



โครงสร้าง และการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

การควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เพื่อให้สามารถนำมาขนานกันได้อย่างเหมาะสมมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน ชนิดของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ก็มีหลายรูปแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึงชนิดและลักษณะการควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง และการควบคุมระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถขนานชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ใช้ในการขนาน เพื่อใช้ในการออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายต่อไป

2.1 การขนานแหล่งจ่ายไฟตรง

ในการขนานแหล่งจ่ายไฟตรง ที่มีลักษณะเป็นแหล่งแรงดัน ซึ่งมีค่าความต้านทานขาออกต่ำนั้น ถ้ามีความแตกต่างของแรงดันขาออกเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้มีความแตกต่างของกระแสขาออกของแหล่งจ่ายแต่ละชุดมาก ดังนั้นการขนานแหล่งจ่ายที่ควบคุมแรงดันขาออกเท่านั้นจึงเป็นไปได้ยาก เพราะจะทำให้มีความแตกต่างของกระแสขาออกมาก แหล่งจ่ายที่มีแรงดันขาออกสูงสุดจะจ่ายกระแสขาออกเป็นส่วนใหญ่ จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะจำกัดกระแส มีผลให้แรงดันขาออกตกลงมาจากกระทั่งแหล่งจ่ายที่มีแรงดันสูงสุดตัวถัดมาเริ่มจ่ายกระแสต่อ ซึ่งจะ เป็นลักษณะเช่นนี้จนสามารถจ่ายโหลดได้ตามต้องการ จะเห็นได้ว่าชุดวงจรที่แรงดันขาออกสูงสุดจะจ่ายโหลดเกิน (โดยจะทำงานในภาวะจำกัดกระแส) ขณะที่แหล่งจ่ายวงจรอื่นจะจ่ายโหลดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การควบคุมที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ชุดวงจรที่ต่อขนานกันแบ่งจ่ายกระแสได้ใกล้เคียงกัน [Billing, 1989] มีดังนี้ คือ

2.1.1 การขนานแบบนาย-บ่าว (Master-slave operation)

วิธีการนี้แหล่งจ่ายชุดหนึ่งทำหน้าที่เป็นนาย (master) โดยจะเป็นตัวควบคุมแรงดันขาออก และขับนำภาคกำลังของแหล่งจ่ายที่นำมาขนานกันทั้งหมด ซึ่งแหล่งจ่ายแต่ละชุด จะทำหน้าที่แบ่งจ่ายกระแสให้กับโหลด การแบ่งจ่ายกระแสนี้จะขึ้นอยู่กับแรงดันตกคร่อมความต้านทานขาออกของแต่ละชุดวงจร การแบ่งกระแสโดยวิธีนี้ไม่ดีนัก เนื่องจากจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแหล่งจ่ายแต่ละชุดค่อนข้างมาก และข้อเสียที่สำคัญของการขนานโดยวิธีนี้คือ ถ้าแหล่งจ่ายชุดที่เป็นนายเสีย จะส่งผลให้แหล่งจ่ายทุกวงจรไม่สามารถทำงานได้

2.1.2 การขนานโดยการควบคุมกระแส (Current mode control)

วิธีการขนานที่มีหลักการคล้ายกับการขนานโดยวิธีนาย-ป่าว จะแตกต่างกันตรงที่สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมกระแสออกของทุกชุดวงจรจะเป็นสัญญาณร่วมสำหรับทุกชุดวงจรที่มาขนาน สัญญาณอ้างอิงนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับกระแสที่ป้อนกลับมาของแต่ละชุดวงจร ชุดวงจรกำลังทุกชุดทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (voltage-controlled current source) กระแสออกของระบบจะเท่ากับผลบวกของกระแสออกแต่ละชุดวงจร สัญญาณควบคุมกระแสจะมีการปรับตัวตามความต้องการของกระแสออกของระบบ การใช้วิธีนี้แต่ละชุดวงจรจะมีวงจรขับนำสวิตช์ในภาคกำลังแยกจากกัน ทำให้มีข้อดี คือ ความเสียหายของภาคกำลังในแต่ละชุดวงจร จะไม่มีผลให้ชุดวงจรอื่นเสียหาย และการแบ่งกระแสจะดีพอสมควร โดยสมมติฐานว่า ชุดวงจรกำลังแต่ละชุดเหมือนกัน เมื่อมีคำสั่งกระแสเดียวกัน ชุดวงจรกำลังจะจ่ายกระแสเท่ากัน

2.1.3 การขนานโดยบังคับการแบ่งจ่ายกระแส (Forced current sharing)

การขนานโดยวิธีนี้ จะใช้การปรับแรงดันขาออกของแหล่งจ่าย แต่ละชุดวงจร เพื่อรักษาการแบ่งจ่ายกระแส ของแต่ละชุดวงจรที่มาขนานกันให้เท่ากัน เนื่องจากความต้านทานขาออกของแหล่งจ่ายแรงดันมีค่าต่ำ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลให้มีการเปลี่ยนแปลงกระแสขาออกที่สูง ชุดวงจรแต่ละชุดจะเปรียบเทียบกับกระแสขาออกกับค่าเฉลี่ยของกระแสออกของระบบ และปรับแรงดันขาออกให้มีกระแสออกเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสออกของระบบ การปรับแรงดันขาออกนี้จะปรับผ่านสัญญาณอ้างอิง โดยใช้สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกระแสขาออกของแต่ละชุดวงจรกับค่าเฉลี่ยของกระแสออกของระบบ ช่วงการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของสัญญาณจะมีการจำกัด โดยปกติประมาณ 1% หรือน้อยกว่า ของขนาดสัญญาณอ้างอิง

เพื่อให้การแบ่งจ่ายกระแสมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำแหล่งจ่ายหลายชุดมาขนานกันในการวิจัยนี้ จะเลือกใช้วิธีการขนานโดยการควบคุมกระแส (current mode control) กระแสออกของวงจรแต่ละชุดมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้น จึงทำการป้อนกลับกระแสตัวเหนี่ยวนำของแต่ละชุดวงจร เพื่อให้ชุดวงจรมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน โดยกระแสออกของแต่ละชุดวงจร จะถูกควบคุมโดยตรงจากสัญญาณออกของวงจรคุมค่าของระบบ (system regulator) แรงดันออกของระบบจะถูกควบคุมผ่านกระแสออกของแต่ละชุดวงจร ข้อดีของการใช้ควบคุมโดยวิธีนี้ คือ การควบคุมกระแสออกและการจำกัดกระแสของแต่ละชุดวงจรจะทำได้ง่าย โดยการควบคุม และการจำกัดกระแสจะผ่านทางสัญญาณที่มาควบคุมการทำงานของแต่ละชุดวงจร

2.2 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

แหล่งจ่ายไฟตรงแบบสวิตชิง โดยทั่วไปประกอบด้วยวงจร 2 ส่วน คือ วงจรภาคกำลัง และวงจรภาคควบคุม วงจรภาคกำลังจะทำหน้าที่ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันประมาณ 300 โวลต์ โดยใช้วงจรเรียงกระแสกับวงจรกรอง และใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 300 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำตามต้องการ สำหรับวงจรภาคควบคุม จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรภาคกำลัง เพื่อให้ได้ระดับของแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ

2.2.1 วงจรภาคกำลัง

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง แบบสวิตชิงนี้ ทำหน้าที่แปลงผันระดับของแรงดันไฟฟ้าขาออกให้มีค่าตามสัญญาณควบคุม วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง มีหลายแบบ แต่ละแบบจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งในแง่ของอัตราการแปลงผันแรงดัน (V_o/V_u) ความต่อเนื่องของกระแสขาเข้า และขาออก ตลอดจนความยากง่ายในการใช้วงจร ในการสร้างแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันขาออกต่ำโดยที่มีแรงดันขาเข้าสูง วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ใช้ต้องเป็นเกาตรอนระดับแรงดันลงมา สามารถจำแนกวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ทอนระดับลงมาได้ คือวงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันที่ไม่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง และแบบที่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง

2.2.1.1 วงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดัน ที่ไม่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง วงจรแปลงผันชนิดนี้มีอยู่หลายวงจร ได้แก่ วงจรทอนระดับ (buck) วงจรทอนทบระดับภาคแรงดัน (buck-boost) วงจรทอนทบระดับภาคกระแส (Cuk) เป็นต้น วงจรดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.1

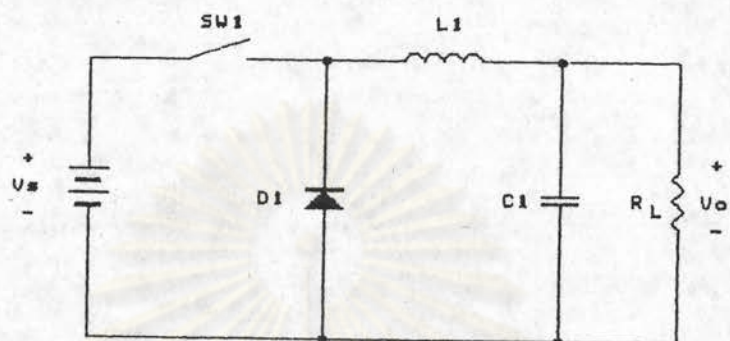
อัตราการแปลงผันแรงดัน ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันขาออกต่อแรงดันของแหล่งจ่ายพลังงานขาเข้า ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน (duty cycle) ของสวิตช์ วัฏจักรงานของสวิตช์ (D) คือ อัตราส่วนของช่วงเวลาที่มีสวิตช์ไวงานนำกระแส (DT) ต่อคาบเวลาการทำงานของสวิตช์ (T) การคำนวณอัตราการแปลงผันแรงดันในภาวะอยู่ตัว จะทำได้โดยอาศัยหลักการสมดุลของพลังงาน เข้ากับพลังงานออก หรืออาจจะคำนวณหาจากความสมดุลระหว่าง ผลคูณของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (volt-sec balance) อัตราการแปลงผันแรงดันจะมีค่าขึ้นอยู่กับ วัฏจักรงาน (D) ของสวิตช์ไวงาน (SW_1) ตามสมการ (2.1) และ (2.2)

กรณีวงจรทอนระดับ (buck)

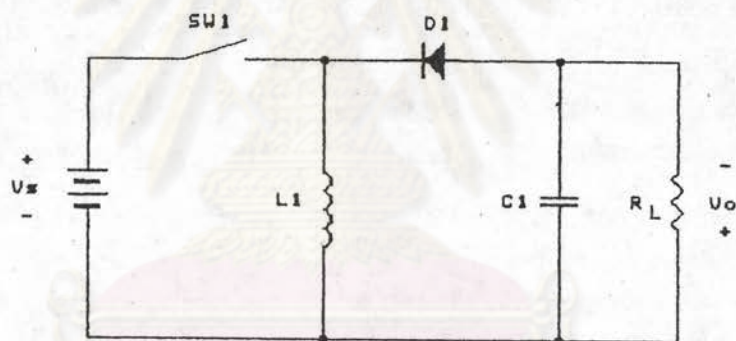
$$\frac{V_o}{V_u} = D \quad (2.1)$$

กรณีวงจรทอนทบระดับภาคแรงดัน และกระแส

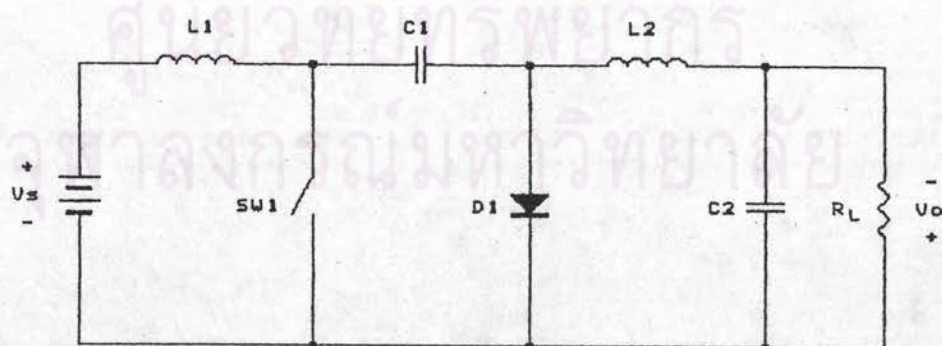
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{(1-D)} \quad (2.2)$$



ก. วงจรทอนระดับ (buck)



ข. วงจรทอนทบระดับภาคแรงดัน (buck-boost)



ค. วงจรทอนทบระดับภาคกระแส (Cuk)

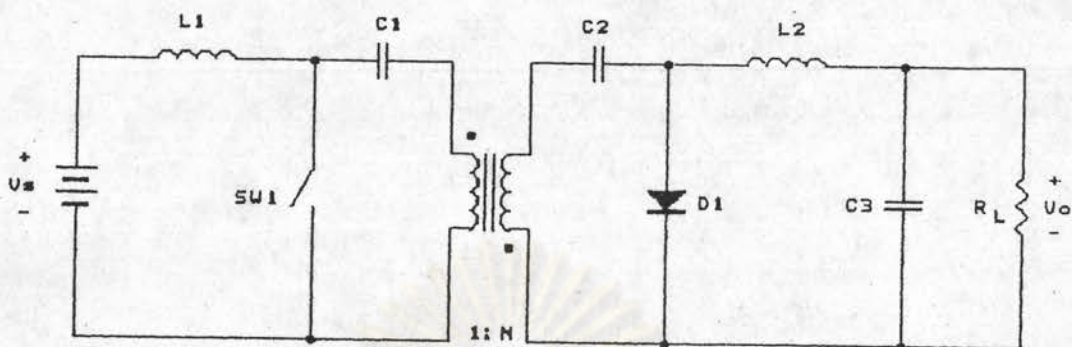
รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันที่ไม่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง

เนื่องจาก $D \leq 1$ จากสมการ (2.1) จะเห็นได้ว่า แรงดันขาออกจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันขาเข้า ส่วนสมการ (2.2) แรงดันขาออกจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันขาเข้า เมื่อ $D < 0.5$ อย่างไรก็ตาม สมการของอัตราการผลิตแรงดันที่กล่าวมา จะถูกต้องเฉพาะในกรณีที่ ไม่มีการสูญเสียในอุปกรณ์ที่ใช้ ฉะนั้น ความเป็นจริงแล้ว แรงดันออกจะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการดังกล่าว

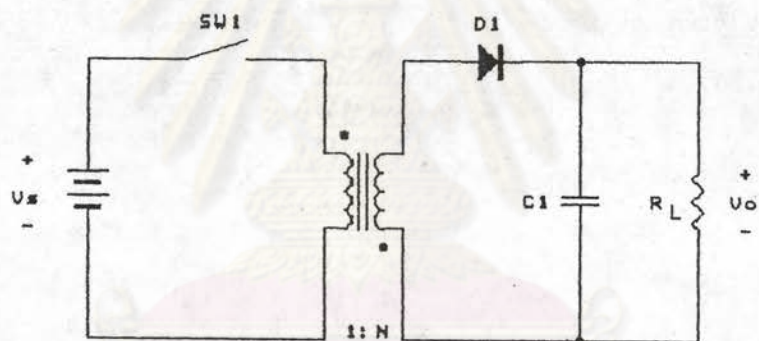
คุณสมบัติที่สำคัญของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง คือ ความต่อเนื่องของกระแสด้านขาเข้า และขาออก ทั้งนี้เพราะกระแสที่ไม่ต่อเนื่องจะมีฮาร์มอนิกสูง อันเป็นผลทำให้เกิดคลื่นรบกวน และกำลังสูญเสียในวงจรมากขึ้น นอกจากนี้ความไม่ต่อเนื่องของกระแสขาออกยังทำให้ระลอกของแรงดันสูงขึ้น วงจรทอนระดับ จะมีความไม่ต่อเนื่องของกระแสขาเข้า และวงจรทอนทบระดับภาคกระแสจะมีความต่อเนื่องทั้งกระแสขาเข้า และขาออก เพราะมีตัวเหนี่ยวนำต่ออยู่ที่ขาเข้า และขาออก

นอกจากนี้ วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ชนิดนี้ยังมีข้อด้อยเสียอื่น ๆ เช่น วงจรทอนระดับจะมีลักษณะวงจรที่ง่าย ส่วนวงจรทอนทบระดับภาคกระแสจะมีวงจรที่ยุ่งยาก เพราะจะต้องเพิ่มตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขึ้นอย่างละตัว การทำงานของสวิตช์ไวงาน (SW_1) และไดโอด (D_1) จะต้องตัดต่อวงจรสลับกันจริง ๆ ซึ่งทางปฏิบัติทำได้ยาก เพราะเมื่อ SW_1 นำกระแส ไดโอดยังคงนำกระแสในช่วงเวลาสั้น ๆ คือ กระแสฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery current) ซึ่งเหมือนกับการลัดวงจรตัวเก็บประจุ C_1 ทำให้เกิดกระแสค่าสูง และมีการสูญเสียมากขึ้น การเลือกใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ยังขึ้นกับลักษณะงานด้วย กรณีที่แหล่งจ่ายไฟตรงแบบ off-line ต้องการแรงดันขาออกที่ต่ำ โดยแรงดันขาเข้ามีค่าสูง วงจรทอนระดับที่ไม่มีแยกโหนดด้วยหม้อแปลงความถี่สูงนี้จะไม่เหมาะสมเพราะวัฏจักรงานที่ใช้จะมีค่าต่ำมาก ซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ยาก

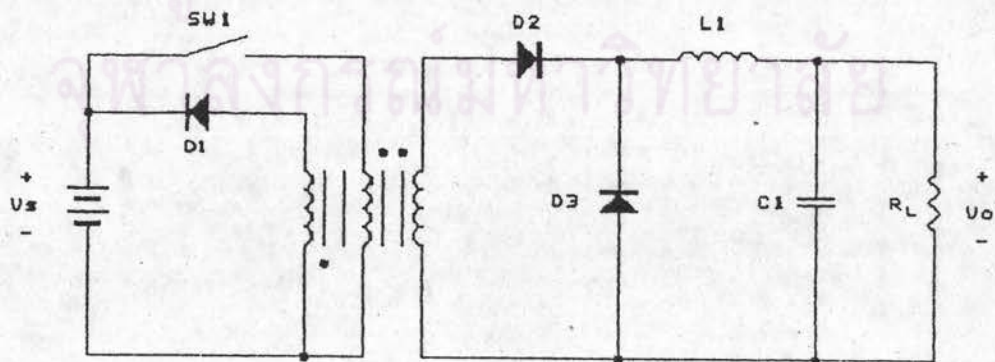
2.2.1.2 วงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันที่มีการแยกโหนดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง วงจรที่มีการแยกโหนดด้วยหม้อแปลงความถี่สูงนี้มีอยู่มากมาย เช่น วงจรทอนทบระดับภาคกระแสที่มีการแยกโหนด (isolated Cuk) วงจรบินกลับ (flyback) วงจรไปหน้า (forward) วงจรพุช-พูล (push-pull) วงจรกึ่งบริดจ์ (half-bridge) วงจรบริดจ์เต็ม (full-bridge) และวงจรบริดจ์ไม่สมมาตร (asymmetrical bridge) เป็นต้น รูปวงจรดังกล่าว แสดงในรูปที่ 2.2



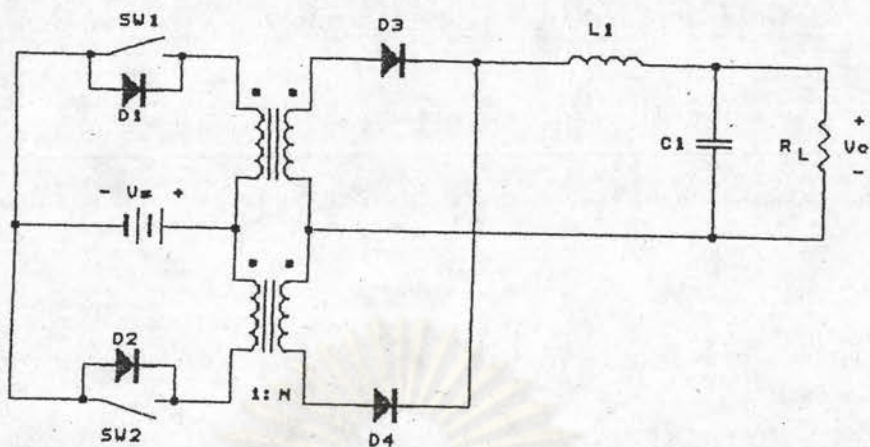
ก. วงจรทอนทระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดด (isolated Cuk)



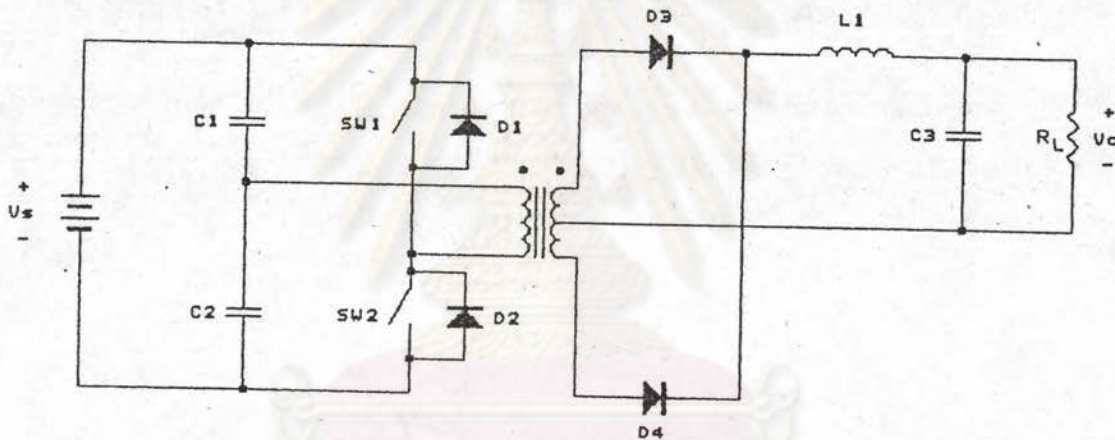
ข. วงจรบินกลับ (flyback)



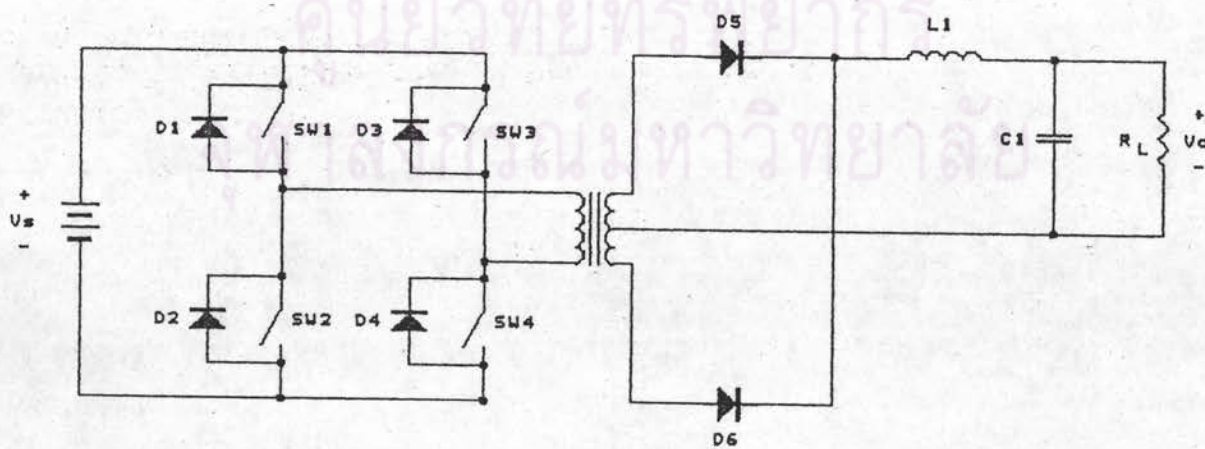
ค. วงจรไปหน้า (forward)



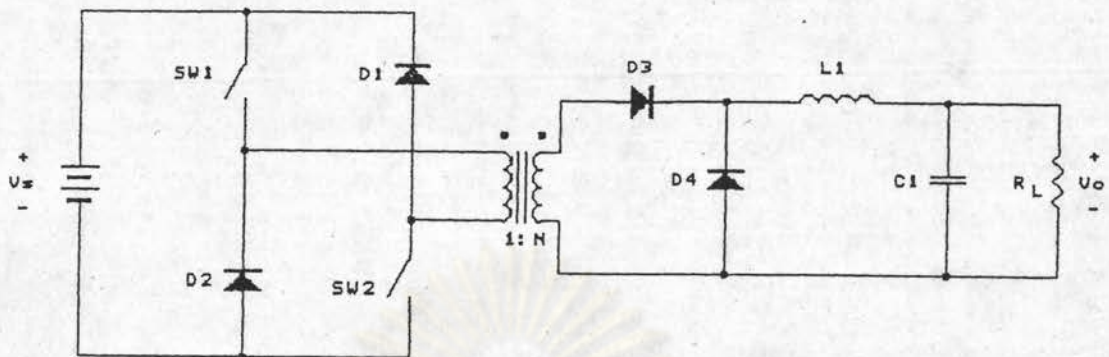
ง. วงจรพช-พล ภาคแรงดัน (push-pull)



จ. วงจรกึ่งบริดจ์ (half-bridge)



ช. วงจรบริดจ์เต็ม (full-bridge)



ข. วงจรบริดจ์ไม่สมมาตร (asymmetrical bridge)

รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันแบบทอนระดับแรงดันที่มีการแยกโหนดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง

วงจรมีการแยกโหนดนี้ จะมีอัตราการแปลงแรงดันแตกต่างกัน ดังนี้ คือ

2.2.1.2.1 กรณีวงจรถอนทอนระดับแรงดันภาคกระแส ที่มีการแยกโหนด และวงจรบินกลับ จะมีอัตราการแปลงผันตามสมการ (2.3)

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{N.D}{(1-D)} \quad (2.3)$$

N คือ อัตราส่วนจำนวนรอบ (turn ratio)

2.2.1.2.2 กรณีวงจรถอนหน้า, วงจรพช-พล, วงจรเต็มบริดจ์ และวงจรถอนไม่สมมาตร จะมีอัตราการแปลงผันตามสมการ (2.4)

$$\frac{V_o}{V_s} = N.D \quad (2.4)$$

2.2.1.2.3 กรณีวงจรถอนบริดจ์ จะมีอัตราการแปลงผันแรงดัน ตามสมการ (2.5)

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{N.D}{2} \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.3)-(2.5) จะเห็นได้ว่า การมีหม้อแปลงความถี่สูงเข้ามาทำให้เราสามารถกำหนดวัฏจักรการทำงานให้อยู่ในภาวะที่เหมาะสมได้ โดยที่แรงดันขาออกจะมีค่า

ตามต้องการโดยขึ้นกับอัตราส่วนจำนวนรอบ (N) ดังนั้น วงจรที่มีหม้อแปลงความถี่สูงเข้ามาแยกโดดนั้น เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงดันขาออกต่ำ โดยที่แรงดันขาเข้ามีค่าสูง

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าวงจรทอนทระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดด วงจรบินกลับ วงจรไปหน้า มีข้อดี คือ จะใช้สวิตช์ไวงานเพียงตัวเดียว ทำให้วงจรชนิดนี้มีความเชื่อถือได้สูง เพราะไม่มีการ shoot through เกิดขึ้นและมีลักษณะวงจรที่ง่าย ยกเว้นวงจรทอนทระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดด จะมีอุปสรรคมาก แต่วงจรนี้หม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้จะมีประสิทธิภาพสูงเพราะไม่มีองค์ประกอบไฟตรงในหม้อแปลงแต่วงจรพวกนี้มีข้อเสีย คือ แรงดันคร่อมสวิตช์ไวงานค่อนข้างสูง ประมาณอย่างน้อย 2 เท่า ของแรงดันขาเข้า และเมื่อสวิตช์ SW_1 ตัดวงจร กระแสที่ไหลในความเหนี่ยวนำรั่ว (leakage inductance) ในหม้อแปลงมีผลทำให้เกิดยอดแหลม (spike) ของแรงดันคร่อมสวิตช์ ทำให้ต้องใช้สวิตช์ไวงานที่ทนแรงดันสูงมาก นอกจากนี้วงจรบินกลับไม่มีความต่อเนื่องของกระแสทั้งขาเข้า และขาออก การมีวงจรไปหน้า หม้อแปลงที่ใช้จะมีขดลวด 3 ขด โดยขดลวดที่ 3 ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นขดลวดที่ใช้ระบายกระแสทำแม่เหล็ก (magnetizing current) ซึ่งเรียกว่าขดลวดตั้งต้น (reset coil) ขดลวดนี้จะต้องมีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กกับขดลวดที่เหลืออย่างดี เพื่อลดแรงดันยอดแหลมของสวิตช์

กรณีวงจรพช-พล นั้น วงจรจะมีความซับซ้อน สวิตช์ไวงานจะใช้ 2 ตัว และแรงดันคร่อมสวิตช์ไวงานจะต้องรับแรงดันสูงอย่างน้อย 2 เท่าของแรงดันขาเข้า ถ้ามีผลจากความเหนี่ยวนำรั่ว ทำให้เกิดยอดแหลมของแรงดัน ทำให้ต้องใช้สวิตช์ไวงานที่ทนแรงดันสูงมาก วงจรนี้จึงเหมาะกับกรณีที่แรงดันขาเข้ามีค่าต่ำ และถ้าหม้อแปลงไม่สมมาตรกันจะมีผลทำให้หม้อแปลงอึดตัวได้ ข้อดีของวงจรนี้ คือ ระบายแรงดันขาออกมีค่าต่ำ

กรณีวงจรกึ่งบริดจ์ และบริดจ์เต็ม นั้น ข้อดี คือ แรงดันคร่อมสวิตช์ไวงานจะรับแรงดันเท่ากับแรงดันขาเข้า และแรงดัน spike ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำรั่ว ทั้งนี้เพราะกระแสสามารถไหลคืนสู่แหล่งจ่ายได้ โดยผ่านทางไดโอดที่ขนานกับสวิตช์ การใช้หม้อแปลงจะใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ข้อเสีย คือ วงจรจะใช้สวิตช์ไวงานหลายตัว ผลของกระแสฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery current) เนื่องจากไดโอดที่ขนานกับสวิตช์ไวงานมีผลให้สวิตช์ไวงานต้องรับกระแสส่วนนี้ไป ทำให้เกิดยอดแหลมช่วงที่สวิตช์ไวงานเริ่มนำกระแส นอกจากนี้ยังมีปัญหาการ shoot through ของสวิตช์ไวงานในกิ่งเดียวกัน และวงจรขับนำสวิตช์มีความยุ่งยาก เพราะจะต้องมีการแยกโดด

ส่วนกรณีวงจรบริดจ์ไม่สมมาตร สวิตช์ไวงานจะทนแรงดัน เท่ากับแรงดันขาเข้า วงจรนี้มีความเชื่อถือได้พอ ๆ กับวงจรไปหน้า และวงจรบินกลับ เนื่องจากไม่มีปัญหาที่เกิดจากการ shoot through อันเกิดจากสวิตช์ไวงาน 2 ตัว ซึ่งอยู่ในกิ่งเดียวกันนำกระแสพร้อมกัน ซึ่งมักเกิดกับวงจรกึ่งบริดจ์ และวงจรบริดจ์เต็ม ในแง่ปัญหาเนื่องจากความเหนี่ยวนำรั่วไหล

(leakage inductance) ของหม้อแปลง จะไม่ทำให้เกิดยอดแหลมของแรงดัน (spike voltage) ทั้งนี้เพราะกระแสใน leakage inductance สามารถไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ตามรูปวงจร กลับคืนสู่แหล่งจ่ายไฟตรงได้ในตอนที่สวิตช์ไวงานหยุดนำกระแส ข้อดีที่สำคัญประการหนึ่งของวงจรนี้ คือ การที่กระแสทำแม่เหล็ก (magnetizing current) ของหม้อแปลงที่ไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ลดลงเป็นศูนย์ทุกครั้งก่อนที่สวิตช์ไวงาน SW_1 และ SW_2 จะเริ่มนำกระแสครั้งถัดไป ทำให้สวิตช์ไวงานไม่ต้องรับกระแสฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery current) ของไดโอด D_1 และ D_2 ส่วนกระแสฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอดด้านทุติยภูมิ D_3 และ D_4 นั้น จะถูกหน่วงโดย leakage inductance ของหม้อแปลง ส่วนข้อเสียของวงจรบริดจ์ไม่สมมาตรนี้ อยู่ที่การใช้สวิตช์หลายตัว วัฏจักรของสวิตช์ไวงานไม่เกิน 50% อันเป็นผลมาจากข้อจำกัดของ volt-sec คร่อมหม้อแปลง และหม้อแปลงที่ใช้จะมีองค์ประกอบไฟตรงของกระแส ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามวงจรนี้ แม้จะใช้สวิตช์ไวงานมากขึ้น แต่ถ้าจะเปรียบเทียบกำลังออกต่อสวิตช์ 1 ตัว แล้ว จะไม่แตกต่างจากวงจรอื่นมากนัก สำหรับขีดจำกัดของวัฏจักรงานนั้น ถ้าแรงดันขาออกเปลี่ยนแปลงไม่มากนักก็ไม่มีปัญหา ในแง่ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบไฟตรงของกระแส ถ้าหากวงจรทำงานที่ความถี่ต่ำ ซึ่งการออกแบบหม้อแปลงจะใช้ขีดจำกัดของการอิ่มตัวของแกนหม้อแปลง (saturation limit) จะต้องใช้แกนหม้อแปลงโตขึ้นประมาณเท่าตัว แต่ถ้าเป็นการทำงานที่ความถี่สูง การออกแบบหม้อแปลงจะใช้ขีดจำกัดของกำลังสูญเสียในแกนหม้อแปลง (core loss limit) ซึ่งขีดจำกัดดังกล่าว ทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสนามแม่เหล็ก น้อยกว่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) อยู่แล้ว ขนาดของแกนที่ใช้จะไม่แตกต่างจากวงจรที่ใช้หม้อแปลง ที่ไม่มีองค์ประกอบไฟตรงเลย เช่น วงจรกึ่งบริดจ์ วงจรบริดจ์เต็ม เป็นต้น จากเหตุผลที่กล่าวมา ทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมมาตรเหมาะสมที่จะใช้เป็นวงจรภาคกำลังในแต่ละชุดวงจร ซึ่งทำงานที่ความถี่สูง และวงจรมีความเชื่อถือได้สูง

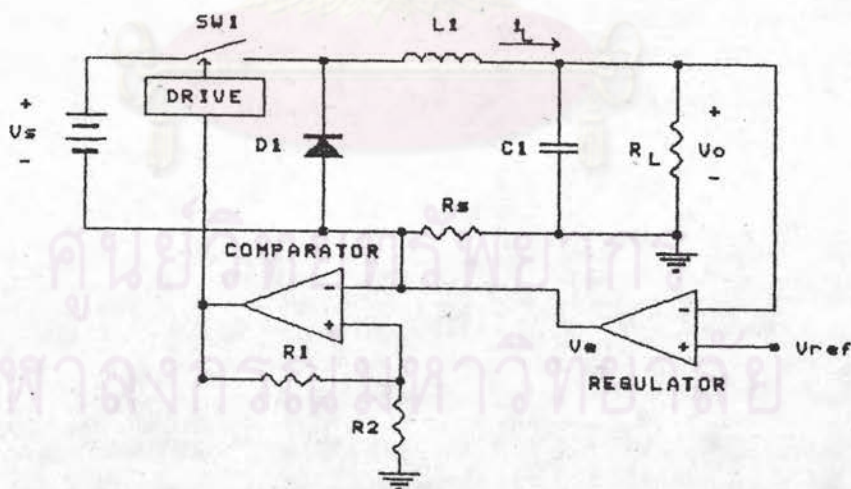
2.2.2 วงจรภาคควบคุม

จากที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.1 การขนานแหล่งจ่ายไฟตรงนั้น เมื่อต้องการให้มีการแบ่งจ่ายกระแสใกล้เคียงกัน ค่าความต้านทานขาออกควรมีค่าสูง เสมือนกับทำให้แหล่งจ่ายแต่ละตัวคล้ายกับแหล่งจ่ายกระแส เพื่อที่จะให้ความต้านทานขาออกนั้นมีค่าสูง การควบคุมให้แต่ละวงจรจะใช้การควบคุมกระแส (current-controlled) [Mitchell, 1988] ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การควบคุมให้กระแสมีค่าอยู่ระหว่างพิกัดสูงสุด-พิกัดต่ำสุด (hysteretic control) และการควบคุมกระแสแบบกำหนดค่าพิกัดสูงสุด และความถี่การทำงานของสวิตช์คงที่ (current-programmed mode)

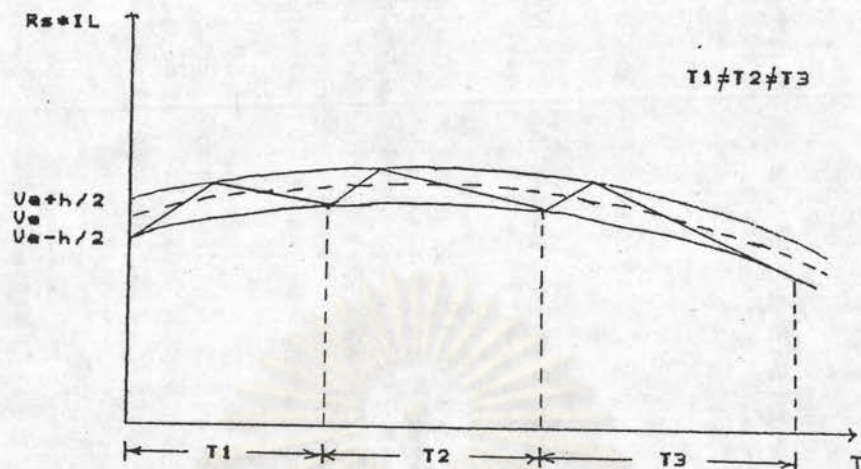
2.2.2.1 การควบคุมแบบ hysteretic control

การควบคุมกระแสโดยวิธีนี้ จะมีการป้อนกลับกระแสของตัวเหนี่ยวนำในรูปของแรงดัน ($R_L i_L$) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณความคลาดเคลื่อน (V_e) จากวงจรคุมค่าแรงดัน โดยวงจรเปรียบเทียบจะเป็นแบบฮิสเตอรีซิส ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ก สำหรับวงจรทอนระดับ (buck) สวิตช์ไวงานจะนำกระแส เมื่อกระแสจากตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำกว่านิกิตต่ำสุด ($V_e - h/2$) และจะหยุดนำกระแสเมื่อกระแสจากตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่านิกิตสูงสุด ($V_e + h/2$) โดยที่ h คือ ค่าฮิสเตอรีซิสสำหรับวงจรเปรียบเทียบ ซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นของการควบคุม ดังรูปที่ 2.3 ข จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (i_L) จะมีค่าเท่ากับสัญญาณความคลาดเคลื่อน (V_e) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันขาออก นั่นคือ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับแรงดันขาออก

การควบคุมวิธีนี้จะมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนโหลดที่เร็ว และระบบที่ใช้การควบคุมแบบ hysteretic control จะเป็นแบบ first-order system ซึ่งการออกแบบวงจรคุมค่าทำได้ง่าย แต่ความถี่ของการทำงานจะไม่คงที่ จะเปลี่ยนไปตามสัญญาณการควบคุม และสภาพโหลดขณะนั้น มีผลทำให้การควบคุมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ได้ยาก



ก รูปแสดงการควบคุมแบบ hysteretic control สำหรับวงจรทอนระดับ

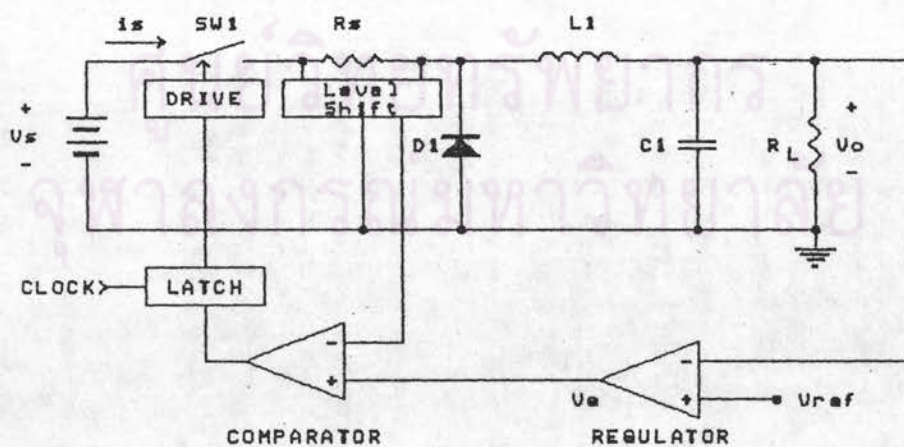


ข รูปคลื่นของการควบคุมแบบ hysteretic control

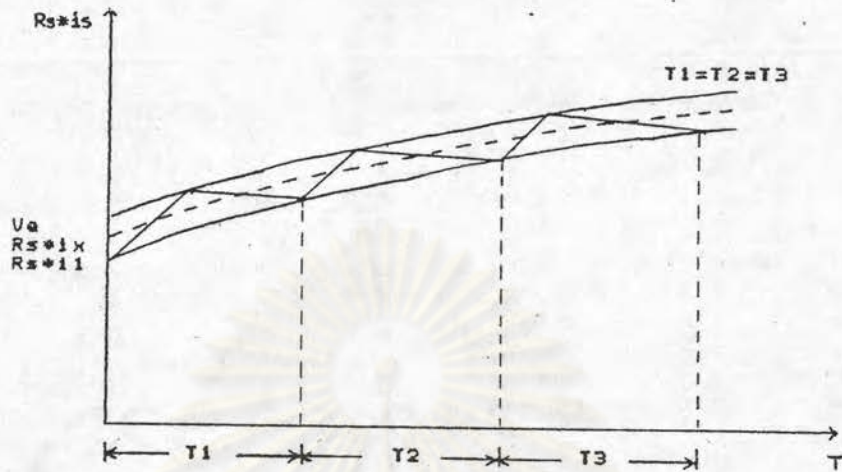
รูปที่ 2.3 การควบคุมกระแสแบบ hysteretic control

2.2.2.2 การควบคุมแบบ current-programmed mode

กรณีที่ต้องการให้ความถี่การทำงานมีค่าคงที่นั้น ไม่สามารถควบคุมทั้งค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดพร้อมกัน โดยทั่วไป การควบคุมให้ความถี่การทำงานคงที่นั้น มักจะให้ค่าสูงสุดเป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิตช์ ดังแสดงในรูปวงจรในรูปที่ 2.4 ก และรูปคลื่นของการควบคุมในรูปที่ 2.4 ข



ก รูปวงจรถามควบคุมแบบ current-programmed mode สำหรับวงจรทอนระดับ



ข รูปคลื่นของการควบคุมแบบ current-programmed mode

รูปที่ 2.4 การควบคุมแบบ current-programmed mode

การทำงานนั้น สวิตช์ไวงานจะเริ่มนำกระแสเมื่อมีสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่คงที่ และจะหยุดนำกระแสเมื่อกระแสมีค่าเท่ากับสัญญาณความคลาดเคลื่อน (V_o) เนื่องจากการควบคุมแบบนี้ จะจำกัดเฉพาะค่าสูงสุดของกระแสในตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น ดังนั้น จะใช้การควบคุมกระแสสวิตช์ (i_s) แทนการควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ การควบคุมแบบ current-programmed mode นี้ ระบบจะไม่เป็นแบบ first-order system ที่แท้จริง แต่จะมีขั้วที่ 2 (second pole) ของฟังก์ชันโอนย้ายของแรงดันขาออก กับสัญญาณควบคุม (control-to-output transfer function) ที่มีค่าใหญ่กว่าขั้วแรกมาก ๆ สามารถประมาณได้ว่าระบบที่ใช้การควบคุมแบบ current-programmed mode เป็นแบบ first-order system ได้

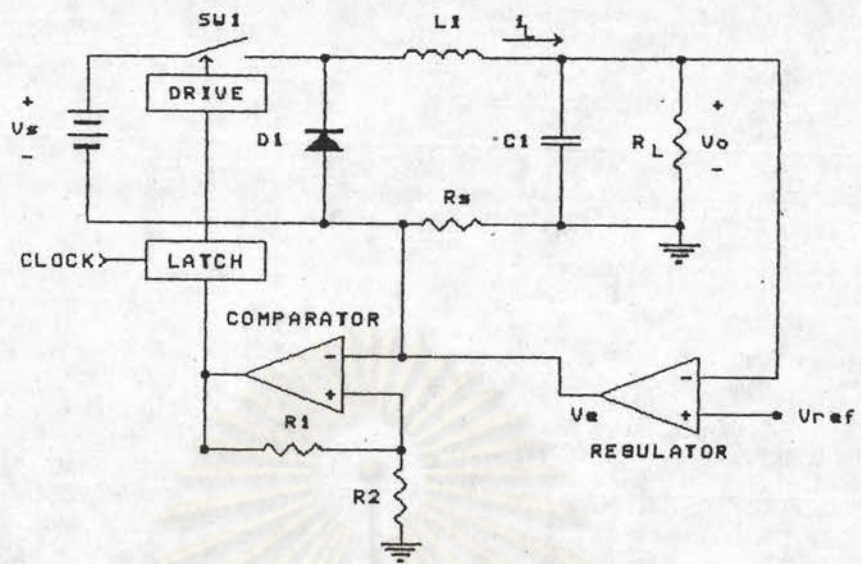
การควบคุมโดยวิธีนี้ ในภาวะที่มีการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนั้น กระแสในตัวเหนี่ยวนำอาจเพิ่มขึ้นไปไม่ถึงค่าของสัญญาณความคลาดเคลื่อน (V_o) ในช่วงคาบการทำงานแรก ๆ ดังนั้น เพื่อให้ความถี่การทำงานของสวิตช์มีค่าคงที่ จึงต้องมีการจำกัดค่าวัฏจักรงานสูงสุดของสวิตช์ (D) โดยกำหนดวัฏจักรสูงสุดของสัญญาณนาฬิกา ส่วนกรณีที่มีการลดโหลดอย่างรวดเร็วก็เช่นเดียวกัน คือ เมื่อสิ้นสุดการทำงาน กระแสในตัวเหนี่ยวนำยังมีค่าสูงกว่าสัญญาณความคลาดเคลื่อน (V_o) เพื่อให้ความถี่มีค่าคงที่เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาก็จะทำให้สวิตช์นำกระแสตามปกติ ทำให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดิม แต่การควบคุมจะพยายามให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำลดลง และการที่สวิตช์ไม่หยุดนำกระแสทันทีเมื่อมีคำสั่งให้หยุดนำกระแส มีผลให้

กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น โดยช่วงเวลาที่กระแสในตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นนี้จะเท่ากับ เวลาที่จะควบคุมให้สวิตช์หยุดนำกระแส (turn-off time) ดังนั้น การควบคุมแบบ current-programmed mode จะมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนโวลตจมากกว่า การควบคุมแบบ hysteretic control แต่เนื่องจากการทำงานแบบ current-programmed mode นี้ มีความถี่การทำงานคงที่ ดังนั้น การควบคุมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้ง่าย

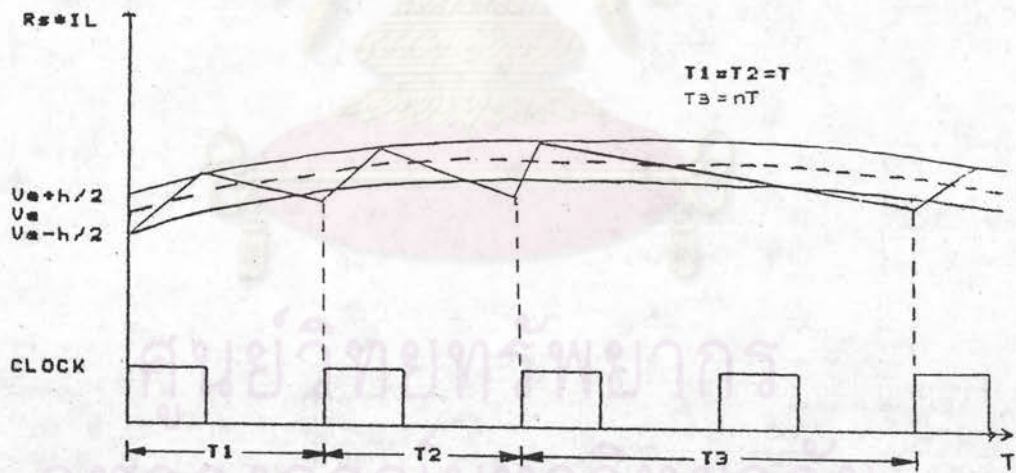
เนื่องจากการควบคุมแบบ current-programmed mode วัฏจักรงานสามารถลดลงได้ถึงค่าต่ำสุด (minimum duty cycle) ค่าหนึ่งอันเป็นผลจาก turn-off time ของสวิตช์ ดังนั้นภาวะการจำกัดกระแสจะจำกัดกระแสได้ค่าหนึ่ง เมื่อมีการลดค่าความต้านทานโวลตลงจนถึงภาวะการลัดวงจร การจำกัดกระแสไม่สามารถทำได้ เมื่อความถี่การทำงานของสวิตช์มีค่าคงที่ เพราะ ในภาวะลัดวงจรแรงดันขาออกจะมีค่าต่ำ เท่ากับผลคูณของกระแสที่จำกัดในภาวะนั้นกับค่าความต้านทานของโวลต ทำให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำลดลงช้ามาก คือกระแสในตัวเหนี่ยวนำยังลดลงไม่ต่ำกว่าสัญญาณความคลาดเคลื่อน (V_o) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาคาบถัดมา จะทำให้สวิตช์นำกระแสทำให้กระแสเพิ่มขึ้น ถ้าเป็นลักษณะเช่นนี้จะส่งผลให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้ตัวเหนี่ยวนำอิ่มตัว กระแสสวิตช์มีค่าสูงมากจนทำให้สวิตช์เสียหาย ดังนั้น การจำกัดกระแสในภาวะนั้น จะทำโดยการลดความถี่ลงเหมือนกับเป็นการลดวัฏจักรงานให้ต่ำลง

ดังนั้น การควบคุมกระแสจะใช้หลักการควบคุมแบบ current-programmed mode กับ hysteretic control ร่วมกัน รูปที่ 2.5 ก และ 2.5 ข แสดงรูปวงจร และรูปคลื่นการทำงานในภาวะปกติ และภาวะการจำกัดกระแสที่การควบคุมแบบ current-programmed mode สามารถทำงานได้ จะทำงานเป็นแบบ current-programmed mode เมื่อมีสัญญาณนาฬิกา สวิตช์จะนำกระแสทำให้กระแสในตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ ค่าพิกัดสูงสุดของอีส์เตอริซิส ($V_o + h_p/2$) หลังจากนั้น สวิตช์หยุดนำกระแส ซึ่งในภาวะปกติ และภาวะจำกัดกระแสที่การควบคุมแบบ current-programmed mode การจำกัดกระแสที่แรงดันขาออกไม่ต่ำนัก กระแสตัวเหนี่ยวนำจะลดลงเร็ว และมีค่าต่ำกว่าค่าพิกัดต่ำสุด ($V_o - h_p/2$) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาคาบถัดมาจะทำให้สวิตช์นำกระแส การทำงานดังกล่าวอยู่ในภาวะ current-programmed mode

แต่เมื่อเข้าสู่ภาวะจำกัดกระแสที่แรงดันขาออกต่ำมาก ๆ การทำงานแบบ current-programmed mode นี้ ไม่สามารถจำกัดกระแสได้ การลดลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะช้าถ้ายังลดลงไม่ถึงค่าพิกัดต่ำสุด ($V_o - h_p/2$) ถึงแม้มีสัญญาณนาฬิกามาสวิตช์ก็จะไม่นำกระแส จนกว่ากระแสตัวเหนี่ยวนำลดลงมาต่ำกว่า ($V_o - h_p/2$) และมีสัญญาณนาฬิกาการทำงานเช่นนี้ จะไม่เหมือนกับการควบคุมแบบ hysteretic control จริง ๆ เพราะความถี่ที่ลดลงจะเป็นสัดส่วนจำนวนเต็มกับความถี่ของสัญญาณนาฬิกา



ก. รูปร่างจรรยาควบคุมแบบ current-programmed mode และ hysteretic control ร่วมกัน สำหรับวงจรทอนระดับ



ข. รูปคลื่นการทำงานแบบ current-programmed mode และ hysteretic control ร่วมกัน

รูปที่ 2.5 การควบคุมกระแสแบบ current-programmed mode ร่วมกับ hysteretic control

ข้อดีของการควบคุมแบบนี้ คือ ในสภาวะปกติการทำงานจะมีความถี่คงที่ ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลง และกระแสในตัวเหนี่ยวนำจะใช้ความถี่ตามสัญญาณนาฬิกา แม้จะลดความถี่ลงก็ไม่ส่งผลให้หม้อแปลงอ้อมตัว เพราะมีการกำหนดวัฏจักรงานสูงสุดของสัญญาณนาฬิกาไว้ แต่ข้อเสียของการควบคุมวิธีนี้ คือ ในภาวะจำกัดกระแสที่มีการลดความถี่การทำงานค่อนข้างจะไม่แน่นอน

2.3 การหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง นี้ เป็นการนำเอาชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมาต่อขนานกัน และแหล่งจ่ายแต่ละชุดที่นำมาต่อขนานกันมีการควบคุมกระแสออก ทำให้ชุดวงจรแต่ละชุด มีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแส แต่ระบบที่ได้จากการขนานชุดวงจรจะมีการควบคุมแรงดันขาออก โดยอาศัยการป้อนกลับแรงดันขาออกที่ต้องการควบคุมเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ความแตกต่างของสัญญาณทั้งสองจะถูกขยาย และปรับแต่งโดยวงจรคุมค่า (regulator) สัญญาณออกจากวงจรคุมค่าจะไปควบคุมการจ่ายกระแสของชุดวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง โดยการควบคุมการทำงานของสวิตช์ เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ และการตอบสนองที่ดี ฟังก์ชันโอนย้าย (transfer function) ของวงจรคุมค่าต้องมีค่าเหมาะสมในการออกแบบฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรคุมค่านั้น ต้องทราบฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างตัวแปรที่ควบคุมกับสัญญาณที่ใช้ควบคุม ซึ่งเป็นสัญญาณออกจากวงจรคุมค่าการทำงานของวงจรภาคกำลังแต่ละชุด จะมีการตัดต่อวงจรของสวิตช์ตลอดเวลา โดยรูปแบบของวงจร และตัวแปรต่าง ๆ ของวงจรมีความไม่ต่อเนื่อง ทำให้ไม่สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายได้ เนื่องจากไม่ใช่วงจรเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง จะใช้ความถี่สูงในการสวิตช์สูงกว่าความถี่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของวงจร (circuit natural frequency) และความถี่ของสัญญาณควบคุมมาก ดังนั้น ถึงแม้มีความแตกต่างของวงจรในช่วงสวิตช์ไวงานต่อวงจร $D \cdot T_s$ กับช่วงสวิตช์ไวงานตัดวงจร $(1-D) \cdot T_s$ ก็ตามอาจประมาณได้ว่าตัวแปรสถานะต่าง ๆ ของวงจรยังมีความต่อเนื่อง ทำให้ดูเหมือนว่ามีความต่อเนื่องของวงจร ในการหาวงจรแบบต่อเนื่องที่สมมูลกับวงจรเดิมที่มีความไม่ต่อเนื่องนั้น จะอาศัยการเฉลี่ยโดยวัฏจักรงานเป็นตัวกำหนดน้ำหนักในการเฉลี่ย ซึ่งจะทำให้ได้ 2 วิธี คือ การใช้รูปแบบวงจรสมมูล (equivalent circuit model technique) [Middlebrook, 1981, 1987] หรืออาจใช้วิธีการเฉลี่ยตัวแปรสถานะของวงจร (state-space averaging technique) [Middlebrook 1981, 1986, 1988, Serverns and Bloom, 1984] จากวิธีการดังกล่าว จะทำให้ได้วงจรที่มีความต่อเนื่อง แต่โดยทั่วไปจะยังคงเป็นวงจรไม่เชิงเส้น ซึ่งยังไม่สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายได้ แต่ในกรณีที่มีสัญญาณควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบจุดทำงานสงบ เราอาจใช้วิธีประมาณวงจรไม่เชิงเส้นที่มีความต่อเนื่อง



ไม่เชิงเส้น ซึ่งยังไม่สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายได้ แต่ในกรณีที่มีสัญญาณควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบจุดทำงานสงบ เราอาจใช้วิธีประมาณวงจรไม่เชิงเส้นที่มีความต่อเนื่องด้วยวงจรเชิงเส้น ทำให้สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ได้ การวิเคราะห์ และออกแบบวงจรโดยการใช่วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กถึงแม้มีข้อจำกัดดังได้กล่าวมาแล้วก็ตาม แต่ก็ เป็นวิธีที่ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ได้ดี และง่ายกว่าการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้มีแนวทางการออกแบบวงจรคุมค่าเบื้องต้นได้ สะดวกและรวดเร็วก่อนใช้คอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรในขั้นสุดท้าย

โดยทั่วไปแล้ว วงจรสมมูลแบบเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงจะขึ้นกับรูปแบบของวงจร โดยวงจรภาคกำลังเป็นวงจรบริดจ์แบบไม่สมมาตร จะมีลักษณะการทำงานเหมือนวงจรทอนระดับ (buck convertor) โดยมองหิม้อแปลงด้านทุติยภูมิเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่มีลักษณะเป็นพัลส์ และใช้วิธีการควบคุมแบบ current programmed mode ซึ่งมีความถี่การสวิตซ์คงที่ (เป็นภาวะปกติของการทำงาน) ดังนั้นจะวิเคราะห์หาวงจรสมมูลแบบเชิงเส้น สำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) และฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรดังกล่าวในการออกแบบวงจรคุมค่า จากการศึกษาที่มีการควบคุมโดยการกำหนดกระแส (current programmed mode) จะประกอบด้วยวงรอบปิด 2 วงรอบซ้อนกันอยู่ โดยวงรอบปิดภายในจะเป็นวงรอบ ที่ใช้ในการควบคุมกระแสตัวเหนี่ยวนำ โดยสัญญาณควบคุมเป็นค่าอ้างอิงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ส่วนสัญญาณป้อนกลับเป็นค่าของกระแสในตัวเป็นเหนี่ยวนำสำหรับวงรอบปิดภายนอก จะเป็นวงรอบที่ใช้ในการควบคุมแรงดันออกของแหล่งจ่าย ซึ่งค่าอ้างอิงและสัญญาณป้อนกลับจะเป็นแรงดันที่ต้องการควบคุม ได้มีการเสนอการทางในการหาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงไว้สองแนวทาง

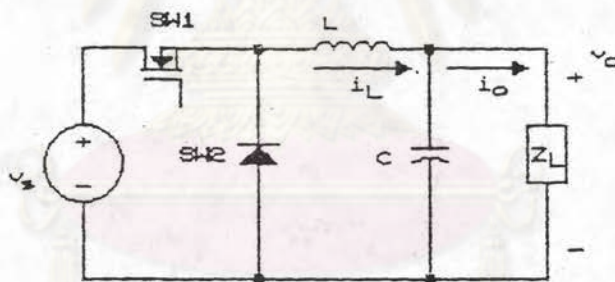
แนวทางแรก [Cho and Lee, 1986; Mitchell, 1988] ทำโดยพิจารณาทั้งสองวงรอบปิดไปพร้อมกัน และใช้วิธีการเฉลี่ยตัวแปรสถานะของวงจร (state space averaging technique) เพื่อหาฟังก์ชันโอนย้ายโดยไม่มีการหาวงจรสมมูล ด้วยวิธีนี้วงรอบปิดทั้งสองจะไม่มีผลกระทบต่อกันทำให้มีความยุ่งยากในการพิจารณาออกแบบวงจรคุมค่า

แนวทางที่สอง [Middlebrook, 1981, 1987] ทำโดยพิจารณาเฉพาะวงรอบปิดกระแสภายในเพียงวงรอบปิดเดียวก่อนและทำการหาแบบจำลองเต็มรูป (canonical model) เพื่อให้หาฟังก์ชันโอนย้ายทั้งหมดของวงรอบปิดกระแสภายในก่อน แล้วจึงทำการออกแบบวงจรคุมค่าของวงรอบปิดภายนอก ซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าหลักการของวงรอบปิดเดียว วิธีการหาแบบจำลอง [Middlebrook, 1987] จะใช้รูปแบบวงจรสมมูล (equivalent circuit model technique) โดยทำการขยายเพิ่มเติมจาก canonical model ของวงจรแปลงผัน

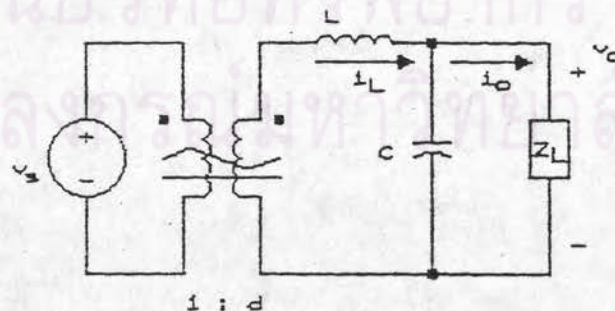
ไฟตรง-ไฟตรง ที่ใช้วิธีการควบคุมแบบ duty ratio programmed ซึ่งมีข้อดีที่คุณสมบัติของ วงจรจะยังคงสภาพไว้หมด ต่างกับการหาแบบจำลอง [Middlebrook, 1981] โดยการ เฉลี่ยตัวแปรสถานะของวงจรในการหาแบบจำลอง ซึ่งทำให้คุณสมบัติบางอย่างถูกหักล้างไป นอกจากนี้ [Ridley, Cho and Lee, 1988] ได้มีการสนับสนุนวิธีการหาโดยการพิจารณา วงจรแยกกันด้วย

เนื่องจากแนวทางที่สอง จะทำให้สามารถออกแบบวงจรคุมค่าได้ง่าย ดังนั้น ใน การหาแบบจำลองเชิงเส้น สำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุม โดยการ กำหนดกระแส จะใช้วิธีการตามแนวทางที่สอง ซึ่งหาแบบจำลอง โดยการขยายเพิ่มเติมจาก canonical model ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ที่ใช้การควบคุมแบบ duty ratio programmed ในขั้นแรกเราจะทำการพิจารณา canonical model ของวงจรทอนระดับที่ใช้ การควบคุมแบบ duty ratio programmed โดยการใช้รูปแบบวงจรสมมูล [Middlebrook, 1981] ดังนี้

จากวงจรพื้นฐานของวงจรทอนระดับในรูปที่ 2.6 ก เมื่อทำการเปลี่ยนผลลัพธ์การ ทำงานของวงจรจากการปิดเปิดวงจรของสวิตช์ SW_1 เป็นหม้อแปลงที่สมมูลกัน คือ เป็น หม้อแปลงที่แปลงได้ทั้งไฟกระแสสลับ และไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข



ก. วงจรพื้นฐานของวงจรทอนระดับ



ข. วงจรทอนระดับที่แปลงผลของการปิดเปิดสวิตช์ เป็นหม้อแปลง

รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงผลจากการปิดเปิดสวิตช์ เป็นหม้อแปลง

โดยที่ $d = D + \hat{d}$ เมื่อ \hat{d} คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ
 วัฏจักรงานคงที่ D

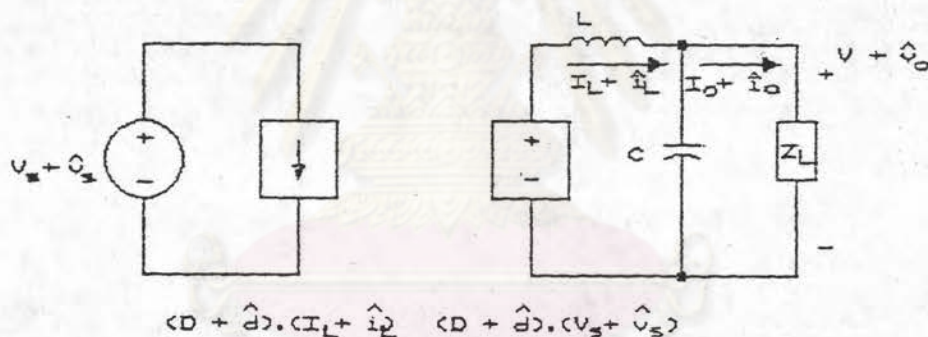
$v_s = V_s + \hat{v}_s$ เมื่อ \hat{v}_s คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ
 แรงดันเข้าคงที่ V_s

$i_L = I_L + \hat{i}_L$ เมื่อ \hat{i}_L คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ ค่าคงที่
 ของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ I_L

$v_o = V_o + \hat{v}_o$ เมื่อ \hat{v}_o คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ ค่าคงที่
 ของแรงดันออก V_o

$i_o = I_o + \hat{i}_o$ เมื่อ \hat{i}_o คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบ ๆ ค่าคงที่
 ของกระแสออก I_o

จากรูปที่ 2.6 ข ทำการเปลี่ยนหม้อแปลงเป็นแหล่งจ่ายกำลังไม่อิสระที่สมมูลกัน
 ดังแสดงในรูปที่ 2.7



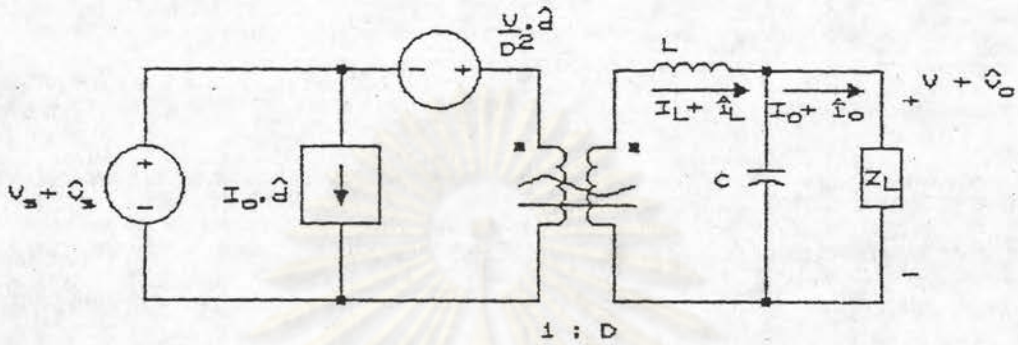
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนหม้อแปลงในรูปที่ 2.6.ข เป็นแหล่งจ่ายที่สมมูลกัน

จากรูปที่ 2.7 สามารถแยกแหล่งจ่ายไม่อิสระแต่ละตัว เป็นแหล่งจ่ายไม่อิสระ 2
 ตัว ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 (D + \hat{d}) \cdot (I_L + \hat{i}_L) &= D \cdot I_L + D \cdot \hat{i}_L + \hat{d} \cdot I_L + \hat{d} \cdot \hat{i}_L \\
 &= D (I_L + \hat{i}_L) + I_L \cdot \hat{d} && \text{(ละเลข } \hat{d} \cdot \hat{i}_L) \\
 (D + d) \cdot (V_s + \hat{v}_s) &= D \cdot V_s + D \cdot \hat{v}_s + \hat{d} \cdot V_s + \hat{d} \cdot \hat{v}_s \\
 &= D \cdot (V_s + \hat{v}_s) + V_s \cdot \hat{d} && \text{(ละเลข } \hat{d} \cdot \hat{v}_s)
 \end{aligned}$$

จากแหล่งจ่ายไม่อิสระ $D \cdot (I_L + \hat{i}_L)$ และ $D \cdot (V_s + \hat{v}_s)$ ทำการแปลงเป็นหม้อแปลง
 ไฟฟ้าที่มีอัตราการผลิตเท่ากับ $1:D$ แล้วย้ายข้างของแหล่งจ่าย $V_s \cdot \hat{d} = (V/D) \cdot \hat{d}$

ไปทางปรนภูมิจะได้ $(V/D^2) \cdot \hat{d}$ นอกจากนี้ เนื่องจาก $I_L = I_o = V_o/R$ เมื่อ R คือ อัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยของแรงดันออกไฟตรงต่อค่าเฉลี่ยของกระแสออกไฟตรง ทำให้แบบจำลองในรูปที่ 2.7 เป็นดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 canonical model ของวงจรทอนระดับที่ใช้การควบคุมแบบ duty ratio programmed

ในทางปฏิบัติสำหรับการควบคุมแบบ duty ratio programmed วัฏจักรงาน d จะได้จากวงจรมอดูเลตที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณออกของวงจรมอดูเลต (vc) กับ สัญญาณฟันเลื่อยที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ Vm ทำให้

$$d = \frac{V_c}{V_m} = \frac{V_c + \hat{V}_c}{V_m} = \frac{V_c}{V_m} + \frac{\hat{V}_c}{V_m}$$

ดังนั้น $D = \frac{V_c}{V_m} \quad \hat{d} = \frac{\hat{V}_c}{V_m}$

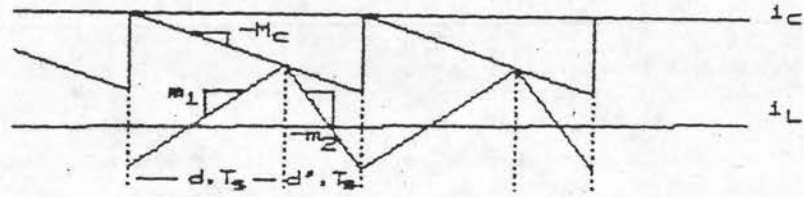
แต่ในกรณีของการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตซ์คงที่ d จะขึ้นกับสัญญาณควบคุม (ic) กระแสที่ทำการควบคุม (iL) และสัญญาณฟันเลื่อยชดเชย ดังลักษณะรูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรในรูปที่ 2.9

จากรูปที่ 2.9 จะได้สมการของ iL ที่เวลา d.Ts เป็น

$$i_c - M_c \cdot d \cdot T_s = i_L + (m_1 \cdot d \cdot T_s) / 2 \tag{2.8}$$

โดยที่

$m_1 = M_1 + \hat{m}_1$ เมื่อ \hat{m}_1 คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบค่าของความชันขาขึ้นของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (M_1)



รูปที่ 2.9 ลักษณะรูปคลื่นที่แสดงการทำงานของวงจรทอนระดับที่ใช้วิธีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตช์คงที่

$m_2 = M_2 + \hat{m}_2$ เมื่อ \hat{m}_2 คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบค่าของความชันขาลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (M_2)

$i_c = I_c + \hat{i}_c$ เมื่อ \hat{i}_c คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กรอบค่าของสัญญาณคำสั่งกระแสที่เป็นสัญญาณออกของวงจรคุมค่า (i_c) ปกติจะใช้แรงดันคุมค่า (v_c) แทน i_c ซึ่งทั้งสองสัมพันธ์กันด้วยความต้านทาน R_f โดยแทน $i_c = v_c / R_f$

T_s คือ คาบการทำงานของสวิตช์

M_c คือ ความชันของสัญญาณพื้นเลื่อยชดเชย เนื่องจากจะถือว่าความชันของสัญญาณพื้นเลื่อยชดเชยซึ่งเป็นสัญญาณอิสระมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงมีเฉพาะปริมาณไฟตรงเท่านั้น

เมื่อทำการแทนค่า ในสมการ (2.8) โดยแยกแต่ละพจน์เป็นปริมาณไฟตรง และปริมาณไฟสลับ (ปริมาณการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดเล็ก) จะได้ผลคือ

$$D = \frac{2}{n \cdot M_1 \cdot T_s} \cdot \left(\frac{V_c}{R_f} - I_L \right) \tag{2.9}$$

$$\hat{d} = \frac{2}{n \cdot M_1 \cdot T_s} \cdot \left(\frac{\hat{V}_c}{R_f} - \hat{i}_L \right) - \frac{D}{n \cdot M_1} \cdot \hat{m}_1 \tag{2.10}$$

$$\text{โดยที่ } n = 1 + \frac{2 \cdot M_c}{M_1} \tag{2.11}$$

จากรูป 2.6 ก ในช่วงที่สวิตช์ SW_1 นำกระแส แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L เท่ากับ $v_s - v_o$ ดังนั้น

$$m_1 = \frac{(v_s - v_o)}{L} \quad (2.12)$$

จาก $v_o = D \cdot v_s$ จะได้

$$M_1 = \frac{(D' \cdot v_o)}{(D \cdot L)} \quad (2.13)$$

$$\hat{m}_1 = \frac{(\hat{v}_s - \hat{v}_o)}{L} \quad (2.14)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.13), (2.14) ลงในสมการ (2.10) จะได้

$$\hat{d} = \frac{K \cdot R \cdot D}{n \cdot D' \cdot v_o} \left(\frac{\hat{v}_c}{R_f} - \hat{i}_L \right) - \frac{D^2}{n \cdot D' \cdot v_o} \cdot \hat{v}_s + \frac{D^2}{n \cdot D' \cdot v_o} \cdot \hat{v}_o \quad (2.15)$$

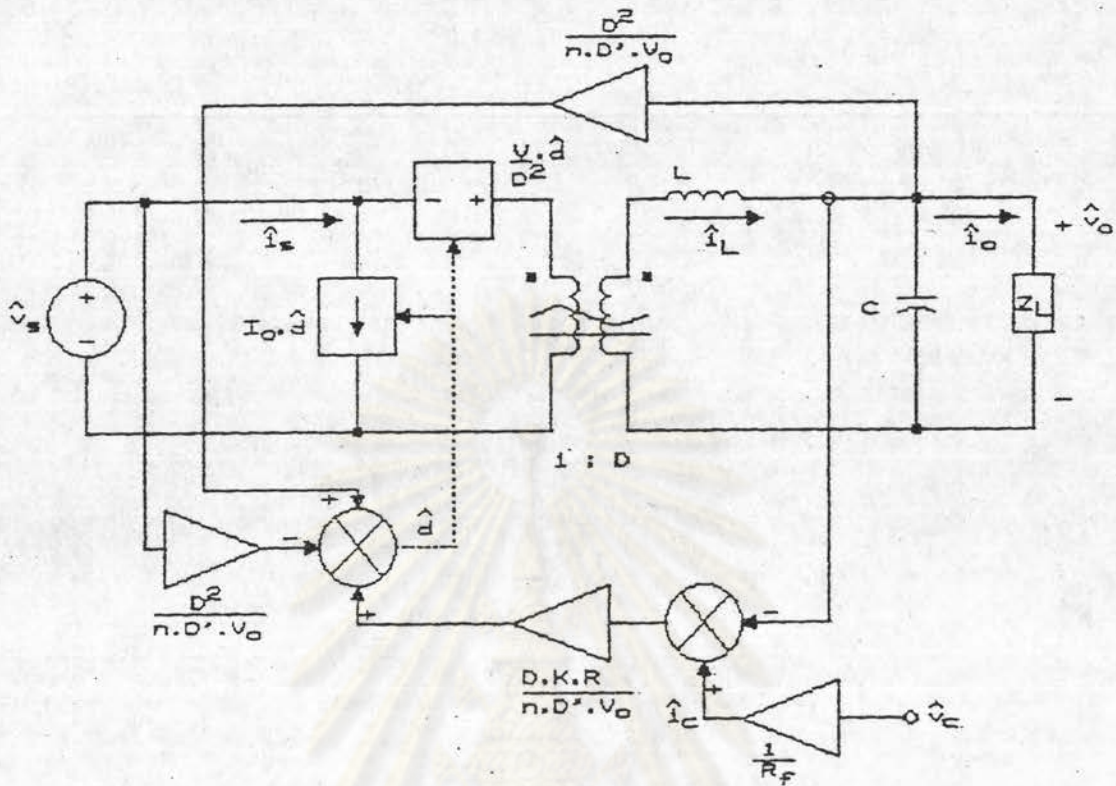
โดยที่ $K = \frac{(2 \cdot L)}{(R \cdot T_s)}$

ในกรณีที่มีการกำหนดสัญญาณชดเชยแบบพอดดี คือให้ $M_c = M_2$ ซึ่งทำให้การทำงานของวงจรมีการตอบสนองที่เร็วที่สุด [Middlebrook, 1981] ทำให้

$$n = 1 + \frac{2 \cdot M_2}{M_1}$$

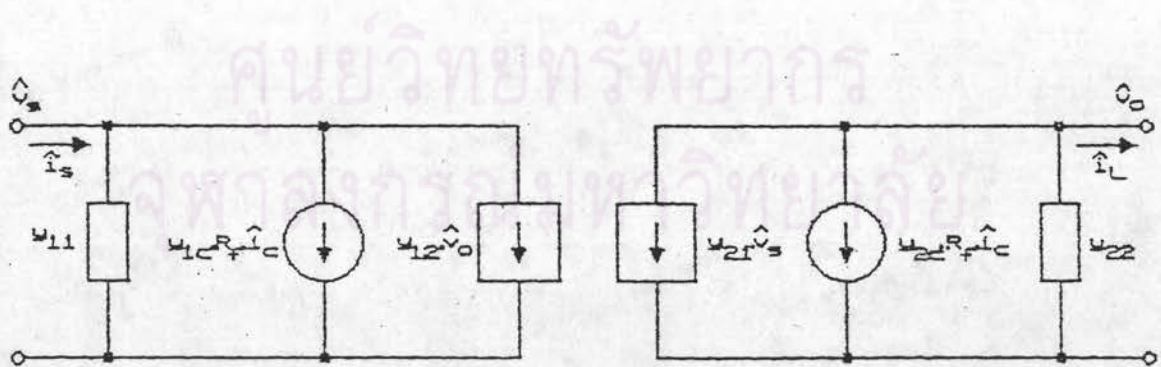
หรือ $n = 1 + \frac{2 \cdot D}{D'} = \frac{1 + D}{D'} = \frac{(1 + D)}{(1 - D)}$ (2.16)

จากสมการที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า \hat{d} นอกจากจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคำสั่งกระแส (\hat{v}_c) แล้ว ยังขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ (\hat{i}_L), การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาเข้า (\hat{v}_s) และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก (\hat{v}_o) เมื่อนำค่า \hat{d} ที่ได้มารวมกับรูปที่ 2.8 ก็จะได้แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.10



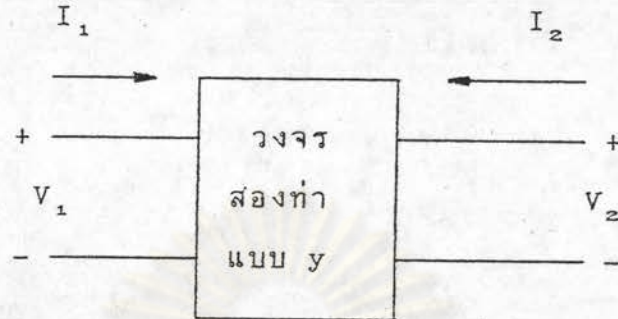
รูปที่ 2.10 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่ความถี่ในการสวิตซ์คงที่

เพื่อเป็นการง่ายในการหาฟังก์ชันโอนย้าย (transfer function) ต่าง ๆ จึงทำการเปลี่ยนแบบจำลองในรูปที่ 2.10 เป็นวงจรสองท่า แบบ y ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับที่มีการควบคุมโดยกำหนดกระแสที่มีความถี่ในการสวิตซ์คงที่ในรูปแบบของตัวแปร y

ตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 2.11 หาได้จากหลักการของวงจรสองท่าแบบ y ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสองท่าแบบ y

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 มีนิยามของตัวแปรแต่ละพจน์ดังนี้

$$y_{11} = \frac{I_1}{V_1} \Big|_{v_2=v_c=0} = \frac{i_s}{V_s} \Big|_{\hat{v}_o=\hat{v}_c=0} \quad (2.17)$$

$$y_{1c} = \frac{I_1}{V_c} \Big|_{v_1=v_2=0} = \frac{i_s}{V_c} \Big|_{\hat{v}_s=\hat{v}_o=0} \quad (2.18)$$

$$y_{12} = \frac{I_1}{V_2} \Big|_{v_1=v_c=0} = \frac{i_s}{V_o} \Big|_{\hat{v}_s=\hat{v}_c=0} \quad (2.19)$$

$$y_{21} = \frac{I_2}{V_1} \Big|_{v_2=v_c=0} = -\frac{i_L}{V_s} \Big|_{\hat{v}_o=\hat{v}_c=0} \quad (2.20)$$

$$y_{2c} = \frac{I_2}{V_c} \Big|_{v_1=v_2=0} = -\frac{i_L}{V_c} \Big|_{\hat{v}_s=\hat{v}_o=0} \quad (2.21)$$

$$y_{22} = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{v_1=v_c=0} = -\frac{i_L}{V_o} \Big|_{\hat{v}_s=\hat{v}_c=0} \quad (2.22)$$

ทำการหาตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรสองท่า ตามสมการ (2.17) - (2.22) จากรูปที่ 2.10 และสมการ (2.15) จะได้

$$y_{11} = -\frac{c_1 \cdot D^2}{R} \cdot \left[\frac{1 + [(s/c_1) \cdot (\pi/w_s)]}{1 + (s/w_c)} \right] \quad (2.23)$$

โดยที่ $c_1 = 1 - \frac{(n \cdot D' - 1)}{K}$

$$y_{1c} = \frac{D}{R_f} \cdot \frac{1 + sL/R}{1 + s/w_c} \quad (2.24)$$

$$y_{12} = \frac{c_2 \cdot D}{R} \cdot \left[\frac{1 + [(s \cdot D/c_2) \cdot (\pi/w_s)]}{1 + (s/w_c)} \right] \quad (2.25)$$

โดยที่

$$c_2 = 1 - \frac{(n \cdot D' - D)}{K}$$

$$y_{21} = - \frac{D \cdot (n \cdot D' - 1)}{K \cdot R} \cdot \frac{1}{(1 + s/w_c)} \quad (2.26)$$

$$y_{2c} = - \frac{1}{R_f} \cdot \frac{1}{(1 + s/w_c)} \quad (2.27)$$

$$y_{22} = \frac{(n \cdot D' - D)}{K \cdot R} \cdot \frac{1}{(1 + s/w_c)} \quad (2.28)$$

โดยที่

$$w_s = \frac{2 \cdot \pi}{T_s} = 2 \cdot \pi \cdot f_s$$

$$w_c = \frac{K \cdot R}{n \cdot D' \cdot L} = \frac{2}{n \cdot D' \cdot T_s} = \frac{w_s}{\pi \cdot n \cdot D'} = \frac{2 \cdot f_s}{n \cdot D'} \quad (2.29)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย