

การทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของการมอดูเลต

เชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

A Carrier-Based Dipolar Realization of Space Vector

Modulation for Matrix Converters

ไพบุลย์ เกียรติสุขคนาธร¹ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์²

¹ ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ บทความจะแสดงให้เห็นความสมมูลของรูปแบบการสวิตช์ที่เกิดจากการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์เปรียบเทียบกับการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ที่มีการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์และการเลือกเฟสอ้างอิงที่เหมาะสมในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ยุ่งยากซับซ้อนและใช้การคำนวณค่อนข้างมาก สามารถทำให้เป็นจริงได้โดยง่ายด้วยการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่

คำสำคัญ : เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์, การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่, การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

Abstract

This paper presents a carrier-based dipolar realization of space-vector modulation for matrix converters. The PWM patterns generated by the space-vector PWM are shown to be equivalent to those of the carrier-based dipolar PWM if the zero voltage and the reference input phase are appropriately chosen to construct the reference signals. The research results reveal that the space-vector modulation, which is complex and requires intensive calculation, can be realized easily using the double-carrier-based dipolar modulation method.

Keywords : matrix converters, carrier-based dipolar modulation, space-vector modulation

1. บทนำ

วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยอาศัยมุมมองเชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นวิธีการมอดูเลตที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการมอดูเลตดังกล่าวไม่เพียงอยู่บนพื้นฐานของการสร้างแรงดันด้านออกขณะหนึ่งเท่านั้น แต่ยังสามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลาย[1]-[3] ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการมอดูเลตแบบนี้โดยทั่วไปจำเป็นต้องอาศัยการเลือกเวกเตอร์แอกทีฟ(Active

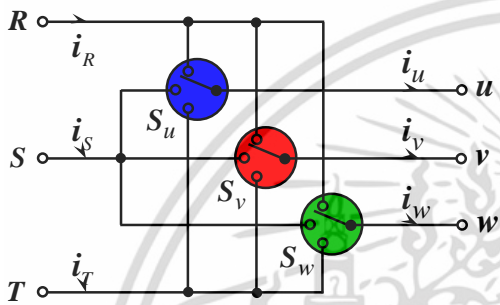
vector) และเวกเตอร์ศูนย์ (Zero vector) ร่วมกับการจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออก ณ ขณะนั้น ช่วงเวลาการสวิตช์ของสเปซเวกเตอร์จะได้ออกจากการคำนวณค่าวัฏจักรงานของทั้งส่วนวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ สุดท้ายจึงได้สัญญาณขับนำสวิตช์ของสวิตช์แต่ละตัวจากสถานะการสวิตช์และช่วงเวลาการสวิตช์ของสเปซเวกเตอร์ที่คำนวณได้ ดังนั้นการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์จะมีการคำนวณค่าวัฏจักรงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความซับซ้อนและไม่เห็นความเชื่อมโยงโดยตรงกับค่าแรงดันที่ต้องการสร้างรวมทั้งต้องใช้ตารางค้นหา (Look up table) ในการเลือกเวกเตอร์ที่ใช้ในการมอดูเลต ซึ่งจะต้องรู้เซกเตอร์ของแรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้าเสมอ

ในบทความนี้ผู้วิจัยจะแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซำคู่สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ [4] สามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ได้ โดยมีขั้นตอนที่ง่ายกว่า คือการบวกแรงดันลำดับศูนย์ และการเลือกเฟสด้านเข้าที่เหมาะสมเป็นจุดอ้างอิงเท่านั้น



รูปที่ 1 โครงสร้างเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

2. โครงสร้างและรูปสมการทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต

เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ 9 ตัวที่ทำหน้าที่ควบคุมการสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการจากแรงดันด้านเข้าและสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกได้ดังสมการที่ (1) - (2)

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_z \\ v^* + v_z \\ w^* + v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

ในที่นี้ R, S, T และ u^*, v^*, w^* คือแรงดันด้านเข้าและคำสั่งแรงดันด้านออก ณ ขณะหนึ่ง M คือเมทริกซ์การมอดูเลต และ v_z คือแรงดันลำดับศูนย์ ตัวห้อย i, o แทนปริมาณด้านเข้าและด้านออก

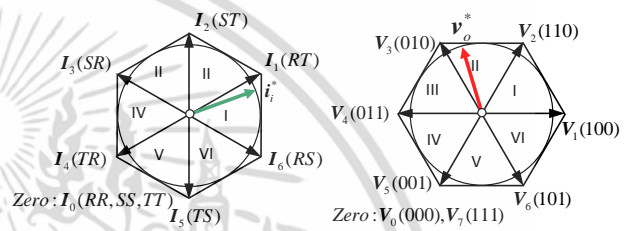
3. รูปแบบการสวิตช์ที่ได้จากการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม

การมอดูเลตแบบนี้จะอาศัยแนวคิดที่มองเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนวงจรเรียงกระแสต่ออยู่กับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์ผ่านส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเสมือน และใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์คำนวณค่าวัฏจักรงานของวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ ในการมอดูเลตแบบนี้การเลือกเวกเตอร์ศูนย์จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการมอดูเลต ส่วนการจัดเรียงลำดับเวกเตอร์จะเป็นตัวกำหนดลำดับการสวิตช์ ดังนั้นรูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์จะขึ้นอยู่กับ การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับในแต่ละเซกเตอร์ของแรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้า ดังแสดงในรูปที่ 2 การมอดูเลตในงานวิจัย [1] มีเทคนิคการเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 สเปซเวกเตอร์กระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออก

ตารางที่ 1 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตในงานวิจัย [1]

Input Sector	R>T>S	R>S>T	S>R>T	S>T>R	T>S>R	T>R>S	R>T>S
	I	II	III	IV	V	VI	
Output Sector I	Vector	RSS	RTT	STT	SRR	TRR	TSS
	Vector	RRS	RRT	SST	SSR	TTR	TTS
	Vector	RRT	SST	SSR	TTR	TTS	RRS
	Vector	RTT	STT	SRR	TRR	TSS	RSS
	Vector	TTT	TTT	RRR	RRR	SSS	SSS
	PWM mode	2u1d	1b1u1d	1n2d	2u1d 1b1u1d	1n2d	2u1d 1b1u1d
Sequence	A	X	X	A	X	X	A
Output Sector II	Vector	RRS	RRT	SST	SSR	TTR	TTS
	Vector	SRS	TRT	TST	RSR	RTR	STS
	Vector	TRT	TST	RSR	RTR	STS	SRS
	Vector	RRT	SST	SSR	TTR	TTS	RRS
	Vector	RRR	SSS	SSS	TTT	TTT	RRR
	PWM mode	1n2d	2u1d 1b1u1d	1n2d	2u1d 1b1u1d	1n2d	2u1d 1b1u1d
Sequence	X	X	C	X	X	C	X

หมายเหตุ รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์แรงดันออกที่ III และ V จะเหมือนกับ I ส่วนรูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์แรงดันออกที่ IV และ VI จะเหมือนกับ II

เมื่อวิเคราะห์รูปแบบการสวิตช์ในตารางที่ 1 พบว่ามีรูปแบบการมอดูเลต 3 รูปแบบ ประกอบด้วย 2u1d, 1b1u1d และ 1n2d [4] ส่วนลำดับการสวิตช์มี 2 รูปแบบคือแบบ A และ C ในที่นี้สัญลักษณ์ u,d,b,m แทนการมอดูเลตแบบขั้วเดี่ยว (unipolar) แบบขั้วคู่ (dipolar) แบบสองขั้ว (bipolar) และแบบไม่สวิตช์ (non-switching) ตัวเลขหน้า u,d,b,m แสดงจำนวน

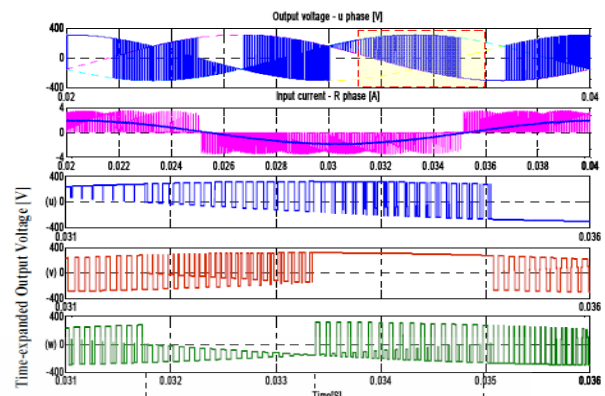
เฟสที่มีการมอดูเลตในรูปแบบนั้นๆ ส่วนลำดับการสวิตช์แบบ A,B,C แทนการสวิตช์ตามลำดับ min → max → mid, max → mid → min, mid → min → max เมื่อ max = max(R,S,T), mid=mid(R,S,T), min=min(R,S,T) ตามลำดับ สัญญลักษณ์ X หมายถึงกรณีลำดับการสวิตช์ไม่เป็นทั้งแบบ A , B หรือ C จึงไม่สามารถสร้างได้ด้วยเทคนิคคลื่นพาหะแบบชั่วคราว

ตารางที่ 2 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตในงานวิจัย [2]

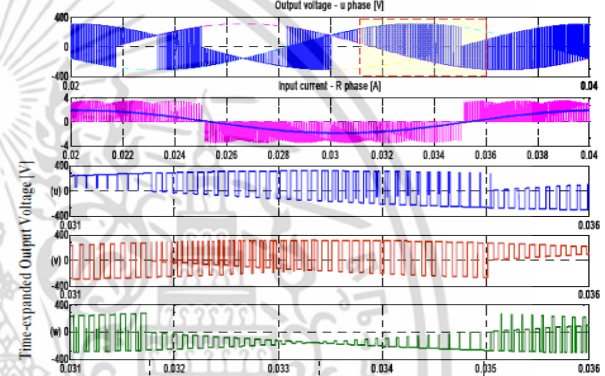
Input Sector	R>T>S	R>S>T	S>R>T	S>T>R	T>S>R	T>R>S	R>T>S
	I	II	III	IV	V	VI	
Output Sector I	Vector	RSS	RRT	STT	SSR	TRR	TTS
		RRS	RTT	SST	SRR	TTR	TSS
		RRT	STT	SSR	TRR	TTS	RSS
		RTT	SST	SRR	TTR	TSS	RRS
	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR	
PWM mode	2u1d	1b1u1d	2u1d	1b1u1d	2u1d	1b1u1d	2u1d
Sequence	A	C	A	C	A	C	
Output Sector II	Vector	SRS	RRT	TST	SSR	RTR	TTS
		RRS	TRT	SST	RSR	TTR	STS
		RRT	TST	SSR	RTR	TTS	SRS
		TRT	SST	SSR	TTR	STS	RRS
	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR	
PWM mode	2u1d	1b1u1d	2u1d	1b1u1d	2u1d	1b1u1d	2u1d
Sequence	A	C	A	C	A	C	

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของงานวิจัย [1] บางเซกเตอร์จะมีจำนวนการสวิตช์ 10 ครั้งในหนึ่งคาบ เนื่องจากมีการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์เกิดขึ้นพร้อมกันสองเฟส (แสดงการแรงงาในตาราง) เพื่อแก้ปัญหาหนึ่งงานวิจัย [2] ได้นำเสนอการลดจำนวนครั้งการสวิตช์โดยจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ใหม่และเลือกเวกเตอร์ศูนย์ใหม่ให้สอดคล้องกันด้วย ทำให้การเปลี่ยนสถานะการสวิตช์เกิดขึ้นที่ละเฟส และจำนวนการสวิตช์ลดลงเหลือ 8 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2 ผลการจำลองการทำงานเมื่อใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของงานวิจัย [1] และ [2] แสดงได้ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ในรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาในส่วนขยายสเกลเวลาจะพบว่าในช่วงที่รูปแบบการสวิตช์เป็นแบบ 1n2d จะมีเฟสหนึ่งที่มีจำนวนการสวิตช์สูงกว่าเฟสที่เหลือ ทำให้จำนวนครั้งการสวิตช์โดยรวมต่อคาบเพิ่มเป็น 10 ครั้งสอดคล้องตามตารางที่ 1 ในรูปที่ 4 จะเห็นว่า ช่วงที่เดิมเคยมีรูปแบบการสวิตช์เป็นแบบ 1n2d ในรูปที่ 3 จะเปลี่ยนเป็นแบบ 1b1u1d และ 2u1d แทนสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ผลการจำลองการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์งานวิจัย[1]



รูปที่ 4 ผลการจำลองการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์งานวิจัย[2]

ปัญหาการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์เกิดขึ้นพร้อมกันสองเฟสสามารถแก้ไขได้อีกวิธีหนึ่ง โดยการเปลี่ยนการเลือกเวกเตอร์ที่ใช้และการจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ใหม่ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตในงานวิจัย [4]

Input Sector	R>T>S	R>S>T	S>R>T	S>T>R	T>S>R	T>R>S	R>T>S
	I	II	III	IV	V	VI	
Output Sector I	Vector	RSS	RRT	STT	SSR	TRR	TTS
		RRS	RST	SST	STR	TTR	TRS
		RRT	SST	SSR	TTR	TTS	RSS
		RTT	STT	SRR	TRR	TSS	RSS
	TTT	TTT	RRR	RRR	SSS	SSS	
PWM mode	2u1d	1b1u1d	1n2d	2u1d	1b1u1d	1n2d	2u1d
Sequence	A	B	A	A	B	A	A
Output Sector II	Vector	RRR	RRT	SSS	SSR	TTT	TTS
		RRT	TRT	SSR	RSR	TTS	STS
		RRS	TST	SST	RTR	TTR	SRS
		TRS	SST	RST	TTR	STR	RRS
	SRS	SSS	TST	TTT	RTR	RRR	
PWM mode	1n2d	2u1d	1b1u1d	1n2d	2u1d	1b1u1d	1n2d
Sequence	B	C	C	B	C	C	B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้น เนื่องจากวิธีการมอดูเลตในงานวิจัย[1] และ [2] ใช้เวกเตอร์ศูนย์ที่มีขนาดแรงดันค่าสูงสุดหรือค่ากลาง ทำให้แรงดันโหมคร่วมมีค่าสูง งานวิจัย [3] จึงเสนอให้เลือกใช้เวกเตอร์ศูนย์ที่มีขนาดแรงดันค่าต่ำสุดแทนทำให้ได้รูปแบบการใช้เวกเตอร์ดังตารางที่ 4 เมื่อวิเคราะห์การใช้เวกเตอร์ในลักษณะนี้ จะเห็นรูปแบบการมอดูเลตเป็นแบบ 2u1d โดยมีลำดับการสวิตช์เป็นแบบ A หรือ C ดังแสดงในตารางที่ 4

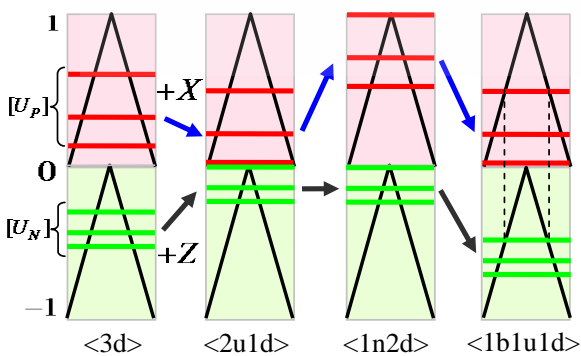
ตารางที่ 4 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตในงานวิจัย [3]

Input Sector	R>T>S	R>S>T	S>R>T	S>T>R	T>S>R	T>R>S	R>T>S	
	I	II	III	IV	V	VI		
Output Sector I	Vector	RSS SSS RRT RRR STT TTT	RRS RRS RTT RRT SST STT	SRR SSR TTR TRR TSS TTS	RRR RRS RRT RRR STT TTT	RRS RRS RTT RRT SST STT	SRR SSR TTR TRR TSS TTS	
	PWM mode	2u1d						
	Sequence	A	C	A	C	A	C	
	Vector	SRS SSS RRT RRR TST TTT	RRS SRS TRT RRT SST TST	RSR SSR TTR TRR TTS TTS	RRR RRS RRT RRR STT TTT	RRS RRS RTT RRT SST STT	SRR SSR TTR TRR TSS TTS	
PWM mode	2u1d							
Sequence	A	C	A	C	A	C		

4.ความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์และการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่

4.1 พื้นฐานการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่

การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของการมอดูเลตแบบนี้จะใช้สัญญาณอ้างอิง U_p และ U_N เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะ 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5 สัญญาณอ้างอิง U_p และ U_N ที่ใช้เพื่อให้เกิดรูปแบบการมอดูเลตและลำดับการสวิตช์สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในตารางที่ 1-4 คำนวณได้จากค่าแรงดันคำสั่งและแรงดันด้านเข้า ณ ขณะหนึ่งดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเลือกแรงดันลำดับศูนย์

เมทริกซ์การมอดูเลตในสมการที่ (1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3) โดยที่ M_0 คือเมทริกซ์ที่กำหนดแรงดันลำดับศูนย์

$$M = M' + M_0 = [m'_{ij}] + M_0 \tag{3}$$

เมื่อ

$$M' = \frac{1}{R^2 + S^2 + T^2} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix}^T \text{ และ } M_0 = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ X & Y & Z \\ X & Y & Z \end{bmatrix}$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ X, Y, Z จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละคอลัมน์ของ M' เนื่องจาก M คือค่าวัฏจักรงาน ซึ่งจะต้องมีค่าเป็นบวกและ $0 \leq M \leq 1$ เสมอ ดังนั้นค่า X, Y, Z จะต้องเป็นไปตามสมการที่ (4)

$$\left. \begin{aligned} -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) &\leq X \leq 1 - \max(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ -\min(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) &\leq Y \leq 1 - \max(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) \\ -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) &\leq Z \leq 1 - \max(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

จากรูปที่ 5 สามารถหาค่า X, Y, Z ของเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ที่ทำให้เกิดรูปแบบการมอดูเลตต่างๆ เหมือนกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แสดงได้ดังสมการที่(5)-(7)

a) <2u1d> PWM

$$\left. \begin{aligned} X &= -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y &= 1 - X - Z \\ Z &= -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

b) <1n2d> PWM

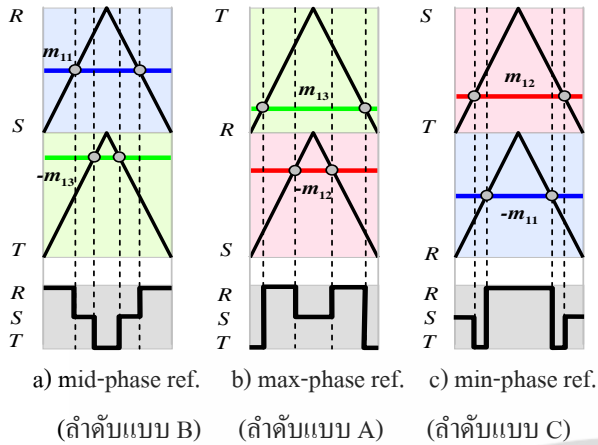
$$\left. \begin{aligned} X &= 1 - \max(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y &= 1 - X - Y \\ Z &= -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{aligned} \right\} \text{ หรือ } \left. \begin{aligned} X &= -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y &= 1 - Y - Z \\ Z &= 1 - \max(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

c) <1b1u1d> PWM

$$\left. \begin{aligned} X &= -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y &= -\min(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) \\ Z &= 1 - X - Y \end{aligned} \right\} \text{ หรือ } \left. \begin{aligned} X &= 1 - Y - Z \\ Y &= -\min(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) \\ Z &= -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

4.3 การเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง

การเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงที่แตกต่างกัน(ค่ากลางของรูปคลื่นพาหะ)ในการมอดูเลตจะทำให้ได้ลำดับการสวิตช์แตกต่างกัน 3 ลักษณะคือ แบบ A,B,C ดังแสดงในรูปที่ 6 สัญญาณอ้างอิง U_p และ U_N ที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะที่ให้ลำดับการสวิตช์เป็นแบบ A,B,C จะเป็นดังสมการที่(8)-(10)



รูปที่ 6 ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสด้านเข้าที่แตกต่างกันเป็นจุดอ้างอิง (กรณีตัวอย่าง เมื่อ R=max, S=mid, T=min)

a) max-phase reference (ลำดับการสวิตช์แบบ A)

$$[U_p] = \begin{bmatrix} m'_{13} + Z \\ m'_{23} + Z \\ m'_{33} + Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} \geq 0, \quad [U_N] = - \begin{bmatrix} m'_{12} + Y \\ m'_{22} + Y \\ m'_{32} + Y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (8)$$

b) mid-phase reference (ลำดับการสวิตช์แบบ B)

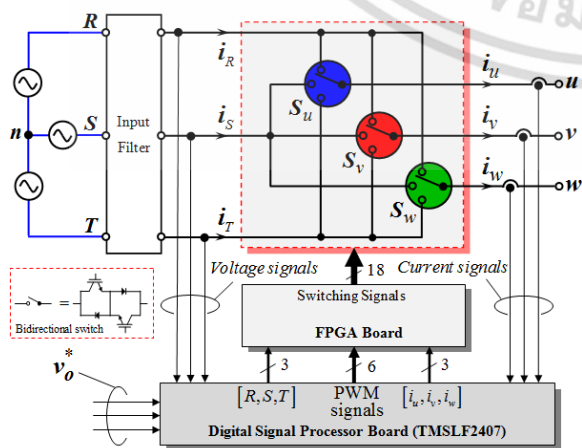
$$[U_p] = \begin{bmatrix} m'_{11} + X \\ m'_{21} + X \\ m'_{31} + X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} \geq 0, \quad [U_N] = - \begin{bmatrix} m'_{13} + Z \\ m'_{23} + Z \\ m'_{33} + Z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (9)$$

c) min-phase reference (ลำดับการสวิตช์แบบ C)

$$[U_p] = \begin{bmatrix} m'_{12} + Y \\ m'_{22} + Y \\ m'_{32} + Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} \geq 0, \quad [U_N] = - \begin{bmatrix} m'_{11} + X \\ m'_{21} + X \\ m'_{31} + X \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (10)$$

5. โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ

อัลกอริทึมของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซิกมอยด์นำไปใช้เพื่อสร้างรูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์จะใช้บอร์ด DSP รุ่น TMSLF2407 ร่วมกับบอร์ด FPGA โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

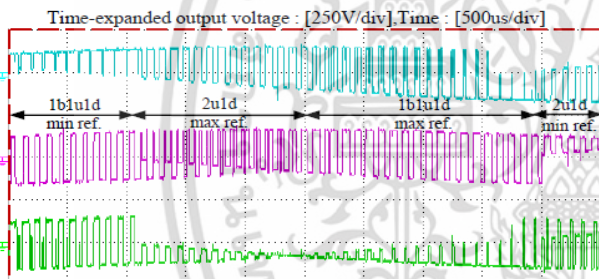
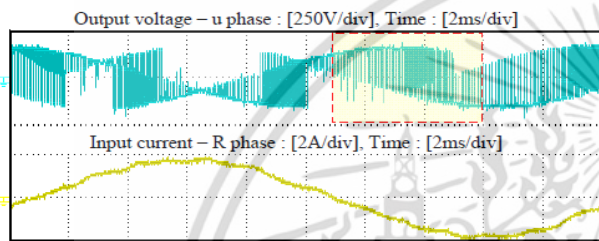
รูปที่ 7 สามารถอธิบายหน้าที่การทำงานอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้ บอร์ด DSP ใช้วิธีการมอดูเลตแบบซิกมอยด์ที่นำเสนอจะสร้างสัญญาณ PWM จากคลื่นพาหะสองตัวสำหรับเฟสที่เป็นค่า $\max(R, S, T)$ และ $\min(R, S, T)$ ค่าสัญญาณอ้างอิง U_p และ U_N จะคำนวณจากข้อมูลคำสั่งแรงดันด้านออก u^*, v^*, w^* และแรงดันด้านเข้า R, S, T จากนั้นบอร์ด FPGA จะรับสัญญาณ PWM ดังกล่าวไปสร้างสัญญาณ PWM สำหรับเฟสที่เป็นค่า $\text{mid}(R, S, T)$ และท้ายที่สุดจะนำสัญญาณ PWM ทั้งสามเฟสมาสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์สำหรับ IGBT 18 ตัว โดยมีการปรับค่าเวลาประวิง(Dead time)อย่างเหมาะสม การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์(Commutation) จะอาศัยข้อมูลทิศทางของกระแสด้านออก ทั้งนี้ได้มีการแก้ปัญหาการไม่เข้าจังหวะของการส่งสัญญาณ PWM จากบอร์ด DSP ไปยังบอร์ด FPGA เพื่อป้องกันความผิดพลาดของสัญญาณด้วย

6. ผลการทดลองการทำงาน

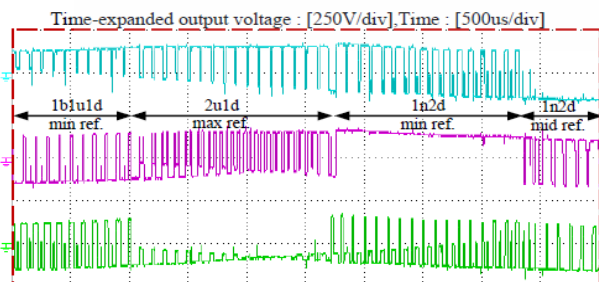
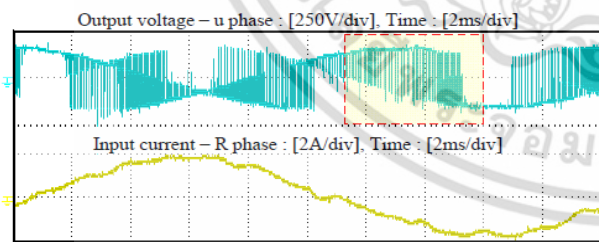
รูปที่ 8-10 คือผลการทดลองการทำงานที่ใช้อัลกอริทึมการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซิกมอยด์เพื่อสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ ในที่นี้กำหนดให้โหลด $R=50\Omega, L=34mH$ ความถี่ด้านออก $100Hz$ ดัชนีการมอดูเลต $q=0.8$ และตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง(PF=1) จากผลการทดลองในรูปที่ 8 จะเห็นว่า รูปแบบการสวิตช์ที่ได้จะมีความสอดคล้องกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในตารางที่ 2 และเหมือนกับผลการจำลองในรูปที่ 4 ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 9 ก็จะเป็นรูปแบบการสวิตช์ที่สอดคล้องกับการมอดูเลตในตารางที่ 3 และเหมือนกับผลการจำลองในรูปที่ 3 เช่นกัน ยกเว้นช่วงการมอดูเลตแบบ 1n2d ที่ได้มีการปรับเปลี่ยนเพื่อลดจำนวนการสวิตช์ให้เหลือ 8 ครั้งต่อคาบ

รูปแบบการสวิตช์ของวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของทั้งสองกรณีนี้เป็นแบบโหมดผสมโดยจะขึ้นอยู่กับเซกเตอร์ของกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออก ณ ขณะนั้น ดังนั้นการใช้วิธีการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะเพื่อสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์จึงจำเป็นจะต้องรู้เซกเตอร์ของกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกด้วยเพื่อจะสร้างรูปแบบการสวิตช์ได้อย่างถูกต้อง

อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่การมอดูเลตมีเพียงรูปแบบเดียว ตัวอย่างเช่นในกรณีของงานวิจัย[3] ตามตารางที่ 4 จะมีการมอดูเลตแบบ 2u1d เท่านั้น กรณีนี้หากใช้วิธีการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะจะไม่ต้องอาศัยข้อมูลของเซกเตอร์กระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออก แต่เพียงแค่เลือกใช้เมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (5) เท่านั้น ลักษณะดังกล่าวจะทำให้สามารถลดขั้นตอนในการมอดูเลตลงได้ นอกจากนั้นยังทำให้การมอดูเลตง่ายขึ้นด้วย ผลการทดลองที่สมมูลกับรูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในตารางที่ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10

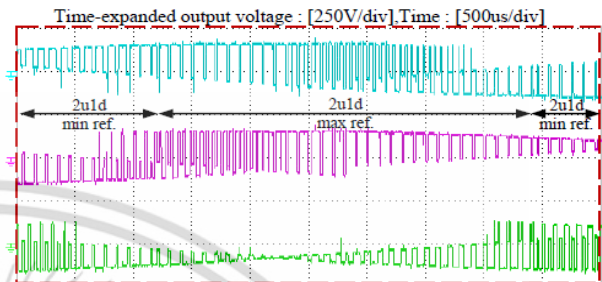
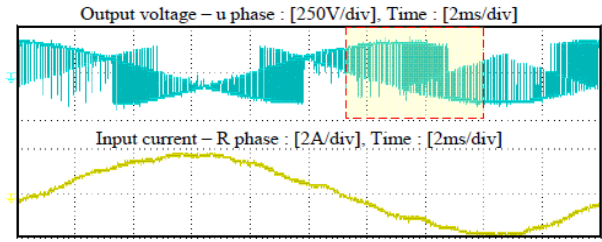


รูปที่ 8 ผลการทดลองการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ที่สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในตารางที่ 2



รูปที่ 9 ผลการทดลองการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ที่สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในตารางที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 ผลการทดลองการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ที่สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในตารางที่ 4

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอการทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยได้วิเคราะห์ให้เห็นรูปแบบการมอดูเลตและลำดับการสวิตช์ที่เกิดจากวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบต่าง ๆ บทความนี้แสดงให้เห็นว่า การบวกแรงดันลำดับศูนย์และการเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงอย่างเหมาะสมในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ สามารถสร้างรูปแบบการมอดูเลตและลำดับการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ได้ ทั้งนี้การคำนวณตามวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอจะง่ายกว่าการคำนวณเชิงสเปซเวกเตอร์มาก

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Huber and D. Borjovic, "Space vector modulated three-phase to three phase matrix converter with input power factor correction," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 6, pp. 1234-1246, Nov/Dec. 1995.
- [2] P. Nielsen et al, "Space vector modulated matrix convener with minimized number of switchings and a feed foward compensation of input voltage unbalance," in Proc. PEDES, pp. 833-839, 1996.
- [3] H. J. Cha and P. N. Enjeti, "An Approach to reduce Common-Mode Voltage in Matrix Converter," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 39, no. 4, pp. 1151-1159, July/August. 2003.
- [4] P. Kiatsookkanatorm and S. Sangwongwanich, "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, Jan. 2012.