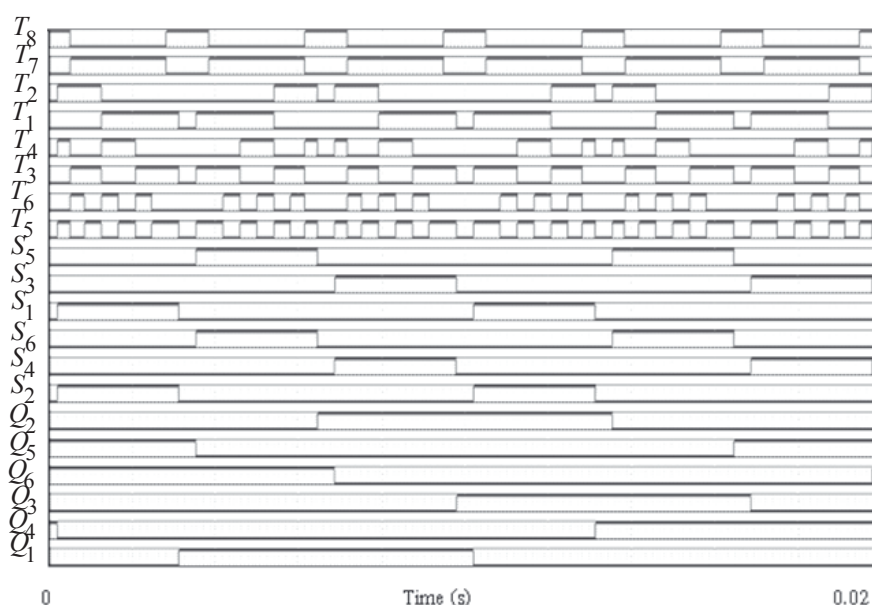
รูปที่ 11 ชุดทดลองต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส

4. ผลการทดลอง

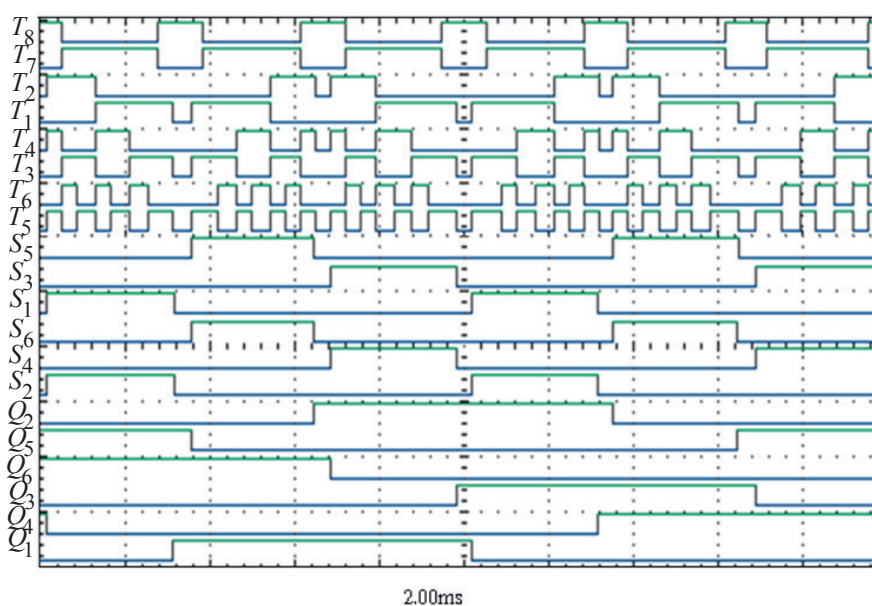
ชุดทดลองต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 11 ควบคุมการสวิตช์แบบ SVC เมื่อปรับตำแหน่งเวกเตอร์ 18 ตำแหน่ง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นสวิตช์คือ IRFP460 ตัวขับใช้ไอซี TLP250 แรงดันดีซีลิงค์ที่ใช้ $V_{dc} = 380/9$ V อุปกรณ์สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์คือตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล 32 บิต เบอร์

TMS320F28335 โหลดที่ใช้คือมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ¼ แรงม้า

รูปที่ 12(ก) และรูปที่ 12(ข) แสดงรูปคลื่นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ($Q_1 - Q_6$) สวิตช์แบบ 2 ทิศทาง ($S_1 - S_6$) และส่วนควบคุมแรงดันดีซีลิงค์ ($T_1 - T_8$) ซึ่งเกิดจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM และได้จากการทดลองตามลำดับ

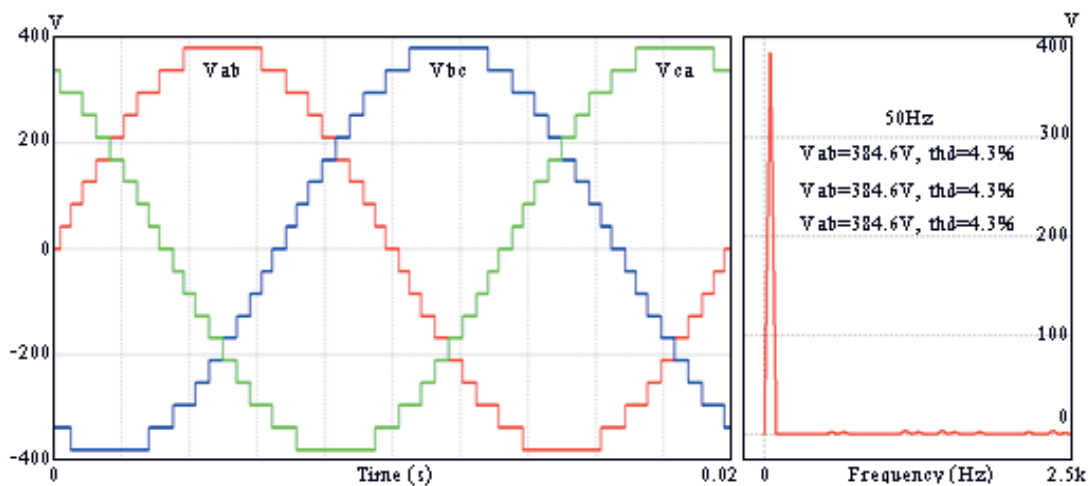


(ก) ผลจำลองการทำงาน

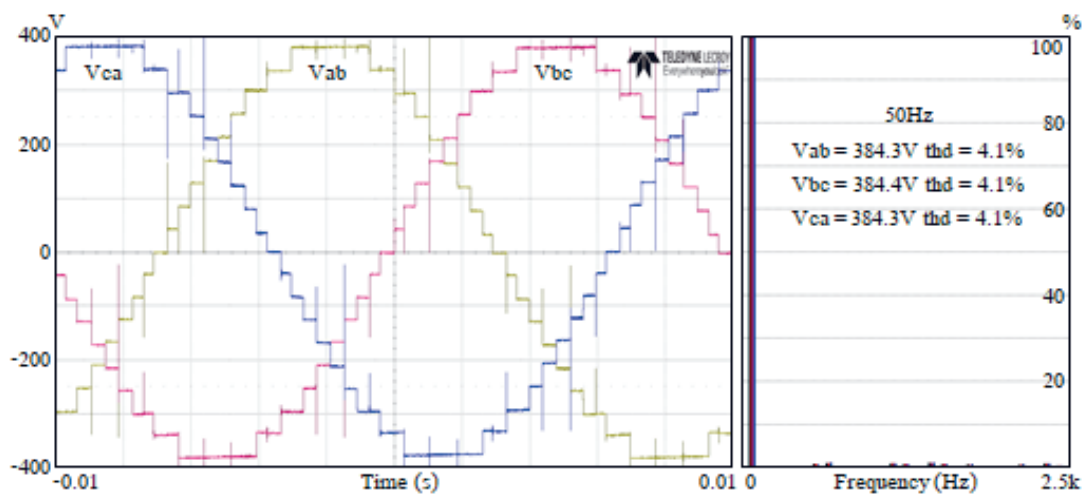


(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 12 สัญญาณควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์



(ก) ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM



(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันระหว่างสายด้านนอก

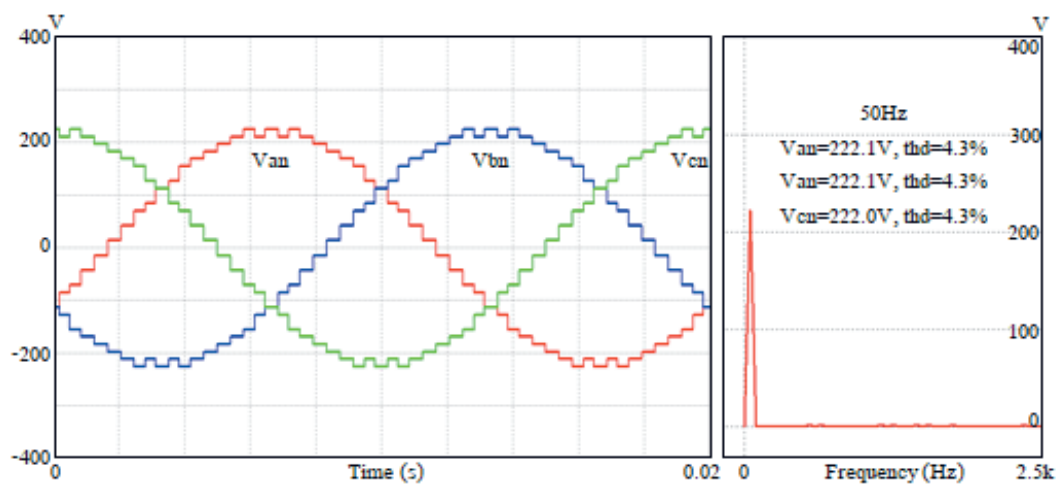
รูปคลื่นแรงดันระหว่างสายด้านนอกซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการจำลองการทำงานและการทดลอง ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 4.3% และ 4.1% ตามลำดับ

ผลจำลองการทำงานและผลการทดลองของรูปคลื่นแรงดันเฟสด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 0.9% และ 1.1% ตามลำดับ

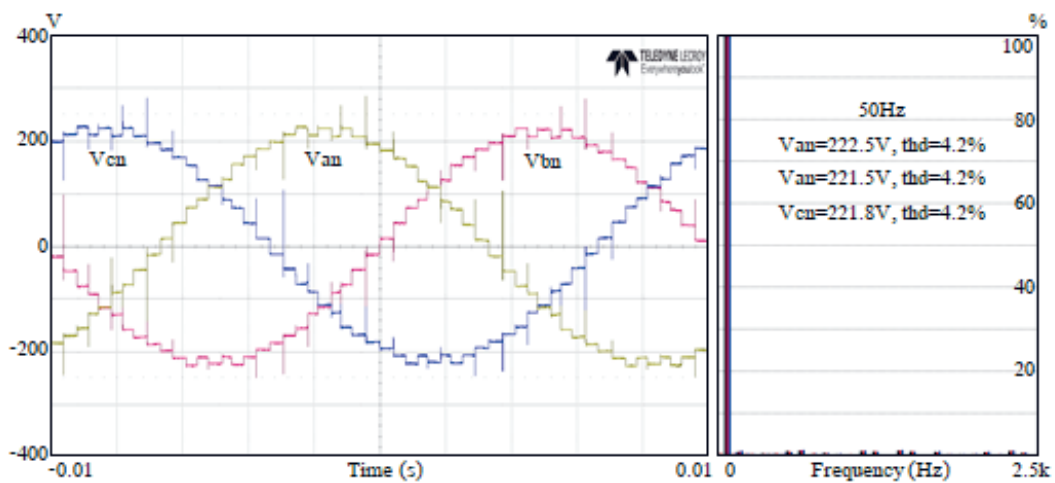
รูปที่ 15 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดจากผลจำลองการทำงานและผลการทดลอง โดยมีค่า

ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 0.9% และ 1.1% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 10 ประกอบผลจำลองการทำงานพบว่าแรงดันระหว่างสายด้านนอกมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ที่ 5.9% เมื่ออินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมการสวิตช์แบบเวกเตอร์ดั้งเดิม ในขณะที่เมื่อมีการปรับตำแหน่งเวกเตอร์ใหม่ดังที่ได้นำเสนอ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ที่ 4.3% เมื่อเปรียบเทียบจะพบว่าค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมลดลง 27.12% ผลที่ได้ยืนยันความถูกต้องถึงวิธีการที่ได้นำเสนอ

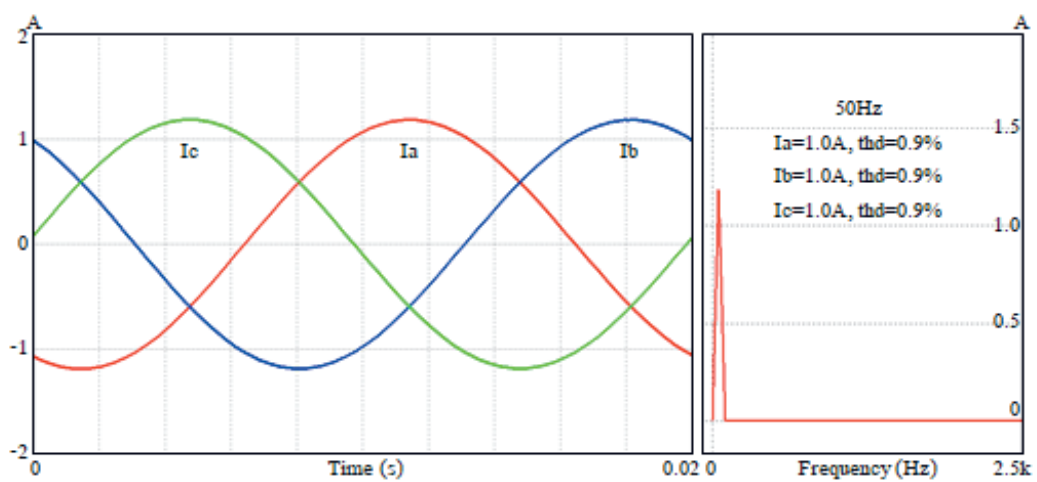


(ก) ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM

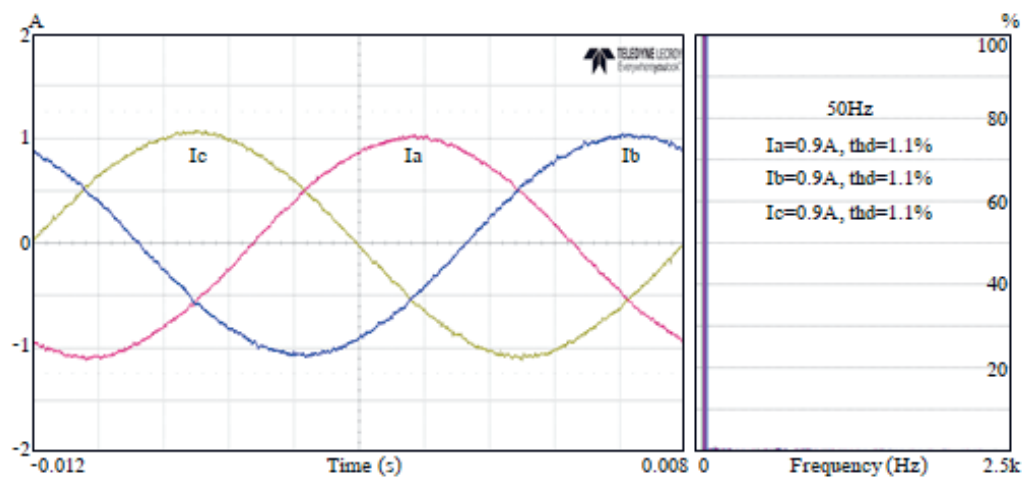


(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 14 รูปคลื่นแรงดันด้านออกระหว่างสาย



(ก) ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM



(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 15 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านโหลด

5.สรุป

อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟสควบคุมด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ รูปคลื่นแรงดันออกที่ระดับขั้นบันไดที่ 7 (T_7) เป็นต้นไปจะอยู่นอกรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ ส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกสูง บทความนี้ตำแหน่งเวกเตอร์ถูกปรับจากแบบดั้งเดิม 18 ตำแหน่ง คือ V(008) V(108) V(708) V(808) V(807) V(801) V(800) V(810) V(870) V(880) V(780) V(180) V(080) V(081) V(087) V(088) V(078) และ V(018) เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ ข้อจำกัดคือความยากสำหรับการออกแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต้องออกแบบให้ระดับแรงดันระหว่างสายด้านออกทั้ง 3 เฟสรวมกันเป็นศูนย์ทุกตำแหน่งของการสวิตช์ ตำแหน่งของเวกเตอร์ทำให้ทราบแรงดันดีซีลิงค์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยมีตำแหน่งมุมของการสวิตช์ทั้งหมด 54 สภาวะ ผลที่ได้จากการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว พิกัด 1/4 แรงม้า ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสอยู่ที่ 4.1% และ 1.1% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ยืนยันความ

ถูกต้องของวิธีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเวกเตอร์ที่ได้นำเสนอ

โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดค่าของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ โดยใช้มอเตอร์พิกัด 1/4 แรงม้า ความถี่ 50 Hz แบบไม่มีโหลดแทนการใช้โหลด R-L เนื่องจากดีซีลิงค์ที่ใช้ในการทดลองมีพิกัดกระแสไม่สูง ถ้าต้องการนำอินเวอร์เตอร์ไปขับมอเตอร์ที่ต่อโหลด จำเป็นต้องเพิ่มพิกัดกระแสของดีซีลิงค์ให้สูงขึ้น และควรทดลองที่ความถี่อื่นๆ สำหรับขับมอเตอร์เพื่อทดสอบการตอบสนองของอินเวอร์เตอร์

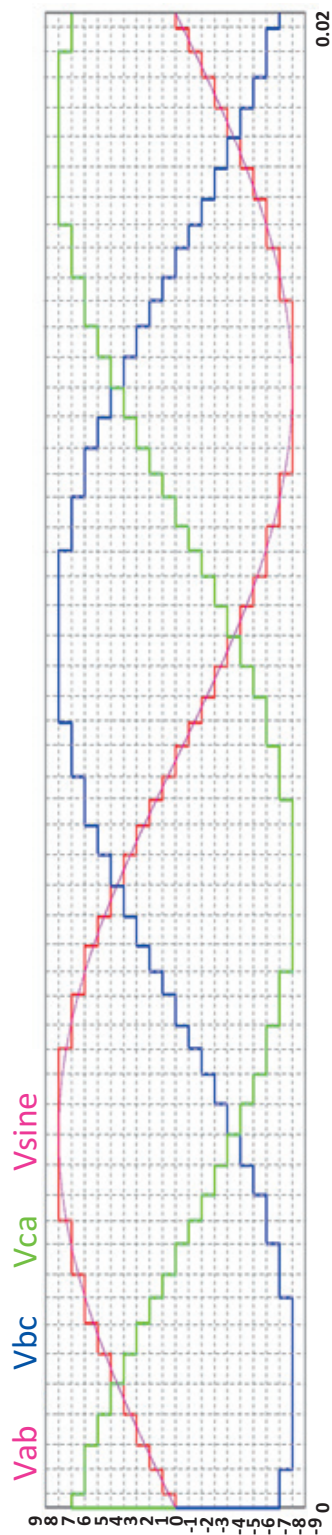
6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการจัดการพลังงาน (PEAEM) คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang JH, Le TV, Ibadullaev A, Park SJ. A study of TNPC type single-phase 5-level inverter for energy storage

- system. ITEC Asia-Pacific, 2016;346-350.
- [2] Rodriguez J, Lai JS, Peng FZ. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002;49(4); 724-738.
- [3] Edpuganti A, Rathore AK. Fundamental switching frequency optimal pulse width modulation of medium-voltage cascaded seven-level inverter. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015; 51(4);3485–3492.
- [4] Du Z, Tolbert LM, Ozpineci B, Chiasson JN. Fundamental frequency switching strategies of a seven-level hybrid cascaded H-bridge multilevel inverter. IEEE Transactions on Power Electronics. 2009;24(1);25-33.
- [5] Hu P, Jiang D. A level-increased nearest level modulation method for modular multilevel converters. IEEE Transactions on Power Electronics. 2015;30(4);1836–1842.
- [6] Gao L, Fletcher JE. A space vector switching strategy for three-level five-Phase inverter drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010;57(7);2332-2343.
- [7] Ahmed M, Sheir A, Orabi M. Real-time solution and implementation of selective harmonic elimination of seven-Level multilevel inverter. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2017;5(4);1700-1709.
- [8] Alnamer SS, Mekhilef S, Mokhlis H. Proposed new N-multilevel family of topologies for T-type inverter. IEICE Electronics Express. 2017;14 (15);1-11.
- [9] Masaoud A, Ping HW, Mekhilef S, Taallah AS. New three-phase multilevel inverter with reduced number of power electronic components. IEEE Transactions on Power Electronics. 2014;29 (11);6018-6029.
- [10] Masaoud A, Ping HW, Mekhilef S, Taallah AS. New three-phase multilevel inverter with reduced number of power electronic components. IEEE Transactions on Power Electronics. 2014;29 (11);6018-6029.



State	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	1	
Switch angle (θ)	$\theta=3.33$	$\theta=10$	$\theta=16.67$	$\theta=23.33$	$\theta=30$	$\theta=36.67$	$\theta=43.33$	$\theta=50$	$\theta=56.67$	$\theta=63.33$	$\theta=70$	$\theta=76.67$	$\theta=83.33$	$\theta=90$	$\theta=96.67$	$\theta=103.33$	$\theta=110$	$\theta=116.67$	$\theta=123.33$	$\theta=130$	$\theta=136.67$	$\theta=143.33$	$\theta=150$	$\theta=156.67$	$\theta=163.33$	$\theta=170$	$\theta=176.67$	$\theta=183.33$	$\theta=190$	$\theta=196.67$	$\theta=203.33$	$\theta=210$	$\theta=216.67$	$\theta=223.33$	$\theta=230$	$\theta=236.67$	$\theta=243.33$	$\theta=250$	$\theta=256.67$	$\theta=263.33$	$\theta=270$	$\theta=276.67$	$\theta=283.33$	$\theta=290$	$\theta=296.67$	$\theta=303.33$	$\theta=310$	$\theta=316.67$	$\theta=323.33$	$\theta=330$	$\theta=336.67$	$\theta=343.33$	$\theta=350$	$\theta=356.67$	$\theta=363.33$	
V_{ab}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	0
V_{bc}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	0
V_{sine}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	0

ภาคผนวก : รูปที่ 1(ผ) สภาวะการสวิตช์ทั้งหมด 54 สภาวะ เมื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งเวกเตอร์ 18 ตำแหน่ง