การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาดเคสเฮชบริดจ์

Comparative Study of Switching Techniques Performance for Cascaded H-bridge Multilevel Inverters

อดิศร จิวสืบพงษ์[1] ณัฐพงษ์ โปธิ[1] และ เชวศักดิ์ รักเป็นไทย[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา 65103500@up.ac.th

บทคัดย่อ

วิธีการสวิตช์แบบปรับเฟสและแบบปรับระดับมักถูกใช้ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ โดยวิธีการสวิตช์แบบปรับระดับยังสามารถจำแนกเป็น 3 รูปแบบ คือ IPD, APOD, และ POD ตามลักษณะการจัดเรียงของคลื่นพาหะ อย่างไรก็ตาม วิธีการสวิตช์ที่ต่างกันอาจให้ผลของขนาดแรงดันเอาต์พุตและผลรวมฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนค่าดัชนีการมอดูเลต ดังนั้น วิธีการสวิตช์เหล่านั้นภายใต้เทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM จึงถูกพิจารณาเปรียบเทียบในบทความนี้ ประสิทธิผลของวิธีการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับถูกแสดงด้วยผลการจำลอง

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับ วิธีการสวิตช์ คาสเคดเอชบริดจ์

Abstract

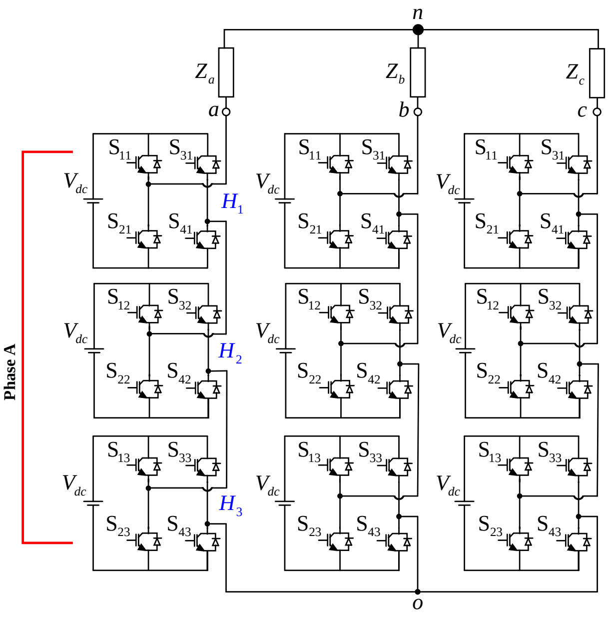
Phase-shifted and level-shifted switching methods are commonly employed in cascaded H-bridge multilevel inverters. The level-shifted method can also be classified into 3 types, i.e., IPD, APOD, and POD, based on the arrangement of the carrier waveforms. However, each switching method might provide different levels of output voltage and total harmonic distortion, especially in the case of modulation index is modified. Therefore, those switching methods based on SVPWM are investigated and compared in this paper. The effectiveness of switching methods for multilevel inverters is clearly demonstrated by simulation.

Keywords: Multilevel inverter, Switching techniques, Cascaded H-bridges

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ (Cascaded H-bridge, CHB) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลาง โดยมีการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ระบบกักเก็บพลังงาน สถานีชาร์จประจุไฟฟ้า และในระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า [1] เป็นต้น อีกทั้งอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดนี้ยังคงมีจุดเด่น เช่น สามารถขยายขนาดแรงดันเอาต์พุตตามจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ ผลรวมฮาร์มอนิกที่ต่ำ [2], [3] และให้ผลของการกระเพื่อมแรงบิด (Torque ripple) ต่ำ เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์สองระดับ (Two-level inverter) ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าทั่วไป [4]

วิธีการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีอยู่ 2 วิธี หลักๆ คือ วิธีการสวิตช์แบบปรับเฟส (Phase-shifted switching technique) และวิธีการสวิตช์แบบปรับระดับ (Level-shifted switching techniques) ซึ่งใช้การจัดเรียงสัญญาณรูปคลื่นพาหะสามเหลี่ยมในการสร้างสัญญาณพัลส์ โดยวิธีการสวิตช์แบบปรับระดับยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ 1) มุมเฟสเท่ากัน (In-phase disposition, IPD), 2) มุมเฟสต่างกันสำหรับคลื่นพาหะที่อยู่ติดกัน (Alternative phase opposite disposition, APOD) และ 3) มุมเฟสต่างกันระหว่างคลื่นพาหะด้านบวกและด้านลบ (Phase opposite disposition, POD) [2], [5] ซึ่งวิธีการสวิตช์เหล่านี้ ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่เป็นมาตรฐานและเป็นที่นิยมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ อย่างไรก็ตาม หากสามารถรู้ถึงสมรรถนะของวิธีการสวิตช์เหล่านี้ ทั้งกรณีที่ประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการคงค่าดัชนีการมอดูเลต และกรณีที่ต้องการการปรับค่าดัชนีการมอดูเลตตามสภาวะการทำงาน ซึ่งอาจเป็นส่วนหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพต่อระบบควบคุมที่นำอินเวอร์เตอร์หลายระดับไปประยุกต์ใช้ได้ มากไปกว่านั้น บทความนี้ยังพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (Space vector pulse width modulation technique, SVPWM) และวิธีการมอดูเลตแบบไซน์ (Sinusoidal pulse width modulation technique, SPWM) สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ [1],[3]



รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ชนิดคาดเคสเฮชบริดจ์

available online December 1, 2023.
*Corresponding author: อดิศร จิวสืบพงษ์ มหาวิทยาลัยพะเยา (E-mail: 65103500@up.ac.th)

2. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาดเคสเฮชบริดจ์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอชบริดจ์ประกอบด้วยเซลล์เอชบริดจ์หลายเซลล์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรม โดยมีโครงสร้างของวงจรแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์จะสอดคล้องกับจำนวนของเอชบริดจ์ เป็นดังสมการที่ (1) โดยที่จำนวนสวิตช์ทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์สามารถหาค่าได้เป็นดังสมการที่ (2)

$$m = 2H + 1 \tag{1}$$

$$N_{sw} = 6(m-1) \tag{2}$$

โดยที่ m คือ จำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ H คือ จำนวนเอชบริดจ์ในแต่ละเฟส และ N_{sw} คือ จำนวนสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

และจากผลการต่ออนุกรมของคาสเคดเอชบริดจ์ดังรูปที่ 1 ผลรวมของแรงดันเอาต์พุตของเฟสเอ สามารถหาค่าได้ดัง (3)

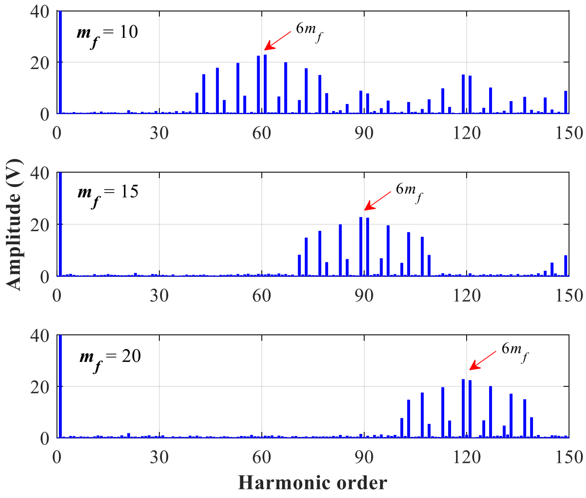
$$V_{ao} = V_{H1} + V_{H2} + V_{H3} \tag{3}$$

โดย V_{ao} คือ แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เฟสเอ และ V_{H1}, V_{H2}, V_{H3} คือ แรงดันเอาต์พุตของเอชบริดจ์ตัวที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ

ค่าดัชนีการมอดูเลตคลื่นความถี่ (Frequency modulation index, m_f) ถูกใช้เพื่อแสดงอันดับคลื่นความถี่ฮาร์มอนิกของแรงดันเอาต์พุต ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่คลื่นพาหะและความถี่สัญญาณเอาต์พุตแสดงดังสมการที่ (4) ค่าดัชนีการมอดูเลตคลื่นความถี่จะถูกกำหนดขึ้นโดยพิจารณาถึงจุดสมดุลระหว่างการสูญเสียของอินเวอร์เตอร์และผลของความถี่ฮาร์โมนิกต่อความถี่มูลฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยพบว่า คลื่นความถี่ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์ (โดยทั่วไปปรากฏที่อันดับ $6m_f$, [5]) จะมีอันดับสูงขึ้นแปรผันตรงตามค่าดัชนีการมอดูเลตคลื่นความถี่ที่กำหนด

$$m_f = \frac{f_{cr}}{f} \tag{4}$$

โดยที่ f_{cr}, f คือ ความถี่คลื่นพาหะที่ใช้ในการสวิตช์ และความถี่สัญญาณเอาต์พุต ตามลำดับ



รูปที่ 2 คลื่นความถี่ฮาร์มอนิกของแรงดันไลน์

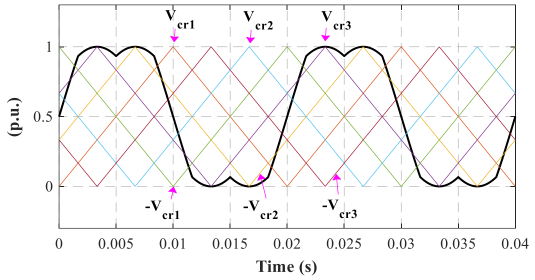
2.1 วิธีการสวิตช์แบบปรับเฟส (Phase-shifted)

เทคนิคการมอดูเลตแบบปรับเฟส ใช้การปรับมุมคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ให้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ [5] ซึ่งจำนวนคลื่นพาหะจะมีค่าเท่ากับ $m - 1$ และมุมต่างระหว่างคลื่นพาหะสามารถหาค่าได้เป็นดังสมการที่ (5) รูปที่ 3 แสดงคลื่นพาหะของวิธีการสวิตช์แบบปรับเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับบนพื้นฐานเทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM โดยที่ V_{cr1}, V_{cr2}, และ V_{cr3} เป็นคลื่นพาหะสัญญาณเพื่อใช้ในการสวิตช์ S_{11}, S_{12}, และ S_{13} ของบริดจ์เซลล์ในแต่ละเฟสดังรูปที่ 1 โดยในส่วนของคลื่นพาหะ $-V_{cr1}$, $-V_{cr2}$, และ $-V_{cr3}$ ถูกใช้สำหรับการสวิตช์ของ S_{31}, S_{32}, และ S_{33} ตามลำดับ ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามารถหาค่าได้เป็นดังสมการที่ (6) โดยรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวิธีการสวิตช์แบบปรับเฟส แสดงดังรูปที่ 4

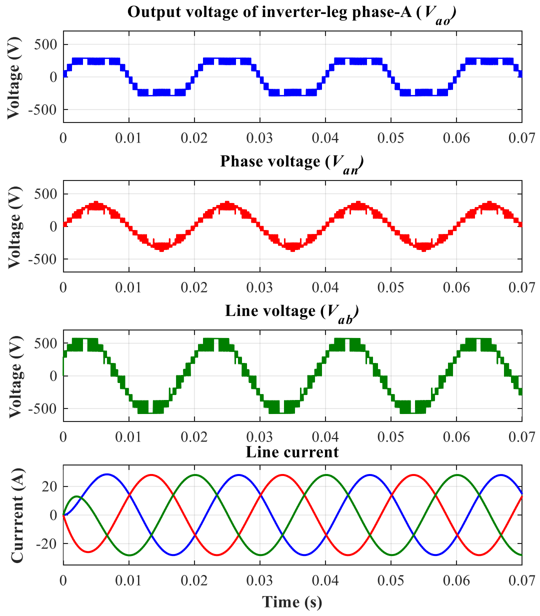
$$\theta_{cr} = \frac{360^{o}}{(m-1)} \tag{5}$$

$$f_{sw,inv} = (m-1)\,f_{cr} \tag{6}$$

โดยที่ θ_{cr}, $f_{sw,inv}$ คือ มุมต่างคลื่นพาหะสามเหลี่ยม และความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ตามลำดับ



รูปที่ 3 รูปคลื่นพาหะของการสวิตช์แบบปรับเฟส



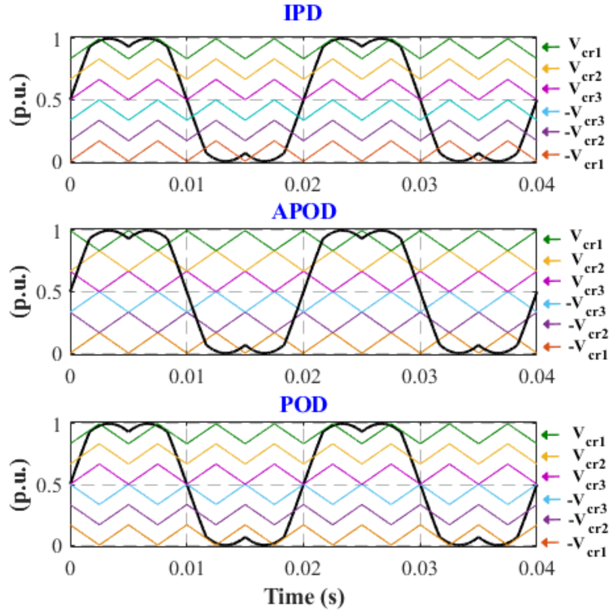
รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของการสวิตช์แบบปรับเฟส

2.2 วิธีการสวิตช์แบบปรับระดับ (Level-shifted)

การสวิตช์แบบปรับระดับ ใช้การปรับระดับของรูปคลื่นพาหะสามเหลี่ยมในการสร้างสัญญาณพัลส์ โดยมีจำนวนรูปคลื่นพาหะเท่ากันกับเทคนิคการปรับเฟส (m – 1) วิธีการนี้ยังสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 รูปแบบตามลักษณะของรูปคลื่นพาหะ ดังที่ได้ระบุไปแล้วในส่วนของบทนำ คือ 1) IPD คลื่นพาหะทั้งหมดจะมีมุมเฟสเท่ากัน 2) APOD คลื่นพาหะที่อยู่ติดกันจะมีมุมต่างเฟสกัน 180 องศา และ 3) POD คลื่นพาหะด้านบวกจะมีมุมเฟสต่างกับคลื่นพาหะด้านลบอยู่ 180 องศา [5] ซึ่งรายละเอียดรูปคลื่นพาหะของวิธีการทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5 และในส่วนการสวิตช์ยังคงเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับวิธีการสวิตช์แบบปรับเฟส กล่าวคือ V_{cr1}, V_{cr2}, และ V_{cr3} เป็นคลื่นพาหะสัญญาณเพื่อใช้ในการสวิตช์ของ S_{11}, S_{12}, และ S_{13} ของบริดจ์เซลล์ในแต่ละเฟส โดยในส่วนของคลื่นพาหะ $-V_{cr1}$, $-V_{cr2}$, และ $-V_{cr3}$ ใช้สำหรับการสวิตช์ของ S_{31}, S_{32}, และ S_{33} ของบริดจ์เซลล์ในแต่ละเฟสเช่นกัน ซึ่งรายละเอียดในส่วนของการสร้างสัญญาณพัลส์แต่ละบริดจ์เซลล์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดคาสเคดเอชบริดจ์แสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [5]

แน่นอนว่าสวิตช์ในแต่ละขาของบริดจ์เซลล์จะทำงานไม่พร้อมกัน (Interlock) เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจร ดังเช่น S_{11} และ S_{21} หรือ S_{31} และ S_{41} โดยจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันของทุกบริดจ์เซลล์ ในทางปฏิบัติจะมีการกำหนดช่วงเวลาไร้สนอง (Dead time) เพื่อให้การสวิตช์ของแต่ละบริดจ์เซลล์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ซึ่งความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สำหรับวิธีการสวิตช์แบบปรับระดับสามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (7)

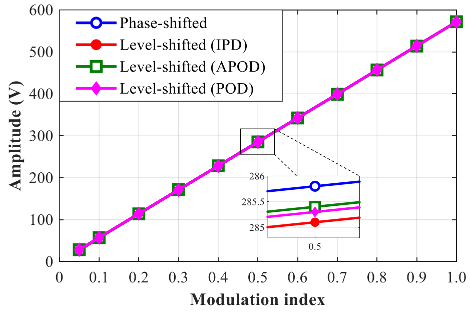
$$f_{sw,inv} = f_{cr} \tag{7}$$



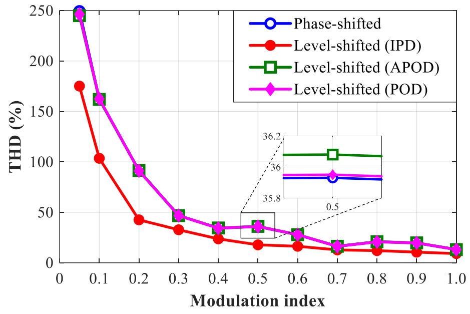
รูปที่ 5 รูปคลื่นพาหะของวิธีการสวิตช์แบบปรับระดับ

ตารางที่ 1 ปริมาณต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดในแบบจำลอง

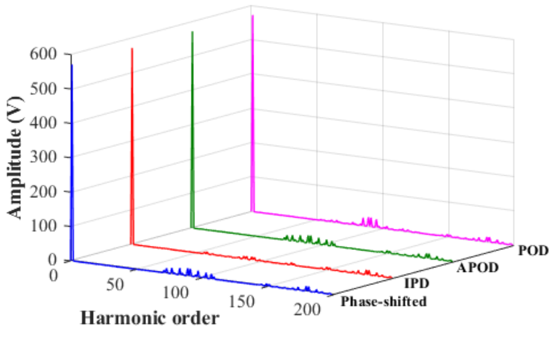
ชื่อตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่าที่กำหนด
แรงดันดีซี	V_{dc}	100 V
ความถี่เอาต์พุต	f	50 Hz
ความถี่คลื่นพาหะ วิธีการสวิตช์แบบปรับเฟส วิธีการสวิตแบบปรับระดับ	f_{cr}	 750 Hz 4500 Hz
ความต้านทานโหลด	R	10.0 Ω
ความเหนี่ยวนำโหลด	L	2.0 mH
แรงดันเทรชโฮลด์ของสวิตช์	V_{ceo}	1.95 V
แรงดันเทรชโฮลด์ของไดโอด	V_{do}	1.65 V
ความต้านทานสวิตช์	r_{ce}	0.02 Ω
ความต้านทานไดโอด	r_d	0.02 Ω



(ก) ขนาดแรงดันไลน์เอาต์พุต



(ข) ผลรวมฮาร์มอนิก



(ค) คลื่นความถี่ฮาร์มอนิกที่ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1.0

รูปที่ 6 ผลการจำลองเปรียบเทียบวิธีการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ

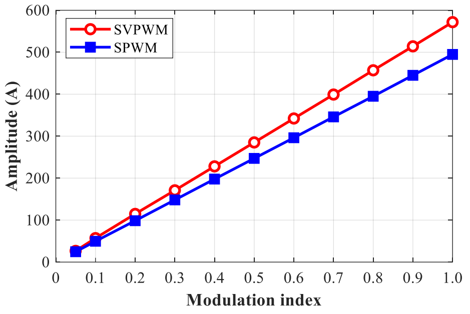
3. ผลการจำลอง

อินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดคาดเคสเฮชบริดจ์ถูกพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการสวิตช์ทั้งแบบปรับเฟสและแบบปรับระดับ รวมทั้งสิ้น 4 วิธี บนพื้นฐานของวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการจำลอง แรงดันดีซี (V_{dc}) ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ของแต่ละบริดจ์เซลล์ โดยขับโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (*RL*) ที่ความถี่เอาต์พุต 50 เฮิรตซ์ รายละเอียดของปริมาณต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1 ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ ($f_{sw,inv}$) ของวิธีการสวิตช์ทั้งแบบปรับเฟสและแบบปรับระดับถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ (6) และ (7) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการสวิตช์ทั้งหมดภายใต้การปรับค่าดัชนีการมอดูเลตในช่วง 0.05 ถึง 1.0 โดยพิจารณาขนาดแรงดันเอาต์พุตและผลรวมฮาร์มอนิก จากผลการจำลองพบว่า วิธีการสวิตช์ทั้ง 4 วิธีให้ขนาดแรงดันที่ไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) ขณะที่ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.5 วิธีการสวิตช์แบบปรับเฟสมีขนาดแรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่ 285.8 โวลต์ ซึ่งมากกว่าวิธีการสวิตช์แบบปรับระดับชนิด IPD ที่มีขนาดแรงดันเท่ากับ 285.1 โวลต์ (ค่าความต่างคิดเป็น 0.24 เปอร์เซ็นต์) อย่างไรก็ตาม วิธีการสวิตช์แบบปรับระดับชนิด IPD กลับให้ผลรวมฮาร์มอนิกต่ำที่สุดในทุกช่วงการพิจารณา เมื่อเทียบกับวิธีการสวิตช์อื่น ดังรูปที่ 6(ข) โดยที่รูปคลื่นความถี่ฮาร์มอนิกแสดงในรูปที่ 6(ค) สังเกตได้ว่า ที่ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1.0 วิธีการสวิตช์ทั้งหมดให้ประสิทธิผลไม่แตกต่างกัน ซึ่งใช้ได้กับกรณีที่ไม่ต้องการการปรับค่าดัชนีการมอดูเลต

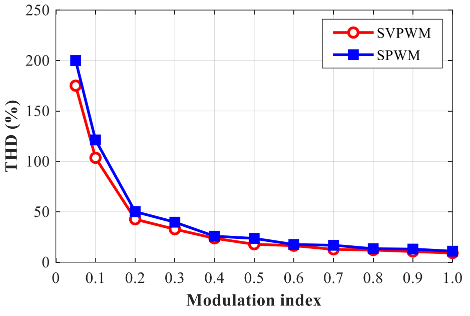
รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดแรงดันเอาต์พุตและผลรวมฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ระหว่างเทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM และ SPWM โดยใช้วิธีการสวิตช์แบบปรับระดับชนิด IPD พบว่า เทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM ให้สมรรถนะที่ดีกว่าทั้งในส่วนของให้ขนาดแรงดันเอาต์พุตที่สูง และผลรวมฮาร์มอนิกต่ำกว่าในทุกช่วง

4. สรุป

วิธีการสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับทั้งแบบปรับเฟส และแบบปรับระดับซึ่งประกอบด้วย 3 วิธีการ คือ IPD, APOD, และ POD ถูกพิจารณาเปรียบเทียบภายใต้การกำหนดความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เท่ากันโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM จากผลการจำลองพบว่า วิธีการสวิตช์ทั้ง 4 วิธีให้ประสิทธิผลไม่แตกต่างกันทั้งขนาดแรงดันเอาต์พุตและผลรวมฮาร์มอนิกที่ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 1.0 ซึ่งหากพิจารณาที่ค่าดัชนีการมอดูเลตน้อยกว่า 1.0 พบว่า วิธีการสวิตช์ทั้งหมดให้ขนาดแรงดันเอาต์พุตในระดับที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม วิธีการสวิตช์แบบปรับระดับชนิด IPD ให้ผลรวมฮาร์มอนิกต่ำที่สุดในทุกช่วงที่พิจารณาเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ซึ่งถือได้ว่าเป็นวิธีการสวิตช์ที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานที่มีความต้องการ การปรับค่าดัชนีการมอดูเลต ดังเช่น การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า อีกทั้งเทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบ SPWM



(ก) ขนาดแรงดันเอาต์พุต



(ข) ผลรวมฮาร์มอนิก

รูปที่ 7 ขนาดแรงดันเอาต์พุตและผลรวมฮาร์มอนิกระหว่างเทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM และ SPWM

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Lewicki, C. Odeh, and M. Morawiec, “Space vector pulse width modulation strategy for multilevel cascaded H-bridge inverter with dc-link voltage balancing ability,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 2, pp. 1275–1283, 2023.

[2] M. M. Rahman, S. Hossain, and S. Rezwan, “Seven-level cascaded H-bridge inverter and fault-tolerant control strategy,” *2nd Int. Conf. Innovation in Engineering and Technology*, 2019.

[3] P. Udakhe, D. Atkar, S. Chiriki, and V. B. Borghate, “Comparison of different types of SPWM techniques for three phase seven level cascaded H-bridge inverter,” *IEEE 1st Int. Conf. Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, 2016.

[4] H. Yao, Y. Yan, T. Shi, G. Zhang, Z. Wang, and C. Xia, “A novel SVPWM scheme for field-oriented vector-controlled PMSM drive system fed by cascaded H-bridge inverter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 8, pp. 8988 - 9000, 2021.

[5] B. Wu and M. Narimani, “High-power converters and AC drives,” in IEEE press series on power engineering, 2nd ed.: Jonh Wiley & Sons, 2017, ch. 7, pp. 119 - 141.