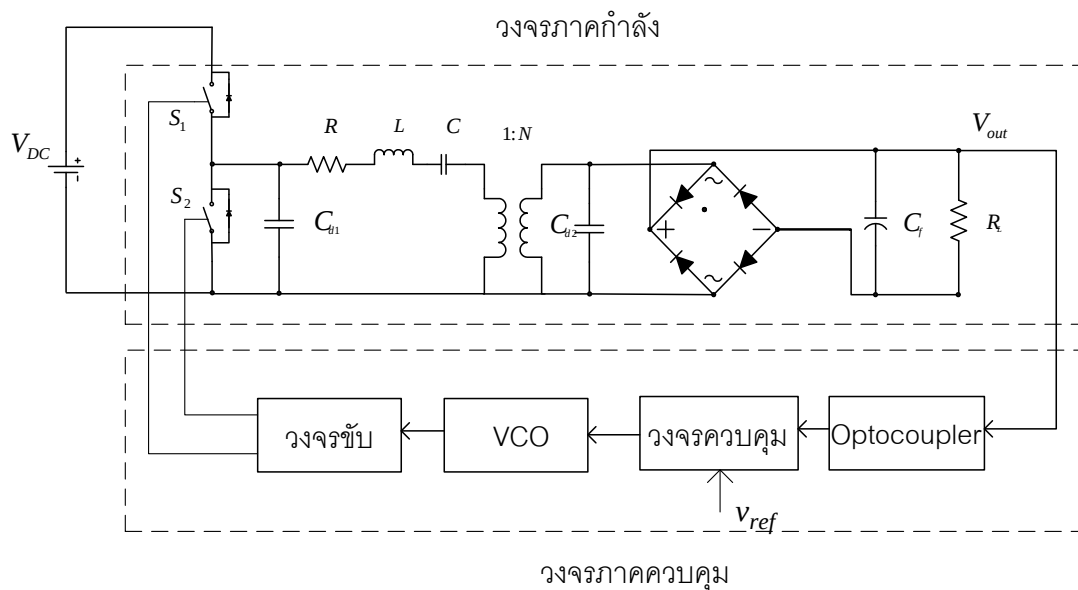


บทที่ 4

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

4.1 บทนำ

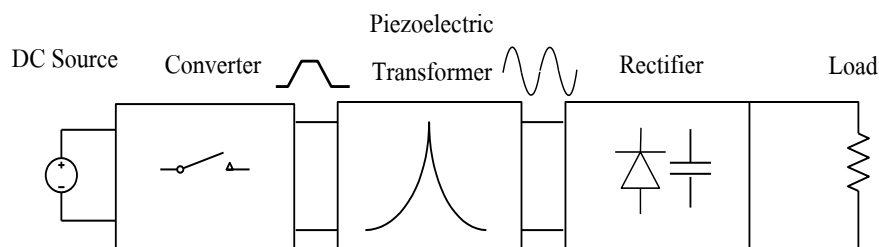
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ตามรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยโครงสร้างสองส่วนคือ ภาคการส่งถ่ายกำลังงานและภาคระบบควบคุม ในส่วนภาคการส่งถ่ายกำลังงานทำหน้าที่ในการส่งถ่ายพลังงานจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกระดับหนึ่งที่ด้านทางออก ส่วนนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบสร้าง คือประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ต้องมีค่าสูง และหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุที่มีมิติสูงเช่น Inductor ซึ่งทำให้ได้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาดที่บาง ในส่วนของโครงสร้างของภาคระบบควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านทางออกแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่4.1 โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง

4.2 ภาควิชาการส่งถ่ายกำลังงาน

รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของภาควิชาการส่งถ่ายกำลังงาน



รูปที่ 4.2 วงจรส่วนของการส่งถ่ายพลังงาน

4.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้งานทำหน้าที่สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้กับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์โดยรูปสัญญาณที่ได้มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมคางหมู ในส่วนคอนเวอร์เตอร์นี้ต้องออกแบบให้สวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ Zero Voltage Switching (ZVS) การออกแบบให้สวิตช์ทำงานแบบ ZVS ทำให้พลังงานที่สูญเสียในขณะสวิตช์มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของคอนเวอร์เตอร์มากขึ้น ส่วนตัวสวิตช์ต่อกันเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Half Bridge Switch ซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.1 [11]

หลักการควบคุมจะใช้การควบคุมด้วยความถี่หลังความถี่ Resonance โดยถ้าเพิ่มความถี่จะหมายถึงการเพิ่ม Impedance ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มากขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดน้อยลง ในทางตรงกันข้ามถ้าลดความถี่จะหมายถึงการลด Impedance ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์น้อยลงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมากขึ้น

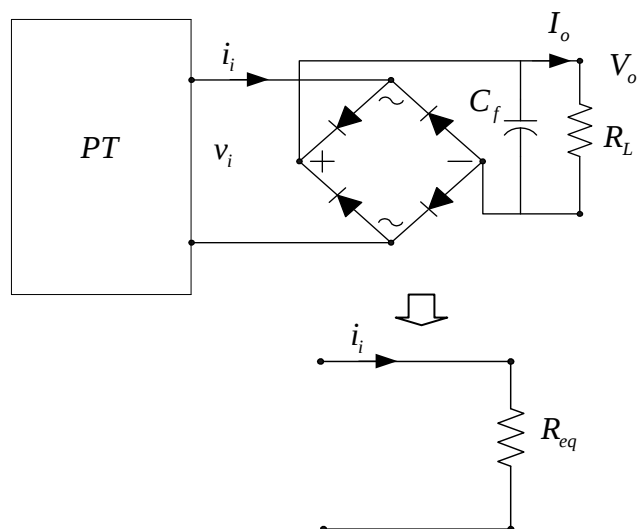
เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดลดลง วงจรควบคุมจะลดความถี่ลงทำให้ Impedance ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ลดลง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์น้อยลง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมากขึ้น จึงทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ ตรงกันข้ามเมื่อกระแสโหลดลดลงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมากขึ้นวงจรควบคุมจะเพิ่มความถี่ขึ้นทำให้ Impedance ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มากขึ้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดน้อยลง จึงทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้เช่นกัน

4.2.2 เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดอัตราการขยายแรงดันทางไฟฟ้า โดยแรงดันทางไฟฟ้าทางด้านทางออกมีขนาดแปรตามความถี่ของการสวิตช์ที่คอนเวอร์เตอร์ และรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางออกเป็นสัญญาณไฟฟ้าสลับที่มีความถี่ตามความถี่ของการสวิตช์ที่คอนเวอร์เตอร์เช่นกัน ในการออกแบบต้องวิเคราะห์การทำงานขณะที่โหลดเหมาะสม ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 สมการที่ (3.42) เพราะในการออกแบบต้องออกแบบจะเลือกโหลดที่ทำให้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด [10]

4.2.3 วงจร Bridge Rectifier

ในส่วนนี้ใช้วงจร Full Bridge Rectifier ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ด้านออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจ่ายให้กับโหลด ในวิเคราะห์ ได้ย้ายโหลด R_L ผ่าน Full Bridge Rectifier ได้ R_{eq} ตามรูปที่ 4.3 [12]



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูล Full Bridge Rectifier

ให้กำลังด้านทางเข้าเท่ากับกำลังด้านทางออกตามรูปที่ 4.3 จะได้

$$P_i = P_o \quad (4.1)$$

โดยที่ $P_i = \frac{I_i^2}{2} R_{eq} \quad (4.2)$

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_i d(\omega t) = \frac{2I_i}{\pi} \quad (4.3)$$

$$P_o = I_o^2 R_L = \left(\frac{2I_i}{\pi} \right)^2 R_L \quad (4.4)$$

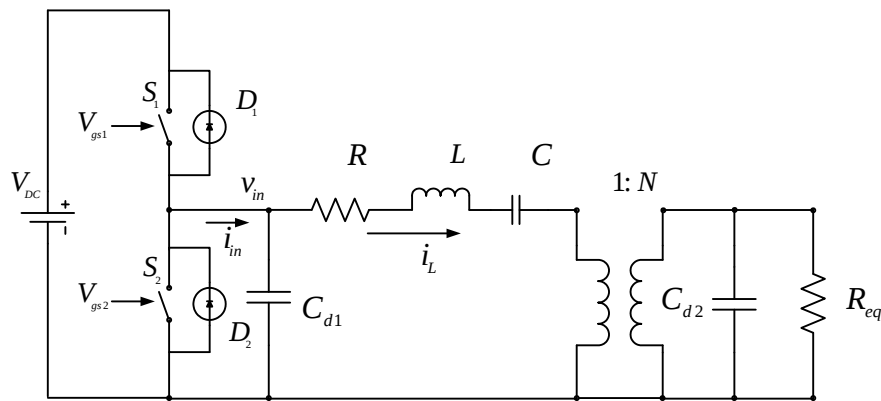
แทนสมการที่(4.2)และ(4.4) ในสมการที่ 4.1

$$\frac{I_i^2}{2} R_{eq} = \left(\frac{2I_i}{\pi} \right)^2 R_L \quad (4.5)$$

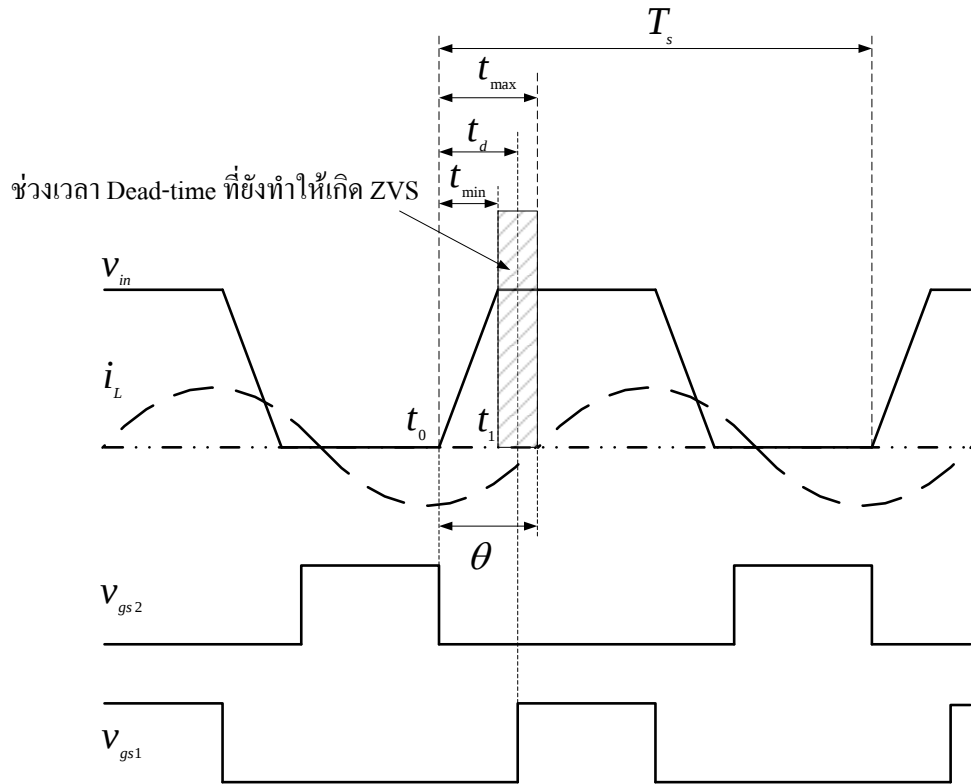
$$R_{eq} = R_L \frac{8}{\pi^2} \quad (4.6)$$

4.3 สวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ Zero Voltage Switching (ZVS)

ในการออกแบบให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ต้องออกแบบให้สวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ ZVS ก็คือต้องให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ ก่อนที่จะมีการปิดหรือเปิดสวิตช์ การออกแบบต้องกำหนด Dead-time (t_d) ที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ ในการกำหนด Dead-time (t_d) จะกำหนดน้อยไปหรือมากไปไม่ได้เพราะจะไม่ทำให้เกิดการทำงานแบบ ZVS, จึงต้องกำหนดเงื่อนไขสองประการในการออกแบบ คือช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่น้อยที่สุด ($t_d = t_{min}$) ที่จะทำให้เกิด ZVS และช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่มากที่สุด ($t_d = t_{max}$) ที่ยังคงทำให้เกิดการทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของเบิซโซอิลีกทริกทรานฟอ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.5 ช่วงเวลาการทำงานของ ZVS

4.3.1 เงื่อนไขช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่น้อยที่สุด (t_{min}) (พิจารณาเฉพาะที่ S_2)

ช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่น้อยที่สุด (t_{min}) ที่ S_2 ทำงานได้แบบ ZVS อธิบายได้คือ ถ้าที่ $t_d = t_{min}$, $v_{in} = V_{dc}$ ดังนั้น v_{ds2} เท่ากันศูนย์, เมื่อ S_2 ปิดวงจรจึงเกิดการ ทำงานแบบ ZVS, การวิเคราะห์ เริ่มจากสมการช่วงเวลาในตัวเก็บประจุเสมือนด้านทางเข้า (C_{dl}) เก็บประจุ (Charge) จากแหล่งจ่ายไฟ ฟัดตรงด้านทางเข้า (V_{dc}) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้ [13] (เนื่องจากปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์มี Quality Factor (Q) สูงจึงสามารถประมาณว่ากระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ L เป็นสัญญาณ Sinusoidal [13])

$$i(t) = I_L \sin(\omega t - \theta) \quad (4.6)$$

ขั้นตอนการเก็บประจุของ C_{dl} ในช่วงเวลา $t_0 < t < t_1$ ในรูปที่ 4.5 เป็นช่วงเวลาสั้นๆใน หนึ่งคาบเวลาเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณจึงประมาณว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลใน C_{dl} เป็นค่าคงที่ค่า หนึ่งโดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า C_{dl} ที่ t_0 ที่ดังนี้ [13]

$$i_{C_{d1}(t_0)} = I_{cd1} = -I_L \sin(-\theta) \quad (4.7)$$

$$I_{C_{d1}} = I_L \sin(\theta) \quad (4.8)$$

สมการความสัมพันธ์ ของกระแสที่ไหลเข้า C_{d1}

$$i_{C_{d1}} = C_{cd1} \frac{dV_{DC}}{dt}$$

$$dt = \frac{C_{d1}}{i_{C_{d1}}} dV_{DC} \quad (4.9)$$

$$\int dt = \int \frac{C_{d1}}{i_{C_{d1}}} dV_{DC} \quad (4.10)$$

$$t = \frac{C_{d1}}{i_{C_{d1}}} V_{DC} \quad (4.11)$$

แทน $i_{(C_{d1})}$ ด้วยสมการที่ (4.3) และ $t = t_{\min}$

$$t_{\min} = \frac{C_{d1} V_{DC}}{I_L \sin(\theta)} \quad (4.12)$$

แรงดันทางไฟฟ้าที่ V_{in} เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูทำให้ยากต่อการคำนวณ จึงประมาณให้แรงดันทางไฟฟ้าที่ V_{in} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเพราะค่ามี fundamental ใกล้เคียงกันโดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ V_{in} มีค่า fundamental ดังนี้ [13]

$$V_{in} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \quad (4.13)$$

ค่า Impedance ที่ทางเข้าของเบิซโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ของรูปที่ 4.5 เมื่อไม่พิจารณาค่า Impedance ของ C_{d1}

$$Z_{in} = R_{in} + X_{in} \quad (4.14)$$

$$R_{in} = R + \frac{R_{eq}}{N^2(1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \quad (4.15)$$

$$X_{in} = 2\pi f_s L - \frac{1}{2\pi f_s C} - \frac{(2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2}{(2\pi f_s C_{d2} N^2)(1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \quad (4.16)$$

สมการที่ (4.9) (4.10) และ (4.11) คำนวณขนาด Impedance ที่ทางด้านเข้า

$$|Z_{in}| = \sqrt{R_{in}^2 + X_{in}^2} \quad (4.17)$$

สมการที่ (4.9)(4.10) (และ (4.11) คำนวณมุม Impedance ทางด้านเข้า

$$\theta = a \tan \left[\frac{X_{in}}{R_{in}} \right] \quad (4.18)$$

ค่ากระแสที่ L จากสมการที่ (4.8) และ (4.12)

$$I_L = \frac{V_{in}}{|Z_{in}|} = \frac{2V_{DC}}{\pi |Z_{in}|} \quad (4.19)$$

แทนค่าสมการ(4.14)ลงในสมการที่(4.7)

$$t_{\min} = \frac{\pi C_{d1} |Z_{in}|}{2 \sin(\theta)} \quad (4.20)$$

4.3.2 เงื่อนไขช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่มากที่สุด (t_{max}) (พิจารณาเฉพาะที่ S_2)

ช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่มากที่สุด (t_{max}) ที่ S_2 ยังคงทำงานได้แบบ ZVS จากรูปที่ 4.5 ถ้า สวิตช์ S_2 ปิดวงจรหลังจากกระแส I_L เริ่มเป็นบวกจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ C_{d1} จ่ายกระแสแทน V_{DC} เพราะสวิตช์ S_1 เปิดอยู่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ V_{in} ลดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า V_{ds2} ไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น ถ้า S_2 ปิดวงจรทำให้เกิดการสูญเสียที่สวิตช์, และการทำงานไม่เป็นแบบ ZVS จากรูปที่ 4.5 วิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของมุมของกระแสไฟฟ้า I_L ในหนึ่งคาบเวลา

ถ้าหนึ่งคาบเวลา (T_s) เท่ากับ 360° แล้วคาบเวลา t_{max} เท่ากับมุมของกระแส I_L ตามรูปที่ 4.5

$$\frac{T_s}{360^\circ} = \frac{t_{\max}}{\theta} \quad (4.21)$$

$$t_{\max} = \frac{T_s \theta}{360^\circ} \quad (4.22)$$

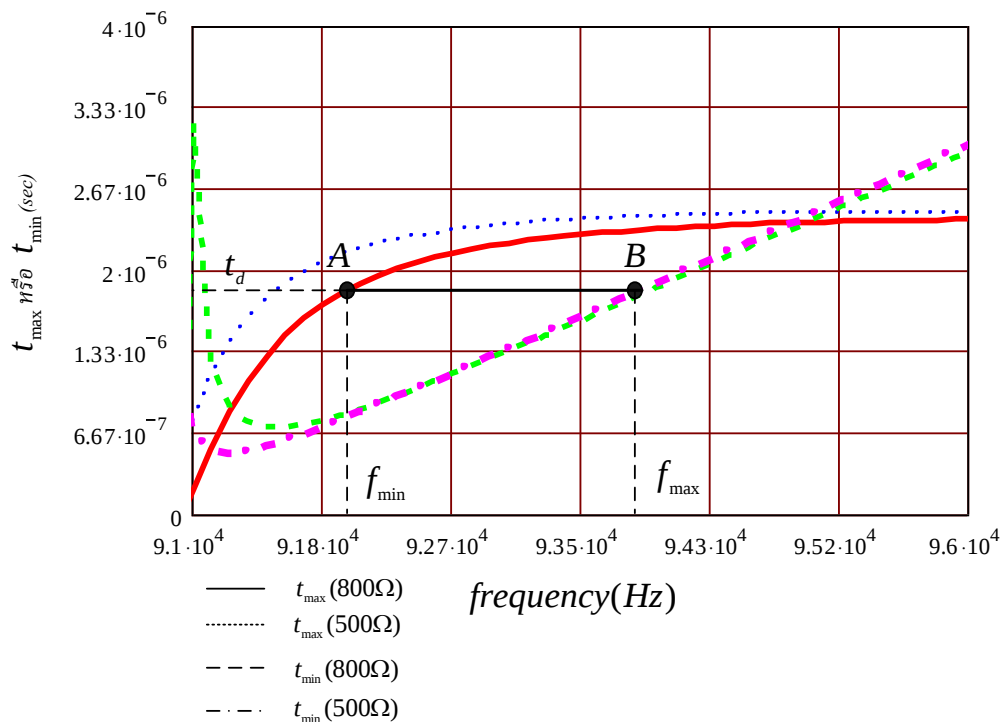
โดยที่

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (4.23)$$

แทนค่าสมการที่(4.18)ลงในสมการที่(4.17) ได้

$$t_{\max} = \frac{\theta}{f_s 360^\circ} \quad (4.24)$$

นำสมการ (4.15) และ (4.19) มาวิเคราะห์เพื่อหาช่วงเวลา Dead-time ที่ยังอยู่ภายใต้เงื่อนไข ZVS จากรูปที่ 4.6 ช่วงเวลา Dead-time (t_d) ที่อยู่ระหว่าง $t_{\min}$ และ $t_{\max}$ เป็นพื้นที่ที่ยังอยู่ในเงื่อนไข ZVS ในการออกแบบให้กำหนดช่วงเวลา Dead-time (t_d) แล้วลากเส้นภายในพื้นที่ของเงื่อนไข ZVS ทำให้ได้ความถี่สูงสุดของการสวิตช์ ($f_{\max}$) และความถี่ต่ำสุดของการสวิตช์ ($f_{\min}$) เพื่อใช้ในการออกแบบต่อไป



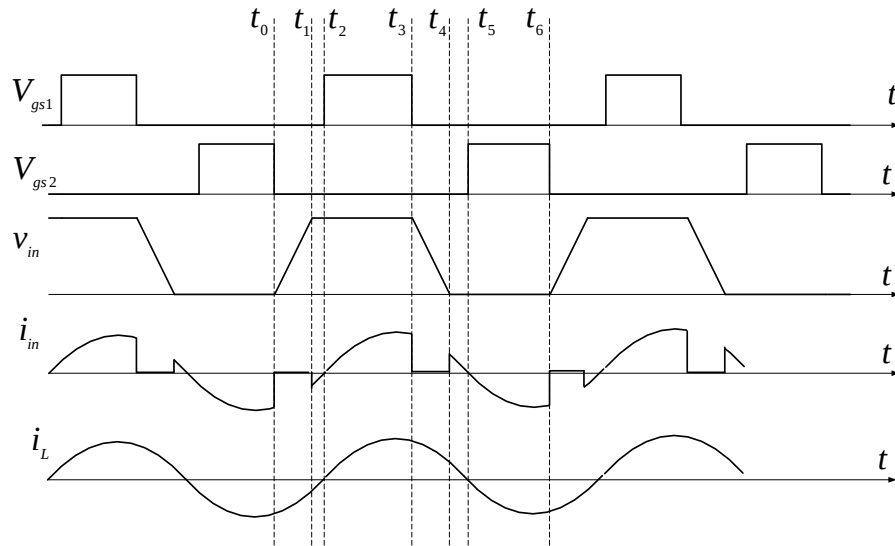
รูปที่ 4.6 แสดงช่วงเวลา Dead-time ที่ทำให้เกิดเงื่อนไข ZVS

4.4 การทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ภายใต้เงื่อนไข ZVS

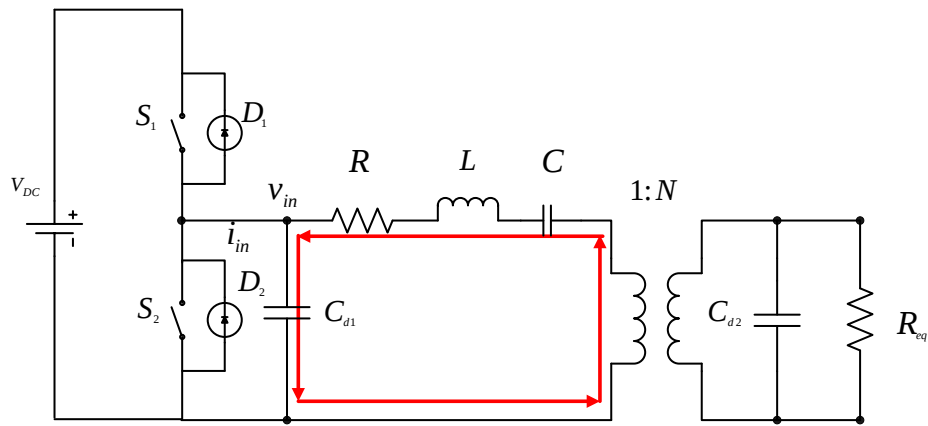
การทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 ตามรูปที่ 4.4 ภายใต้การทำงานที่สวิตช์ทำงาน ZVS อธิบายตามคาบเวลาการทำงานได้ดังต่อไปนี้ [13]

การเกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่หนึ่ง (S_1) จากรูปที่ 4.7 ที่คาบเวลา $t_o - t_1$ ตัวเก็บประจุด้านทางเข้า C_{dl} เก็บประจุ (Charge) จนเต็มทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่สองเท่ากับ V_{DC} ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่หนึ่งเป็นศูนย์ เมื่อสวิตช์ตัวที่หนึ่งทำงานในช่วงเวลานี้ จะทำให้เกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่หนึ่ง

การเกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่สอง (S_2) จากรูปที่ 4.7 ที่คาบเวลา $t_3 - t_4$ ตัวเก็บประจุด้านทางเข้า C_{dl} คายประจุ (Discharge) จนหมดทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ตัวที่สองเท่ากับศูนย์ เมื่อสวิตช์ตัวที่สองทำงานในช่วงเวลานี้จะทำให้เกิด ZVS ในสวิตช์ตัวที่สอง



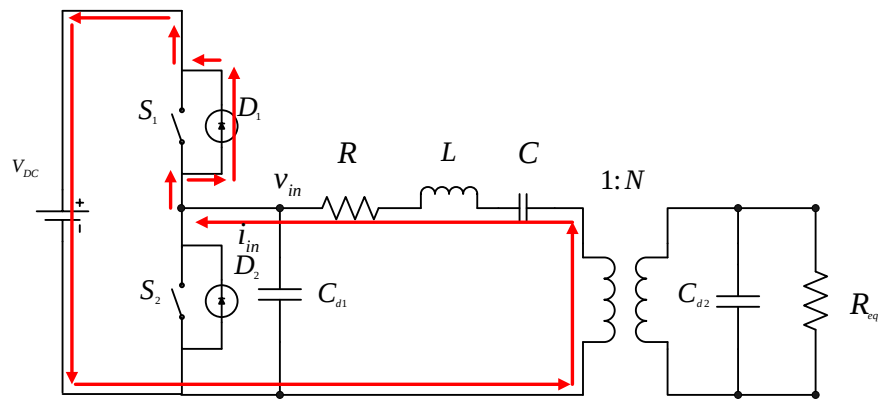
รูปที่ 4.7 คาบเวลาการทำงานของเบิซออิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์เมื่อทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.8 การทำงานของเบิซออิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_0 - t_1$

4.4.1 ช่วงเวลาแรก ที่เวลา t_0 ถึง t_1

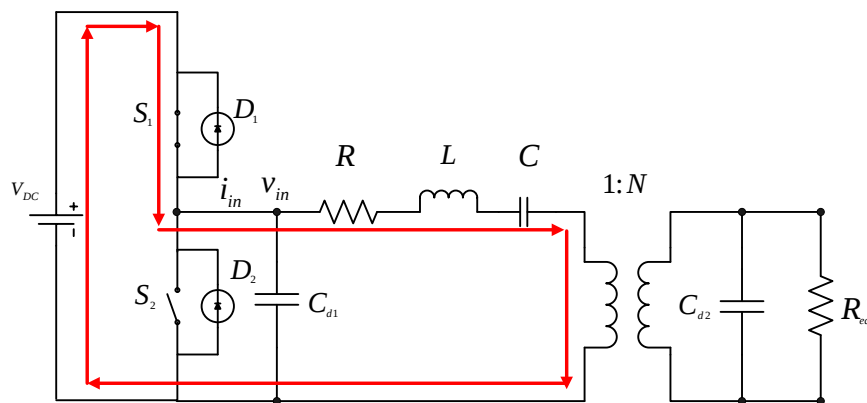
เมื่อสวิตช์ S_2 เริ่มเปิดวงจรที่เวลา t_0 โดยที่สวิตช์ S_1 ยังคงเปิดวงจรอยู่ C_{dl} เริ่มเก็บประจุไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าจากตัวเหนี่ยวนำ L จนแรงดันไฟฟ้าที่ C_{dl} มีค่าเท่ากับ V_{DC} ขณะสวิตช์ S_2 เปิดวงจรแรงดันไฟฟ้าที่ S_2 จะเท่ากับศูนย์ เพราะ C_{dl} มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นศูนย์ทำให้เกิดทำงานแบบ ZVS และ C_{dl} จะเก็บประจุไฟฟ้าไปตลอดช่วงเวลา t_0 ถึง t_1 ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 จะต้องไม่ปิดวงจรก่อนที่ C_{dl} เก็บประจุไฟฟ้าจนแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{dl} เท่ากับ V_{DC} เพราะถ้าสวิตช์ S_1 ปิดวงจรก่อน v_{Cdl} เท่ากับ V_{DC} , v_{ds1} จะไม่เท่ากับศูนย์ทำให้สวิตช์ S_1 ไม่ทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.9 การทำงานของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_1 - t_2$

4.4.2 ช่วงเวลาที่สอง ที่เวลา t_1 ถึง t_2

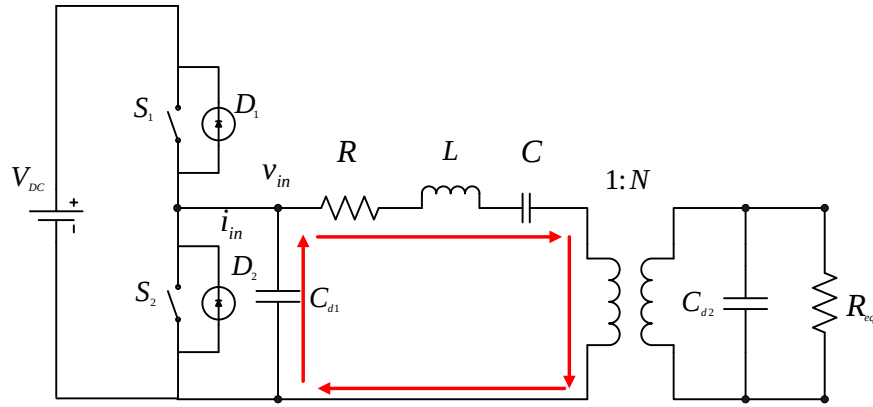
ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 และ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่ C_{d1} เก็บประจุไฟฟ้าถ้า v_{cd1} มากกว่า V_{dc} จะทำให้ D_1 ทำงานกระแสไฟฟ้าไหลจาก C_{d1} ผ่าน D_1 ไปยัง V_{dc}



รูปที่ 4.10 การทำงานของเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_2 - t_3$

4.4.3 ช่วงเวลาที่สาม ที่เวลา t_2 ถึง t_3

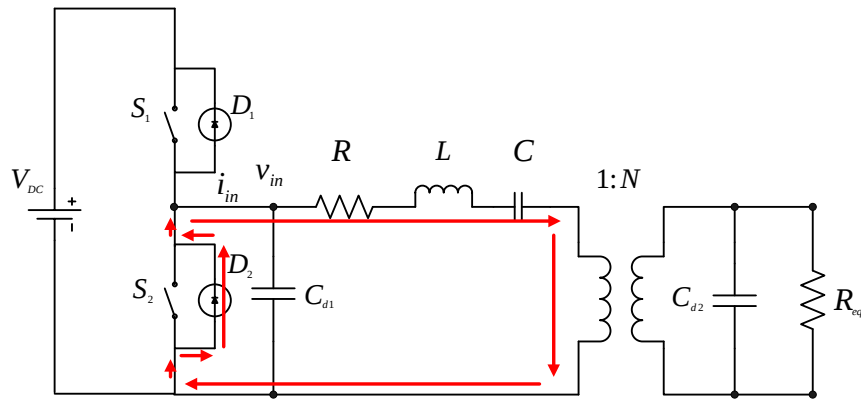
ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่แต่สวิตช์ S_1 เริ่มปิดวงจรหลังระยะเวลาที่ v_{cd1} เท่ากับ V_{dc} , v_{ds1} เท่ากับศูนย์ S_1 ทำงานแบบ ZVS กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสวิตช์ S_1 ไปที่ R, L และ C โดยไม่ไหลเข้า C_{d1} เพราะมีประจุไฟฟ้าเต็ม



รูปที่ 4.11 การทำงานของเบิซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_3 - t_4$

4.4.4 ช่วงเวลาที่สี่ ที่เวลา t_3 ถึง t_4

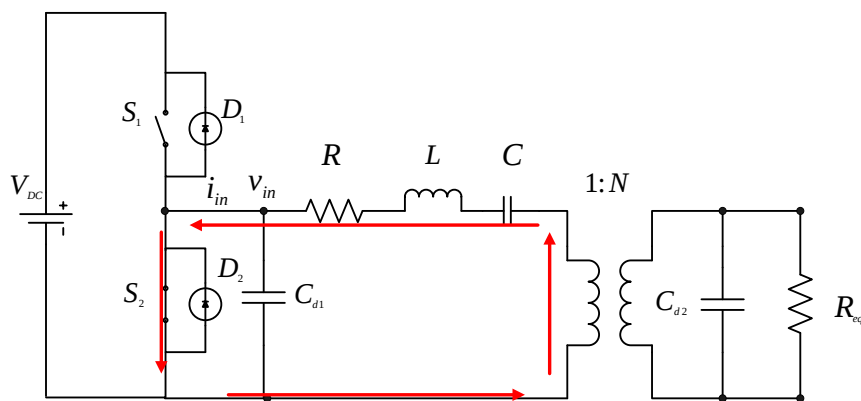
เมื่อสวิตช์ S_1 เริ่มเปิดวงจรสวิตช์ที่เวลา t_3 , เมื่อสวิตช์ S_1 เริ่มเปิดวงจรแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ S_1 จะเท่ากับศูนย์เพราะ C_{dl} มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ V_{dc} , S_1 จึงทำงานแบบ ZVS โดยที่ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่ C_{dl} จะคายประจุไฟฟ้าตลอดช่วงเวลา t_3 ถึง t_4 ให้ตัวเหนี่ยวนำ L จนแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{dl} มีค่าลดลงจนเท่ากับศูนย์ ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_2 จะต้องไม่ปิดวงจรก่อนที่ C_{dl} คายประจุไฟฟ้าจนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{dl} เท่ากับศูนย์ เพราะถ้าสวิตช์ S_2 ปิดวงจรก่อนจะทำให้ S_2 ไม่ทำงานแบบ ZVS



รูปที่ 4.12 การทำงานของเบิซอเล็กทริกทรานฟอเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_4 - t_5$

4.4.5 ช่วงเวลาที่ห้า ที่เวลา t_4 ถึง t_5

ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 และ S_2 ยังเปิดวงจรอยู่ C_{dl} คายประจุหมด แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{dl} มีค่าเท่ากับศูนย์ช่วงเวลา t_4 ถึง t_5 กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่าน D_2



รูปที่ 4.13 การทำงานของปัสโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ที่เวลา $t_5 - t_6$

4.4.6 ช่วงเวลาที่หก ที่เวลา t_5 ถึง t_6

ช่วงเวลานี้สวิตช์ S_1 ยังเปิดวงจรอยู่แต่สวิตช์ S_2 เริ่มปิดวงจรหลังระยะเวลา $t = t_5$ ที่แรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อม C_{d1} มีค่าเท่ากับศูนย์กระแสไฟฟ้าจะไหลจาก R , L และ C ผ่านสวิตช์ S_2 โดยไม่ไหลเข้า C_{d1} เพราะสวิตช์ S_2 ต่อขนาน C_{d1} และ v_{cd1} เท่ากับศูนย์ ดังนั้น S_2 ทำงานแบบ ZVS

4.7 สรุป

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ประกอบด้วยภาคกำลังและภากระบบควบคุม โดยมีวงจรภาคกำลังเป็นวงจรหลักในการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ต้องการ ส่วนระบบควบคุมเป็นวงจรสำหรับควบคุมผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้เป็นไปตามคุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องการ ได้แก่การมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว และความสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้มีค่าอยู่ในย่านที่กำหนดได้ โดยวิธีการออกแบบวงจรควบคุมที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ คือ วิธีผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป