

## การออกแบบและทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

## Design and Tested of Single-Phase Matrix Converter

ประสพโชค โห้ทองคำ<sup>1</sup> สุตาพร อารัมรุณ<sup>2</sup><sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ prasopchok.hot@rmutr.ac.th<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม nongns@hotmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส ซึ่งใช้ชุดสวิตช์สองทิศทาง 4 ชุด ประกอบด้วย ไอจีบีที-ไดโอดกำลัง เป็นสวิตช์ตัดต่อในวงจรกำลังหลัก วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์นี้สามารถแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแบบไซน์ชอยดอลหนึ่งเฟสไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบของคลื่นพีคดับลิวิเอมที่สามารถปรับค่าได้ โดยการปรับค่าความถี่การสวิตช์ที่สัญญาณควบคุมและอัตราการมอดูเลชันของสัญญาณพีคดับลิวิเอม โดยสามารถปรับอัตราการมอดูเลชันได้ที่ค่า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ความถี่เอาต์พุตสามารถปรับได้ที่ค่า 12.5Hz, 25Hz, 50Hz, และ 100Hz ที่จำนวนพัลส์ 3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล โดยทำการทดสอบกับโหลดตัวต้านทานต่อเนื่องกับตัวเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบได้ทำการวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตด้วยการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดลองจริง รวมทั้งทำการวัดค่าประสิทธิภาพของวงจรด้วย

คำสำคัญ: เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ เอชทูเอชอี คอนเวอร์เตอร์ พีคดับลิวิเอมคอนเวอร์เตอร์

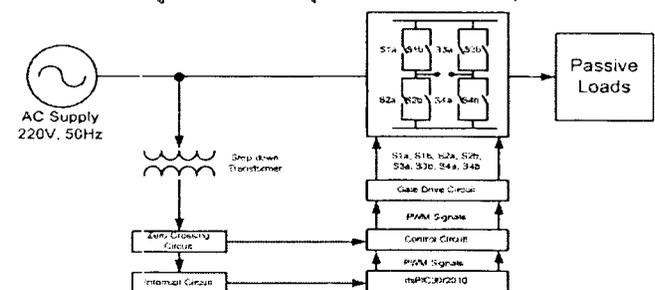
## Abstract

This paper presents the design and tested of a single phase matrix converter using 4-units of bidirectional IGBT-power Diodes as main power switching devices. The converter can directly convert the utility 1-phase sinusoidal supply voltage into a variable voltage of variable PWM pattern by adjusting the switching frequency of the control signal and modulation index of the PWM control signal. The modulation indexes are 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0. The output voltages are 12.5Hz, 25Hz, 50Hz, and 100Hz. The numbers of pulse are 3 and 5 per half cycle. Waveforms of input and output voltages and currents of the matrix converter for a given simulation with MATLAB/Simulink program and experimental are observed. Moreover, the efficiency is measured.

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

## 1. บทนำ

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตหนึ่งเฟสเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตหนึ่งเฟสโดยตรงได้มีการนำเสนอครั้งแรกโดย Abdollah Khoei [1] และ Zuckerberger [2] แต่ยังไม่สามารถที่จะทำการปรับความถี่เอาต์พุตได้หลากหลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่สามารถปรับความถี่เอาต์พุตได้หลากหลาย โดยจะทำการทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสกับ โหลดแบบพาสซีฟที่สามารถปรับค่าความถี่เอาต์พุตได้ รวมทั้งทำการวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และจากการทดลองจริง ตลอดจนวัดค่าประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งได้ทำการทดสอบกับ โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ โดยทำการปรับค่าความถี่เอาต์พุตที่ค่า 12.5 Hz, 25Hz, 50Hz และ 100Hz ที่อัตราการมอดูเลชัน 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 ซึ่งมีจำนวนพัลส์ 3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ ได้ต่อไป



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

## 2. วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสมีบล็อกไดอะแกรมและวงจรดังรูปที่ 1 และ 2 โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตเป็น

$$v_{in}(t) = V_{im} \sin \omega_i t \quad (1)$$

และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ

$$v_{out}(t) = V_{om} \sin \omega_o t \quad (2)$$

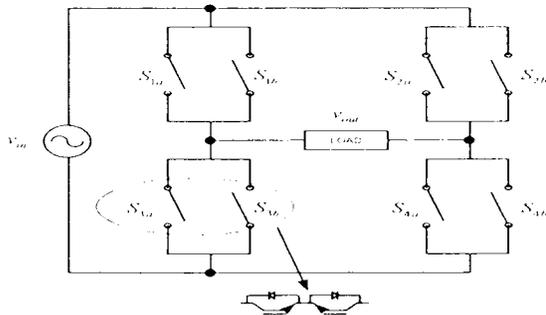
โดยที่ค่าความถี่เอาต์พุตที่ใช้งานมีค่าเท่ากับ

$$f_o = f_m - f_i \quad (3)$$

การทำงานของสวิตช์จะทำงานเพื่อตัดต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่

สามารถปรับความถี่และอัตราการมีอดได้ โดยมีการทำงานดังสมการที่ 4 ดังนี้

$$v_o(t) = \begin{cases} v_i(t) & S_1 \text{ \& } S_4 \text{ are ON} \\ -v_i(t) & S_2 \text{ \& } S_3 \text{ are ON} \\ 0 & S_1 \text{ \& } S_2 \text{ are ON} \\ 0 & S_3 \text{ \& } S_4 \text{ are ON} \end{cases} \quad (4)$$



รูปที่ 2 วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

จากรูปที่ 1 ส่วนประกอบของวงจรสามารถแยกออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

1. สัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม (PWM Signals)
2. วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์ (Zero Crossing Voltage Detector Circuit)
3. วงจรสร้างสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (Interrupt Circuit)
4. วงจรควบคุม (Control Circuit)

2.1 สัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม (PWM Signals)

สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มสร้างขึ้นจาก dsPIC30F2010 ซึ่งทำให้ได้ค่าความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 12.5Hz, 25Hz, 50Hz และ 100Hz โดยกรเก็บข้อมูลของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มจะเก็บในลักษณะเป็นตารางในหน่วยความจำของ dsPIC30F2010 เมื่อทำการอ่านค่าข้อมูลจากตารางข้อมูลส่งออกทางพอร์ตของ dsPIC30F2010 จะได้สัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม ที่อัตราการมีอดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 และ 4



(ก) อัตราการมีอดที่ 0.2 (ข) อัตราการมีอดที่ 0.8

รูปที่ 3 การออกแบบสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม 3 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล



(ก) อัตราการมีอดที่ 0.2 (ข) อัตราการมีอดที่ 0.8

รูปที่ 4 การออกแบบสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล

ในการปรับความถี่และอัตราการมีอดของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มสามารถทำได้ตามสมการที่ 5 และ 6

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{sine}} \quad (5)$$

$$m_a = \frac{V_{m,sine}}{V_{m,tri}} \quad (6)$$

2.2 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์ (Zero Crossing Voltage Detector Circuit)

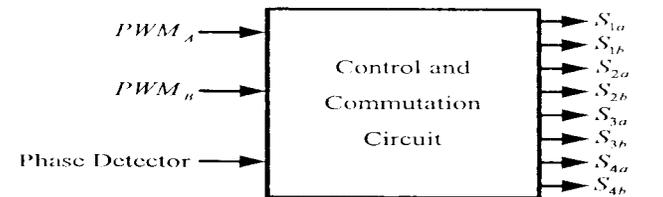
วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าศูนย์ทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าศูนย์โวลท์ของไฟเอซไบนทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า โดยจะนำสัญญาณไฟเอซที่ได้จากการลดระดับลงมาแล้วจากวงจรแยกกราวด์มาผ่านวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะได้สัญญาณพัลส์ที่มีความสัมพันธ์กับไฟเอซไบล์และสัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบจะนำไปเป็นสัญญาณอินพุทให้แก่วงจรสร้างสัญญาณอินเตอร์รัพท์แบบอนมาสกเกเบิล (Nonmaskable Interrupt) ส่งไปยัง dsPIC30F2010 ต่อไป

2.3 วงจรสร้างสัญญาณอินเตอร์รัพท์ (Interrupt Circuit)

การสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสนั้น การเริ่มต้นของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแต่ละชุดจะต้องเริ่มจากตำแหน่งศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าไบนจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทำงานในลักษณะที่ซิงโครไนซ์กัน นั่นคือทำให้เฟสของแรงดันไฟฟ้าอินพุท และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตรงกัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดการซิงโครไนซ์ขึ้นจะใช้การอินเตอร์รัพท์ไมโครโปรเซสเซอร์ให้เริ่มสร้างและส่งข้อมูลสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม ณ ตำแหน่งศูนย์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุท โดยสัญญาณอินเตอร์รัพท์ที่ใช้เป็นการอินเตอร์รัพท์แบบอนมาสกเกเบิล (Non-maskable Interrupt)

2.4 วงจรควบคุม (Control Circuit)

วงจรควบคุมการทำงานของสวิทซ์ทั้ง 4 ชุด มีลักษณะตามรูปที่ 5 โดยที่มีสัญญาณ PWM จำนวน 2 ชุด และสัญญาณจากวงจร Phase Detector เป็นสัญญาณอินพุทให้แก่วงจรควบคุมที่ใช้เป็นวงจรโลจิกเกตที่ทำการเลือกสัญญาณ PWM ออกไปควบคุมการทำงานของสวิทซ์สองทิศทางทั้ง 4 ชุด ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรควบคุมการทำงานของสวิทซ์ทั้ง 4 ชุด

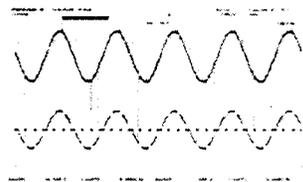
3. ผลการทดสอบกับโหลด

การทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสตามที่ได้ทำการสร้างขึ้นได้ทำการทดสอบกับโหลดตัวต้านทานและตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าอินพุทขนาด 100 โวลท์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ แล้วทำการจ่ายสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มเพื่อควบคุมสวิทซ์สองทิศทางให้ทำงาน ซึ่งทำการจ่ายสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มที่จำนวนพัลส์

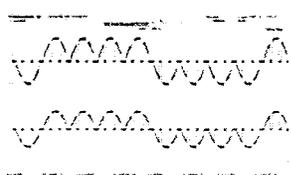
3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ที่อัตราการมีอด 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 และมีค่าความถี่เอาต์พุตของวงจรที่ค่าเท่ากับ 12.5Hz, 25Hz, 50Hz และ 100Hz โดยทำการทดสอบกับ โหลดตัวต้านทาน และ โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลการทดสอบต่างๆ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน

การทดสอบกับโหลดตัวต้านทานขนาด 500 วัตต์ ทำการบันทึกผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และจากการทดลอง จะได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตที่ค่าความถี่สวิช 12.5 Hz และ 50Hz ที่อัตราการมีอด 0.8 และจำนวนพัลส์เท่ากับ 3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิลสามารถแสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านอินพุตและเอาต์พุตดังรูปที่ 6-9

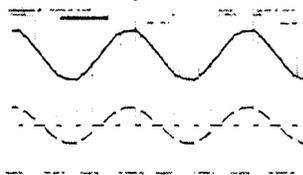


(ก) ด้านอินพุต

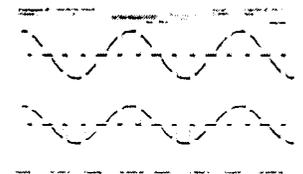


(ข) ด้านเอาต์พุต

รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 12.5 เฮิรตซ์ อัตราการมีอด 0.8 จำนวน 3 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)

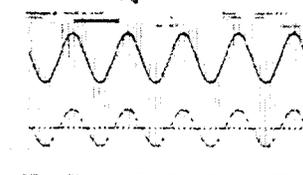


(ก) ด้านอินพุต

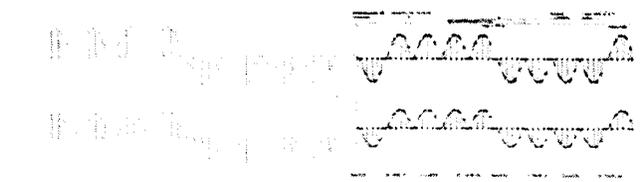


(ข) ด้านเอาต์พุต

รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิรตซ์ อัตราการมีอด 0.8 จำนวน 3 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)

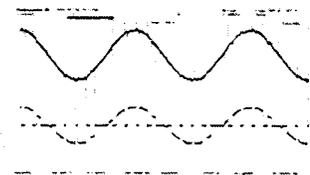


(ก) ด้านอินพุต

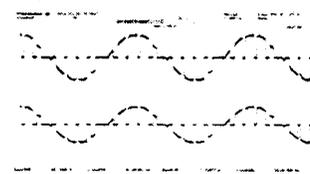


(ข) ด้านเอาต์พุต

รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 12.5 เฮิรตซ์ อัตราการมีอด 0.8 จำนวน 5 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)



(ก) ด้านอินพุต

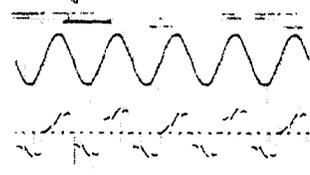


(ข) ด้านเอาต์พุต

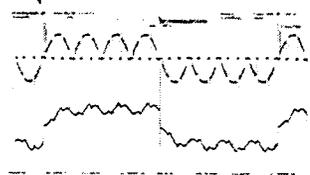
รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิรตซ์ อัตราการมีอด 0.8 จำนวน 5 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)

3.2 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ

ทำการทดสอบกับโหลดตัวต้านทานขนาด 100 วัตต์ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 1.0021 เฮนรี่ แล้วทำการบันทึกผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และจากการทดลอง จะได้รูปสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ค่าความถี่สวิช 12.5Hz, 25Hz, 50Hz และ 100Hz ที่อัตราการมีอด 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โดยมีจำนวนพัลส์เท่ากับ 3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิลได้ผลการทดลองดังรูปที่ 10-13

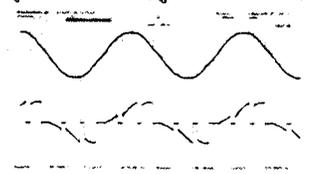


(ก) ด้านอินพุต

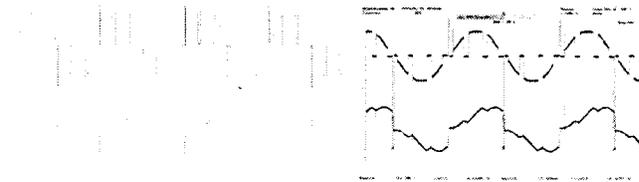


(ข) ด้านเอาต์พุต

รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 12.5 เฮิรตซ์ อัตราการมีอด 0.8 จำนวน 3 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)

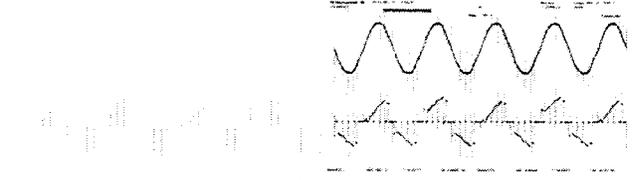


(ก) ด้านอินพุต



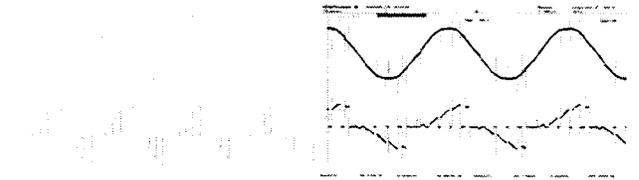
(ข) ด้านเอาต์พุต

รูปที่ 11 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ อัตราการมอดูเลต 0.8 จำนวน 3 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)



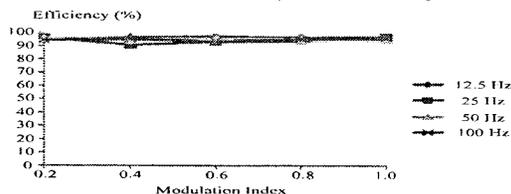
(ก) ด้านอินพุต

รูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 12.5 เฮิร์ตซ์ อัตราการมอดูเลต 0.8 จำนวน 5 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)



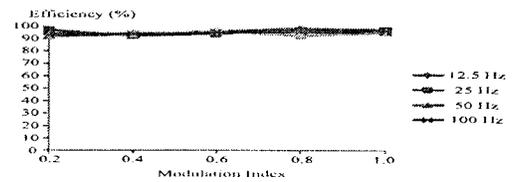
(ก) ด้านอินพุต

รูปที่ 13 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ อัตราการมอดูเลต 0.8 จำนวน 5 พัลส์ ต่อครึ่งไซเคิล (รูปบน : แรงดัน, รูปล่าง : กระแส)



รูปที่ 14 ค่าประสิทธิภาพกับอัตราการมอดูเลตที่ค่าความถี่ต่างๆ ที่จำนวนพัลส์ 3 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ทดสอบกับโหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 14 และ 15 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรต้นแบบพบว่าวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสกับ โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำที่จำนวนพัลส์ 3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดที่ 96.98 และ 97.83 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 15 ค่าประสิทธิภาพกับอัตราการมอดูเลตที่ค่าความถี่ต่างๆ ที่จำนวนพัลส์ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ทดสอบกับ โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ

#### 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างพร้อมทำการทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสทั้งจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และจากการทดลองจริง โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอินพุตจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าหนึ่งเฟสขนาดแรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยใช้สวิตช์สองทิศทาง (Bi-directional Switch) ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เพื่อทำการทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟ โดยทำการ ON-OFF ด้วยสัญญาณพีดับลิเวียมที่จำนวนพัลส์ 3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล ที่ค่าความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 12.5Hz, 25Hz, 50Hz และ 100Hz โดยมีค่าอัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ที่จำนวนพัลส์ 3 และ 5 พัลส์ต่อครึ่งไซเคิล พบว่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสามารถปรับความถี่ได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรต้นแบบมีค่าเท่ากับ 97.83 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งรูปคลื่นที่วัดได้ทั้งจากการจำลองและจากการทดลองจริงมีลักษณะเหมือนกันและเป็นไปในทางเดียวกัน ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกใช้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและด้านต่างๆต่อไป

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdollah Khoei and Subbaraya Yuvarajan, "Single-Phase AC-AC Converter Using Power MOSFET's", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 35, No. 3, August 1988.
- [2] A. Zuckerberger, D. Weinstock, and A. Alexandrovitz, "Single-phase Matrix Converter", IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol.144, No.4, pp. 235-240., July 1997.
- [3] Zahirrudin Idris, Mustafar Kamal Hamzah, and Mohamad Fadzil Saidon, " Implementation of Single-Phase Matrix Converter as a Direct AC-AC Converter with Commutation Strategies", 37<sup>th</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC06), 18-22 June 2006, pp. 1-7.
- [4] S.Z. Mohammad Noor, M.K.Hamzah, N.F. Abdul Rahman, A.F. Hapani, and Z. Idris, "XILINK FPGA Design for Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) control of Single-phase Matrix Converter", 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Application (ISIEA2011), Langkawi, Malaysia, September 25-28, 2011,