

วงจรแปลงผันไฟฟ้าเอซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยตรงที่ปราศจากวงจรส่วนเชื่อมโยงดีซีทดสอบ กับโหลดแบบพาสซีฟ

A Direct Three-Phase AC to AC Converter without DC Link Circuit Testing with the Passive Loads

ประสพโชค โห้ทองคำ¹ สันติสุข สว่างกล้า² อภิชญา ทองรักษ์³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ prasopchok.hot@rmutr.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม santisuk@siam.edu

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยตรงที่ปราศจากวงจรเชื่อมโยงดีซี ที่ใช้สวิตซ์สองทิศทางจำนวน 9 ชุด ซึ่งประกอบด้วยไอจีบีที-ไดโอดกำลังทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ด้านอินพุตที่มีความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เอาท์พุทที่สามารถปรับความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ โดยการปรับค่าความถี่และค่าอัตราการมอดูเลตที่สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแบบ SPWM รวมทั้งมีการแสดงหลักการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในเชิงคณิตศาสตร์ด้วย นอกจากนี้ได้ทำการวัดรูปคลื่น ค่าฮาร์มอนิก และค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งทางด้านอินพุตและเอาท์พุทที่ทุกค่าความถี่เอาท์พุทด้วยการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างวงจรต้นแบบต่อไป

คำสำคัญ: เอซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส, เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส, สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแบบไซน์

Abstract

This paper presents the direct conversion of the Three-phase AC input to the Three-phase AC output without the DC Link. 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 through alteration of the frequency and modulation index of the SPWM signals used by the converter. A mathematical approach is initially applied to describe the principle of the Matrix Converter. Moreover, the harmonics analysis and the total harmonics distortion (THD) of the output side and input side of the voltage and the current waveforms are observed at several the output frequencies with the MATLAB/Simulink program. These data are used for the implementation of the prototype in the future work.

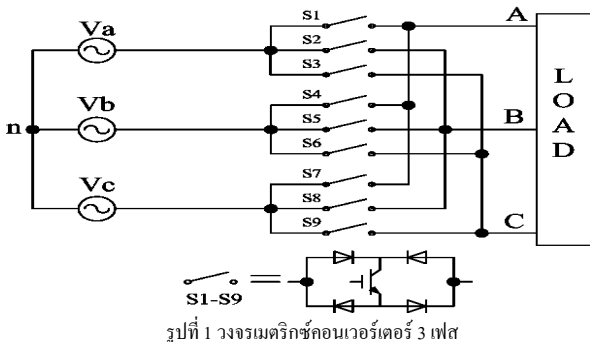
Keywords: 3-phase AC to AC Converter, 3-phase Matrix Converter, SPWM

1. บทนำ

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยตรงที่ปราศจากวงจรเชื่อมโยงดีซี เรียกว่า วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Gyugyi และ Pelly ในปี 1976 [1] และมีการนำเสนอในรูปแบบของคณิตศาสตร์โดย Venturini และ Alessina ในปี 1981 [3] โดยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเอาท์พุทโดยตรงมีข้อดีคือทำการขจัดส่วน DC link ในวงจรอินเวอร์เตอร์ออกไป ซึ่งมีการนำเสนอในงานวิจัยโดย Ziogas [4] รวมทั้งของ Blaabjerg [5] ซึ่งได้มีการทำวิจัยเกี่ยวกับงานทางด้านวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีจำนวนมากมาย เช่น S. K. Sul [6] นำเสนอเทคนิคการมอดูเลตของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้หลักการ carrier based modulation นำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจร J. Wang [7] นำเสนออุปกรณ์สวิตซ์แบบใหม่ที่ใช้ในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ด้วย IGBT Hong-Hee Lee [8] นำเสนอเทคนิคที่ดับบลิวเอ็มแบบ carrier based modulation โดยนำมาใช้กับวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยทางอ้อมที่ใช้สวิตซ์สองทางในวงจร rectifier และ inverter Habib Rajabi Mashhadi [9] นำเสนอเทคนิค space vector modulation มาใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์สองทางใน วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่มีการทำ overmodulation ด้วยในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ในวงจร Kamal Al-Haddad [10] นำเสนอหลักการเทคนิคการมอดูเลตแบบ space vector modulation แบบสมมาตรมาใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบ โดยอ้อมด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจากงานวิจัยที่กล่าวมายังคงมีการนำเสนองานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ อย่างหลากหลายทั้งการเสนอแนวความคิดโดยการทดลองและจากการจำลองมากมายหลากหลายด้วยกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดอีกรูปแบบหนึ่งของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ด้วยการใช้สวิตซ์สองทางที่ใช้เป็นไดโอดกำลังจำนวน 4 ตัว ต่อกันเป็นแบบบริดจ์และใช้ไอจีบีทีจำนวน 1 ตัว ต่อตรงกลางบริดจ์ ซึ่งเป็นสวิตซ์สองทางอีกรูปแบบหนึ่งที่ทำารควบคุมการทำงานได้โดยง่าย พร้อมทั้งได้ทำการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของสวิตซ์สองทางด้วย พร้อมกันนั้นวงจรเมตริกซ์คอน

เวอร์เตอร์ 3 เฟส ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส ด้วย ซึ่งทางด้านเอาต์พุตสามารถปรับค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ โดยที่วงจรทุกส่วนทั้งหมดทำการทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ทั้งหมด เพื่อทดสอบความถูกต้องของวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างวงจรต้นแบบในงานวิจัยต่อไป

2. วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส



วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส มีลักษณะของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 1 และสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่สร้างได้จากแรงดันไฟฟ้าอินพุต โดยสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 1-6 ดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

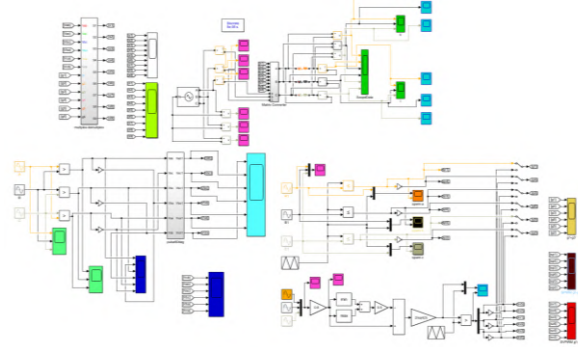
โดยที่ V_i คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต, V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตไลน์, M คือ อัตราการมอดูเลต

3. การทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

การทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสกับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส มีลักษณะโครงสร้างของวงจรดังแสดงในรูปที่ 2

ส่วนประกอบของวงจรที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบด้วย ส่วนวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา, ส่วนการสร้างสัญญาณที่ดับลิวิต

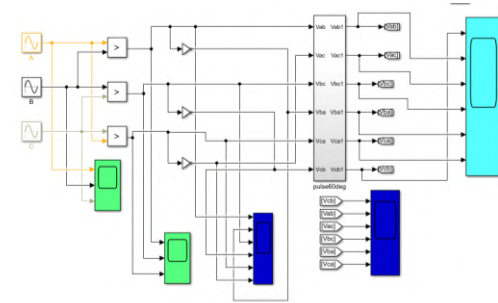
แบบ SPWM, ส่วนวงจร MUX/DMUX, และส่วนวงจรสวิตซ์สองทางที่ต่อกันทั้ง 9 ชุด ดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดแต่ละส่วนดังนี้



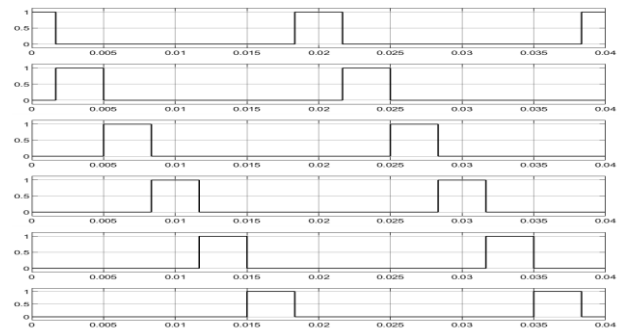
รูปที่ 2 วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่ใช้ในการทดลอง

3.1 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์เท่ากับ 60 องศา จำนวน 6 พัลส์ใน 1 ไซเคิล โดยมีลักษณะตามรูปที่ 3 และมีลักษณะสัญญาณพัลส์ใน 1 ไซเคิลดังรูปที่ 4

3.2 ส่วนการสร้างสัญญาณที่ดับลิวิตแบบ SPWM ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณที่ดับลิวิตแบบ SPWM ที่สามารถปรับความถี่และอัตราการมอดูเลตได้ โดยใช้สัญญาณไซน์ 3 เฟส เป็นสัญญาณอ้างอิงและใช้สัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณพาหะแล้วนำมาทำการเปรียบเทียบกันเพื่อสร้างเป็นสัญญาณที่ดับลิวิตแบบ SPWM โดยมีลักษณะของวงจรตามรูปที่ 5 และมีลักษณะของสัญญาณที่ดับลิวิตตามรูปที่ 6



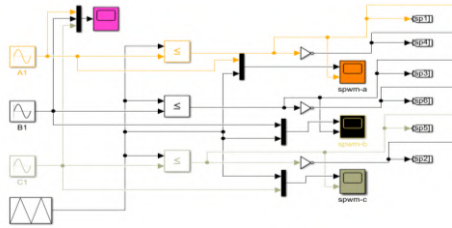
รูปที่ 3 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา



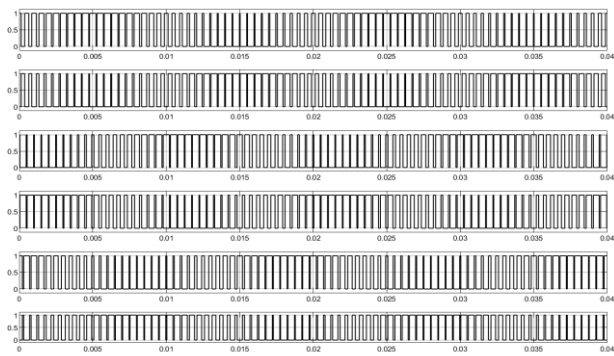
รูปที่ 4 ลักษณะสัญญาณพัลส์ 60 องศาที่สร้างขึ้นในการควบคุมการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

3.3 วงจร MUX/DMUX ทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 9 ชุด โดยได้รับสัญญาณพัลส์มาจากวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 60 องศา และวงจรสร้างสัญญาณที่

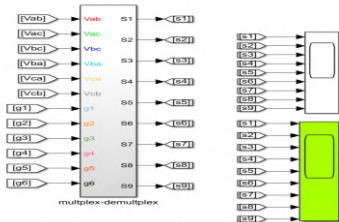
ดับเบิลวีเอ็มแบบ SPWM มาทำการผ่านส่วนวงจร MUX/DMUX ซึ่งประกอบด้วยวงจรลอจิกเพื่อทำการสร้างสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มที่ใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทางทั้ง 9 ชุด โดยมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 7 และมีลักษณะสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มทั้ง 9 ชุด ดังรูปที่ 8



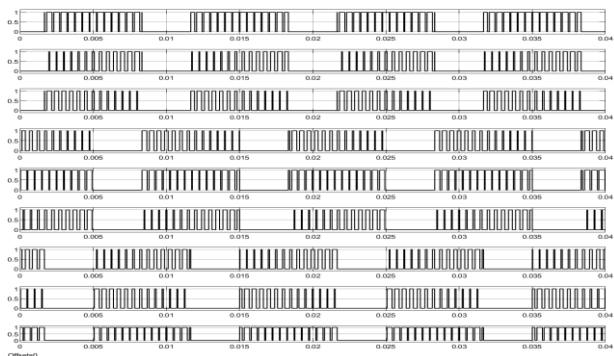
รูปที่ 5 วงจรสร้างสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มแบบ SPWM เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของสวิตซ์สองทาง



รูปที่ 6 สัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มแบบ SPWM ทั้ง 6 ชุด ที่จ่ายให้กับวงจร MUX/DMUX เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของสวิตซ์สองทาง



รูปที่ 7 วงจร MUX/DMUX ที่แปลงสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็ม 6 ชุด เป็น 9 ชุด เพื่อใช้ในการขับนำสวิตซ์สองทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

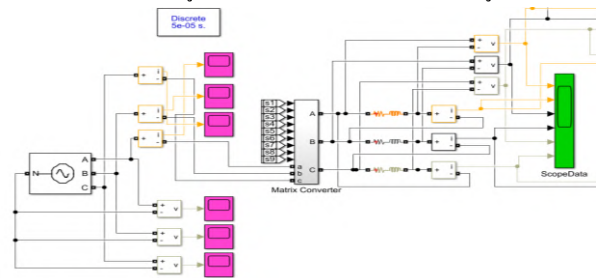


รูปที่ 8 สัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มแบบ SPWM ที่ใช้ในการควบคุมสวิตซ์สองทาง S1-S9 ที่ผ่านวงจร MUX/DMUX (S1-S9 จากบนลงล่าง)

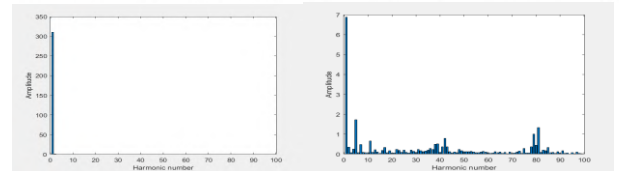
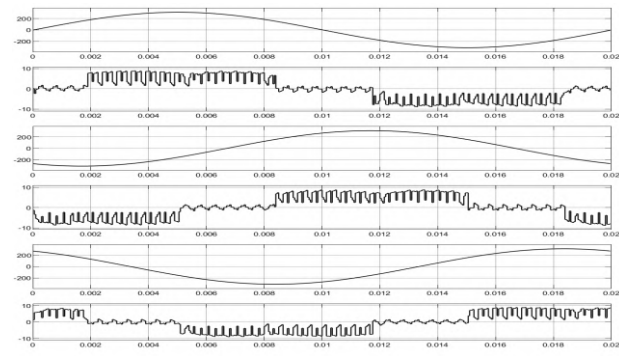
4. ผลการทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

การทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส สามารถทำได้ตามวงจรในรูปที่ 9 ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าระดับแรงดัน 220Vrms

ความถี่ 50Hz, 3 เฟส ต่อแบบวายเป็นอินพุทให้แก่วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งทำการทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส ต่อแบบเดลต้า คือ ตัวต้านทานขนาด 100 โอห์มต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 20mH และควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มแบบ SPWM ที่ความถี่สวิตซ์เท่ากับ 2kHz จ่ายให้กับสวิตซ์สองทางโดยผ่านเป็นสัญญาณอินพุทให้แก่วงจร MUX/DMUX เพื่อสร้างสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มไปขับสวิตซ์สองทางทั้ง 9 ชุด โดยทำการปรับค่าความถี่ทางด้านเอาต์พุทที่ค่าเท่ากับ 25Hz, 50Hz, และ 100Hz พร้อมทั้งสามารถปรับอัตราการมอดของสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มได้ที่ค่า 0-1.0 ซึ่งในการทดสอบได้ทำการวัดรูปคลื่นทางด้านอินพุททุกความถี่ด้านเอาต์พุทที่อัตราการมอดเท่ากับ 0.8 พบว่ารูปคลื่น, ค่าฮาร์มอนิก, และค่า THD ของทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 10 ส่วนทางด้านเอาต์พุทที่ค่าความถี่ต่างๆ และที่ค่าอัตราการมอดคูณค่าเท่ากับ 0.8 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11-13



รูปที่ 9 ระบบในการทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส



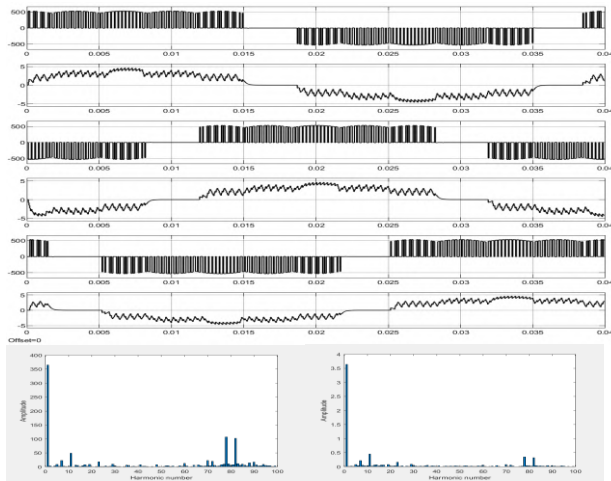
แรงดันไฟฟ้า, THD=0.469%

กระแสไฟฟ้า, THD=46%

รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านอินพุทที่อัตราการมอดของสัญญาณ SPWM เท่ากับ 0.8 พร้อมค่าฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟส a

5. สรุปผลการทดลอง

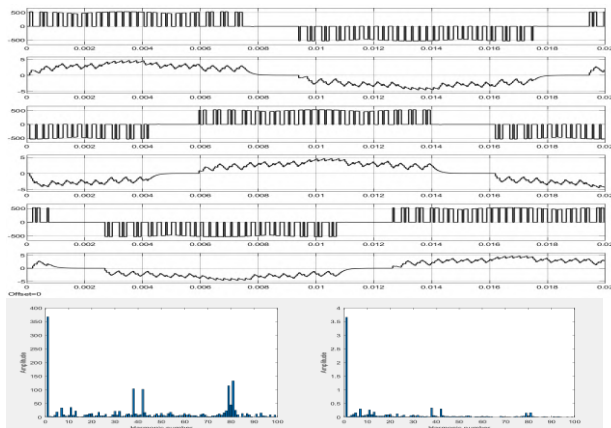
จากผลการทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส กับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส พบว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้สามารถทำการปรับความถี่ทางด้านเอาต์พุทได้ตามที่ต้องการ โดยการปรับที่ค่าความถี่ของสัญญาณที่ดับเบิลวีเอ็มแบบ SPWM ซึ่งสามารถทำได้เป็นอย่างดี รวมทั้ง



แรงดันไฟฟ้า, THD=46.7%

กระแสไฟฟ้า, THD=21.4%

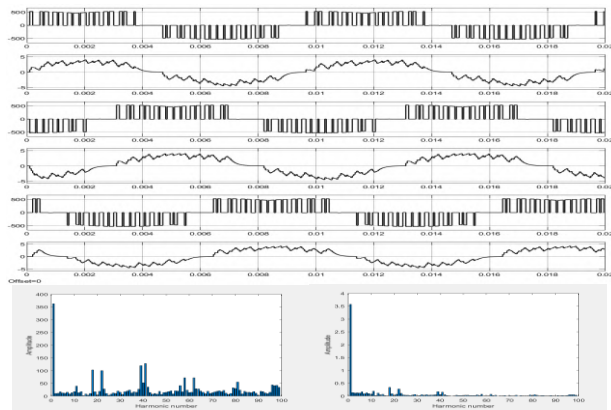
รูปที่ 11 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านด้านเอาต์พุตที่ความถี่ 25Hz และที่ค่าอัตรากรมอดของสัญญาณ SPWM เท่ากับ 0.8 พร้อมค่าฮาร์มอนิกและ ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟส a



แรงดันไฟฟ้า, THD=70.1%

กระแสไฟฟ้า, THD=22%

รูปที่ 12 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านด้านเอาต์พุตที่ความถี่ 50Hz และที่ค่าอัตรากรมอดของสัญญาณ SPWM เท่ากับ 0.8 พร้อมค่าฮาร์มอนิกและ ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟส a



แรงดันไฟฟ้า, THD=88.1%

กระแสไฟฟ้า, THD=20.5%

รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านด้านเอาต์พุตที่ความถี่ 100Hz และที่ค่าอัตรากรมอดของสัญญาณ SPWM เท่ากับ 0.8 พร้อมค่าฮาร์มอนิกและ ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟส a

สามารถปรับอัตรากรมอดของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแบบ SPWM ได้ด้วยตามต้องการเพื่อใช้ในการควบคุมโหลดแบบ 3 เฟส ซึ่งในการทดลองได้ทำการวัดรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งทางด้านอินพุตที่ทุกความถี่และทางด้านเอาต์พุตที่ทุกความถี่ด้วย อีกทั้งทำการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกและค่า Total Harmonics Distortion (THD) ของทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ทำการทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟ 3 เฟส ซึ่งได้ผลการทดลองดังข้างต้น โดยข้อมูลทั้งหมดนี้สามารถนำไปทำการสร้างวงจรต้นแบบที่ใช้งานจริงได้ต่อไป

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. Ziozas, 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
- [10] Lazhar Rmili, Sana Ktala, Salem Rahmani, and Kamal Al-Haddad, "Symmetrical Space Vector Modulation of Three Phases Indirect Matrix Converter", *2020 4th International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*, pp.278-283, 2020.