

# การควบคุมเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สำหรับพลังงานหมุนเวียน Control of a Matrix Converter for Renewable Energy Sources

ประจักษ์ บุญภักดี<sup>1</sup> ชัชวาลย์ เยระบุตร<sup>2</sup>

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา<sup>1</sup>

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล<sup>2</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอ การทดสอบการควบคุมเชิงเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนด้วยเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนด้วยแหล่งพลังงานหมุนเวียน หลักการทำงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ และวิธีการมอดูเลตเชิงสเปกตรัมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้อธิบายในรายละเอียด วงจรต้นแบบของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ขนาดพิกัด 3kW, 230V, 50Hz ถูกพัฒนาขึ้น การควบคุมเชิงเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและมอดูเลตของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS 320F28069 สองบอร์ดที่ทำงานคู่ขนาน ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของการควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

**คำสำคัญ:** เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์, การมอดูเลตเชิงสเปกตรัมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

## Abstract

This paper presents the simulation of vector control of a matrix converter fed induction generator for renewable energy sources. Operating principle, indirect space vector PWM of a matrix converter, and vector control of induction generators are presented and discussed. A matrix converter prototype 3 kW, 230V, 50Hz is developed and digitally controlled by using 32-bit microcontrollers TMS320F28069. The experimental results confirm effectiveness of the proposed method.

**Keywords :** Matrix converter, indirect space vector PWM, induction generator

## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การเพิ่มขึ้นของประชากรโลก ส่งผลให้มีความต้องการ พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมากพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้กันมากได้มาจาก พลังงานจากซากฟอสซิล ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติและน้ำมันซึ่งเป็นที่แหล่งพลังงานธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไปและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานอื่นเพื่อป้องกันปัญหาวิกฤติขาดแคลนพลังงาน พลังงานลม/พลังงานน้ำ เป็นพลังงานสะอาดที่ได้จากธรรมชาติ วิกฤติการณ์พลังงานสามารถนำมาใช้ได้ตลอดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สำหรับการแปลงพลังงานหมุนเวียนดังกล่าวเป็นพลังงานไฟฟ้านั้น ต้องอาศัยทั้งเป็นตัวแปลงพลังงานจลน์ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แต่การแปลงพลังงานยังไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากปัญหาความเร็วลมต่ำหรืออัตราการไหลของน้ำต่ำหรือการเปลี่ยนแปลงน้ำไม่สม่ำเสมอเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องควบคุมความเร็วของกังหันให้สัมพันธ์กับความเร็วลม/อัตราการไหลของน้ำเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ดังนั้นจึงได้นำเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์มาใช้ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีข้อดีหลายประการ

ใน ค.ศ. 1980 M. Venturini [1] ได้นำเสนอ วงจรที่สามารถแปลงผัน ความถี่ แรงดันไฟฟ้าและ ควบคุมค่าตัวประกอบกำลังโดยใช้ทรานซิสเตอร์และใช้หลักการมอดูเลตขั้นความถี่สูงในการสร้าง แรงดันไฟฟ้าด้านออก ใน ค.ศ. 1989 A. Alessina and M. Venturini [2] ได้นำเสนอ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ กำลัง ที่ทำหน้าที่แปลงผันพลังงานไฟฟ้า

กระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุม แรงดัน ความถี่ไฟฟ้า มุมเฟส ด้านออกได้ตามต้องการ โดยที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเรียงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ได้กลายเป็นวงจรต้นแบบ เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ใน ค.ศ. 1995 L. Huber and D. Borojevic [3] ได้นำเสนอ หลักการมอดูเลตเชิงสเปกตรัมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยพิจารณาว่าวงจรด้านเข้าเป็นวงจรเรียงกระแสและด้านออกเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อผ่านจุดเชื่อมโยงไฟตรงเสมือน

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดสำหรับแหล่งพลังงานหมุนเวียนแสดงดังรูปที่ 2

## 2. หลักการทำงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส จะประกอบด้วยสวิตช์สองทาง จำนวน 9 สวิตช์ ดังรูปที่ 2 กำหนดตัวอักษรพิมพ์เล็กเป็น เฟสด้านเข้า {a, b, c} และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่เป็นเฟสด้านออก {A, B, C} ตัวอย่างเช่น  $S_{aA}$  เป็นสวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเฟส a ด้านเข้ากับเฟส A ด้านออก โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านออกสามารถควบคุมให้มีระดับแรงดัน ความถี่และมุมเฟส ตามต้องการโดยการมอดูเลตสวิตช์เข้าด้วยสวิตช์ซึ่งฟังก์ชัน [3,4]

$$\text{แรงดันด้านออกจะได้} \quad V_o = SV_i \quad (1)$$

$$\text{กระแสด้านเข้าสามารถคำนวณได้จาก} \quad I_i = S^T I_o \quad (2)$$

โดยที่สวิตช์ซึ่งฟังก์ชันในรูปเมตริกซ์

$$S = \begin{bmatrix} S_{aA} & S_{bA} & S_{cA} \\ S_{aB} & S_{bB} & S_{cB} \\ S_{aC} & S_{bC} & S_{cC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

สถานะปิดและเปิดสวิตช์ถูกกำหนดโดย

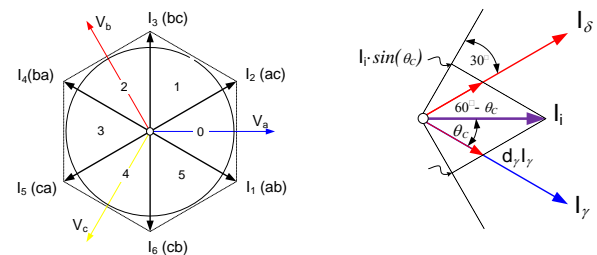
$$S_{jk} = 1 ; \text{ปิด} \quad j \in \{a, b, c\}, k \in \{A, B, C\} \quad S_{jk} = 0 \text{ เปิด}$$

## 2.1 การมอดูเลตเชิงสเปกตรัมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า

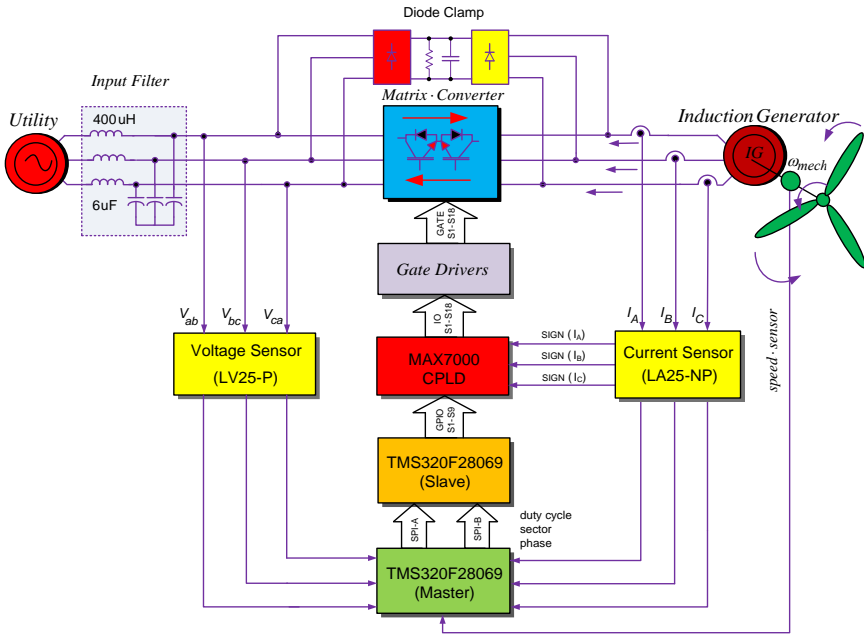
วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าด้านเข้า ประกอบด้วยสวิตช์สองทางจำนวน 6 สวิตช์ วงจรนี้ทำหน้าที่เรียง กระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าส่วนด้านออกจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมทั้งสามารถควบคุมกระแสด้าน เข้าให้เป็นรูปไซน์ และโดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1 [3] เพื่อที่จะให้ไฟฟ้ากระแสตรงมี ค่ามากที่สุด การมอดูเลตเชิงสเปกตรัมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า จะมี 6 แอตกัฟเฟกเตอร์ และ 3 ซีไร่ เวกเตอร์ โดยที่ สเปกตรัมของวงจรเรียงกระแส แสดงดังรูปที่ 1

$$d_\delta = \frac{T_\delta}{T_s} = m_i \sin(60 - \theta_i) \quad (4)$$

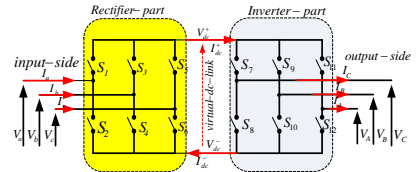
$$d_\gamma = \frac{T_\gamma}{T_s} = m_i \sin(\theta_i) \quad (5)$$



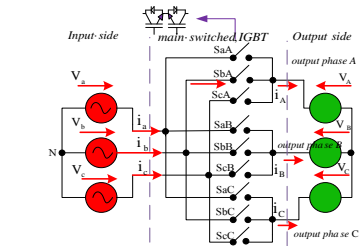
รูปที่ 1 สเปกตรัมของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2. เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สำหรับพลังงานหมุนเวียน



รูปที่ 3. เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ทางอ้อม



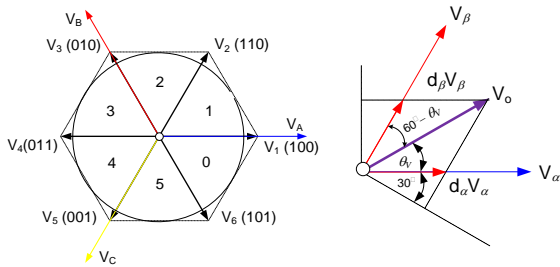
รูปที่ 4. วงจรเสมือนของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.2 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์วงจรงอินเวอร์เตอร์

ส่วนที่สองคือวงจรงอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะประกอบไปด้วยจำนวนสวิตช์ 6 สวิตช์ ด้านเข้ารับไฟฟ้า กระแสตรงจากวงจรงเรียงกระแส แล้วทำการแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ด้านออกที่สามารถ ควบคุม ให้มีระดับแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และมุมเฟสด้านออกตามต้องการ การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ [3] วงจรงอินเวอร์เตอร์ จะมี 6 แอตกที่ฟเวกเตอร์ และ 2 ซีโรเวกเตอร์ โดยที่ สเปซเวกเตอร์ของวงจรง อินเวอร์เตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5 และสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชั่นวงจรงอินเวอร์เตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5

$$d_\delta = \frac{T_\delta}{T_s} = m_p \sin(60 - \theta_v) \tag{6}$$

$$d_\gamma = \frac{T_\gamma}{T_s} = m_p \sin(\theta_v) \tag{7}$$



รูปที่ 5 สเปซเวกเตอร์วงจรงอินเวอร์เตอร์

2.3 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

จากหลักการสเปซเวกเตอร์ของทั้งสอวงจรง คือวงจรงบริดจ์คิไฟเออร์ และวงจรงบริดอินเวอร์เตอร์ที่กล่าวมาแล้วสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์จะได้คู่เวกเตอร์ดั่งรายละเอียด เมื่อพิจารณาแรงดันด้านเข้าและแรงดันด้านออก [3,4] โดยแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะสัมพันธ์กับแรงดันด้านเข้าด้วยสมการแรงดันด้านออกจะสัมพันธ์กับแรงดันด้านเข้าด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [d_\alpha V_\alpha d_\gamma I_\gamma^T + d_\beta V_\beta d_\gamma I_\gamma^T + d_\alpha V_\alpha d_\delta I_\delta^T + d_\beta V_\beta d_\delta I_\delta^T] \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_C \end{bmatrix} \tag{8}$$

กระแสด้านเข้าจะสัมพันธ์กับกระแสด้านออกด้วยสมการ

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = [d_\gamma V_\alpha I_\gamma^T + d_\delta d_\alpha I_\delta^T + d_\gamma I_\gamma d_\beta V_\beta^T + I_\delta d_\beta d_\delta V_\beta^T] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{9}$$

ค่าวิญจักรงาน (Duty Cycle) ของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์คำนวณได้

$$d_{\gamma\alpha} = \frac{T_{\gamma\alpha}}{T_s} = m_p m_i \sin(60 - \theta_v) \sin(60 - \theta_i) \tag{10}$$

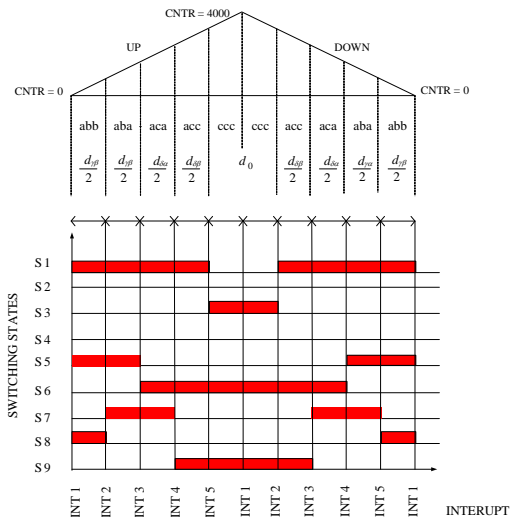
$$d_{\alpha\delta} = \frac{T_{\alpha\delta}}{T_s} = m_p m_i \sin(60 - \theta_v) \sin(\theta_i) \tag{11}$$

$$d_{\gamma\beta} = \frac{T_{\gamma\beta}}{T_s} = m_p m_i \sin(\theta_v) \sin(60 - \theta_i) \tag{12}$$

$$d_{\beta\delta} = \frac{T_{\beta\delta}}{T_s} = m_p m_i \sin(\theta_v) \sin(\theta_i) \tag{13}$$

$$d_o = \frac{T_o}{T_s} = 1 - (d_{\gamma\alpha} + d_{\alpha\delta} + d_{\gamma\beta} + d_{\beta\delta}) \tag{14}$$

ค่าดัชนีการมอดูเลตของวงจรงบริดจ์รีคตีไฟเออร์จะถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงสูงสุด และค่าดัชนีการมอดูเลตของวงจรงบริดอินเวอร์เตอร์จะมีค่าระหว่าง 0-1 จากสมการที่ (7)-(11) สามารถนำมาสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 6

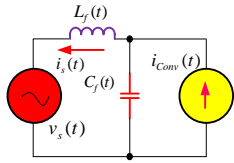


รูปที่ 6 การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง

3.การออกแบบวงจรงรองกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าด้านเข้าของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ไม่เป็นรูปไซน์เต็มมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมีความถี่เท่ากับความถี่สวิตซ์ ดังนั้นจึงทำให้กระแสไฟฟ้าด้านเข้าขึ้นตอนการออกแบบวงจรงรองกระแสไฟฟ้าด้านเข้า โดยที่เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

จะถูกจำลองให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน และตัวอินดักเตอร์และคาปาซิเตอร์มีคุณสมบัติเป็นอุดมคติ [3]



รูปที่ 6. วงจรเทียบเคียงของวงจรกรองกระแสด้านเข้า

1. จากความสัมพันธ์ของค่าอินดักเตอร์และคาปาซิเตอร์และความถี่ตัดข้าม (Cross Over Frequency) เป็นไปตามสมการ

$$LC = \frac{1}{\omega_{cut}^2} \quad (15)$$

2. ค่าอินดักเตอร์จะต้องเลือกให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้แรงดันตกคร่อมไม่สูงจนเกินไป ขณะที่ทำงานเกินพิกัดดังนั้นอินดักเตอร์สูงสุดที่ทำให้เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่พิกัด

$$L \leq \left( \frac{V^2}{\omega_1 P_{out}} \right) \left( 1 - \frac{\% \Delta V}{100} \right) \sin \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{\% \Delta V}{100} \right) \right) \quad (16)$$

โดยที่

- $\omega_1$  คือ ความถี่มูลฐาน
- $\% \Delta V$  คือ เปอร์เซ็นต์แรงดันตกคร่อมอินดักเตอร์
- $P_{out}$  คือ พิกัดของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

3. การเลือกค่าคาปาซิเตอร์ควรจะมีค่าน้อยที่สุด ไม่ควรเลือกให้มีค่าขนาดใหญ่ อาจทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าต่ำในกรณีที่มีเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่โหลดต่ำ

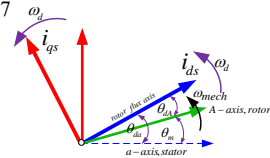
$$C \leq \frac{1}{\omega_1 V^2} \sqrt{P_{min}^2 \left( \frac{1}{PF_{min}} - 1 \right)} \quad (17)$$

โดยที่  $P_{min}$  คือ กำลังไฟฟ้าต่ำสุด (10% ของพิกัดเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์)

$PF_{min}$  คือ ค่าตัวประกอบกำลังต่ำสุดที่ทำงานจุดต่ำสุดไม่ควรต่ำกว่า

#### 4. การควบคุมเชิงเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การควบคุมเชิงเวกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีลักษณะการทำงานคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรง กล่าวคือแรงบิดสามารถควบคุมได้อย่างอิสระ ในงานวิจัยนี้ใช้การควบคุมเชิงเวกเตอร์ทางอ้อมที่อ้างอิงอยู่บนแกนอ้างอิงหมุนของโรเตอร์ฟลักซ์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7. การอ้างอิงกระแสและแรงดันบนแกนสเตเตอร์และ โรเตอร์ฟลักซ์

ดังนั้นสมการแบบจำลองพลศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะพิจารณาอยู่บนแกนตรง และแกนตั้งฉาก ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ [5,6]

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_d \phi_{qs} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{ds} + L_m \frac{d}{dt} (i_{ds} + i_{dr}) \quad (18)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_d \phi_{ds} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{qs} + L_m \frac{d}{dt} (i_{qs} + i_{qr}) \quad (19)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_{dr} \phi_{qr} + L_{lr} \frac{d}{dt} i_{dr} + L_m \frac{d}{dt} (i_{ds} + i_{dr}) \quad (20)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_{dr} \phi_{dr} + L_{lr} \frac{d}{dt} i_{qr} + L_m \frac{d}{dt} (i_{qs} + i_{qr}) \quad (21)$$

ความเร็วเชิงมุม สลิป (Slip) สามารถคำนวณได้จาก

$$\omega_{dA} = \frac{R_r L_m i_{qs}}{L_r \phi_{dr}} \quad (22)$$

ตำแหน่งมุมประมาณของโรเตอร์ฟลักซ์คำนวณได้จาก

$$\theta_{dA} = \int (\omega_{mech} + \omega_{dA}) dt \quad (23)$$

ฟลักซ์สนามแม่เหล็กโรเตอร์

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (24)$$

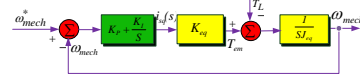
ฟลักซ์สนามแม่เหล็กโรเตอร์ในแนวตั้งฉากจะถูกควบคุมให้เท่ากับศูนย์  $\lambda_{qr}=0$  จะได้สมการแรงบิดได้

$$T_{em} = \frac{PL_m^2}{2L_r} (i_{qs} \phi_{dr}) \quad (25)$$

#### 5. ตัวควบคุม $K_p$ และ $K_i$ วงรอบควบคุมความเร็วรอบ

ความเร็วรอบจะใช้ตัวควบคุม  $K_p$  และ  $K_i$  จะควบคุมที่แกนตั้งฉาก จากสมการที่ (22) โดยออกแบบที่สภาวะไร้โหลด ( $T_L=0$ ) และให้ถือว่าเป็นสัญญาณที่รบกวน

[6] วงรอบการควบคุมความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8. วงรอบการควบคุมความเร็วรอบโดยวิธีตัวควบคุมพีโอ

โดยที่ค่า  $K_{eq} = \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{sd}^*$  (26)

ในการออกแบบจะใช้ ความถี่ตัดข้าม เท่ากับ 100 Hz และใช้ค่า ส่วนต่อมอดุส เท่ากับ 60 องศา ดังนั้นอัตราขยายของตัวควบคุมพีโอ สามารถคำนวณได้จากสมการ

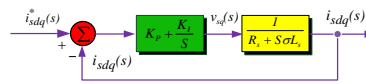
$$K_i = \frac{\omega_c^2 J_{eq}}{(K \sqrt{1 + \tan^2(PM)})^2} \quad (27)$$

$$K_p = \frac{K_i \tan(PM)}{\omega_c} \quad (28)$$

จากสมการเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ในภาคผนวก ดังนั้นจะได้ค่าอัตราขยายของความเร็วรอบที่  $K_i = 0.0632$ ,  $K_p = 3.60$

#### 6. ตัวควบคุม $K_p$ และ $K_i$ วงรอบกระแสแกนตรงและแกนตั้งฉาก

จากสมการมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสมการที่อ้างอิงแกนหมุน (18) และ (21) แร่ด้นไฟฟ้าเหนี่ยวนำไขว้และแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ จะพิจารณาเป็นสัญญาณที่เข้ามารบกวนระบบ [6] เมื่อนำมาเขียนในวงรอบปิด แสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9. การควบคุมกระแสไฟฟ้าแกนตรงด้วยตัวควบคุมพีโอ

ตัวควบคุมพีโอ โดยใช้ค่าความถี่ตัดข้ามห่าง 10 เท่า จากวงรอบแรงบิด ส่งผลให้เลือกค่าความถี่ตัดข้าม 1,000 Hz และเลือกส่วนต่อมอดุสเท่ากับ 60 องศา [6]

#### 7. การทดสอบจริงกับวงจรต้นแบบ

วงจรต้นแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้รับการทดสอบใช้เชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 10 โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในภาคผนวก การทดสอบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส เชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับระบบไฟฟ้าในการทดสอบจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังทางกลับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขณะที่เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อต้นกำลังทางกลับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้แรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศตรงข้ามทิศการหมุนและเริ่มเข้าสู่โหมดการเบรกแบบคืนพลังงาน ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) เปลี่ยนสถานะจากบวกเป็นลบ ผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบต้นกำลังทำเอาท์พุทเพาเวอร์เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 13 รูปที่ 11 กระแสไฟฟ้าเข้าเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (สีแดง) 50 Hz และ กระแสไฟฟ้าออกเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำความถี่ประมาณ 36Hz (สีเขียว) และการควบคุมเชิงเวกเตอร์จะควบคุมให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนที่ 1130rpm ดังแสดงในรูปที่ 11 สีน้ำเงิน และรูปที่ 12 แสดงกระแสไฟฟ้าด้านเข้ากระแสไฟฟ้าด้านออก (สีแดง) และแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายด้านนอกของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากการมอดุเลตที่มีความถี่สูงเข้ากับแรงดันส่งผลให้เกิดแรงดันมีลักษณะเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมมีความกว้างเท่ากับช่วงเวลาปิด-เปิดสวิตช์

#### 8. สรุปผลการทดลอง

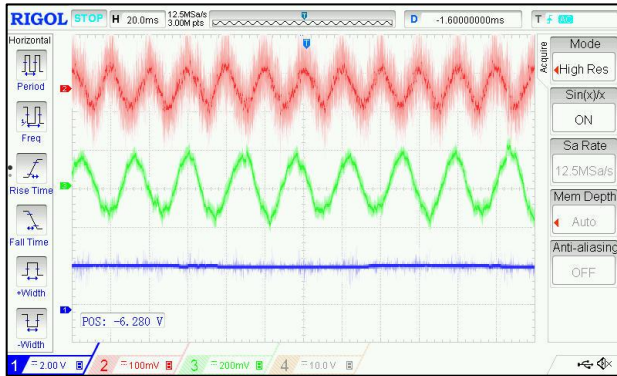
บทความนี้นำเสนอการพัฒนาและควบคุมเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ป้อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแหล่งพลังงานหมุนเวียน หลักการทำงานและการวิเคราะห์ของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ สเปซเวกเตอร์ฟลักซ์วิดมีอคดูเลชันทางอ้อม การควบคุมเชิงเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การออกแบบอัตราขยายวงรอบการควบคุมความเร็วและสนามแม่เหล็กโรเตอร์ได้ถูกนำเสนอ นอกจากนั้นได้อธิบายการพัฒนา วงจรต้นแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 kVA, 230 V, 3Ø และการพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่าเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมกับระบบไฟฟ้า



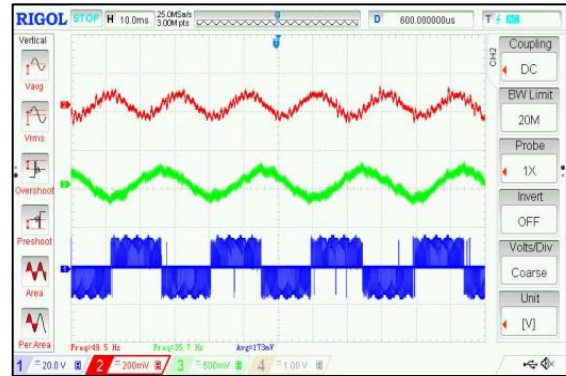
รูปที่ 10. เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สำหรับพลังงานหมุนเวียน

9. เอกสารอ้างอิง

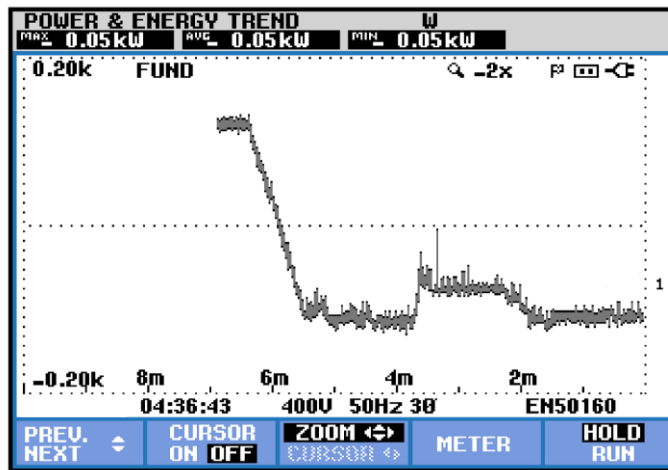
[1] M. Venturini, A new sine wave in, sine wave out conversion technique eliminates reactive elements. Proc. of Powercon 7, 1980, E3-1-E3-15.  
 [2] A. Alesina, M. Venturini, Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 4, no:1, pp. 101- 112, Jan. 1989.  
 [3] Huber L, Borojevic D. Space Vector Modulated Three-Phase to Three-Phase Matrix Converter with Input Power Factor Correction. IEEE Trans. Ind.1995,31 (6): 1234- 1246.  
 [4] Han Ju Cha, Analysis and Design of Matrix Converters for Adjustable Speed Drives and Distributed Power Sources, Ph.D Thesis Texas A&M University  
 [5] Werner Leonhard, Control of Electrical Drives, SpringerVerlag.  
 [6] Ned.Mohan, Power Electronics and Drives, MNPERE



รูปที่ 11. กระแสก่อนผ่านวงจรกรองด้านเข้า 2A/div, กระแสไฟฟ้าหลังผ่านวงจรกรอง 2A/div, ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1000rpm/div



รูปที่ 12. กระแสไฟฟ้าด้านเข้า (1A/div), กระแสไฟฟ้าด้านออก(2.5A/DIV), แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย V<sub>AB</sub> (500V/DIV), TIME/DIV=20ms



รูปที่ 13. กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหนึ่งขั้วนำป้อนเข้าระบบไฟฟ้าด้วยเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

ภาคผนวก

**Induction Motor:** 0.37kW, 230V/50Hz, 4Poles,  $R_s=7.1 \Omega$ ,  $L_s=22.6mH$ ,  $R_r=7 \Omega$ ,  $L_r=0.283H$ ,  $L_m=22.6mH$ ,  $J_m=0.0013 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$   
**Matrix Converter:** 3kVA, 230V, 50Hz, Switching Frequency=10kHz, Power Factor=0.95, Input Filter=1.5mH/6uF, Clamp =100kΩ/16.5uF.