



การวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต สำหรับการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

Analysis Design and Implementation of the Three-Phase Matrix Converter using the Output Voltage Signals for the PWM Signals Generation

สันติสุข สว่างกล้า¹ ประสพโชค โห้ทองคำ² อภิษฎา ทองรักษ์³

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม santisuk@siam.edu

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ prasopchok.hot@rmutr.ac.th

³สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร aphichata.t@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจำนวน 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ที่ใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อใช้ในการขับนำสวิทซ์สองทิศทางจำนวน 9 ชุด ซึ่งประกอบด้วยไอจีบีที-ไดโอดกำลังทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ด้านอินพุตที่มีความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เอาต์พุตที่สามารถปรับความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ โดยการปรับความถี่และอัตราการมอดที่สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม รวมทั้งมีการแสดงหลักการการทำงานของวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในเชิงคณิตศาสตร์ก่อนทำการทดลองจริงด้วย พร้อมทั้งทำการวัดรูปคลื่นและค่าฮาร์มอนิกเพื่อเปรียบเทียบทั้งที่ได้จากการจำลองและการทดลองจริง ซึ่งจากผลการจำลองและการทดลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดี นอกจากนี้ได้ทำการทดลองการควบคุมแบบ V/f คงที่เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย

คำสำคัญ: วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ วงจรเอชทูเอชคอนเวอร์เตอร์ พีดับบลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์

Abstract

This paper present the analysis, design, and implementation of the 6-pulses three phase PWM AC-AC Matrix Converter which using the output voltage signal for PWM signal generation. This converter is using the 9-units of bidirectional, IGBT-Power Diode. The converter is converting a constant utility three-phase sinusoidal supply voltage and frequency into a variable output voltage and frequency of pulses PWM through alteration of the frequency and modulation index of the PWM signals used by the converter. A mathematical approach is initially applied to describe the principle of the Matrix Converter, before implementation takes place through theoretical waveforms. A comparison is then made of the theoretical waveforms with the practical

waveforms and the harmonics obtained from the three-phase PWM AC-AC Matrix Converter. The outcomes in both theory and practice are shown to be in relatively close agreement. Moreover, the V/f control is shown in this paper for the induction motor drive.

Keywords: Matrix Converter Circuit, AC to AC Converter, PWM Converter

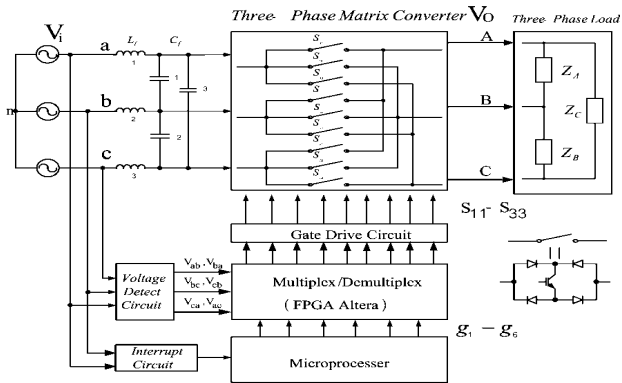
1. บทนำ

วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Gyugyi และ Pelly ในปี 1976 [1] และมีการนำเสนอในรูปแบบของคณิตศาสตร์โดย Venturini และ Alessina ในปี 1981 [3] โดยวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตโดยตรงมีข้อดีคือทำการขจัดส่วน DC link ในวงจรอินเวอร์เตอร์ออกไป ซึ่งมีการนำเสนอในงานวิจัยโดย Ziogas [4] และ Blaabjerg [5] และมีการวิจัยอื่น ๆ อีกมากมาย โดยส่วนใหญ่จะใช้หลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SPWM และ SVPWM [6-9] ในการขับนำสวิทซ์สองทิศทางในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ แต่ในบทความนี้จะใช้หลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มโดยการพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมาใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อใช้ในการขับนำสวิทซ์สองทิศทางในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งหลักการนี้จะทำการกำหนดจำนวนพัลส์ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ โดยในบทความนี้จะนำเสนอแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่จำนวน 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ซึ่งสามารถที่จะทำการปรับความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้โดยการปรับอัตราการมอดที่สัญญาณพีดับบลิวเอ็มรวมแสดงการควบคุมแบบ V/f เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อไป

2. หลักการของวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีโครงสร้างของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 1 และสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่สร้างได้จาก

แรงดันไฟฟ้าอินพุท โดยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 1-6 ดังนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

$$[V_{oAB}(\omega_o t)] = [V_i \cos(\omega_o t), V_i \cos(\omega_o t + 120^\circ), V_i \cos(\omega_o t - 120^\circ)]$$

$$\times \begin{bmatrix} M \cos(\omega_i t) \\ M \cos(\omega_i t + 120^\circ) \\ M \cos(\omega_i t - 120^\circ) \end{bmatrix} \times [\cos(\omega_o t)] \quad (1)$$

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

$$= \frac{MV_i}{2} [\cos(2\omega_i t) + \cos(0^\circ) + \cos(2\omega_i t - 240^\circ) + \cos(0^\circ) + \cos(2\omega_i t - 480^\circ) + \cos(0^\circ)] \times \cos(\omega_o t) \quad (3)$$

$$= \left[\frac{3MV_i}{2} \right] \times [\cos(\omega_o t)] \quad (4)$$

$$[V_{oBC}(\omega_o t)] = \left[\frac{3MV_i}{2} \right] \times [\cos(\omega_o t + 120^\circ)] \quad (5)$$

$$[V_{oCA}(\omega_o t)] = \left[\frac{3MV_i}{2} \right] \times [\cos(\omega_o t - 120^\circ)] \quad (6)$$

โดยที่ V_i คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุท, V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทไลน์ ทุไลน์, M คือ อัตราการมอดดูเลต

3. การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุท 3 เฟส 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล

ในการออกแบบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุท 3 เฟส ให้มีรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุท 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล เริ่มต้นจากพิจารณาแรงดันไฟฟ้าไลน์ทุไลน์ 3 เฟส แล้วทำการแบ่งแรงดันไฟฟ้าไลน์ทุไลน์ในแต่ละไลน์เป็น 6 ช่วง ช่วงละ 60 องศา โดยในแต่ละช่วงจะมีจำนวนพัลส์เท่ากับ 2 พัลส์ เท่ากันในแต่ละช่วงดังรูปที่ 2 จากนั้นเมื่อพิจารณาจากพัลส์แรงดันที่กว้างที่สุด จะมีความกว้างพัลส์เท่ากับ MT โดยที่ T คือช่วงเวลา $1/12$ ของคาบเวลาหนึ่งไซเคิลของแรงดันไฟสลับ และสามารถปรับความกว้างพัลส์ได้จาก 0 ถึง T โดยการปรับค่า

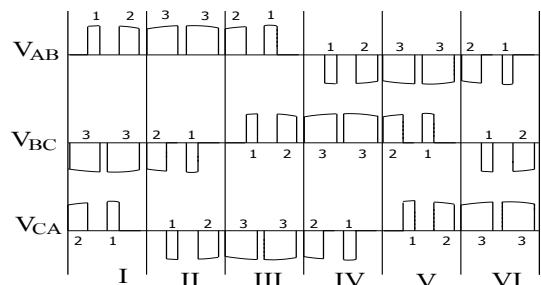
Modulation Index : M หรืออัตราการมอดดูเลตจาก 0 ถึง 1 และความกว้างพัลส์แต่พัลส์จะมีความกว้างตามสมการที่ 7

$$X1MT : (1-X1)MT : MT : MT : (1-X1)MT : X1MT \quad (7)$$

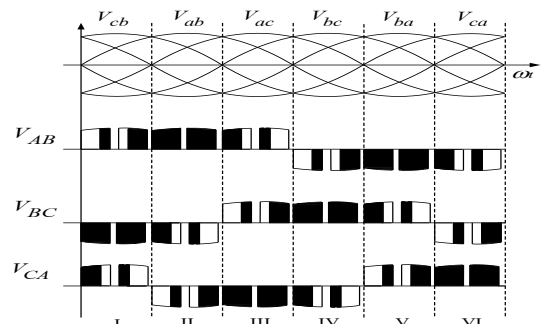
โดยที่ $X1$ คือ อัตราส่วนความกว้างพัลส์, M คือ อัตราการมอดดูเลต, T คือช่วงเวลาในหนึ่งไซเคิลของแรงดันไฟฟ้าอินพุทมีค่าเท่ากับ π/m และ m คือ จำนวนพัลส์ในครึ่งไซเคิล

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 เป็นลักษณะแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุท 3 เฟส 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิลความถี่ 50 Hz อัตราการมอดดูเลต 0.8 เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอินพุทจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

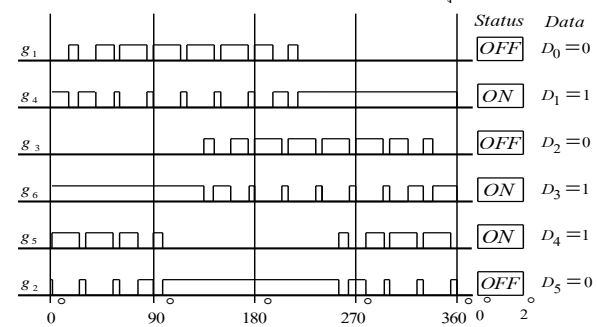
หลังจากได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุททั้ง 3 เฟสแล้วต่อไปก็จะทำการออกแบบรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็ม $g_1 - g_6$ ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแสดงได้ดังรูปที่ 4 ต่อมาทำการสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตซ์สองทิศทาง $S_{11} - S_{33}$ ในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยใช้สมการที่ 8 ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อขั้วนำสวิตซ์สองทิศทางทั้ง 9 ชุดในวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ต่อไป



รูปที่ 2 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุท 3 เฟส 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล



รูปที่ 3 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุท 3 เฟส 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิลความถี่ 50 Hz อัตราการมอดดูเลต 0.8 เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอินพุท



รูปที่ 4 สภาวะการทำงานของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $g_1 - g_6$ ที่จำนวนพัลส์ของรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ความถี่ 50 Hz ที่ อัตราการมีอด 0.8

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= (V_{ab} + V_{ac})g_1 + (V_{ba} + V_{ca})g_4 \\
 S_{12} &= (V_{ab} + V_{ac})g_3 + (V_{ba} + V_{ca})g_6 \\
 S_{13} &= (V_{ab} + V_{ac})g_5 + (V_{ba} + V_{ca})g_2 \\
 S_{21} &= (V_{bc} + V_{ba})g_1 + (V_{cb} + V_{ab})g_4 \\
 S_{22} &= (V_{bc} + V_{ba})g_3 + (V_{cb} + V_{ab})g_6 \\
 S_{23} &= (V_{bc} + V_{ba})g_5 + (V_{cb} + V_{ab})g_2 \\
 S_{31} &= (V_{cb} + V_{ab})g_1 + (V_{ac} + V_{bc})g_4 \\
 S_{32} &= (V_{cb} + V_{ab})g_3 + (V_{ac} + V_{bc})g_6 \\
 S_{33} &= (V_{cb} + V_{ab})g_5 + (V_{ac} + V_{bc})g_2
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

4. โครงสร้างของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีโครงสร้างดังรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบดังนี้

4.1 ส่วนในการสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม

ในส่วนนี้จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC30F4011 ทำการสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $g_1 - g_6$ ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มดังกล่าวจะมีการทำการซิงโครไนซ์กับแรงดันไฟฟ้าอินพุตจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้สัญญาณอินเทอร์รัพท์จากวงจรสร้างสัญญาณอินเทอร์รัพท์แล้วส่งผ่านไปยังวงจรมัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์ต่อไป

4.2 ส่วนวงจรอินเทอร์รัพท์

วงจรอินเทอร์รัพท์นี้จะทำการสร้างสัญญาณอินเทอร์รัพท์ให้แก่ไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC30F4011 เพื่อให้ไมโครโปรเซสเซอร์ทำการเริ่มสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มจากจุดเริ่ม ณ ตำแหน่งศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุต โดยสัญญาณอินเทอร์รัพท์เป็นแบบ non-maskable interrupt หรือแบบ \overline{NMI} สร้างโดยใช้วงจรโมโนสเตเบิล

4.3 ส่วนวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าจะสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมออกมา 6 สัญญาณ คือ V_{ab} , V_{ac} , V_{bc} , V_{ba} , V_{ca} และ V_{cb} ซึ่งจะส่งไปยังวงจรมัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์ โดยสัญญาณจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าจะมีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ 60 องศา เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $S_{11} - S_{33}$ ต่อไป

4.4 ส่วนวงจรมัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์

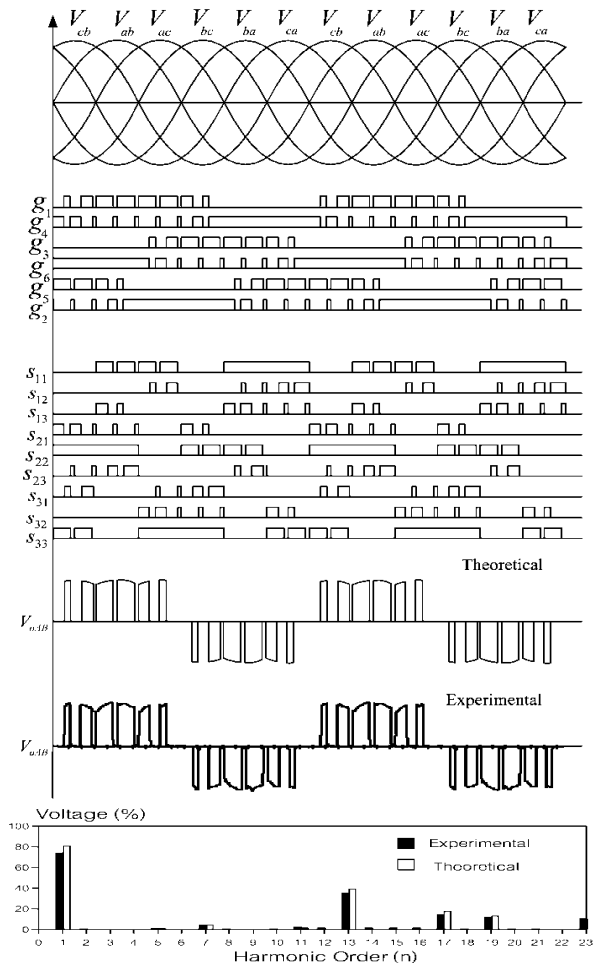
ส่วนวงจรนี้จะทำการสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $S_{11} - S_{33}$ เพื่อใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทิศทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยวงจรนี้จะรับสัญญาณมาจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าทั้ง 6 สัญญาณ และสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $g_1 - g_6$ จากไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC30F4011 แล้วทำการสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $S_{11} - S_{33}$ ตามสมการที่ 8 โดยในวงจรมัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์จะใช้ชิป FPGA ของ Altera ในการประมวลผลสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $S_{11} - S_{33}$ ออกมาแล้วนำไปขับนำสวิตซ์สองทิศทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ต่อไป

4.5 ส่วนวงจรมัลติเพล็กซ์คอนเวอร์เตอร์

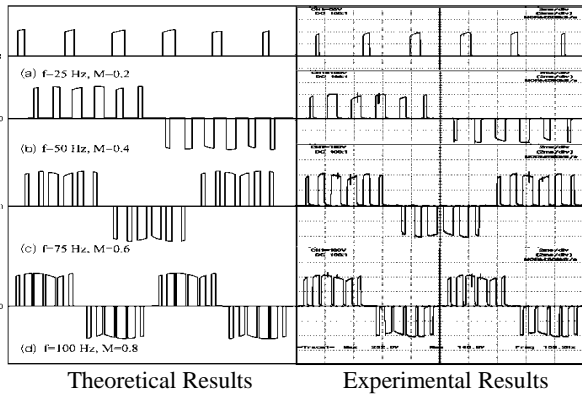
ส่วนวงจรมัลติเพล็กซ์คอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยสวิตซ์สองทิศทางจำนวน 9 ชุด คือ $S_{11} - S_{33}$ ต่อกันดังรูปที่ 1 ซึ่งสวิตซ์สองทิศทางจะประกอบด้วยไดโอดกำลังและไอจีบีทีต่อกันดังรูปที่ 1 โดยจะให้กระแสไฟฟ้าไหลได้สองทิศทาง คือ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลดและจากโหลดไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งสวิตซ์สองทิศทางจะได้รับสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $S_{11} - S_{33}$ จากวงจรมัลติเพล็กซ์/ดีมัลติเพล็กซ์ผ่านวงจรขับเกทเพื่อขับนำสวิตซ์สองทิศทางนี้ต่อไป

5. ผลการทดลอง

จากวงจรมัลติเพล็กซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างได้ทำการทดสอบกับโหลดโดยใช้สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มที่ได้ทำการออกแบบไว้เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจำนวน 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ซึ่งสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม $g_1 - g_6$ สามารถทำการปรับค่าอัตราการมีอดได้ตั้งแต่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 และค่าความถี่เอาต์พุตที่ 25Hz, 50Hz, 75Hz, และ 100Hz โดยสามารถแสดงรูปคลื่นทั้งหมดที่ความถี่ 50Hz อัตราการมีอด 0.8 พร้อมค่าฮาร์มอนิกจากการจำลองและการทดลองได้ดังรูปที่ 5

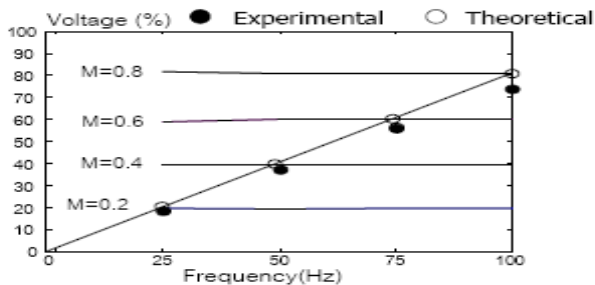


รูปที่ 5 รูปคลื่นจากการจำลองและการทดลองที่ความถี่ 50Hz อัตราการมีอด 0.8



รูปที่ 6. รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากการจำลองและการทดลองที่ความถี่และอัตราการมอดูเลตต่างๆ

หลังจากนั้นทำการทดสอบวัฏรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตทั้งจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจากการทดลองที่ค่าอัตราการมอดูเลตต่างๆและความถี่ต่างๆจะได้รูปคลื่นดังรูปที่ 6 พร้อมกันนั้นทำการวัดค่าฮาร์มอนิกจากการจำลองและการทดลองจะได้ดังรูปที่ 7

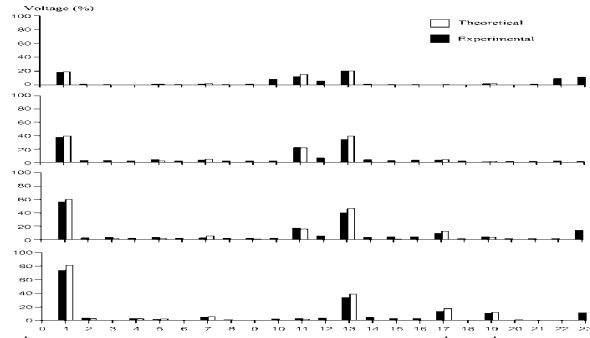


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของกรควบคุมแบบ V/f ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากนั้นนำข้อมูลมาทำการทดลองการควบคุมแบบ V/f เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยทำการวัดจากการจำลองและการทดลองนำมาพล็อตกราฟระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการมอดูเลตต่างๆจะได้กราฟดังรูปที่ 8

6. สรุปผลการทดลอง

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของออกมาได้และสามารถสร้างเป็นวงจรต้นแบบได้ โดยนำไปทำการทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟที่ค่าความถี่ 25Hz, 50Hz, 75Hz, และ 100Hz และที่ค่าอัตราการมอดูเลต 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ได้ โดยได้ทำการจำลองและทดลองวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีรูปคลื่นแรงดัน 6 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิลแล้ววัฏรูปคลื่นพร้อมทั้งหาค่าฮาร์มอนิก พบว่าทั้งจากการจำลองและการทดลองมีความใกล้เคียงกัน พร้อมกันนั้นยังมีการทดสอบการควบคุมแบบ V/f โดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่และอัตราการมอดูเลต ซึ่งข้อมูลต่างๆ เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อไปในการวิจัยขั้นต่อไป



รูปที่ 7 รูปสเปกตรัมของฮาร์มอนิกของค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ความถี่และอัตราการมอดูเลตต่างๆจากรูปที่ 6 ทั้งจากการจำลองและการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์และทุนสนับสนุนทางด้านงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี 2564 ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในการทำวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Gyugyi and B. R. Pelly, *Static Power Frequency Changers: Theory, Performance, and Application*, John Wiley & Sons, 1976.
- [2] B.R. Pelly, "Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters", New York, Wiley, 1971.
- [3] A. Alesina and M. Venturini, "Solid-State Power Conversion : A Fourier Analysis Approach to Generalize Transfer Synthesis", *IEEE Transactions on Circuit and Systems*, vol.CAS-28, No.4, pp.319-330., April, 1981
- [4] P.D. Ziogas, S.I. Khan, and M.H. Rashid, "Some Improve Forced Commutated Cycloconverter Structures", *IEEE Trans. Industry Application*, vol. IA-21, pp.1242-1253, Sept./Oct. 1985.
- [5] P. C. Loh, R. Rong, F. Blaabjerg, and P. Wang, "Digital carrier modulation and sampling issues of matrix converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 7, pp. 1690-1700, July 2009.
- [6] Y. D. Yoon, and S. K. Sul, "Carrier-based modulation technique for matrix converter", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 6, pp. 1691-1703, Nov. 2006.
- [7] C. Liu, B. Wu, N. R. Zargari, D. Xu, and J. Wang, "A novel three-phase three-leg ac/ac converter using nine IGBTs", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1151-1160, May 2009.
- [8] Tuyen D. Nguyen, and Hong-Hee Lee "Dual Three-Phase Indirect Matrix Converter with Carrier-Based PWM Method", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, Feb. 2014.
- [9] Amir Masoud Bozorgi, Mohammad Monfared, and Habib Rajabi Mashhadi, "Two Simple Over Modulation Algorithms for Space Vector Modulated Three-phase to Three-phase Matrix Converter", *IET Power Electron.*, 2014, Vol. 7, Iss. 7, pp. 1915-1924