



KMUTNB

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๔๐

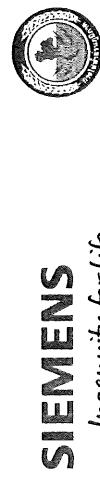
The 40th Electrical Engineering Conference (EECON - 40)

Featuring



KMUTNB Student Branch

with Special Thanks to



Volume I

PW, GN, PE

วันที่ ๑๕ - ๑๗ พฤษภาคม พ.ศ.๒๕๖๐

สถานที่ โรงแรมเตօະซາຍນ์ (The Zign Hotel) อ.บางคลະ呜 จ.ฉะบุรี



## การวิเคราะห์วิธีควบคุมและวิธีมอดูลาร์ชั่นที่ใช้งานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา

## Analysis of Control and Modulation Techniques for Three-Phase Vienna Rectifier

ผู้กรอก ศิริพันธ์, ผุดุง กิตติสว่าง, ประชา คำภักดี และ วรกร วงศ์สายเชื้อ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี kotchakorn.si.59@ubu.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีควบคุมและวิธีมอดูลาร์ชั่นที่ใช้งานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา (Vienna Rectifier) โดยเลือกวิธีควบคุมสองวิธีคือ 1. การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง 2. การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยกระแส และ เลือกวิธีมอดูลาร์ชั่นสองวิธีคือ 1. การปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมแบบเดื่องไฟส์ 2. การปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมแบบเดื่องไฟส์ ซึ่งทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทดสอบการทำงาน โดยการเปรียบเทียบค่า เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสด้านเข้า และ ค่าอัตราะลอกคลื่นของแรงดันกระแสตรง พบว่าวิธีควบคุมแบบกำลังไฟฟ้าโดยตรง ทำงานร่วมกับวิธีมอดูลาร์ชั่นแบบปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมแบบเดื่องไฟส์ ให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสตรงด้วยต่ำสุดที่ 7.77 เมอร์เซ่นต์ และ ค่าอัตราะลอกคลื่นของแรงดันกระแสตรงด้วยต่ำสุดที่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ รูปคลื่นของการจำลองยืนยันประสิทธิผลของการควบคุมและการอุดตันเพื่อการออกแบบและเลือกวิธีการที่เหมาะสมขั้นตอนการเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา

**คำสำคัญ:** การปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมแบบเดื่องไฟส์, การควบคุมโดยกระแส, การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง, การปรับความกว้างของพัลส์โดยเกตเตอร์

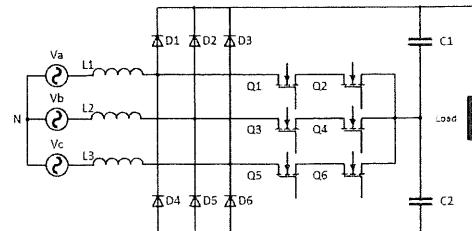
## Abstract

This paper presents control and modulation topologies for three-phase Vienna rectifier by combination of two control methods and two modulation methods. The two selected power control techniques consist of direct power control (DPC) and current control (CC) whereas the two selected modulation techniques consist of carrier-based phase-shift PWM (CBPS-PWM) and space vector PWM (SVPWM). The simulation results based on MATLAB/Simulink are used to test the percentages of total harmonic distortion of input current (THDi) and de-link ripple voltage. The results show that the three-phase Vienna rectifier is equipped with DPC and CBPWM reducing the THDi to be as small as 7.77%. Moreover, the output dc-link ripple voltage can be suppressed to be as small as 0.1%. Simulated waveforms confirm the effectiveness of controls and modulations to design and choose the appropriate methods for the three-phase Vienna rectifier.

**Keywords:** Carrier-Based Phase-Shift PWM, Current Control, Direct Power Control, Space Vector PWM

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเอาระบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) มาใช้มากขึ้น ซึ่งองค์ประกอบสำคัญในการแปลงไฟฟ้าสัมภានามไฟฟ้า เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนที่จะนำไปใช้กับวงจรเรียงกระแส หรือ วงจรเรียงกระแสโดยทั่วไปนิยมใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ไดโอด (bridge diode rectifier) ซึ่งการทำงานของวงจรนี้ จะทำให้กระแสอินพุตมีความติดเที่ยบไปจากสัญญาณรูปไวซ์น์ ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังทางด้านอินพุตมีค่าต่ำ ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนสารมอนิกส์รวม อาจจะเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ก่อให้เกิดปัญหาด้านสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งโดยทั่วไปก็เรียกโดยรวมว่า สัญญาณรบกวนสถานะแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) ซึ่งแนวทางการลดทอนสัญญาณรบกวนที่นิยมใช้คือประเภท Active PFC Systems [1]



รูปที่ ๑ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา

แนวทางการลดทอนสัญญาณรบกวนประเภท Active PFC Systems นั้น มีด้วยกัน หลายวิธี เช่น Single-Switch Rectifier, Two-Switch Rectifier, Six-Switch Rectifier แต่วิธีที่ได้รับความนิยมคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา (Vienna Rectifier) ดังรูปที่ ๑ ซึ่งเป็นวงจรชนิด Three-Level Rectifier โดยใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่สามารถทำงาน ทำให้สามารถลดการใช้จ่ายอุปกรณ์แบบซ้อนๆ อย่าง ส่งผลให้วงจรมีขนาดที่เล็กลงและประสิทธิภาพสูง ดังนั้นการเลือกวิธีที่จะใช้ควบคุมการทำงานและวิธีมอดูลาร์ชั่นที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา ที่เป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและการลดทอนสัญญาณรบกวน โดยวิธีควบคุมที่ใช้ลอดทอนสัญญาณและเพิ่มประสิทธิภาพที่นิยมใช้กับวงจร Active PFC นี้สองวิธีคือ 1. Direct Power Control เป็นการควบคุม Active Power และ Reactive Power ของระบบ ที่จะให้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูงและ %THD ต่ำ 2. Current Control เป็น

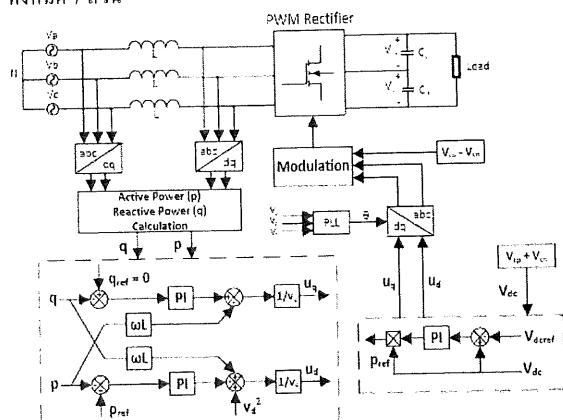
การควบคุมค่ากระแสอินพุตที่อยู่ใน Rotating Reference Frame (d-q Frame) ซึ่งมีการควบคุมที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ล่วงเวลาระบบมอคูลั่นที่มีห้องแบบ Low Switching Frequency และ High Switching Frequency ซึ่งวิธีมอคูลั่นที่เหมาะสมกับวงจร Active PFC คือ High Switching Frequency และวิธีมอคูลั่นที่นิยมกันมีสองวิธีคือ 1. Carrier-Based Phase-Shift PWM ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและให้ประสิทธิภาพสูง 2. Space Vector PWM ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิ้งได้อย่างอิสระและให้ประสิทธิภาพสูง

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการควบคุมและวิธีการมอคูลั่นที่เหมาะสมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเรียงนาฬิกา ซึ่งจะส่งผลต่อการลดตอนสัญญาณขาลงอนิภัยและการปรับปรุงค่าด้วยการควบคุมกำลังในระบบอินเวอร์เตอร์แบบไข้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสามเฟส

## 2. วิธีการควบคุมวงจรเรียงกระแสสามเฟส

### 2.1 วิธี Direct Power Control

Direct Power Control [2] ดังรูปที่ 2 เป็นวิธีควบคุมวงจรเรียงกระแสสามเฟสประเภทหนึ่งที่นิยมใช้กัน โดยที่จะทำการควบคุมค่า active power และ reactive power ของระบบซึ่งจะมีส่วนประกอบทั้งหมด 7 ส่วน



รูปที่ 2 Direct Power Control Block Diagram

1. เป็นส่วนที่แปลงแรงดันและกระแสในระบบไฟฟ้าสามเฟสให้เข้าสู่ในรูปของ Rotating Reference Frame (d-q Frame) โดยใช้หลักการของ Clarke's Transformation (1), (2), (3) และ Park's Transformation (4), (5)

$$i_a = \frac{2}{3} i_d - \frac{1}{3} (i_b - i_c) \quad (1)$$

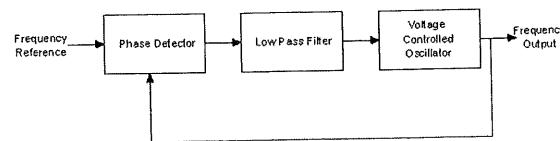
$$i_b = \frac{2}{\sqrt{3}} (i_b - i_c) \quad (2)$$

$$i_c = \frac{2}{3} (i_a + i_b) \quad (3)$$

$$i_d = i_a \cdot \cos(\theta) + i_b \cdot \sin(\theta) \quad (4)$$

$$i_q = -i_a \cdot \sin(\theta) + i_b \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

2. Phase Lock Loop ดังรูปที่ 3 ใช้สำหรับควบคุมเพื่อสอดคล้องแรงดันและกระแสอินพุตให้มีความเท่ากัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าด้วยการควบคุมกำลังที่ถูกกำหนด



รูปที่ 3 Phase Lock Loop Block Diagram

3. เป็นส่วนที่คำนวณค่า Active Power (p) (6) และ Reactive Power

(q) (7) ของระบบเพื่อที่จะนำไปควบคุมในส่วนต่อไป

$$p = v_d i_d + v_q i_q \quad (6)$$

$$q = v_q i_d - v_d i_q \quad (7)$$

4. เป็นส่วนที่ควบคุมแรงดัน DC Bus ของระบบให้มีแรงดันที่คงที่ตามที่กำหนดไว้ โดยใช้การควบคุมแบบ PI control

5. ส่วน Decoupling หลังจากคำนวณค่า active power และ reactive power แล้วนั้น ระบบต้องควบคุมให้ค่า reactive power มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อที่จะทำให้ระบบมีค่าด้วยการควบคุมกำลังเป็นหนึ่ง โดยใช้ PI control ในการควบคุม และใช้สมการ Decoupling (8), (9)

$$i_d = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) (p_{ref} - p) + \omega L q + v_d^2 \cdot \frac{1}{v_d} \quad (8)$$

$$i_q = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) (q_{ref} - q) - \omega L p \cdot \frac{1}{v_d} \quad (9)$$

6. เป็นส่วนที่แปลงแรงดันในรูปของ Rotating Reference Frame (d-q Frame) ให้กับลับเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสเพื่อที่จะนำไปใช้ในการcontrol ค่าด้วยการใช้หลักการของ Inverse Park's Transformation (10), (11) และ Inverse Clarke's Transformation (12), (13), (14)

$$i_\alpha = i_d \cdot \cos(\theta) - i_q \cdot \sin(\theta) \quad (10)$$

$$i_\beta = i_d \cdot \sin(\theta) + i_q \cdot \cos(\theta) \quad (11)$$

$$i_a = i_\alpha \quad (12)$$

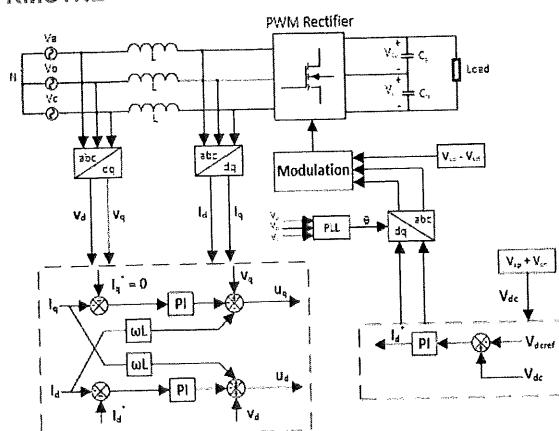
$$i_b = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta \quad (13)$$

$$i_c = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta \quad (14)$$

7. เป็นส่วนที่ควบคุมแรงดัน DC Bus ของระบบให้มีแรงดันคงที่ คร่าวม capacitor ทั้ง 2 ตัวเพื่อกัน โดยใช้ PI control ในการควบคุม

### 2.2 วิธี Current Control

Current Control [3] ดังรูปที่ 4 ที่เป็นวิธีควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีองค์ประกอบคล้ายกับวิธี Direct Power Control คือ มีส่วนแปลงแรงดันและกระแสในระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็น Rotating Reference Frame (d-q Frame), Phase Lock Loop, การควบคุมแรงดัน DC Bus, การควบคุมแรงดัน Balance Capacitor และ ส่วนที่แปลงแรงดันในรูปของ Rotating Reference Frame (d-q Frame) ให้กับลับเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟส แต่ส่วนที่จะแตกต่างกันคือ วิธีนี้จะใช้การควบคุมกระแสใน q-axis เป็นศูนย์ เพื่อที่จะทำให้ระบบมีค่าด้วยการควบคุมกำลังเป็นหนึ่ง ซึ่งมีสมการ Decoupling (15), (16)



รูปที่ ๔ Current Control Block Diagram

$$u_d = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{d,\text{ref}} - i_d) + v_d + \omega L i_q \quad (15)$$

$$u_q = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{q,\text{ref}} - i_q) + v_q - \omega L i_d \quad (16)$$

### 3. วิธีการ Modulation

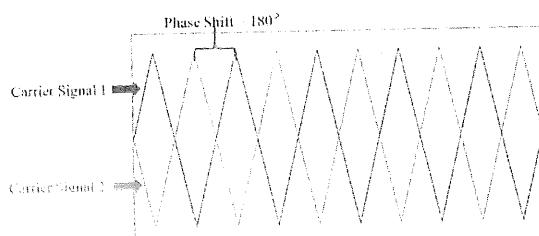
#### 3.1 วิธี Carrier-Based Phase Shift PWM

Carrier-Based Phase-Shift PWM [4] จะใช้สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Carrier Signal) ซึ่งจะมี Frequency และ Amplitude เท่ากันแต่จะต่างกันที่สัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้เปรียบเทียบนั้นจะทำการ Shift Phase กันอยู่ ดังรูปที่ 5 โดยที่การใช้งาน Carrier-Based Phase-Shift PWM จะต้องดูว่ามีไปใช้กับวงจรที่มีแรงดันก้อนเดียวหรือไม่ สำหรับวงจรที่มีแรงดันก้อนเดียวจะต้องดูว่ามีความต้องการพลังงานและจ่ายไฟที่จะนำไปใช้เท่ากับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งจะต้องเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนาให้เป็นไปตามที่กำหนด สำหรับวงจรที่มีแรงดันก้อนเดียวจะต้องดูว่ามีความต้องการพลังงานและจ่ายไฟที่จะนำไปใช้เท่ากับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งจะต้องเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนาให้เป็นไปตามที่กำหนด

$$\text{Carrier Signal} = m - 1; \quad (17)$$

$m$  = voltage level of converter

$$\theta = \frac{360^\circ}{m - 1} \quad (18)$$

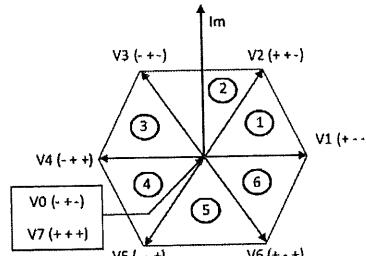


รูปที่ ๕ สัญญาณ Carrier-Based Phase-Shift ของจังหวะ Converter 3 ระดับ

#### 3.2 วิธี Space Vector PWM

Space Vector PWM [5] เป็นการใช้วิภาคเตอร์แรงดันของไฟฟ้าสามเฟสในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม โดยวิภาคเตอร์นี้มีเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิচซึ่งทำ

ให้เกิดวิภาคเตอร์แรงดันที่แตกต่างกันเป็นวิภาคเตอร์ ( $V_0-V_7$ ) และแบ่งวิภาคเตอร์แรงดันออกเป็นหกส่วน ที่ทำมุมกัน  $60^\circ$  องศา ดังรูปที่ 6



รูปที่ ๖ เวกเตอร์ทั้งหมดซึ่งเกิดจากอุปกรณ์สวิช

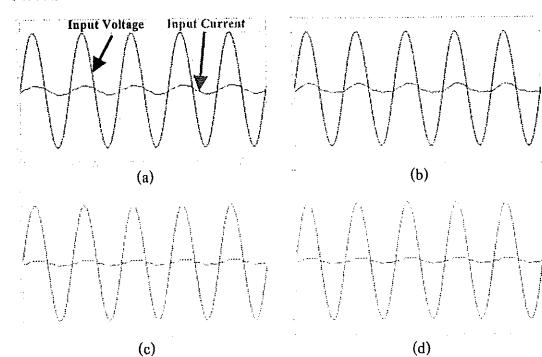
#### 4 ผลการทดสอบ

ในการทดสอบจะเป็นการทดสอบโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจะหาค่าความคุณภาพและวิธีการอุ่นเครื่องที่ส่งผลให้กระแสอินพุตมีลักษณะเป็นรูปไข่นและวัดค่า %THD ได้ตัวที่สุด ทำงานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนาโดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

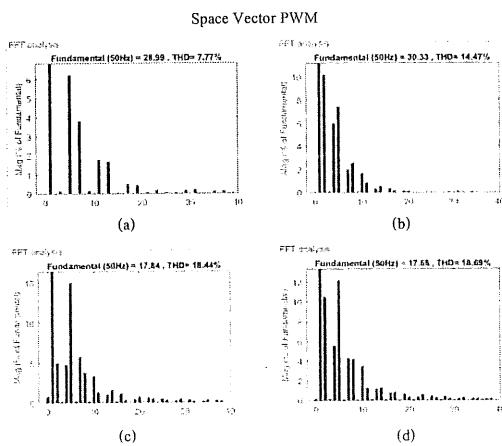
Parameters	Value
Input Voltage	380 V <sub>AC</sub>
Output Voltage	800 V <sub>DC</sub>
Output Power	10 kW
Switching Frequency	10 kHz
Inductor	8 mH
Capacitor	730 μF
Sample Time	0.00001 s

โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็นสี่แบบคือ

1. วิธีความคุณแบบ Direct Power Control กับ วิธีอุ่นเครื่องแบบ Carrier-Based Phase-Shift PWM จากผลการทดสอบดังรูปที่ 7 (a) จะพบว่า ลักษณะของกระแสอินพุตเป็นรูปไข่นแต่มีการเปลี่ยนเส้นทางระหว่างแรงดันกับกระแสอินพุตอยู่สักก้อนน้อย และมี %THD = 7.77% ดังรูปที่ 8 (a)
2. วิธีความคุณแบบ Direct Power Control กับ วิธีอุ่นเครื่องแบบ Space Vector PWM จากผลการทดสอบดังรูปที่ 7 (b) จะพบว่า ลักษณะของกระแสอินพุตเป็นรูปไข่นแต่มีการเปลี่ยนเส้นทางระหว่างแรงดันกับกระแสอินพุตอยู่สักก้อนน้อย และมี %THD = 14.47% ดังรูปที่ 8 (b)
3. วิธีความคุณแบบ Current Control กับ วิธีอุ่นเครื่องแบบ Carrier-Based Phase-Shift PWM จากผลการทดสอบดังรูปที่ 7 (c) จะพบว่า ลักษณะของกระแสอินพุตเปลี่ยนไปจากรูปไข่นและมี %THD = 18.44% ดังรูปที่ 8 (c)
4. วิธีความคุณแบบ Current Control กับ วิธีอุ่นเครื่องแบบ Space Vector PWM จากผลการทดสอบดังรูปที่ 7 (d) จะพบว่า ลักษณะของกระแสอินพุตคิดเพิ่มน้ำไปจากรูปไข่น และมี %THD = 18.69% ดังรูปที่ 8 (d)



รูปที่ ๗ แรงดันและกระแสสัมผุของการทำงานทั้งสี่วิธี (a) Direct Power Control กับ Carrier-Based Phase-Shift PWM, (b) Direct Power Control กับ Space Vector PWM, (c) Current Control กับ Carrier-Based Phase-Shift PWM, (d) Current Control กับ Space Vector PWM



รูปที่ ๘ ค่าความเพี้ยนร่วนอัตโนมัติของการทำงานทั้งสี่วิธี (a) Direct Power Control กับ Carrier-Based Phase-Shift PWM, (b) Direct Power Control กับ Space Vector PWM, (c) Current Control กับ Carrier-Based Phase-Shift PWM, (d) Current Control กับ Space Vector PWM

สามารถสรุปผลของค่าความเพี้ยนร่วนอัตโนมัติรวม (Total Harmonic Distortion: THD) ของการทดสอบทั้งสี่แบบได้ด้านตารางที่ ๑  
ตารางที่ ๑ เปรียบเทียบค่า %THD ที่ได้จากการจำลองการทำงานทั้งสี่แบบ

Modulation Control	Carrier-Based Phase Shift PWM	Space Vector PWM
Direct Power Control	7.77%	14.47%
Current Control	18.44%	18.69%

และได้ทดสอบวัด Ripple Voltage ดังรูปที่ ๙ ของ DC Bus ที่ 800 V<sub>dc</sub>

และสรุปค่า Ripple Voltage ได้ตามตารางที่ ๒

ตารางที่ ๒ เปรียบเทียบค่า Ripple Voltage ที่ได้จากการจำลองการทำงานทั้งสี่แบบ

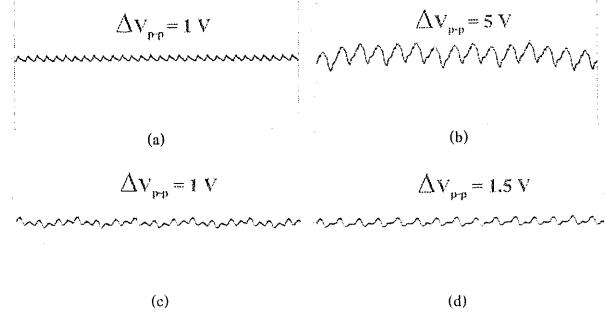
Modulation Control	Carrier-Based Phase Shift PWM	Space Vector PWM
Direct Power Control	0.1%	0.6%
Current Control	0.1%	0.19%

## 5. สรุปผลการทดสอบ

จากการจำลองการทำงานของวิธีความถี่และวิธีมอตุ เลี้ยงที่ประยุกต์ใช้บันทุจึงเรียงกระแสแบบเวียนนาเพื่อแบบ พนั่ววิธีความถี่แบบกำลังไฟฟ้าโดยตรง (DPC) ร่วมกับวิธีมอตุเลี้ยงแบบปรับ ความกว้างของหักส์โดยใช้สัญญาณสามเหลี่ยมเบล็อกเฟส (CBPS-PWM) ให้ผลของสัญญาณกระแสอินพุตมีค่าความต่อเพียงน้อยกว่าวิธีอื่น โดยมีค่าประมาณ 7.77% อีกทั้งให้ค่าอัตราการลอกคลื่นของแรงดันกระแสตรงค้านออกที่มีค่าน้อยกว่าวิธีอื่นด้วย โดยมีค่าประมาณ 0.1% ผลการจำลองสรุปคลื่นบันทุนว่าวิธีการดังกล่าวเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ กับบันทุจึงเรียงกระแสแบบเวียนนา

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Johann W. Kolar and Thomas Friedli, "The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems", IEEE Transactions on Power Electronics 2012, pp. 12-14.
- [2] Hui Ma, Yunxiang Xie, Zeyu Shi, "Improved direct power control for Vienna-type rectifiers based on sliding mode control", IEC Power Electronics 2015, pp. 2-5.
- [3] "A Controller Design of More Electric Aircraft Power Systems Using an Adaptive Tabu Search Algorithm", International Electrical Engineering Congress 2017, pp. 1-3.
- [4] Abhijit Choudhury and Sheldon S. Williamson, "Performance Comparison Study of Space-Vector and Modified-Carrier-Based PWM Techniques for a Three-Level Neutral-Point-Clamped Traction Inverter Drive", IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS 2016, pp. 2-4.
- [5] Bengi Tolunay, "Space Vector Pulse Width Modulation for Three-Level Converters - a LabVIEW Implementation", UPPSALA UNIVERSITAET, pp. 29-40.



รูปที่ ๙ DC Ripple Voltage ของการทำงานทั้งสี่วิธี (a) Direct Power Control กับ Carrier-Based Phase-Shift PWM, (b) Direct Power Control กับ Space Vector PWM, (c) Current Control กับ Carrier-Based Phase-Shift PWM, (d) Current Control กับ Space Vector PWM