วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

การควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

The Input Power Factor Control of a Carrier-Based Dipolar PWM for Matrix Converters

ไพบูลย์ เกียรติสุขคณาธร[1*] และ สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์[2]

[1]อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดสุพรรณบุรี 72130
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์อิสระ b และ d ในคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตอย่างเหมะสม วิธีที่นำเสนอจะมีขั้นตอนในการมอดูเลตง่ายๆไม่ยุ่งยากซับซ้อน นอกจากนั้นยังสามารถแสดงความเชื่อมโยงของการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าจากกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟด้านออกได้อย่างชัดเจน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าได้ตามต้องการ

Abstract

This paper presents the input power factor control of a modulation using a carrier-based dipolar for matrix converters by determining the optimum value of free parameters, b and d, in general solutions of the modulation matrix. The proposed PWM method is not only less complicated but can clearly show the coupling of the input power factor control from both active and reactive output power. The experimental results show that the proposed PWM method can control the conditioned input power factor set earlier

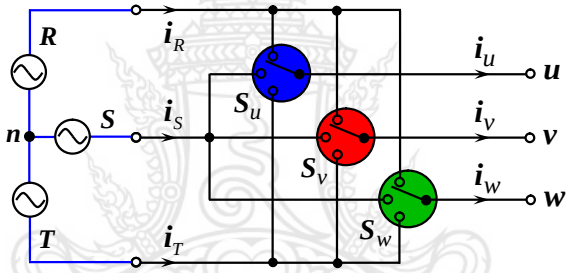
คำสำคัญ : เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ ตัวประกอบกำลัง
Keywords : matrix converters, carrier-based dipolar PWM, power factor

ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ Paiboonkiat@hotmail.com โทร. 0 3554 4301-3 ต่อ127

1. บทนำ

เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์จะมีลักษณะโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยสวิตช์ 9 ตัว ทำหน้าที่ควบคุมการสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการจากแรงดันด้านเข้า ในขณะเดียวกันจะทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสหรือตัวประกอบกำลังด้านเข้าเป็นไปตามที่ต้องการด้วย ซึ่งการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้านั้นนอกจากจะควบคุมให้มีค่าเท่ากับหนึ่งแล้วยังสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้าหรือล้าหลังได้อีกด้วยเช่นงานวิจัย นำเสนอการมอดูเลตเพื่อควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลังเพื่อชดเชยผลของวงจรกรองผ่านต่ำด้านเข้าที่มีอิมพีแดนซ์รวมเป็นคาปาซิทีฟ และงานวิจัย นำเสนอเมทริกซ์การมอดูเลต 2 รูปแบบที่ให้มุมเฟสของกระแสด้านเข้าแตกต่างกันซึ่งทำให้สามารถควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าได้ นอกจากนั้นงานวิจัย เสนอการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าผ่านค่าพารามิเตอร์อิสระ แต่งานวิจัยดังกล่าวยังมีความซับซ้อนสูง และไม่สามารถแสดงให้เห็นความเชื่อมโยงของการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าจากกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟด้านออกได้อย่างชัดเจน

บทความนี้นำเสนอการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ผ่านค่าพารามิเตอร์อิสระในคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต ในบทความนี้จะแสดงให้เห็นว่าวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมโยงระหว่างตัวประกอบกำลังด้านเข้ากับกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟด้านออกได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 1 โครงสร้างของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

1.1 รูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต

รูปแบบทั่วไปของสมการแรงดันและกระแสของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์แสดงดังสมการที่ (1) - (2) สัญลักษณ์ของแรงดันนิยามได้ตามรูปที่ 1

$$\left.\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}}_{\mathbf{v}_o} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}} \underbrace{\begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix}}_{\mathbf{v}_i} = \begin{bmatrix} u^*+v_Z \\ v^*+v_Z \\ w^*+v_Z \end{bmatrix} \\ v_o = \mathbf{M}v_i \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$i_i = \mathbf{M}^T i_o \quad (2)$$

$$0 \le m_{ij} \le 1, \quad \sum_{j=1}^{3} m_{ij} = 1, \quad i = \{1,2,3\}, j = \{1,2,3\} \quad (3)$$

เมื่อ $\mathbf{M}$ คือเมทริกซ์การมอดูเลตขนาด 3x3 m_{ij} คือฟังก์ชันการสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัว

R,S,T คือแรงดันด้านเข้า u^*,v^*,w^* คือคำสั่งแรงดันด้านออก

v_z คือแรงดันลำดับศูนย์ ตัวห้อย i,o แทนปริมาณด้านเข้าและด้านออก

2. วิธีการทดลอง

2.1 การควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ

การควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้า

ผลการวิจัย Somboon Sangwongwanich ได้ให้คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}$ ที่สอดคล้องกับสมการที่ (1) และ (2) แสดงอยู่ในเทอมของแรงดันด้านออกคำสั่ง u^*, v^*, w^* และแรงดันด้านเข้า R, S, T ได้ดังสมการที่ (4) โดยมี b, d และ $\mathbf{M}_0$ เป็นพารามิเตอร์อิสระในการมอดูเลต ในที่นี้ $\mathbf{J}$ คือเมทริกซ์การหมุน $90°$ ในทิศทวนเข็มนาฬิกาและ $\| \ \|$ แสดงถึงขนาดของเวกเตอร์

$$\mathbf{M} = \overbrace{\underbrace{\frac{\boldsymbol{v}_O^* \boldsymbol{v}_i^T}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2}}_{\mathbf{M}_U} + \underbrace{b\frac{\boldsymbol{v}_O^* \left[\mathbf{J}\boldsymbol{v}_i\right]^T}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2}}_{\mathbf{M}_P(b)} + \underbrace{d\frac{\left[\mathbf{J}\boldsymbol{v}_O^*\right]\left[\mathbf{J}\boldsymbol{v}_i\right]^T}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2}}_{\mathbf{M}_Q(d)}}^{\mathbf{M}'} + \mathbf{M}_0 \tag{4}$$

จากสมการที่(4) เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (1) และ (2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันด้านเข้าตามสมการที่ (5) และได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านเข้ากับกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟด้านออกตามสมการที่ (6)

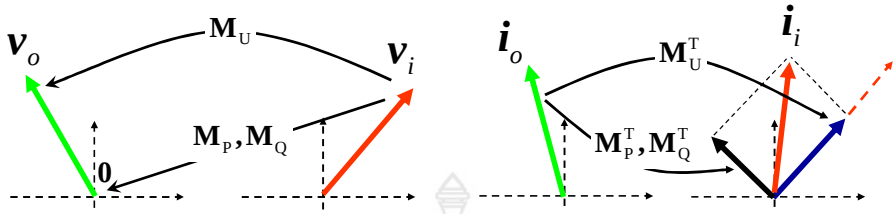
$$\boldsymbol{v_o} = \left(\underbrace{\left(\frac{\boldsymbol{v_o}\boldsymbol{v_i}^T}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} \right)}_{\mathbf{M}_U\boldsymbol{v_i}=\boldsymbol{v}_o^*} + \underbrace{\left(b\frac{\boldsymbol{v_o}\left(\mathbf{J}\boldsymbol{v}_i\right)^T}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} \right)}_{\mathbf{M}_P\boldsymbol{v_i}=0} + \underbrace{\left(d\frac{\left(\mathbf{J}\boldsymbol{v_o}\right)\left(\mathbf{J}\boldsymbol{v}_i\right)^T}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} \right)}_{\mathbf{M}_Q\boldsymbol{v_i}=0} + \underbrace{\mathbf{M}_0}_{\mathbf{M}_0\boldsymbol{v_i}=v_Z} \right) \boldsymbol{v_i} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{i}_i &= \overbrace{\underbrace{\left(\boldsymbol{v}_i \frac{(\boldsymbol{v}_o^T \boldsymbol{i}_o)}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} \right)}_{active\,current}}^{\mathbf{M}_U^T\boldsymbol{i}_o} + \overbrace{\underbrace{\left(b\mathbf{J}\boldsymbol{v}_i \frac{(\boldsymbol{v}_o^T \boldsymbol{i}_o)}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} \right)}_{reactive\,current}}^{\mathbf{M}_P^T\boldsymbol{i}_o} + \overbrace{\underbrace{\left(d\mathbf{J}\boldsymbol{v}_i \frac{(\mathbf{J}\boldsymbol{v}_o)^T \boldsymbol{i}_o)}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} \right)}_{reactive\,current}}^{\mathbf{M}_Q^T\boldsymbol{i}_o} + \underbrace{\mathbf{M}_0^T\boldsymbol{i}_o}_{0} \\ &= \boldsymbol{v}_i \frac{p_o}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} + \mathbf{J}\boldsymbol{v}_i \left[\frac{b \cdot p_o}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} - \frac{d \cdot q_o}{\|\boldsymbol{v}_i\|^2} \right] \end{aligned} \tag{6}$$

$$p_i(t) = p_o(t); \qquad q_i(t) = -b \cdot p_o(t) + d \cdot q_o(t) \tag{7}$$

จากสมการที่ (5) และ (6) แสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์การแปลง $\mathbf{M}_P$ และ $\mathbf{M}_Q$ จะไม่สร้างแรงดันด้านออก เนื่องจาก $\left(J\boldsymbol{v}_i\right)^T . \boldsymbol{v}_i = 0$ เสมอ แต่จะสร้างกระแสรีแอกทีฟด้านเข้าเท่านั้น ค่าพารามิเตอร์อิสระ b และ d จึงสามารถใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าได้โดยไม่กระทบต่อแรงดันด้านออก สมการที่ (6) ชี้ให้เห็นพฤติกรรมของเมทริกซ์การแปลงแต่ละส่วนว่าสร้างกระแสด้านเข้าในองค์ประกอบแอกทีฟและรีแอกทีฟอย่างไร ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสได้ดังรูปที่ 2 นอกจากนั้นสมการที่ (7) ยังแสดงให้เห็นถึงความเชื่อมโยงอย่างชัดเจนว่าเทอมใดสร้างกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟทั้งด้านเข้าและด้านออก กล่าวคือกำลังไฟฟ้าแอค

ทีฟด้านเข้าจะขึ้นกับกำลังไฟฟ้าแอคทีฟด้านออกเท่านั้น แต่กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟด้านเข้าจะขึ้นกับทั้งกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟด้านออก

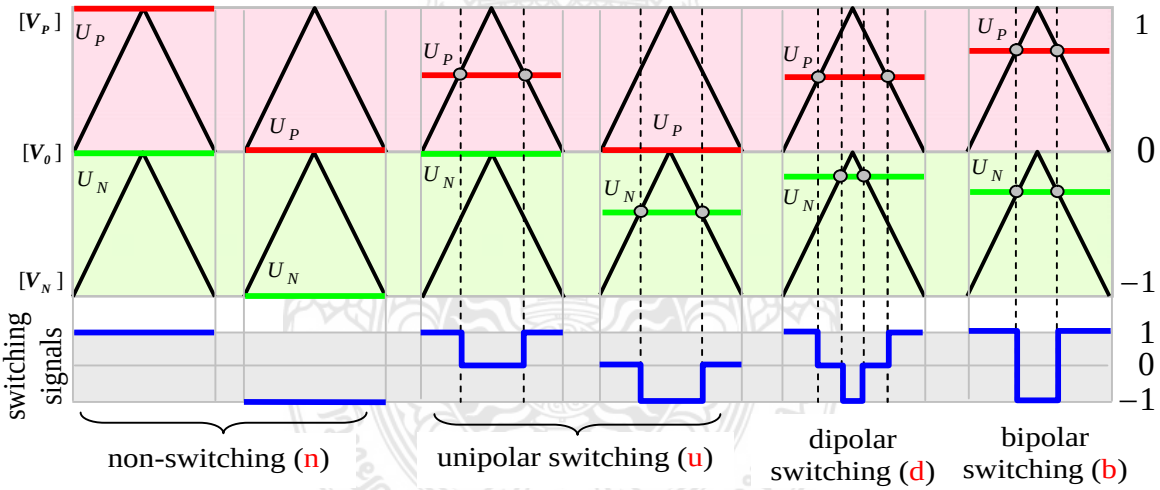


(ก) เวกเตอร์แรงดัน (ข) เวกเตอร์กระแส

รูปที่ 2 พฤติกรรมของเมทริกซ์การมอดูเลตต่อลักษณะการแปลงของเวกเตอร์แรงดันและกระแส

2.2 การมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่

ในการมอดูเลตเพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าจะใช้การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ ซึ่งเป็นวิธีการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ที่อาศัยสัญญาณอ้างอิงบัสบวก U_P และบัสลบ U_N เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะ 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

จากสมการที่ (4) สามารถเขียนรูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตขนาด 3x3 ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าได้ตามสมการที่ (8)

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_U + \mathbf{M}_P + \mathbf{M}_Q + \mathbf{M}_0 \tag{8}$$

$$\mathbf{M}_U = \frac{1}{(R^2+S^2+T^2)}\begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_P = \frac{b}{\sqrt{3}(R^2+S^2+T^2)}\begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S-T & T-R & R-S \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_Q = \frac{d}{3(R^2+S^2+T^2)}\begin{bmatrix} v^*-w^* \\ w^*-u^* \\ u^*-v^* \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S-T & T-R & R-S \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{cases} 0 \le X,Y,Z \le 1 \\ X+Y+Z = 1 \end{cases}$$

ในการพิจารณาต่อไปนี้เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย จะสมมติให้แรงดันด้านเข้าและด้านออกมีลำดับค่าดังนี้คือ $R = \max(R,S,T)$, $S = \min(R,S,T)$, $T = \text{mid}(R,S,T)$ และ $u^* > v^* > w^*$ สำหรับในกรณีอื่น ๆ ก็สามารถคิดได้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อแทนสมการที่ (8) ในสมการที่ (1) และจัดรูปสมการใหม่เพื่อให้จุดอ้างอิงของแรงดันในสมการอยู่ที่เฟส ซึ่งแรงดันด้านเข้าเป็นค่ากลางในกรณีนี้คือเฟส S จะได้ตามสมการที่ (9)

$$\begin{bmatrix} u-S \\ v-S \\ w-S \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} u_P \\ v_P \\ w_P \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{u}_P} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_N \\ v_N \\ w_N \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{u}_N} = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R-S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S-T \end{bmatrix} \tag{9}$$

เมื่อนำการมอดูเลตแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับที่แสดงดังรูปที่ 3 มาประยุกต์ใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในกรณีที่ *R = "max"* , *S = "mid"* และ *T = "min"* จะได้แรงดัน $v_P = R,\ v_0 = S,\ v_N = T$ สัญญาณอ้างอิง U_P และ U_N ที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะขนาดหนึ่งหน่วยสำหรับควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าหาได้โดยนำค่าแรงดันอ้างอิงของบัสบวกและบัสลบในสมการที่ (9) มาทำเป็นค่าปทัสถาน(Normalize) เทียบกับขนาดของบัสบวก(R-S) และบัสลบ(S-T) ตามลำดับ สัญญาณอ้างอิงดังกล่าวจะได้จากคอลัมน์ที่หนึ่งและสามของเมทริกซ์การมอดูเลตดังแสดงในสมการที่ (10)

$$[U_P] = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{11}+X \\ m'_{21}+X \\ m'_{31}+X \end{bmatrix} \ge 0,\ [U_N] = -\begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} m'_{13}+Z \\ m'_{23}+Z \\ m'_{33}+Z \end{bmatrix} \le 0 \tag{10}$$

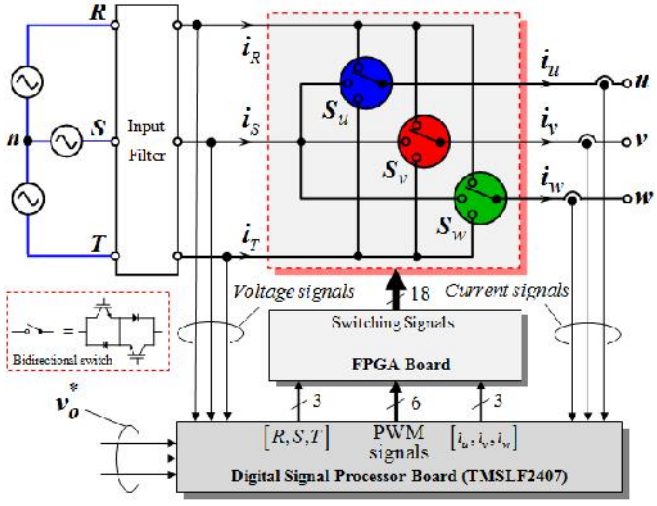
เมื่อ $\mathbf{M}' = [m'_{ij}] = \mathbf{M}_U + \mathbf{M}_P + \mathbf{M}_Q$ จะได้

$$\left.\begin{aligned}[U_P] &= \frac{\left(R\begin{bmatrix}u*\\v*\\w*\end{bmatrix}+\boldsymbol{b}\frac{(S-T)}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix}u*\\v*\\w*\end{bmatrix}+\boldsymbol{d}\frac{(S-T)}{3}\begin{bmatrix}v*-w*\\w*-u*\\u*-v*\end{bmatrix}\right)}{(R^2+S^2+T^2)}+\begin{bmatrix}X\\X\\X\end{bmatrix}\\ [U_N] &= -\frac{\left(T\begin{bmatrix}u*\\v*\\w*\end{bmatrix}+\boldsymbol{b}\frac{(R-S)}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix}u*\\v*\\w*\end{bmatrix}+\boldsymbol{d}\frac{(R-S)}{3}\begin{bmatrix}v*-w*\\w*-u*\\u*-v*\end{bmatrix}\right)}{(R^2+S^2+T^2)}-\begin{bmatrix}Z\\Z\\Z\end{bmatrix}\end{aligned}\right\} \quad (11)$$

โดยในที่นี้จะเลือกค่า X, Y, Z ของเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ ที่ทำให้การมอดูเลตเป็นแบบขั้วเดี่ยว 2 เฟส และแบบขั้วคู่ 1 เฟส <2u1d> Somboon Sangwongwanich

2.3 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ

อัลกอริทึมของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ที่นำไปใช้เพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าจะใช้บอร์ด DSP รุ่น TMSLF2407 ร่วมกับบอร์ด FPGA โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4 สามารถอธิบายหน้าที่การทำงานอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้ บอร์ด DSP ใช้วิธีการมอดูเลตแบบขั้วคู่ที่นำเสนอจะสร้างสัญญาณ PWM จากคลื่นพาหะสองตัวสำหรับเฟสที่เป็นค่า $\max(R,S,T)$ และ $\min(R,S,T)$ ค่าสัญญาณอ้างอิง U_P และ U_N จะคำนวณจากข้อมูลคำสั่งแรงดันด้านออก $u*, v*, w*$ และแรงดันด้านเข้า R,S,T จากนั้นบอร์ด FPGA จะรับสัญญาณ PWM ดังกล่าวไปสร้างสัญญาณ PWM สำหรับเฟสที่เป็นค่า $\mathrm{mid}(R,S,T)$ และท้ายที่สุดจะนำสัญญาณ PWM ทั้งสามเฟสมาสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์สำหรับ IGBT 18 ตัว โดยมีการปรับค่าเวลาประวิง(Dead time) อย่างเหมาะสม การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ (Commutation) จะอาศัยข้อมูลทิศทางของกระแสด้านออก

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการทดสอบการทำงาน

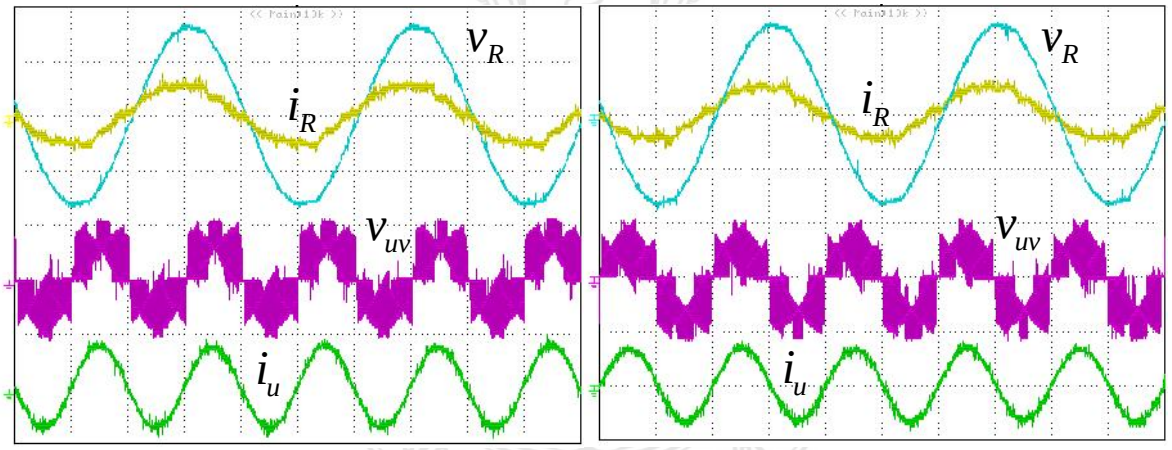
การทดสอบในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งได้โดยไม่ขึ้นกับตัวประกอบกำลังด้านออก นอกจากนั้นจะแสดงผลการทดสอบการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลังและนำหน้า โดยอาศัยการควบคุมผ่านพารามิเตอร์อิสระ b และ d ในที่นี้จะกำหนดให้ โหลดมีค่า *R=50* t , *L=34mH* ความถี่ด้านออก 100 Hz ดัชนีการมอดูเลต q=0.6 และความถี่การสวิตช์ 10 kHz

3.2 ผลการทดสอบตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง

การทดสอบการมอดูเลตเพื่อควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งจะกำหนดให้ตัวประกอบกำลังด้านออกมีค่าแตกต่างกันโดยการเปลี่ยนมุมเฟสด้านออก $(¤)$ เท่ากับ 20 และ 30 องศา ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองในการควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งเมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ b=d=0 รูปคลื่นด้านบนคือแรงดันด้านเข้า(สีฟ้า)และกระแสด้านเข้า(สีเหลือง) ถัดมาคือรูปคลื่นแรงดันด้านออกระหว่างเฟส(สีม่วง) และสุดท้ายคือรูปคลื่นกระแสด้านออก(สีเขียว) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสด้านเข้ามีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์และมีเฟสตรงกับแรงดันด้านเข้าแม้ตัวประกอบกำลังด้านออกจะแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามหากสังเกตรูปคลื่นกระแสด้านเข้าจะมีเฟสนำหน้าแรงดันด้านเข้าอยู่เล็กน้อยซึ่งมีผลมาจากตัวเก็บประจุของวงจรกรองผ่านต่ำด้านเข้า

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



ก) มุมเฟสด้านออก $¤ = 20°$ ข) มุมเฟสด้านออก $¤ = 30°$

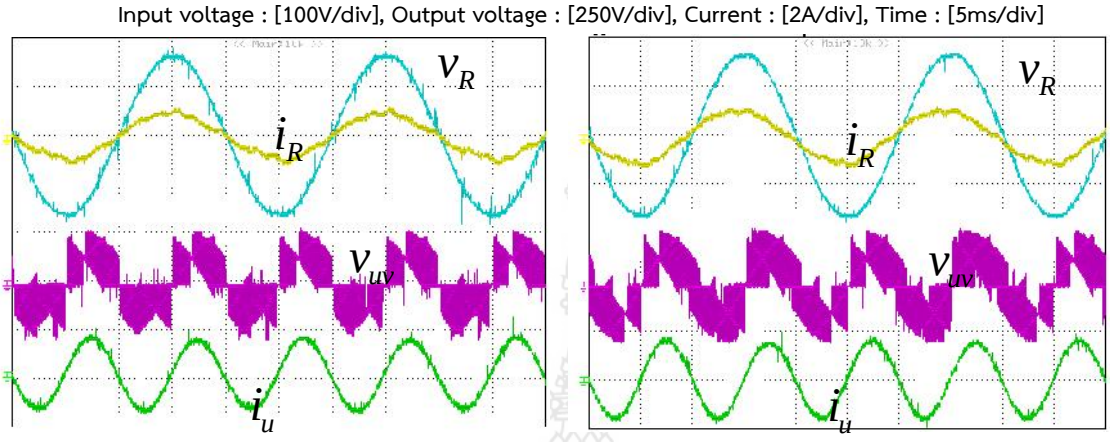
รูปที่ 5 ผลการทดลองการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง

3.3 ผลการทดสอบตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลัง

การทดสอบการมอดูเลตเพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลังจะอาศัยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ b และ d โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ 1) ใช้เฉพาะพารามิเตอร์ b 2) ใช้เฉพาะพารามิเตอร์ d เงื่อนไขของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ b และ d จะใช้ค่าที่ให้กระแสด้านเข้าล้าหลังโดยไม่เกิดการมอดูเลตเกินและสอดคล้อง ตามสมการที่(7) ในที่นี้จะกำหนดให้มุมเฟสของกระแสด้านออก $¤ = 20°$

ผลการทดลองการควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลัง เมื่อกำหนดให้ b=-0.5, d=0 และb=0, d=-0.5 แสดงดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่ากระแสด้านเข้าจะนำหน้าน้อยกว่ากรณีตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งเนื่องจากกรณีนี้กระแสด้านเข้าจะมีทั้งกระแสแอกทีฟและรีแอกทีฟ ผลของกระแสรีแอกทีฟจะทำให้กระแสและแรงดันด้านเข้ามีเฟส

ตรงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูปที่ 5 ก) ลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการมอดูเลตที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้ำหลังได้



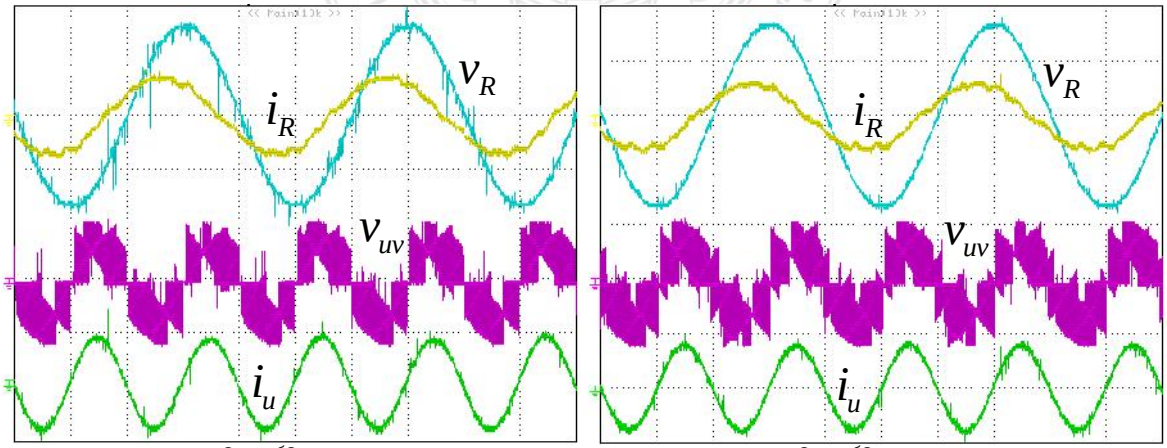
ก) พารามิเตอร์อิสระ b=-0.5, d=0 ข) พารามิเตอร์อิสระ b=0, d=-0.5

รูปที่ 6 ผลการทดลองการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้ำหลัง

3.4 ผลการทดสอบตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้า

การมอดูเลตเพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้าจะกำหนดเงื่อนไขการทดสอบในทำนองเดียวกันกับกรณีตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้ำหลัง แต่ในกรณีนี้จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ b และ d มีเครื่องหมายตรงกันข้ามการกำหนดค่า b และ d จะใช้ค่าที่ให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้าโดยไม่เกิดการมอดูเลตเกินเช่นเดียวกัน

ผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังนำหน้าได้ โดยสังเกตจากกระแสด้านเข้าจะนำหน้ามากกว่ากรณีตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งในรูปที่ 5 ก) ผลการทดลองแสดงให้เห็นด้วยว่ากรณีที่ b=0.5, d=0 จะเป็นกรณีที่ให้กระแสนำหน้ามากกว่าในกรณีที่ b=0, d=0.5 เนื่องจากการควบคุมกระแสรีแอกทีฟด้านเข้าเพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลังผ่านพารามิเตอร์ d จะอาศัยกระแสรีแอกทีฟด้านออกเป็นตัวควบคุมแต่ถ้ากระแสรีแอกทีฟด้านออกมีค่าน้อยจึงไม่สามารถควบคุมกระแสรีแอกทีฟด้านเข้าได้มากเหมือนการใช้พารามิเตอร์ b ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้กระแสแอกทีฟเป็นตัวควบคุม



ก) พารามิเตอร์อิสระ b=0.5, d=0 ข) พารามิเตอร์อิสระ b=0, d=0.5

รูปที่ 7 ผลการทดลองการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้า

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์อิสระ b และ d อย่างเหมาะสม วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน นอกจากนั้นยังสามารถแสดงความเชื่อมโยงระหว่างการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้ากับกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟด้านออกได้อย่างชัดเจน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าได้ตามที่ต้องการการกำหนดพารามิเตอร์อิสระ b=d=0 จะได้ตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง และถ้ากำหนด b=-0.5 หรือ d=-0.5 จะได้ตัวประกอบกำลังล้าหลัง แต่ถ้ากำหนด b=0.5 หรือ d=0.5 จะได้ตัวประกอบกำลังนำหน้า

5. เอกสารอ้างอิง

L. Huber and D. Borojevic., 1995. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction, **IEEE Trans. on Ind. Appl**, vol. 31, no. 6, pp. 1234-1246.

Y.-D. Yoon and S.-K. Sul., 2007. Carrier-based modulation method for matrix converter with input power factor control and under unbalanced input voltage conditions. **in Proc. Conf. Rec. IEEE APEC**, pp. 310–314

H. M. Nguyen et al., 2011. Input Power Factor Compensation Algorithms Using a New Direct-SVM Method for Matrix Converter, **IEEE Trans. Ind. Electron**, vol. 58, no. 1, pp. 232-243.

F. Schafmeister and Johann W. Kolar., 2012. Novel hybrid modulation schemes significantly extending the reactive power control range of all matrix converter topologies with low computational effort, **IEEE Trans. Ind. Electron**, vol. 59, no. 1, pp. 194-210.

M. Venturini and A. Alesina., 1980. The generalized transformer: A new bidirectional sinusoidal waveform frequency converter with continuously adjustable input power factor, **in Proc. IEEE PESC'80,** pp. 242–252.

M. Braun and K. Hasse., 1983. A direct frequency changer with control of input reactive power, **IFAC control in power electronic and electrical drives**, Lausanne, Switzerland, pp. 187-194.

D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L. Zarri., 2002. Matrix converter modulation strategies: A new general approach based on space-vector representation of the switch state. **IEEE Trans. Ind. Electron**. Vol. 49, no.2, pp. 370–381.

Paiboon Kiatsookkanatorn and Somboon Sangwongwanich., 2012. A Unified PWM Method for Matrix Converters and Its Carrier-Based Realization Using Dipolar Modulation Technique, **IEEE Trans. Ind. Electron**, vol. 59, no.1, pp. 80-92.