

การพัฒนาการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะ สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

Development of a Carrier-Based PWM for Three-Level Inverters

ไพบุลย์ เกียรติสุขคนธา¹ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์²

¹ ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ บทความได้ขยายทฤษฎีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ที่ใช้มุมมองการสร้างความดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาพัฒนาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ นอกจากนั้นยังได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับ เมื่อประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์ในทำนองเดียวกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตที่ได้พัฒนาสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในเชิงการแปลงแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรงในลักษณะเดียวกับการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สองระดับ

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์สองระดับ, อินเวอร์เตอร์สามระดับ, การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ, การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

Abstract

This paper presents development of a carrier-based PWM for three-level inverters. In this paper, the theory of a carrier-based PWM of two-level inverters, as viewpoint of the reference voltages which are the command output voltages and the addition of zero voltage, is considered for three-level inverters. Moreover, the modulation pattern of three-level inverters is also shown that zero voltage had been applying in the same way of the space-vector modulation of two-level inverters. The research results reveal that the developed PWM can be shown the behavior of voltage conversion and straightforward to the relationship between command output voltages and reference voltages.

Keywords : Two-level inverters, Three-level inverters, Carrier-based modulation, Space-vector modulation

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์สองระดับเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม การสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ นิยมใช้วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) เนื่องจากสามารถสร้างแรงดันด้านออก ณ ขณะหนึ่ง และยังให้ดัชนีการมอดูเลตมีค่าสูงสุดอีกด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัย[1][2]ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ด้วยการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมทำให้การมอดูเลตทำได้โดยง่ายและใช้การคำนวณน้อยลง นอกจากนี้ยังเห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ต้องการสร้างกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรง

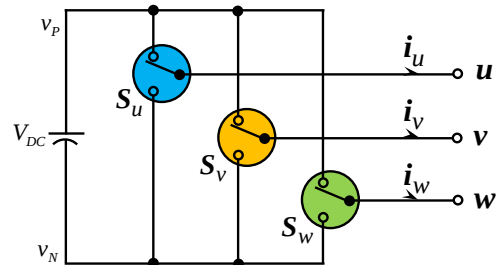
อินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่ไม่สามารถทนแรงดันสูงๆได้ แรงดันไฟตรงด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันบัสไฟตรง ทำให้ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีแรงดันตกคร่อมเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันบัสไฟตรงเท่านั้น นอกจากนี้ในกรณีที่ขนาดแรงดันด้านเข้าเท่ากับอินเวอร์เตอร์สามระดับ จะมีความผิดเพี้ยนของแรงดันด้านออกน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับ อย่างไรก็ตามการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับไม่สามารถใช้การมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สองระดับได้โดยตรง ดังนั้นงานวิจัย[3][4]ได้พัฒนาการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยขยายแนวคิดจากการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับ แต่วิธีการมอดูเลตดังกล่าวยังมีความซับซ้อนและใช้การคำนวณค่อนข้างมาก รวมทั้งไม่เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ต้องการสร้างกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรง

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยมีประเด็นหลักที่จะนำเสนอ ดังนี้

- ขยายทฤษฎีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ที่ใช้การคำนวณน้อยและใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาพัฒนาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

- แสดงการประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์ในการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับกับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

2. การมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ



รูปที่ 1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สองระดับ

2.1 โครงสร้างและรูปสมการทั่วไปของอินเวอร์เตอร์สองระดับ

อินเวอร์เตอร์สองระดับมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกได้ดังสมการที่ (1) - (2)

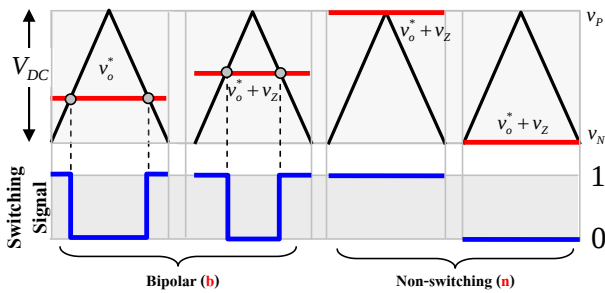
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_z \\ v^* + v_z \\ w^* + v_z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \\ m_{31} & m_{32} \end{bmatrix}}_{M_{3 \times 2}} \begin{bmatrix} v_P \\ v_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^2 m_{ij} = 1, i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, 2\} \quad (2)$$

ในที่นี้ v_P, v_N คือแรงดันบัสไฟตรงด้านเข้าค่าบวกและค่าลบ ตามลำดับ u^*, v^*, w^* คือแรงดันด้านออกคำสั่ง m_{ij} คือฟังก์ชันการมอดูเลตและ v_z คือแรงดันลำดับศูนย์

2.2 การสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาหะ

การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอินเวอร์เตอร์สองระดับ การมอดูเลตแบบนี้จะสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์โดยอาศัยสัญญาณอ้างอิงเปรียบเทียบกับรูปคลื่นพาหะสามเหลี่ยม โดยทั่วไปรูปคลื่นพาหะและสัญญาณอ้างอิงมักจะมีขนาดหนึ่งหน่วย แต่ในบทความนี้รูปคลื่นพาหะที่ใช้ในการอธิบายแนวคิดการมอดูเลตจะมีค่าสูงสุดและต่ำสุดตามค่าแรงดันด้านเข้าหรือแรงดันบัสไฟตรง โดยสัญญาณอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับแรงดันด้านออกที่ต้องการสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2



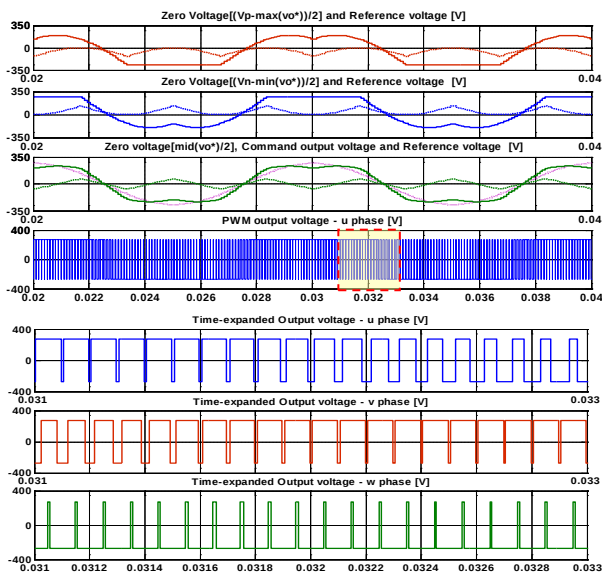
รูปที่ 2 การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ

รูปที่ 2 แสดงการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ จะเห็นได้ว่ากรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับ จะให้รูปแบบการมอดูเลตที่เป็นไปได้เพียง 2 รูปแบบเท่านั้น คือแบบไม่สวิตช์ (non-switching) และแบบสองขั้ว (bipolar)

2.3 การบวกแรงดันลำดับศูนย์สำหรับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

การมอดูเลตที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับคือการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ ดังนั้นในที่นี้จะเลือกแรงดันลำดับศูนย์ v_z ที่ให้รูปแบบการสวิตช์เหมือนกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ซึ่งจะได้ตามสมการที่ (4) และสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 3

$$v_z = \frac{[v_p - \max(u^*, v^*, w^*)]}{2} + \frac{[v_N - \min(u^*, v^*, w^*)]}{2} = \frac{\text{mid}(u^*, v^*, w^*)}{2} \quad (4)$$



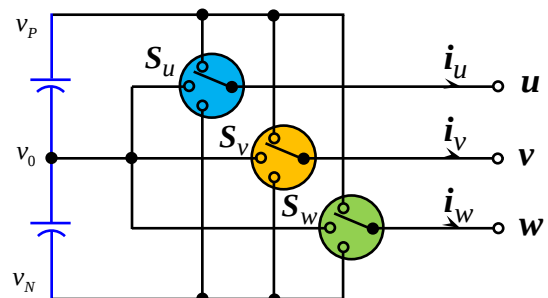
รูปที่ 3 รูปคลื่นการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่สมมูลกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์

รูปที่ 3 แสดงรูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ในการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการบวกแรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (4) ในการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ จะให้รูปแบบการสวิตช์เหมือนกับวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แต่วิธีการมอดูเลตแบบนี้จะไม่ซับซ้อนและใช้การคำนวณน้อยกว่า

3. การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

3.1 โครงสร้างและรูปสมการทั่วไปของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบครึ่งจุดนิวทริลมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ 9 ตัว ทำหน้าที่สร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการ แรงดันไฟตรงสามระดับด้านเข้าจะได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันบัสไฟตรง



รูปที่ 4 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบครึ่งจุดนิวทริล

จากรูปที่ 4 จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกกับด้านเข้าในรูปของเมทริกซ์การมอดูเลตดังสมการที่ (5)

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_z \\ v^* + v_z \\ w^* + v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_0 \\ v_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^3 m_{ij} = 1, i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, 2, 3\} \quad (6)$$

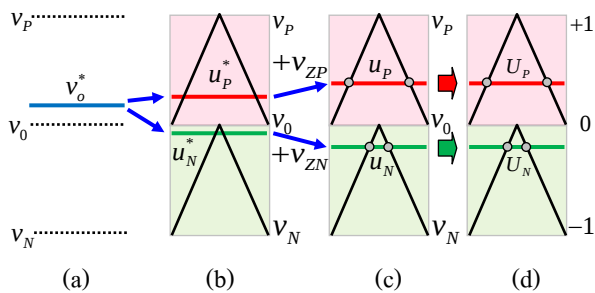
3.2 แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งบนฐานคลื่นพาหะแบบขั้วคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าสวิตช์ในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมี 3 ตัว ซึ่งแตกต่างจากกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่มีเพียง 2 ตัว ดังนั้นการมอดูเลตในกรณีนี้คลื่นพาหะและแรงดันอ้างอิงที่นำมาเปรียบเทียบเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์จึงต้องมีสองชุด ซึ่งเราจะเรียกลักษณะอย่างนี้ว่า “การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบขั้วคู่” [5]

ดังแสดงในรูปที่ 5 การมอดูเลตแบบนี้มักถูกมองเป็นแค่เทคนิคในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์เท่านั้น จึงไม่สามารถมองเห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการกับสัญญาณอ้างอิงได้โดยตรง ดังนั้นหากเราขยายแนวคิดการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับที่ใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาพัฒนาใช้กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบข้าวคู่ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ จะทำให้สามารถมองเห็นพฤติกรรมในเชิงการสร้างแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการ v_o^* กับสัญญาณอ้างอิง U_p, U_n ได้โดยตรง ค่าแรงดันอ้างอิง u_p, u_n และค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_{zp}, v_{zn} จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (7)

$$u_p = u_p^* + v_{zp}, \quad u_n = u_n^* + v_{zn} \quad (7)$$

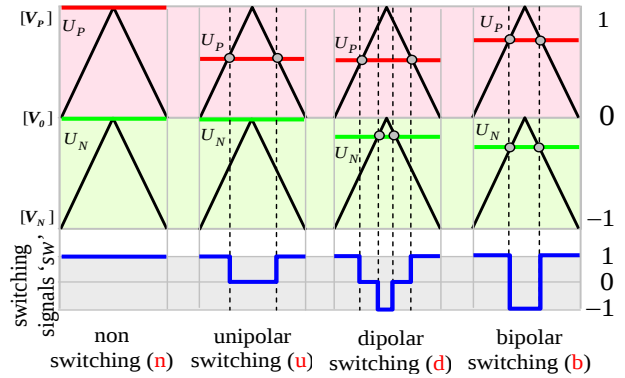
โดยที่ $v_o^* = u_p^* + u_n^*$ และ $v_z = v_{zp} + v_{zn}$



รูปที่ 5 แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันด้านออกคำสั่งในการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบข้าวคู่

รูปที่ 5 แสดงการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบข้าวคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับซึ่งสามารถอธิบายแนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งได้ดังนี้ แรงดันด้านออกคำสั่ง v_o^* ตามรูปที่ 5(a) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือแรงดันคำสั่งบวก u_p^* ซึ่งสร้างจากบัสบวกและแรงดันคำสั่งลบ u_n^* ซึ่งสร้างจากบัสลบ ดังแสดงในรูปที่ 5(b) เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ v_{zp} กับแรงดันคำสั่งบวก u_p^* จะทำให้แรงดันอ้างอิง u_p เลื่อนขึ้นหรือลงอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ในทำนองเดียวกันแรงดันคำสั่งลบ u_n^* เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ v_{zn} ที่เหมาะสมจะทำให้แรงดันอ้างอิง u_n เลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการเช่นเดียวกัน การบวก v_{zp}, v_{zn} ตามรูปที่ 5(c) จะมีอิสระต่อกัน และเมื่อนำแรงดันอ้างอิง u_p และ u_n ในรูปที่ 5(c)

มาทำเป็นค่าปกติ (normalized) จะได้สัญญาณอ้างอิง U_p, U_n ที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะแบบข้าวคู่ขนาดหนึ่งหน่วยตามรูปที่ 5(d) การเลื่อน U_p, U_n ไปยังตำแหน่งต่างๆ จะได้รูปแบบการมอดูเลตแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปแบบการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

รูปที่ 6 แสดงรูปแบบการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบข้าวคู่ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_{zp}, v_{zn} ต่างกันจะทำให้ได้รูปแบบการมอดูเลตแตกต่างกัน 4 รูปแบบคือ แบบไม่สวิตช์ (Non-Switching) แบบข้าวเดี่ยว (Unipolar Switching) แบบข้าวคู่ (Dipolar Switching) และแบบสองข้าว (Bipolar Switching)

3.3 การประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

รูปสมการทั่วไปของการมอดูเลต $\mathbf{M}$ สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับในสมการที่ (5) หากแยกเทอมของฟังก์ชันการมอดูเลตแรงดันลำดับศูนย์ออกจากฟังก์ชันการมอดูเลตจะได้

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}' + \mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} m'_{ij} \end{bmatrix} + \mathbf{M}_0 \quad (8)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{M}' = \frac{1}{v_p^2 + v_0^2 + v_n^2} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_0 \\ v_n \end{bmatrix}^T \text{ และ } \mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ X & Y & Z \\ X & Y & Z \end{bmatrix}$$

เมื่อนำรูปสมการทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}$ จากสมการที่ (8) แทนในสมการที่ (5) และนำแรงดันด้านออกและด้านเข้าเทียบกับจุดกึ่งกลางบัสจะได้

$$\begin{bmatrix} u - v_0 \\ v - v_0 \\ w - v_0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m'_{11} + X \\ m'_{21} + X \\ m'_{31} + X \end{bmatrix}}_{u_p} (v_p - v_0) + \underbrace{\begin{bmatrix} m'_{13} + Z \\ m'_{23} + Z \\ m'_{33} + Z \end{bmatrix}}_{u_n} (v_n - v_0) \quad (9)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} m'_{11} \\ m'_{21} \\ m'_{31} \end{bmatrix} = \frac{v_P}{\sqrt{v_P^2 + v_0^2 + v_N^2}} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} m'_{13} \\ m'_{23} \\ m'_{33} \end{bmatrix} = \frac{v_N}{\sqrt{v_P^2 + v_0^2 + v_N^2}} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}$$

และแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_{ZN} ในสมการที่ (7) หาได้จาก

$$v_{ZP} = X[v_P - v_0], \quad v_{ZN} = Z[v_N - v_0] \quad (10)$$

ในที่นี้จะเลือกค่า x, z น้อยที่สุดที่ทำให้เงื่อนไข $0 \leq m_{ij} \leq 1$ เป็นจริง ซึ่งจะได้ตามสมการที่ (11) และสามารถแสดงตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง $\mathbf{M}$ ได้ดังรูปที่ 7

$$X = -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}), \quad Z = -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \quad (11)$$

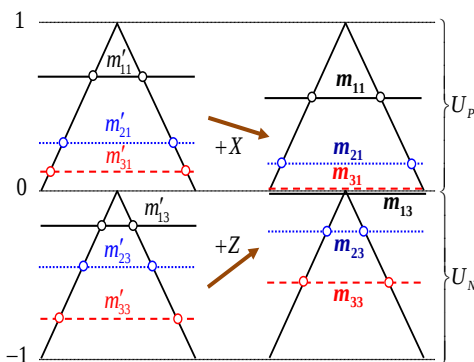
เมื่อนำสมการที่ (11) แทนในสมการที่ (10) จะได้แรงดันลำดับศูนย์

$$\left. \begin{aligned} v_{ZP} &= -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31})(v_P - v_0) \\ &= \frac{-v_P}{\|v_i\|^2} \min[v_o^*](v_P - v_0) \\ &= -\frac{1}{2} \min[v_o^*]; (\text{if } v_0 = 0, v_P = v_N) \end{aligned} \right\} \quad (12.1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{ZN} &= -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33})(v_N - v_0) \\ &= \frac{-v_N}{\|v_i\|^2} \max[v_o^*](v_N - v_0) \\ &= -\frac{1}{2} \max[v_o^*]; (\text{if } v_0 = 0, v_P = v_N) \end{aligned} \right\} \quad (12.2)$$

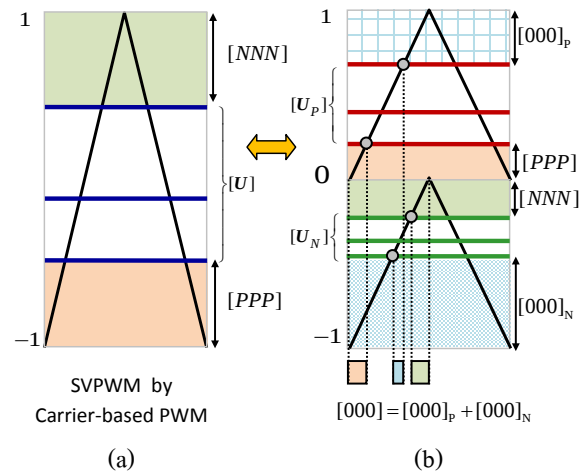
และผลรวมของแรงดันลำดับศูนย์

$$v_Z = v_{ZP} + v_{ZN} = \frac{1}{2} \text{mid}(u^*, v^*, w^*) \quad (13)$$



รูปที่ 7 ตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิงเมื่อเลือกค่า x, z น้อยที่สุด

จากสมการที่ (13) จะเห็นว่าผลรวมแรงดันลำดับศูนย์ v_Z จะเหมือนกับสมการที่ (4) ของอินเวอร์เตอร์สองระดับและหากนำแรงดันอ้างอิง u_P, u_N ของอินเวอร์เตอร์สามระดับมารวมกันจะได้แรงดันอ้างอิงเหมือนกับกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเลือกค่า x, z น้อยที่สุดตามสมการที่(11) จะทำให้ผลรวมของแรงดันลำดับศูนย์เหมือนกับกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับ



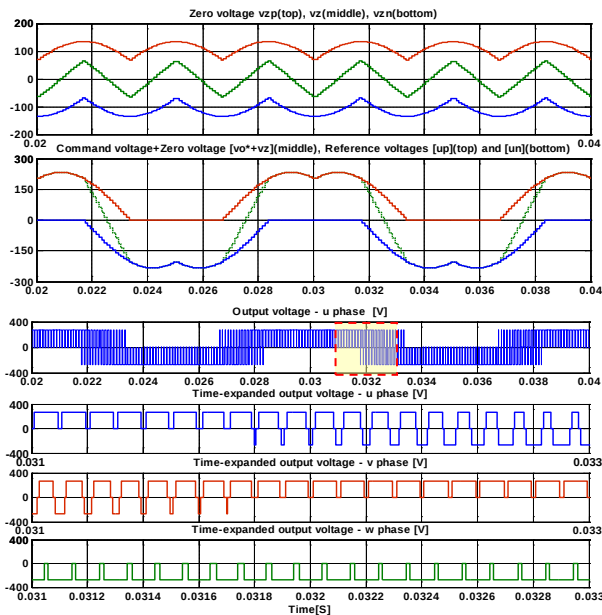
รูปที่ 8 การใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับและสามระดับบนมุมมองของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ

รูปที่ 8 แสดงการใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับและสามระดับบนมุมมองของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ จากแนวคิดการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับหากพิจารณาตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง $[U]$ ดังแสดงในรูปที่ 8(a) จะพบว่าเป็นกรณีที่ใช้เวกเตอร์ศูนย์ “PPP” และ “NNN” เท่านั้น ส่วนในกรณีของอินเวอร์เตอร์สามระดับตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง $[U_P], [U_N]$ ที่สอดคล้องกับการใช้เวกเตอร์ศูนย์ “PPP” “000” และ “NNN” สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8(b) และหากพิจารณาการมอดูเลตในรูปที่ 7 จะพบว่าเป็นกรณีที่ใช้เวกเตอร์ศูนย์ “000” เท่านั้น

3.4 ผลการจำลองการทำงาน

รูปที่ 9 แสดงผลการจำลองการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับ บนสุดคือแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_Z และ v_{ZN} ตามลำดับ ถัดมาคือแรงดันอ้างอิง u_P, u_N และ u ที่ขั้วสุดท้ายคือแรงดันด้านออก เมื่อพิจารณาในส่วนขยายสเกลเวลาในรูปที่ 3

และ 8 จะเห็นได้ว่าในกรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับจะได้รูปแบบการมอดูเลตแบบสองชั่วทั้งสามเฟส<3b> แต่ในกรณีของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะได้การมอดูเลตเป็นแบบชั่วเดียว 2 เฟสและแบบชั่วคู่ 1 เฟส <2u1d> [6] อย่างไรก็ตาม รูปแบบการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับสามารถสร้างได้อีกหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_{ZN}

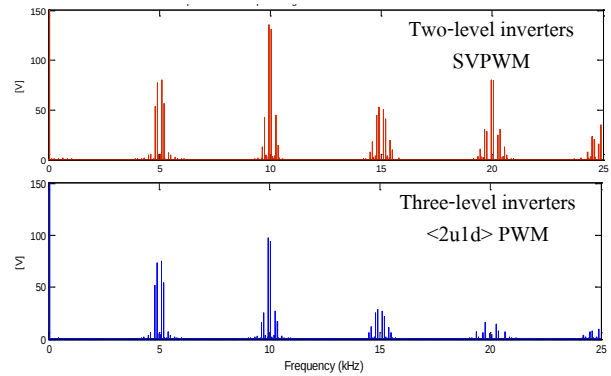


รูปที่ 8 รูปคลื่นการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบชั่วคู่ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะ

	อินเวอร์เตอร์	
	สองระดับ	สามระดับ
แรงดันอ้างอิง	u	u_p, u_n
แรงดันลำดับศูนย์	v_z	v_{ZP}, v_{ZN}
คลื่นพาหะ	1 ชั่ว	2 ชั่ว
รูปแบบการมอดูเลตที่เป็นไปได้	<1n2b> และ <3b>	<2u1d>, <1n2d>, <1u1b1d>, <3d>, ฯลฯ
จำนวนครั้งการสวิตช์	4, 6 ครั้ง	8, 12 ครั้ง

จากแนวคิดที่ได้พัฒนาการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับมาเป็นการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะแบบชั่วคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับสามารถแสดงการเปรียบเทียบทั้งสองกรณีได้ดังตารางที่ 1 และสามารถแสดงสเปกตรัมแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สองระดับและสามระดับได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 สเปกตรัมของแรงดันด้านออกสำหรับการมอดูเลตแบบ<3b> และ <2u1d> ที่ดัชนีการมอดูเลต $q=0.8$

4. สรุป

บทความนี้ได้พัฒนาการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยขยายแนวคิดการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์สองระดับ ที่ใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์มาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับ นอกจากนั้นยังได้แสดงการประยุกต์ใช้แรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สองระดับมาใช้กับอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแนวคิดที่นำเสนอสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในเชิงการแปลงแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการกับแรงดันอ้างอิงได้โดยตรงในลักษณะเดียวกันกับอินเวอร์เตอร์สองระดับ และที่สำคัญแนวคิดนี้ยังสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้อีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Blasko, "Analysis of a hybrid PWM based on modified space-vector and triangle-comparison method," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, pp. 756-764, May/June, 1997.
- [2] K. Zhou and D. Wang, "Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier based PWM: A comprehensive analysis," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 1, pp. 186-196, Feb. 2002.
- [3] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A comprehensive study of neutral point voltage balancing problem in three level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, pp. 242-249, Mar. 2000.
- [4] S. B. Monge, et al., "Capacitor voltage balance for the neutral point clamped converter using the virtual space vector concept with optimized spectral performance," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 22, no. 4, pp. 1128-1135, July. 2007.
- [5] B. Velaerts, et al., "A novel approach to the generation and optimization of three-level PWM waveforms for three-level inverters," in Proc. of PESC, vol. 2, pp. 1255-1262, April. 1988.
- [6] A. Saengseethong and S. Sangwongwanich, "A new modulation strategy for capacitor voltage balancing in three-level NPC inverters based on matrix converter theory," in Proc. of IPEC-Sapporo, pp. 2358-2365, June. 2010.