

การปรับศูนย์ของสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชันสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส
IMPLEMENTATION OF THREE-PHASE CENTER-ALIGNED
SPACE VECTOR PULSEWIDTH

กัณฑ์กณ พรหมนิกร* ธีรศาสตร์ คณาศรี และ ประสิทธิ์ มงคลเกษม
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
Kantapon Phromnikorn* Teerasat Kanasri Prasit Mongkolkasem
Department of Science and Technology, Faculty of Liberal Art and Science,
Roi Et Rajabhat University

(Received: January 9, 2023; Revised: April 15, 2023; Accepted: April 20, 2023)

*ผู้ประสานงาน : ผศ.ดร.กัณฑ์กณ พรหมนิกร อีเมล : bowonp@reru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้วิธีการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ โดยใช้วิธีการแปลงจากสเปซเวกเตอร์สามระดับไปเป็นสเปซเวกเตอร์สองระดับที่ใช้งานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา (Vienna Rectifier) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์สามระดับนั้นจะมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการคำนวณค่าเวลาการสวิตช์และลำดับการสวิตช์ การเลือกใช้เทคนิคการแปลงจากสเปซเวกเตอร์สามระดับไปเป็นสเปซเวกเตอร์สองระดับโดยใช้การคำนวณหาเวลาการสวิตช์และลำดับการสวิตช์เทียบเคียงกับสเปซเวกเตอร์สองระดับซึ่งง่ายต่อการใช้งาน อีกทั้งยังใช้การควบคุมแบบ d-q เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตและแรงดันกระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่ ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตที่ 2.28% และสามารถควบคุมแรงดันกระแสตรงด้านเอาต์พุตให้คงที่ที่ 800 Vdc ที่พิกัดกำลัง 10 kW

คำสำคัญ: สเปซเวกเตอร์สามระดับ, สเปซเวกเตอร์สองระดับ, วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา, การควบคุมแบบ d-q

ABSTRACT

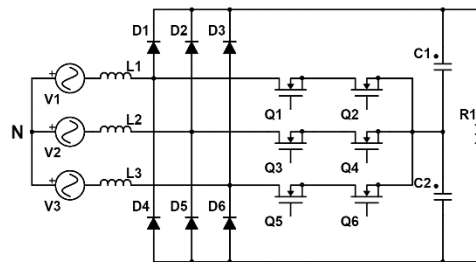
This paper presents space vector modulation by three-level space vector to two-level space vector for three-phase Vienna rectifier. Normally, Three-Level Space

Vector have more complicated to calculate switching time and sequence. Mapping three-level to two-level space vector for time equation and switching sequence is simple. D-Q control method is used to control the harmonics distortion of input current and dc-bus output voltage. The simulation results based on MATLAB/Simulink show that total harmonics distortion of input current is 2.28% and the dc-bus out voltage is regulated at 800 Vdc at the rated power 10 kW.

Keywords: Three-Level Space Vector, Two-Level Space Vector, Three-Phase Vienna Rectifier, D-Q Control.

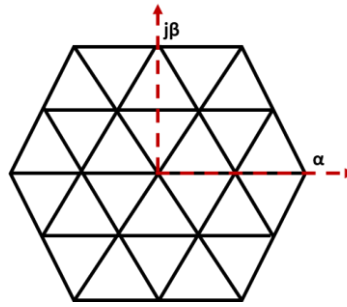
1. บทนำ

วงจรเรียงกระแสแบบเวียนนา [1] รูปที่ 1 เป็นวงจรเรียงกระแสชนิดสามเฟสและแรงดันสามระดับ ซึ่งข้อดีของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนาคือ เป็นวงจรประเภทไวงาน (Active Filter) ขนาดของวงจรกรองความถี่ที่เล็กกว่า, ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า, ให้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธีแบบ เชื้อยงาน (Passive Filter) อีกทั้งยังช่วยลดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตอีกด้วย



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา

วิธีการควบคุมวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนานั้นจะใช้วิธีควบคุมแบบ d-q และวิธีมอดูเลชั่นที่นิยมใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรเรียงกระแสแบบเวียนนาคือ สเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชั่นซึ่งเป็นสเปซเวกเตอร์สามระดับ จะประกอบไปด้วย 27 สถานะการสวิตช์และ 19 เวกเตอร์แรงดัน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงภาพสเปซเวกเตอร์สามระดับ

เนื่องจากจำนวนสถานะการสวิตช์และเวกเตอร์แรงดันที่มีจำนวนมาก ทำให้มีการคำนวณที่ซับซ้อน ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอวิธีการใช้สเปซเวกเตอร์สามระดับ ในรูปแบบการคำนวณแบบสเปซเวกเตอร์สองระดับ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะช่วยให้ง่ายต่อการคำนวณสเปซเวกเตอร์ ที่ใช้งานร่วมกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเวียนนา อีกทั้งยังคงรักษาสมรรถนะของวงจรไว้เหมือนเดิม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีควบคุมแบบ d-q [2] ดังรูปที่ 3 ซึ่งแรงดันอินพุต (V_a , V_b , V_c) และกระแสอินพุต (i_a , i_b , i_c) จะถูกแปลงจากระบบสามเฟสให้อยู่ในรูปของเฟรมอ้างอิงแบบหมุน (V_d , V_q และ i_d , i_q) โดยใช้หลักการแปลงของ คลาร์ก ดังสมการที่(1), (2), (3) และการแปลงของปาร์ค ดังสมการที่ (4), (5)

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

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

$$i_0 = \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (3)$$

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos(\theta) + i_\beta \cdot \sin(\theta) \quad (4)$$

$$i_q = -i_\alpha \cdot \sin(\theta) + i_\beta \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

โดยที่ i_d เป็นค่ากระแสที่อยู่ในแกน d ซึ่งเปรียบเสมือนค่ากำลังไฟฟ้าจริงและ i_q เป็นค่ากระแสที่อยู่ในแกน q ซึ่งเปรียบเสมือนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ จากนั้น i_d^* จะมาจากตัวควบคุม PI ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟตรง ด้านเอาต์พุต และ i_q^* จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์เพื่อที่จะควบคุมให้แค่ตัว

ประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ซึ่งทั้งกระแส i_d และ i_q จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PI ที่ใช้ในการควบคุมกระแส ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$u_d = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{dref} - i_d) + v_d + \omega L i_q \quad (6)$$

$$u_q = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{qref} - i_q) + v_q - \omega L i_d \quad (7)$$

เมื่อทำการแปลงแรงดันในรูปของเฟรมอ้างอิงแบบหมุน (d-q frame) ให้กลับเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสเพื่อที่จะนำไปใช้ในการมอดูเลชันต่อไป โดยใช้หลักการแปลงกลับของปาร์ค ดังสมการที่ (8), (9) และการแปลงกลับของคลาร์ก ดังสมการที่ (10), (11), (12)

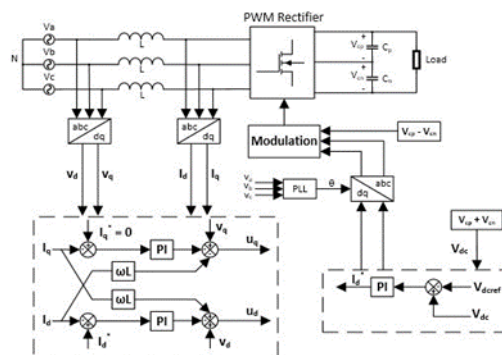
$$i_\alpha = i_d \cdot \cos(\theta) - i_q \cdot \sin(\theta) \quad (8)$$

$$i_\beta = i_d \cdot \sin(\theta) + i_q \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

$$i_a = i_\alpha \quad (10)$$

$$i_b = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta \quad (11)$$

$$i_c = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta \quad (12)$$



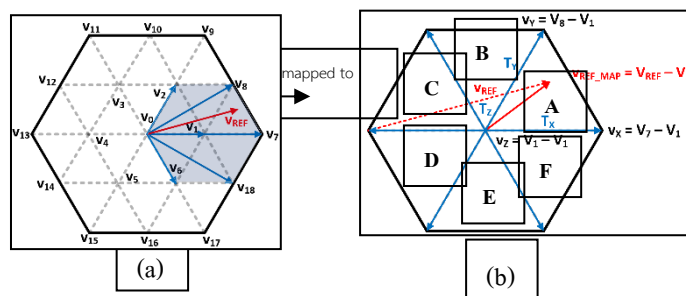
รูปที่ 3 แผนภาพการควบคุมแบบ d-q

3. วิธีดำเนินการวิจัย

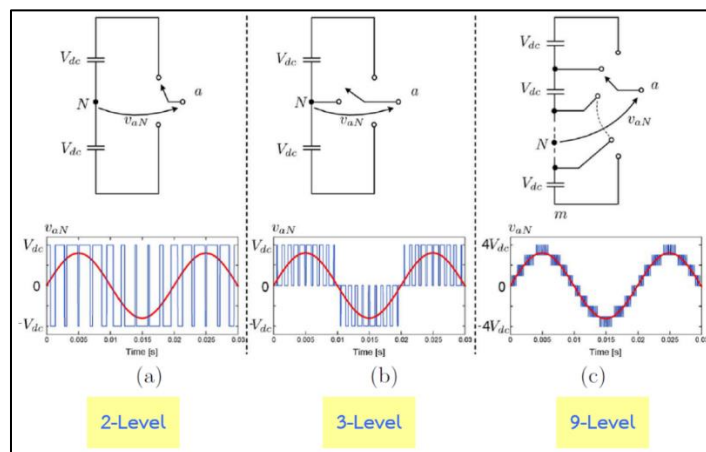
วิธีการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์สามระดับเป็นสเปซเวกเตอร์สองระดับ

3.1 การเปลี่ยนจุดเริ่มต้นของสเปซเวกเตอร์สามระดับ

วิธีการนี้จะเป็นการเปลี่ยนจุดเริ่มต้น (v_0) ของสเปซเวกเตอร์สามระดับ [3] ดังรูปที่ 4 (a) ซึ่งประกอบไปด้วย 19 เวกเตอร์แรงดัน แบ่งเป็นเวกเตอร์ศูนย์ (v_0) มีขนาดเท่ากับศูนย์, เวกเตอร์ขนาดเล็ก ($v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$) มีขนาดเท่ากับ $V_{dc}/3$, เวกเตอร์ขนาดกลาง ($v_8, v_{10}, v_{12}, v_{14}, v_{16}, v_{18}$) มีขนาดเท่ากับ $\sqrt{3}V_{dc}/3$ และเวกเตอร์ขนาดใหญ่ ($v_7, v_9, v_{11}, v_{13}, v_{15}, v_{17}$) มีขนาดเท่ากับ $2V_{dc}/3$ ไปยังเวกเตอร์ขนาดเล็ก $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$ ซึ่งจะทำให้สเปซเวกเตอร์มีรูปร่างคล้ายกับสเปซเวกเตอร์สองระดับ ดังรูปที่ 4 (b) จะสามารถหาเวกเตอร์แรงดันอ้างอิง ดังสมการที่ (13) และ (14)



รูปที่ 4 (a) เวกเตอร์แรงดันอ้างอิงในสเปซเวกเตอร์สามระดับ, (b) เวกเตอร์แรงดันอ้างอิงหลังจากย้ายจุดเริ่มต้นในสเปซเวกเตอร์สองระดับ



รูปที่ 5 คลื่นแรงดันเอาต์พุตของตัวแปลงผันแรงดัน

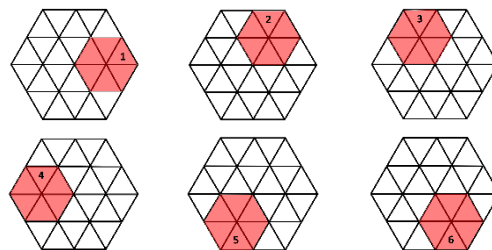
$$T_x V_x + T_y V_y + T_z V_z = T_s V_{REF_MAP} \quad (13)$$

$$T_x + T_y + T_z = T_s$$

(14)

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \frac{T_s}{2} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{(n-1)\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{(n-1)\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

ซึ่งสามารถแบ่งเซกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์สามระดับออกเป็นสเปซเวกเตอร์สองระดับ 6 เซกเตอร์ [4] ดังรูปที่ 6 และจะได้ขนาดของ v_z ในแต่ละ เซกเตอร์ ตามตารางที่ 1



รูปที่ 6 แบ่งสเปซเวกเตอร์สามระดับเป็น 6 เซกเตอร์

ตารางที่ 1 ตำแหน่งเวกเตอร์ศูนย์ของแต่ละเซกเตอร์และขนาด

เซกเตอร์	ตำแหน่งเวกเตอร์ศูนย์	ขนาดของ V_z
1	V1	$V_{dc}/3$
2	V2	$V_{dc}/6$
3	V3	$-V_{dc}/6$
4	V4	$-V_{dc}/3$
5	V5	$-V_{dc}/6$
6	V6	$V_{dc}/6$

3.2 การคำนวณค่าเวลาดีวีไอซ์เคล T_x, T_y, T_z

สามารถใช้สมการหาค่าเวลาดีวีไอซ์เคล [5] แบบเดียวกับสเปซเวกเตอร์สองระดับ ได้ตั้งสมการที่ (15) เมื่อ n คือเซกเตอร์ย่อย 1-6 ของสเปซเวกเตอร์สองระดับและ T_s คือเวลาการสุ่ม

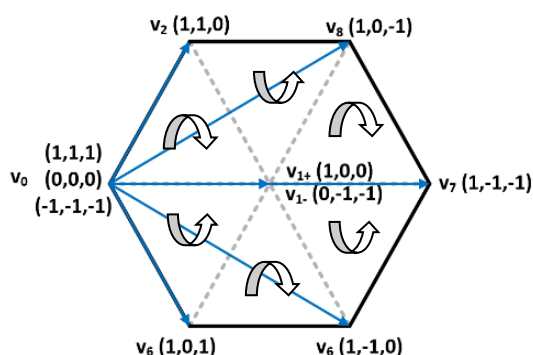
ดังนั้นเมื่อคำนวณค่าเวลาดิวตี้ไซเคิลแล้วจะได้ดังสมการที่ (16), (17) และ (18) และสามารถสรุปค่าตำแหน่งของเวกเตอร์ และเวลาดิวตี้ไซเคิล ของแต่ละเซกเตอร์ย่อยในเซกเตอร์ 1 ได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปค่าตำแหน่งของเวกเตอร์ และเวลาดิวตี้ไซเคิลของเซกเตอร์ 1

เซกเตอร์ย่อย	ตำแหน่งของเวกเตอร์			เวลาดิวตี้ไซเคิล		
	V_x	V_y	V_z	T_x	T_y	T_z
A	$V_7 - V_1$	$V_8 - V_1$	$V_1 - V_1$	Z	X	$T_5 - X - Z$
B	$V_8 - V_1$	$V_2 - V_1$	$V_1 - V_1$	Y	-Z	$T_5 - Y + Z$
C	$V_2 - V_1$	$V_0 - V_1$	$V_1 - V_1$	X	-Y	$T_5 - X + Y$
D	$V_0 - V_1$	$V_6 - V_1$	$V_1 - V_1$	-Z	-X	$T_5 + Z + X$
E	$V_6 - V_1$	$V_{18} - V_1$	$V_1 - V_1$	-Y	Z	$T_5 + Y - Z$
F	$V_{18} - V_1$	$V_7 - V_1$	$V_1 - V_1$	-X	Y	$T_5 + X - Y$

3.3 การกำหนดลำดับการสวิตช์

การกำหนดลำดับการสวิตช์ในสเปซเวกเตอร์สองระดับจะใช้วิธีการสมมาตรของเวกเตอร์ [6] เช่น ลำดับการสวิตช์ของเซกเตอร์ย่อย 1 ในเซกเตอร์ 1 ดังแสดงในรูปที่ 7 จะมีลำดับการสวิตช์ดังสมการที่ (19)



รูปที่ 7 ลำดับการสวิตช์ของเซกเตอร์ 1

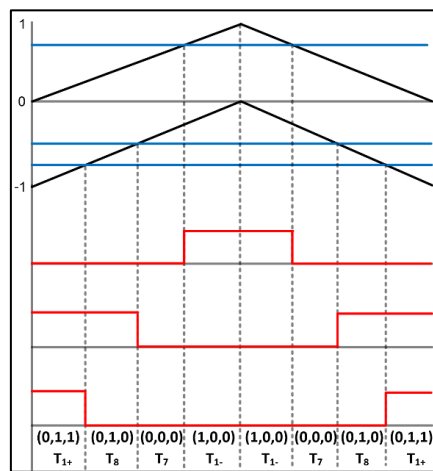
และกำหนดเงื่อนไขการมอดูเลชั่นจากทิศทางของกระแสด้านอินพุตอย่างเช่นในเซกเตอร์ 1 กระแสใน phase A จะมีค่าเป็นบวกดังนั้นจะมอดูเลชั่นกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีค่าเป็นบวก และ กระแสใน

phase B และ phase C จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจะมอดูเลชั่นกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีค่าเป็นลบดังรูปที่ 8

$$X = 2\sqrt{3}V_y \times \frac{T_s}{V_{dc}} \quad (16)$$

$$Y = 3V_x + \sqrt{3}V_y \times \frac{T_s}{V_{dc}} \quad (17)$$

$$Z = 3V_x - \sqrt{3}V_y \times \frac{T_s}{V_{dc}} \quad (18)$$



รูปที่ 8 การมอดูเลชั่นในเซกเตอร์ย่อย 1 ของเซกเตอร์ 1

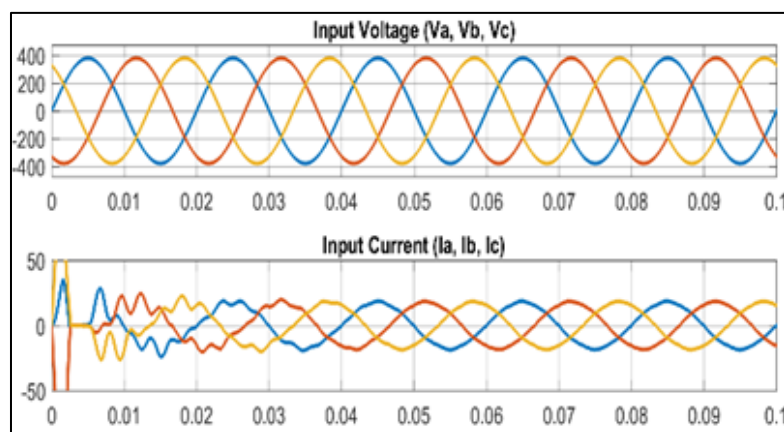
4. ผลการทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อดูการทำงานที่ส่งผลให้กระแสอินพุตมีลักษณะเป็นรูปไซน์, การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุต และวัดค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสด้านอินพุต โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

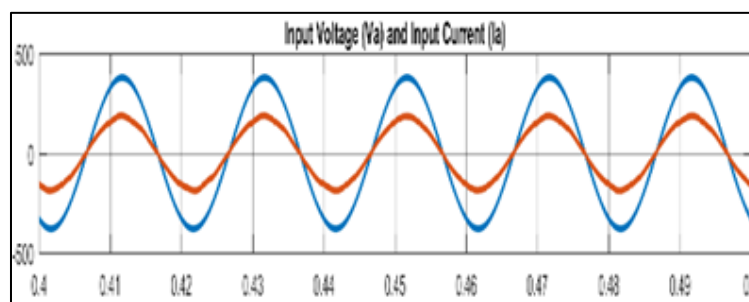
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์

Parameters	Value
Input Voltage	380 V _{AC}
Output Voltage	800 V _{DC}
Output Power	10 kW
Switching Frequency	20 kHz
Inductor	3 mH
Capacitor	220 uF
Sample Time	0.000001 s

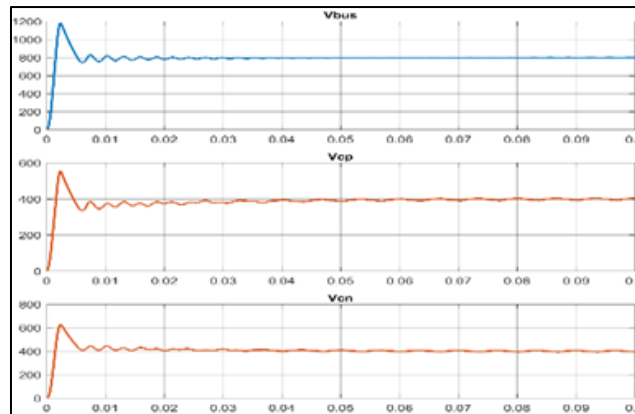
จากรูปที่ 9 แรงดันด้านอินพุต (V_a , V_b , V_c) และ กระแสด้านอินพุต (I_a , I_b , I_c) ซึ่งกระแสด้านอินพุตนั้นถูกควบคุมจากการมอดูเลชั่นทำให้มีลักษณะเป็นรูปไซน์ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตต่ำ และจากรูปที่ 10 แรงดันด้านอินพุต(V_a) และกระแสด้านอินพุต (I_a) ไม่เกิดการเหลื่อมเฟสกันทำให้และแรงดัน line-line แสดงเป็นแรงดันสามระดับดังรูปที่ 12 ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตแล้วพบว่ามีค่าความผิดเพี้ยนอยู่ที่ 2.28% ดังรูปที่ 13



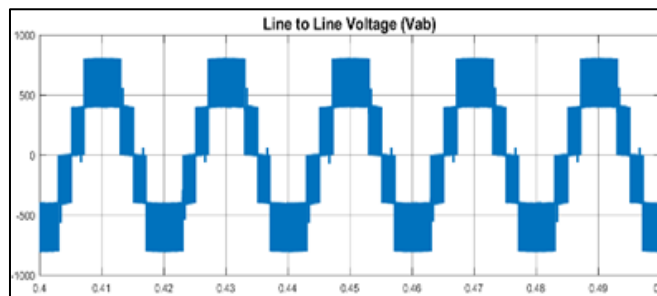
รูปที่ 9 แรงดันด้านอินพุต (V_a , V_b , V_c) และกระแสด้านอินพุต (I_a , I_b , I_c)



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแรงดันด้านอินพุต (V_a) กับกระแสด้านอินพุต (I_a)

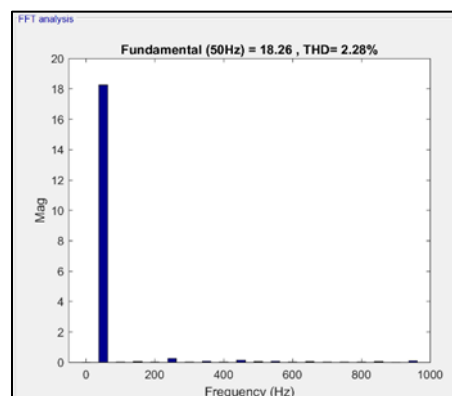


รูปที่ 11 แรงดันด้านเอาต์พุต (Vbus), แรงดันที่ตัวเก็บประจุเอาต์พุต (Vcp) และแรงดันที่ตัวเก็บประจุเอาต์พุต (Vcn)



รูปที่ 12 แรงดัน line-line (Vab)

$$V_{1+} - V_8 - V_7 - V_{1-} - V_{1-} - V_7 - V_8 - V_{1+} \quad (19)$$



รูปที่ 13 ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุต

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการมอดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดมอดูเลชันของวงจรคอนเวอร์เตอร์สามระดับในวงจรเรียงกระแสแบบเวียนนา โดยใช้สเปซเวกเตอร์สามระดับเป็นสเปซเวกเตอร์สองระดับ ซึ่งสเปซเวกเตอร์สามระดับโดยทั่วไปนั้นจะมีการคำนวณที่ซับซ้อน โดยวิธีนี้จะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณโดยใช้การคำนวณค่าเวลาตัวชี้เซลล์และการกำหนดลำดับการสวิตช์เช่นเดียวกับวิธีสเปซเวกเตอร์สองระดับและยังสามารถลดค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสด้านอินพุตให้มีค่าต่ำเพียง 2.28% อีกทั้งยังสามารถรักษาระดับแรงดันกระแสตรงด้านเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ที่ 800Vdc

เอกสารอ้างอิง

- [1] Johann, W. K. and Thomas F. (2012). The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 28(1), 12-14.
- [2] June-Seok, L. and Kyo-Beum, L. (2016). A Novel Carrier-Based PWM Method for Vienna Rectifier With a Variable Power Factor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 63(1), 1-2.
- [3] Hui, M., Yunxiang, X. and Zeyu, S. (2015). Modeling and Direct Power Control Method of Vienna Rectifiers Using the Sliding Mode Control Approach, **Journal of Power Electronics**. 15(1), 7-11.
- [4] Vieri, X. (2012). Center-Aligned SVPWM Realization for 3-Phase 3-Level Inverter, **Texas Instruments Application Report**, pp. 1-11.
- [5] Bengi, T. (2012). **Space Vector Pulse Width Modulation for Three-Level Converters - a LabVIEW Implementation**. Retrieved from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:504868/fulltext01>.
- [6] Hui, M., Yunxiang, X. and Zeyu, S. (2018). Neutral-point Balancing Control of Vienna-type rectifier based on Correlation between Carrier-based PWM and SVM. In **Proceedings of 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, pp. 547-552. Pattaya, Thailand: IEEE.

