

บทที่ 3

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

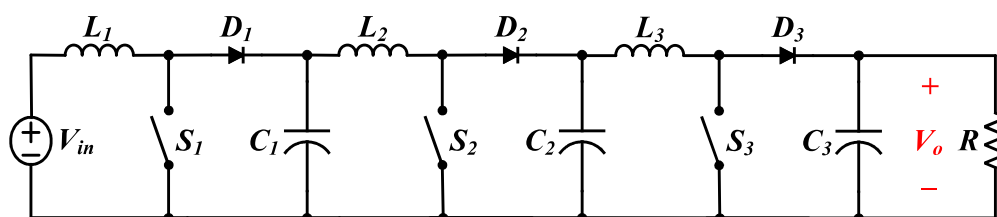
3.1 บทนำ

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อหกระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนที่มีแรงดันต่ำประมาณ 20V ให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้น เพื่อนำไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง หรือแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยอาศัยวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ ในบทที่ 3 จะนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยกำหนดให้ระบบมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีแรงดันเท่ากับ 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 400V สำหรับโหลดตัวต้านทาน 1600Ω ซึ่งจะได้กำลังไฟฟ้าเป็น 100W ในการออกแบบจะเริ่มจากการอธิบายโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น หลักการทำงานของวงจร การพิจารณาอัตราขยายแรงดัน และกระแสของวงจร การออกค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ หลังจากนั้นเป็นการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรดังกล่าวในด้านการหกระดับแรงดัน โดยเนื้อหาที่เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นในบทที่ 3 นี้ จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาวิธีการควบคุมฟัซซี่ รวมถึงตรวจจับความผิดปกติ และการสร้างความคงทนต่อความผิดปกติให้กับวงจรนี้ต่อไป

3.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดันต่ำให้ได้แรงดันเอาต์พุต (V_{out}) กระแสตรงที่เพิ่มขึ้น โดยใช้หลักการนำกระแสและหยุดนำกระแสของสวิตช์ เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีแรงดันที่ต่ำประมาณ 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 400V ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า การใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมอาจไม่สามารถทำได้ เนื่องจากอัตราขยายแรงดันดังกล่าวส่งผลให้ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์สูงมาก ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สูงมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของ

วงจรลด การนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเรียงต่อกันหลายชั้นสามารถช่วยลดปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามจำนวนสวิตช์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นที่นำมาเรียงต่อกัน วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสามารถเพิ่มแรงดันได้ถึง 20 เท่า โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ไม่สูงมากนัก ทั้งนี้โครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นประกอบด้วย แหล่งจ่ายอินพุต (V_{in}) สวิตช์กำลังสามตัว (S_1, S_2, S_3) ไดโอดสามตัว (D_1, D_2, D_3) ตัวเหนี่ยวนำสามตัว (L_1, L_2, L_3) ตัวเก็บประจุสามตัว (C_1, C_2, C_3) และโหลดตัวต้านทาน (R) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายชั้น มีช่วงการทำงานของสวิตช์นำกระแส และหยุดนำกระแสที่พร้อมกันและไม่พร้อมกัน จะขึ้นอยู่กับจำนวนสวิตช์กำลังที่มีอยู่ในวงจร S_1, S_2 และ S_n ดังนั้นโหมดการทำงานของวงจรกรณี n สวิตช์ จะมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3.1) โดยที่ N_m คือจำนวนของโหมดการทำงาน และ n คือจำนวนสวิตช์กำลังที่ปรากฏอยู่ในวงจร ในกรณีที่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะมีสวิตช์กำลังปรากฏอยู่ในวงจรจำนวนสามตัว จึงมีโหมดการทำงานของวงจร 8 โหมด ดังตารางที่ 3.1

$$N_m = 2^n \quad (3.1)$$

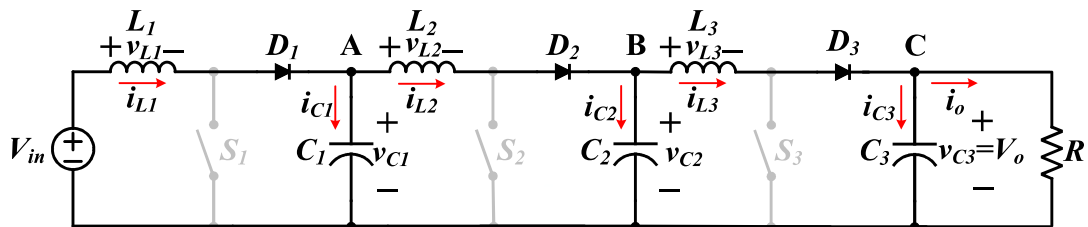
ตารางที่ 3.1 โหมดการทำงานของแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

โหมดการทำงาน	สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1)	สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2)	สวิตช์ตัวที่ 3 (S_3)
1	OFF	OFF	OFF
2	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF
4	OFF	ON	ON
5	ON	OFF	OFF

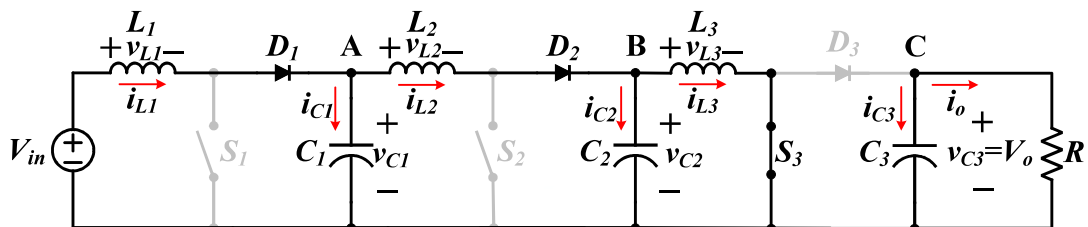
ตารางที่ 3.1 โหมดการทำงานของแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น (ต่อ)

โหมดการทำงาน	สวิตช์ตัวที่ 1 (S_1)	สวิตช์ตัวที่ 2 (S_2)	สวิตช์ตัวที่ 3 (S_3)
6	ON	OFF	ON
7	ON	ON	OFF
8	ON	ON	ON

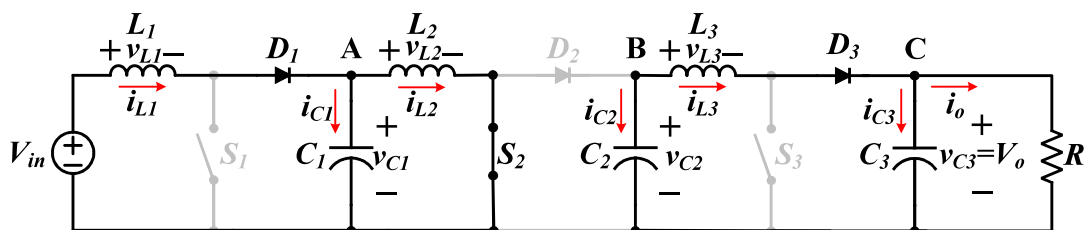
จากตารางที่ 3.1 สามารถพิจารณาการทำงานของสวิตช์ S_1 , S_2 และ S_3 ชะนะนำกระแส และหยุดนำกระแสของสวิตช์ได้ทั้งหมด 8 โหมดดังรูปที่ 3.2 ถึง 3.9 ตามลำดับ



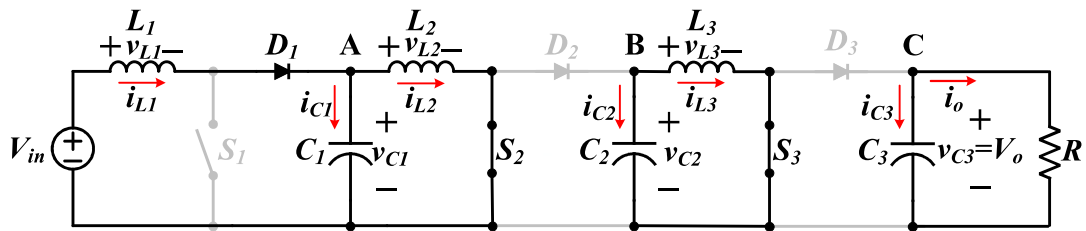
รูปที่ 3.2 โหมดการทำงานที่ 1 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น



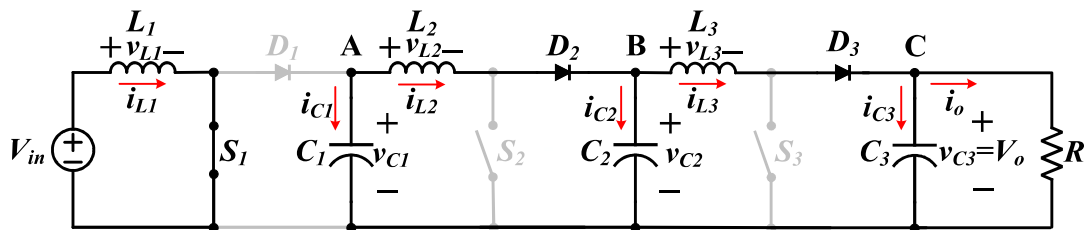
รูปที่ 3.3 โหมดการทำงานที่ 2 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น



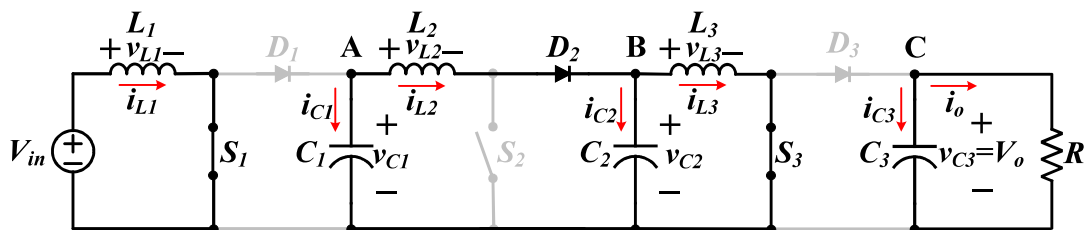
รูปที่ 3.4 โหมดการทำงานที่ 3 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น



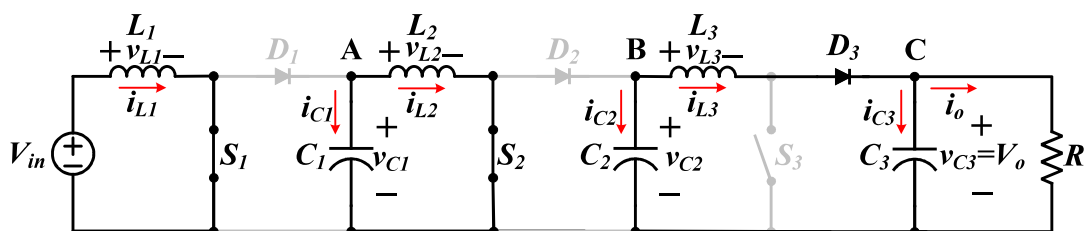
รูปที่ 3.5 โหมดการทำงานที่ 4 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



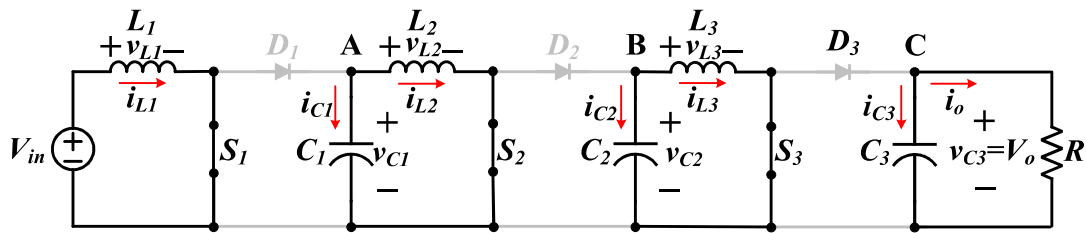
รูปที่ 3.6 โหมดการทำงานที่ 5 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



รูปที่ 3.7 โหมดการทำงานที่ 6 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

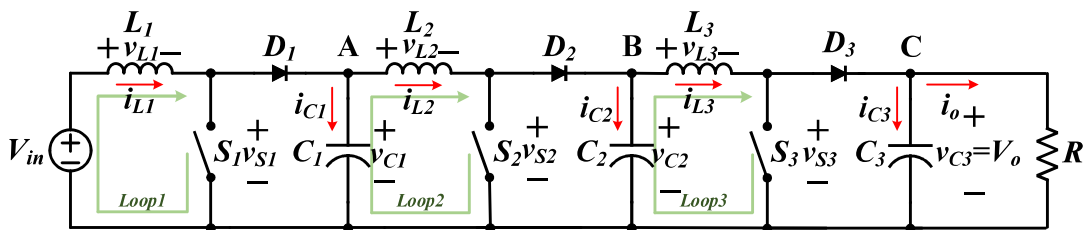


รูปที่ 3.8 โหมดการทำงานที่ 7 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น



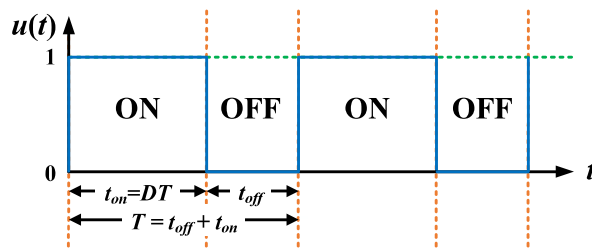
รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานที่ 8 ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

จากการทำงานทั้ง 8 โหมดข้างต้น สามารถวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นโดยพิจารณาตัวแปรสวิตช์ (Switched variable) ประกอบด้วยแรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสที่ไหลผ่านไดโอด ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวแปรสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นจะใช้สัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์ ($u(t)$) เพื่อพิจารณาตัวแปรสวิตช์ในช่วงนำกระแส และหยุดนำกระแสของสวิตช์แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์

จากรูปที่ 3.11 สามารถพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ (D) ได้จากช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส (t_{on}) และช่วงเวลาที่ยสวิตช์หยุดนำกระแส (t_{off}) ของสวิตช์ดังสมการที่ (3.2) เมื่อ T คือคาบการสวิตช์

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.2)$$

จากการพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ข้างต้นสามารถหาแรงดันตกคร่อมสวิตช์ทั้งสามตัว (v_{S1} , v_{S2} , v_{S3}) และกระแสที่ไหลผ่านไวด์ทั้งสามตัว (i_{D1} , i_{D2} , i_{D3}) โดยที่ u_1 , u_2 และ u_3 คือสัญญาณการสวิตช์ของสวิตช์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ตัวแปรสวิตช์ในฟังก์ชันการสวิตช์ของแรงดันตกคร่อมสวิตช์ กระแสที่ไหลผ่านไวด์

สวิตช์	โหมด	แรงดันสวิตช์	ฟังก์ชันการสวิตช์ของแรงดันตกคร่อมสวิตช์	กระแสไวด์	ฟังก์ชันการสวิตช์ของกระแสไหลผ่านไวด์
S_1	ON	$v_{S1} = 0$	$v_{S1} = (1-u_1)v_{C1}$	$i_{D1} = 0$	$i_{D1} = (1-u_1)i_{L1}$
	OFF	$v_{S1} = v_{C1}$		$i_{D1} = i_{L1}$	
S_2	ON	$v_{S2} = 0$	$v_{S2} = (1-u_2)v_{C3}$	$i_{D2} = 0$	$i_{D2} = (1-u_2)i_{L2}$
	OFF	$v_{S2} = v_{C2}$		$i_{D2} = i_{L2}$	
S_3	ON	$v_{S3} = 0$	$v_{S3} = (1-u_3)v_{C3}$	$i_{D3} = 0$	$i_{D3} = (1-u_3)i_{L3}$
	OFF	$v_{S3} = v_{C3}$		$i_{D3} = i_{L3}$	

จากตารางที่ 3.2 สามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นดังแสดงในรูปที่ 3.10 และเขียนสมการให้อยู่ในรูปตัวแปรฟังก์ชันการสวิตช์ จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law: KCL) และกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law: KVL) ได้ดังนี้

รูป 1 : $-V_{in} + v_{L1} + v_{S1} = 0$

$$i_{L1} = \frac{1}{L_1}(-v_{S1} + V_{in}) \quad (3.3)$$

รูป 2 : $-v_{C1} + v_{L2} + v_{S2} = 0$

$$\dot{i}_{L2} = \frac{1}{L_2}(-v_{S2} + v_{C1}) \quad (3.4)$$

ลูป 2 : $-v_{C3} + v_{L3} + v_{S3} = 0$

$$\dot{i}_{L3} = \frac{1}{L_3}(-v_{S3} + v_{C2}) \quad (3.5)$$

โหนด A : $-i_{D1} + i_{C1} + i_{L2} = 0$

$$\dot{v}_{C1} = \frac{1}{C_1}(-i_{D1} + i_{L2}) \quad (3.6)$$

โหนด A : $-i_{D2} + i_{C2} + i_{L3} = 0$

$$\dot{v}_{C2} = \frac{1}{C_2}(-i_{D2} + i_{L3}) \quad (3.7)$$

โหนด A : $-i_{D3} + i_{C3} + i_O = 0$

$$\dot{v}_{C3} = \frac{1}{C_3} \left(-i_{D3} + \frac{1}{R} v_{C3} \right) \quad (3.8)$$

แทนค่าฟังก์ชันการสวิตช์ v_{S1} , v_{S2} , v_{S3} , i_{D1} , i_{D2} และ i_{D3} จากตารางที่ 3.2 ลงในสมการที่ (3.3) ถึง (3.8) จะได้อนุพันธ์กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม และอนุพันธ์แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามดังนี้

$$\dot{i}_{L1} = \frac{1}{L_1} \left(-(1-u_1)v_{C1} + v_{in} \right) \quad (3.9)$$

$$\dot{i}_{L2} = \frac{1}{L_2} \left(-(1-u_2)v_{C2} + v_{C1} \right) \quad (3.10)$$

$$\dot{i}_{L3} = \frac{1}{L_3} \left(-(1-u_3)v_{C3} + v_{C2} \right) \quad (3.11)$$

$$\dot{v}_{C1} = \frac{1}{C_1} \left(-(1-u_1)i_{L1} + i_{L2} \right) \quad (3.12)$$

$$\dot{v}_{C2} = \frac{1}{C_2} \left(-(1-u_2)i_{L2} + i_{L3} \right) \quad (3.13)$$

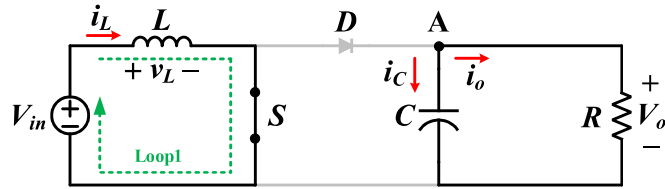
$$\dot{v}_{C3} = \frac{1}{C_3} \left(-(1-u_3)i_{L3} + \frac{1}{R}v_{C3} \right) \quad (3.14)$$

จากการพิจารณาตัวแปรฟังก์ชันการสวิตช์ประกอบด้วยแรงดันตกคร่อมสวิตช์ทั้งสามตัว กระแสที่ไหลผ่านไดโอดทั้งสามตัว จะได้อนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม แสดงถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหก นอกจากนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นจะถูกใช้ในการการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำของวงจร ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.3 อัตราขยายแรงดันและอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

การพิจารณาอัตราขยายแรงดันและกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเกิดจากการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาต่อเรียงกันสามขั้น โดยสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (v_L), กระแสที่ไหลผ่าน

ตัวเก็บประจุ (i_C), V_{in} , V_{out} , D และสัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์ ในช่วงการนำกระแส และหยุดนำกระแส ของสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมแสดงดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมขณะที่ในช่วงที่สวิตช์นำกระแส

ลูป 1 : $-V_{in} + v_L = 0$

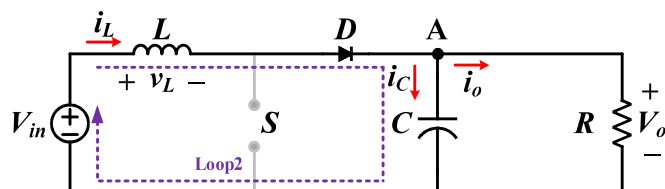
$$v_L = V_{in} \quad (3.15)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (3.16)$$

โหนด A : $i_o + i_C = 0$

$$i_C = -i_o = -\frac{V_o}{L} \quad (3.17)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{V_o}{RC} \quad (3.18)$$



รูปที่ 3.13 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส

ลูป 2 : $-V_{in} + v_L + V_o = 0$

$$v_L = V_{in} - V_o \quad (3.19)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (3.20)$$

โนด A : $-i_L + i_o + i_c = 0$

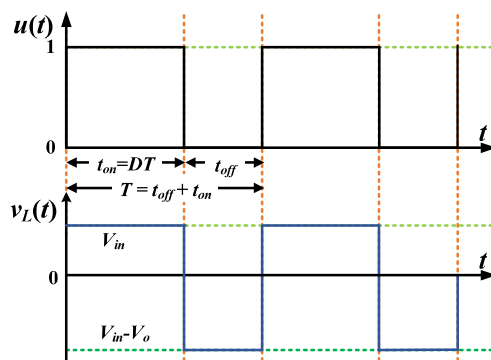
$$i_c = i_L - i_o = i_L - \frac{V_o}{L} \quad (3.21)$$

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \quad (3.22)$$

จากความสัมพันธ์ของ v_L และ i_c ในสภาวะอยู่ตัว ขณะที่สวิตช์นำกระแส และหยุดนำกระแส สามารถพิจารณาหาอัตราขยายแรงดัน และกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นดังต่อไปนี้

3.3.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

หลักการสมดุลพลังก์เชื่อมโยงในตัวเหนี่ยวนำถูกพิจารณาสำหรับหาอัตราขยายแรงดัน (M_V) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม จากสมการที่ (3.15) และ (3.19) สามารถหาค่าเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (v_L) ในสภาวะอยู่ตัวได้จากรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในสภาวะอยู่ตัว

จาก v_L ในสภาวะอยู่ตัว สามารถพิจารณาค่าเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ $\langle v_L \rangle$ มีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงคาบการทำงานของสวิตช์ และจะได้ค่าอัตราขยายแรงดันดังสมการที่ (3.23)

$$\text{ค่าเฉลี่ย : } \langle v_L \rangle = \frac{DTV_{in} + (1-D)T(V_{in} - V_o)}{T} = 0$$

$$M_V(D) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (3.23)$$

จากอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมข้างต้น สามารถพิจารณาอัตราขยายแรงดันในแต่ละชั้น (M_{V1} , M_{V2} , M_{V3}) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังสมการที่ (3.24), (3.25) และ (3.26) ตามลำดับ โดยที่ D_1 , D_2 และ D_3 คือวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ของสวิตช์ตัวที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

$$M_{V1}(D) = \frac{V_{C1}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D_1)} \quad (3.24)$$

$$M_{V2}(D) = \frac{V_{C2}}{V_{C1}} = \frac{1}{(1-D_2)} \quad (3.25)$$

$$M_{V3}(D) = \frac{V_o}{V_{C2}} = \frac{1}{(1-D_3)} \quad (3.26)$$

จากอัตราขยายแรงดันในแต่ละชั้นข้างต้นสามารถหาอัตราขยายแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ดังสมการที่ (3.27)

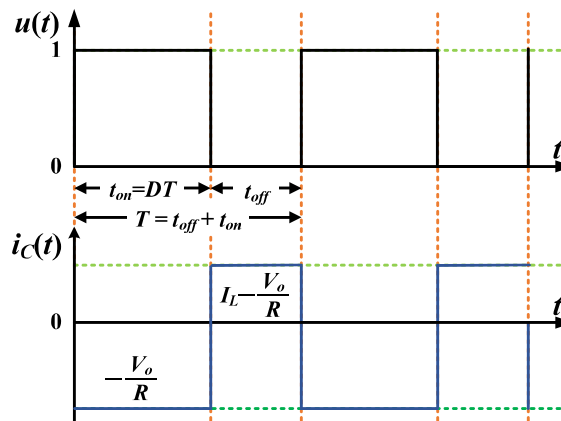
$$M_V(D) = \frac{V_o}{V_{in}} = \begin{cases} \frac{\frac{V_{C1}}{V_{in}} \cdot \frac{V_{C2}}{V_{C1}} \cdot \frac{V_o}{V_{C2}}}{M_{V1}(D) \cdot M_{V2}(D) \cdot M_{V3}(D)} \\ \frac{1}{(1-D_1) \cdot (1-D_2) \cdot (1-D_3)} \end{cases} \quad (3.27)$$

3.3.2 อัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

อัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมจะพิจารณาจากหลักการสมดุลประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ จากสมการที่ (3.17) และ (3.21) สามารถหาค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_C) ในสภาวะอยู่ตัวดังรูปที่ 3.15

$$\text{ค่าเฉลี่ย : } \langle i_C \rangle = \frac{DT \left(-\frac{V_o}{R} \right) + (1-D)T \left(I_L - \frac{V_o}{R} \right)}{T} = 0$$

$$M_I(D) = \frac{V_o}{I_L R} = \frac{i_o}{I_L} = (1-D) \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.15 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัว

จากอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม ดังสมการที่ (3.28) สามารถพิจารณาอัตราขยายกระแสในแต่ละชั้น (M_{I1} , M_{I2} , M_{I3}) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นดังสมการที่ (3.29), (3.30) และ (3.31) ตามลำดับ

$$M_{I1}(D) = \frac{i_{L2}}{i_{L1}} = (1 - D_1) \quad (3.29)$$

$$M_{I2}(D) = \frac{i_{L3}}{i_{L2}} = (1 - D_2) \quad (3.30)$$

$$M_{I3}(D) = \frac{i_o}{i_{L3}} = (1 - D_3) \quad (3.31)$$

จากอัตราขยายกระแสในแต่ละชั้นข้างต้นสามารถหาอัตราขยายกระแสของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ดังสมการที่ (3.32)

$$M_I(D) = \frac{i_o}{i_{L1}} = \begin{cases} \frac{\frac{i_{L2}}{i_{L1}} \cdot \frac{i_{L3}}{i_{L2}} \cdot \frac{i_o}{i_{L3}}}{M_{I1}(D) \cdot M_{I2}(D) \cdot M_{I3}(D)} \\ (1 - D_1) \cdot (1 - D_2) \cdot (1 - D_3) \end{cases} \quad (3.32)$$

จากการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดันและอัตราขยายกระแสของวงจรบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยพิจารณาจากสมดุลพลังค์ในตัวเหนี่ยวนำ และสมดุลประจุในตัวเก็บประจุตามลำดับ เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีแรงดันที่ต่ำประมาณ 20V และต้องการแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 400V สำหรับโหลดตัวต้านทาน 1600Ω ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า ดังนั้นหากพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ทั้งสามเท่ากันจะมีค่าเท่ากับ 0.635 ($D_1=D_2=D_3=0.635$) ซึ่งจะได้ค่ากระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) เป็น 5A, 1.85A และ 0.69A ตามลำดับ ส่วนค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม (v_{C1} , v_{C2} , v_{C3}) มีค่าเท่ากับ 54V, 146VA และ 400V

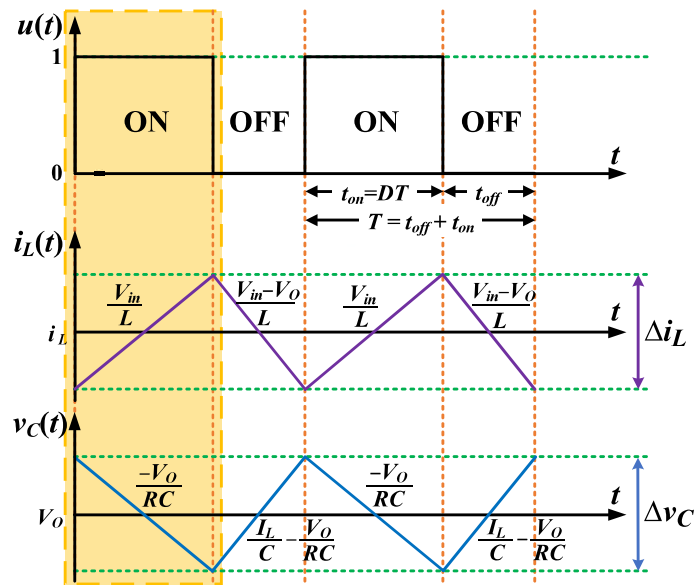
ตามลำดับ โดยข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบตัวควบคุมพีซี อีกทั้งยังใช้ในการออกแบบการตรวจจับความผิดปกติของแบบสวิตช์เปิดวงจร ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ (L_1, L_2, L_3) และตัวเก็บประจุ (C_1, C_2, C_3) ที่ปรากฏอยู่ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมแสดงดังรูปที่ 3.16 ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L จะอาศัยอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงที่สวิตช์นำกระแสที่เกิดจากการสะสมพลังงาน และคายพลังงานดังสมการที่ (3.16) และ (3.20) ตามลำดับ ส่วนการออกแบบค่าพารามิเตอร์ C จะอาศัยอนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เกิดจากการสะสมประจุ และคายประจุดังสมการที่ (3.18) และ (3.22) ตามลำดับ เพื่อให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (Δi_L) และการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (Δv_C) อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จะทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ

ค่าพารามิเตอร์ L มีผลต่อ Δi_L เป็นอย่างมาก หาก Δi_L สูงอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อกับอุปกรณ์วงจรภายในวงจร และยังส่งผลให้ Δv_C สูงตามไปด้วย ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L จะอาศัยอนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำช่วงนำกระแสของสวิตช์ในสถานะอยู่ตัวดังรูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์อนุพันธ์ของกระแสสามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ L ได้ดังสมการที่ (3.33) โดยที่ f_s คือความถี่สวิตช์ มีค่าเท่ากับ $f_s = 1/T$



รูปที่ 3.16 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในสภาวะอยู่ตัวของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม

อนุพันธ์ของกระแส :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_{in}}{L}$$

$$L = \frac{V_{in} D}{f_s \Delta i_L} \quad (3.33)$$

ดังนั้นในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวภายในของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น สามารถออกแบบได้โดยอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L สมการที่ (3.33) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม โดยจะกำหนดขอบเขตการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม (Δi_{L1} , Δi_{L2} , Δi_{L3}) โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์อนุพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัวดังสมการที่ (3.9), (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ จะได้ค่าพารามิเตอร์ L_1 , L_2 และ L_3 ดังสมการที่ (3.34), (3.35) และ (3.36) ตามลำดับ

$$L_1 = \frac{V_{in} D_1}{f_s \Delta i_{L1}} \quad (3.34)$$

$$L_2 = \frac{V_{c1} D_2}{f_s \Delta i_{L2}} \quad (3.35)$$

$$L_3 = \frac{V_{c2} D_3}{f_s \Delta i_{L3}} \quad (3.36)$$

ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำ ได้มีการพิจารณาค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามตัว (Δi_{L1} , Δi_{L2} , Δi_{L3}) ให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยมีค่าเท่ากับ 0.09A, 0.19A และ 0.14A ตามลำดับ ซึ่งจากค่าเหล่านี้ ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม (L_1 , L_2 , L_3) เท่ากับ 14mH, 17.9mH และ 65.7mH ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาด 15mH, 18.75mH และ 70mH ตามลำดับ เพื่อใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการเลือกใช้ขนาดเหล่านี้ยังคงทำให้ค่าการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสามอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้เช่นเดิม

3.4.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุ

ค่าพารามิเตอร์ C มีผลต่อ Δv_C เป็นอย่างมากเช่นเดียวกันกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ L หาก Δv_C มีขนาดสูงมากจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่น ๆ ภายในวงจรได้ ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ C จะอาศัยอนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในช่วงนำกระแสของสวิตช์ในสถานะอยู่ตัวดังรูปที่ 3.16

$$\text{อนุพันธ์ของแรงดัน : } \frac{dv_C}{dt} t = -\frac{\Delta v_C}{DT} = -\frac{i_o}{C}$$

$$C = \frac{i_o D}{f_s \Delta v_C} \quad (3.37)$$

จะได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์เก็บประจุทั้งสามตัวภายในของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น สามารถอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ C สมการที่ (3.37) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม เนื่องจากมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยจะกำหนดขอบเขตการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม (Δv_{C1} , Δv_{C2} , Δv_{C3}) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์อนุพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามตัวดังสมการที่ (3.12), (3.13)

และ (3.14) ตามลำดับ จะได้ค่าพารามิเตอร์ C_1 , C_2 และ C_3 ดังสมการที่ (3.38), (3.39) และ (3.40) ตามลำดับ

$$C_1 = \frac{i_{L2} D_1}{f_s \Delta v_{C1}} \quad (3.38)$$

$$C_2 = \frac{i_{L3} D_2}{f_s \Delta v_{C2}} \quad (3.39)$$

$$C_3 = \frac{i_o D_3}{f_s \Delta v_{C3}} \quad (3.40)$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุจะพิจารณาการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม (Δv_{C1} , Δv_{C2} , Δv_{C3}) โดยมีค่าอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ซึ่งมีค่าเป็น 0.24V, 0.096V และ 0.034V ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าตัวเก็บประจุทั้งสามเท่ากัน (C_1 , C_2 , C_3) เป็น 485.63 μ F, 452.81 μ F และ 463.24 μ F ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากันคือ 500 μ F เพื่อใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการเลือกใช้ค่านี้อย่างคงทำให้ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้เช่นเดิม

จากสมการออกแบบข้างต้น จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นโดยอาศัยข้อมูลในตารางที่ 3.3 จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ (L_1 , L_2 , L_3) และตัวเก็บประจุ (C_1 , C_2 , C_3) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นแสดงตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
V_{in}	แรงดันไฟฟ้าอินพุต	20	V
V_o	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	400	V
P_o	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	100	W
R	โหลดตัวต้านทาน	1600	Ω

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ (ต่อ)

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
$D_1=D_2=D_3$	ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์	0.63	–
i_{L1}	กระแสไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำ	5	A
i_{L2}		1.85	A
i_{L3}		0.69	A
V_{C1}	แรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ	54	V
V_{C2}		146	V
V_{C3}		400	V
Δi_{L1}	กระแสไฟฟ้ากระเพื่อม	0.09	A
Δi_{L2}		0.19	A
Δi_{L3}		0.14	A
ΔV_{C1}	แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม	0.24	V
ΔV_{C2}		0.096	V
ΔV_{C3}		0.034	V

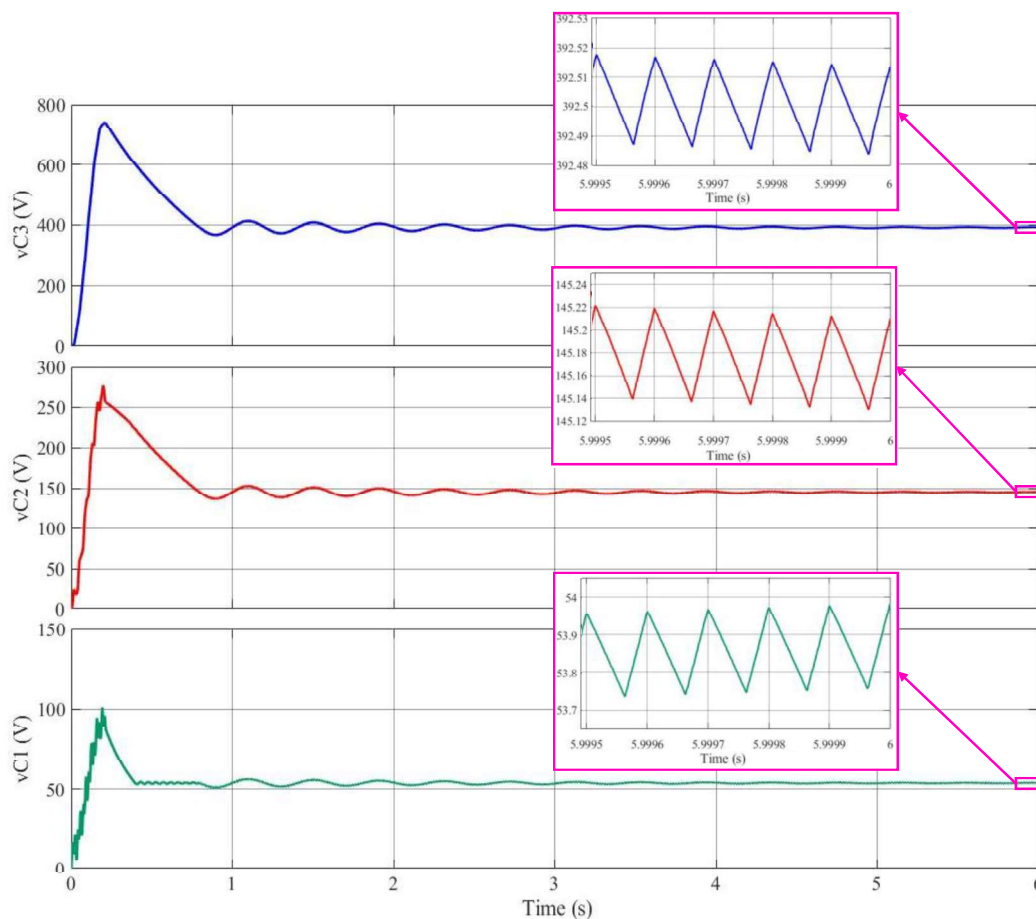
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
L_1	ตัวเหนี่ยวนำ	15	mH
L_2		18.75	mH
L_3		70	mH
$C_1=C_2=C_3$	ตัวเก็บประจุ	500	μF

3.5 ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK เข้าช่วยในการจำลองสถานการณ์ โดยใช้โครงสร้างวงจรดังรูปที่ 3.1 โดยกำหนดให้โหลดตัวต้านทานเป็น 1600Ω แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 20V และค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ D_1 , D_2 และ D_3 เท่ากันที่ 0.63 เพื่อให้ได้อัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้การจำลอง

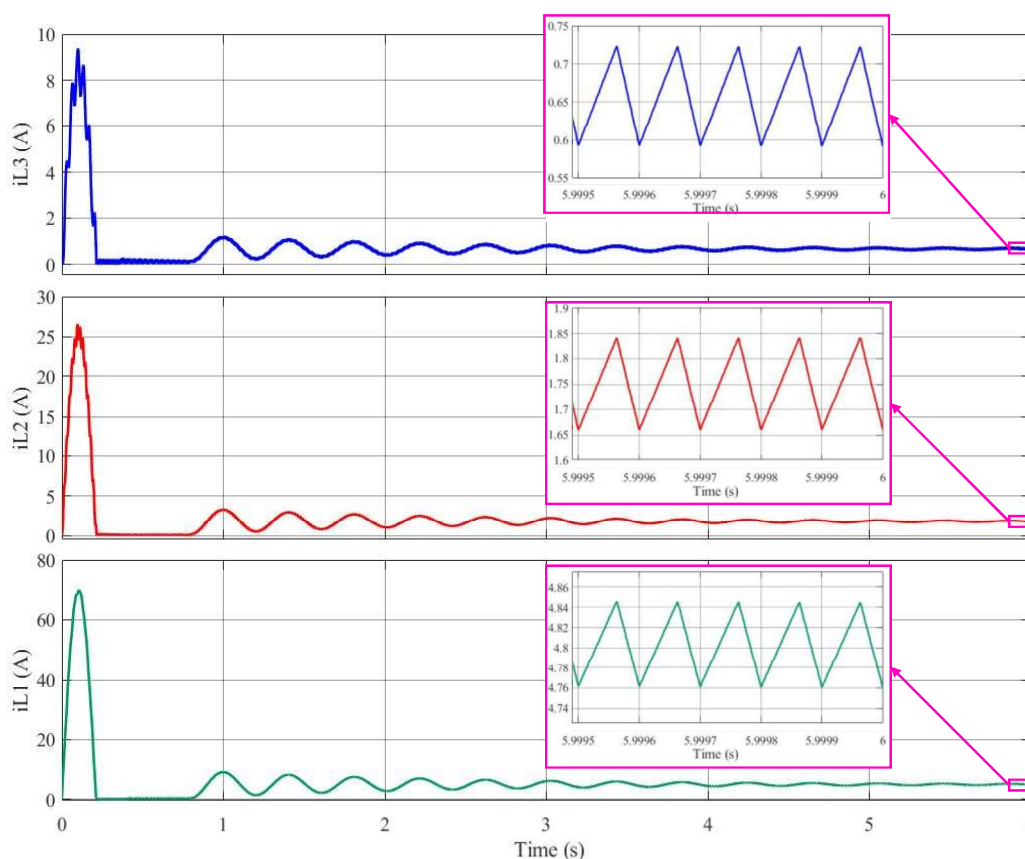
สถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น จะใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ



รูปที่ 3.17 ผลจากการจำลองสถานการณ์ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสาม

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.17 และ 3.18 เห็นได้ว่าในสภาวะชั่วครู่จะเกิดการพุ่งเกินของ v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} ที่ประมาณ 100V, 275V และ 750V ตามลำดับ ในขณะเดียวกันยังเกิดการพุ่งเกินของ i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} ที่ประมาณ 70A, 27A และ 9.5A ตามลำดับ ซึ่งอาจส่งผลให้อุปกรณ์ภายในวงจรเสียหายจนวงจรไม่สามารถทำงานต่อไปได้หากค่ากระแส และแรงดันเกินพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง อีกทั้งยังใช้เวลานานประมาณ 4 วินาที ในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว เมื่อพิจารณาผลตอบแทนในสภาวะอยู่ตัวแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ โดย v_{C1} , v_{C2} และ v_{C3} มีค่าประมาณ 54V, 146V และ 400V ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราขยายของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้นสูงถึง 20 เท่า รวมถึง i_{L1} , i_{L2} และ i_{L3} มีค่าประมาณ 5A, 1.85A

และ 0.6875A ทั้งนี้ในส่วนของการกระเพื่อมของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสามตัวต่างก็มีค่าสอดคล้องตามที่ออกแบบไว้เช่นกัน



รูปที่ 3.18 ผลจากการจำลองสถานการณ์ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสาม

3.6 สรุป

บทที่ 3 ได้นำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น โดยอธิบายโครงสร้างของวงจร หลักการทำงานของวงจร อัตราขยายแรงดัน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจร และนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ที่สามารถทบทวนแรงดันแรงดันเอาต์พุตของวงจรสูงถึง 400V โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ทั้งสามที่มีค่าเท่ากันที่ 0.63 และจ่ายกำลังไฟฟ้า 100 W ให้กับโหลดตัวต้านทานขนาด 1600Ω เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 20V รวมถึงแสดงการกระเพื่อมของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่ได้ผลสอดคล้องตามที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของวงจรขณะที่มีตัวควบคุม พบว่ามีการฟุ้งเกินของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่

ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลเสียหยาบกับอุปกรณ์ภายในวงจร อีกทั้งยังใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ดังนั้นในบทความต่อไปจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีชซีที่พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามชั้น ให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้นทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว สามารถรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร