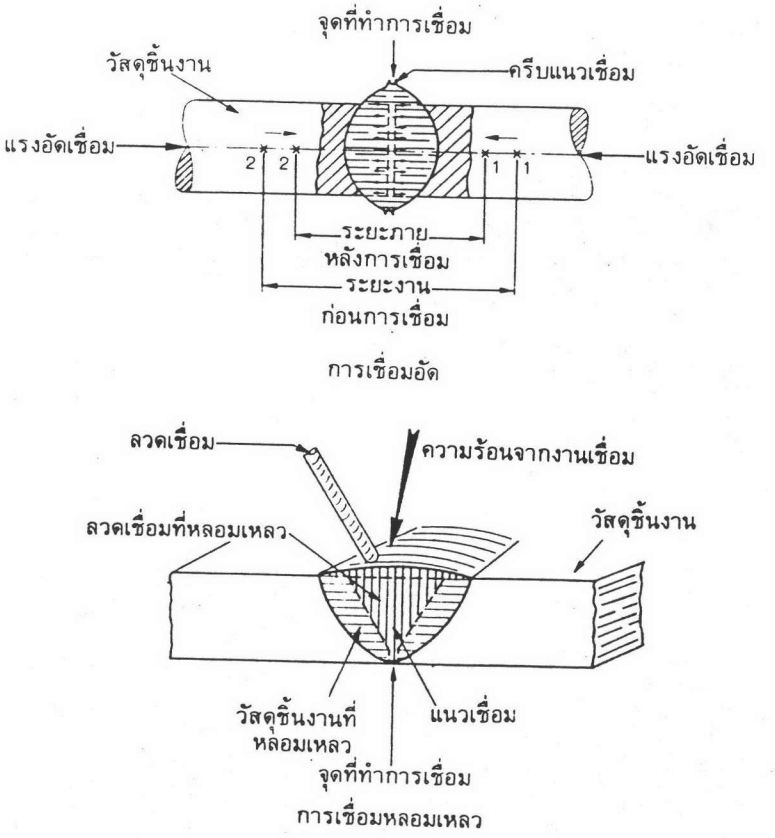
บทที่ 2

ทฤษฎีเครื่องเชื่อมอาร์คไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์

บทนำ

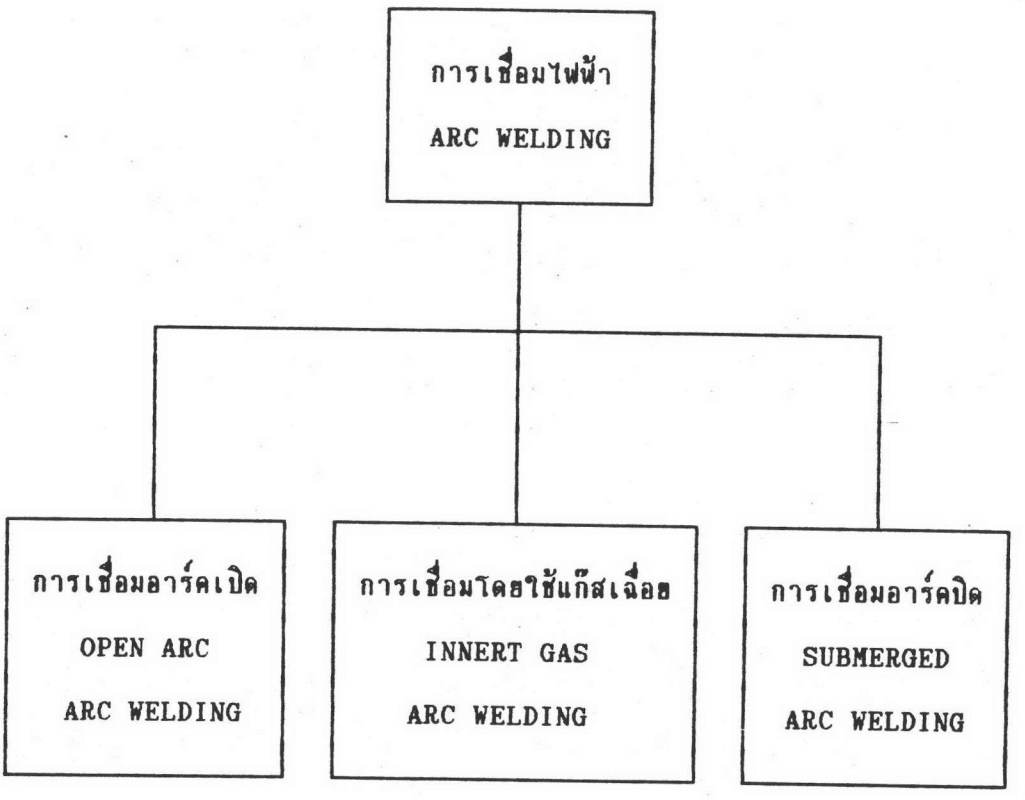
การเชื่อมโลหะคือการนำโลหะมาต่อประสานกัน ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน การเชื่อมโลหะแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การเชื่อมโดยใช้ความร้อนพร้อมกับแรงอัด เรียกว่าการเชื่อมอัด (Press Welding) และการเชื่อมโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว เรียกว่าการเชื่อมหลอมเหลว (Fusion Welding) ดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างการเชื่อมอัดและการเชื่อมหลอมเหลว

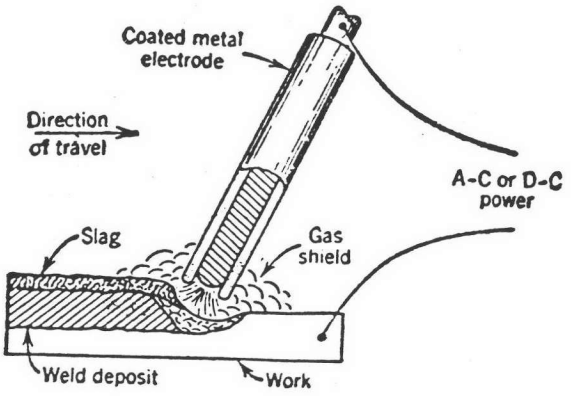
1. การเชื่อมอัด หมายถึงการเชื่อมโลหะที่มีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเฉพาะจุดที่ต้องการเชื่อมจุดใดจุดหนึ่งเป็นการเฉพาะ โดยให้ความร้อนจนถึงจุดหลอมตัว หรือเกือบถึงจุดหลอมตัวจากนั้นใช้แรงอัดอัดส่วนที่หลอมละลายจนผิวงานติดกันเป็นจุดหรือแนวเชื่อมตลอดแนวภาคตัดหรือส่วนผิวของชิ้นงาน เช่น การเชื่อมแบบจุด (Spot Welding)

2. การเชื่อมหลอมเหลว หมายถึงการเชื่อมโลหะโดยใช้ความร้อนทำให้ชิ้นงานหลอมละลายในขอบเขตจำกัด ณ อุณหภูมิหนึ่ง ขณะเดียวกันใช้วัสดุชนิดเดียวกันกับชิ้นงานเป็นตัวเติมรอยประสานหรือไม่เติมก็ได้ ในขณะที่ชิ้นงานหลอมละลาย วัสดุตัวประสานที่ใช้เติมลงในบ่อหลอมจะต้องมีอุณหภูมิหรือจุดหลอมตัวใกล้เคียงหรือเท่ากับโลหะที่ทำการเชื่อม หลังจากบ่อหลอมเย็นตัวลงก็จะปรากฏเป็นแนวเชื่อมหรือรอยพอกบนผิวหน้าชิ้นงาน การเชื่อมหลอมเหลวนี้สามารถทำได้หลายแบบ การเชื่อมอาร์คไฟฟ้าเป็นกรรมวิธีการเชื่อมหลอมเหลวแบบหนึ่ง รูปที่ 2.2 แสดงแผนผังการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าแบบหลอมเหลว



รูปที่ 2.2 ผังแสดงกรรมวิธีการเชื่อมอาร์คไฟฟ้าแบบหลอมเหลว

การเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมโลหะ ผู้ค้นพบคือสลาเวียนอฟฟ์ (SLAVIANOFF) เป็นวิธีการเชื่อมที่นิยมและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง วิธีการเชื่อมแบบนี้ใช้ลวดเชื่อมหรือชุปเชื่อมที่มีสารพอกหุ้มอยู่ ขณะที่ลวดเชื่อมทำให้เกิดอาร์คตัวลวดเชื่อมเองจะทำหน้าที่หลอมละลายเติมเนื้อโลหะให้แก่บ่อหลอมละลายให้เกิดแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเชื่อมอาร์คไฟฟ้าแบบหลอมเหลวโดยใช้ลวดเชื่อมโลหะ

ม่านแก๊สที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของสารพอกหุ้มจะปกคลุมบริเวณแนวเชื่อมไว้เพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกริยากับรอยเชื่อม ส่วนสารพอกหุ้มที่หลอมละลายปิดแนวเชื่อม เมื่อเย็นลงจะกลายเป็นตะกรันเชื่อม (Slag)

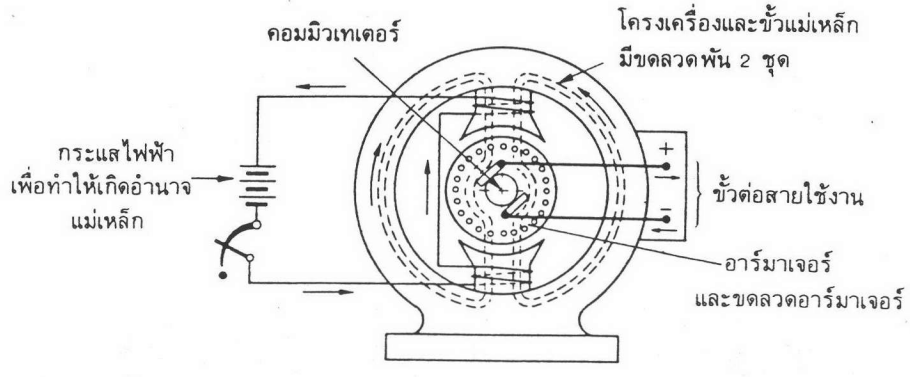
<u>ทฤษฎีเครื่องเชื่อมไฟฟ้า</u>

เครื่องเชื่อมไฟฟ้า คือแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดประกายอาร์คในวงจรเชื่อม และให้ความร้อนแก่บ่อหลอมละลายอย่างเพียงพอ เครื่องเชื่อมไฟฟ้าที่มีใช้งานโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเยเนอร์เรเตอร์ (Generator)
2. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)
3. เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำ หรือเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเรกติฟาย (Rectifier)

1. <u>เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเยเนอเรเตอร์</u>

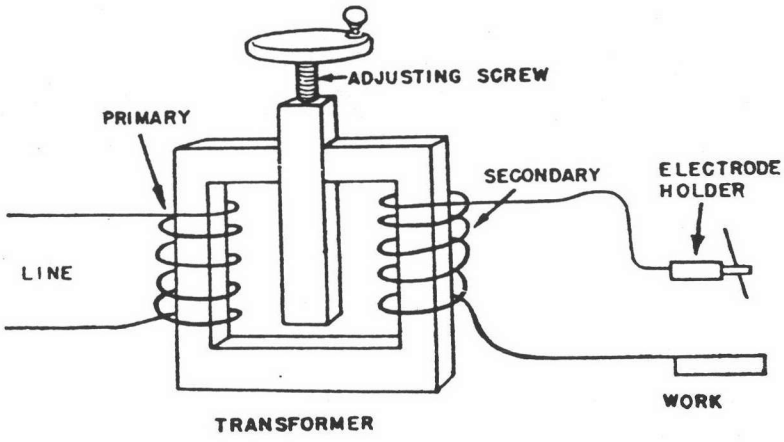
เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเยเนอเรเตอร์เป็นเครื่องเชื่อมที่ผลิตไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้แก่วงจรเชื่อม กระแสไฟเชื่อมที่ผลิตได้แตกต่างกันตามขนาดของเครื่องสามารถจ่ายกระแสเชื่อมได้ตั้งแต่ 50 - 500 แอมแปร์ ในรูป 2.4 แสดงโครงสร้างของเครื่องเชื่อมแบบเยเนอร์เรเตอร์ ข้อดีของเครื่องเชื่อมชนิดนี้ คือเลือกขั้วเชื่อมได้ และเกิดประกายอาร์คเชื่อมได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ ราคาต้นทุนสูงต้องการการบำรุงรักษามาก



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบเยเนอร์เรเตอร์

2. <u>เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงไฟฟ้า</u>

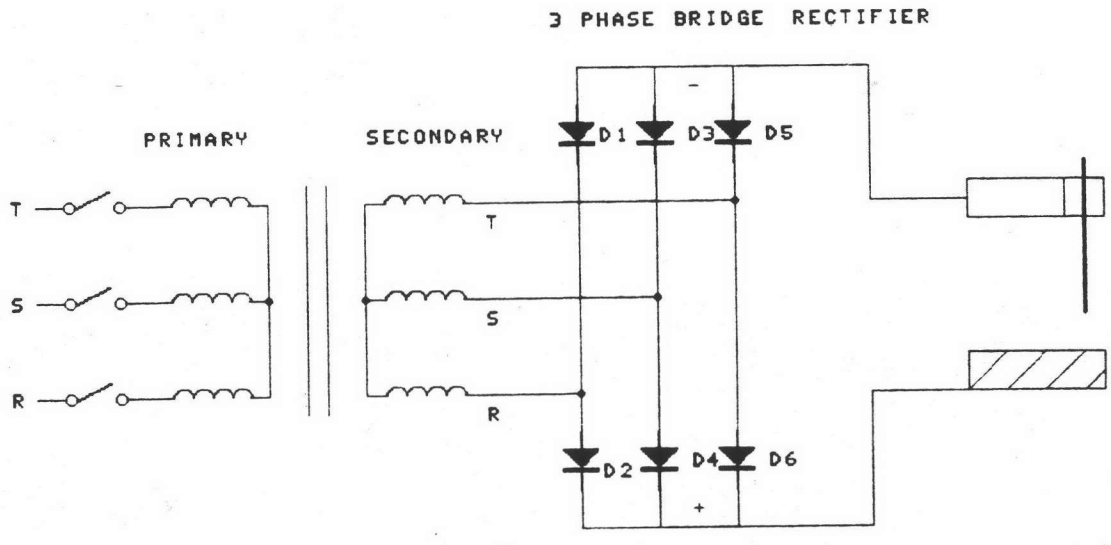
เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟฟ้าสลับออกมาใช้ในงานเชื่อม ขาเข้าเครื่องเชื่อมจะต่อกับสายเมนไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันที่ใช้ในการเชื่อม ตัวหม้อแปลงจะทำหน้าที่ลดแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเพื่อให้มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการเชื่อม ตัวหม้อแปลงที่ใช้ในเครื่องเชื่อม จะเป็นแบบที่มีความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงสูง เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งจะทำให้สามารถลัดวงจรขาออกได้ รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ข้อดีของเครื่องเชื่อมชนิดนี้คือ ราคาต้นทุนต่ำ ต้องการการบำรุงรักษาน้อย แต่มีข้อเสียคือ เลือกขั้วเชื่อมไม่ได้



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

3. <u>เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำ</u>

เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบนี้เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้ผลิตไฟฟ้ากระแสตรงจากไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสหรือ 3 เฟสโดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 1 เฟสหรือแบบบริดจ์ 3 เฟส เป็นตัวเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการเชื่อม โครงสร้างประกอบด้วยชุดหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิรตซ์ต่อกับชุดไดโอดเรกติฟายแบบบริดจ์ และพัดลมทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับชุดเรกติฟาย ในรูปที่ 2.6 แสดงวงจรของเครื่องเชื่อมไฟตรงที่ใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำ ข้อดีของเครื่องเชื่อมชนิดนี้คือ เลือกขั้วเชื่อมได้และเกิดประกายอาร์คเชื่อมได้ง่าย



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรของเครื่องเชื่อมไฟตรงที่ใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำ

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมแต่ละชนิด

คุณสมบัติทั่วไป	เครื่องเชื่อมแบบเยเนอเรเตอร์	เครื่องเชื่อมแบบเรกติฟาย	เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลง
ชนิดของกระแสไฟเชื่อม	กระแสไฟตรง	กระแสไฟตรง	กระแสไฟสลับ
การเลือกใช้ขั้วเชื่อม	ได้	ได้	ไม่ได้
การเกิดประกายอาร์คเชื่อม	ง่าย	ง่าย	ปานกลาง
COS ϕ ไม่ปรับแก้	~1	~0.3	~0.3
COS ϕ ปรับแก้แล้ว	ไม่ต้องแก้	0.7-0.8	0.7-0.8
ความสูญเสียกำลัง กำลังขณะเปล่างาน	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ประสิทธิภาพ (η)	0.6	0.7-0.8	0.8-0.9
การบำรุงรักษา	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ราคาต้นทุน	สูง	ปานกลาง	ต่ำ

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้เครื่องเชื่อมแต่ละชนิดตามความเหมาะสมของงาน

การเลือกขั้วเชื่อม

จากข้อดีของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถเลือกขั้วเชื่อมได้ทำให้สามารถเลือกลักษณะการเชื่อมได้ 2 ลักษณะดังนี้

1. การเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงต่อขั้วตรง

การเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงต่อขั้วตรง (Directing Current Straight Polarity) ใช้ย่อว่า DCSP หรือ DC- การเชื่อมในลักษณะเช่นนี้ สายไฟเชื่อม หัวเชื่อม และลวดเชื่อมต่อเข้ากับขั้วลบ(-) และชิ้นงานต่อเข้ากับขั้วบวก(+) การใช้วงจรลักษณะเช่นนี้จะทำให้ได้แนวเชื่อมสมบูรณ์ มีการซึมลึกสูง

2. การเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงต่อกลับขั้ว

การเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงต่อกลับขั้ว (Directing Current Reverse Polarity) ใช้ย่อว่า DCRP หรือ DC+ การเชื่อมในลักษณะเช่นนี้ สายไฟเชื่อม หัวเชื่อม และลวดเชื่อมต่อเข้ากับขั้วบวก(+) และชิ้นงานต่อเข้าสายขั้วลบ(-) การใช้วงจรลักษณะเช่นนี้จะให้แนวเชื่อมมีลักษณะแนวกว้าง ซึมไม่ลึก

อย่างไรก็ดีเครื่องเชื่อมแบบเยเนอเรเตอร์และแบบเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำจะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้าย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวได้มีการใช้หลักการสวิตช์ชิงที่ความถี่สูงเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาตลอดจนได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น รายละเอียดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

แหล่งจ่ายไฟตรงแบบวิธีสวิตช์

แหล่งจ่ายไฟตรงแบบวิธีสวิตช์ โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วนคือ วงจรภาคกำลังและวงจรภาคควบคุม วงจรภาคกำลังประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันประมาณ 295 โวลต์ โดยใช้วงจรเรียงกระแสร่วมกับวงจรกรองและวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง(DC-DC Converter)นี้ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 295 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ สำหรับวงจรภาคควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรภาคกำลัง เพื่อให้ได้ระดับของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกตามต้องการ

1. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบวิธีสวิตช์นี้ ทำหน้าที่แปลงผันระดับของแหล่งจ่ายไฟตรง เพื่อให้แรงดันไฟตรงด้านขาออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีค่าตามสัญญาณควบคุม วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงมีหลายแบบแต่ละแบบจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน ทั้งในแง่ของอัตราการแปลงผันแรงดัน (V_o/V_s) ความต่อเนื่องของกระแสขาเข้าและขาออก ความซับซ้อนของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรตลอดจนกำลังสูญเสียในสวิตช์ วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงสามารถจำแนกได้เป็น วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบพื้นฐานและวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบพัฒนามาจากวงจรพื้นฐาน

1.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบพื้นฐาน วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้มีอยู่หลายวงจรได้แก่ วงจรทอนระดับ (Buck) วงจรทบระดับ (Boost) วงจรทอนทบระดับภาคแรงดัน(Buck-Boost) วงจรทอนทบระดับภาคกระแส(Cúk) เป็นต้น วงจรดังกล่าวแสดงในรูป 2.7

อัตราการแปลงผันแรงดันซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันของแหล่งจ่ายพลังงานด้านเข้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน(Duty Cycle) ของสวิตช์ วัฏจักรงานของสวิตช์ (D) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของช่วงเวลาที่สวิตช์ไวงานนำกระแส (DT) ต่อคาบเวลาการทำงานของสวิตช์ (T) การคำนวณอัตราการแปลงผันแรงดันในภาวะอยู่ตัว จะทำได้โดยอาศัยหลักการสมดุลของพลังงานเข้ากับพลังงานออก หรืออาจจะคำนวณหาจากความสมดุลระหว่างผลคูณของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-Sec Balance) อัตราการแปลงผันแรงดันจะมีค่าขึ้นอยู่กับวัฏจักรงาน (D) ของสวิตช์ไวงาน (SW_1) ตามสมการ (2.1) (2.2)และ (2.3)

กรณีวงจรทอนระดับ (Buck)

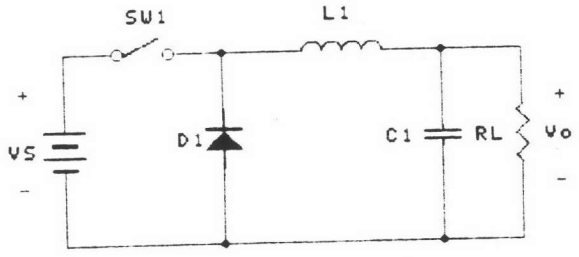
$$V_o/V_s = D \qquad (2.1)$$

กรณีวงจรทบระดับ (Boost)

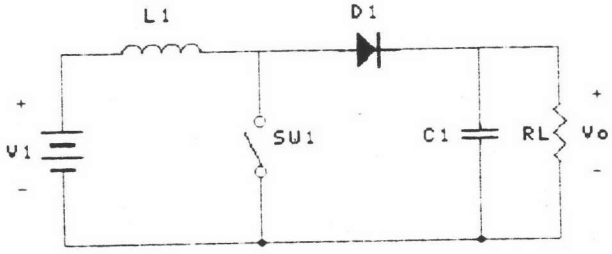
$$V_o/V_s = 1/(1-D) \qquad (2.2)$$

กรณีวงจรกอนทบระดับภาคแรงดันและกระแส

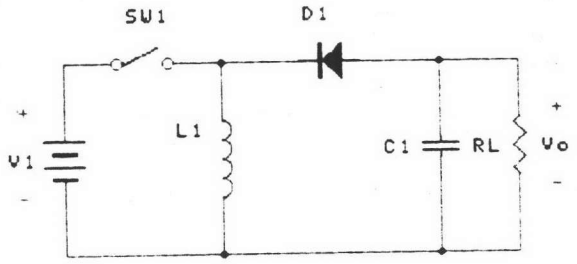
$$V_o/V_s = -D/(1-D) \qquad (2.3)$$



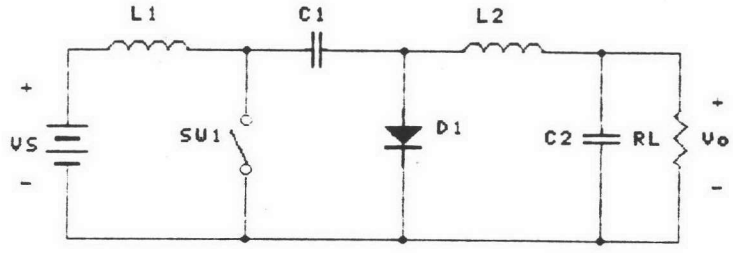
ก. วงจรกอนระดับ(Buck)



ข. วงจรกบระดับ(Boost)



ค. วงจรกอนทบระดับภาคแรงดัน(Buck-Boost)



ง. วงจรทอนทบระดับภาคกระแส (Cúk)

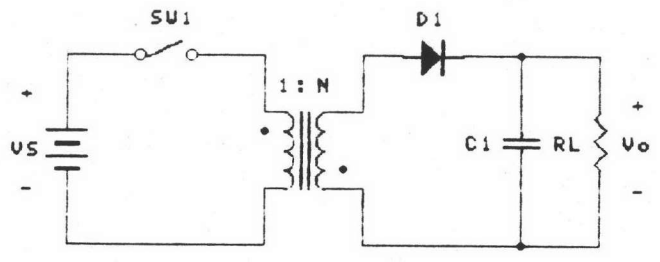
รูปที่ 2.7 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบพื้นฐาน

เนื่องจาก D $\ll$ 1 จากสมการ (2.1) จะเห็นได้ว่าแรงดันด้านออกของวงจรทอนระดับจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันด้านเข้า จากสมการ (2.2) แรงดันด้านออกของวงจรทบระดับจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันด้านเข้า จากสมการ (2.3) แรงดันด้านออกของวงจรทอนทบระดับจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันด้านเข้าเมื่อ D < 0.5 และแรงดันด้านออกจะมีค่ามากกว่าแรงดันด้านเข้าเมื่อ D > 0.5 อย่างไรก็ดีสมการของอัตราการแปลงผันแรงดันที่กล่าวมาจะถูกต้องเฉพาะในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียในอุปกรณ์ที่ใช้ ฉะนั้นความเป็นจริงแล้วแรงดันด้านออกจะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการดังกล่าว

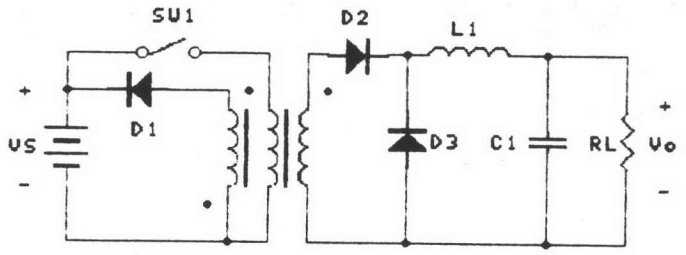
คุณสมบัติที่สำคัญของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง คือความต่อเนื่องของกระแสด้านเข้าและด้านออก ทั้งนี้เพราะกระแสที่ไม่ต่อเนื่องจะมีฮาร์มอนิกสูงอันเป็นผลทำให้เกิดคลื่นรบกวนและกำลังสูญเสียในวงจรมากขึ้น นอกจากนี้ความไม่ต่อเนื่องของกระแสด้านออกยังจะทำให้ระลอกของแรงดันทั้งด้านเข้าและด้านออกสูงขึ้น วงจรทอนระดับจะมีความไม่ต่อเนื่องของกระแสด้านออก วงจรทบระดับจะมีความไม่ต่อเนื่องของกระแสด้านเข้าวงจรทอนทบระดับจะมีความไม่ต่อเนื่องของกระแสด้านเข้าและด้านออก วงจรทอนทบระดับภาคกระแสจะมีความต่อเนื่องของกระแสทั้งด้านเข้าและด้านออก นอกจากนี้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแต่ละชนิดจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่น วงจรทอนระดับจะมีลักษณะวงจรที่ง่าย ส่วนวงจรทอนทบระดับภาคกระแสจะมีวงจรที่ยุ่งยากเพราะจะต้องเพิ่มตัวเหนี่ยวนำและตัว

เก็บประจุขึ้นอย่างละตัว ในการเลือกใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแต่ละชนิดจะขึ้นกับลักษณะงาน โดยทั่วไปแล้วถึงแม้ว่าอัตราแปรผันสามารถปรับค่าได้ทำให้แปรค่าของแรงดันไฟตรงด้านออกได้ในช่วงกว้างก็จริง ในทางปฏิบัติแล้วจะมีค่า D ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงนิยมปรับแรงดันออกในช่วงแคบ ๆ เท่านั้น ในกรณีที่แรงดันด้านเข้ากับแรงดันด้านออกมีค่าต่างกันมาก ๆ เช่น ในกรณีของแหล่งจ่ายไฟตรงแบบ Off-Line ถ้าต้องการแรงดันด้านออกที่ต่ำโดยแรงดันด้านเข้ามีค่าสูง วงจรทอนระดับที่ไม่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูงที่ช่วยในการปรับแรงดันด้านออกอาจจะมีความไม่เหมาะสม เพราะวัฏจักรงานที่ใช้จะมีค่าต่ำมากซึ่งในทางปฏิบัติทำได้ยากเนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์จะไม่ดี

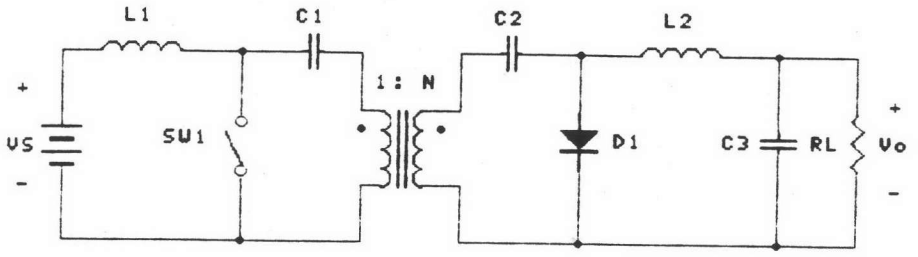
1.2 <u>วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่พัฒนามาจากวงจรพื้นฐาน</u> วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้ เป็นวงจรที่มีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงความถี่สูง เช่น วงจรบินกลับ (Flyback) วงจรไปหน้า (Forward) วงจรทอนทบระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดด (Isolated Cúk) วงจรพุช-พูล (Push-Pull) วงจรกึ่งบริดจ์ (Half-Bridge) วงจรบริดจ์เต็ม (Full-Bridge) และวงจรบริดจ์ไม่สมมาตร (Asymmetrical Bridge) เป็นต้น รูปวงจรดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.8



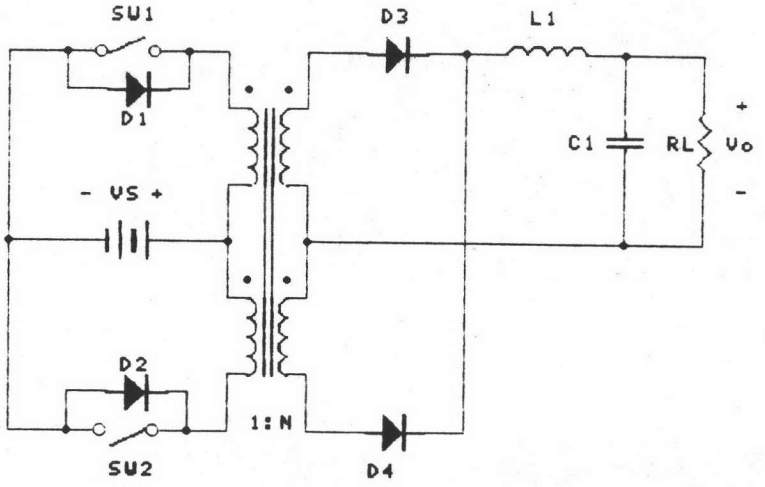
ก. วงจรบินกลับ(Flyback)



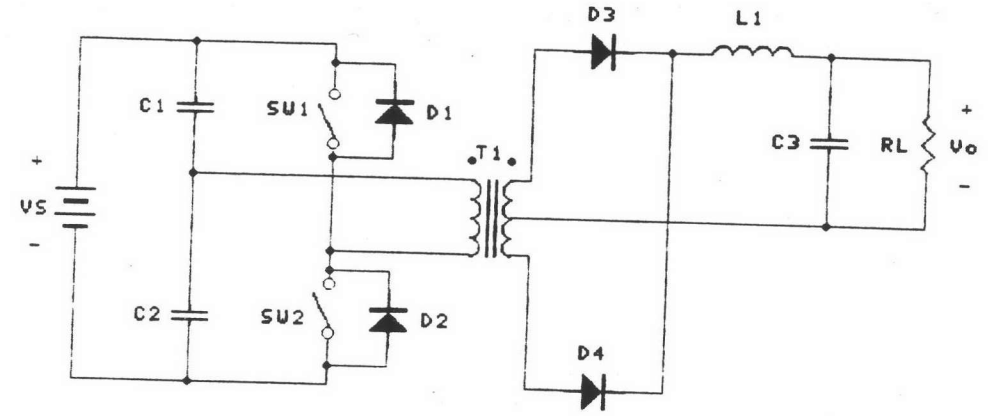
ข. วงจรไปหน้า(Forward)



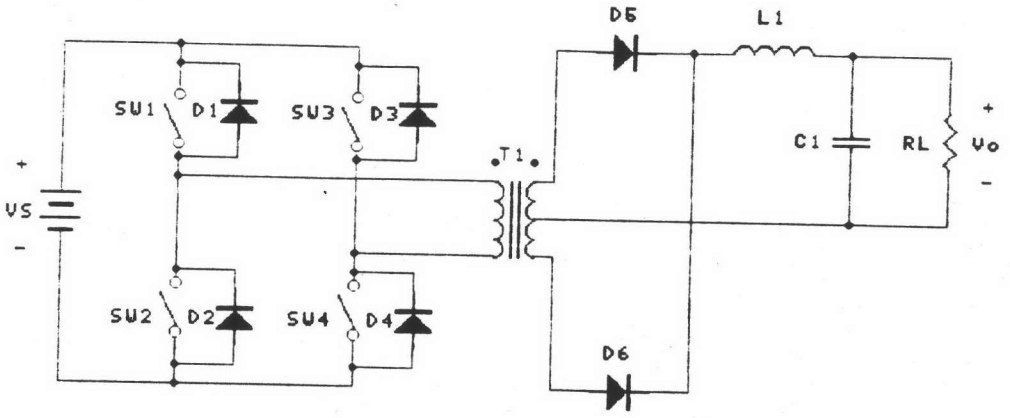
ค. วงจรทอนทบระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดด(Isolated Ćuk)



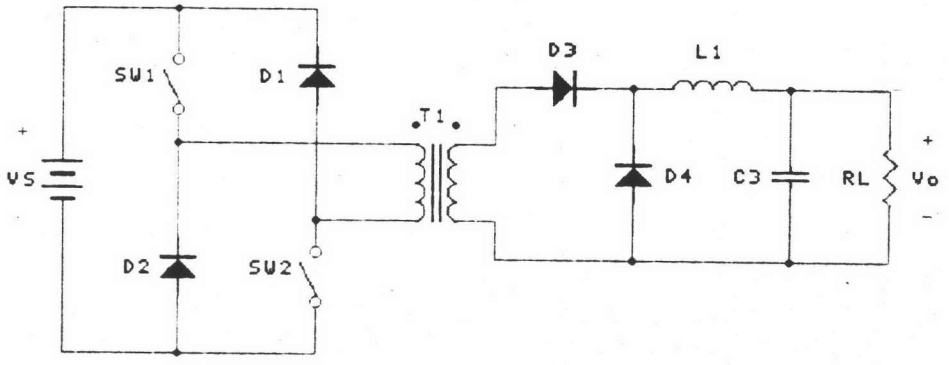
ง. วงจรพุช-พูล ภาคแรงดัน(Push-Pull)



จ. วงจรกึ่งบริดจ์(Half-Bridge)



ช. วงจรบริดจ์เต็ม(Full-Bridge)



ซ. วงจรบริดจ์ไม่สมมาตร(Asymmetrical Bridge)

รูปที่ 2.8 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่พัฒนามาจากวงจรพื้นฐาน

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่พัฒนามาจากวงจรพื้นฐานอาจจะมีการแยกโดดด้วยหม้อแปลงหรืออาจมีการเพิ่มสวิตช์ เช่นวงจรในรูปที่ 2.8 วงจรที่มีการแยกโดดนี้จะมีอัตราการแปลงแรงดันที่แตกต่างกันดังนี้คือ

กรณีวงจรบินกลับและวงจรทอนทบระดับแรงดันภาคกระแสที่มีการแยกโดดจะมีอัตราการแปลงผันตามสมการ (2.4) เมื่อ N คืออัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn Ratio)

$$V_o/V_s = N*D/(1-D) \qquad (2.4)$$

กรณีวงจรไปหน้า, วงจรพุช-พูล, วงจรเต็มบริดจ์และวงจรบริดจ์ไม่สมมาตรจะมีอัตราการแปลงผันตามสมการ (2.5)

$$V_o/V_s = N*D \qquad (2.5)$$

กรณีวงจรกึ่งบริดจ์จะมีอัตราการแปลงผันแรงดันตามสมการ (2.6)

$$V_o/V_s = N*D/2 \qquad (2.6)$$

จากสมการ 2.4 - 2.6 จะเห็นได้ว่าการใช้หม้อแปลงความถี่สูงทำให้เราสามารถเลือกวัฏจักรการทำงานที่เหมาะสมได้ ส่วนการปรับค่าแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าจะทำโดยการปรับอัตราส่วนจำนวนรอบ (N) ดังนั้นวงจรที่มีหม้อแปลงความถี่สูงจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการแยกโดดวงจรด้านเข้ากับวงจรด้านออก หรือกรณีที่แรงดันด้านเข้ากับแรงดันด้านออกแตกต่างกันมาก ๆ

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าวงจรทอนทบระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดดวงจรบินกลับ วงจรไปหน้า มีข้อดีคือจะใช้สวิตช์ไวงานเพียงตัวเดียวทำให้วงจรชนิดนี้มีความเชื่อถือได้สูงเพราะไม่มีการ Shoot Through เกิดขึ้นและมีลักษณะวงจรที่ง่าย ยกเว้นวงจรทอนทบระดับภาคกระแสที่มีการแยกโดดจะมีอุปกรณ์มาก แต่วงจรนี้หม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้จะมีประสิทธิภาพสูง เพราะไม่มีองค์ประกอบไฟตรงในหม้อแปลง แต่วงจรพวกนี้มีข้อเสียคือแรงดันคร่อมสวิตช์ไวงานค่อนข้างสูงประมาณอย่างน้อย 2 เท่าของแรงดันด้านเข้าและเมื่อสวิตช์ SW_1 ตัดวงจร ความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ในหม้อแปลงมีผลทำให้เกิดยอดแหลม (Spike) ของแรงดันคร่อมสวิตช์ ทำให้ต้องใช้สวิตช์ไวงานที่ทน

แรงดันสูงขึ้น นอกจากนี้วงจรบินกลับมีความไม่ต่อเนื่องของกระแสทั้งขาเข้าและขาออก

กรณีวงจรไปหน้า หม้อแปลงที่ใช้จะมีขดลวด 3 ขด โดยขดลวดขดที่ 3 ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นขดลวดที่ใช้ระบายกระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ซึ่งเรียกว่าขดลวดตั้งต้น (Reset Coil) ขดลวดนี้จะต้องมีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กกับขดลวดที่เหลืออย่างดี เพื่อลดแรงดันยอดแหลมของสวิตช์

กรณีวงจรพุช-พูลนั้น วงจรจะมีความซับซ้อนกว่าเนื่องจากต้องใช้สวิตช์ไวงาน 2 ตัว แรงดันคร่อมสวิตช์ไวงานจะเป็น 2 เท่าของแรงดันด้านเข้าและเกิดแรงดันยอดแหลมเนื่องจากความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง ทำให้ต้องใช้สวิตช์ไวงานที่ทนแรงดันสูงขึ้น วงจรนี้จึงเหมาะกับกรณีที่แรงดันด้านเข้ามีค่าต่ำและถ้าเกิดความไม่สมมาตรของแรงดันคร่อมหม้อแปลงจะทำให้หม้อแปลงอิ่มตัวได้ ข้อดีของวงจรนี้คือ ระลอกแรงดันขาออกมีค่าต่ำ

กรณีวงจรกึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์นั้นมีข้อดีคือ แรงดันคร่อมสวิตช์ไวงานจะเท่ากับแรงดันด้านเข้าและไม่เกิดแรงดันยอดแหลมที่เกิดจากความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อสวิตช์หยุดนำกระแส กระแสที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลสามารถไหลผ่านทางไดโอดที่ขนานกับสวิตช์อีกตัวหนึ่ง การใช้หม้อแปลงจะใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบไฟตรงของกระแสและเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานในกรณีต้องการกำลังสูง ๆ แต่ข้อเสียคือ วงจรจะใช้สวิตช์ไวงานหลายตัวในกรณีวงจรเต็มบริดจ์ มีปัญหาการ Shoot Through ของสวิตช์ไวงานในกึ่งเดียวกัน อย่างไรก็ตามปัญหาการ Shoot Through สามารถป้องกันได้โดยใช้วงจรขับนำสวิตช์ที่มี Dead Time ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

กรณีวงจรบริดจ์ไม่สมมาตร แรงดันคร่อมสวิตช์ไวงานจะเท่ากับแรงดันขาเข้าและจะไม่เกิดแรงดันยอดแหลมที่เกิดจากความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงเช่นเดียวกับวงจรแบบบริดจ์ นอกจากนี้วงจรแบบบริดจ์ไม่สมมาตรไม่มีปัญหาที่เกิดจากการ Shoot Through ของสวิตช์ไวงาน แต่ข้อเสียที่สำคัญของวงจรบริดจ์ไม่สมมาตรคือ วัฏจักรของสวิตช์ไวงานจะไม่เกิน 50 เปอร์เซนต์ อันเป็นผลมาจากข้อจำกัดของ Volt-Sec คร่อมหม้อแปลงและหม้อแปลงที่ใช้จะมีองค์ประกอบไฟตรงของกระแส ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบกึ่งบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบวิธีสวิตช์ที่สร้างขึ้น เนื่องจาก

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่มีโครงสร้างแบบกึ่งบริดจ์มีข้อดีคือ ใช้สวิตช์ไวงานน้อยกว่าโครงสร้างแบบเต็มบริดจ์และไม่มีองค์ประกอบไฟตรงของกระแส ทำให้สามารถใช้หม้อแปลงความถี่สูงอย่างมีประสิทธิภาพ ข้อเสียคือมีปัญหาการ Shoot Through ของสวิตช์ไวงานในกิ่งเดียวกันได้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้เป็นแบบสามสถานะ (Tri-State)

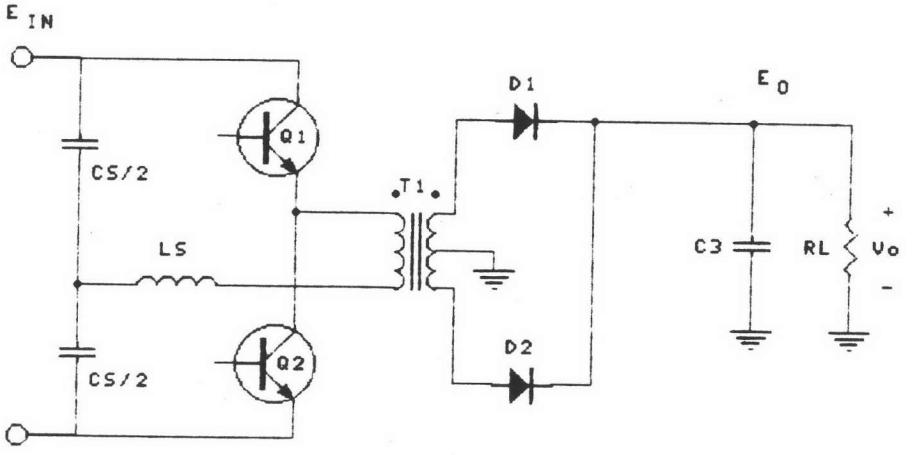
วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ถ้าทำงานแบบ Pulse-Width Modulated (PWM) จะมีกำลังสูญเสียในสวิตช์และความเครียด (Stress) ในสวิตช์สูง นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดฮาร์มอนิกค่อนข้างมาก เนื่องจากในสภาวะที่สวิตช์เปลี่ยนจากนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส และสภาวะที่สวิตช์เปลี่ยนจากหยุดนำกระแสเป็นนำกระแสจะมีค่าของกระแสและแรงดันในสวิตช์สูงในเวลาเดียวกัน การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจจะทำได้หลายวิธีเช่น ใช้วงจรสนับเบอร์ ใช้เรโซแนนซ์สวิตช์ หรือใช้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์

ในปัจจุบันวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์ ได้รับความนิยมเนื่องจากมีกำลังสูญเสียในตอนสวิตช์ต่ำทำให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง นอกจากนี้ยังมี di/dt และ dv/dt ของสวิตช์ต่ำ เป็นผลทำให้ EMI และ RFI ต่ำ ตลอดจนมีความเชื่อถือได้สูง ซึ่งรายละเอียดของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์จะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

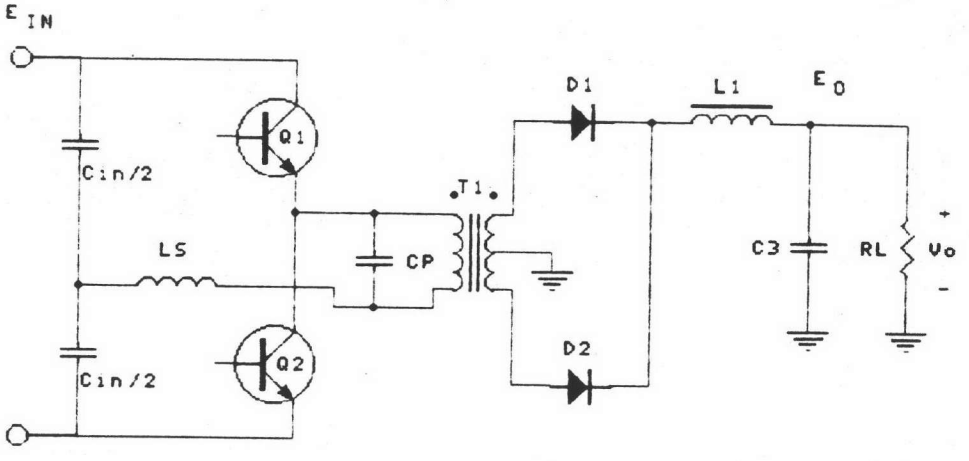
วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์ (Resonant DC-DC Converter) มีโครงสร้างของวงจรเช่นเดียวกับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบพื้นฐาน หรือวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่พัฒนามาจากวงจรพื้นฐาน แต่จะแตกต่างกันที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบของวงจรซึ่งทำให้เกิดการเรโซแนนซ์และอาศัยปรากฏการณ์ของเรโซแนนซ์เพื่อทำให้กำลังสูญเสียในตอนสวิตช์ต่ำ และการควบคุมแรงดันด้านขาออกของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์ จะใช้วิธีควบคุมความถี่หรือควบคุมเฟสแทนการควบคุมวัฏจักรงาน ในกรณีที่วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและความต้านทานโหลด จะมีลักษณะการต่อวงจรของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและความต้านทานโหลดที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะได้แก่วงจรแบบอนุกรม วงจรแบบขนาน และวงจรแบบผสม

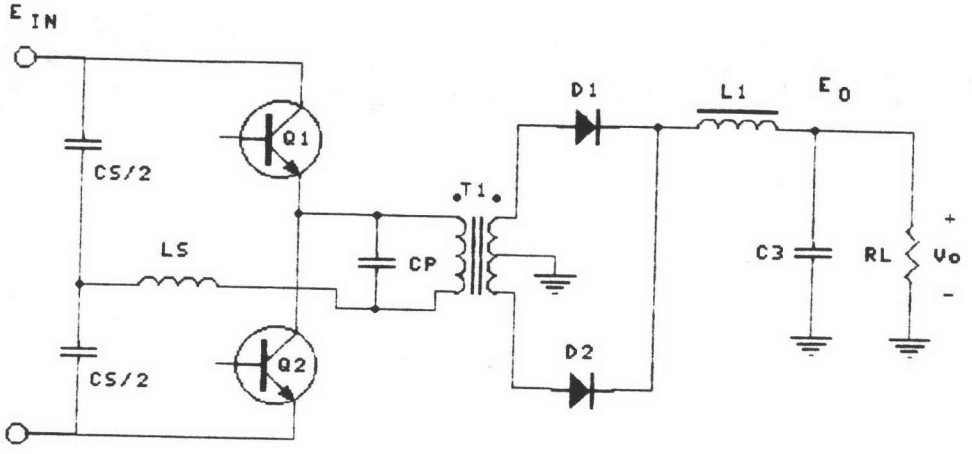
ทำให้สามารถจำแนกวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์ตามลักษณะการต่อตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและความต้านทานโหลดออกเป็น 3 ลักษณะคือ Series-Resonant Converter Parallel-Resonant Converter และ Combination Series-Parallel Resonant Converter ดังแสดงในรูป 2.9 วงจรดังกล่าวเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์ที่มีโครงสร้างของวงจรแบบกึ่งบริดจ์



ก. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด



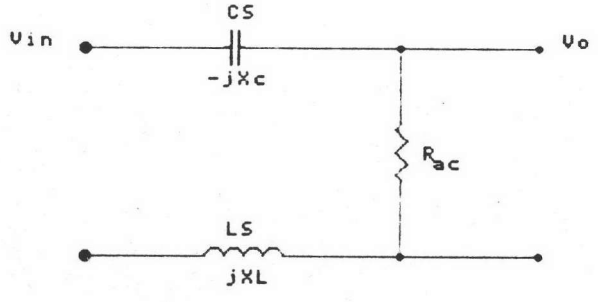
ข. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด



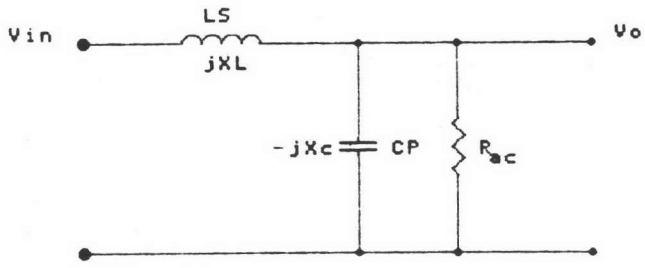
ค. วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลด

รูปที่ 2.9 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงกึ่งบริดจ์แบบเรโซแนนซ์ (HALF-BRIDGE RESONANT CONVERTER)

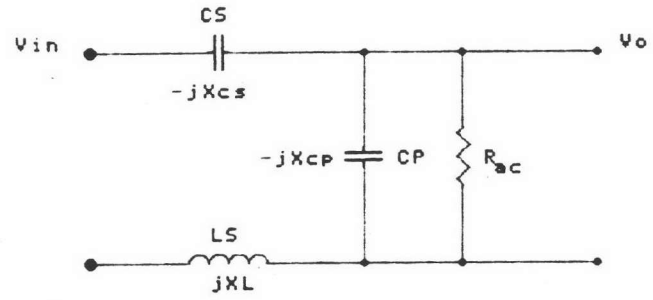
เนื่องจากสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบกึ่งบริดจ์จะสลับกันทำงานทำให้ได้แรงดันออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นวงจรกึ่งบริดจ์จึงทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง โดยจะต้องมีวงจรด้านขาออกทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เป็นองค์ประกอบของวงจรซึ่งทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ จึงถือว่าเป็นโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ รูปที่ 2.10 แสดงวงจรสมมูลของโหลดของอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะการต่อวงจรของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และความต้านทานโหลดแบบต่าง ๆ กัน



ก. วงจรสมมูลของโหลดแบบอนุกรม



ข. วงจรสมมูลของโหลดแบบขนาน



ค. วงจรสมมูลของโหลดแบบอนุกรม-ขนาน

รูปที่ 2.10 แสดงวงจรสมมูลที่เป็นโหลดของอินเวอร์เตอร์

1. <u>วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด</u>

จากวงจรในรูปที่ 2.9 (ก) ถ้าตัวเก็บประจุ $C_s/2$ มีค่าเล็กและทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s วงจรสมมูลของโหลดของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C_s ตัวเหนี่ยวนำ L_s และความต้านทานโหลด R_{ac} ต่ออนุกรมกันดังแสดงในรูป 2.10 (ก) ดังนั้นจึงเรียกวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้ว่าวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด (Series Loaded Resonant Converter) วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้มีข้อดีตรงที่ตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ C_s ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะทำหน้าที่ปิดกั้นไฟตรงไม่ให้ไหลผ่านหม้อแปลง ทำให้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้ไม่ทำให้เกิดความไม่สมมาตรของแรงดันคร่อมหม้อแปลง (Volt-Sec Unbalance) นอกจากนี้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด ยังมีข้อดีที่กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะลดลงตามกระแสโหลดเมื่อความต้านทานของโหลดเพิ่ม ทำให้กำลังงานสูญเสียในสวิตช์ลดลงเมื่อความต้านทานโหลดเพิ่มขึ้น การป้องกันการลัดวงจรที่โหลดสามารถทำได้โดยการออกแบบให้โหลดของอินเวอร์เตอร์มีค่า Q ค่อนข้างสูงซึ่งจะทำให้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกับค่า

ความต้านทานของโหลดน้อย จนเมื่อความต้านทานเป็นศูนย์กระแสผ่านสวิตช์จะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด คือไม่สามารถคุมค่าแรงดันด้านออกเมื่อไม่มีโหลด เนื่องจากแรงดันด้านออกจะไม่ขึ้นกับความถี่ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.11 ที่ Q = 1 แรงดันออกจะเปลี่ยนตามความถี่น้อยลงและถ้าเป็นกรณีไม่มีโหลดค่า Q = 0 เส้นกราฟนี้จะแสดงเป็นเส้นตรงในแนวนอน ดังนั้นจึงไม่สามารถคุมค่าแรงดันด้านออกในขณะไม่มีโหลดได้ แต่เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้ภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์เป็นแบบออสซิเลตด้วยตัวเองทำให้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงหยุดทำงานขณะไม่มีโหลดและจะเริ่มทำงานใหม่ขณะมีโหลดต่อเข้ากับวงจร การวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด สามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอซี (ac Analysis Technique) (ROBERT L.STETGERWALD; A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies; IEEE Transaction On Power Electronics Vol. 3 No. 2,April,1988) ซึ่งจะง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบวงจร แต่ผลการวิเคราะห์และออกแบบวงจรโดยวิธีนี้จะเป็นค่าโดยประมาณเพื่อใช้เป็นค่าเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอซีจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$V_o/V_{in} = 1/[1+j(X_L/R_{ac}-X_c/R_{ac})] \qquad (2.7)$$

$$Ed = E_{IN}/2 \qquad (2.8)$$

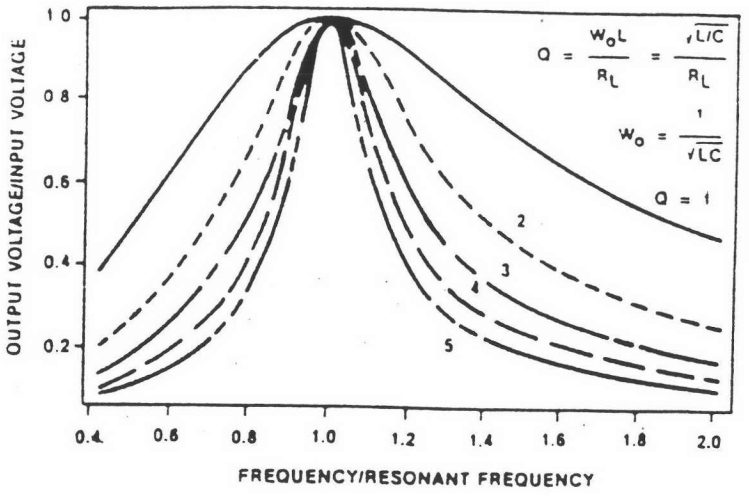
$$R_{ac} = (8/\pi^2)R_L \qquad (2.9)$$

$$Q = w_o L_s/R_L \qquad (2.10)$$

$$w_o = 1/\sqrt{L_s C_s} \qquad (2.11)$$

$$E_o/E_d = 1/[1+j(\pi^2/8)Q[w/w_o-w_o/w]] \qquad (2.12)$$

จากสมการ 2.12 เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าสำหรับความถี่ค่าต่าง ๆ เมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด

จากกราฟแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลดจะเห็นว่าเมื่อความต้านทานโหลดมีค่าน้อยจะทำให้ Q มีค่ามาก แรงดันด้านออกจะเปลี่ยนตามความถี่ค่อนข้างมาก แต่เมื่อความต้านทานโหลดมีค่ามากจะทำให้ Q มีค่าน้อยแรงดันด้านออกจะเปลี่ยนตามความถี่น้อยลง

2. <u>วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด</u>

จากวงจรในรูปที่ 2.9 (ข) ถ้าตัวเก็บประจุ $C_{in}/2$ มีค่าใหญ่จะทำหน้าที่แบ่งแรงดันด้านเข้าเท่านั้นไม่เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s แต่จะมีตัวเก็บประจุ C_p ทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุ C_p และความต้านทานโหลด R_{ac} จะต่อขนานกันดังแสดงในรูป 2.10 (ข) ดังนั้นจึงเรียกวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้ว่า วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด (Parallel Loaded Resonant Converter) ข้อดีของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดคือ สามารถลัดวงจรที่โหลดได้โดยตรงเพราะเมื่อลัดวงจรที่โหลด

กระแสจะถูกจำกัดโดยตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ แต่ข้อเสียของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดคือ เมื่อลดโหลดโดยการเพิ่มความต้านทานกระแสออกของอินเวอร์เตอร์จะไม่ลดลงตามโหลดแต่กลับจะเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของวงจรต่ำ เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอซีจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดดังนี้

$$V_o/V_{IN} = 1/[1-X_L/X_C+j(X_L/R_{ac})] \quad (2.13)$$

$$V_o = \pi E_o/(2\sqrt{2}) \quad (2.14)$$

$$V_{IN} = 2\sqrt{2}E_d/\pi \quad (2.15)$$

$$E_d = V_{IN}/2 \quad (2.16)$$

$$Q = R_L/w_o L_s \quad (2.17)$$

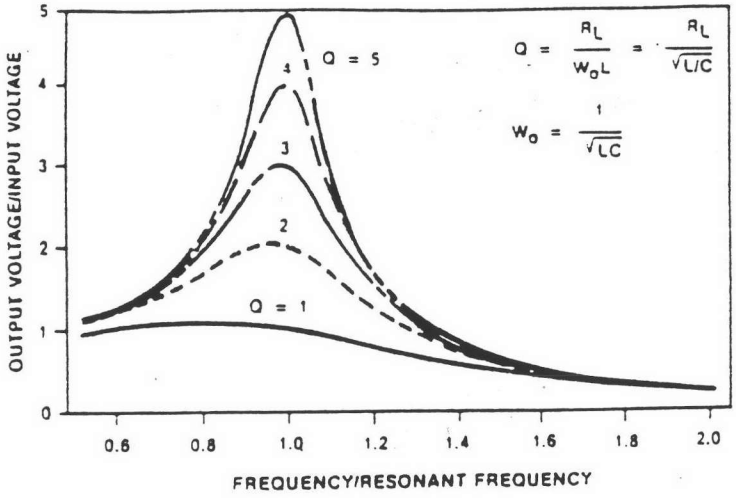
$$w_o = 1/\sqrt{L_s C_p} \quad (2.18)$$

$$R_{ac} = \pi^2 R_L/8 \quad (2.19)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.13 จะได้

$$E_o/E_d = 1/[(\pi^2/8)[1-(w/w_o)^2]+j(w/w_o)(1/Q)] \quad (2.20)$$

จากสมการ 2.20 เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าสำหรับความถี่ค่าต่าง ๆ เมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด

จากกราฟแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดจะเห็นว่าเมื่อความต้านทานโหลดมีค่ามากทำให้ Q มีค่ามากแรงดันขาออกจะเปลี่ยนตามความถี่ค่อนข้างมาก แต่เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าน้อยจะทำให้ Q มีค่าน้อยแรงดันขาออกจะเปลี่ยนตามความถี่น้อยลง จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดจะสามารถคุมค่าแรงดันขาออกขณะที่ไม่มีโหลด โดยวิธีเพิ่มความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้นซึ่งเป็นข้อดีของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลด

3. <u>วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลด</u>

จากวงจรในรูป 2.9 (ค) ถ้าตัวเก็บประจุ C_s และ C_p มีค่าไม่ใหญ่นักและทำหน้าที่เรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ L_s จะเห็นได้ว่าเมื่อทำให้แหล่งกำเนิดแรงดันเป็นศูนย์ตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่เรโซแนนซ์ทั้งสองตัวกับตัวเหนี่ยวนำ จะมีลักษณะการต่อวงจรร่วมกับโหลดเป็นทั้งวงจรแบบอนุกรมและวงจรแบบขนานดังแสดงในรูป 2.10 (ค) จึงเรียกวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้ว่า วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลด (Series-Parallel Loaded Resonant Converter) รูป 2.13 และ 2.14 แสดงกราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดนี้ ซึ่งจะมีคุณสมบัติของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนานโหลดรวมกันอยู่

ถ้าความต้านทานของโหลดมีค่าน้อยกว่ารีแอคแตนซ์ของ C_p มาก เราสามารถละเลยตัวเก็บประจุ C_p ได้ ทำให้มีคุณสมบัติของวงจรแบบอนุกรม ในทางตรงกันข้ามถ้า

ความต้านทานของโหลดมีค่ามากกว่ารีแอคแตนซ์ของ C_s มาก เราไม่สามารถละเลย C_p ได้ จะเห็นได้ว่าจะมีตัวเก็บประจุ C_p ขนานกับโหลดทำให้มีคุณสมบัติของวงจรแบบขนาน ดังนั้น วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบนี้เหมาะกับงานที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดกว้าง ๆ แต่ข้อเสียคือในกรณีทั้งความต้านทานของโหลดมีค่าต่ำและความต้านทานของโหลดมีค่าสูง กระแสออกของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีค่าสูง เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอซีจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลดดังนี้

$$V_o/V_{IN} = 1/[1+X_{CS}/X_{CP}-X_L/X_{CP}+j(X_L/R_{ac}-X_{CS}/R_{ac})] \quad (2.21)$$

$$Q_s = X_L/R_L \quad (2.22)$$

$$w_s = 1/\sqrt{L_s C_s} \quad (2.23)$$

$$E_o = 2\sqrt{2}V_o/\pi \quad (2.24)$$

$$V_{IN} = 2\sqrt{2}E_d/\pi \quad (2.25)$$

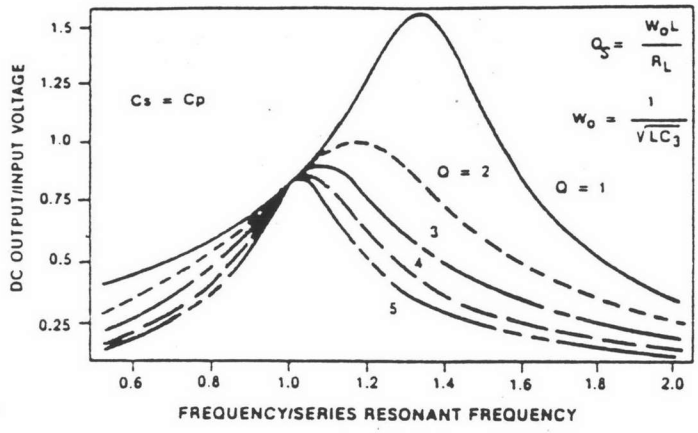
ดังนั้นจากสมการที่ 2.21 จะได้

$$E_o/E_d = 1/[(\pi^2/8)[1+C_p/C_s-w^2LC_p]+jQ_s(w/w_s-w_s/w)] \quad (2.26)$$

กรณี $C_s=C_p$ จะได้

$$E_o/E_d = 1/[(\pi^2/8)[2-(w/w_s)^2]+jQ_s(w/w_s-w_s/w)] \quad (2.27)$$

จากสมการ 2.27 เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าสำหรับความถี่ค่าต่าง ๆ เมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟดังรูป 2.13

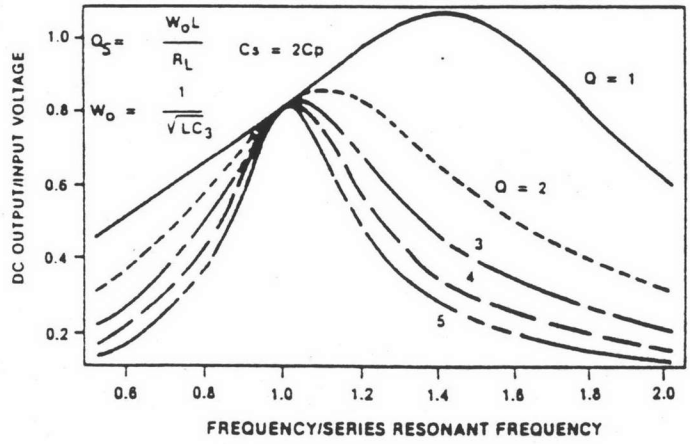


รูปที่ 2.13 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลดเมื่อ $C_s = C_p$

กรณี $C_s = 2C_p$ จะได้

$$E_o/E_d = 1/[(\pi^2/16)[3-(w/w_s)^2]+jQ_s(w/w_s-w_s/w)] \quad (2.28)$$

จากสมการ 2.28 เมื่อนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกต่อแรงดันขาเข้าสำหรับความถี่ค่าต่าง ๆ เมื่อ Q มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 จะได้กราฟดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนานโหลดเมื่อ $C_s = 2C_p$

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบขนานโหลดและวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบอนุกรม-ขนานโหลด มีข้อเสียที่ในขณะไม่ต่อโหลดจะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์และองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ เป็นผลทำให้เกิดกำลังสูญเสียในขณะไม่ต่อโหลด จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับงานเชื่อมไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลด ที่มีข้อดีในแง่ไม่เกิดกระแสไหลในวงจรขณะไม่ต่อโหลด และเมื่อใช้ภาคควบคุมการทำงานของสวิตช์เป็นแบบออสซิเลตด้วยตัวเองทำให้วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงชนิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโหลดหยุดทำงานขณะไม่มีโหลดและจะเริ่มทำงานใหม่ขณะมีโหลด ซึ่งเหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น

<u>วงจรภาคควบคุม</u>

วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไปควบคุมการทำงานของสวิตช์ ในวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ซึ่งจะต้องควบคุมลำดับการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ และจังหวะการทำงานของสวิตช์ เพื่อให้ได้รูปคลื่นของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามต้องการและไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง ในกรณีวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบธรรมดาจะควบคุมที่วัฏจักรงาน (Duty Cycle) หรือเป็นแบบ Pulse-Width-Modulation (PWM)

ส่วนในกรณีวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบเรโซแนนซ์ การควบคุมการทำงานของสวิตช์อาจจะทำได้โดยใช้ วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานของสวิตช์จากวงจรกำเนิดสัญญาณอิสระซึ่งสามารถกำหนดความถี่ได้อย่างอิสระ หรืออาจจะได้จากการป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันของโหลด วงจรกำเนิดสัญญาณอิสระมีข้อดีในแง่ของความสะดวกในการกำหนดความถี่ ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมกำลังออกของอินเวอร์เตอร์ได้ส่วนการใช้การป้อนกลับของกระแสหรือแรงดันโหลดนั้น จะมีข้อดีในแง่ของความง่ายของวงจรและป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ดีกว่า อันจะเป็นผลดีในแง่ความเชื่อถือได้ของวงจร ดังนั้นจึงได้เลือกใช้วงจรกำเนิดสัญญาณกำหนดจังหวะการทำงานโดยการป้อนกลับของกระแสโหลด เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ โดยที่กระแสโหลดจะมีลักษณะเป็น sine wave และป้อนให้กับหม้อแปลงของวงจรกำเนิดสัญญาณ กำหนดจังหวะการทำงานของวงจร ซึ่งได้

รับจากการป้อนกลับของกระแสโหลดโดยต่อเข้ากับหม้อแปลงขับนำแต่ละตัว ซึ่งขดทางด้านปฐมภูมิจะมีขั้วเหมือนกัน แต่ขดทางด้านทุติยภูมิจะมีขั้วตรงกันข้ามกันเพื่อที่จะขับนำทรานซิสเตอร์ให้สลับกันนำกระแส ทั้งนี้จะต้องใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเท่ากันจำนวนรอบทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากันทั้งสองตัว เพื่อป้องกันการเกิดความผิดพลาดในการขับนำเบสของทรานซิสเตอร์อันจะทำให้เกิดการทะลุผ่านในแต่ละกิ่งได้ ส่วนการควบคุมความถี่จะใช้หลักการควบคุมการอิ่มตัวของแกนขับนำ โดยการป้อนกระแสไฟตรงให้กับขดลวดควบคุมซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป