

การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซ เวกเตอร์สองเฟสที่ขยายการมอดูเลทเชิงเส้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งจ่ายให้กับมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสคู่

Optimal Zero-Sequence Selection for Two-Phase SVPWM with Extended Linear Modulation Range for Five-Leg Inverter supplying Dual Two-Phase Induction Motors

วัชรินทร์ พรหมคุณ^{1*} วิจิตร กิณเรศ¹ Kazuhiro Ohyama² นาวิ รุจิตาม³ ประหยัด กองสุข⁴

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

²Department of Electrical Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka 811-0295, Japan

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์

63 หมู่ 7 ถนนรังสิต-นครนายก อำเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตจันทบุรี

131 หมู่ 10 ถนนบ่อราศนราดูล ตำบลพลวง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดจันทบุรี 22210

Watcharin Promkhun^{1*} Vijit Kinnares¹ Kazuhiro Ohyama² Navee Rujidam³ Prayad Kongsuk⁴

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka 811-0295, Japan

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak,
Nakhonnayok, 26120, Thailand

⁴Department of Electrical Engineering, Faculty of Agro-Industry Technology, Rajamangala
University of Technology Tawan-Ok Chanthaburi Campus, Chanthaburi, 22210, Thailand

*Corresponding author Email: promkhun.w_8@hotmail.com

(Received: May 20, 2019; Accepted: August 9, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอเกี่ยวกับการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟสที่ขยายการมอดูเลทเชิงเส้น ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัวที่ควบคุมอย่างอิสระต่อกัน เพื่อขยายการมอดูเลทเชิงเส้น การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมนั้นสามารถลดขนาดพีคของดิแวลต์ของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถขยายการมอดูเลทเชิงเส้นของค่าดัชนีการมอดูเลทรวมได้มากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ในบทความนี้ได้แนะนำและวิเคราะห์ผลทั้งฟังก์ชันการมอดูเลทของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง และการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสคู่อย่างอิสระต่อกัน ซึ่งสามารถยืนยันผลการจำลองได้จากผลการทดสอบ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส การมอดูเลตเชิงเส้น มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

ABSTRACT

This paper presents an optimal zero-sequence selection for two-phase SVPWM extended linear modulation for five-leg inverter supplying dual two-phase induction motors independently controlled. Optimal zero-sequence selection can reduce peak of duty cycles for five-leg inverter. The selection affects to extend linear range of total modulation index, which is higher than 100 percentages. In this paper, modulating functions of five-leg inverter and independently dual two-phase induction motors drive are presented and analyzed. All simulation results can be verified by experimental results.

Keyword: Five-leg inverter, two-phase SVPWM, linear modulation, two-phase induction motor.

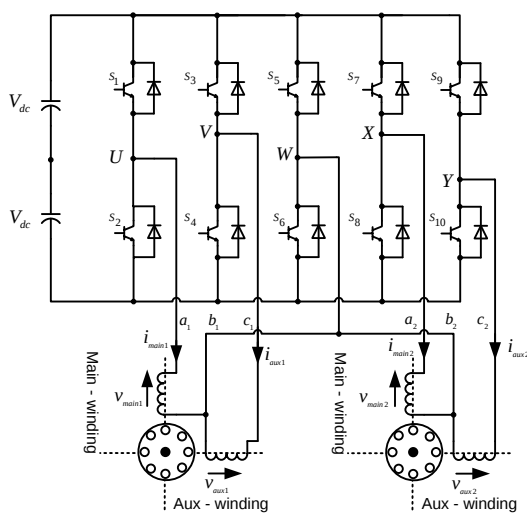
1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันห้ากึ่งถูกนำมาใช้เพื่อลดต้นทุนรวมของอินเวอร์เตอร์โดยการลดจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัว การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสองตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้นถูกนำเสนอใน [1-2] สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัวโดยทั่วไปนั้นจะใช้อินเวอร์เตอร์สามกึ่งจำนวนสองตัว ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์จำนวน 12 ตัวในการขับเคลื่อน แต่สำหรับการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้น จะมีการใช้กึ่งของอินเวอร์เตอร์หนึ่งกึ่งเป็นกึ่งร่วมระหว่างมอเตอร์สองตัว ทำให้ประหยัดอุปกรณ์สวิตช์ลงไปถึงหนึ่งกึ่ง ซึ่งประหยัดอุปกรณ์ไปได้ 2 ตัว การใช้อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัวถูกนำเสนอใน [3-4] และการนำเสนออินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสและสามเฟสถูกนำเสนอใน [5] การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้นจะแบ่งค่าดัชนีการมอดูเลตกันระหว่างมอเตอร์สองตัว โดยค่าดัชนีการมอดูเลตรวมไม่เกิน 100% [1-4] ซึ่งจะ เป็นข้อจำกัดของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งที่ต้องแบ่งการใช้งานแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง มีหลายงานวิจัยที่พัฒนาปรับปรุงเทคนิคการมอดูเลตเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงได้เพิ่มขึ้นโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ของมอเตอร์ทั้งสองตัวไม่ต่างกันมาก และ

ขับเคลื่อนมอเตอร์ในการควบคุมแบบเวกเตอร์ [6] ซึ่งสามารถเพิ่มดัชนีการมอดูเลตขึ้นได้จากตัวละ 50% ไปเป็น 86.6% โดยส่วนใหญ่หากควบคุมมอเตอร์สองตัวให้ทำงานอย่างอิสระต่อกัน ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์สองตัวทำงานที่คนละความถี่ที่ต่างกันมากและมอดูเลตทางไฟฟ้าอย่างอิสระ ฉะนั้นจึงไม่สามารถใช้เทคนิคนี้เพื่อใช้ประโยชน์แรงดันไฟตรงได้สูงขึ้นอย่างใน [6] เพราะส่วนใหญ่อะศัยการทำงานที่ความต่างขององศาทางไฟฟ้าที่เหมาะสม และมอเตอร์สองตัวทำงานที่ความถี่ไม่ต่างกันมาก แต่ในกรณีที่มอเตอร์สองตัวทำงานอย่างอิสระต่อกันจำเป็นต้องใช้วิธีอื่น ซึ่งได้มีการนำเสนออีกหนึ่งวิธีใน [4] ซึ่งได้นำเสนอผลการจำลองการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงค่าดัชนีการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัว และในบทความนี้จึงได้นำเสนอผลการทดสอบในทางปฏิบัติของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งดังกล่าวที่ใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟส เพื่อปรับปรุงค่าดัชนีการมอดูเลตรวมให้สามารถใช้งานได้เกิน 100% โดยใช้วิธีเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสม และได้แสดงวงจรกำลังในรูปที่ 1

การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ของการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง คือสิ่งที่สำคัญสำหรับการมอดูเลต

เนื่องจากสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟสที่ใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์สามกึ่งนำ มีหนึ่งกึ่งที่มีดิวิตไ้ไขเกิ้ลน้อยกว่ากึ่งอื่น หากเลือกดิวิตไ้ไขเกิ้ลที่มีค่าดิวิตไ้ไขเกิ้ลต่ำกว่ามาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนำ จะทำให้ค่าดิวิตไ้ไขเกิ้ลรวมของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนำลดลง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าดัชนีการมอดูเลตได้สูงกว่า 100 % ในช่วงเชิงเส้น สำหรับวิธีการเลือกดิวิตไ้ไขเกิ้ลสำหรับใช้เป็นกึ่งร่วมที่นำเสนอนั้น คือการเลือกแบบ Common B ซึ่งเป็นการเลือกดิวิตไ้ไขเกิ้ล b ของอินเวอร์เตอร์สามกึ่งนำทั้งสองตัวมาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง



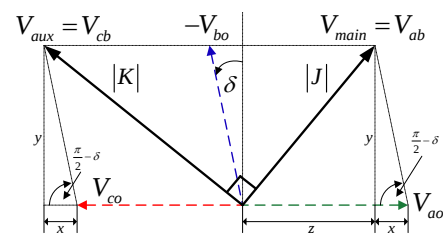
รูปที่ 1 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งแบบ common B ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัว

2. การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส

2.1 แรงดันขาออกสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์สามกึ่ง

เวกเตอร์แรงดันขาออกสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์สามกึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2 โดยมีเวกเตอร์แรงดันสามตัว แล้วใช้แรงดันไลน์ทูไลน์เป็นแรงดันขาออก ซึ่งใช้เวกเตอร์ V_{bo} เป็นเวกเตอร์แรงดันร่วม แรงดันขาออกสำหรับจ่ายให้กับขดลวดหลักของมอเตอร์ คือแรงดันไลน์ทูไลน์ V_{ab} และแรงดันขาออกสำหรับจ่ายให้กับขดลวดช่วยของมอเตอร์ คือแรงดันไลน์ทูไลน์ V_{cb} โดยมีแพค

เตอร์แรงดัน $|J|$ และ $|K|$ เป็นตัวคูณแรงดัน ซึ่งเป็นแพคเตอร์แรงดันขดลวดหลักและช่วยตามลำดับ การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสให้มีสมรรถนะที่ดี จำเป็นต้องจ่ายแรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักไม่เท่ากัน โดยจ่ายแรงดันเป็นอัตราส่วนตามอัตราส่วนจำนวนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก สำหรับการปรับอัตราส่วนแรงดันขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก สามารถทำได้โดยเลื่อนมุมเฟสของแรงดันกึ่งร่วม V_{bo} ด้วยมุม δ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับแพคเตอร์แรงดัน $|J|$ และ $|K|$

อัตราส่วนจำนวนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลักคือ α ดังนั้นมุม δ และ ϕ สามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2)

$$\delta = 2 \cdot \tan^{-1}(\alpha) - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

ขนาดของสเปซเวกเตอร์ขาออกกำหนดได้จากแพคเตอร์แรงดัน $|J|$ $|K|$ และ $|L|$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3)-(5) [7]

$$|J| = \sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \quad (3)$$

$$|K| = \sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \quad (4)$$

$$|L| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|J|}\right)^2 + \left(\frac{1}{|K|}\right)^2}} \quad (5)$$

ขณะที่ขนาดของแรงดันขาออกสองเฟสที่จ่ายให้กับขดลวดช่วย V_{aux} และขดลวดหลัก V_{main} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) และ (7) โดย V_{dc} คือครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง และ M คือค่าดัชนีการมอดูเลท

$$V_{main} = MV_{dc} |J| \quad (6)$$

$$V_{aux} = MV_{dc} |K| \quad (7)$$

2.2 การมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส

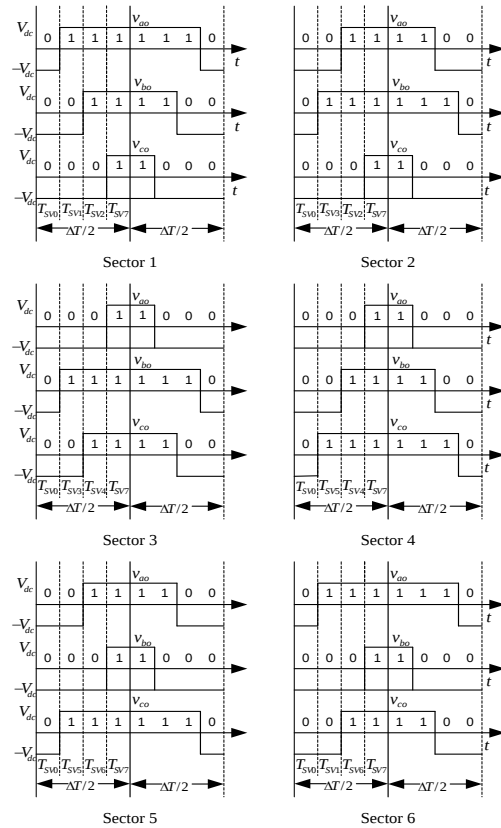
การมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟสนั้นสามารถทำได้โดยใช้สมการในตารางที่ 1 คำนวณหาค่าเวลาของแอกทีฟเวกเตอร์ที่อยู่ในเซกเตอร์นั้นๆ โดย θ_0 คือมุมอ้างอิงของสเปซเวกเตอร์ โดยเริ่มต้นที่ 0 องศาจากเซกเตอร์ 1 แล้วกวาดไปจนถึงเซกเตอร์สุดท้าย แล้วนำไปประกอบกับตำแหน่งการวางเวกเตอร์ในรูปที่ 3 ซึ่งจะได้ค่าออกมาเป็นดิวิตีซีเกิ้ลของสัญญาณ PWM โดยค่าดัชนีการมอดูเลทอยู่ระหว่าง $0 \leq M \leq \sqrt{2}$ [7]

สำหรับการคำนวณหาดิวิตีซีเกิ้ลของแต่ละกึ่งนั้น เมื่อคำนวณเวลาแอกทีฟของเวกเตอร์แอกทีฟแล้ว สามารถใช้ตำแหน่งการวางเวกเตอร์ในรูปที่ 3 เป็นตัวประกอบในการคำนวณ และสามารถคำนวณค่าดิวิตีซีเกิ้ลในเซกเตอร์ 1 ได้ตามสมการที่ (8)-(10) และได้แสดงรูปสัญญาณดิวิตีซีเกิ้ลเต็มลูกคลื่นในรูปที่ 4

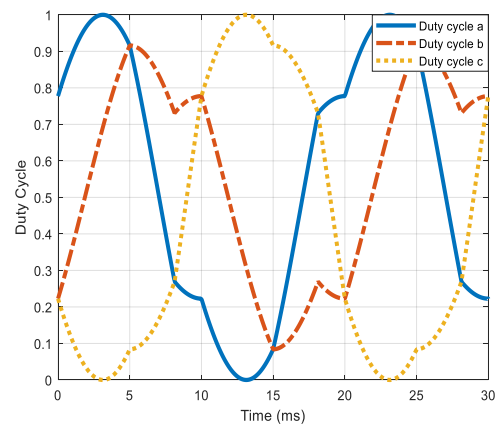
$$D_a = \frac{T_{SV1}}{\Delta T/2} + \frac{T_{SV2}}{\Delta T/2} + \frac{T_{SV7}}{\Delta T/2} \quad (8)$$

$$D_a = \frac{T_{SV2}}{\Delta T/2} + \frac{T_{SV7}}{\Delta T/2} \quad (9)$$

$$D_a = \frac{T_{SV7}}{\Delta T/2} \quad (10)$$



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวางเวกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามกึ่ง



รูปที่ 4 สัญญาณดิวิตีซีเกิ้ลของสเปซเวกเตอร์สองเฟส

ตารางที่ 1 เวลาแอกทีฟของสเปซเวกเตอร์สองเฟส

Sector 1	Sector 2
$\frac{T_{sv_1}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right)}{2}$ $\frac{T_{sv_2}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin(\theta_0)}{2}$	$\frac{T_{sv_1}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin\left(\frac{3\pi}{4} + \phi - \theta_0\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$ $\frac{T_{sv_2}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin\left(\theta_0 - \frac{\pi}{2}\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$
Sector 3	Sector 4
$\frac{T_{sv_3}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin(\pi - \theta_0)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$ $\frac{T_{sv_4}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\theta_0 - \frac{3\pi}{4} - \phi\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$	$\frac{T_{sv_1}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_0\right)}{2}$ $\frac{T_{sv_5}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin(\theta_0 - \pi)}{2}$
Sector 5	Sector 6
$\frac{T_{sv_5}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin\left(\frac{7\pi}{4} + \phi - \theta_0\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$ $\frac{T_{sv_6}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin\left(\theta_0 - \frac{3\pi}{2}\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$	$\frac{T_{sv_6}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin(2\pi - \theta_0)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$ $\frac{T_{sv_1}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\theta_0 - \frac{7\pi}{4} - \phi\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$

3. การมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งสองภาวะไหล

การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งสองภาวะไหล ขั้นตอนแรกคือการเลือกดิวิต์ไชเกิ้ลที่จะใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ เนื่องจากการมอดูเลตแบบห้ากึ่งสองเอาท์พุท จะใช้ดิวิต์ไชเกิ้ลหนึ่งสัญญาณของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งไปเป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่สอง และใช้ดิวิต์ไชเกิ้ลหนึ่งสัญญาณของตัวที่สองไปเป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง ซึ่งสัญญาณที่นำไปใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ทั้งสองตัวรวมกันเรียกว่า ดิวิต์ไชเกิ้ลของกึ่งรวมของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง เมื่อสัญญาณขาออกไปใช้จะเป็นสัญญาณไลน์ทูไลน์ จะทำให้สัญญาณลำดับศูนย์หายไป หากพิจารณาที่แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ก็เช่นกัน แรงดันขาออกจะไม่มีแรงดันลำดับศูนย์ปรากฏที่ขั้วมอเตอร์ทั้งสองตัว และสามารถแสดงสมการสำหรับการมอดูเลตห้ากึ่งได้ดังสมการที่ (11) และแสดงบล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตได้ดังรูปที่ 5 ซึ่ง

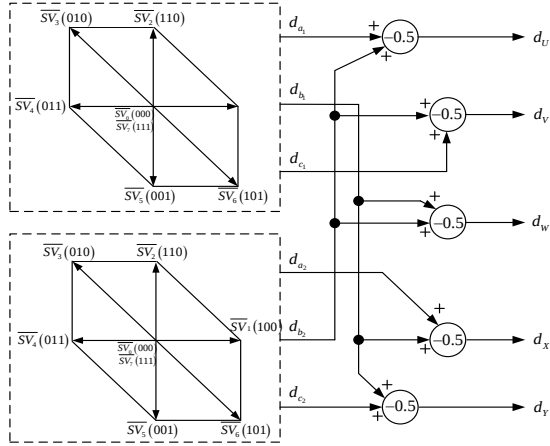
โดยปกติสัญญาณดิวิต์ไชเกิ้ลมีขนาดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และมีค่าออฟเซ็ทอยู่ที่ 0.5 หากนำมามอดูเลตแบบห้ากึ่งจำเป็นต้องลบค่าออฟเซ็ทออก 0.5

$$\begin{aligned}d_U &= d_{a_1} + d_{b_2} - 0.5 \\d_V &= d_{c_1} + d_{b_2} - 0.5 \\d_W &= d_{b_1} + d_{b_2} - 0.5 \\d_X &= d_{a_2} + d_{b_1} - 0.5 \\d_Y &= d_{c_2} + d_{b_1} - 0.5\end{aligned}\quad (11)$$

การเลือกดิวิต์ไชเกิ้ลกึ่งรวมสำหรับสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟสนั้นจะมีผลต่อค่าดิวิต์ไชเกิ้ลรวมของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าดิวิต์ไชเกิ้ล b นั้นจะมีขนาดพิคที่น้อยกว่าตัวอื่น ซึ่งเมื่อเทียบกับการเลือกดิวิต์ไชเกิ้ล a และ c หากนำดิวิต์ไชเกิ้ล b ไปใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์จะทำให้ดิวิต์ไชเกิ้ลรวมนั้นลดลง แล้วจะส่งผลให้สามารถใช้ดิวิต์ไชเกิ้ลรวมได้มากกว่า 100 % การนำดิวิต์ไชเกิ้ล b ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งมาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของมอเตอร์อีกตัวหนึ่งจะพิจารณาจากพิคของดิวิต์ไชเกิ้ล b ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งดังสมการที่ (12) และสามารถคำนวณดิวิต์ไชเกิ้ลสูงสุดของมอเตอร์ตัวที่สองได้ดังสมการที่ (13) และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการมอดูเลตของมอเตอร์ทั้งสองตัวดังสมการที่ (14) และ (15)

หากเลือกดิวิต์ไชเกิ้ล a หรือ c เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ จะไม่สามารถช่วยให้ดิวิต์ไชเกิ้ลของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งลดลง เนื่องจากพิคของแต่ละสัญญาณนั้นมีค่าปกติอยู่แล้ว สำหรับการเลือกสัญญาณดิวิต์ไชเกิ้ลมาเป็นสัญญาณลำดับศูนย์นั้น มีทั้งหมด 6 รูปแบบ และระบุได้ตามคู่สัญญาณที่นำมาเป็นสัญญาณลำดับศูนย์ เช่น นำสัญญาณดิวิต์ไชเกิ้ล a_1 - a_2 , b_1 - b_2 และ c_1 - c_2 มาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์เรียกว่า common A, common B และ common C ตามลำดับ และยังมีการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์อื่นๆอีก 4 แบบ คือ a_1 - b_2 , a_1 - c_2 , a_2 - b_1 , และ a_2 - c_1 ซึ่งจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับ common A และ common C คือไม่สามารถช่วยลดพิคของดิวิต์ไชเกิ้ลของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งได้ ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอเฉพาะ common A,

common B และ common C ซึ่งจากสมการที่ (14) และ (15) common B สามารถลดดิฟฟ์ไซด์ได้ ส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าดัชนีการมอดูเลตได้มากกว่า 100% ในช่วงเชิงเส้นได้ และได้แสดงพื้นที่การมอดูเลตเชิงเส้นของการเลือกดิฟฟ์ไซด์เกิ้ลที่ร่วมต่างๆ ดังรูปที่ 6



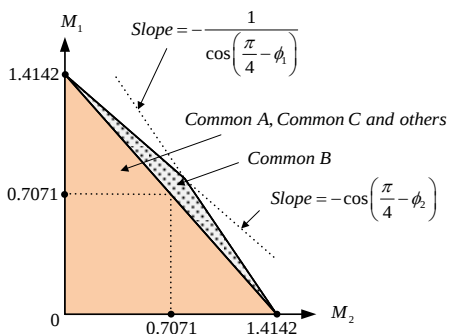
รูปที่ 5 ไดอะแกรมการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง
แบบ common B

$$D_{b1,peak} = \frac{M_1 |K_1|}{4} + 0.5 \quad (12)$$

$$D_{2,max} = 1 - D_{b1,peak} \therefore D_{2,max} = \frac{M_{2,max}}{2\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$M_{2,max} = \sqrt{2} - M_1 \cos\left(\frac{\pi}{4} - |\phi_1|\right) \quad (14)$$

$$M_{1,max} = \sqrt{2} - M_2 \cos\left(\frac{\pi}{4} - |\phi_2|\right) \quad (15)$$



รูปที่ 6 ย่านเชิงเส้นของดัชนีการมอดูเลตสำหรับ
อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นพื้นที่การมอดูเลตเชิงเส้นของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งที่ใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ และการเลือกดิฟฟ์ไซด์เกิ้ลที่ร่วมแบบ common B สามารถเพิ่มย่านการมอดูเลตเชิงเส้นได้สูงกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (13) และ (14)

4. การจำลอง และการทดสอบ



รูปที่ 7 ฮาร์ดแวร์อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง และเครื่องมือวัด

ผลการจำลองได้จากโปรแกรม Matlab/Simulink และผลทดสอบ การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งบนพื้นฐานการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสคู่ เพื่อขยายย่านการมอดูเลตเชิงเส้นของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง ได้แสดงรูปฮาร์ดแวร์ในรูปที่ 7 สำหรับการจำลอง และการทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆในการเลือกสัญญาณดิฟฟ์ไซด์เกิ้ลร่วมทั้ง 3 รูปแบบ เหมือนกันทั้งหมด ดังนี้ $\alpha_1 = 1.5$, $\alpha_2 = 1.5$, $f_s = 2.5kHz$, $f_1 = 25Hz$, $f_2 = 50Hz$, $M_1 = 0.825$, $M_2 = 0.707$ ซึ่งค่าดัชนีการมอดูเลตรวมมีค่าเท่ากับ 1.532 คิดเป็น 108.3% ของค่าดัชนีการมอดูเลตปกติ และใช้แรงดันไฟตรงเชื่อมโยง 300 โวลต์

รูปที่ 8, 10 และ 12 แสดงผลการจำลอง ส่วนรูปที่ 9, 11 และ 13 แสดงผลการทดสอบสัญญาณตัวตัดไขเกิ้ล และสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งที่ใช้สเปซเวกเตอร์สองเฟส ในรูปแบบการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A, common B และ common C ตามลำดับ ซึ่งในรูปได้แสดงรูปสัญญาณของกึ่ง U, V, W, X, Y

จากผลการจำลอง และผลการทดลองในรูปที่ 8 ถึง 13 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ใช้ค่าดัชนีการมอดูเลทรวม 108.3% ตามเงื่อนไขของการจำลองและทดสอบนั้น การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A มีตัวตัดไขเกิ้ลของกึ่ง V และ W บางช่วงที่มีค่าเกิน 1 และตัวตัดไขเกิ้ลของกึ่ง Y มีบางช่วงที่มีค่าต่ำกว่า 0 จึงส่งผลให้เกิดการโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นที่สัญญาณ PWM กึ่ง V, W และ Y ในผลการจำลอง และสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 8 และรูปที่ 9

การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common B มีตัวตัดไขเกิ้ลของทุกกึ่งตั้งแต่ U ไปจนถึงกึ่ง Y มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากผลการจำลอง และการทดสอบพบว่าไม่เกิดการโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นที่สัญญาณ PWM ทั้งในผลการจำลอง และสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 10 และรูปที่ 11

และการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common C มีตัวตัดไขเกิ้ลของกึ่ง X บางช่วงที่มีค่าเกิน 1 และตัวตัดไขเกิ้ลของกึ่ง U และ W มีบางช่วงที่มีค่าต่ำกว่า 0 จึงส่งผลให้เกิดการโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นที่สัญญาณ PWM กึ่ง U, W และ X ในผลการจำลอง และสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบ ในรูปที่ 12 และรูปที่ 13

จากผลการจำลอง และทดสอบในรูปที่ 8 ถึง 13 แสดงให้เห็นว่า การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common B สามารถขยายย่านเชิงเส้นของการมอดูเลทความกว้างพัลส์ขึ้นได้เกิน 100% ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (12) ถึง (15)

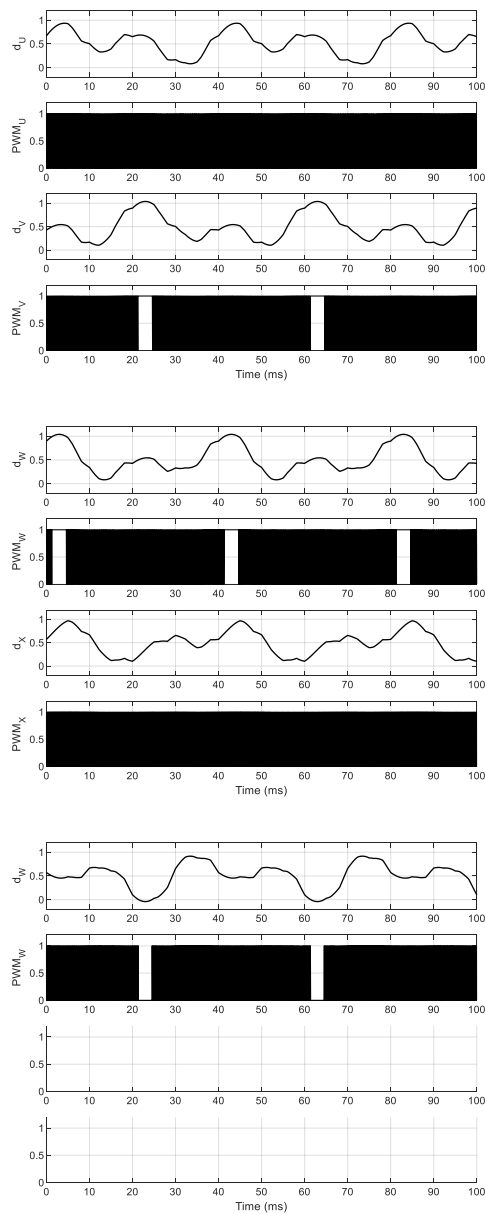
ผลการจำลอง และผลการทดสอบในรูปที่ 14 ถึง 21 แสดงผลทางด้านฮาร์มอนิก ซึ่งได้สเปกตรัมของแรงดันมอเตอร์ขดลวดหลัก และขดลวดช่วย ทั้งของมอเตอร์ตัวที่

1 และตัวที่ 2 เนื่องจากมีการเกิดโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นในการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A และ common C ดังนั้นจึงได้เปรียบเทียบขนาดแรงดันฮาร์มอนิกความถี่ต่ำที่เกิดขึ้น ระหว่างการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A, common B และ common C ในรูปที่ 14 ถึง 21

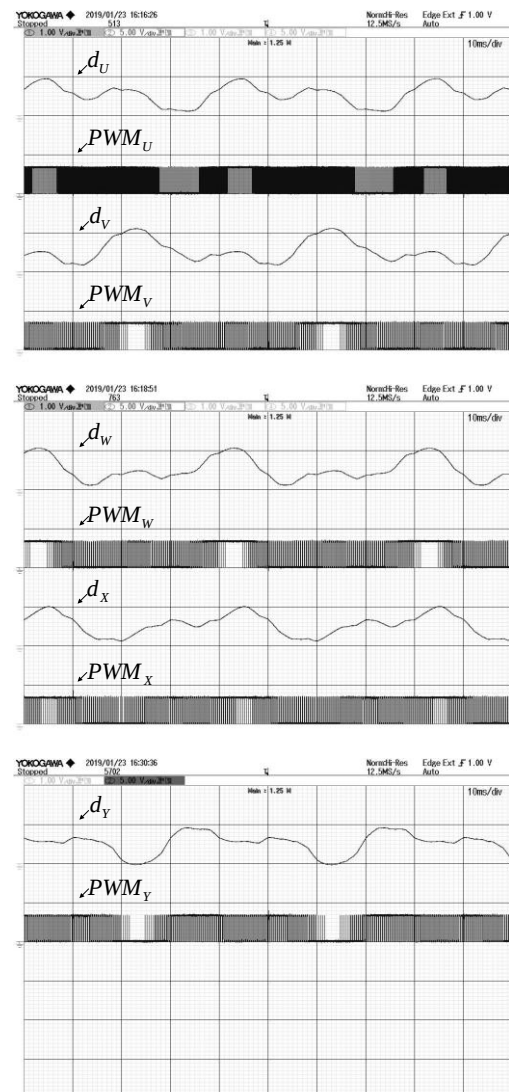
การเกิดโอเวอร์มอดูเลทสามารถให้แรงดันความถี่มูลฐานที่สูงขึ้น แต่จะไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ซึ่งการเกิดโอเวอร์มอดูเลทจะทำให้เกิดกลุ่มฮาร์มอนิกความถี่ต่ำ ใกล้เคียงกับความถี่มูลฐานขึ้น [8]

ผลการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสทั้งสองตัวได้แสดงในรูปที่ 22 และผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 23 แสดงให้เห็นว่าทั้งผลการจำลอง และผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ในกรณีที่มอเตอร์ทั้งสองตัวถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้น จะมีช่วงการทำงานบางช่วงที่มอเตอร์สร้างพัลส์ไม่ถึงพิคกิ้ง จึงส่งผลให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานที่พิคกิ้งกำลังได้ มอเตอร์ทั้งสองตัวสามารถทำงานได้ทั้งในกรณีที่ขั้วภาระไหลแตกต่างกัน หรือความเร็วรอบต่างกัน ได้ ตามสภาวะเงื่อนไขที่แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ที่ค่าดัชนีการมอดูเลทต่างๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสม กับวิธีการเลือกอื่นๆแล้ว วิธีการเลือกลำดับศูนย์ที่นำเสนอ (Common B) นั้นสามารถเพิ่มแรงดันขาออกให้มอเตอร์ได้สูงขึ้นเพียงวิธีเดียว ดังผลการจำลองและการทดสอบทั้งหมด

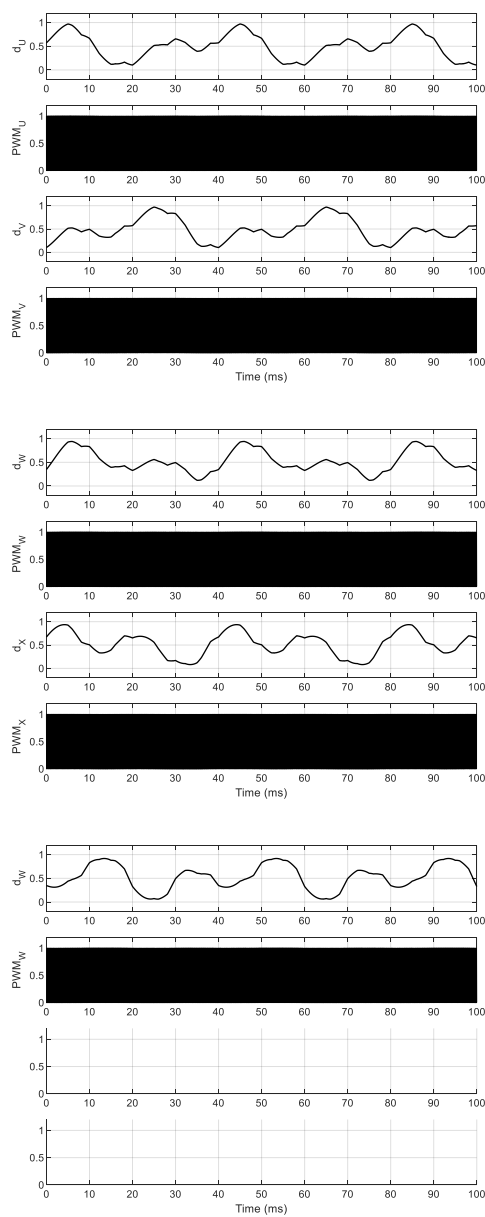


รูปที่ 8 ผลการจำลองสัญญาณดิไวตีไซเคิล และ PWM ของ
Common A

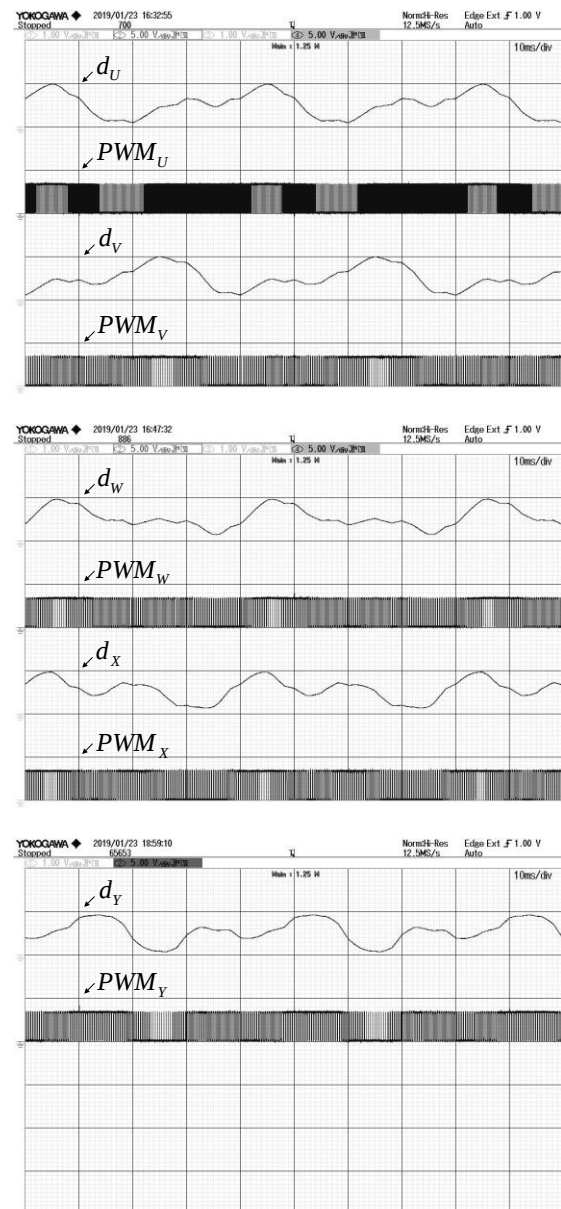


รูปที่ 9 ผลการทดสอบสัญญาณดิไวตีไซเคิล และ PWM
ของ Common A

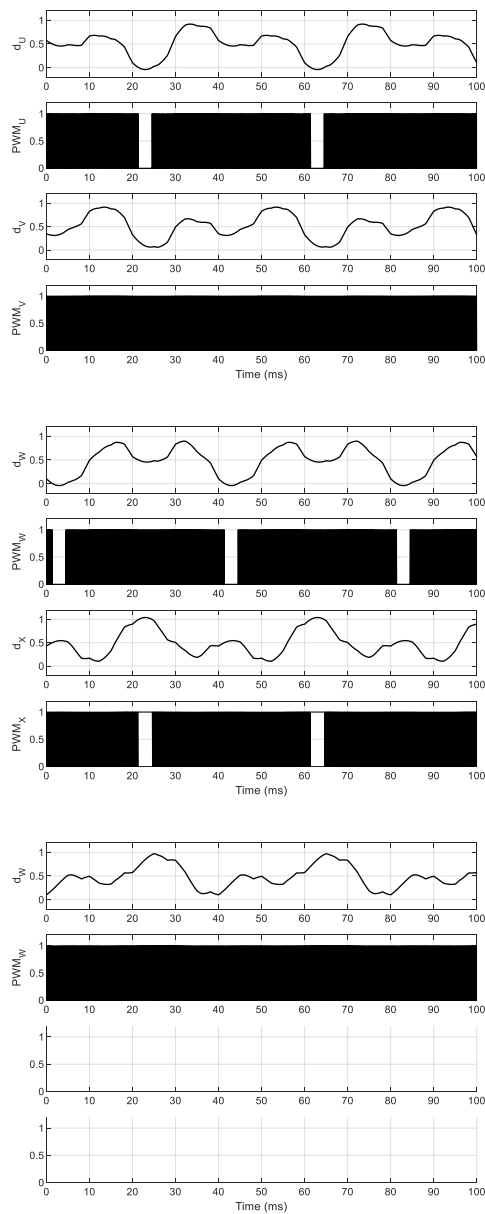
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562



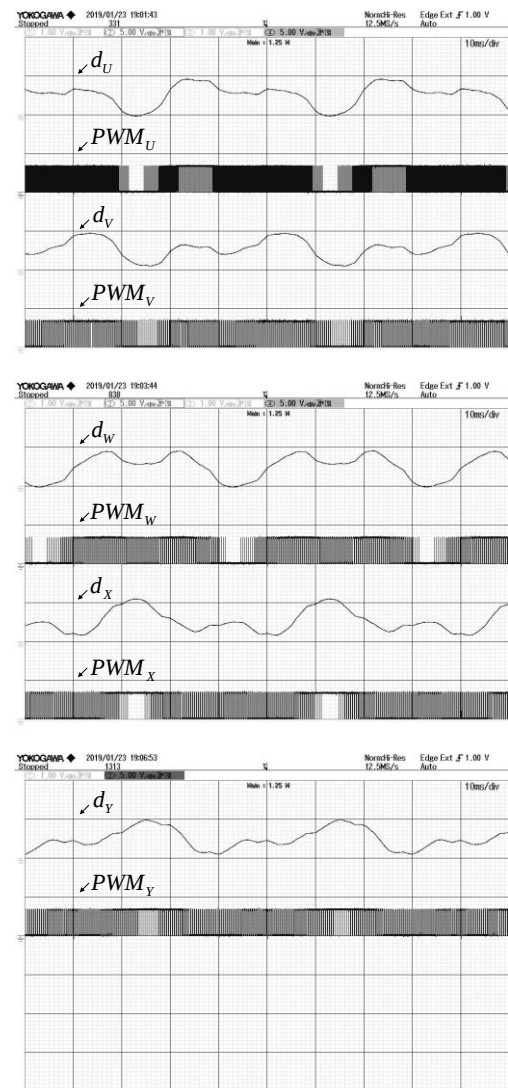
รูปที่ 10 ผลการจำลองสัญญาณดิ้ว์ไซเกิ้ล และ PWM ของ Common B



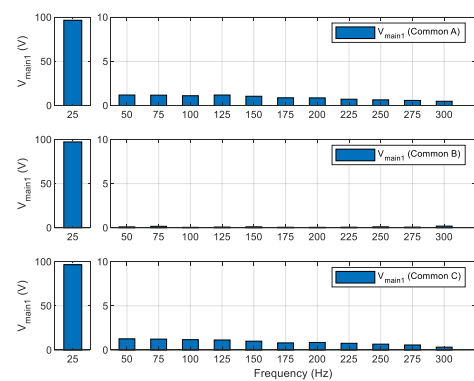
รูปที่ 11 ผลการทดสอบสัญญาณดิ้ว์ไซเกิ้ล และ PWM ของ Common B



รูปที่ 12 ผลการจำลองสัญญาณดิฟฟิเคิล และ PWM
ของ Common C

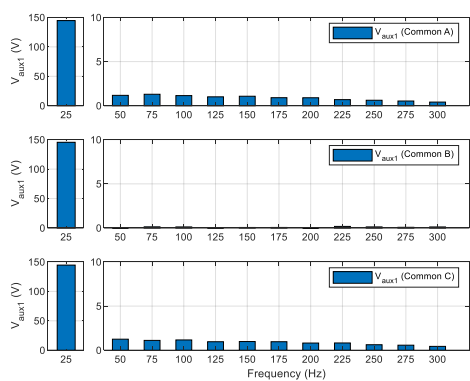


รูปที่ 13 ผลการทดสอบสัญญาณดิฟฟิเคิล และ PWM
ของ Common C

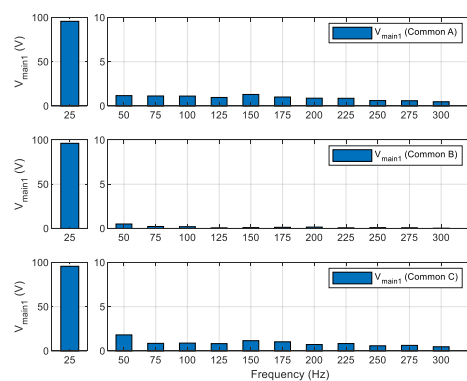


รูปที่ 14 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 1

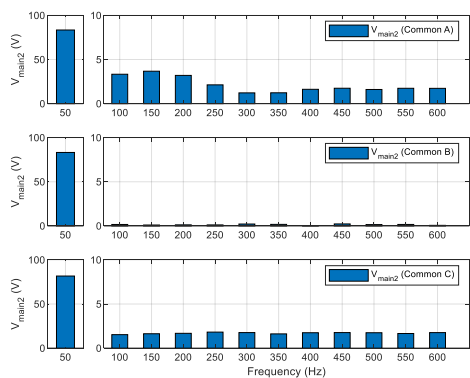
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562



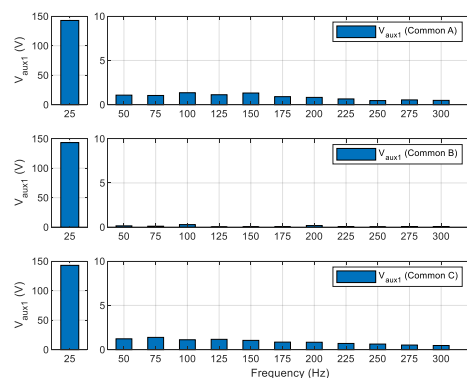
รูปที่ 15 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 1



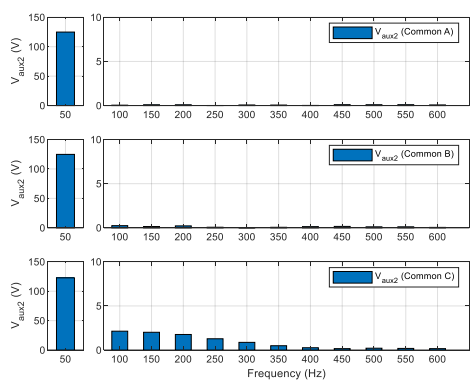
รูปที่ 18 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 1



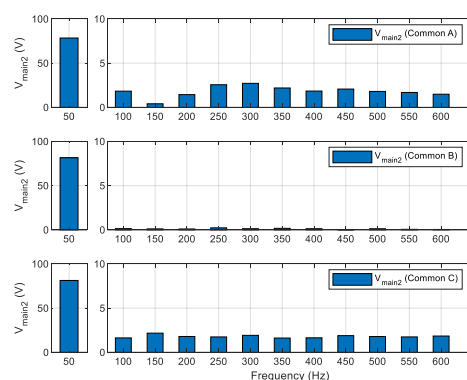
รูปที่ 16 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 2



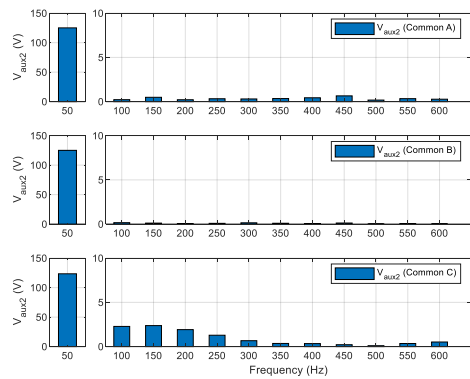
รูปที่ 19 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 1



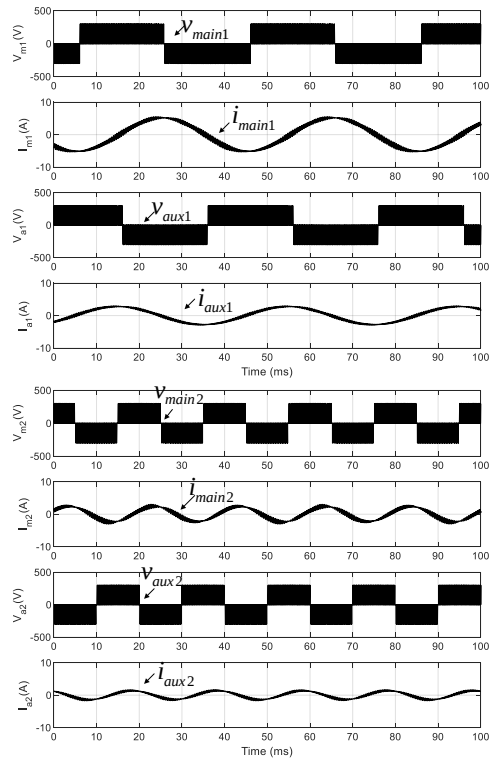
รูปที่ 17 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 2



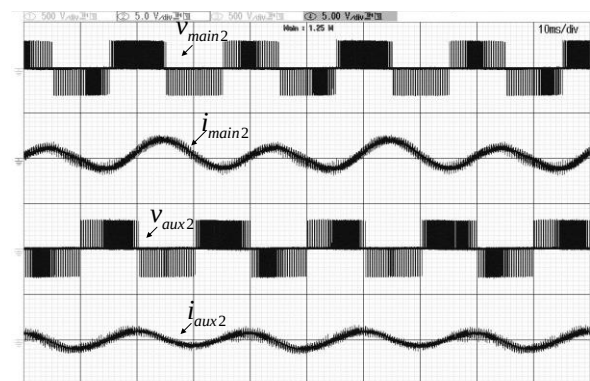
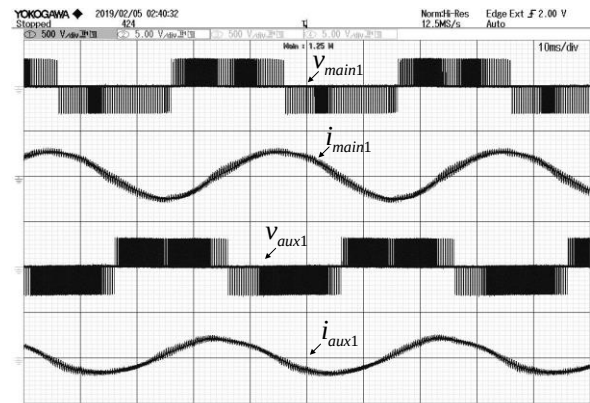
รูปที่ 20 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 2



รูปที่ 21 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 2



รูปที่ 22 ผลการจำลองแรงดันและกระแสของมอเตอร์ทั้งสองตัว



รูปที่ 23 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสของมอเตอร์ทั้งสองตัว

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

พิกัดกำลัง	2 hp
อัตราส่วนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก (α)	1.5
จำนวนโพล	4
ความถี่พิกัด	50 Hz
ความเร็วรอบที่พิกัดกำลัง	1450 rpm

5. สรุป

จากการวิเคราะห์ผลการจำลอง และผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ว่า การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งบนพื้นฐานการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัวที่ควบคุมอย่างอิสระต่อกัน สามารถขยายงานการมอดูเลทเชิงเส้นได้ โดยการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common B นั้นสามารถลด

ขนาดพีคของดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง ซึ่งได้ส่งผลให้สามารถขยายย่านเชิงเส้นของค่าดัชนีการมอดูเลทรวมได้มากกว่า 100 เปอร์เซนต์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการจำลอง และผลการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สัญญาทุนเลขที่ PHD/0163/2558

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Jones, S.N. Vukosavic, D. Dujic, E. Levi and P. Wright, "Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant applications," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 2, no.5, pp. 275-287, Sep. 2008.
- [2] C. S. Lim and N. A. Rahim, "Model Predictive Control of a Two-Motor Drive With Five-Leg-Inverter Supply," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 60, no.1, pp. 54-65, Feb. 2013.
- [3] S. Dangeam and V. Kinnarees, "Two Single-phase Induction Motor Drives Using a Five-leg Voltage Source Inverter," *The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)*, Pattaya City., Thailand, pp. 156-162, Oct. 2015
- [4] W. Promkhun, V. Kinnarees, K. Ohyama and V. Thanyaphirak, "Optimal Zero-Sequence Selection for Five-Leg Inverter Based on Two-Phase SVPWM Fed Dual Two-Phase Induction Motors," *The 6th International Electrical Engineering Conference (iEECON 2018)*, Krabi, Thailand, pp. 283-286, March 2018.
- [5] G. Su, and J. S. Hsu, "A Five-Leg Inverter for Driving a Traction Motor and a Compressor Motor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.21, no.3, pp. 687-692, May 2006.
- [6] K. Oka, Y. Nozawa and K. Matsuse, "An Improved Method of Voltage Utility Factor for PWM Control of a Five-Leg Inverter in Two Induction Motor Drives," *IEEE Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, vol. 1, no.1, pp. 108-111, May 2006.
- [7] V. Kinnarees and C. Charumit, "Modulating Functions of Space Vector PWM for Three-Leg VSI-Fed Unbalanced Two-Phase Induction Motors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no.4, pp. 1135-1139, Apr. 2009.
- [8] D. G. Holmes, "Overmodulation of an Inverter," in *Pulse Width Modulation for Power Converters*, T. A. Lipo, Ed. New Jersey: John Willey, pp. 349-382, 2003.