

บทที่ 5

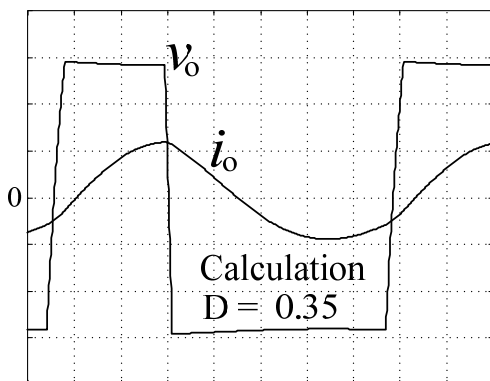
ผลการวิเคราะห์และการทดลอง

5.1 บทนำ

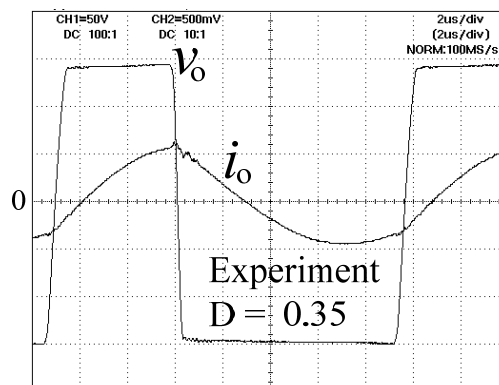
เพื่อยืนยันความถูกต้องของหลักการและวิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอแสดงในบทที่ 4 ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการทดลองเครื่องต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ ซึ่งได้แก่คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในส่วนของคลื่นคำนวณจะอาศัยสมการในแต่ละโหมดที่ได้แสดงการวิเคราะห์ไว้ในหัวข้อ 4.2.4 และใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณและพล็อตคลื่นดังกล่าวที่ขณะวงจรกำลังทำงานภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS จากนั้นใช้คลื่นคำนวณของแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานภายใต้สภาวะ Critical ZVS ซึ่งเป็นสภาวะที่แบ่งรอยต่อระหว่าง ZVS และ NON-ZVS ในการพิจารณาตัวแปรวิกฤติ 4 ตัวแปรได้แก่ ค่าความถี่สวิทช์วิกฤติ ($f_{s,c}$) ค่าพีคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุตวิกฤติ ($I_{o1,c}$) ค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูลวิกฤติ ($\theta_{1,c}$) และค่าเวลาการชาร์จประจุประจุวิกฤติ ($T_{Ch,c}$) ซึ่งตัวแปรวิกฤติเหล่านี้จะอยู่บนเส้นแบ่งรอยต่อระหว่างสภาวะ ZVS และ NON-ZVS ตลอดย่านของการปรับค่าดีวีไอเซิลพร้อมทั้งยืนยันความถูกต้องของหลักการวิเคราะห์ที่นำเสนอขึ้นด้วยผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น

5.2 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จากการคำนวณและทดลองภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS

จากสมการแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละโหมดการทำงานภายในหนึ่งไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ได้แสดงการวิเคราะห์ไว้ในหัวข้อ 4.2.4 สามารถใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณและพล็อตคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o โดยที่คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตเหล่านี้สอดคล้องกับข้ออ้างอิงของแรงดันและทิศทางอ้างอิงของกระแสที่กำหนดไว้ในวงจรรูปที่ 4.2 สำหรับการดำเนินงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรจากการคำนวณได้ดังรูปที่ 5.1(ก), 5.2(ก) และ 5.3(ก) สำหรับกรณี $D=0.35$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ พร้อมทั้งยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ขึ้นด้วยคลื่นจากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.1(ข), 5.2(ข) และ 5.3(ข) สำหรับกรณี $D=0.35$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ

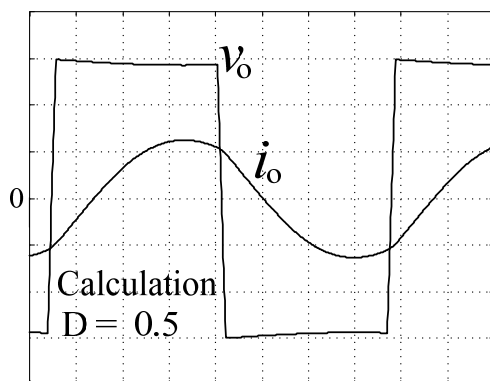


(ก) การคำนวณ

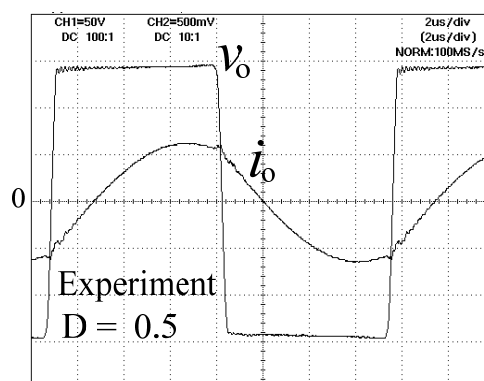


(ข) การทดลอง

รูปที่ 5.1 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลองที่ค่า $D=0.35$ ขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS, สเกล : 50 Volt/Div, 5 Amp/Div, 2 μ s/Div

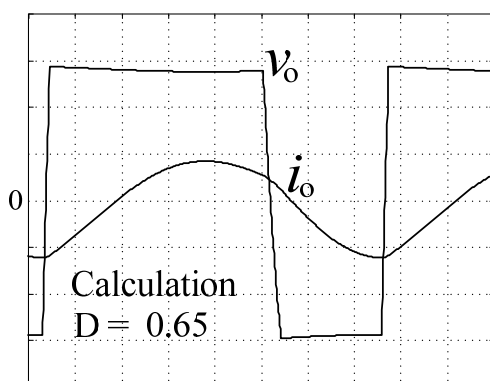


(ก) การคำนวณ

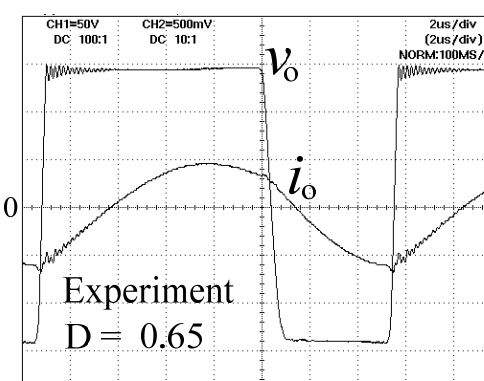


(ข) การทดลอง

รูปที่ 5.2 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลองที่ค่า $D=0.5$ ขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS, สเกล : 50 Volt/Div, 5 Amp/Div, 2 μ s/Div

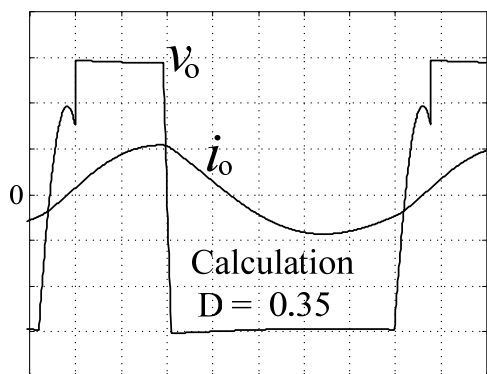


(ก) การคำนวณ

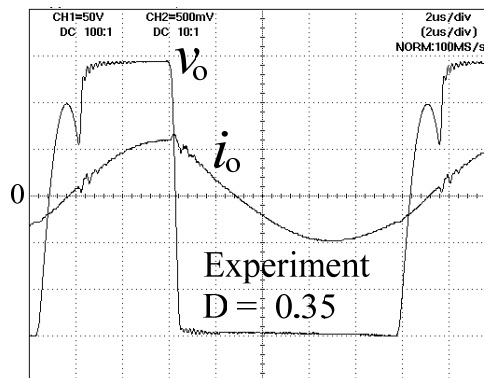


(ข) การทดลอง

รูปที่ 5.3 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลองที่ค่า $D=0.65$ ขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS, สเกล : 50 Volt/Div, 5 Amp/Div, 2 μ s/Div



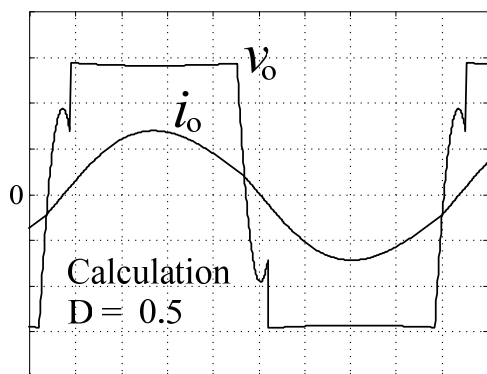
(ก) การคำนวณ



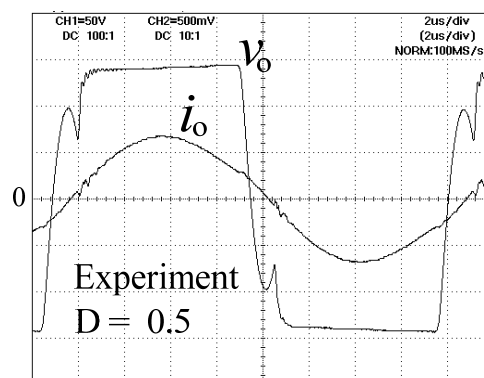
(ข) การทดลอง

รูปที่ 5.4 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลองที่ค่า $D=0.35$

ขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS, สเกล : 50 Volt/Div, 5 Amp/Div, 2 μ s/Div



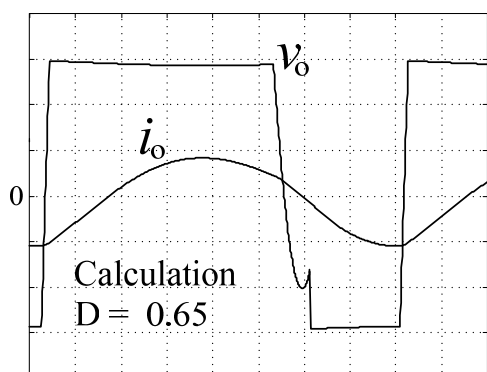
(ก) การคำนวณ



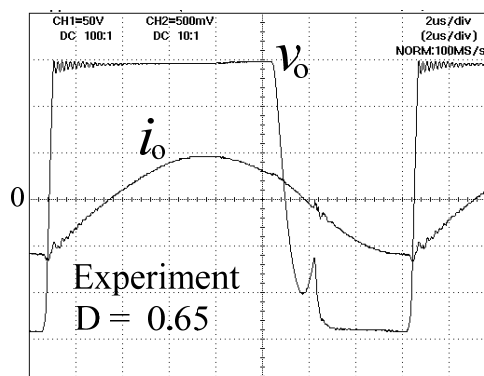
(ข) การทดลอง

รูปที่ 5.5 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลองที่ค่า $D=0.5$

ขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS, สเกล : 50 Volt/Div, 5 Amp/Div, 2 μ s/Div



(ก) การคำนวณ



(ข) การทดลอง

รูปที่ 5.6 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o , i_o จากการคำนวณและทดลองที่ค่า $D=0.65$

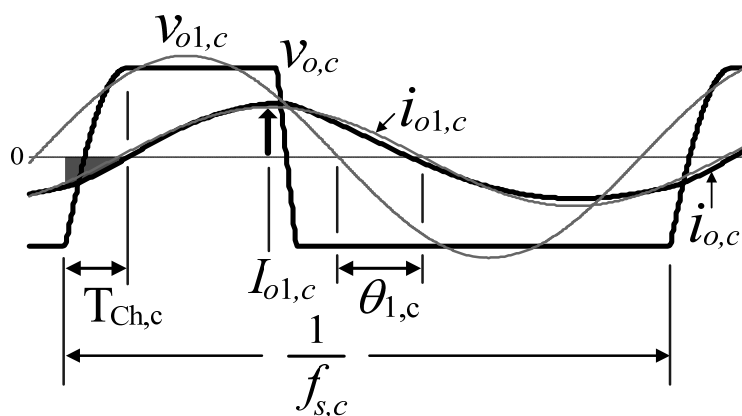
ขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS, สเกล : 50 Volt/Div, 5 Amp/Div, 2 μ s/Div

สำหรับการทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ NON-ZVS สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรจากการคำนวณได้ดังรูปที่ 5.4(ก), 5.5(ก) และ 5.6(ก) สำหรับกรณี $D=0.35$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ พร้อมทั้งยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์นี้ด้วยคลื่นจากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.4(ข), 5.5(ข) และ 5.6(ข) สำหรับกรณี $D=0.35$, $D=0.5$ และ $D=0.65$ ตามลำดับ

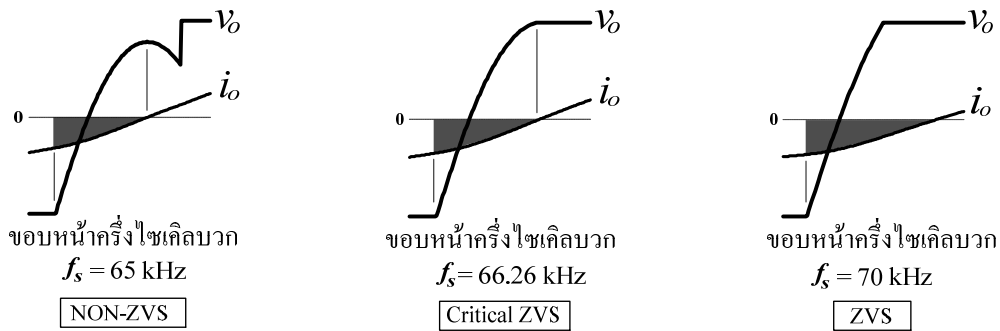
5.3 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการเกิด ZVS หรือ NON-ZVS

5.3.1 การกำหนดจุดแบ่งรอยต่อระหว่างสภาวะ ZVS และ NON-ZVS โดยใช้สภาวะ Critical ZVS ในการพิจารณา

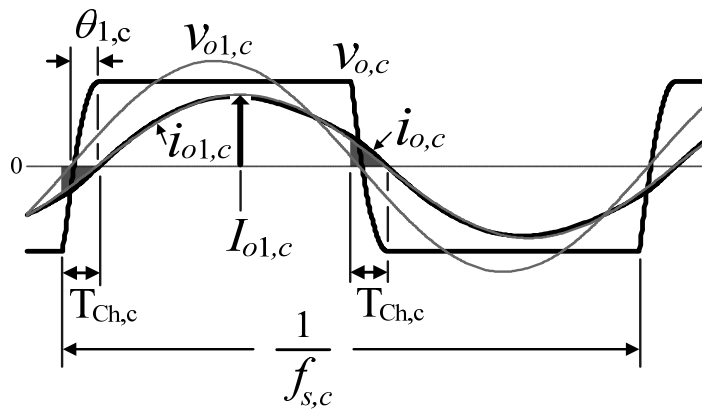
จากที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 เกี่ยวกับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการพิจารณาผลที่เกิดจากการขนถ่ายประจุของตัวเก็บประจุแคปซอร์สของสวิตช์มอสเฟต ($C_{ds} = C_1 = C'_1 = C_2 = C'_2$) ซึ่งสามารถแบ่งสภาวะการทำงานของวงจรออกได้เป็น 2 สภาวะที่แตกต่างกันคือ ZVS และ NON-ZVS โดยมีจุดแบ่งตรงกลางระหว่าง 2 สภาวะนี้เรียกว่า Critical ZVS ซึ่งจุดแบ่งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรวิกฤติ 4 ตัวแปร ได้แก่ ค่าความถี่สวิตช์ซึ่งวิกฤติ ($f_{s,c}$) ค่าพีคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุตวิกฤติ ($I_{o1,c}$) ค่ามุมเฟสลา้หลังขององค์ประกอบหลักมูลวิกฤติ ($\theta_{1,c}$) และค่าเวลาการชาร์จประจุประจุวิกฤติ ($T_{Ch,c}$) ซึ่งตัวแปรวิกฤติเหล่านี้จะอยู่บนเส้นแบ่งรอยต่อระหว่างสภาวะ ZVS และ NON-ZVS ตลอดย่านของการปรับค่าดิวิตีไซเคิล โดยนิยามของค่าตัวแปรวิกฤติเหล่านี้สามารถกำหนดจากคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตวิกฤติดังแสดงในรูปที่ 5.7(ก) สำหรับกรณี $D=0.35$ ($D < 0.5$) รูปที่ 5.8(ก) สำหรับกรณี $D=0.5$ และรูปที่ 5.9(ก) สำหรับกรณี $D=0.65$ ($D > 0.5$)



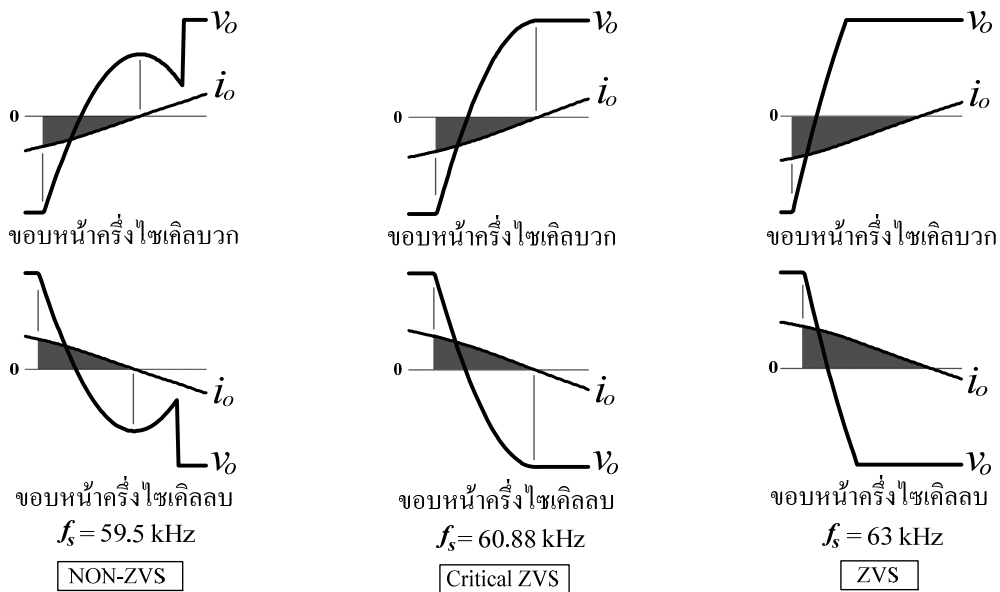
(ก) นิยามของตัวแปรวิกฤติ $f_{s,c}$, $I_{o1,c}$, $\theta_{1,c}$ และ $T_{Ch,c}$



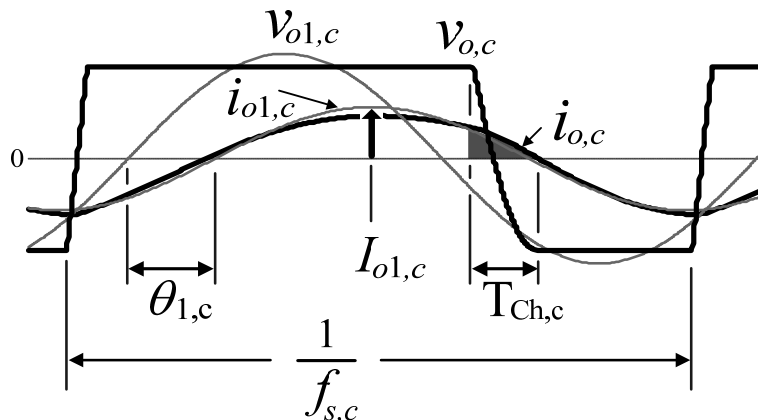
(ข) Current-Time area (เนื้อที่กระแสเวลา) ขณะ $f_s < f_{s,c}$, $f_s = f_{s,c}$ และ $f_s > f_{s,c}$
 รูปที่ 5.7 นิยามของตัวแปรวิกฤติและขนาด Current-Time Area สำหรับกรณี $D = 0.35$ ($D < 0.5$)



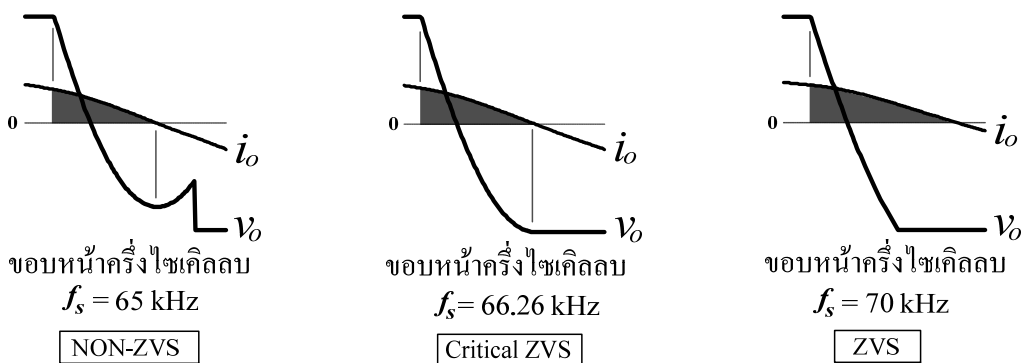
(ก) นิยามของตัวแปรวิกฤติ $f_{s,c}$, $I_{o1,c}$, $\theta_{1,c}$ และ $T_{Ch,c}$



(ข) Current-Time Area (เนื้อที่กระแสเวลา) ขณะ $f_s < f_{s,c}$, $f_s = f_{s,c}$ และ $f_s > f_{s,c}$
 รูปที่ 5.8 นิยามของตัวแปรวิกฤติและขนาดของ Current-Time Area สำหรับกรณี $D = 0.5$



(ก) นิยามของตัวแปรวิกฤติ $f_{s,c}$, $I_{o1,c}$, $\theta_{1,c}$ และ $T_{Ch,c}$



(ข) Current-Time Area (เนื้อที่กระแสดเวลา) ขณะ $f_s < f_{s,c}$, $f_s = f_{s,c}$ และ $f_s > f_{s,c}$

รูปที่ 5.9 นิยามของตัวแปรวิกฤติและขนาด Current-Time Area สำหรับกรณี $D = 0.65$ ($D > 0.5$)

5.3.2 การวิเคราะห์หาเส้นแบ่งรอยต่อระหว่างสถานะ ZVS และ NON-ZVS ของวงจร

อินเวอร์เตอร์ซึ่งกำหนดด้วยตัวแปรวิกฤติของสถานะ Critical ZVS

การวิเคราะห์หาเส้นแบ่งรอยต่อระหว่างการทำงานภายใต้สถานะ ZVS และ NON-ZVS ของอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์จ่ายโวลตเรโซแนนท์อนุกรมของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีการควบคุมด้วยดิโอดีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาท์พุท สามารถทำได้โดยการพิจารณาจากค่าตัวแปรวิกฤติ 4 ตัวแปรของคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่ได้จากการคำนวณขณะวงจรทำงานภายใต้สถานะ Critical ZVS พร้อมยืนยันความถูกต้องของหลักการด้วยผลการทดลองของเครื่องต้นแบบที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยการวิเคราะห์เพื่อหาค่าของตัวแปรวิกฤติที่ค่าดิโอดีไซเคิล (D) ใดๆ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

| พารามิเตอร์ในการทดลอง | | ค่าของพารามิเตอร์ |
|--|--------------|--|
| MOSFET IRFP460 | V_{DSS} | 500 V |
| | I_D | 20 A |
| | C_{oss} | 870 pF |
| drain-source capacitor ($C_{ds} = C_1 = C'_1 = C_2 = C'_2$) | | $(2 \times C_{oss}) + 4700 \text{ pF} = 6440 \text{ pF}$ |
| blocking capacitor (C_b) | | $6.6 \mu\text{F}$ |
| resonant capacitor (C') | | $4.4 \mu\text{F}$ |
| equivalent resonant capacitor (C) | | $\frac{(N_2/N_1)^2 C' C_b}{(N_2/N_1)^2 C' + C_b} = 0.0437 \mu\text{F}$ |
| dc link voltage (V_d) | | 150 V |
| high-frequency step down transformer | ferrite core | $2 \times \text{EE80}$ |
| | turn ratio | 10 |
| iron work-piece | diameter | 2.5 cm |
| | lenth | 15 cm |
| heating coil | turns | 4 |
| | diameter | 4 cm |
| operating temperature | | $400 \text{ }^\circ\text{C}$ |

$$R = \frac{V_{o1,c}}{I_{o1,c}} \cos \theta_{1,c} \quad (5.1)$$

$$L = \frac{\frac{V_{o1,c}}{I_{o1,c}} \sin \theta_{1,c} + \frac{1}{2\pi f_{s,c} C}}{2\pi f_{s,c}} \quad (5.2)$$

$$\theta_{1,c} = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi f_{s,c} L - \frac{1}{2\pi f_{s,c} C}}{R} \right) \quad (5.3)$$

ตารางที่ 5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรวิกฤติขณะวงจรทำงานภายใต้สภาวะ Critical ZVS

| ขั้นตอนที่ | รายละเอียด |
|------------|--|
| 1 | ตั้งค่าคิวตี้ไซเคิล (D) |
| 2 | ปรับความถี่สวิตชิง (f_s) จนกระทั่ง $f_s = f_{s,c}$ ซึ่งจะทำให้ได้คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตวิกฤติ ($v_{o,c}, i_{o,c}$) มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.7(ก) หรือ 5.8(ก) หรือ 5.9(ก) โดยอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับ 400°C |
| 3 | บันทึกคลื่น $v_{o,c}, i_{o,c}$ พร้อมข้อมูลของคลื่นในรูปแบบ ASCII ด้วยดิจิทัลออสซิลอโคป |
| 4 | อ่านค่า $T_{Ch,c}$ จากคลื่นทดลองของแรงดันเอาต์พุต $v_{o,c}$ |
| 5 | วิเคราะห์หาค่า $V_{o1,c}$, $I_{o1,c}$ และ $\theta_{1,c}$ จากข้อมูลในรูปแบบ ASCII ของคลื่น $v_{o,c}, i_{o,c}$ วิกฤติด้วย FFT |
| 6 | นำค่า $V_{o1,c}$, $I_{o1,c}$ และ $\theta_{1,c}$ ไปคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล (R) และค่าความเหนี่ยวนำสมมูล (L) ของโหลดโดยใช้สมการ (5.1) และ (5.2) ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่า R และ L เหล่านี้ดังแสดงในตารางที่ 5.3 |
| 7 | พล็อตคลื่น $v_{o,c}, i_{o,c}$ ขณะทำการเปลี่ยนค่าความถี่สวิตชิงจนกระทั่ง $f_s = f_{s,c}$ โดยใช้ค่า R และ L สมมูลและสมการแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ของวงจรในหัวข้อ 4.2.2 และใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในขบวนการคำนวณ |
| 8 | อ่านค่า $T_{Ch,c}$ จากคลื่นคำนวณของ $v_{o,c}, i_{o,c}$ |
| 9 | วิเคราะห์หาค่า $I_{o1,c}$ และ $\theta_{1,c}$ จากคลื่น $v_{o,c}, i_{o,c}$ ที่ได้จากการคำนวณด้วย FFT ซึ่งค่า $\theta_{1,c}$ นี้จะสอดคล้องกับสมการ (5.3) |
| 10 | พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรวิกฤติจากการคำนวณ ($f_{s,c}, I_{o1,c}, \theta_{1,c}$ และ $T_{Ch,c}$) และค่าคิวตี้ไซเคิล (D) ซึ่งค่าของตัวแปรวิกฤติเหล่านี้คำนวณไว้แล้วในขั้นตอนที่ 7-9 |
| 11 | พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรวิกฤติจากการทดลอง ($f_{s,c}, I_{o1,c}, \theta_{1,c}$ และ $T_{Ch,c}$) และค่าคิวตี้ไซเคิล (D) ลงในกราฟเดียวกันกับการคำนวณ ซึ่งค่าของตัวแปรวิกฤติจากการทดลองเหล่านี้วัดค่าไว้แล้วในขั้นตอนที่ 2, 4 และ 5 |

ตารางที่ 5.3 ค่าความต้านทานสมมูล (R) และค่าความเหนี่ยวนำสมมูล (L) ของโหลดที่ได้จากการวัดขณะอินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ Critical ZVS

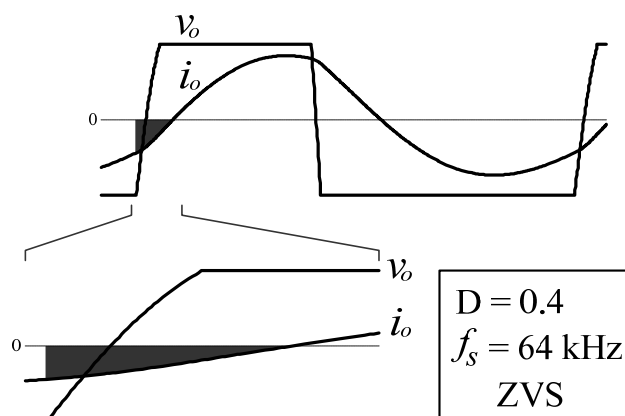
| D | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.65 | 0.7 |
|-----------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| R (Ω) | 24.64 | 23.54 | 22.87 | 22.16 | 21.53 | 22.18 | 22.9 | 23.52 | 24.65 |
| L (μH) | 196.2 | 188.25 | 180.8 | 174.65 | 168.9 | 174.65 | 180.79 | 188.26 | 196.2 |

เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600°C ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (μ) ของวัสดุชิ้นงานจะมีค่าเกือบคงที่ [1], [2] ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานสมมูล (R) และค่าความเหนี่ยวนำสมมูล (L) ของโหลดไม่มาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบขณะที่อุณหภูมิของชิ้นงานคงที่เท่ากับ 400°C สำหรับกรณีที่ปรับค่าดิวิตีไซเคิลในย่าน 0.3 – 0.7 สามารถคำนวณค่าตัวแปรวิกฤตที่สั่งได้ตามขั้นตอนที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ผลจากการคำนวณสามารถพล็อตเส้นกราฟที่แตกต่างกันได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่สวิทชิงวิกฤต ($f_{s,c}$) และค่าดิวิตีไซเคิล (D) ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุตวิกฤต ($I_{o1,c}$) และค่าดิวิตีไซเคิล (D) ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูลวิกฤต ($\theta_{1,c}$) และค่าดิวิตีไซเคิล (D) ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาการชาร์จประจุประจุวิกฤต ($T_{Ch,c}$) และค่าดิวิตีไซเคิล (D) ดังแสดงในรูปที่ 5.15 และสุดท้ายผลการคำนวณยังได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลทางทฤษฎี โดยพล็อตเปรียบเทียบในกราฟรูปเดียวกัน ผลที่ได้ทั้งสองปรากฏว่าใกล้เคียงกันสำหรับในแต่ละกรณี

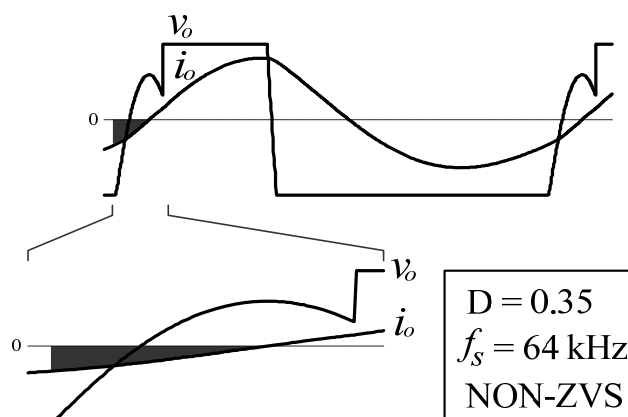
ตลอดย่านการควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิล การทำงานของวงจรอาจจะเข้าไปอยู่ภายใต้สภาวะ ZVS หรือ NON-ZVS ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของตัวแปรวิกฤต 4 ตัว รายละเอียดของเงื่อนไขเหล่านี้สามารถอธิบายให้เข้าใจได้ด้วย Current-Time Area ที่แรงขาของคลื่นกระแสเอาต์พุตวิกฤต ($i_{o,c}$) ดังแสดงในรูปที่ 5.7(ก) สำหรับกรณี $D = 0.35$ ($D < 0.5$) ในรูปที่ 5.8(ก) สำหรับกรณี $D = 0.5$ และในรูปที่ 5.9(ก) สำหรับกรณี $D = 0.65$ ($D > 0.5$) ซึ่ง Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตวิกฤตนี้จะตรงกับจุดทำงานในเส้นกราฟรูปที่ 5.12–5.15 ในขณะที่จุดทำงานอื่นๆ ในเส้นกราฟเหล่านี้จะมี Current-Time Area เท่ากันตลอด ในกรณีที่ค่าของตัวแปรวิกฤตไม่ได้อยู่ในเส้นกราฟที่ใช้ในการแบ่งสภาวะการทำงานออกเป็นสองสภาวะ ZVS และ NON-ZVS เหล่านี้จะส่งผลทำให้การทำงานของวงจรเข้าไปอยู่ภายใต้สภาวะ ZVS หรือ NON-ZVS อย่างใดอย่างหนึ่ง กล่าวคือถ้าค่าความถี่สวิทชิงต่ำกว่าค่าวิกฤต ($f_s < f_{s,c}$) ค่าพีคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุตต่ำกว่าค่าวิกฤต ($I_{o1} < I_{o1,c}$) ค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูลต่ำกว่าค่าวิกฤต ($\theta_1 < \theta_{1,c}$) และค่าเวลา

การชาร์จประจุประจุมากกว่าค่าวิกฤติ ($T_{Ch} > T_{Ch,c}$) จะทำให้ Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตเล็กกว่า Current-Time Area วิกฤติ ดังแสดงด้วยพื้นที่แรเงารูปซ้ายของรูปที่ 5.7(ข), 5.8(ข) และ 5.9(ข) สำหรับกรณีที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 0.35, 0.5 และ 0.65 ตามลำดับ ส่งผลทำให้การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เข้าไปอยู่ภายใต้สภาวะ NON-ZVS ในทางกลับกันถ้าค่าความถี่สวิทซ์สูงกว่าค่าวิกฤติ ($f_s > f_{s,c}$) ค่าพีคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุตสูงกว่าค่าวิกฤติ ($I_{o1} > I_{o1,c}$) ค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูลสูงกว่าค่าวิกฤติ ($\theta_1 > \theta_{1,c}$) และค่าเวลาการชาร์จประจุประจุต่ำกว่าค่าวิกฤติ ($T_{Ch} < T_{Ch,c}$) จะทำให้ Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตใหญ่กว่า Current-Time Area วิกฤติ ดังแสดงด้วยพื้นที่แรเงาในรูปขวาของรูปที่ 5.7(ข), 5.8(ข) และ 5.9(ข) สำหรับกรณีที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 0.35, 0.5 และ 0.65 ตามลำดับ ส่งผลทำให้การทำงานของวงจรเข้าไปอยู่ภายใต้สภาวะ ZVS

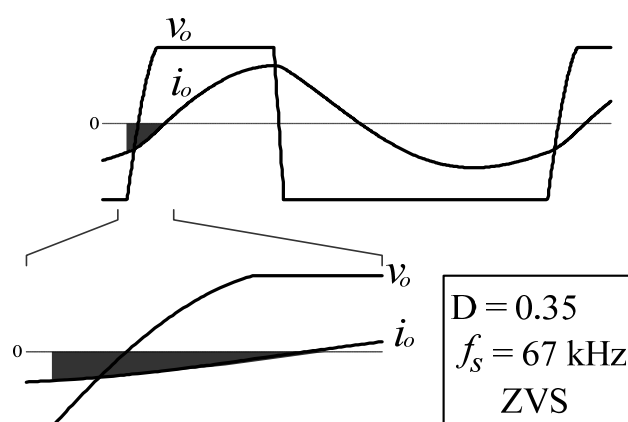
การปรับลดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการปรับควิตซ์ไซเคิลให้มียาลดลงจาก 0.5 หรือให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 จะต้องปรับความถี่สวิทซ์ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพื่อควบคุมให้วงจรยังคงทำงานภายใต้สภาวะ ZVS รายละเอียดของประเด็นนี้เริ่มต้นด้วยการพิจารณา Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตในรูปที่ 5.10(ก) ซึ่งเป็นกรณีวงจรทำงานที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 0.4 และความถี่สวิทซ์ $f_s = 64$ kHz เมื่อปรับค่าควิตซ์ไซเคิลลดลงไปยัง 0.35 โดยไม่มีการเพิ่มความถี่สวิทซ์ซึ่งจะส่งผลทำให้ Current-Time Area เล็กกว่า Current-Time Area วิกฤติดังแสดงในรูปที่ 5.10(ข) ผลดังกล่าวนี้ทำให้การทำงานของวงจรเปลี่ยนจากสภาวะ ZVS ไปเป็น NON-ZVS แต่เมื่อเพิ่มความถี่สวิทซ์ขึ้นจาก 64 kHz ไปยัง 67 kHz จะทำให้ Current-Time Area ใหญ่กว่า Current-Time Area วิกฤติดังแสดงในรูปที่ 5.10(ค) ส่งผลทำให้การทำงานของวงจรถลับไปยังสภาวะ ZVS ได้เช่นเดิม ส่วนในอีกทิศทางหนึ่งของการปรับค่าควิตซ์ไซเคิลให้มีค่ามากกว่า 0.5 โดยพิจารณา Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตในรูปที่ 5.11(ก) ซึ่งเป็นกรณีวงจรทำงานที่ค่าควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 0.6 และความถี่สวิทซ์ $f_s = 64$ kHz เมื่อปรับค่าควิตซ์ไซเคิลเพิ่มขึ้นไปยัง 0.65 โดยไม่มีการเพิ่มความถี่สวิทซ์ซึ่งจะส่งผลทำให้ Current-Time Area เล็กกว่า Current-Time Area วิกฤติดังแสดงในรูปที่ 5.11(ข) ผลดังกล่าวนี้ทำให้การทำงานของวงจรเปลี่ยนจากสภาวะ ZVS ไปเป็น NON-ZVS แต่เมื่อเพิ่มความถี่สวิทซ์ขึ้นจาก 64 kHz ไปยัง 67 kHz จะทำให้ Current-Time Area ใหญ่กว่า Current-Time Area วิกฤติดังแสดงในรูปที่ 5.11(ค) ส่งผลทำให้การทำงานของวงจรถลับไปยังสภาวะ ZVS ได้เช่นเดิม



(ก) ขณะ $D = 0.4$, $f_s = 64 \text{ kHz}$ ทำให้วงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS

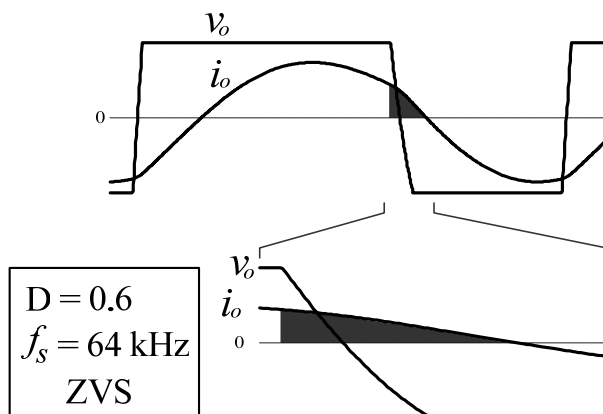


(ข) ขณะ $D = 0.35$, $f_s = 64 \text{ kHz}$ ทำให้วงจรทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS

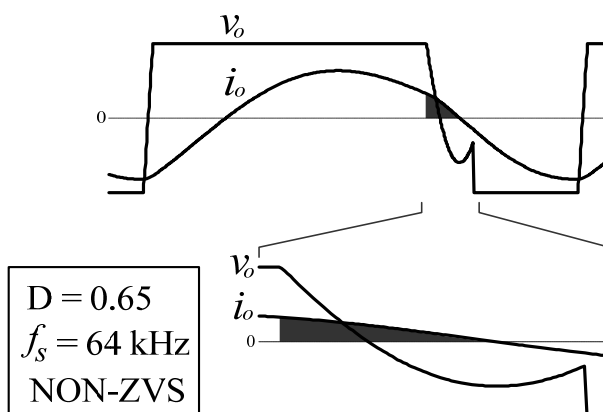


(ค) ขณะ $D = 0.35$, $f_s = 67 \text{ kHz}$ ทำให้วงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS

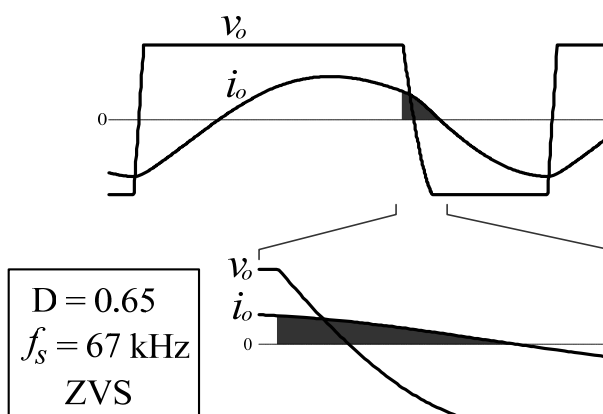
รูปที่ 5.10 ขนาด Current-Time Area ขณะปรับค่าคิวตี้เซลดจาก 0.4 ลดลงเป็น 0.35



(ก) ขณะ $D = 0.6$, $f_s = 64 \text{ kHz}$ ทำให้วงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS

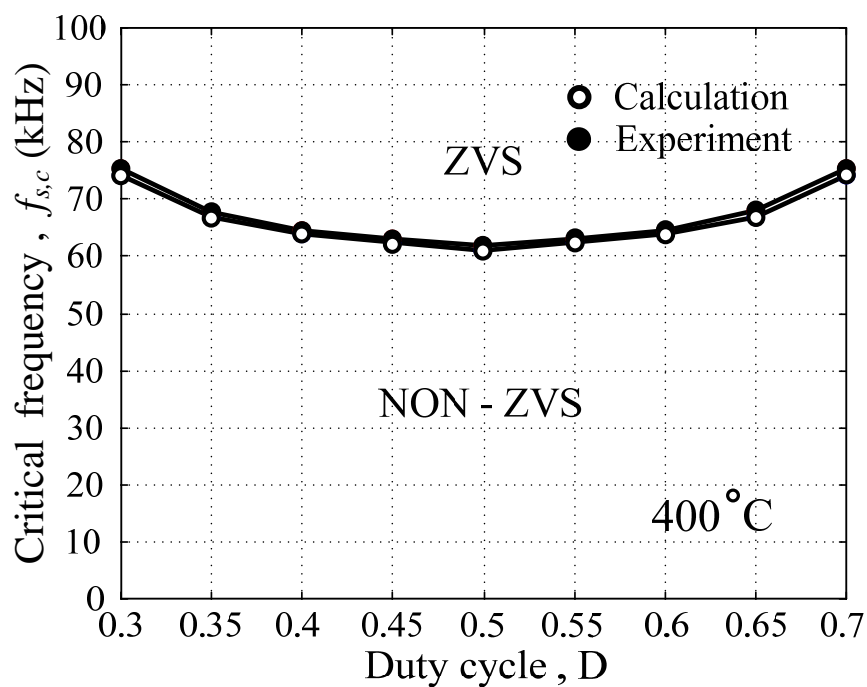


(ข) ขณะ $D = 0.65$, $f_s = 64 \text{ kHz}$ ทำให้วงจรทำงานภายใต้สภาวะ NON-ZVS

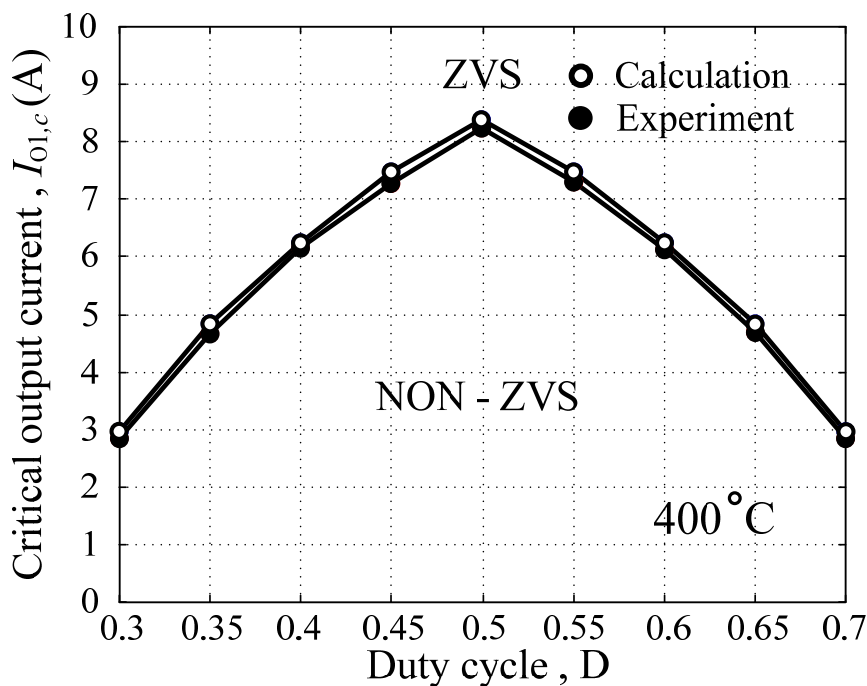


(ค) ขณะ $D = 0.65$, $f_s = 67 \text{ kHz}$ ทำให้วงจรทำงานภายใต้สภาวะ ZVS

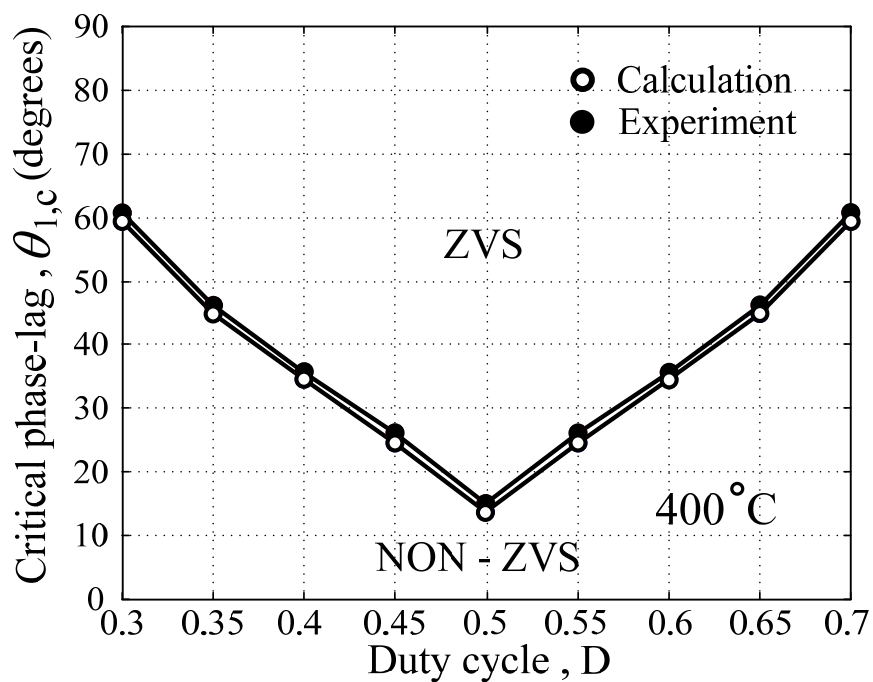
รูปที่ 5.11 ขนาด Current-Time Area ขณะปรับค่าดิวตี้ไซเคิลจาก 0.6 เพิ่มขึ้นเป็น 0.65



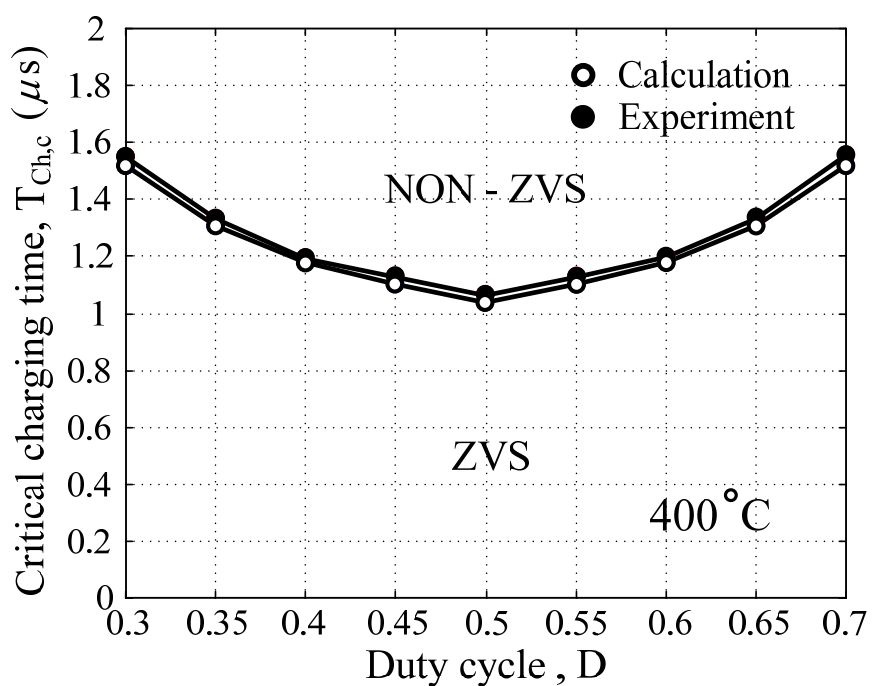
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่สวิทชิงวิกฤติ ($f_{s,c}$) และค่าดีวตี้ไซเคิล (D)



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุตวิกฤติ ($I_{o1,c}$) และค่าดีวตี้ไซเคิล (D)



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูลวิฤติ ($\theta_{1,c}$) และค่าตัวชี้เซกิต (D)



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาการชาร์จประจุวิฤติ ($T_{Ch,c}$) และค่าตัวชี้เซกิต (D)

5.4 สรุป

จากผลการวิเคราะห์การทำงานของวงจรภายใต้สภาวะ ZVS และ NON-ZVS ในวงจรมอสเฟตอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิลขณะจ่ายโหลดเรโซแนนท์อนุกรมเพื่อใช้ในการงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงพร้อมสร้างเครื่องต้นแบบเพื่อทดสอบยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

(1) การออกแบบระบบควบคุมของมอสเฟตอินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายโหลดเรโซแนนท์อนุกรมที่ควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตจะต้องมีการควบคุมค่าดิวิตีไซเคิลและความถี่สวิตชิ่งไปพร้อมๆ กัน นั้นหมายความว่าจะต้องมีลู่วิเคราะห์ 2 ลู่วิเคราะห์คือควบคุมค่าดิวิตีไซเคิลและควบคุมความถี่สวิตชิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์อยู่ภายใต้สภาวะ ZVS ตลอดช่วงการควบคุม

(2) ถ้ากำหนดให้ค่าแรงดันดีซีอินพุตคงที่และค่าของตัวเก็บประจุแคปซิเตอร์-ชอร์สของสวิตช์มอสเฟตแต่ละดั่งคงที่ จะทำให้ Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตที่ใช้ในการขนถ่ายประจุขณะทำงานภายใต้สภาวะ Critical ZVS จะมีขนาดพื้นที่เท่ากันตลอดช่วงการปรับค่าดิวิตีไซเคิล ถ้า Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตนี้มีขนาดโตกว่าจุดวิกฤติจะทำให้การขนถ่ายประจุสำเร็จก่อนสัญญาณควบคุมจะมาถึง ส่งผลให้การทำงานของวงจรอยู่ภายใต้สภาวะ ZVS แต่ถ้า Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตนี้มีขนาดเล็กกว่าจุดวิกฤติจะทำให้การขนถ่ายประจุทำไม่ได้ไม่สำเร็จส่งผลให้การทำงานของวงจรอยู่ภายใต้สภาวะ NON-ZVS

(3) การที่วงจรอินเวอร์เตอร์นี้จะทำงานภายใต้สภาวะ ZVS หรือ NON-ZVS นั้นสามารถกำหนดได้โดยค่าตัวแปรวิกฤติ 4 ตัวแปร โดยที่การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์จะอยู่ภายใต้สภาวะ ZVS ได้ก็ต่อเมื่อค่าความถี่สวิตชิ่ง (f_s) ค่าพีคขององค์ประกอบหลักมูลของกระแสเอาต์พุต (I_{o1}) ค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูล (θ_1) ต้องมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติของมัน ในขณะที่ค่าเวลาการชาร์จประจุ (T_{Ch}) ต้องมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤติของมัน

(4) การควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายโหลดเรโซแนนท์อนุกรมที่ควบคุมด้วยดิวิตีไซเคิลของคลื่นแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้ 2 ย่านที่สมมาตรกันคือย่านที่ปรับค่าดิวิตีไซเคิลจาก 0.5 ถึง 0 และย่านที่ปรับค่าดิวิตีไซเคิลจาก 0.5 ถึง 1

(5) สำหรับการปรับลดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยการปรับลดค่าดิวิตีไซเคิลจาก 0.5 หรือการปรับเพิ่มค่าดิวิตีไซเคิลจาก 0.5 โดยไม่ได้เพิ่มค่าความถี่สวิตชิ่งเป็นผลให้ความถี่สวิตชิ่งและค่ามุมเฟสล่าหลังขององค์ประกอบหลักมูลต่ำกว่าค่าวิกฤติของมันทำให้ขนาด Current-Time Area ของกระแสเอาต์พุตที่ใช้ในการขนถ่ายประจุแคปซิเตอร์-ชอร์สของสวิตช์มอสเฟตมีขนาดพื้นที่ต่ำกว่าจุดวิกฤติ ส่งผลให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์ไปอยู่ภายใต้สภาวะ NON-ZVS