

การวิเคราะห์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิล
สำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

Analysis of a Duty Cycle Control Resonant Inverter for the Load of
High-Frequency Induction Heating

ยงยุทธ นาราชฎ¹

Yongyuth Naras¹

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิลสำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยเริ่มจากการวิเคราะห์วงจรแสดงการทำงานในโหมดต่างๆ ในระหว่างการควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิล จากนั้นหาสมการของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรแสดงการทำงานในโหมดเหล่านี้ และใช้สำหรับการคำนวณคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตโดยการใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณ เมื่อวิเคราะห์คลื่นแรงดันและกระแสเหล่านี้โดยใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ สามารถนำไปสู่การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ได้ ผลการคำนวณทางทฤษฎีที่นำเสนอขึ้นนี้ยังได้มีการยืนยันความถูกต้องด้วยผลการทดลองโดยใช้เครื่องต้นแบบขนาดพิกัด 3 kW ที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ : เรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์ การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ ดิวิตีไซเคิล

ABSTRACT

This paper presents an analysis of a duty cycle control resonant inverter for the load of high-frequency induction heating. A variety of modes of circuit operation during duty cycle control are analyzed as a first step. Then, the output voltage and current equations of these modes of circuit operation are obtained and used for calculation of the output voltage and current waveforms using MATLAB program. These waveforms will be analyzed by Fourier analysis which can lead further to the calculation of output power P_o of the inverter. The proposed theoretical results are also verified by experimental ones, using a prototype test set rated at 3 kW in the laboratory.

Keywords : resonant, inverter, induction heating, duty cycle

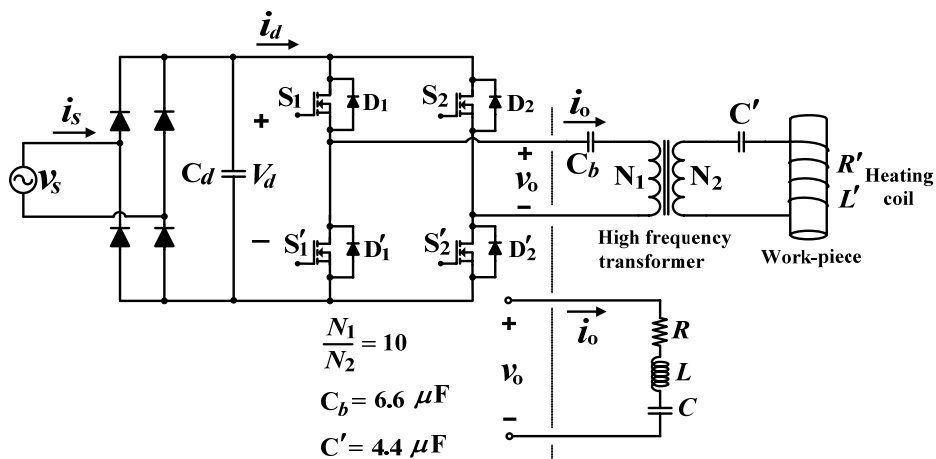
E-mail : Yongyuth_nar@yahoo.com

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพฯ 10160

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Siam University, Bangkok 10160

คำนำ

วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์สำหรับใช้ในงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 1 มีหลายวิธีสำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ได้แก่ การควบคุมความถี่สวิทชิง (Frequency Control) ในย่านความถี่ที่สูงกว่าตำแหน่งเรโซแนนท์ของวงจร (M. K. Kazimierczuk และคณะ, 1995) การควบคุมจำนวนพัลส์ (Pulse Density Modulated, PDM) (H. Fujita และคณะ, 1996) การควบคุมแบบเลื่อนเฟส (Phase Shift Control) (L. Grajales และคณะ, 1993) การควบคุมเนื้อที่แรงดันแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Voltage Cancellation Control) (J. M. Burdío และคณะ, 2004) และอีกวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้และทำได้ง่ายคือการควบคุมด้วยดีวตีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุต (Duty-Cycle Control) (P. Imbertson และคณะ, 1997) ซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอในบทความนี้ โดยนำเสนอการวิเคราะห์เพื่อให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในระหว่างการปรับค่าดีวตีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุต (v_o) เมื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆ ของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์นี้โดยใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ทำให้สามารถอธิบายได้ว่าทำไมจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดประเภทอุปกรณให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำได้ด้วยการควบคุมดีวตีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตดังกล่าว และผลจากการวิเคราะห์นี้ทำให้สามารถอธิบายได้ว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ในสองย่านที่สมมาตรกันคือจาก 0 ถึง 0.5 และจาก 0.5 ถึง 1

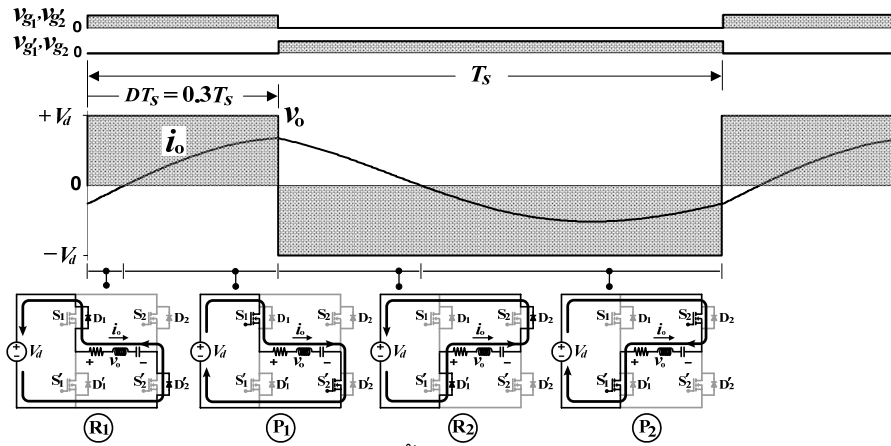


รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์จ่ายโหลดที่มีการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง

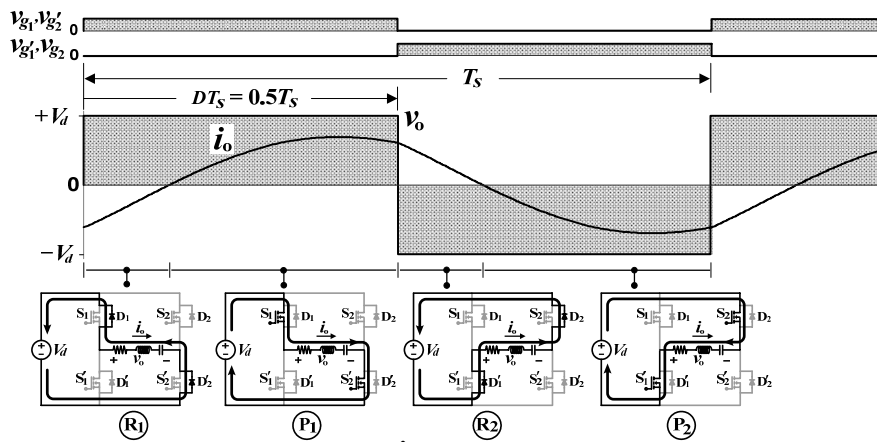
การวิเคราะห์หาโหมดการทำงานของวงจรพร้อมสมการแรงดันและกระแสเอาต์พุต

1. วงจรแสดงการทำงานในแต่ละโหมด

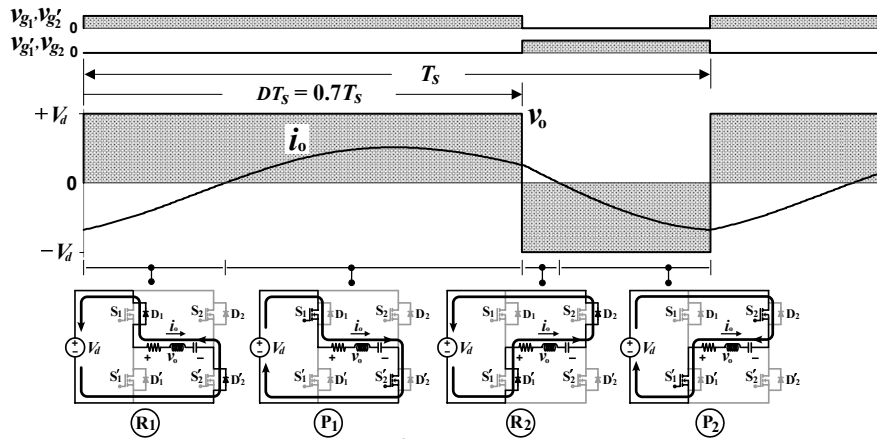
วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่นำเสนอในบทความนี้ใช้เพาเวอร์ MOSFET เบอร์ IRFP460 เป็นอุปกรณ์สวิทช์ ขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานด้านเอาต์พุตสามารถแทนด้วย $R' L'$ อนุกรม ในขณะที่ C_b และ C' คือตัวเก็บประจุที่ใช้ในการสกัดองค์ประกอบดีซี (blocking capacitor) และตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ (resonant capacitor) ตามลำดับ เมื่อย้ายตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเหล่านี้มารวมไว้ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวด (N_1/N_2) เท่ากับ 10 จะได้วงจรสมมูลด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แทนด้วย RLC อนุกรมดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในการวิเคราะห์ต่อไปนี้จะสามารถแทนโหลดด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วย RLC อนุกรมดังกล่าว



(ก) ดิวตี้ไซเคิล $D = 0.3$



(ข) ดิวตี้ไซเคิล $D = 0.5$



(ค) ดิวตี้ไซเคิล $D = 0.7$

รูปที่ 2 สัญญาณขั้วเกต คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตและวงจรแสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละโหมด

การควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการควบคุมดิวตี้ไซเคิล (D) ของคลื่นแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ในรูปที่ 1 ทำได้โดยการควบคุมให้คู่สวิตช์ S_1 และ S_2' นำกระแสในช่วงเวลา DT_s ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต $v_o = +V_d$ และคู่สวิตช์ S_2 และ S_1' นำกระแสในช่วงเวลา $(1-D)T_s$ ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุต

$v_o = -V_d$ โดยในแต่ละไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตจะมีโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้งหมดสี่โหมด ประกอบด้วย โหมดรีเจนเนอเรทีฟสองโหมดคือรีเจนเนอเรทีฟแรงดันบวก (R_1) และรีเจนเนอเรทีฟแรงดันลบ (R_2) ซึ่งเป็นโหมดการทำงานที่มีการขนถ่ายกำลังไฟฟ้าจากโหลดคืนไปยังแหล่งจ่ายดีซีด้านอินพุตและโหมดเพาเวอร์อีกสองโหมดคือเพาเวอร์แรงดันบวก (P_1) และเพาเวอร์แรงดันลบ (P_2) ซึ่งเป็นโหมดการทำงานที่มีการขนถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีด้านอินพุตผ่านอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลด ลักษณะสัญญาณควบคุมเกทคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตและวงจรแสดงการทำงานในแต่ละโหมดภายในหนึ่งไซเคิลของการสวิตช์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2(ก), 2(ข) และ 2(ค) สำหรับกรณีที่ค่าดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 0.3, 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ

2. สมการและคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต

จากวงจรแสดงการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละโหมดดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถวิเคราะห์หาสมการแรงดันและกระแสเอาต์พุต (v_o , i_o) ในแต่ละโหมดแสดงได้ดังสมการ

$$v_o(t) = \begin{cases} V_d & , 0 < t < DT_s \\ -V_d & , DT_s < t < T_s \end{cases} \quad (1)$$

$$i_o(t) = \begin{cases} e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_d t + I \cos \omega_d t \right] & , 0 < t < DT_s \\ e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{-V_d - V - \alpha LI}{\omega_1 L} \right) \sin \omega_d t + I \cos \omega_d t \right] & , DT_s < t < T_s \end{cases} \quad (2)$$

โดยที่

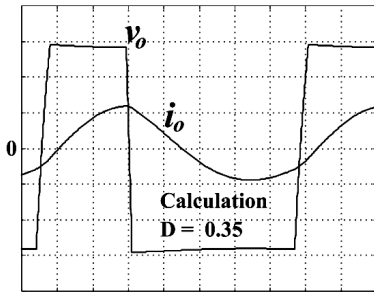
I คือค่าเริ่มต้นของกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ในแต่ละโหมดการทำงาน

V คือค่าเริ่มต้นของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ในแต่ละโหมดการทำงาน

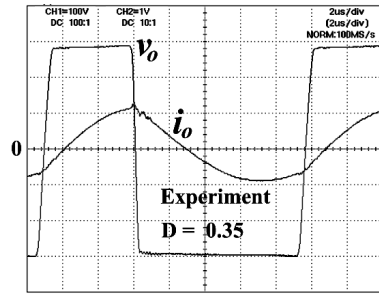
$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_d = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

T_s คือคาบเวลาของคลื่นแรงดันเอาต์พุตซึ่งเท่ากับคาบเวลาของการสวิตช์

จากสมการ v_o , i_o ในแต่ละโหมดการทำงานใน (1) และ (2) สามารถใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณและเขียนคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเหล่านี้ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะคลื่นได้ดังรูปที่ 3 สำหรับกรณีที่ค่าดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 0.35 รูปที่ 4 สำหรับกรณีที่ค่าดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 0.5 และรูปที่ 5 สำหรับกรณีที่ค่าดีวีดีไซเคิลเท่ากับ 0.65 พร้อมทั้งได้ยืนยันความถูกต้องของผลการคำนวณด้วยคลื่นจากการทดลองซึ่งแสดงไว้ในรูปเดียวกันของแต่ละกรณี

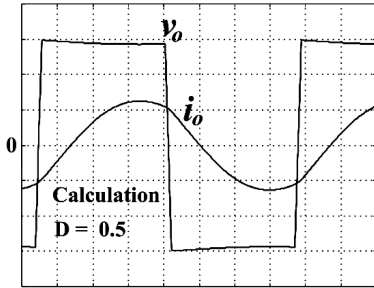


(ก) คำนวณ

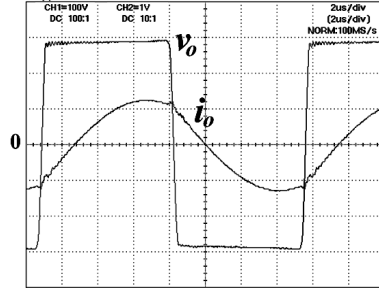


(ข) ทดลอง

รูปที่ 3 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลอง ขณะ D = 0.35

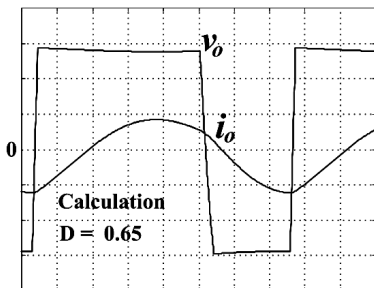


(ก) คำนวณ

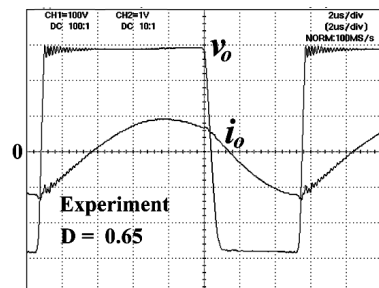


(ข) ทดลอง

รูปที่ 4 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลอง ขณะ D = 0.5



(ก) คำนวณ



(ข) ทดลอง

รูปที่ 5 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลอง ขณะ D = 0.65

การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิล

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอนี้จะเริ่มจากการคำนวณหาองค์ประกอบต่างๆ ของทั้งคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตในระหว่างที่มีการปรับค่าดิวิตีไซเคิล ซึ่งเมื่อพิจารณาจากคลื่นแรงดันเอาต์พุต (v_o) ของอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการควบคุมดิวิตีไซเคิล (D) ในย่านจาก 0 ถึง 1 ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อทำการวิเคราะห์ฟูเรียร์ของคลื่นนี้สามารถแสดงองค์ประกอบต่างๆ ของคลื่นแรงดันเอาต์พุตได้ดังสมการ

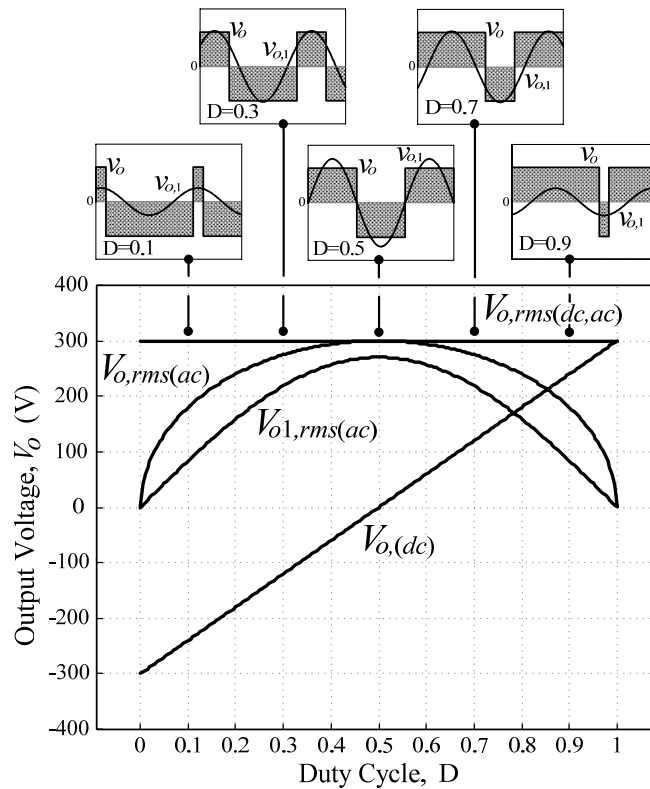
$$\begin{aligned}
 v_o = & (2D-1)V_d + \frac{V_d}{\pi} [(2 \sin 2\pi D) \cos \omega_s t + (2 - 2 \cos 2\pi D) \sin \omega_s t] \\
 & + \frac{V_d}{2\pi} [(2 \sin 2 \times 2\pi D) \cos 2\omega_s t + (2 - 2 \cos 2 \times 2\pi D) \sin 2\omega_s t] \\
 & + \frac{V_d}{3\pi} [(2 \sin 3 \times 2\pi D) \cos 3\omega_s t + (2 - 2 \cos 3 \times 2\pi D) \sin 3\omega_s t] + \dots
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

โดยที่ ω_s คือความถี่เชิงมุมขององค์ประกอบหลักมูลของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตซึ่งเท่ากับความถี่สวิตชิ่ง

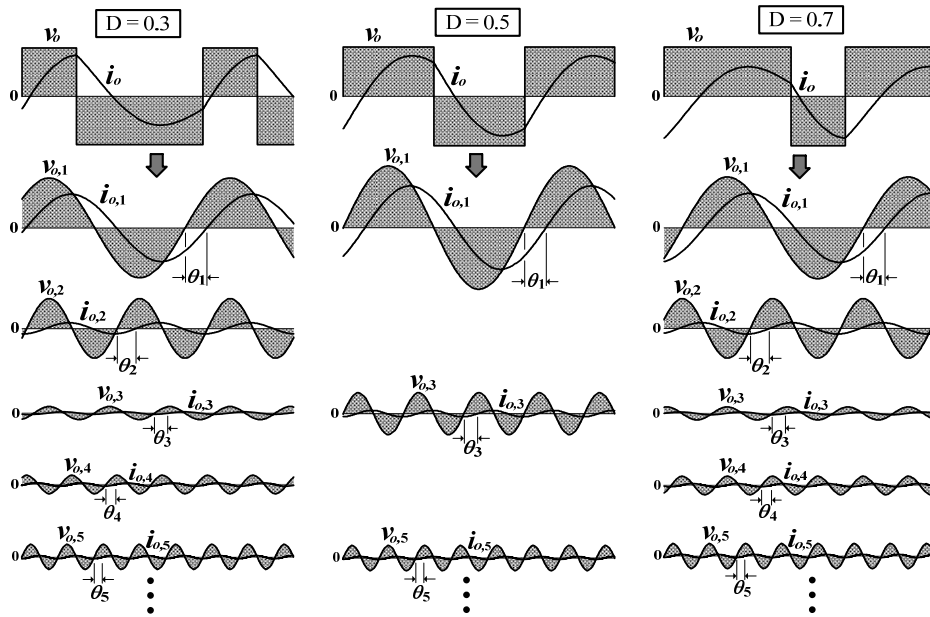
จากสมการแสดงองค์ประกอบต่างๆ ของคลื่นแรงดัน v_o ใน (3) เมื่อกำหนดให้ $V_d = 300$ V ตลอดย่านการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลจาก 0 ถึง 1 สามารถคำนวณหาองค์ประกอบดีซี ($V_{o,(dc)}$) ค่า rms ขององค์ประกอบเอซี ($V_{o,rms(ac)}$) ค่า rms ขององค์ประกอบหลักมูล ($V_{o1,rms(ac)}$) และค่า rms ขององค์ประกอบดีซีรวมกับเอซี ($V_{o,rms(dc,ac)}$) และพล็อตกราฟแสดงเปลี่ยนแปลงเทียบกับค่าดิวตี้ไซเคิลแสดงได้ดังรูปที่ 6

เมื่อจ่ายแรงดันเอาต์พุตดังใน (3) ให้กับโหลด RLC อนุกรมซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่หลักมูลเท่ากับ Z_1 และอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์เท่ากับ Z_3, Z_5, Z_7, \dots จะได้องค์ประกอบต่างๆ ของคลื่นกระแสเอาต์พุตดังสมการ

$$i_o = \frac{V_d}{\pi Z_1} [(2 \sin 2\pi D) \cos(\omega_s t - \theta_1) + (2 - 2 \cos 2\pi D) \sin(\omega_s t - \theta_1)] \\ + \frac{V_d}{2\pi Z_2} [(2 \sin 2 \times 2\pi D) \cos(2\omega_s t - \theta_2) + (2 - 2 \cos 2 \times 2\pi D) \sin(2\omega_s t - \theta_2)] \quad (4) \\ + \frac{V_d}{3\pi Z_3} [(2 \sin 3 \times 2\pi D) \cos(3\omega_s t - \theta_3) + (2 - 2 \cos 3 \times 2\pi D) \sin(3\omega_s t - \theta_3)] + \dots$$



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของ $V_{o,(dc)}$, $V_{o,rms(ac)}$, $V_{o1,rms(ac)}$ และ $V_{o,rms(dc,ac)}$ ขณะปรับค่าดิวตี้ไซเคิล D



รูปที่ 7 องค์ประกอบเอชี่ของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตพร้อมมุมต่างเฟส

องค์ประกอบเอชี่ของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตใน (4) และ (5) สามารถแสดงลักษณะคลื่นได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจะเห็นว่าในกรณี $D=0.3$ และ $D=0.7$ จะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 2, 3, 4, 5, ... ส่วนกรณี $D=0.5$ จะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3, 5, 7, ... และจากองค์ประกอบของคลื่นเหล่านี้สามารถนำไปใช้สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้ดังสมการ

$$P_o = V_{o1}I_{o1} \cos \theta_1 + V_{o2}I_{o2} \cos \theta_2 + V_{o3}I_{o3} \cos \theta_3 + \dots \quad (5)$$

โดยที่

$$V_{o1} = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_d}{\pi}(2 \sin 2\pi D)\right]^2 + \left[\frac{V_d}{\pi}(2 - 2 \cos 2\pi D)\right]^2}}{\sqrt{2}}, \quad V_{o2} = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_d}{2\pi}(2 \sin 4\pi D)\right]^2 + \left[\frac{V_d}{2\pi}(2 - 2 \cos 4\pi D)\right]^2}}{\sqrt{2}},$$

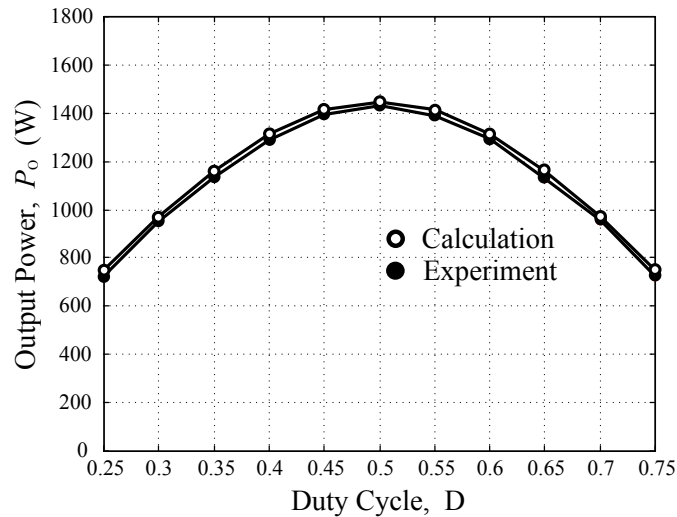
$$V_{o3} = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_d}{3\pi}(2 \sin 6\pi D)\right]^2 + \left[\frac{V_d}{3\pi}(2 - 2 \cos 6\pi D)\right]^2}}{\sqrt{2}}, \quad \dots$$

$$I_{o1} = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_d}{\pi Z_2}(2 \sin 2\pi D)\right]^2 + \left[\frac{V_d}{\pi Z_2}(2 - 2 \cos 2\pi D)\right]^2}}{\sqrt{2}}, \quad I_{o2} = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_d}{2\pi Z_2}(2 \sin 4\pi D)\right]^2 + \left[\frac{V_d}{2\pi Z_2}(2 - 2 \cos 4\pi D)\right]^2}}{\sqrt{2}},$$

$$I_{o3} = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_d}{3\pi Z_3}(2 \sin 6\pi D)\right]^2 + \left[\frac{V_d}{3\pi Z_2}(2 - 2 \cos 6\pi D)\right]^2}}{\sqrt{2}}, \quad \dots$$

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + \left(\omega_s L - \frac{1}{\omega_s C}\right)^2}, \quad Z_2 = \sqrt{R^2 + \left(2\omega_s L - \frac{1}{2\omega_s C}\right)^2}, \quad Z_3 = \sqrt{R^2 + \left(3\omega_s L - \frac{1}{3\omega_s C}\right)^2}, \quad \dots$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{\omega_s L - (1/\omega_s C)}{R} \right], \quad \theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{2\omega_s L - (1/2\omega_s C)}{R} \right], \quad \theta_3 = \tan^{-1} \left[\frac{3\omega_s L - (1/3\omega_s C)}{R} \right], \quad \dots$$



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) และค่าดิวตีไซเคิล (D)

จากองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นว่าคู่ของคลื่นแรงดันและกระแสของแต่ละฮาร์โมนิกส์ จะมีมุมต่างเฟสเกือบเท่ากับ 90° เนื่องจากวงจรสมมูล RLC ของโหลดจะกลายเป็นค่าสมมูลที่เกือบจะเป็นค่ารีแอ็คแตนซ์ของความเหนี่ยวนำอย่างเดียวและผลที่สุดคือองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์จะสร้างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้น้อยมาก ดังนั้นจึงเป็นการสมเหตุสมผลมากที่สุดที่จะคำนวณกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยประมาณจากคู่ของส่วนประกอบหลักมูลของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตโดยไม่ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ ผลจากการคำนวณของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในขณะปรับค่าดิวตีไซเคิลจาก 0.25 ถึง 0.75 สามารถพล็อตกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตนี้ได้ดังรูปที่ 8 พร้อมทั้งยืนยันความถูกต้องของหลักการวิเคราะห์ที่นำเสนอด้วยผลการทดลองซึ่งได้แสดงไว้ในกราฟรูปเดียวกัน และจะเห็นได้จากกราฟว่าค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตนี้จะลดลงในลักษณะสมมาตรเมื่อปรับค่าดิวตีไซเคิลในสองย่านคือจาก 0.5 ถึง 0.25 และจาก 0.5 ถึง 0.75

สรุป

จากการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ควบคุมด้วยดิวตีไซเคิลสำหรับงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงพร้อมสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อทดสอบยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

(1) การควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายโหลดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ควบคุมด้วยดิวตีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้ 2 ย่านที่สมมาตรกันคือย่านที่ปรับค่าดิวตีไซเคิลจาก 0.5 ถึง 0 และย่านที่ปรับค่าดิวตีไซเคิลจาก 0.5 ถึง 1 โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าสูงสุดที่ค่าดิวตีไซเคิลเท่ากับ 0.5

(2) องค์ประกอบเอชซีของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเท่านั้นที่ใช้สร้างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เนื่องจากองค์ประกอบดีซีของกระแสเอาต์พุตไม่สามารถไหลไปยังโหลดได้

(3) เนื่องจากขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของกระแสเอาต์พุตจะมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดขององค์ประกอบหลักมูล นอกจากนั้นมุมเฟสขององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของกระแสเอาต์พุตจะล้าหลังองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของแรงดันเอาต์พุตเกือบ 90° นั้นหมายความว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่เกิดจากองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยมาก กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเกือบทั้งหมดจึงเกิดจากองค์ประกอบหลักมูลของคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยสยาม

เอกสารอ้างอิง

- M. K. Kazimierczuk and Dariusz Czarkowski, **Resonant Power Converters**. John Wiley & Sons, 1995.
- H. Fujita and H. Akagi, "Pulse-Density-Modulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage-Source Inverter for Induction Melting Applications," IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 32, No. 2, 1996, pp. 279-286.
- L. Grajales, J. A. Sabate, K. R. Wang, W. A. Tabisz and F. C. Lee, "Design of a 10 kW, 500 kHz Phase-Shift Controlled Series-Resonant Inverter for Induction Heating," Proceeding of Industry Applications Society, Toronto, Canada, 1993, pp. 843-849.
- J. M. Burdio, L. A. Barragan, F. Monterde, D. Navarro, and J. Acero, "Asymmetrical Voltage-Cancellation Control for Full-Bridge Series Resonant Inverter," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 19, No. 2, 2004, pp. 461-469.
- P. Imbertson and N. Mohan, "New directions in dc-dc power conversion based on idealized concepts leading ultimately to the asymmetrical duty-cycle power converter," IEEE Transaction on Circuits and Systems I, Vol. 44, No. 8, 1997, pp. 722-727.