

การออกแบบ สร้าง และพัฒนา 3-เฟส เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

วิโชค โห้ทองคำ¹ และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ²

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการของวงจร 3-เฟส พีดีบีบลิวเอ็ม เอช-เอช เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้ IGBT-Diode ที่สามารถให้กระแสไหลได้สองทิศทางจำนวนรวม 9 ชุด เป็นอุปกรณ์สวิตช์ตัดต่อในวงจรกำลัง คอนเวอร์เตอร์นี้สามารถแปลงได้โดยตรงจากแรงดันแหล่งจ่ายอินพุตการไฟฟ้า 3-เฟส ที่มีแรงดันและความถี่คงที่ให้เป็นแรงดันเอชอีลักษณะคลื่น 6 พัลส์ที่สามารถปรับแรงดันและความถี่โดยการปรับความถี่และอัตราการมอดที่ซูดส์สัญญาณควบคุมพีดีบีบลิวเอ็มของคอนเวอร์เตอร์นี้ ในขั้นตอนแรกจะกล่าวถึงหลักการทางทฤษฎีของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในทอแมคคณิตศาสตร์ จากนั้นจะเป็นการแปลความหมายให้อยู่ในรูปของคลื่นทางทฤษฎีซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับทางปฏิบัติเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องแนวคิดทางทฤษฎีของคอนเวอร์เตอร์นี้ จากนั้นจะเป็นการนำแนวคิดนี้มาออกแบบสร้างเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายแรงดันพีดีบีบลิวเอ็ม 3-เฟส ทางด้านเอาต์พุท คลื่นที่ได้จากการสร้างและทดลองนี้ยังได้นำไปเปรียบเทียบกับคลื่นทางทฤษฎีเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องในขั้นตอนการออกแบบในตอนท้ายของบทความวิจัยนี้ ยังได้ทำการคำนวณ ออกแบบและสร้างเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะคลื่นทฤษฎีและคลื่นทดลองของแรงดันเอาต์พุทที่มีอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่เพื่อเป็นการเตรียมสำหรับงานปรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เอชอีต่อไป

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

Design and Development of a Three-Phase Matrix Converter

Vichok Hothongkham¹ and Viriya Pichetjamroen²

King Mongkut's University of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

Abstract

This research paper presents the principle of a three-phase PWM ac-ac matrix converter, using 9-units of bi-directional, IGBT-Diode as power switching devices. The converter can directly convert three-phase utility voltages of constant frequency into a variable frequency and variable voltage having 6-pulse waveforms by adjusting the frequency and modulation index of the PWM control signals. The theoretical principle of matrix converter will be first described in terms of mathematic equations and then interpreted by means of theoretical waveforms in order to verify the concept of this converter. Moreover, the matrix converter is designed, constructed and tested in our laboratory to generate the 3-phase PWM output voltages and compared with its theoretical waveforms. In the last section of this paper, the theoretical and experimental 3-phase PWM output voltages of variable voltage and frequency which have constant voltage-to-frequency ratio are obtained which can be used in the application such as ac motor speed control.

¹ Graduate Student, Department of Electrical Engineering.

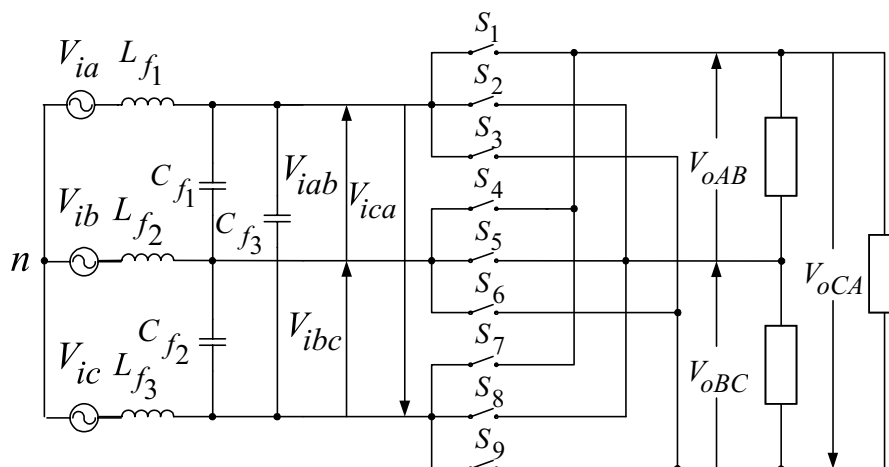
² Associate Professor, Department of Electrical Engineering.

1. บทนำ

วงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดเรกติไฟเออร์-อินเวอร์เตอร์ ในปัจจุบันมักเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมทั่วไป โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย วงจรเรกติไฟเออร์ (rectifier) และวงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter) ที่มีดีซีลิงค์ (DC Link) เป็นจุดเชื่อมโยงระหว่างวงจรทั้งสองเข้าด้วยกัน จะเห็นว่าระบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะมีการแปลงพลังงานไฟฟ้าถึง 2 ขั้นตอน คือ การแปลงจาก AC เป็น DC และจาก DC เป็น AC ซึ่งลักษณะเช่นนี้ จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานมากขึ้นกว่าการแปลงรูปพลังงานไฟฟ้าเพียงขั้นตอนเดียว [1] กล่าวคือ การแปลงพลังงานจาก AC เป็น AC โดยตรงโดยใช้วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ดังที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้

นอกจากนี้ วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ดังกล่าว ยังสามารถแก้ปัญหาของวงจรเรกติไฟเออร์-อินเวอร์เตอร์แบบเก่าได้ในเรื่องการคืนพลังงานจากด้านโหลด เพื่อมาเก็บสะสมในตัวเก็บประจุเพื่อรอการปลดคายพลังงานทิ้งด้วยวงจรดีสชาร์จที่มีตัวความต้านทานขนาดใหญ่ ทำหน้าที่กำจัดพลังงานส่วนนี้ทิ้งและรอรับการเก็บสะสมครั้งใหม่จากด้านโหลด

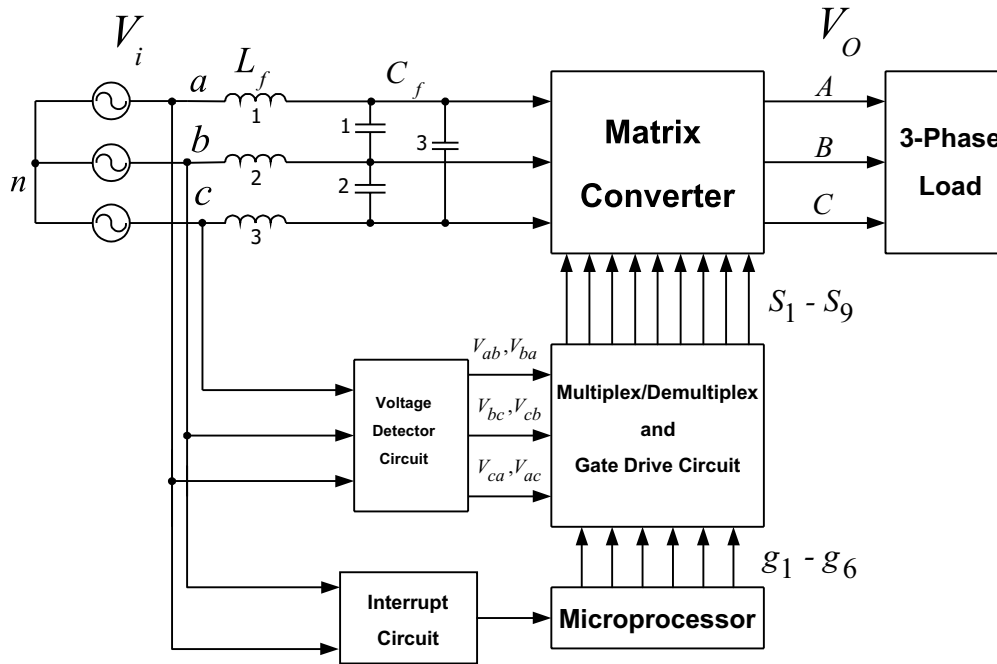
ดังนั้นการใช้เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ จึงมีวัตถุประสงค์หลักสำคัญ 2 ประการคือ เพื่อปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของวงจรดีซีลิงค์ให้สูงขึ้น ตลอดจนเพื่อให้สามารถคืนพลังงานจากด้านโหลดเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีโดยตรงได้ครั้งละมากๆ วงจร 3-เฟส พีดับบลิวเอ็ม เอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้สามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยจะมีบล็อกไดอะแกรมรวมที่ใช้ในการสร้างและควบคุมสัญญาณทั้งหมดเพื่อป้อนให้กับ Matrix Converter ในรูปที่ 2 เพื่อใช้ในการวัดและทดสอบเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยสวิตช์ S_1-S_9 จำนวน 9 ชุด โดยที่สวิตช์แต่ละชุดสามารถทำหน้าที่สวิตช์ ON/OFF เพื่อให้กระแสไหลได้สองทิศทาง รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับหลักการทำงานของวงจร การสร้างแรงดันคลื่นเอาต์พุตความถี่สูงหรือความถี่ต่ำ ตลอดจนหลักการสร้างแรงดันเอาต์พุต 3-เฟส เพื่อให้ V/f มีค่าคงที่ (Constant Voltage-to-Frequency Ratio) จะได้กล่าวในหัวข้อต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 1 วงจร 3-เฟส พีดับบลิวเอ็ม เอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

2. ทฤษฎีและหลักการทำงานของวงจรเมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์

วงจร 3-เฟส พีดีบีพลิวเอ็ม เอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (Three-Phase PWM AC-AC Matrix Converter) สามารถเขียนแสดงในรูปสมการทางคณิตศาสตร์และแปลความหมายเป็นลักษณะคลื่นในทางทฤษฎีและคลื่นที่สร้างจริงในทางปฏิบัติได้ดังหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมรวมของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

2.1 การวิเคราะห์ห้วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในเชิงคณิตศาสตร์

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ จะมีอินพุต 3-เฟส a, b, c เป็นแหล่งจ่ายจากแรงดันการไฟฟ้าป้อนให้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ เพื่อแปลงเป็นแรงดัน 3-เฟส ออกทางด้านเอาต์พุตในลักษณะของคลื่นพีดีบีพลิวเอ็มที่สามารถปรับความถี่ f และแรงดัน V ได้ด้วยการปรับอัตราการมอด (Modulation index) : M ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์นี้ในรูปของวงจรแปลงความถี่ 6-port ที่มี 3-port เป็นอินพุต และ 3-port เป็นเอาต์พุตและในกรณีของโหลด 3-เฟส ที่สมดุลงก็สามารพิจารณาให้เป็นวงจรแปลงความถี่ที่แปลงจาก 3-เฟส เป็น 1-เฟส จำนวน 3 ชุดที่มีการทำงานแยกอิสระออกจากกัน [2], [3] จากที่กล่าวข้างต้นสามารถเขียนสมการของแรงดันเอาต์พุต V_{OAB} ระหว่างเฟส A และ B ในรูปของคลื่นเอาต์พุต $\cos(\omega_o t)$ ที่มีขนาดและแอมพลิจูดขึ้นกับแรงดันอินพุต 3-เฟส $V_{iab}, V_{ibc}, V_{ica}$ กับสวิตชิงฟังก์ชันของวงจรคอนเวอร์เตอร์ $MCos(\omega_i t), MCos(\omega_i t - 120^\circ)$ และ $MCos(\omega_i t + 120^\circ)$ ซึ่งสมการเอาต์พุตดังกล่าวจะมีลักษณะดังนี้

$$[V_{OAB}(\omega_O t)] = \begin{bmatrix} V_i \cos(\omega_i t) & V_i \cos(\omega_i t - 120^\circ) & V_i \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} M \cos(\omega_i t) \\ M \cos(\omega_i t - 120^\circ) \\ M \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix} \cos(\omega_O t) \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} MV_i \cos(\omega_i t) \cos(\omega_i t) \\ + MV_i \cos(\omega_i t - 120^\circ) \cos(\omega_i t - 120^\circ) \\ + MV_i \cos(\omega_i t + 120^\circ) \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix} \cos(\omega_O t) \quad (2)$$

$$= \frac{MV_i}{2} \begin{bmatrix} \cos(2\omega_i t) + \cos(0^\circ) + \cos(2\omega_i t - 240^\circ) \\ + \cos(0^\circ) + \cos(2\omega_i t + 240^\circ) + \cos(0^\circ) \end{bmatrix} \cos(\omega_O t) \quad (3)$$

$$= \left\{ \frac{3MV_i}{2} \right\} \{ \cos(\omega_O t) \} \quad (4)$$

และโดยการพิจารณาในลักษณะทำนองเดียวกันก็จะได้สมการเอาที่พุ่มระหว่างเฟส B และ C, V_{OBC} และระหว่างเฟส C และ A, V_{OCA} ตามลำดับดังนี้

$$[V_{OBC}(\omega_O t)] = \left\{ \frac{3MV_i}{2} \right\} \{ \cos(\omega_O t - 120^\circ) \} \quad (5)$$

$$[V_{OCA}(\omega_O t)] = \left\{ \frac{3MV_i}{2} \right\} \{ \cos(\omega_O t + 120^\circ) \} \quad (6)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของ $MV_i \cos(\omega_i t) \cos(\omega_i t)$ ในสมการที่ 2 ก็จะสามารถเขียนแสดงเพื่อให้เห็นเป็นลักษณะคลื่นได้ดังรูปที่ 3(e) ซึ่งเกิดจากผลคูณระหว่างคลื่นแรงดันอินพุท V_{iab} ในรูปที่ 3(a) กับสวิตชิงฟังก์ชันในรูปที่ 3(b) ทำนองเดียวกันเฉพาะส่วนของ

$$MV_i \cos(\omega_i t - 120^\circ) \cos(\omega_i t - 120^\circ)$$

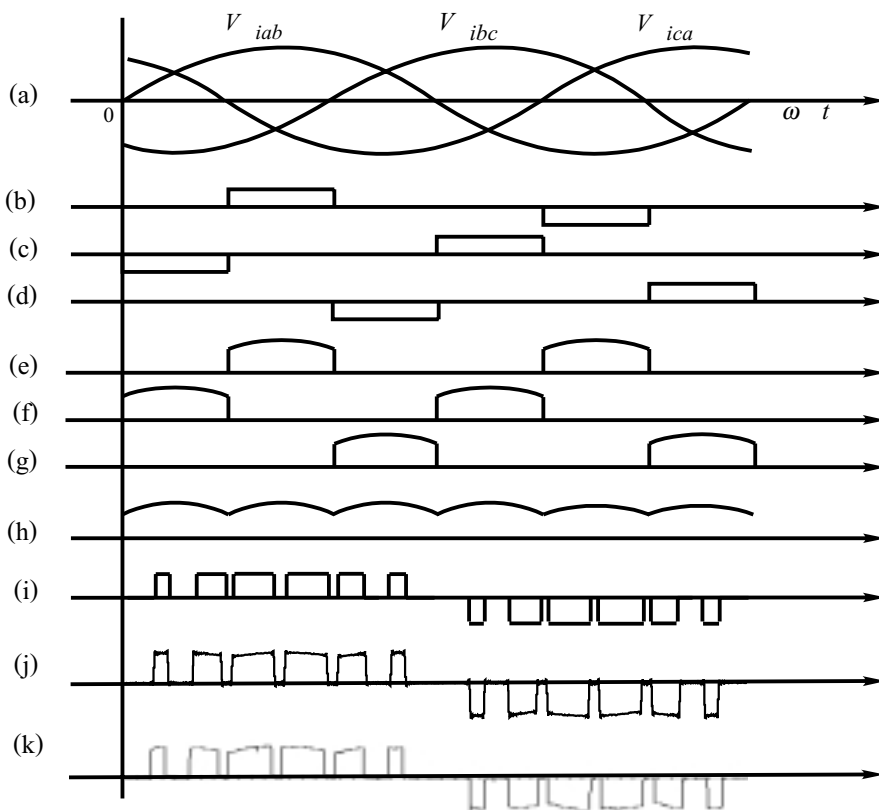
ในสมการที่ 2 สามารถเขียนแสดงเพื่อให้เห็นเป็นลักษณะคลื่นได้ดังรูปที่ 3(f) และเฉพาะ ส่วนของ

$$MV_i \cos(\omega_i t + 120^\circ) \cos(\omega_i t + 120^\circ)$$

ในสมการที่ 2 สามารถเขียนแสดงเพื่อให้เห็นเป็นลักษณะคลื่นได้ดังรูปที่ 3(g) จากนั้นเมื่อนำ ลักษณะคลื่นทั้งสามในรูปที่ 3(e), (f) และ (g) มารวมกันซึ่งก็คือส่วนของ

$$\left[\frac{MV_i}{2} (\cos(2\omega_i t) + \cos(0^\circ)) \right] + \left[\frac{MV_i}{2} (\cos(2\omega_i t - 240^\circ) + \cos(0^\circ)) \right] + \left[\frac{MV_i}{2} (\cos(2\omega_i t + 240^\circ) + \cos(0^\circ)) \right]$$

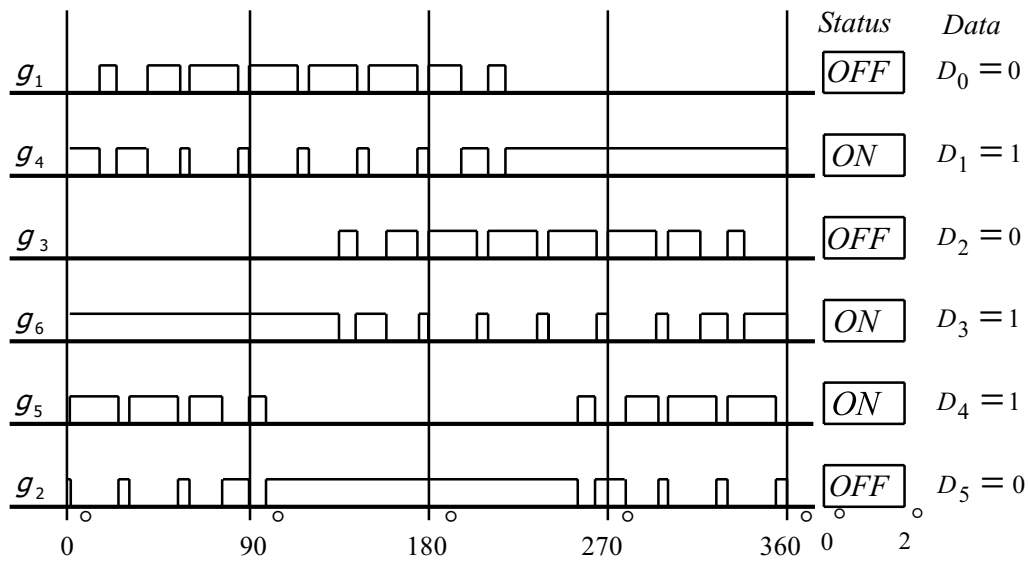
ในสมการที่ 3 ก็จะได้ผลรวมที่มีลักษณะคลื่น 6 พัลส์ในรูปที่ 3(h) และเมื่อนำคลื่น 6 พัลส์ นี้ไปคูณกับพีดับบลิวเอ็มสวิตซึ่งฟังก์ชันในรูปที่ 3(i) ซึ่งก็คือส่วนของ $\cos(\omega_o t)$ ในสมการที่ 3 แล้วก็จะได้ลักษณะคลื่นจริงที่เอาท์พุทระหว่างเฟส A และ B, V_{OAB} ดังรูปที่ 3(j) ลักษณะคลื่นเอาท์พุท V_{OAB} ในรูปที่ 3(j) นี้ เมื่อนำมาคำนวณและทดลองสร้างจริงจะมีลักษณะดังรูปที่ 3(k) ซึ่งปรากฏว่า จะได้ลักษณะคลื่นใกล้เคียงกับทางทฤษฎีเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง



รูปที่ 3 ลักษณะคลื่นทางทฤษฎีที่แปลความหมายจากคณิตศาสตร์ (a) รูปคลื่นอินพุท 3-เฟส (b), (c), (d) สวิตซ์ฟังก์ชัน (e), (f), (g) คลื่นพัลเวฟ 2-pulse (h) คลื่นพัลเวฟ 6-pulse (i) พีดับบลิวเอ็มสวิตซ์ฟังก์ชัน (j) คลื่นเอาท์พุท V_{OAB} ได้จากทฤษฎี (k) คลื่นเอาท์พุท V_{OAB} ได้จากการทดลอง

2.2 การวิเคราะห์วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในเชิงปฏิบัติ

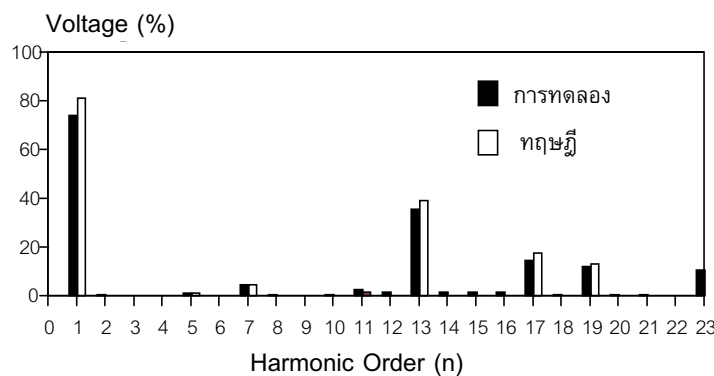
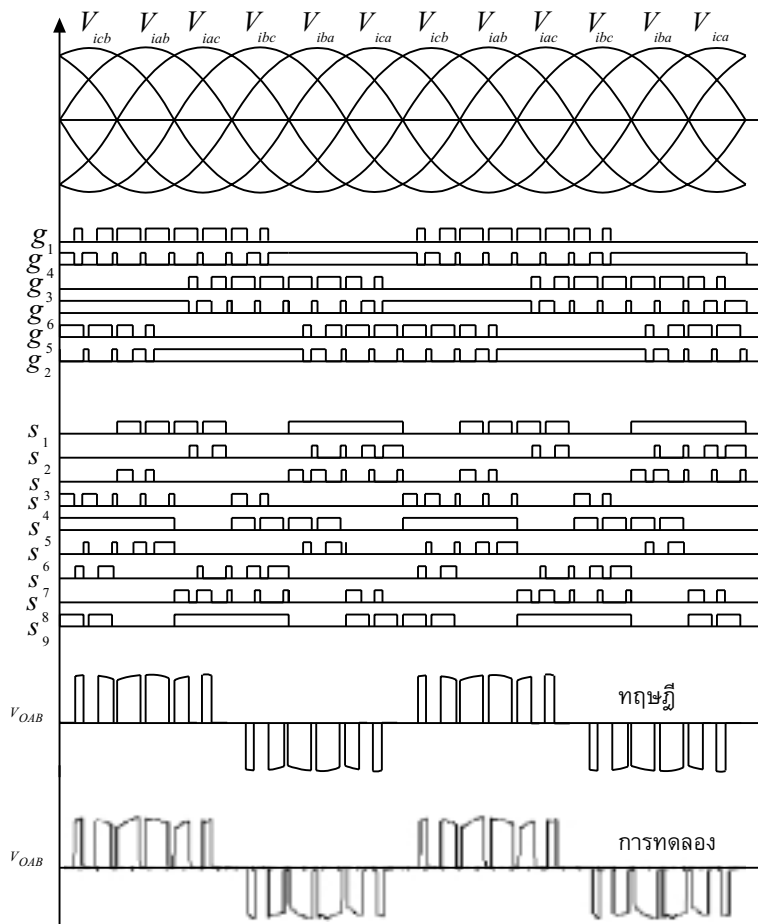
วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้มีลักษณะวงจรดังแสดงในรูปที่ 1 และมีบล็อกไดอะแกรม แสดงการทำงานดังรูปที่ 2 โดยที่สวิทช์ทั้ง 9 ในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์จะทำงานตามสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม S_1-S_9 ซึ่งได้มาจากสัญญาณ 2 ส่วน คือ สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม g_1-g_6 ที่สร้างมาจากไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 โดยการเก็บข้อมูลของสภาวะการทำงานของสวิทช์ที่อัตราการมอดต่าง ๆ ไว้เป็นตารางในหน่วยความจำ (Look-Up Table) แต่ละค่าของข้อมูลเป็นสภาวะการทำงานในช่วง 2 องศา หรือ $1/9$ มิลลิวินาที ดังนั้นจะทำให้มีข้อมูลทั้งหมด 180 ค่า ต่อ 1 ตาราง



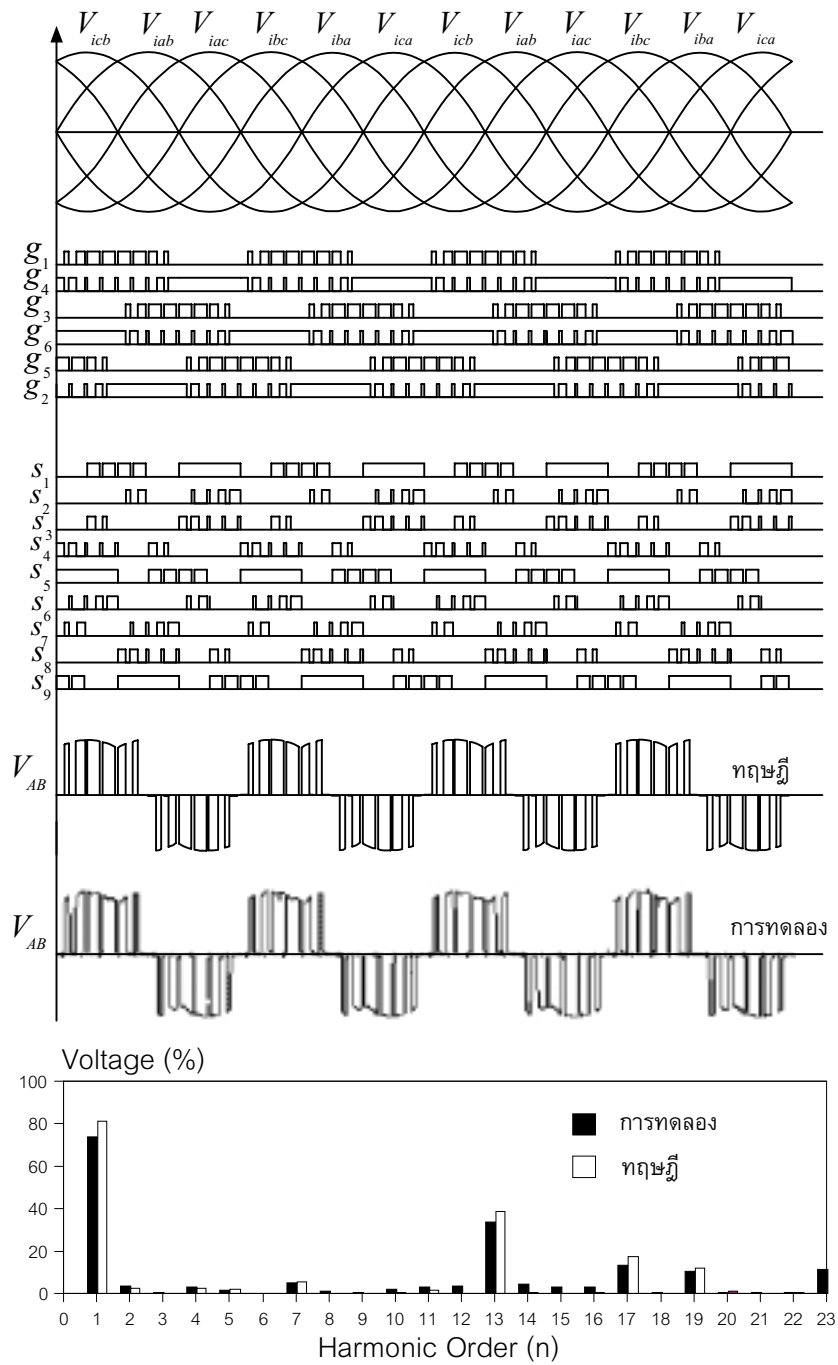
รูปที่ 4 สภาวะการทำงานของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม g_1-g_6 เพื่อใช้ในการหาข้อมูลที่จำนวนพัลส์ของรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิลความถี่ 50 Hz ที่ อัตราการมอด 0.8 ได้ข้อมูลของ 2 องศาแรกเป็น 1AH

ในรูปที่ 4 เป็นการแสดงวิธีการหาข้อมูลของสภาวะการทำงานของสัญญาณ g_1-g_6 ที่จำนวนพัลส์ 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ที่อัตราการมอด $M = 0.8$ โดยได้รับข้อมูลเป็น 00011010B หรือ 1AH ในช่วง 2 องศาแรก ส่วนในการปรับความถี่รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตทำได้โดยการปรับความถี่ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม g_1-g_6 ซึ่งจะทำให้ความถี่เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป พร้อมกันนี้การปรับอัตราการมอดดูเลตก็ทำได้โดยการปรับที่สัญญาณพีดับบลิวเอ็มนี้เช่นกัน โดยไมโครโปรเซสเซอร์ จะทำการอ่านค่าความถี่และอัตราการมอดผ่านเข้ามาทางพอร์ต เพื่อเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรมัลติเพล็กซ์-ดีมัลติเพล็กซ์ (MUX/DMUX Circuit) โดยมีสัญญาณ $V_{iab}, V_{iac}, V_{ibc}, V_{iba}, V_{ica}$ และ V_{icb} ที่ได้มาจากวงจรตรวจจับแรงดันระหว่างไลน์จากการไฟฟ้า และจะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ โดยที่แต่ละพัลส์จะมีความกว้าง 60 องศา ดังรูปที่ 3(b), (c) และ (d) ซึ่งเป็นสัญญาณที่กำหนดสัญญาณ g_1-g_6 ให้เป็นสัญญาณ S_1-S_9 กล่าวคือ สัญญาณที่ตรวจจับแรงดันระหว่างไลน์การไฟฟ้าแต่ละสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดให้สวิทช์ S_1-S_9 ทำงานได้ครั้งละ 6 ชุด หมุนเวียนสลับกันไป เช่น สัญญาณ จะกำหนดให้ g_1, g_3, g_5, g_4, g_6 และ g_2 ไปออกที่ S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 และ S_6 ซึ่งจะทำให้สวิทช์ 3 ชุดบนและ 3 ชุดกลางในรูปที่ 1 ทำงาน ต่อมาสัญญาณ จะกำหนดให้ g_1, g_3, g_5, g_4, g_6 และ g_2 ไปออกที่ S_1, S_2, S_3, S_7, S_8 และ S_9 ซึ่งจะทำให้สวิทช์ 3 ชุดบนและ 3 ชุดล่างทำงาน ต่อมาสัญญาณ V_{ibc} จะกำหนดให้ g_1, g_3, g_5, g_4, g_6

และ g_2 ไปออกที่ S_4, S_5, S_6, S_7, S_8 และ S_9 ซึ่งจะทำให้สวิตช์ 3 ชุดกลางและ 3 ชุดล่างทำงานในอันดับถัดจากนี้สัญญาณอีก 3 สัญญาณที่เหลือใน 1 ไซเคิลของแหล่งจ่ายก็จะมีการทำงานที่เหมือนกัน ซึ่งลักษณะของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่สร้างขึ้นและคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสัญญาณพีดับบลิวเอ็มนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นทางทฤษฎีรูปที่ 3(j) พบว่ารูปคลื่นที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกัน



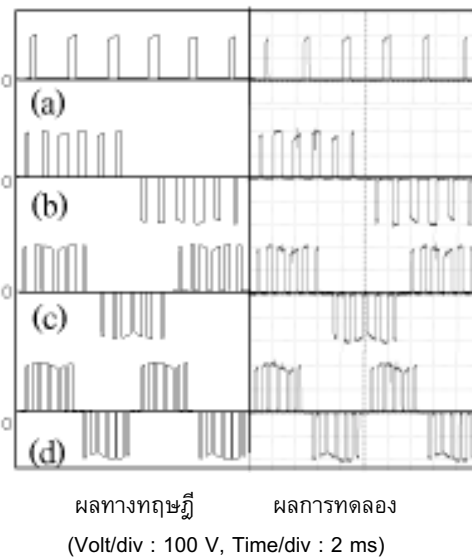
รูปที่ 5 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มและรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจากทฤษฎีและการทดลองพร้อมกับสเปกตรัมแรงดัน ที่ความถี่ 50 Hz อัตราการมอด 0.8



รูปที่ 6 สัญญาณไฟดับลิแวมและรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตจากทฤษฎีและการทดลองพร้อมกับสเปกตรัมแรงดัน ที่ความถี่ 100 Hz อัตราการมอด $M = 0.8$

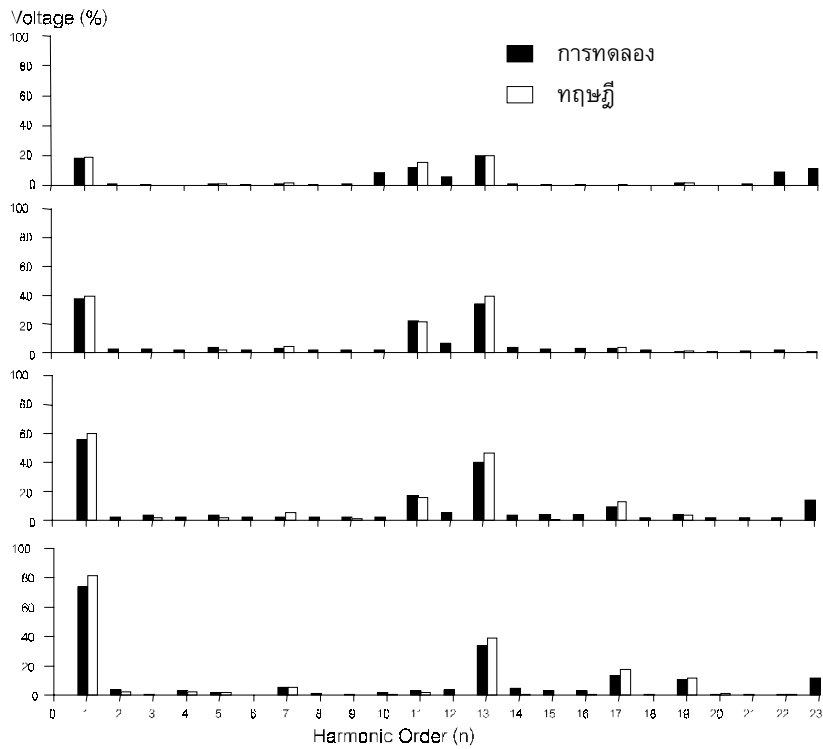
3. การทดลองและผลการทดลอง

จากสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม g_1-g_6 ที่มีจำนวน 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ที่สามารถปรับได้ทั้งความถี่และอัตราการมีอด โดยใช้หลักการสร้างในรูปที่ 4 ซึ่งเมื่อนำมาผ่านวงจรมัลติเพล็กซ์-ดีมัลติเพล็กซ์ ก็จะได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม S_1-S_9 นั้น เมื่อนำมาขับวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้สร้างขึ้น ในขณะที่จ่ายโหลดเอาต์พุตจะได้ลักษณะคลื่นเอาต์พุตที่วัดจริง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับคลื่นทางทฤษฎี ในรูปที่ 5 ที่ความถี่ต่ำ 50 Hz และในรูปที่ 6 ที่ความถี่สูง 100 Hz ที่อัตราการมีอด 0.8 คงที่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองกรณีจะให้ลักษณะคลื่นที่เหมือนกันทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ จากนั้นเมื่อนำทั้งคลื่นทฤษฎีและปฏิบัติที่ 50 Hz และ 100 Hz มาแตกอนุกรมฟูเรียร์ก็จะได้แถบสเปกตรัมแสดงขนาดฮาร์มอนิกต่างๆ เทียบกับขนาดของคลื่นพินดาเมนทอลดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแถบสเปกตรัมที่ได้ทั้งทฤษฎีและปฏิบัติมีลักษณะใกล้เคียงกัน จากข้อมูลที่ได้เหล่านี้สามารถนำมาขยายความคิด เพื่อออกแบบและสร้างคลื่นในลักษณะเฉพาะแบบที่มีการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างค่าความถี่และค่าอัตราการมีอดของคลื่นเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับงานขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ต่อไป โดยได้ทำการเลือกออกแบบจุดการทำงาน 4 จุดด้วยกัน คือ ที่ค่าความถี่ 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz และ 100 Hz ขณะที่ค่าอัตราการมีอดเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งลักษณะคลื่นเหล่านี้ยังได้นำไปคำนวณและทดสอบหาค่าฮาร์มอนิกต่างๆ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาเขียนเป็นเส้นกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าที่คำนวณทางทฤษฎีและค่าที่ได้จากการทดลองก็จะสามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นลิเนียร์ (Linear) ผ่านจุด Origin ของแกนพอดิ ซึ่งหมายถึงค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อความถี่ที่ทุกจุดการทำงานบนเส้นนี้จะมีค่าคงที่ ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้กับงานปรับความเร็วรอบมอเตอร์ต่อไป



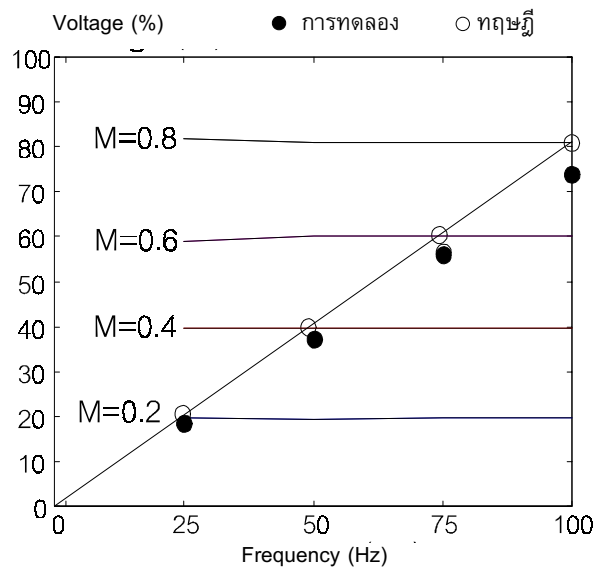
รูปที่ 7 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตจากทฤษฎีและการทดลองที่ความถี่ f และอัตราการมีอด M ต่างๆ ที่มีอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| (a) $f=25$ Hz, $M = 0.2$ | (c) $f=75$ Hz, $M = 0.6$ |
| (b) $f=50$ Hz, $M = 0.4$ | (d) $f=100$ Hz, $M = 0.8$ |



รูปที่ 7 (ต่อ) ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมแรงดันเอาต์พุตจากทฤษฎีและการทดลองที่ความถี่ f และอัตราส่วนมอด M ต่างๆ ที่มีอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่

- (a) $f=25$ Hz, $M = 0.2$
- (b) $f=50$ Hz, $M = 0.4$
- (c) $f=75$ Hz, $M = 0.6$
- (d) $f=100$ Hz, $M = 0.8$

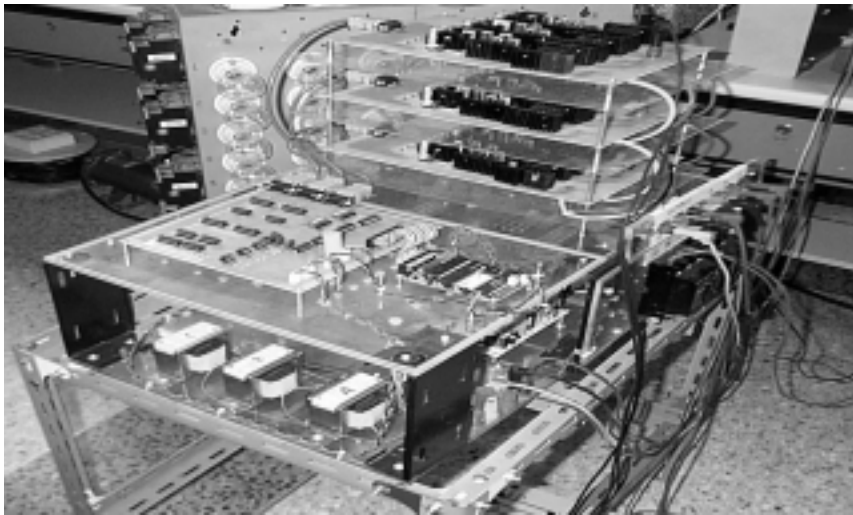


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V กับความถี่ f ที่มีอัตราส่วน V/f คงที่

4. สรุป

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการวิเคราะห์การทำงานของวงจร 3-เฟส PWM เอชซี-เอชซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อยืนยันเปรียบเทียบกับทางปฏิบัติโดยการสร้างวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ขึ้นทดสอบจริง ซึ่งสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- (1) สามารถเขียนวงจรแสดงในเชิงคณิตศาสตร์และแปลความหมายในทางปฏิบัติได้จริง
- (2) สามารถสร้างคลื่นพีดับบลิวเอ็มที่มีความถี่และอัตราการมอดต่างๆ ในทางทฤษฎี และทางปฏิบัติที่สอดคล้องกัน
- (3) สามารถ คำนวณ ออกแบบ และสร้างคลื่นเอาท์พุท ที่มีอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ที่จุดการทำงานต่างๆ เพื่อเตรียมสำหรับงานปรับความเร็วรอบมอเตอร์เอชซีต่อไป



รูปที่ 9 เครื่องต้นแบบ 3 เฟส เอชซี-เอชซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

5. เอกสารอ้างอิง

1. Ziogas, P. D., Kang, Y. G., and Stefanovic, V. R., 1986, "Rectifier-Inverter Frequency Changers with Suppressed DC Link Components," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-22, No. 6, pp. 1027-1036.
2. Ziogas, P. D., Khan, S. I., and Rashid, M. H., 1985, "Analysis and Design of Forced-Commutated Cycloconverter Structures", *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. IA-21, pp. 1242-1253.
3. Ziogas, P. D., Khan, S. I., and Rashid, M. H., 1986, "Analysis and Design of Forced Commutated Cycloconverter Structures with Improved Transfer Characteristics", *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. IE-33, No. 3, pp. 271-280.