

การพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเต็มบริดจ์สามกึ่งที่มีการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้วงจรช่วยแบบแอคทีฟ

Development of a ZVZCS Three-Leg Full-Bridge DC-DC Converter Using an Active Auxiliary Circuit

อภิรักษ์ อินทจักร¹ ธวัชชัย ทองเหลี่ยม² ชิตพิทธิ์ มีศรีสุข^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 669906101@webmail.npru.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเต็มบริดจ์สามกึ่งที่มีการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้วงจรช่วยแบบแอคทีฟ และควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรด้วยวิธีปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพัลส์วิดโมดูเลชัน (พีดับบีวเอ็ม) ระหว่างสวิตช์แต่ละกึ่ง นอกจากนั้นเทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ถูกนำมาใช้เพื่อลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้า วงจรดังกล่าวได้ถูกทำการออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 325 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาออก 60 โวลต์ ความถี่ของการสวิตช์ 50 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าสวิตช์ภายในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบแบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์

คำสำคัญ: เทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ สัญญาณพีดับบีวเอ็มแบบเลื่อนเฟส วงจรเต็มบริดจ์แบบสามกึ่ง

Abstract

This article presents the development of a three-leg full-bridge DC-DC converter that employs a zero-voltage zero-current switching (ZVZCS) technique using an active auxiliary circuit. Power control is achieved by adjusting the phase shift angle of the pulse-width modulation (PWM) signals between the switches of each leg. Additionally, the ZVZCS technique is implemented to reduce switching power losses. The proposed circuit was designed and simulated using computer software, with a power rating of 1 kW, an input voltage of 325 V, an output voltage of 60 V, and a switching frequency of 50 kHz. The results show that the switches in the circuit can operate under ZVZCS conditions.

Keywords: Zero-Voltage Zero-Current Switching Technique, Phase-Shifted PWM Signal, Three-Leg Full-Bridge Converter

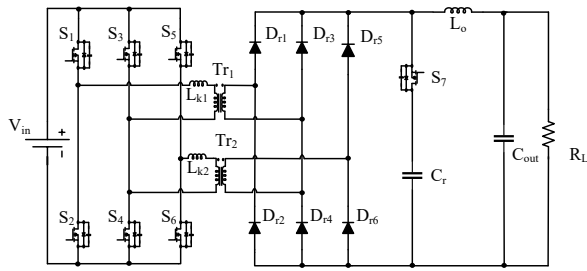
1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC – DC Converter) ถูกนำไปออกแบบใช้งานจำนวนมาก วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าง่ายๆ มีปัญหาที่ความสำคัญเรื่องกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียอันเนื่องมาจากการสวิตช์ (Switching losses) โดยเฉพาะงานที่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูง ๆ เช่น งานระบบขับเคลื่อนหรือแหล่งพลังงานในรถไฟฟ้างานจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดใหญ่ การแปลงผันระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น งานที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง ๆ มีความสูญเสียกำลังไฟฟ้ามากเนื่องจากการสวิตช์การสูญเสียกำลังไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนสะสมที่อุปกรณ์สวิตช์ ส่งผลให้อายุการใช้งานของสวิตช์สั้นลง และวงจรยังมีประสิทธิภาพลดลงอีกด้วย เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะสวิตช์ งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอเทคนิคการสวิตช์แบบนุ่มนวล (Soft-switching technique) [1-6] และเทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ (Zero-voltage zero-current switching : ZVZCS) [7-10] สามารถลดกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขณะสวิตช์ได้ทั้งขณะเริ่มนำกระแส (Turning-ON) และขณะเริ่มหยุดนำกระแส (Turning-OFF) ซึ่งถูกนำไปใช้ในวงจรแปลงผันแบบกึ่งบริดจ์ (Half – bridge converter) [7] วงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์ (Full – bridge converter) [8, 9] และวงจรแปลงผันแบบหลายระดับ (Multi – level converter) [10] วิธีการทำให้เกิดเทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์นั้นยังสามารถแบ่งออกหลัก ๆ ได้แก่ การใช้วงจรช่วยแบบพาสซีฟ (Passive auxiliary circuit) และวงจรช่วยแบบแอคทีฟ (Active auxiliary circuit) [2, 4] ซึ่งจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

งานวิจัยนี้เสนอการใช้เทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้วงจรช่วยแบบแอคทีฟมาพัฒนางจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเต็มบริดจ์สามกึ่งโดยนำสวิตช์ช่วยต่อเข้ากับขั้วขาออกของวงจร บทความนี้กล่าวถึงลักษณะของวงจรที่ได้ทำการนำเสนอ การวิเคราะห์การทำงานวงจรและผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรตามแนวคิดที่ได้เสนอข้างต้น

2. วงจรที่ได้ทำการนำเสนอและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรที่ได้ทำการนำเสนอ



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
เต็มบริดจ์ที่นำเสนอ

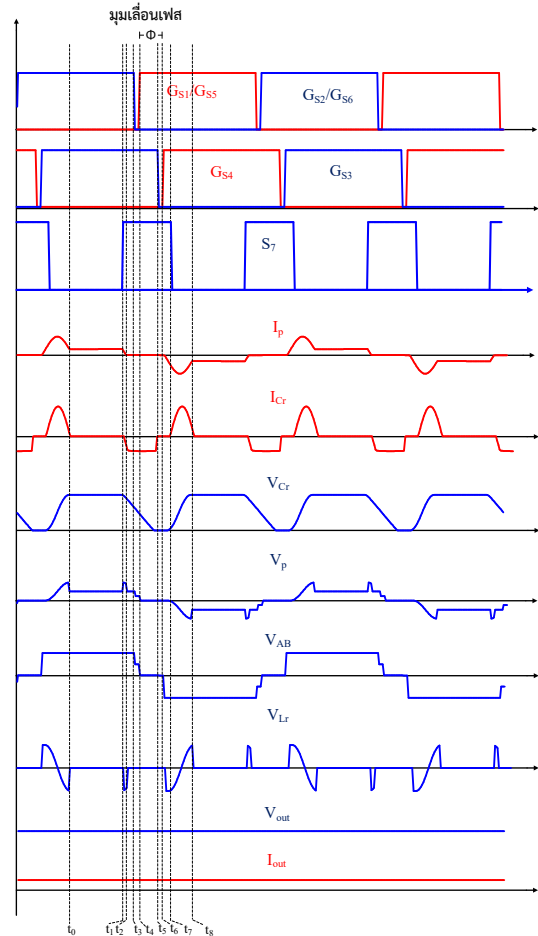
รูปที่ 1 แสดงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเต็มบริดจ์สามกึ่งที่มีการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้วงจรช่วยแบบแอคทีฟที่นำเสนอ วงจรมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า (V_{in}) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มบริดจ์มีสวิตช์ 3 กิ่ง (กิ่ง A, B และ C) แต่ละกิ่งจะมีสวิตช์ MOSFET (MOSFET) 2 ตัว ($S_1 - S_6$) และขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์จะถูกต้องเข้ากับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจำนวน 2 ตัว (Tr_1 และ Tr_2) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าลง ด้านทุติยภูมิจะถูกต่อวงจรเรียงกระแสแบบสามกึ่ง ($D_{r1} - D_{r6}$) เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงกลับมาเป็นกระแสตรงอีกครั้ง ด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสแบบสามกึ่งจะถูกต้องเข้ากับวงจรช่วยแบบแอคทีฟซึ่งประกอบไปด้วยสวิตช์ช่วย (S_7) ที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุช่วย (C_r) วงจรช่วยแบบแอคทีฟนี้จะช่วยให้สวิตช์หลักสามารถทำงานภายใต้เงื่อนไขสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยอาศัยหลักการของวงจรเรโซแนนซ์แบบแอลซีระหว่างตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง นอกจากนี้ แรงดันขาออกของวงจรเรียงกระแสแบบสามกึ่งยังถูกต้องกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสองแบบแอลซี (L_{out} และ C_{out}) เพื่อกรองให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเรียบ และแรงดันขาออกถูกจ่ายไปยังโหลดตัวต้านทาน (R_L) ต่อไป

2.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรที่นำเสนอ

การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์นั้นสามารถทำได้โดยการปรับกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ($G_{s1} - G_{s6}$) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นการปรับมุมเฟสระหว่างสวิตช์กึ่งหน้าและกึ่งหลัง ส่งผลให้แรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนแปลงไป และส่งผลกำลังไฟฟ้าของวงจรเปลี่ยนแปลงไปด้วย กำลังไฟฟ้าของวงจรจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณมีค่าเป็นศูนย์

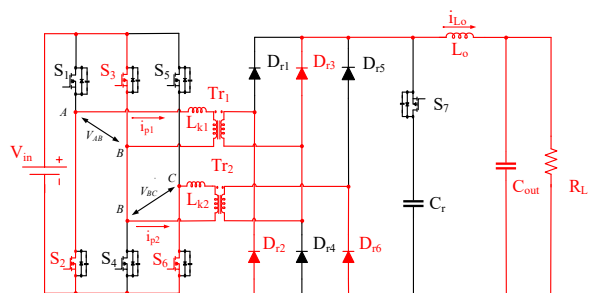
3. โหมดการทำงาน

รูปที่ 2 แสดงสัญญาณซบสวิตช์พีดับเบิลยูเอ็มแบบเลื่อนเฟส (Phase shifted PWM) รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าภายในวงจร จากรูปจะสังเกตเห็นว่าการทำงานในครึ่งไซเคิล วงจรมีโหมดการทำงาน 8 โหมด อย่างไรก็ตาม เพื่อความกระชับในการอธิบาย บทความนี้จะนำเสนอเฉพาะโหมดการทำงานที่เกิดการสวิตช์แรงดันศูนย์กระแสศูนย์ ซึ่งมีรายละเอียดโหมดการทำงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 คลื่นการทำงานของวงจร

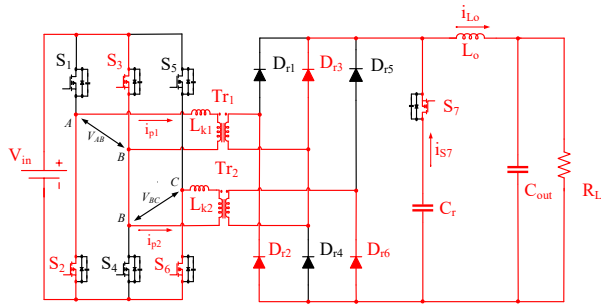
1) โหมดการทำงานที่ 1 [$t_0 - t_1$]



รูปที่ 3 โหมดการทำงานที่ 1 [$t_0 - t_1$]

รูปที่ 3 แสดงโหมดการทำงานที่ 1 วงจรมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ S_2 , S_3 และ S_6 โดยกระแสไหลเข้าสู่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง Tr_1 และ Tr_2 ซึ่งมีแรงดันตกคร่อมเกิดขึ้น ขณะเดียวกันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจ่ายกระแสให้กับไดโอดเรียงกระแส Dr_2 , Dr_3 และ Dr_6 ส่งผลให้อุปกรณ์ทุกตัวในวงจรมีกระแสและแรงดันไหลผ่านคงที่ แสดงถึงสภาวะการทำงานที่เสถียรของระบบในช่วงเวลานี้

2) โหมดการทำงานที่ 2 [t_1 - t_2]



รูปที่ 4 โหมดการทำงานที่ 2 [t_1 - t_2]

รูปที่ 4 แสดงโหมดการทำงานที่ 2 วงจรมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ S_2 , S_3 และ S_6 กระแสดังกล่าวไหลเข้าสู่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง Tr_1 และ Tr_2 ขณะที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจ่ายกระแสให้กับไดโอดเรียงกระแส Dr_2 , Dr_3 และ Dr_6 พร้อมกันนั้น สวิตช์ S_7 เริ่มทำงาน ส่งผลให้ตัวเก็บประจุ C_r เกิดการคายประจุออกมา ทำให้กระแส i_p ค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ ส่งผลให้สวิตช์ S_1 , S_4 และ S_5 สามารถเข้าสู่สภาวะสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (ZCS) ได้ในช่วงเวลาภายหลังจากนี้ และเกิดการเรโซแนนซ์ระหว่าง L_{k1} และ L_{k2} กับ C_r ส่งผลให้แรงดันคร่อม L_{k1} และ L_{k2} มีค่าเป็น $V_{in} - NV_{Cr} < 0$ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ i_p ลดลง กระแสและแรงดันของ C_r แสดงได้ตามสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

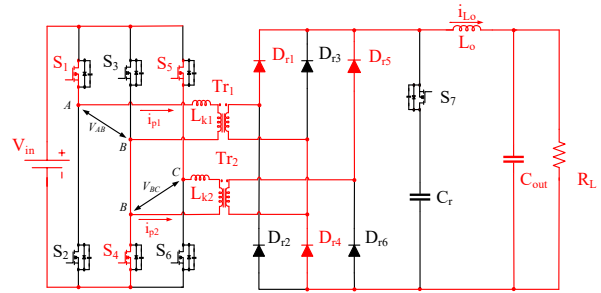
$$i_{Cr}(t) = -\frac{V_{in}}{N \times Z_r} \sin(\omega_r(t-t_2)) \quad (1)$$

$$V_{Cr}(t) = \frac{V_{in}}{N} (1 + \cos(\omega_r(t-t_2))) \quad (2)$$

เมื่อ ω_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์, Z_r คือ ความต้านทานเรโซแนนซ์, N คือ อัตราส่วนการแปลงของหม้อแปลง, i_p คือ กระแสไฟฟ้าหลักของวงจร และ V_{Cr} คือ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

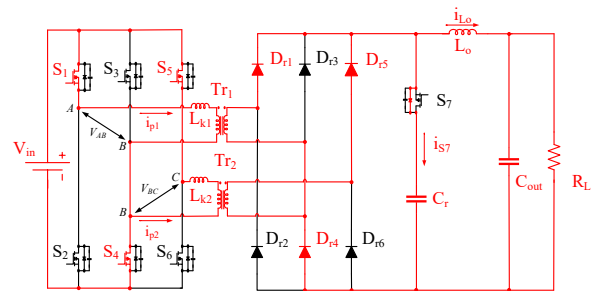
3) โหมดการทำงานที่ 7 [t_6 - t_7]

รูปที่ 5 แสดงโหมดการทำงานที่ 7 วงจรมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ S_1 , S_4 และ S_5 และไหลเข้าสู่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง Tr_1 และ Tr_2 ขณะที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจ่ายกระแสให้กับไดโอดเรียงกระแส Dr_1 , Dr_4 และ Dr_5 พบว่ากระแสไม่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_r ส่งผลให้สวิตช์ S_7 ไม่มีกระแสไหลผ่านตามไปด้วย ซึ่งทำให้สวิตช์ S_2 , S_3 และ S_6 สามารถเข้าสู่โหมดสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) ภายหลังจากช่วงเวลานี้



รูปที่ 5 โหมดการทำงานที่ 7 [t_6 - t_7]

4) โหมดการทำงานที่ 8 [t_7 - t_8]



รูปที่ 6 โหมดการทำงานที่ 8 [t_7 - t_8]

รูปที่ 6 แสดงโหมดการทำงานที่ 8 วงจรมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ S_1 , S_4 และ S_5 กระแสดังกล่าวไหลเข้าสู่ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง Tr_1 และ Tr_2 ขณะที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจ่ายกระแสให้กับไดโอดเรียงกระแส Dr_1 , Dr_4 และ Dr_5 นอกจากนี้ยังพบว่าสวิตช์ S_7 มีกระแสไหลผ่านทางไดโอดในตัวสวิตช์ ซึ่งส่งผลให้ตัวเก็บประจุ C_r เริ่มเกิดการชาร์จประจุขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว

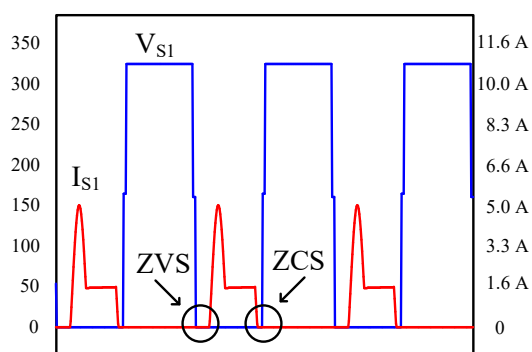
4. ผลการจำลอง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเต็มบริดจ์สามกึ่งที่มีการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้วงจรช่วยแบบแอคทีฟที่ปลูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เพื่อพิสูจน์การทำงานของวงจรตามแนวคิดที่ได้ทำการนำเสนอ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

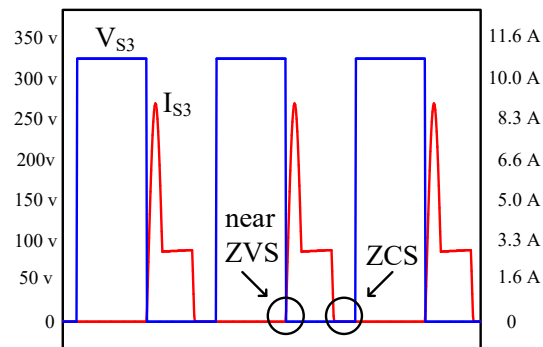
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจร

ตัวแปร	ค่าที่ใช้
V_{in}	325 V
ความถี่สวิตช์	50 kHz
L_{k1} และ L_{k2}	70 μ H
C_r	0.3 μ f
C_{out}	1000 μ f
L_{out}	80 μ H
R_L	3.6 Ohm
อัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	5:1
กำลังไฟฟ้าขาออก (P_{out})	1 kW

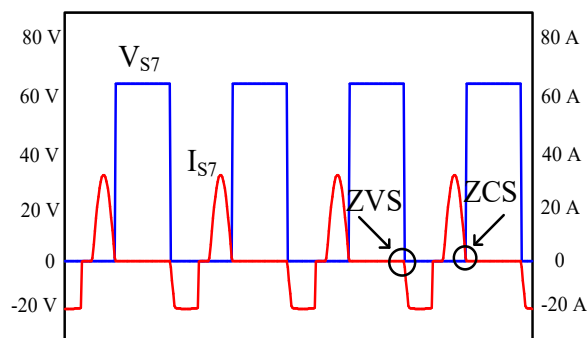
รูปที่ 7 – 9 แสดงผลการจำลองการทำงานของสวิตช์ในวงจรที่นำเสนอ จากผลการจำลองพบว่าสวิตช์ทุกตัวในวงจร ($S_1 - S_6$) สามารถทำงานได้ ภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบนุ่มนวล รูปที่ 7 แสดงคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S_1 เป็นตัวอย่างของรูปคลื่นการทำงานของสวิตช์กึ่ง A และ C สังเกตเห็นว่าวงจรทำงานลักษณะแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ สังเกตได้ว่าในช่วงเริ่มนำกระแสแรงดันตกคร่อมสวิตช์ลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีกระแสไหลผ่าน ส่งผลให้ไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงดังกล่าว ขณะที่ในช่วงเริ่มหยุดนำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์จะลดลงเป็นศูนย์ ก่อนที่สวิตช์จะหยุดนำกระแส ส่งผลให้ไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงดังกล่าวเช่นกัน ลักษณะการทำงานเช่นนี้จะเกิดขึ้นกับสวิตช์ S_1, S_2, S_5 และ S_6 รูปที่ 8 แสดงคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S_3 เป็นตัวอย่างของรูปคลื่นการทำงานของสวิตช์กึ่ง B ซึ่งเป็นกึ่งรวม พบว่าสวิตช์ดังกล่าวมีลักษณะการทำงานเข้าใกล้เงื่อนไขแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ กล่าวคือในช่วงเริ่มนำกระแสมีลักษณะใกล้เคียงการทำงานแบบแรงดันศูนย์ (Near ZVS) และในช่วงเริ่มหยุดนำกระแสมีลักษณะการทำงานแบบกระแสศูนย์ แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 9 แสดงคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าของสวิตช์ช่วย S_7 ซึ่งจะพบว่าเกิดการการทำงานแบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์เช่นเดียวกัน จากสภาวะเรโซแนนซ์ระหว่าง L_{lk1} และ L_{lk2} กับ C_r รูปที่ 10 แสดงคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง Tr_1 ซึ่งจะพบลักษณะการทำงานที่สภาวะเรโซแนนซ์ในช่วงแรกของคลื่นกระแสทั้งกระแสฝั่งบวกและลบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเรโซแนนซ์ระหว่าง L_{lk1} และ L_{lk2} กับ C_r เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณารูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าของตัวเก็บประจุช่วย C_r ก็จะพบสภาวะเรโซแนนซ์เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 11



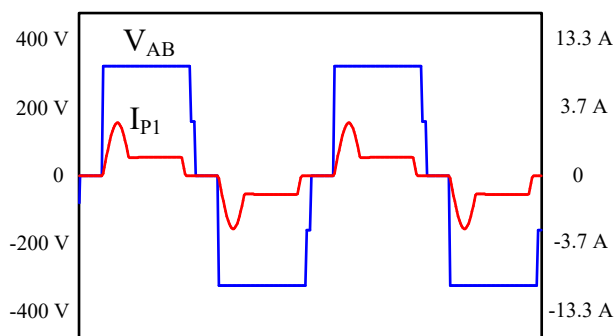
รูปที่ 7 คลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S_1



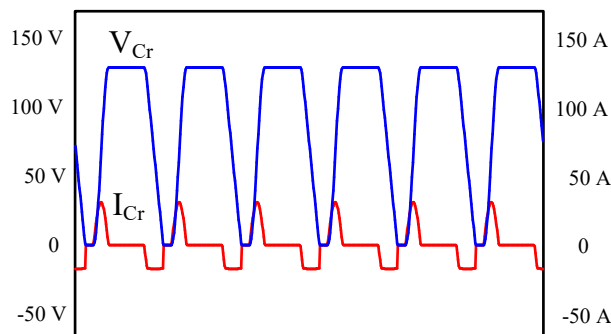
รูปที่ 8 คลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ S_3



รูปที่ 9 คลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ช่วย (S_7)



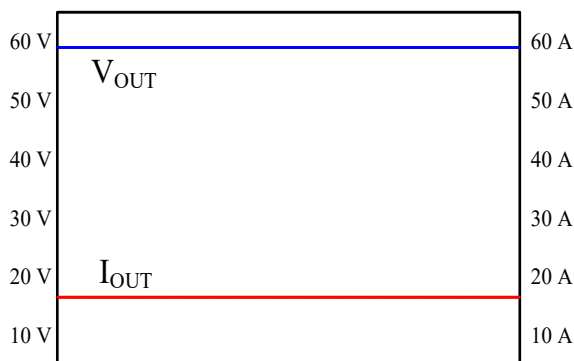
รูปที่ 10 คลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง



รูปที่ 11 คลื่นแรงดันและกระแสของตัวเก็บประจุ C_r

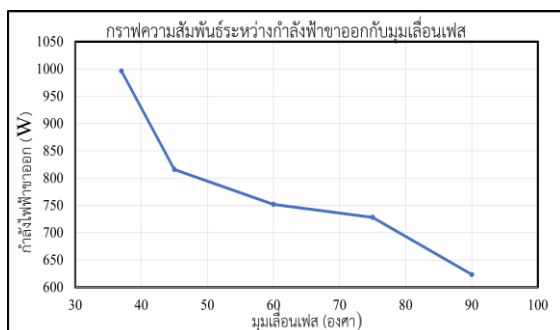


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟขาออก



รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านขาออกของวงจร

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟขาออก ซึ่งได้จากการจำลองการทำงานของพิกัดแรงดันขาเข้า 325 โวลต์ แรงดันขาออก 60 โวลต์ และทำการปรับโหลดเพื่อให้ได้กำลังไฟที่ต้องการ จากนั้นทำการวัดกำลังไฟขาเข้าและกำลังไฟขาออกและนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของวงจร โดยจากการจำลองวงจรสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 93.44 % ที่กำลังไฟฟ้า 20 % ของพิกัด รูปที่ 13 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟขาออกของวงจรที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ สังเกตเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ และกระแสมีค่าเท่ากับ 16.67 แอมป์แปร์



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกำลังไฟขาออก

รูปที่ 14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟขาออกกับมุมเลื่อนเฟสด้วยการจำลองการทำงานของวงจรที่มีแรงดันขาเข้า 325 โวลต์ และทำการเปลี่ยนแปลงมุมเลื่อนเฟสจาก 37 องศา และทำการเพิ่มมุมเลื่อนเฟสไปจนมุมเลื่อนเฟสมีค่าเท่ากับ 90 องศา จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับมุมเลื่อนเฟสให้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้วงจรมีกำลังไฟขาออกลดลง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าลดลง ซึ่งการปรับมุมเลื่อนเฟสนี้จะถูกนำมาใช้ในการควบคุมกำลังไฟและแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร

5. สรุปผลการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเต็มบริดจ์สามกึ่งที่มีการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้วงจรช่วยแบบแอคทีฟ วงจรดังกล่าวได้ใช้เทคนิคการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มระหว่างสวิตช์แต่ละกึ่งในการควบคุมกำลังไฟ วงจรที่นำเสนอได้ถูกทำการออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 325 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาออก 60 โวลต์ ความถี่ของการสวิตช์ 50 กิโลเฮิรตซ์ จากผลการจำลองการทำงานพบว่าสวิตช์ทุกตัวภายในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์กระแสศูนย์ อาศัยการเรโซแนนซ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำร้าวไหลของหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวเก็บประจุช่วย ซึ่งจากการจำลองการทำงานพบว่าวงจรสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 93.44 % ที่กำลังไฟฟ้า 20 % ของพิกัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Liangcai Shu, Wu Chen, Guang Ning and Dajun Ma, "Analysis of Strategy for Achieving Zero-Current Switching in Full-Bridge Converters," (2018) IEEE transaction on industrial electronics. 65(7),5509-5517
- [2] Liangcai Shu, Wu Chen, Guang Ning and Dajun Ma, "A Novel ZCS Full-Bridge PWM Converter with Simple Auxiliary Circuits," (2018) IEEE transaction on industrial electronics. 978-1-5386-6054-6/18
- [3] Anirban Pal and Kaushik Basu, "A Zero-Current-Switched PWM Full Bridge DC-DC Converter," (2019) IEEE transaction on industrial electronics 978-1-7281-0395-2/19
- [4] Enhui Chu, Ping Lu, Chang Xu, and Jianqun Bao, "Zero-Current-Switching in Full-Bridge DC-DC Converters Based on Activity Auxiliary Circuit," (2019) Journal of Power Electronics, Vol. 19, No. 2, pp. 353-362
- [5] Xin Zhang, and Xinbo Ruan., "A ZCS Full-Bridge Converter Without Voltage Overstress on the Switches," (2010) IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 3, March 2010



- [6] Marek Pastor, Milan Lacko., Jaroslav Dudrik and Adrian Marcinek, “Soft-Switching Full-Bridge DC-DC Converter with Energy Recovery Capacitor Snubber,” (2023) *Energies* 2023, 16, 1591
- [7] Haoyu Li and Lei Zhao, “A Dual Half-Bridge Phase Shifted Converter With Wide ZVZCS Switching Range,” (2017) *transactions on power electronics*, digital object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3021747
- [8] In-Ho Cho, and Gun-Woo Moon, “A Zero-Voltage and Zero-Current Switching Full Bridge Converter using an Auxiliary Circuit,” (2012) *IEEE transaction on industrial electronics* 978-1-4673-2421-2
- [9] A. Jangwanitlert, “Analysis of a Wide Load Variation of ZVZCS Phase Shifted PWM Full-Bridge DC-DC Converter,” (2014) *IEEE transaction on industrial electronics* 978-1-4799-3174-3
- [10] Enhui Chu, Xutong Hou, and Huaguang Zhang, “Novel Zero-voltage and Zero-current Switching (ZVZCS) PWM Three-level DC/DC Converter Using Output Coupled Inductor,” (2013) *IEEE* 2013