

## อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน 7-LEVEL H-BRIDGE CASCADED INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCE

บุญธง วสุรีย์<sup>1</sup>, บัญชา หิรัญสิงห์<sup>2,\*</sup> และ อนูวัฒน์ จางวานิชเลิศ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Boonthong Wasuri<sup>1</sup>, Bancha Hiransing<sup>2,\*</sup> และ Anuwat Jangwanitert<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Art, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

<sup>3</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-mail: bancha@webmail.npru.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน วงจรใช้อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ชนิดเอช-บริดจ์ จำนวน 3 ชุด ต่ออนุกรมกัน ส่วนด้านขาเข้านำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์ ซึ่งแหล่งจ่ายแต่ละชุดแบบแยกอิสระต่อกัน วงจรควบคุมใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีดีแบบเบิลยูเอ็มไซน์ชนิดพีดีในการควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมการทำงานใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เบอร์ TMS320F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink กำหนดสัญญาณพีดีแบบเบิลยูเอ็มไซน์ออกมา 12 สัญญาณ วงจรสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเท่ากับ 180 Vp เพื่อศึกษาถึงระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันไฟฟ้าด้านออก งานวิจัยนี้ใช้การจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อยืนยันผลทดลองจากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น

**คำสำคัญ:** อินเวอร์เตอร์, อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์, บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล, แหล่งจ่ายพลังงานทดแทน, ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

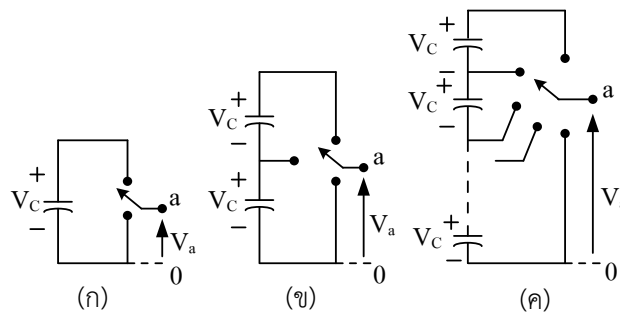
### Abstract

This paper presents the 7-level H-bridge cascaded inverter for renewable energy source. The inverter based on 3 H-bridge single phase inverters that are separated is connected in series. The inverter is supplied from the dc source. The control circuit using Sinusoidal Pulse-Width Modulation (SPWM) technique with PD for controlling switches in the inverter. The control signal generated by Digital Signal Processing (DSP) #TMS320F28335 processor with MATLAB/Simulink is provided for 12 SPWM signals to output port. The 7-Level H-Bridge Cascaded Inverter can generate the output ac voltage 180 Vp from dc voltage source and can be measured the total harmonics distortion (THD) with varies modulation index ( $m_a$ ). The simulation results obtained from the MATLAB/Simulink program have confirmed the proposed circuit.

**Keywords:** Inverter, H-Bridge Multilevel Inverter, Digital Signal Processing Board, Renewable Energy Source, Total Harmonics Distortion.

## บทนำ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) เป็นที่นิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเช่น การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานไปยังระบบไฟฟ้า (Grid Connect Inverter) การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drive) กำลังสูงในงานอุตสาหกรรม ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) และพลังงานทดแทนอื่นๆ เป็นต้น อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีคุณสมบัติคือ ให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกสูงขึ้น ความถี่ของรูปคลื่นไซน์มากยิ่งขึ้นและความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD) ต่ำกว่า ด้วยคุณสมบัติที่ดีกว่าในเรื่องของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ ดังนั้นจึงได้รับความสนใจในการศึกษาและอย่างต่อเนื่อง อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีโครงสร้างพื้นฐานคือ การนำเอาอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังตัวหลายๆ ตัวมาต่ออนุกรมกัน จึงสามารถใช้กับงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งภาพ ก) แสดงสวิตซ์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 ระดับ ภาพ ข) แสดงอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และ ภาพ ค) แสดงอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



ภาพที่ 1 พื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยทั่วไปมีการใช้งานในปัจจุบันมี 3 ชนิดหลักๆ คือ อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์ (Diode-Clamp Multilevel Inverter) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์ (Capacitor-Clamp Multilevel Inverter) และอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แคสเคดเซลล์ (H-Bridge Multilevel Inverter) นอกจากนี้ยังมีอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดอื่นๆ อีก เช่น อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเจเนอรัลไลซ์ (Generalized Multilevel Inverter) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดผสมระดับไฮบริดจ์ (Mixed-Level Hybrid Multilevel Inverter) อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแบ็คทูแบ็คไดโอดแคลมป์ (Back to Back Diode-clamp Multilevel Inverter) เป็นต้น

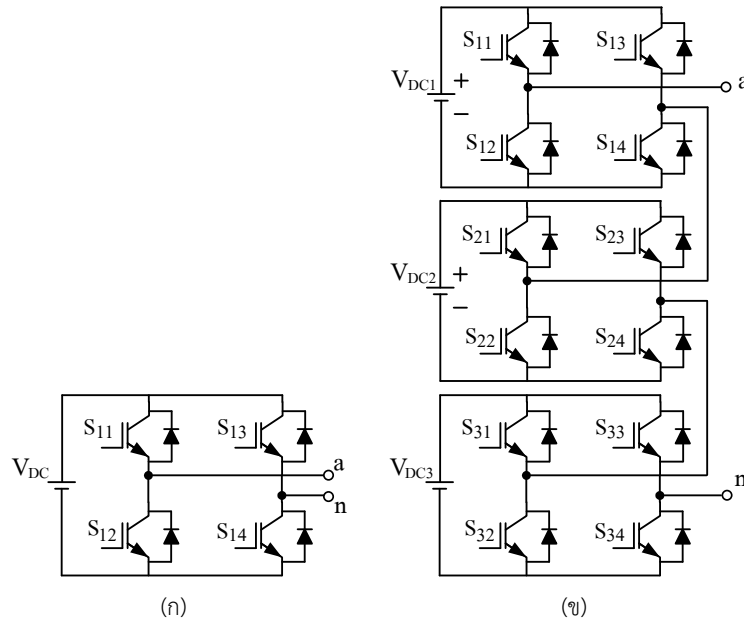
#### 1. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดไดโอดแคลมป์มีโครงสร้างวงจรที่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือไดโอดและอุปกรณ์สวิตซ์กำลัง โดยอุปกรณ์สวิตซ์กำลังจะต่อกันในลักษณะอนุกรมกันเพื่อสร้างขนาดพิคกิ้งของแรงดันด้านขาออกและระดับแรงดันด้านขาออก ระหว่างจุดแรงดันภายในจะถูกต่อด้วยไดโอด 2 ตัวแคลมป์บัสบนและบัสล่าง สำหรับคุณสมบัติของไดโอดแคลมป์นั้นจำเป็นต้องมีขนาดพิคกิ้งที่ต่างกันตามระดับแรงดันที่จุดต่อแรงดันภายใน

#### 2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาปาซิเตอร์แคลมป์หรืออินเวอร์เตอร์หลายระดับฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Multilevel Inverter) มีโครงสร้างคือ ใช้ตัวเก็บประจุต่อแคลมป์เข้ากับอุปกรณ์สวิตซ์เพื่อถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าในวงจร สถานะการสวิตซ์คล้ายกับแบบไดโอดแคลมป์ อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ไดโอดแคลมป์

แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านอินพุต เมื่อทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงๆ จะทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์เกิดขึ้น



ภาพที่ 2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ (ก) 3 ระดับ (ข) 5 ระดับ (ค) 7 ระดับ

### 3. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์มีโครงสร้างคือนำด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์หรืออินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์มาต่ออนุกรมกัน ซึ่งอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดสามารถให้แรงดันด้านขาออกเป็น  $+V_{dc}$ ,  $0$  และ  $-V_{dc}$  โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดแยกอิสระต่อกัน จึงสามารถต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์เชื้อเพลิง หรือ แบตเตอรี่ ได้

จำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์มีความสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้าหรือจำนวนเซลล์ของอินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์คือ

$$m = 2s + 1 \tag{1}$$

จำนวนอุปกรณ์สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์มีความสัมพันธ์กับจำนวนระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกคือ

$$n = 2 \times (m - 1) \tag{2}$$

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ แสดงดังภาพที่ 2 (ก) แสดงอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และภาพ (ข) แสดงอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ และเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดต่างๆ

ลำดับ	ชนิดอินเวอร์เตอร์หลายระดับ	ไดโอดแคลมป์	ฟลายอิงคาปาซิเตอร์	เอช-บริดจ์คาสเคดเซลล์
1	จำนวนสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	$2 \times (m-1)$	$2 \times (m-1)$	$2 \times (m-1)$
2	จำนวนไดโอดแคลมป์	$(m-1) \times (m-2)$	0	0
3	จำนวนตัวเก็บประจุบัสกระแสดตรง	$(m-1)$	$(m-1)$	$(m-1)/2$
4	ตัวเก็บประจุบาลานซ์	0	$(m-1) \times (m-2)/2$	0
5	การประยุกต์ใช้งาน	- ขับมอเตอร์ - STATCOM	- ขับมอเตอร์ - STATCOM	- ขับมอเตอร์ - PV system - Fuel Cell - Battery System

#### การควบคุมและวิธีการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

การควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การสวิตช์ที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental Switching Frequency) และการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มความถี่สูง (High Switching Frequency PWM) ดังนี้

##### 1. การสวิตช์ที่ความถี่มูลฐาน

การสวิตช์ที่ความถี่มูลฐานเป็นใช้สัญญาณพัลส์ที่ความถี่การสวิตช์เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า (50 เฮิร์ตซ์ หรือ 50 เฮิร์ตซ์) ไปขับนำอุปกรณ์สวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีข้อได้เปรียบคือสามารถลดค่าฮาร์โมนิกส์และปรับปรุงค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion: THD) ลงได้ จึงทำให้ค่าความสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching Loss) ต่ำกว่า

##### 2. การสวิตช์แบบสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีดับเบิลยูเอ็มไซน์

การสวิตช์แบบสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีดับเบิลยูเอ็มไซน์ โดยทั่วไปแล้วในงานอุตสาหกรรมมักนิยมใช้การสวิตช์ความถี่สูงแบบพีดับเบิลยูเอ็มไซน์ โดยสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่คงที่ 4 แบบคือ เทคนิคพีดี (Phase Disposition: PD) ซึ่งมุมเฟสเริ่มต้นในแต่ละคลื่นพาหะมีมุมเฟสตรงกัน เทคนิคพีโอดี (Phase Opposition Disposition: POD) มีมุมเฟสเริ่มต้นในซีกบวกจะแตกต่างกันเท่า 180 องศาและ ส่วนเทคนิคเอพีโอดี (Alternative Phase Opposition Disposition: APOD) มีมุมเฟสเริ่มต้นในแต่ละคลื่นพาหะแตกต่างกันเท่า 180 องศา จากคลื่นพาหะรอบข้างการมอดูเลตความถี่สูงพัลส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้การมอดูเลชันระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะ สามารถหาค่าอัตราการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดและอัตราการมอดูเลตเชิงความถี่ดังนี้

$$m_a = \frac{A_{\text{sine}}}{A_{\text{carrier}}} \quad (4)$$

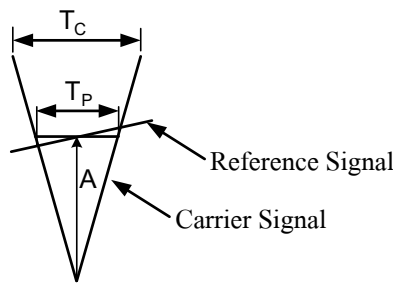
$$m_f = \frac{F_{\text{carrier}}}{F_{\text{sine}}} \quad (5)$$

เมื่อ  $m_a$  คือ อัตราการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด,  $m_f$  คือ อัตราการมอดูเลตเชิงความถี่,  $A_{\text{sine}}$  คือ ขนาดสัญญาณไซน์อ้างอิง,  $A_{\text{carrier}}$  คือ ขนาดสัญญาณคลื่นพาหะสามเหลี่ยม,  $F_{\text{carrier}}$  คือ ความถี่สัญญาณคลื่นพาหะสามเหลี่ยม,  $F_{\text{sine}}$  คือ ความถี่สัญญาณไซน์อ้างอิง

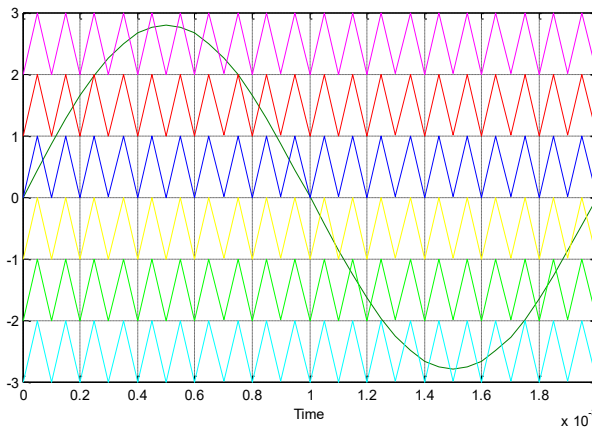
การมอดูเลตความกว้างพัลส์สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้ควบคุมวงจรรีโอดหลายระดับจะใช้การมอดูเลชันระหว่างสัญญาณไซน์อ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะสามเหลี่ยม โดยค่าความกว้างของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มนั้นจะขึ้นอยู่กับความสูงของสัญญาณไซน์อ้างอิงเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงของสัญญาณคลื่นพาหะ [3] ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะและสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6

$$\frac{T_p}{T_c} = A \quad ; 0 \leq A \leq 1 \tag{6}$$

เมื่อ  $T_p$  คือ ความกว้างพัลส์ของสัญญาณด้านออก,  $T_c$  คือ คาบเวลาของสัญญาณคลื่นพาหะ,  $A$  คือ ความสูงของสัญญาณอ้างอิง



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณคลื่นพาหะ



ภาพที่ 4 การมอดูเลชันความกว้างพัลส์แบบสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีดับเบิลยูเอ็มไซน์พีดี

โดยแรงดันด้านออกของวงจรรีโอดหลายระดับระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ จะมีความสัมพันธ์กับดัชนีการมอดูเลต ( $m_a$ ) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า ( $V_{dc}$ ) ตามสมการที่ 7

$$V_{1,Peak} = m_a \cdot V_{dc} \quad ; (m_a \leq 1) \tag{7}$$

โดยที่ 
$$V_{dc} = sE \tag{8}$$

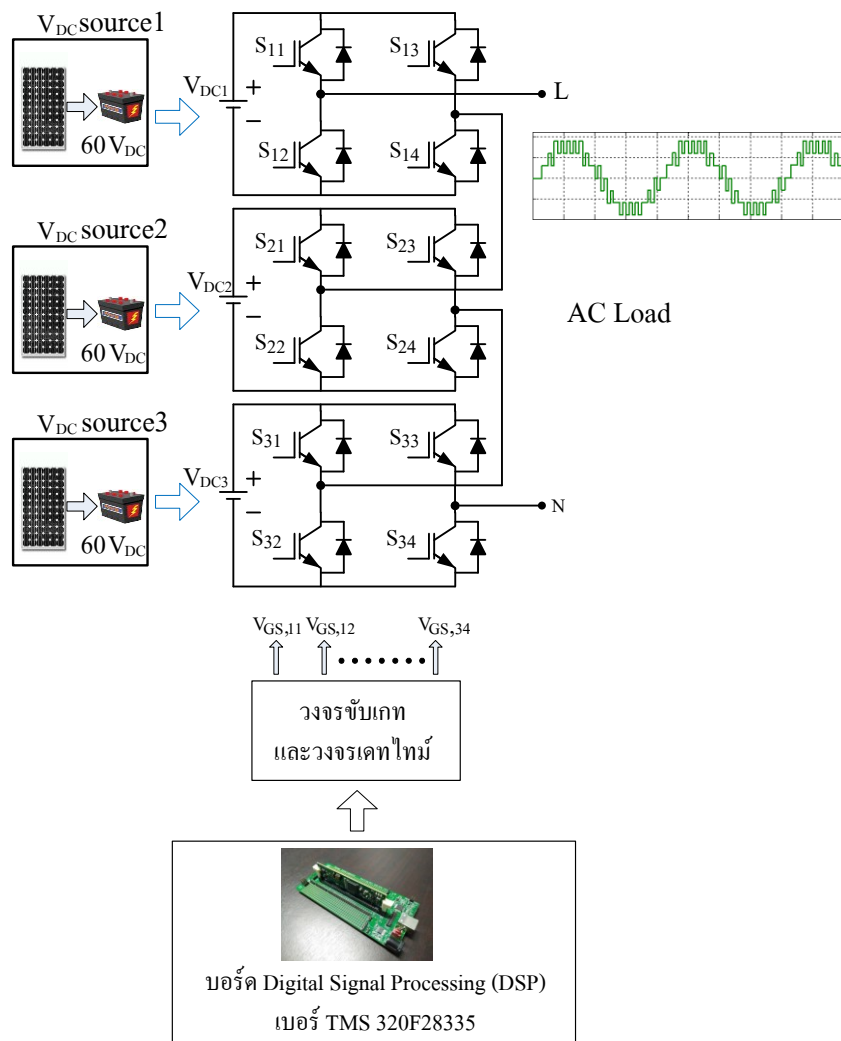
เมื่อเมื่อ  $E$  คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ย่อย,  $s$  คือ จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### การออกแบบวงจรที่ใช้ในการวิจัย

1. วงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ในการวิจัย

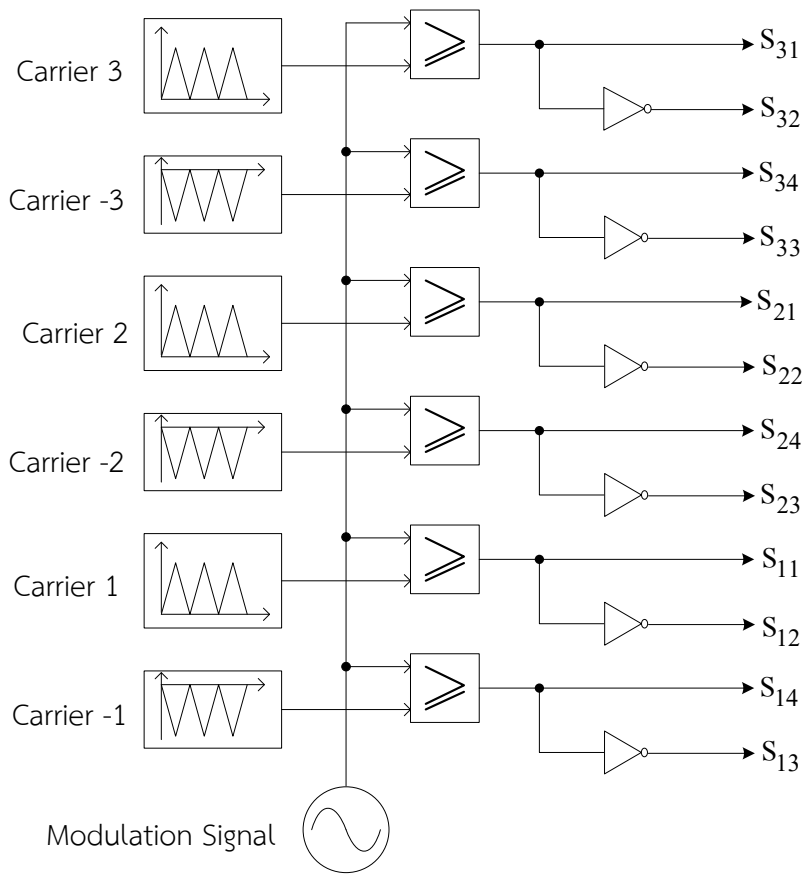
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์ ที่มีข้อดีคือโครงสร้างวงจรไม่สลับซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบ แรงดันไฟฟ้าด้านออกคุณภาพสูงและมีค่าฮาร์มอนิกส์ต่ำ เหมาะสมกับการขับมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง เป็นต้น ภาพที่ 5 แสดงวงจรของงานวิจัยที่นำเสนอ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 60 Vdc ซึ่งแยกอิสระต่อกันจำนวน 3 ชุด แต่ละชุดป้อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์แต่ละเซลล์ จำนวน 3 ชุด ด้านออกของแต่ละเซลล์ต่ออนุกรมกัน ทำให้ได้แรงดันด้านออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์คล้ายๆ ขึ้นบันได เพื่อให้สามารถใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับได้ ส่วนวงจรควบคุมใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink กำหนดสัญญาณพัลส์เบิวยูเอ็มไอซ์ออกมา 12 ชุด เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์โดยผ่านชุดวงจรขับเกท วงจรเดทไทม์และวงจรแยกกราวด์ เพื่อความเหมาะสมของสัญญาณและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์ในวงจร



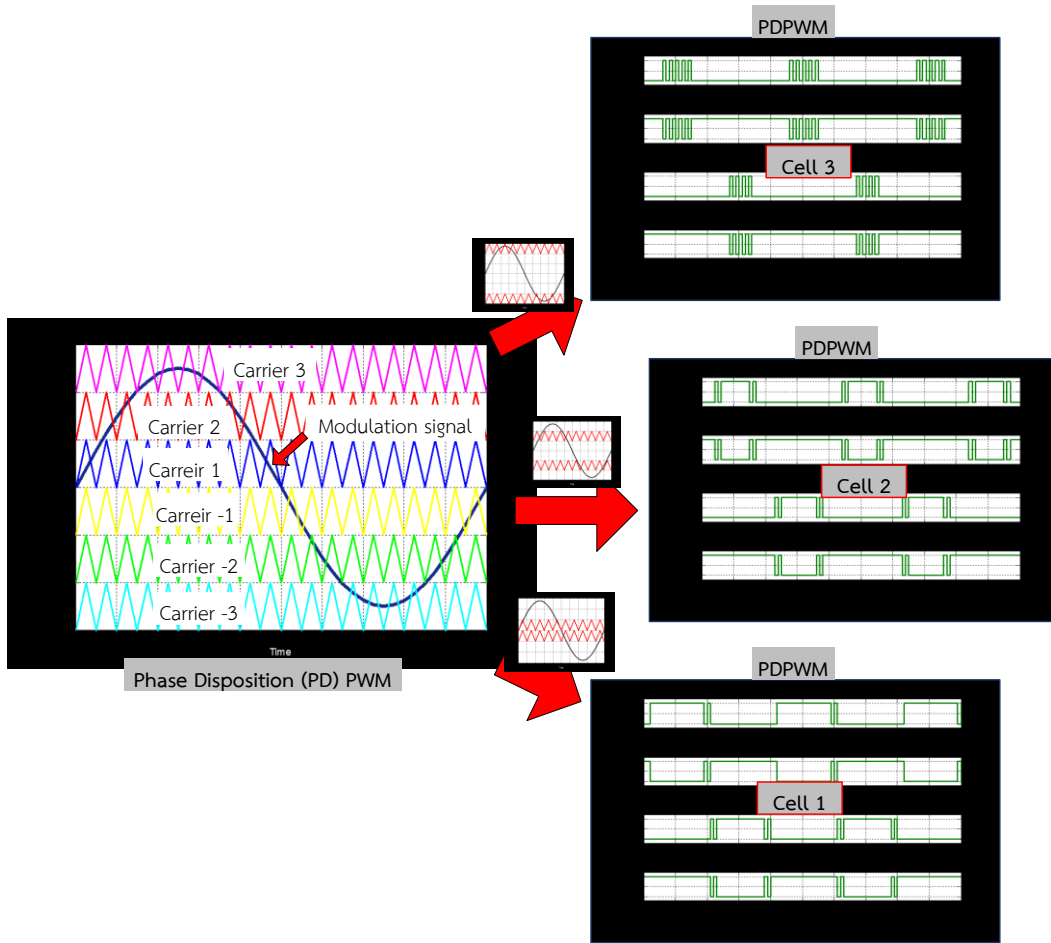
ภาพที่ 5 วงจรของงานวิจัยที่นำเสนอ

2. วงจรควบคุมการสวิตช์

วงจรควบคุมในบทความนี้ใช้สัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีคดับเบิลยูเอ็มไซน์แบบพีดี ในการขับนำอุปกรณ์สวิตช์ ภาพที่ 6 แสดงแผนผังวงจรลอจิกในการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มไซน์จากหลายๆ สัญญาณคลื่นพาหะ ประกอบด้วยสัญญาณคลื่นพาหะความถี่สูงซีกบวกและซีกลบอย่างละ 3 ชั้น สัญญาณแต่ละชุดจะถูกมอดูเลตโดยสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่มูลฐาน 50 Hz ทำให้ได้สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มไซน์เพื่อขับนำอุปกรณ์สวิตช์กึ่งหน้าของอินเวอร์เตอร์แบบเอช - บริดจ์ แต่ละเซลล์และมีการกลับสัญญาณโดยใช้ลอจิกเกตแบบน็อต (NOT Gate) เพื่อขับนำอุปกรณ์สวิตช์กึ่งหลังของอินเวอร์เตอร์แบบเอช - บริดจ์แต่ละเซลล์ โดยผ่านวงจรซบเกท แยกกราวด์และวงจรเดดไทม์ ส่วนรูปที่ 7 แสดงสัญญาณควบคุมพีคดับเบิลยูเอ็มไซน์แบบพีดีที่ได้จากการสร้างขึ้นจากวงจรในภาพที่ 6 เพื่อขับนำอินเวอร์เตอร์แบบเอช-บริดจ์ 3 เซลล์



ภาพที่ 6 แผนผังวงจรลอจิกสร้างสัญญาณคลื่นพาหะหลายระดับพีคดับเบิลยูเอ็มไซน์แบบพีดี



ภาพที่ 7 สัญญาณควบคุมแบบคลื่นพาหะหลายระดับพีดีบีลยูเอ็มไซน์แบบพีดี

### 3. การคำนวณเฟ้นฮาร์มอนิกรวม

วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ที่มีฮาร์มอนิกปนเปื้อนอยู่ดังนั้นสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นไฟฟ้าที่มีความผิดเพี้ยนดังกล่าวด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์รูปคลื่นของฟูรีเยร์ ซึ่งการวิเคราะห์รูปคลื่นที่ไม่ใช่สัญญาณไซน์ (Nonsinusoidal Waveform) และเป็นสัญญาณรายคาบมีค่าความถี่เชิงมุมเท่ากับ  $\omega$  สามารถนิยามอนุกรมฟูรีเยร์ได้เท่ากับ

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \tag{9}$$

เมื่อสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์คือ

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d(\omega t), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \tag{10}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d(\omega t), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \tag{11}$$

หรือเขียนอีกรูปคือ

$$f(t) = C_o + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega t + \theta_n) \tag{12}$$



เมื่อ

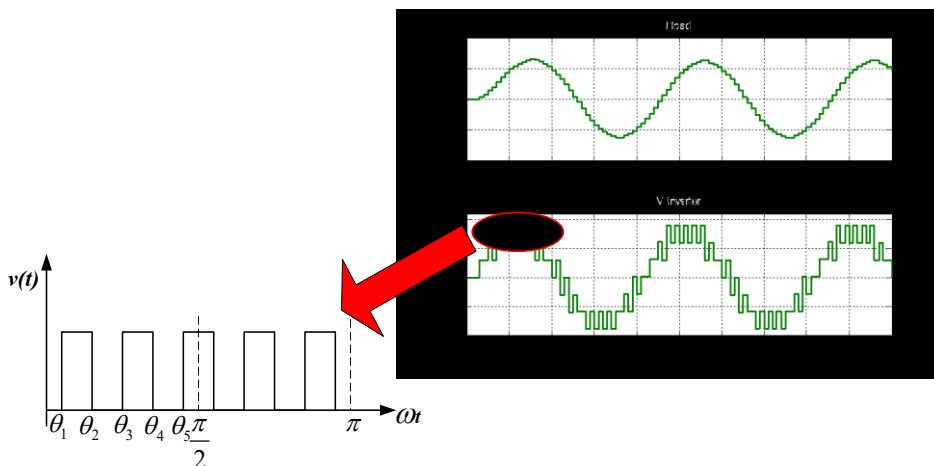
$$\left. \begin{aligned} C_0 &= a_0 \\ C_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \theta_n &= \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

สุดท้ายเราจะได้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ในสมการที่ (7) และสามารถนำไปหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกคือ

$$\left. \begin{aligned} \text{THD}_I &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \\ \text{THD}_V &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

เมื่อ  $I_1$  คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 1,  $V_1$  คือ ค่าแอมพลิจูดของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 1,  $I_n$  คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$ ,  $V_n$  คือ ค่าแอมพลิจูดของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$

จากรูปคลื่นแรงดันด้านออกดังภาพที่ 8 ใช้สมการฟูรีเยร์สมการที่ (7) – (9) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เพื่อคำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมได้ดังสมการที่ (10)



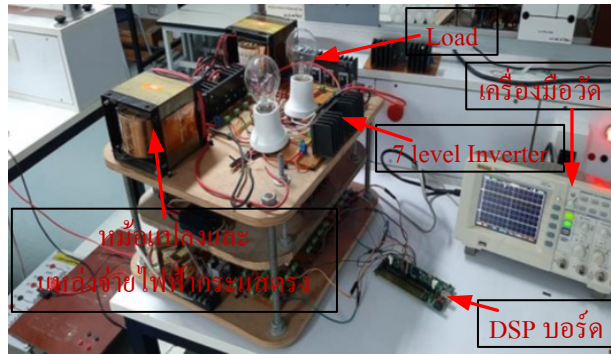
ภาพที่ 8 การวิเคราะห์ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของรูปคลื่นแรงดันด้านออก

### ผลการวิจัย

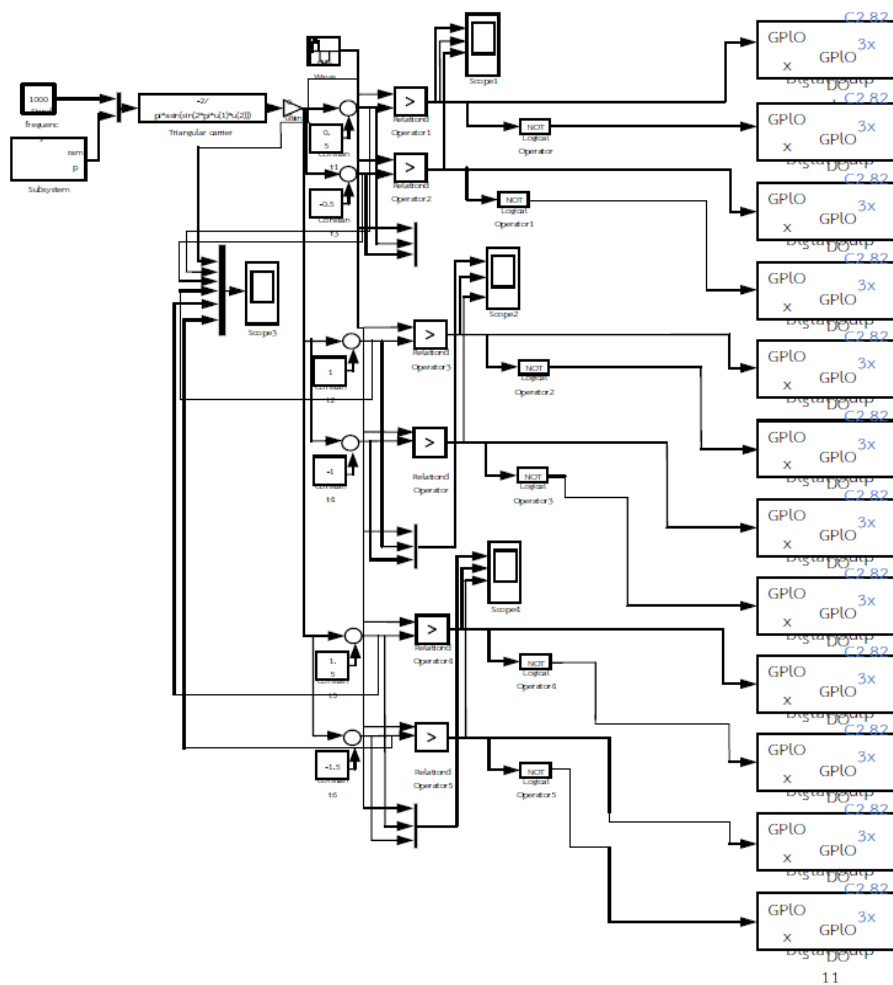
#### ผลการจำลองและการทดลอง

ทดลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ชนิดเซช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์กับเครื่องต้นแบบซึ่งประกอบด้วย ส่วนวงจรภาคกำลัง วงจรภาคควบคุม แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้า โหลดขนาด 200 วัตต์ (โหลด

หลอดไฟ) และส่วนเครื่องมือวัด เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 9 โดยวงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มไซน์จากบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F28335 ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ออกที่ขาพอร์ต Digital Output ของบอร์ด ดังภาพที่ 10

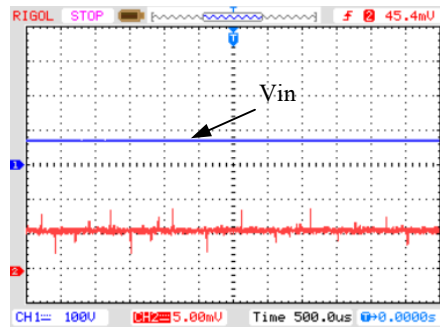


ภาพที่ 9 เครื่องต้นแบบ

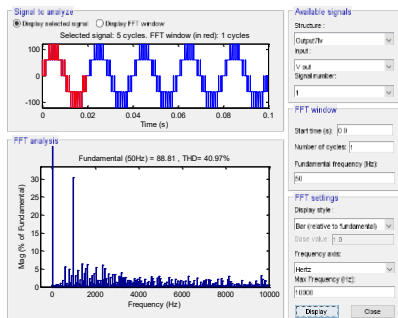


ภาพที่ 10 วงจรสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มไซน์จากบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DSP

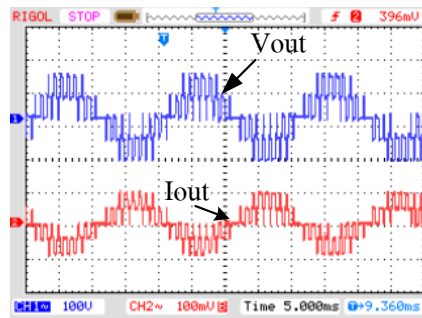
ด้านขาเข้าจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 60 โวลต์ต่อชุด รูปคลื่นแสดงดังภาพที่ 11 จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดลองจากเครื่องต้นแบบสามารถแสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออกดังภาพที่ 12, 13 และ 14 ผลการจำลองและการทดลองแรงดันไฟฟ้าด้านออกโดยปรับค่าดัชนีการมอดูเลต  $m_a = 0.5$  (อินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์ เซลล์ที่ 3 ไม่ทำงาน),  $m_a = 0.75$  (อินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์ ทั้ง 3 เซลล์ทำงาน) และ  $m_a = 1.0$  (อินเวอร์เตอร์ชนิดเอช-บริดจ์ ทั้ง 3 เซลล์ทำงาน) ตามลำดับ และวัดค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (THD) โดยการใช้การจำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้เท่ากับ 40.97%, 25.03% และ 18.30% ตามลำดับ



ภาพที่ 11 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

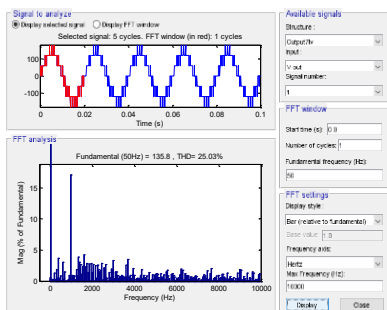


(ก)

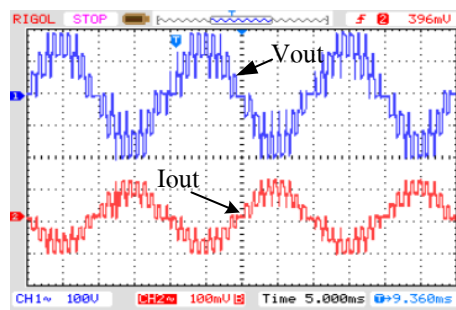


(ข)

ภาพที่ 12 แรงดันด้านออกและค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม  $m_a = 0.5$  ก) การจำลอง ข) การทดลอง

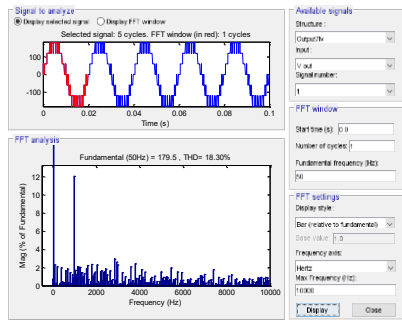


(ก)

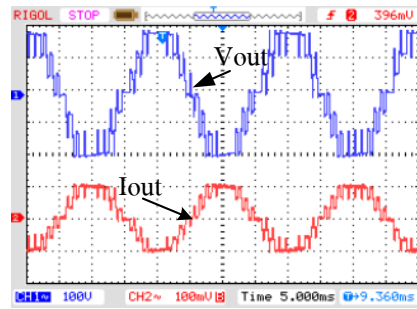


(ข)

ภาพที่ 13 แรงดันด้านออกและค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม  $m_a = 0.75$  ก) การจำลอง ข) การทดลอง



(ก)



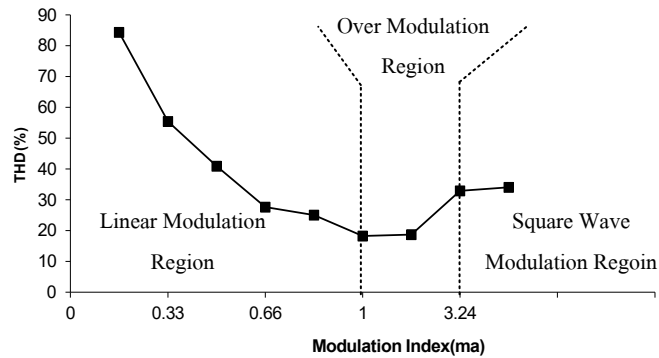
(ข)

ภาพที่ 14 แรงดันด้านออกและค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม  $m_d = 1.0$  ก) การจำลอง ข) การทดลอง

จะเห็นว่าเมื่อทดสอบปรับค่าดัชนีการมอดูเลตจากค่าน้อยถึงค่ามากจะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกมีค่ามากขึ้นและทำให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกมีค่าน้อยลง เนื่องจากรูปแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากขึ้น เมื่อวงจรทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ส่วนย่านโอเวอร์มอดูเลชันและมอดูเลชันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดูเลตกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกแสดงดังตารางที่ 2 และกราฟความสัมพันธ์แสดงดังภาพที่ 15

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดูเลตกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก

ดัชนีการมอดูเลต ( $m_d$ )	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD%)	สถานะการทำงานของเซลล์เอช-บริดจ์	ย่านมอดูเลชัน
0.25	84.34	เซลล์ 1 ทำงาน เซลล์ 2, 3 ไม่ทำงาน	มอดูเลชันเชิงเส้น
0.33	55.46	เซลล์ 1 ทำงาน เซลล์ 2, 3 ไม่ทำงาน	
0.5	40.97	เซลล์ 1, 2 ทำงาน เซลล์ 3 ไม่ทำงาน	
0.66	27.66	เซลล์ 1, 2 ทำงาน เซลล์ 3 ไม่ทำงาน	
0.75	25.03	เซลล์ 1, 2, 3 ทำงาน	
1.0	18.30	เซลล์ 1, 2, 3 ทำงาน	โอเวอร์มอดูเลชัน
1.5	18.76		
3.24	32.93		
3.5	34.10	เซลล์ 1, 2, 3 ทำงาน	มอดูเลชันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการมอดูเลตกับค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม

### สรุปผลวิจัย

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดเอช-บริดจ์แบบคาสเคดเซลล์สำหรับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน วงจรใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์หรืออินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์มาต่ออนุกรมกัน จำนวน 3 ชุด ด้านขาเข้าใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละชุดแบบแยกอิสระต่อกัน วงจรควบคุมใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีดีบีเลเยอเอ็มไซน์ชนิดพีดีผ่านตัวควบคุมการทำงานใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS320F28335 ร่วมกับโปรแกรม MATLAB/Simulink จะเห็นว่าเมื่อทดสอบปรับค่าดัชนีการมอดูเลตจากค่าน้อยถึงค่ามาก ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกมีค่ามากขึ้น แรงดันไฟฟ้าคายอดเพิ่มมากขึ้น และทำให้ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (THD) มีค่าน้อยลง เนื่องจากรูปแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากขึ้น วงจรต้นแบบสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกเท่ากับ 180 Vp ตามทฤษฎีข้างต้น

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Rodriguez, J., Lai, J., and Peng, F. Z. (2002). Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Control, and Applications. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 49(4), 296 – 300.
- [2] Malinowski, M., Gopakumar, K., Rodriguez, J. and Pérez, M. A. (2010). A Survey on Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 57(7), 2197 – 2206.
- [3] Bhuvaneshwari, V., HariKumar, M. E., Shakil Ahmed, A., Vinoth, R., and Singh, A. B. (2014). Multicarrier Sinusoidal PWM Technique Based Analysis of Asymmetrical and Symmetrical 3  $\Phi$  Cascaded MLI. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3(2), 2197 – 2206.
- [4] Khomfoi, S. and Tolbert, L. M. (2007). *Multilevel Power Converters Power Electronics Handbook: Device, circuits, and Applications*. (2nd ed).
- [5] สิทธิพร เจริญนนทพิสุทธิ์ แลพ วิจิตร กิณเรศ. (2546). อินเวอร์เตอร์สามระดับโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์. *วิศวกรรมสารลาดกระบัง*, 20(4), 53 – 59.