

การวิเคราะห์ความถี่สวิตช์ในสถานะ ZVS และ NON-ZVS ในวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วย duty cycle ที่มีผลของตัวเก็บประจุแคปซิเตอร์ของ MOSFET สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

Analysis of ZVS and NON-ZVS Switching Frequencies for a Duty Cycle Control Resonant Inverter with MOSFET Drain-Source Capacitance for the Load of High-Frequency Induction Heating

ยงยุทธ นารายณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ถ.เพชรเกษม ภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160

โทร. 02-4570068 ต่อ 123 โทรสาร. 02-4573982 Email : yongyuth_nar@yahoo.com

วิริยะ พิเชฐจำเริญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ถ. ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 02-7373000 ต่อ 3516 Email : kpviyria@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการคำนวณวิเคราะห์ความถี่สวิตช์ของวงจรที่มีการสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และการสวิตช์ขณะแรงดันไม่เป็นศูนย์ (NON-ZVS) ในวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วย duty cycle ที่มีการพิจารณาผลของตัวเก็บประจุแคปซิเตอร์ของ MOSFET สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยเริ่มจากการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรต่างๆ อย่างละเอียดทั้งภายใต้บริเวณย่านการทำงานของ ZVS และ NON-ZVS ซึ่งจะได้สมการแรงดันและกระแสต่างๆ ของโหมดการทำงานเหล่านี้สำหรับการใช้ในการคำนวณลักษณะคลื่นตามจุดต่างๆ ของวงจรที่นำเสนอโดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ ผลการคำนวณของลักษณะคลื่นเหล่านี้สามารถนำไปสู่การพิจารณาค่าความถี่สวิตช์วิกฤติ $f_{s,c}$ ซึ่งจะนำมาใช้ในการพิจารณาค่าความถี่สวิตช์ในสถานะ ZVS และความถี่สวิตช์ในสถานะ NON-ZVS ผลการคำนวณทางทฤษฎีที่นำเสนอนี้ยังได้มีการยืนยันความถูกต้องด้วยผลการทดลองโดยใช้เครื่องต้นแบบขนาดพิกัด 3 kW ที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ, เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์, สวิตช์แรงดันศูนย์, สวิตช์แรงดันไม่ศูนย์

Abstract

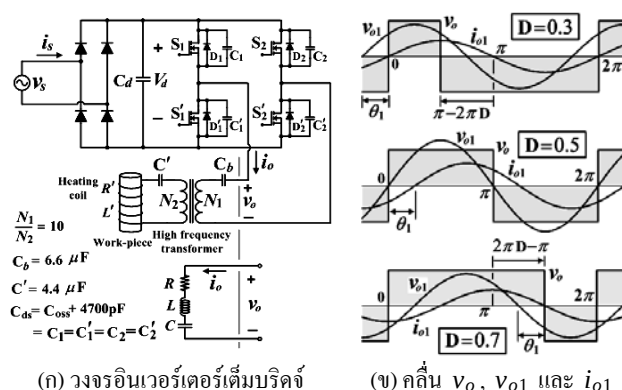
This paper presents the analysis of zero voltage switching (ZVS) frequency and non-zero voltage switching (NON-ZVS) frequency for a duty cycle control resonant inverter with MOSFET drain-source capacitance for the load of high-frequency induction heating. A variety of modes of circuit operation both under the operating regions of ZVS and NON-ZVS are first analyzed in details. Various voltage and current equations of these modes of circuit operation are then obtained and used for calculation of the waveforms in various parts of the proposed circuit using MATLAB program. The calculated results can lead to the

consideration of critical switching frequency which is used to determine ZVS and NON-ZVS operating frequencies. The proposed theoretical results are also verified by experimental ones, using a prototype test set rated at 3 kW in the laboratory.

Keywords : induction heating, resonant inverter, ZVS, NON-ZVS

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์จ่ายโหลดเรโซแนนท์อนุกรมของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 1(ก) มีหลายวิธีในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต วิธีการหนึ่งที่นิยมและทำได้ง่ายคือการควบคุมด้วย duty cycle (D) ของคลื่นแรงดันเอาต์พุต (V_o) [3] ซึ่งมีคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 1(ข) โดยที่ค่า duty cycle นี้สามารถปรับได้ 2 ย่านที่สมมาตรกันคือย่านจาก 0.5 ถึง 0 และย่านจาก 0.5 ถึง 1 ทำให้ขนาดขององค์ประกอบหลักมูลของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตมีค่าสูงสุดที่ค่า $D=0.5$ และมีค่าลดลงเมื่อปรับค่า D ให้เข้าใกล้ 0 หรือเข้าใกล้ 1 ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าสูงสุดเมื่อปรับค่า $D=0.5$ และมีค่าลดลงเมื่อปรับค่า D เข้าใกล้ 0 หรือเข้าใกล้ 1



รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ควบคุมด้วย duty cycle ที่มีการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ

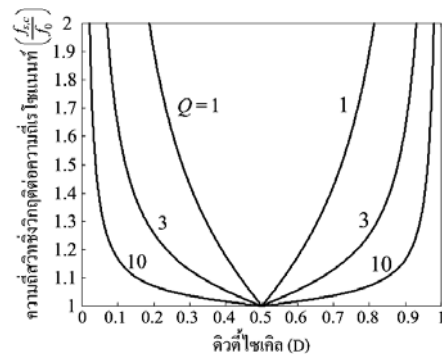
อย่างไรก็ตามการปรับค่าดีไอเซลล์ทั้งสองข้างดังกล่าวข้างต้นนี้ จะต้องควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS เสมอเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อสวิตช์ แต่เมื่อปรับค่าดีไอเซลล์ให้ลดลงจาก 0.5 ($D < 0.5$) จะทำให้อุณหภูมิประกอบหลักมูลของคลื่นแรงดันเอาต์พุต (v_{o1}) นำหน้าขอบหน้าครึ่งไซเคลบวคของคลื่นแรงดันเอาต์พุต (v_o) มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุต (i_{o1}) วิ่งเข้าสู่ขอบหน้าครึ่งไซเคลบวคของคลื่นแรงดัน v_o มากขึ้น ดังแสดงด้วยรูปบนของรูปที่ 1(ข) จนทำให้กระแส i_{o1} นำหน้าขอบหน้าของคลื่น v_o ในที่สุด ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS ในทำนองเดียวกันเมื่อปรับค่าดีไอเซลล์ไปในทิศตรงข้าม ($D > 0.5$) ก็จะทำให้กระแส i_{o1} นำหน้าขอบหน้าครึ่งไซเคลบวคของคลื่น v_o และส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS ได้เช่นกันดังแสดงด้วยรูปล่างของรูปที่ 1(ข) ดังนั้นเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ตลอดทั้งสองช่วงของการควบคุมด้วยดีไอเซลล์จะต้องควบคุมไม่ให้คลื่น i_{o1} นำหน้าขอบหน้าของคลื่น v_o ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับเพิ่มความถี่สวิตช์ (f_s) ขึ้นเล็กน้อย โดยที่ความถี่สวิตช์ค่าต่ำสุดก่อนที่คลื่นกระแส i_{o1} จะนำหน้าขอบหน้าของคลื่น v_o ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าความถี่สวิตช์วิกฤติ ($f_{s,c}$) สามารถพิจารณาได้จากคลื่นแรงดันและกระแสรูปบนและรูปล่างของรูปที่ 1(ข) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สวิตช์วิกฤติกับค่าดีไอเซลล์ดังแสดงใน (1) และสามารถแสดงด้วยเส้นกราฟในรูปที่ 2

$$\frac{f_{s,c}}{f_0} = \frac{\tan\left(\left|\left(\pi - 2\pi D\right)/2\right|\right)}{2Q} + \sqrt{1 + \left[\frac{\tan\left(\left|\left(\pi - 2\pi D\right)/2\right|\right)}{2Q}\right]^2} \quad (1)$$

โดยที่ f_0 คือค่าความถี่เรโซแนนท์ของวงจรซึ่งมีค่าเท่ากับ $1/(2\pi\sqrt{LC})$ และ Q คือค่า quality factor ของวงจรซึ่งมีค่าเท่ากับ $(2\pi f_0 L)/R$ หรือเท่ากับ $1/(2\pi f_0 RC)$

การทำงานของวงจรที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกรณีที่ไม่นำถึงถึงผลของตัวเก็บประจุแคปซอร์ (C_{ds}) ของมอสเฟต ในระหว่างการปรับค่าดีไอเซลล์จึงสามารถทำนายได้ว่าการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ของอินเวอร์เตอร์จะเกิดขึ้นเสมอถ้ามีการปรับเพิ่มความถี่สวิตช์ให้มีค่าสูงขึ้นพอที่จะทำให้มุมเฟสของกระแสเอาต์พุตไม่นำหน้าทั้งขอบหน้าครึ่งไซเคลบวคและลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุต [1],[2] แต่ในทางปฏิบัติเมื่อใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์จะพบว่า C_{ds} ปรากฏอยู่ระหว่างแคปซอร์ทำให้การทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ของอินเวอร์เตอร์อาจจะไม่เกิดขึ้นถึงแม้ว่าได้ปรับเพิ่มความถี่สวิตช์จนกระทั่งมุมเฟสของกระแสเอาต์พุตไม่นำหน้าทั้งขอบหน้าครึ่งไซเคลบวคและลบของคลื่นแรงดันเอาต์พุตแล้วก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไหลคมีค่าไม่มากพอที่จะดีสชาร์จตัวเก็บประจุ C_{ds} ได้เสร็จสมบูรณ์ก่อนที่จะสวิตช์ครั้งถัดไป [1],[2] ดังนั้นการที่จะยังคงรักษาสภาวะการทำงานของวงจรให้อยู่ภายใต้สภาวะ ZVS ได้นั้นจะต้องปรับเพิ่มความถี่

สวิตช์ให้สูงขึ้นไปจากเดิมอีก โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความถี่สวิตช์ที่ทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ตลอดช่วงการปรับค่าดีไอเซลล์โดยนำผลของ C_{ds} รวมเข้ามาในการพิจารณาด้วย

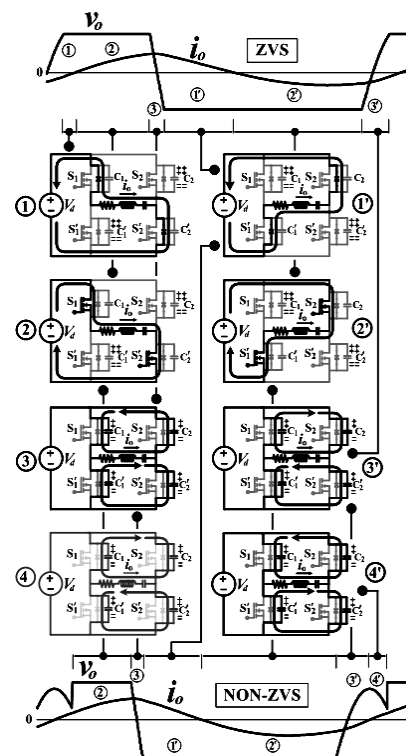


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $f_{s,c}/f_0$ และ D

2. การวิเคราะห์วงจรพร้อมคลื่นการคำนวณและทดลอง

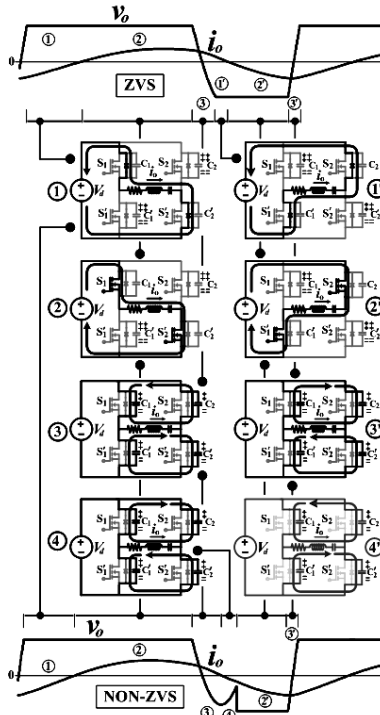
2.1 โหมดการทำงานของวงจร

วงจรซึ่งแสดงการทำงานในโหมดต่าง ๆ ในหนึ่งไซเคลของแรงดันเอาต์พุตขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS สำหรับกรณี $D < 0.5$ นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งมีลำดับโหมดการทำงานคือ ①②③④⑤ สำหรับกรณี ZVS และ ②③④⑤⑥ สำหรับกรณี NON-ZVS ส่วนในรูปที่ 4 แสดงโหมดการทำงานสำหรับกรณี $D > 0.5$ มีลำดับโหมดการทำงานคือ ①②③④⑤ สำหรับกรณี ZVS และ ①②③④⑤⑥ สำหรับกรณี NON-ZVS



รูปที่ 3 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS

สำหรับกรณี $D < 0.5$ ($D = 0.35$)



รูปที่ 4 วงจรแสดงการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS สำหรับกรณี $D > 0.5$ ($D = 0.65$)

2.2 สมการแรงดันและกระแสในแต่ละโหมดการทำงาน

จากวงจรการทำงานในแต่ละโหมดตลอดช่วงหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้แสดงในรูปที่ 3 และ 4 นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o, i_o ได้ดังสมการ (2) จากโหมด ①② สมการ (3) จากโหมด ③④ สมการ (4) จากโหมด ⑤⑥ และสมการ (5) จากโหมด ⑦⑧

$$\left. \begin{aligned} v_o &= V_d \\ i_o &= e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_1 t + I \cos \omega_1 t \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} v_o &= \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right) \left(\frac{1}{\alpha^2 + \omega_2^2} \right) \left[e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_2 t + B_1 \cos \omega_2 t) + D_1 \right] \\ &\quad + (V_2 - V_1) \\ i_o &= \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_2} \left[\left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V'_1 - V'_2}{2L} - \alpha I \right) \sin \omega_2 t + \omega_2 I \cos \omega_2 t \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} v_o &= -V_d \\ i_o &= e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{-V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_1 t + I \cos \omega_1 t \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} v_o &= \left(\frac{C'_1 + C'_2}{C'_1 C'_2} \right) \left(\frac{1}{\alpha^2 + \omega_2^2} \right) \left[e^{-\alpha t} (A_2 \sin \omega_2 t + B_2 \cos \omega_2 t) + D_2 \right] \\ &\quad + (V'_1 - V'_2) \\ i_o &= \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_2} \left[\left(\frac{-2V - V_1 + V_2 + V'_1 - V'_2}{2L} - \alpha I \right) \sin \omega_2 t + \omega_2 I \cos \omega_2 t \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

โดยที่

V_1, V'_1, V_2 และ V'_2 คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อม C_1, C'_1, C_2

และ C'_2 ตามลำดับ

I คือค่าเริ่มต้นของกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์

V คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2}, \quad \omega_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \frac{1}{2LC_{ds}} \right) - \left(\frac{R}{2L} \right)^2}$$

$$A_1 = \left\{ RC_{ds} (V_1 - V_2 + V'_1 - V'_2) (\alpha^2 + \omega_2^2) - 2LI (\alpha^2 + \omega_2^2) - 2\alpha (V + V_1 - V_2) - \alpha (C_{ds}/C) (V_1 - V_2 + V'_1 - V'_2) - \alpha C_{ds} L (V_1 - V_2 + V'_1 - V'_2) (\alpha^2 + \omega_2^2) \right\} (1/4\omega_2 L)$$

$$B_1 = \left\{ (-C_{ds}/C) (V_1 - V_2 + V'_1 - V'_2) - 2(V + V_1 - V_2) + C_{ds} L (V_1 - V_2 + V'_1 - V'_2) (\alpha^2 + \omega_2^2) \right\} (1/4L)$$

$$D_1 = \left\{ (C_{ds}/C) (V_1 - V_2 + V'_1 + V'_2) + 2(V - V_1 - V_2) \right\} (1/4L)$$

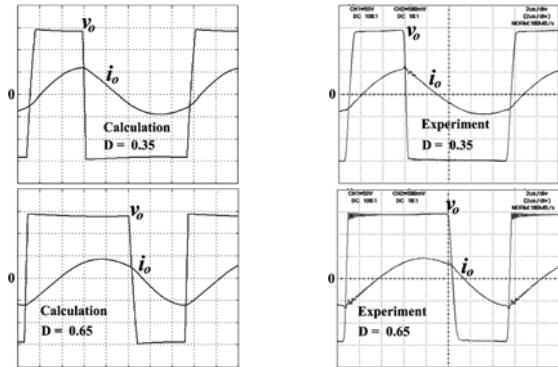
$$A_2 = \left\{ RC_{ds} (V'_2 - V'_1 + V_2 - V_1) (\alpha^2 + \omega_2^2) - 2LI (\alpha^2 + \omega_2^2) - 2\alpha (V + V'_2 - V'_1) - \alpha (C_{ds}/C) (V'_2 - V'_1 + V_2 - V_1) - \alpha C_{ds} L (V'_2 - V'_1 + V_2 - V_1) (\alpha^2 + \omega_2^2) \right\} (1/4\omega_2 L)$$

$$B_2 = \left\{ (-C_{ds}/C) (V'_2 - V'_1 + V_2 - V_1) - 2(V + V'_2 - V'_1) + C_{ds} L (V'_2 - V'_1 + V_2 - V_1) (\alpha^2 + \omega_2^2) \right\} (1/4L)$$

$$D_2 = \left\{ (C_{ds}/C) (V'_2 - V'_1 + V_2 + V_1) + 2(V - V'_2 - V'_1) \right\} (1/4L)$$

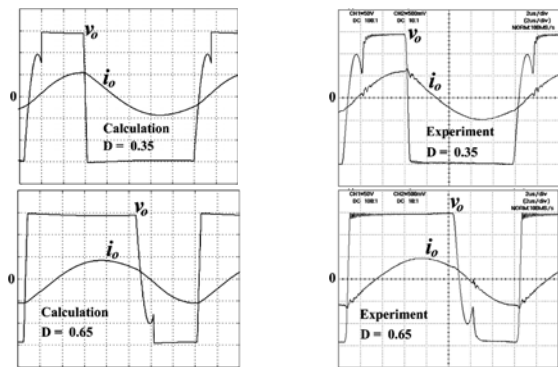
2.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน กระแสจากการคำนวณและการทดลอง

จากสมการ v_o, i_o ในแต่ละโหมดการทำงานใน (2) - (5) สามารถใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณและเขียนคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเหล่านี้ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะคลื่นได้ดังรูปที่ 5 สำหรับกรณีการทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และรูปที่ 6 สำหรับกรณีการทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS พร้อมทั้งได้ยืนยันความถูกต้องของผลการคำนวณด้วยคลื่นจากการทดลองซึ่งแสดงไว้ในรูปเดียวกันของแต่ละกรณี



รูปที่ 5 คลื่น v_o, i_o คำนวณและทดลองขณะวงจรทำงานแบบ ZVS

สเกล : 50 V/Div, 5 A/Div, 2 μ s/Div

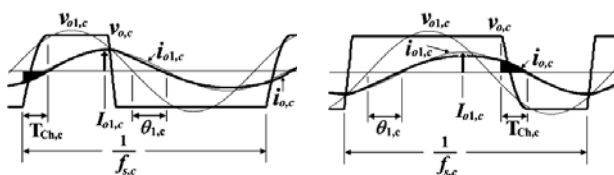


รูปที่ 6 คลื่น v_o, i_o คำนวณและทดลองขณะวงจรทำงานแบบ NON-ZVS

สเกล : 50 V/Div, 5 A/Div, 2 μ s/Div

3. ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อความถี่สวิตชิง ZVS หรือ NON-ZVS

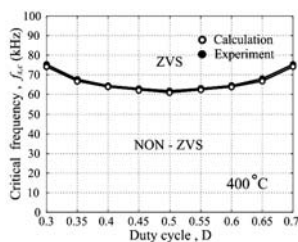
เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ยังทำงานภายใต้สภาวะ ZVS ตลอดย่านการปรับค่าดีวีไอซ์เคลที่มีภาระการบิดเบือนตัวเก็บประจุ C_{ds} ของสวิตช์มอสเฟตจะต้องควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานด้วยความถี่สวิตชิงที่สูงกว่าความถี่สวิตชิงวิกฤติ ($f_{s,c}$) ซึ่งลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ความถี่สวิตชิงวิกฤตินี้แสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยอาศัยคลื่นคำนวณที่จุดวิกฤตินี้จะให้ความถี่สวิตชิงวิกฤติตลอดย่านของการปรับค่าดีวีไอซ์เคล (D) ดังแสดงด้วยเส้นกราฟในรูปที่ 8 พร้อมทั้งได้ยืนยันความถูกต้องด้วยผลการทดลองในกราฟรูปเดียวกัน ทุกจุดบนเส้นกราฟของความถี่สวิตชิงวิกฤตินี้จะมี current-time area ของกระแสเอาต์พุตดังที่แรงภายในคลื่นรูปที่ 7 เท่ากันตลอด ถ้า current-time area นี้เล็กกว่าที่จุดวิกฤติจะทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานใน NON-ZVS ในทางกลับกันถ้า current-time area ใหญ่กว่าที่จุดวิกฤติจะทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะ ZVS โดยที่ขนาดของ current-time area วิกฤตินี้ นอกจาก $f_{s,c}$ แล้วยังขึ้นกับตัวแปรวิกฤติอีก 3 ตัวแปรได้แก่ค่าพิคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุตวิกฤติ ($I_{o1,c}$) ค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูลวิกฤติ ($\theta_{1,c}$) และค่าเวลาการชาร์จประจุ



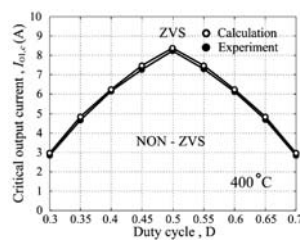
(ก) กรณี $D < 0.5$

(ข) กรณี $D > 0.5$

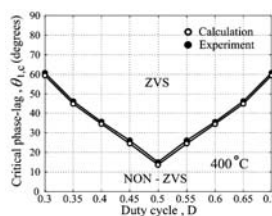
รูปที่ 7 นิยามของตัวแปรวิกฤติ $f_{s,c}$, $I_{o1,c}$, $\theta_{1,c}$ และ $T_{Ch,c}$



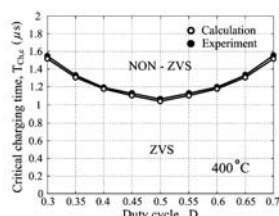
รูปที่ 8 $f_{s,c}$ vs. D



รูปที่ 9 $I_{o1,c}$ vs. D



รูปที่ 10 $\theta_{1,c}$ vs. D



รูปที่ 11 $T_{Ch,c}$ vs. D

วิกฤติ ($T_{Ch,c}$) โดยนิยามของค่าตัวแปรวิกฤติเหล่านี้สามารถกำหนดจากคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตวิกฤติดังแสดงในรูปที่ 7(ก) สำหรับกรณี $D < 0.5$ และรูปที่ 7(ข) สำหรับกรณี $D > 0.5$ เส้นกราฟความสัมพันธ์

ของตัวแปรวิกฤติ $I_{o1,c}$, $\theta_{1,c}$ และ $T_{Ch,c}$ กับค่าดีวีไอซ์เคลทั้งผลจากการคำนวณและทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9, 10 และ 11 ตามลำดับ

4. สรุป

- (1) การออกแบบระบบควบคุมของมอสเฟตอินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายโหลดเรโซแนนท์อนุกรมที่ควบคุมด้วยดีวีไอซ์เคลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตจะต้องมีการควบคุมค่าดีวีไอซ์เคลและความถี่สวิตชิงไปพร้อมๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์อยู่ภายใต้สภาวะ ZVS ตลอดย่านการทำงาน
- (2) ผลของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ของมอสเฟตทำให้ความถี่สวิตชิงวิกฤติมีค่าสูงกว่ากรณีไม่คิดผลของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์
- (3) การควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายโหลดเรโซแนนท์อนุกรมที่ควบคุมด้วยดีวีไอซ์เคลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้ 2 ย่านที่สมมาตรกันคือย่านที่ปรับค่าดีวีไอซ์เคลจาก 0.5 ถึง 0 และย่านที่ปรับค่าดีวีไอซ์เคลจาก 0.5 ถึง 1

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยสยาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. A. Sabate, R. W. Farrington, M. M. Jovanovic, and F. C. Lee, "Effect of Switch Capacitance on Zero-Voltage Switching of Resonant Converters," Proceeding of Applied Power Electronics Conference, 1992, pp. 213-220.
- [2] P. Viriya, N. Yongyuth and K. Matsuse, "Analysis of Two Continuous Control Regions of Conventional Phase Shift and Transition Phase Shift for Induction Heating Inverter under ZVS and NON-ZVS Operation," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 23, No. 6, 2008, pp. 2794-2805.
- [3] P. K. Jain, A. St-Martin, and G. Edwards, "Asymmetrical Pulse-Width-Modulated Resonant DC/DC Converter Topologies," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 11, No. 3, 1996, pp. 413-422.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ยงยุทธ นาราสเทียน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตและวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ทำงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



วิริยะ พิษฐานัน การศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาโทจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง