

การศึกษาการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบผสม ที่มีการสวิตช์แบบนุ่มนวลโดยใช้ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง

A Study of Adjusting Output Power of Hybride Full – Bridge ZVZCS DC-DC Converter Using a DC Blocking Capacitor

วาทัญญู มีศรีสุข¹ นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร¹ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร watanyu@mut.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสมซึ่งใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับสำหรับสวิตช์กึ่งหน้าและวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับสำหรับสวิตช์กึ่งหลัง โดยได้ทำการศึกษาวิธีการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรและแสดงสมการการหาลำดับกำลังไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับค่าดีวีไอที่เกิดสวิตช์ช่วงนอกของสวิตช์กึ่งหน้าและค่ามุมเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณขับสวิตช์กึ่งหน้าและสวิตช์กึ่งหลัง โดยวงจรดังกล่าวได้ถูกออกแบบ สร้างและทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าสามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้สองวิธี ได้แก่การปรับดีวีไอที่เกิดสวิตช์และมุมเลื่อนเฟสดังกล่าวข้างต้น นอกจากนี้สวิตช์ทุกตัวในวงจรยังสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบนุ่มนวลโดยอาศัยตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงและตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง โดยมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1055 วัตต์และมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 92.8 %

คำสำคัญ: วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสม การสวิตช์แบบนุ่มนวล มุมเลื่อนเฟส

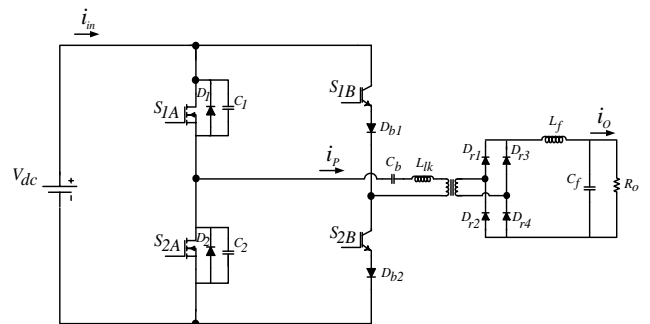
Abstract

This paper presents a study of adjusting the output power of a Hybride DC-DC converter by using a three-level inverter as a leading branch and a two-level inverter for a lagging branch. The methods for adjusting the output power of the Hybride converter are realized and the output power equation which depends on the duty cycle of the outer switches of the leading branch and the phase-shift angle between the gate signals of switches of leading branch and lagging branch is illustrated in this paper. This converter is designed, built and tested in laboratory. It is found that the output power of converter can be varied by adjusting the duty cycle and the phase-shift angle as mentioned above. In addition, all switches in circuit can achieve the soft switching condition by using the leakage inductance of high frequency transformer and a DC blocking capacitor. The converter can provide the rated power of 1055 W and the maximum efficiency is 92.8 %.

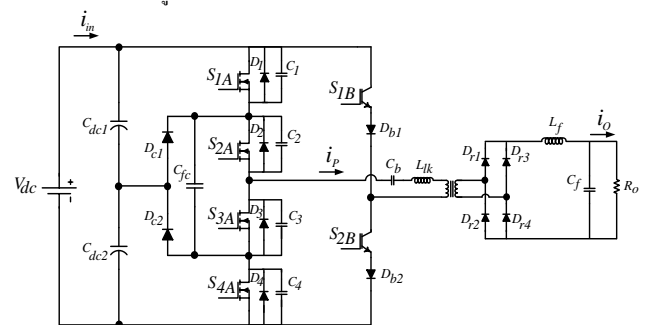
Keywords: Hybride converter, soft switching, phase-shift angle

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter) เช่นวงจรแปลงผันแบบทอน (Buck converter) วงจรแปลงผันแบบทบ (Boost converter) หรือแม้กระทั่งวงจรแบบกึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์ (Half and Full – Bridge converter) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์ (Switching power supply) เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ (Battery charger) เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอเทคนิคที่เรียกว่าการสวิตช์แบบนุ่มนวล (Soft - switching) ได้แก่การทำงานแบบแรงดันศูนย์ (ZVS) และการทำงานกระแสศูนย์ (ZCS) [1] ซึ่งจะสามารถช่วยลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสวิตช์ (Switching losses) และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์เทคนิคดังกล่าวถูกนำมาใช้กับวงจรแบบเต็มบริดจ์ซึ่งถูกแสดงดังในรูปที่ 1 โดยวงจรดังกล่าวประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ซึ่งประกอบไปด้วย สวิตช์ 4 ตัว

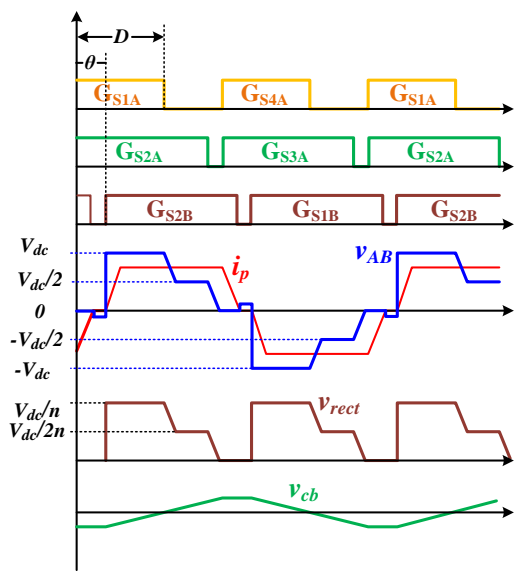


รูปที่ 1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์



รูปที่ 2 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสม [2]

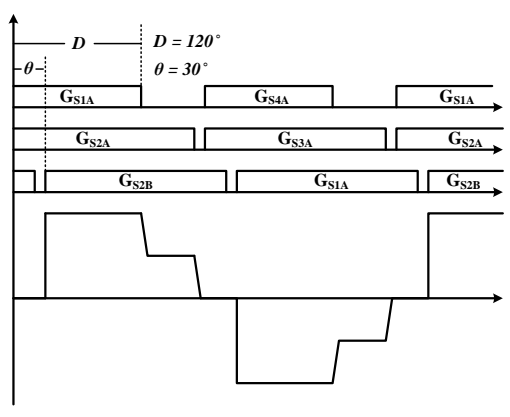
โดยสวิตช์กึ่งหน้า (S1A และ S2A) ใช้ MOSFET ในการสวิตช์ ส่วนสวิตช์กึ่งหลัง (S1B และ S2B) ใช้ IGBT ในการสวิตช์โดยมีไดโอดบล็อกลักต่อนุกรมอยู่กับ IGBT แต่ละตัวเพื่อป้องกันความเสียหายซึ่งเกิดจากแรงดันย้อนกลับ (Reverse voltage) ด้านออกของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์มีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต่ออยู่เพื่อใช้ในการลดระดับแรงดันลง โดยฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงมีตัวเก็บประจุล่อลิ่ง (C_p) ต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk}) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทำให้เกิดการทำงานแบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ (ZVZCS) แม้ว่าวงจรดังกล่าวจะสามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพที่สูง แต่ก็ยังคงพบปัญหาบางประการ นั่นคือ แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าสูงเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสวิตช์กึ่งหน้าซึ่งใช้ MOSFET ในการสวิตช์ ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถทนแรงดันได้เพียงประมาณ 300 – 600 โวลต์เท่านั้น ซึ่งต่างจากสวิตช์ IGBT ซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถทนพิกัดแรงดันได้ถึงประมาณ 1200 โวลต์ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสม [2] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยมีข้อแตกต่างจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ในรูปที่ 1 คือ สวิตช์กึ่งหน้าจะใช้วงจรถึงอินเวอร์เตอร์แบบ สามระดับ โดยประกอบไปด้วยสวิตช์ MOSFET จำนวน 4 ตัว (S1A - S4A) และจะมีตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันจำนวน 2 ตัวซึ่งต่ออนุกรมกัน (C_{dc1} และ C_{dc2}) ถูกต่อขนานกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อแบ่งแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแบบสามระดับ โดยส่วนประกอบอื่นๆของวงจรมีลักษณะเหมือนกันกับวงจรในรูปที่ 1 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวน 2 ตัว จึงทำให้การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์แบบผสมด้วยสัญญาณ PWM มีความซับซ้อนและมีความยืดหยุ่นมากขึ้นทำให้มีความน่าสนใจต่อการศึกษา ดังนั้นในบทความนี้จะได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์แบบผสมซึ่งจะทำให้สามารถทราบพฤติกรรมของการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว



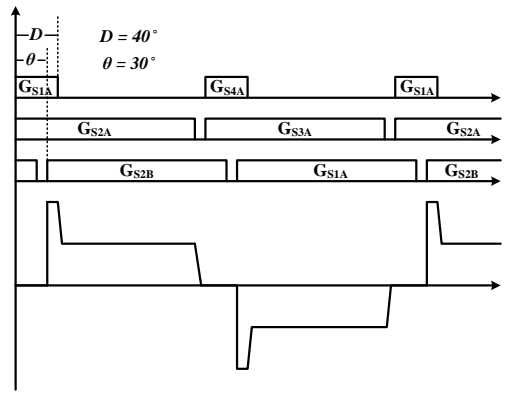
รูปที่ 3 รูปคลื่นการทำงานของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์แบบผสม

2. การปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์แบบผสม

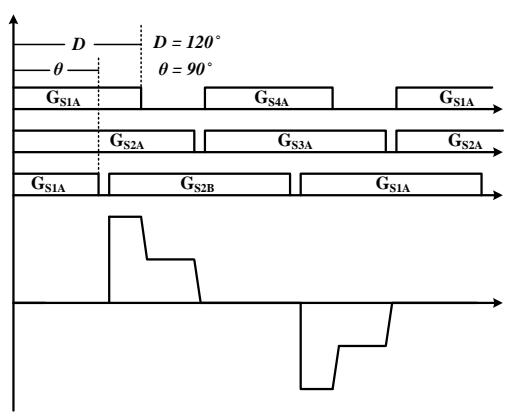
จากรูปคลื่นการทำงานของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์แบบผสมดังรูปที่ 3 พบว่าการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่หนึ่งคือการปรับดิวิตซ์ไชเกิ้ลของสวิตช์วงนอก (S1A และ S4A) วิธีที่สองคือการปรับมุมเลื่อนเฟสระหว่างสวิตช์กึ่งหน้าและสวิตช์กึ่งหลัง โดยทั้งสองวิธีนี้จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของวงจรถึงอินเวอร์เตอร์มีการปรับกำลังไฟฟ้าทั้งสองวิธีสามารถแสดงได้ดังนี้



(ก) เริ่มตั้งแต่ D เท่ากับ 120 องศา และ θ เท่ากับ 30 องศา



(ข) เมื่อเปลี่ยน D ให้เป็น 40 องศาและคงที่ θ ไว้เท่ากับ 30 องศา



(ค) เมื่อเปลี่ยน θ ให้เป็น 90 องศาและคงที่ D ไว้เท่ากับ 120 องศา

รูปที่ 4 ผลการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นแรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนค่า D และ θ

2.1 กรณีปรับคัตวี่ไซเกิลสวิตช์วงนอกของสวิตช์กึ่งหน้า

การปรับคัตวี่ไซเกิลของสวิตช์วงนอกของสวิตช์กึ่งหน้าจะส่งผลให้เนื้อแรงดันไฟฟ้าด้านออกส่วนยอดของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นเปลี่ยนแปลงไปยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้มุมเลื่อนเฟสระหว่างสวิตช์กึ่งหน้าและสวิตช์กึ่งหลังมีค่าเท่ากับ 30 องศา และเมื่อทำการปรับคัตวี่ไซเกิลให้มีค่าเท่ากับ 40 องศา และ 120 องศา ตามลำดับซึ่งจะพบว่า รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์นั้นมีค่าน้อยลงตามลำดับ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ซึ่งจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรมีค่าน้อยลงตามไปด้วย

2.2 กรณีปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณ PWM ระหว่างสวิตช์กึ่งหน้าและสวิตช์กึ่งหลัง

การปรับมุมเลื่อนเฟสจะส่งผลให้เนื้อแรงดันไฟฟ้าส่วนฐานของวงจรมีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยเมื่อกำหนดให้คัตวี่ไซเกิลของสวิตช์กึ่งหน้ามีค่าเท่ากับ 120 องศา และเมื่อทำการเปลี่ยนค่ามุมเลื่อนเฟสสัญญาณ PWM ระหว่างสวิตช์กึ่งหน้าและสวิตช์กึ่งหลังของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 30 และ 90 องศา ตามลำดับซึ่งจะพบว่า รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์นั้นมีค่าน้อยลงตามลำดับดังแสดงได้ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ซึ่งจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรมีค่าน้อยลงตามไปด้วยเช่นกัน

3. การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจร

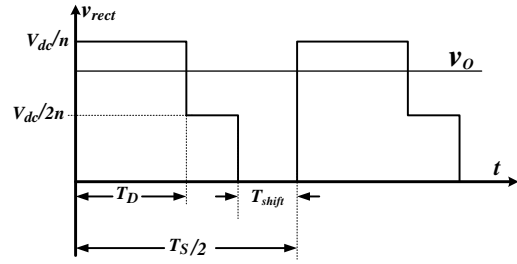
การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสมสามารถกระทำได้โดยพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจร เริ่มจากพิจารณาที่รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะถูกปรับลดระดับของแรงดันลงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงซึ่งมีอัตราส่วนจำนวนรอบเท่ากับ $n:1$ จากนั้นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านทฤษฎีของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะถูกเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสด้านออกซึ่งจะทำให้รูปคลื่นดังแสดงได้ดังรูปที่ 5 เมื่อกำหนดให้ D เป็นคัตวี่ไซเกิลสวิตช์วงนอกของสวิตช์กึ่งหน้า (เพื่อความง่ายต่อการวิเคราะห์ที่กำหนดให้มีหน่วยเป็นองศา) และ θ เป็นค่ามุมเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณสวิตช์กึ่งหน้าและสวิตช์กึ่งหลัง (หน่วยเป็นองศา) ซึ่งจะได้สมการช่วงเวลาของคัตวี่ไซเกิลของสวิตช์วงนอก (T_D) ดังนี้

$$T_D = \frac{D}{360} \cdot T_s \quad (1)$$

และสมการช่วงเวลาของมุมเลื่อนเฟส (T_{shift}) เท่ากับ

$$T_{shift} = \frac{\theta}{360} \cdot T_s \quad (2)$$

จากรูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสมสามารถหาได้จาก



รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงดันทฤษฎีหลังผ่านวงจรเรียงกระแสด้านออก

$$v_o = \frac{[(V_{dc}/n) \cdot T_D] + [(V_{dc}/2n) \cdot (T_s/2) - (T_D + T_{shift})]}{T_s/2} \quad (3)$$

เมื่อทำการนำสมการที่ (1) และ (2) แทนลงในสมการที่ (3) จะได้ว่า

$$v_o = \frac{V_{dc}}{n} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{D}{360} - \frac{\theta}{360} \right], D > \theta \quad (4)$$

และกำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรสามารถหาได้จาก

$$P_o = \frac{\left(\frac{V_{dc}}{n} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{D}{360} - \frac{\theta}{360} \right] \right)^2}{R_o} \quad (5)$$

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจร

แรงดันไฟฟ้าอินพุต (V_{dc})	310 V
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o)	0 – 60 V
ความถี่สวิตช์ (f_s)	50 kHz
ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน (C_{dc1} และ C_{dc2})	2200 μ F
ตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (L_{lk})	26.73 μ H
ตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (C_b)	0.3 μ F
อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงไฟฟ้า	4:1
ตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์ด้านออก (L_f)	33 μ H
ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ด้านออก (C_f)	480 μ F
โหลดความต้านทาน (R_o)	3.2 Ω

4. ผลการทดลอง

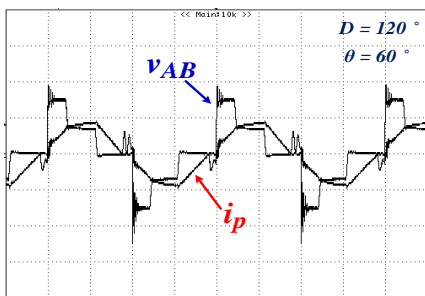
วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสมได้ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อทำการศึกษาทดลองการทำงานในห้องปฏิบัติการโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1 และบันทึกรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคป (YOKOGAWA-DL1620) ได้ผลการทดลองดังนี้

รูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์โดยมีคัตวี่ไซเกิลของสวิตช์วงนอกเท่ากับ 120 องศาและมุมเลื่อนเฟสระหว่างสวิตช์กึ่งหน้ากับสวิตช์กึ่งหลังเท่ากับ 60 องศาพบว่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 822 W เมื่อทำการปรับกำลังไฟฟ้าโดยการปรับคัตวี่ไซเกิลให้มีค่าลดลงเหลือเพียง 90 องศา โดยทำการลดค่ามุมเลื่อนเฟสไว้เท่ากับ 60 องศา พบว่ากำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงเหลือเพียง 631 W ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7 ในกรณีที่ทำการปรับกำลังไฟฟ้าโดยทำการเพิ่มมุมเลื่อนเฟสให้มีค่าเท่ากับ 90 องศาและคงคัตวี่ไซเกิลไว้เท่ากับ 120 องศาจะพบว่า

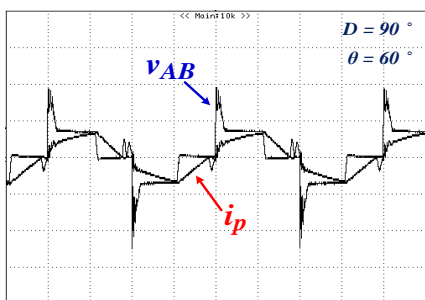
กำลังไฟมีค่าเท่ากับ 618 W โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งลดลงจากกรณีในรูปที่ 6 เช่นกัน รูปที่ 9 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์กึ่งหน้า S1A พบว่าเกิดสภาวะการทำงานแบบแรงดันศูนย์ (ZVS) โดยสังเกตได้จากแรงดันตกคร่อมลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ลักษณะเช่นนี้ทำให้ไม่เกิดความสูญเสียในช่วงเริ่มนำกระแส ซึ่งการสวิตช์แบบ ZVS จะเกิดกับสวิตช์กึ่งหน้า S2A, S3A และ S4A ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้แล้วจะสังเกตได้อีกว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์กึ่งหน้ามีค่าลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเนื่องจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ ทำให้มีความปลอดภัยต่อสวิตช์กึ่งหน้ามากขึ้น รูปที่ 10 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์กึ่งหลัง S1B พบว่าเกิดการ ทำงานแบบกระแสศูนย์ (ZCS) ซึ่งทำให้ไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงหยุดนำกระแสและรูปที่ 11 แสดงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าด้านออกเมื่อทำการปรับค่ามุมเลื่อนเฟสและค่าดีวีดีไอเกิดตามลำดับ

5. สรุป

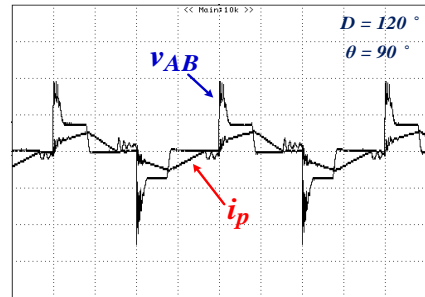
บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบผสมซึ่งสวิตช์ภายในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบนุ่มนวล โดยวงจรดังกล่าวได้ถูกสร้างและทำการทดสอบการทำงานพบว่า การปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรดังกล่าวสามารถกระทำได้ 2 วิธีได้แก่การปรับดีวีดีไอเกิดสวิตช์ช่วงนอกของสวิตช์กึ่งหน้า (S1A และ S2A) และการปรับมุมเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณขับสวิตช์กึ่งหน้าและสวิตช์กึ่งหลัง นอกจากนี้สวิตช์กึ่งหน้าสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์กึ่งหน้ามีค่าเหลือเพียงครึ่งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าทำให้มีความปลอดภัยต่อสวิตช์มากขึ้น ส่วนสวิตช์กึ่งหลังสามารถทำงานด้วยเงื่อนไขกระแสศูนย์ (ZCS) โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 92.8 %



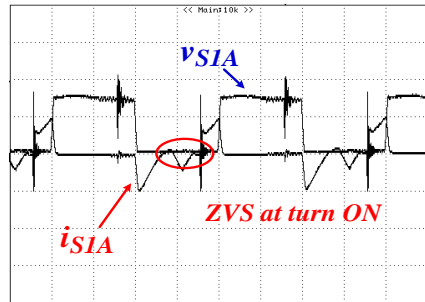
รูปที่ 6 แรงดันและกระแสด้านออกอินเวอร์เตอร์ (200 V/div, 10 A/div และ 5µs/div)



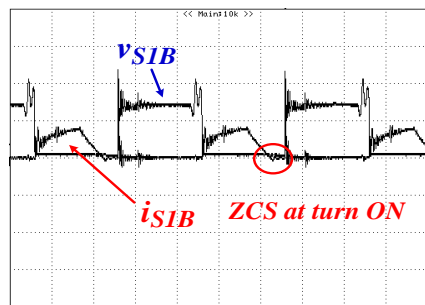
รูปที่ 7 แรงดันและกระแสด้านออกอินเวอร์เตอร์ (200 V/div, 10 A/div และ 5µs/div)



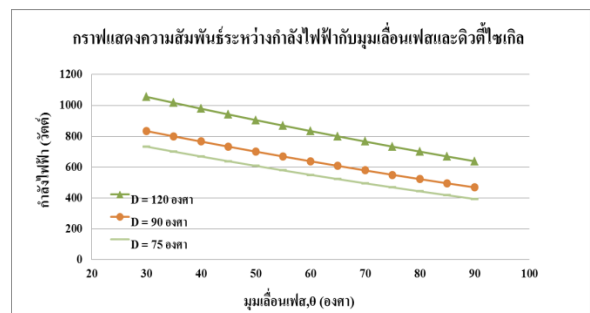
รูปที่ 8 แรงดันและกระแสด้านออกอินเวอร์เตอร์ (200 V/div, 10 A/div และ 5µs/div)



รูปที่ 9 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S1A (100 V/div, 5 A/div และ 5µs/div)



รูปที่ 10 แรงดันและกระแสของสวิตช์ S1B (200 V/div, 10 A/div และ 5 µs/div)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า, มุมเลื่อนเฟสและดีวีดีไอเกิด

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Carr, B. Rowden, and J.C. Balda, "A Three-level Full-bridge Zero-voltage Zero-current Switching Converter with a Simplified Switching Scheme," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 2, 2009, pp. 329-338.
- [2] X. Ruan and B. Li, "Zero-Voltage and Zero-Current-Switching PWM Hybrid Full-Bridge Three-Level Converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no. 5, pp. 612-622, Sep.2001.