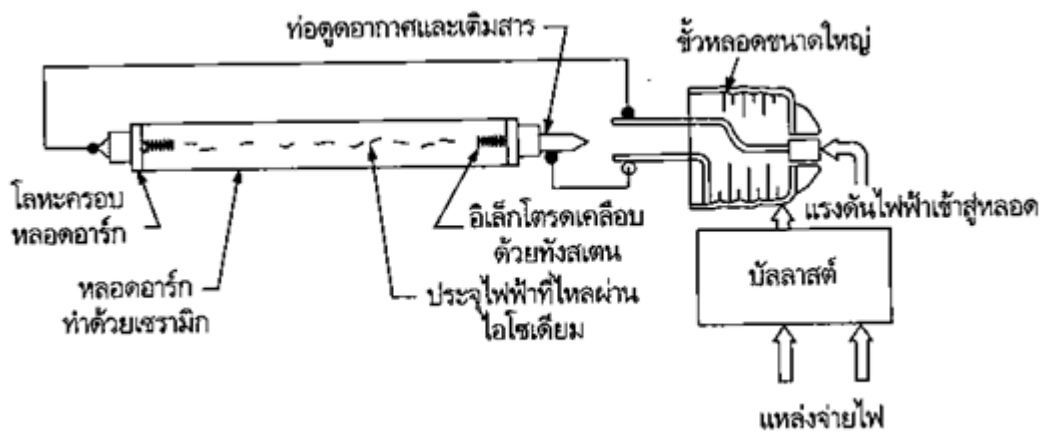


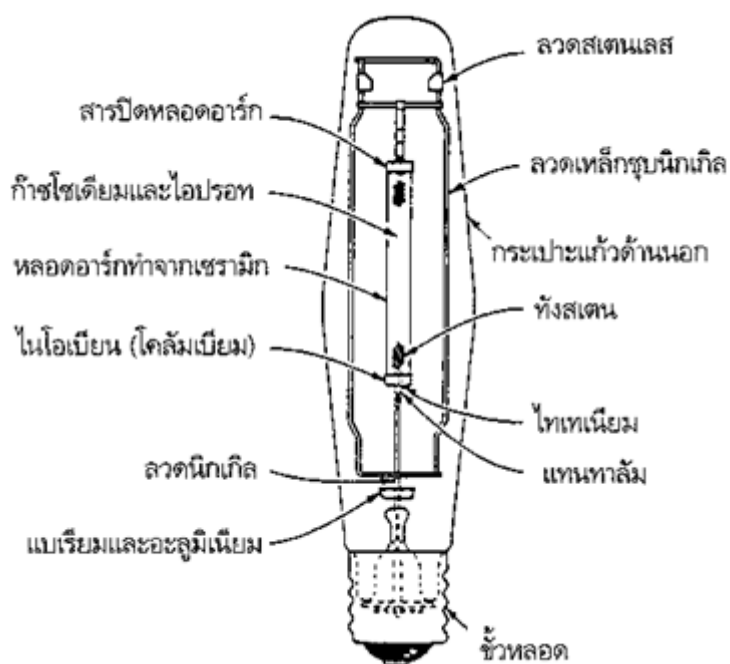
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลอดโซเดียมแรงดันสูง

โครงสร้างและการทำงานของหลอดโซเดียมแรงดันสูง แสงจากหลอดโซเดียมแรงดันสูงผลิตจากหลอดอาร์ก มีโครงสร้างและลักษณะการทำงานเหมือนหลอดแสงจันทร์ โดยจะใช้เวลาในการจุดหลอดและอุ่นหลอด 2 ถึง 3 นาที และใช้เวลา 4 ถึง 6 นาทีในการให้แสงสว่างได้เต็มที่ จากนั้นใช้เวลาในการคืนตัว 10 ถึง 15 นาที ดังภาพที่ 2.1 โดยภายในหลอดอาร์กนอกจากจะบรรจุด้วยปรอทอาร์กอน นีออน และคริปทอนแล้วยังบรรจุเกลือฮาไลด์ของโลหะอื่น ได้แก่ โซเดียมไอโอไดด์ สแกนเดียมไอโอไดด์เป็นสารหลัก และส่วนสารอื่นๆ ได้แก่ ทอลเลียม อินเดียม และแคลเซียมไอโอไดด์ สารโลหะไอโอไดด์ที่เพิ่มเติมเข้าไปใหม่นี้ทำให้เพิ่มแถบสีเกินกว่าไอปรอท ได้แก่ สีแดง สีส้ม และสีเหลือง จึงทำให้แถบสีของหลอดโซเดียมแรงดันสูงครบตลอดความยาวคลื่น หลอดโซเดียมแรงดันสูง จึงทำให้คุณภาพแสงสีดีโดยไม่ต้องเคลือบสารเรืองแสงช่วยแต่อย่างใด



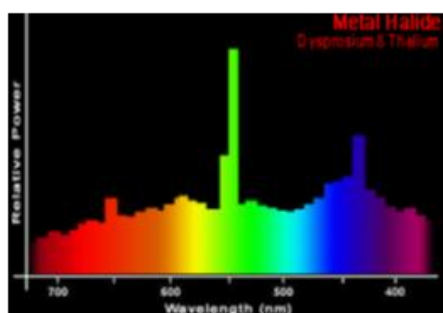


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของซีนีแอมแรงดันสูงทั้งหมด

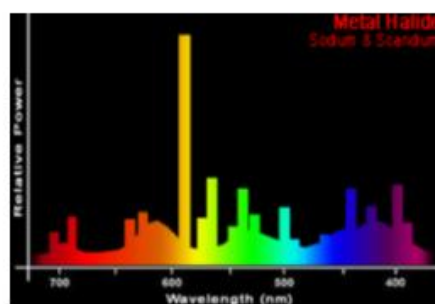
นอกจากนี้หลอดอาร์กของหลอดซีนีแอมแรงดันสูงนี้จะยึดด้วยฐานสปริง เพื่อให้ทนต่อการกระเทือนเมื่อเริ่มเปิดไฟแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จุดหลอดต้องสูงมากพอที่จะทำให้เกิดลำอาร์กระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหลักและอิเล็กโทรดจุดหลอดที่อยู่ใกล้ๆกัน กระบวนการจุดหลอดจะเริ่มขึ้นโดยใช้เวลาจุดอุ่นหลอด 2 ถึง 3 นาที การเกิดไอออนก็มากพอที่จะทำให้ลำอาร์กเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วได้ ขณะเดียวกันสวิตช์โลหะต่างชนิดจะร้อน โกงงอทำให้ลัดวงจรระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหลักและอิเล็กโทรดจุดหลอดที่อยู่ใกล้ๆกัน เพื่อป้องกันแรงดันคร่อมขั้วอิเล็กโทรดหลักและอิเล็กโทรดจุดหลอด หลอดซีนีแอมแรงดันสูงบางชนิดอาจใช้ไดโอดร่วมกับโลหะต่างชนิด และหลอดจะสว่างเต็มที่เมื่อเวลาผ่านไป 4 ถึง 6 นาที

2.1.1 สีและการกระจายพลังงานทางสเปกตรัม

โดยปกติหลอดโซเดียมแรงดันสูงจะใช้แถบสีต่อเนื่องครบตลอดทุกสี นอกจากนี้ยังมีแถบรังสีอัลตราไวโอเล็ตอีกบางส่วนดังภาพที่ 2.2 ก. หลอดแก้วใส แม้ว่าเป็หลอดแก้วใสแต่จะให้คุณภาพของแสงดีมาก โดยดัชนีบอกความถูกต้องของสี คือ 55 แต่อย่างไรก็ตามอาคารบางชนิด เช่น ศูนย์การค้า อาคารพาณิชย์ หรือสถานที่ที่มีการถ่ายทอดโทรทัศน์ จำเป็นต้องให้สีของแสงที่มีคุณภาพสูงเพื่อให้หลอดโซเดียมแรงดันสูงเหมาะกับวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงทำการเคลือบสารเรืองแสงมากขึ้น ดังภาพที่ 2.2 ข. หลอดเคลือบสารเรืองแสง ค่าดัชนีความถูกต้องของสีจะสูงถึง 75 นอกจากนี้สารเรืองแสงที่เคลือบไว้ยังช่วยลดแสงจ้าบาดตาอีกด้วย ส่วนภาพที่ 2.3 แสดงหลอดโซเดียมแรงดันสูงชนิดเคลือบสารเรืองแสง และชนิดแก้วใส



ก.หลอดแก้วใส



ข.หลอดเคลือบสารเรืองแสง

ภาพที่ 2.2 สีและการกระจายพลังงานทางสเปกตรัมของหลอดโซเดียมแรงดันสูง



ก.หลอดแก้วใส



ข.หลอดเคลือบสารเรืองแสง

ภาพที่ 2.3 หลอดโซเดียมแรงดันสูง

2.1.2 คุณสมบัติและขีดความสามารถของโซเดียมแรงดันสูง

2.1.2.1 การกระจายพลังงานแสง

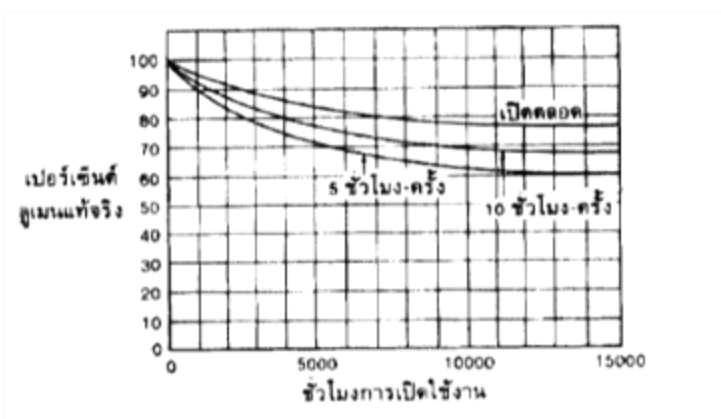
จากภาพที่ 2.4 หลอดโซเดียมแรงดันสูง ขนาด 150 วัตต์ เมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัด จะได้แสงแผ่รังสีที่ตามองเห็นออกมาร้อยละ 24.3 ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด 100 ลูเมน/วัตต์



ภาพที่ 2.4 แสดงการกระจายพลังงานของหลอดโซเดียมแรงดันสูง

2.1.2.2 ค่าการเสื่อมของโซเดียมแรงดันสูง

การเสื่อมของหลอดโซเดียมแรงดันสูงนั้นมีสาเหตุมาจากขั้วอิเล็กโทรดปลดปล่อยอิเล็กตรอนทำให้หลอดอาร์กดำ นอกจากนี้การเสื่อมของหลอดยังขึ้นอยู่กับ การเปิด - ปิดการใช้งาน เช่น ถ้าเปิดไว้ตลอดโดยไม่ปิดเลย ที่อายุ 15,000 ชั่วโมง เเปอร์เซ็นต์ลูเมนที่แท้จริงจะลดลงเหลือร้อยละ 76 แต่ถ้ามีการเปิด - ปิดที่วัฏจักรการใช้งาน 10 ชั่วโมง/ครั้ง ตลอดอายุการใช้งาน (15,000 ชั่วโมง) เเปอร์เซ็นต์ลูเมนที่แท้จริงจะลดลงเหลือร้อยละ 67 เท่านั้น ดังภาพที่ 2.5

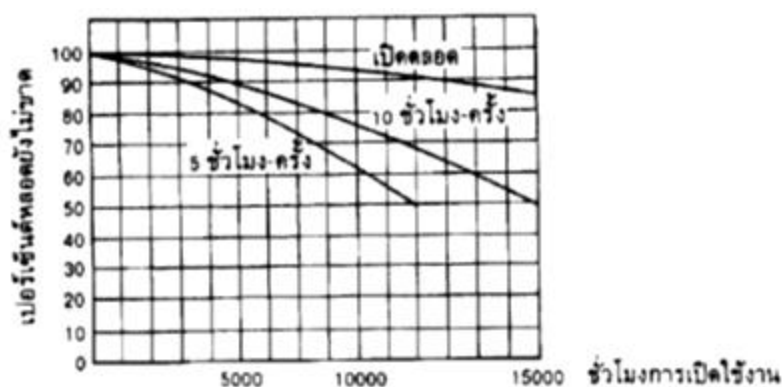


ภาพที่ 2.5 การเสื่อมของหลอดโซเดียมแรงดันสูงต่อชั่วโมงการเปิดใช้งาน

ถ้าหลอดโซเดียมแรงดันสูงขนาด 150 วัตต์ ประเภทหลอดแก้วเคลือบสารฟลักซ์แสงสว่าง 38,000 ลูเมน เปิดไว้โดยไม่ปิดตลอดอายุการใช้งาน 15,000 ชั่วโมง จะเหลือฟลักซ์แสงสว่างเพียง $38,000 \times 0.76$ เท่ากับ 28,880 ลูเมน ถ้าวัฏจักรการใช้งาน 10 ชั่วโมง/ครั้ง ฟลักซ์แสงสว่างจะเหลือ $38,000 \times 0.67$ เท่ากับ 25,460 ลูเมน อย่างไรก็ตามถ้ามีการเปิด - ปิดบ่อยครั้งมากกว่านี้การเสื่อมของหลอดก็จะมากยิ่งขึ้น

2.1.2.3 ผลของการเปิด - ปิดใช้งานต่ออายุการใช้งานของหลอด

อายุการใช้งานของหลอดโซเดียมแรงดันสูงจะอยู่ระหว่าง 6,000 ถึง 15,000 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2.6 โดยคิดที่วัฏจักรการใช้งาน 10 ชั่วโมง/ครั้ง และโดยเฉลี่ยแล้วอายุการใช้งานจะอยู่ระหว่าง 15,000 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2.6 ถ้าชั่วโมงการเปิดใช้งาน 15,000 ชั่วโมง วัฏจักรการใช้งาน 10 ชั่วโมง/ครั้ง จะเหลือจำนวนของหลอดที่ยังไม่ขาดเท่ากับร้อยละ 50 แต่ถ้าเปิดไฟไว้ตลอดโดยไม่ปิดเลย จำนวนของหลอดที่ยังไม่ขาดจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 85 ดังนั้นจากกราฟจะเห็นได้ว่าถ้าเปิด - ปิดบ่อยครั้งหลอดจะมีอายุสั้น



ภาพที่ 2.6 เปอร์เซนต์ของหลอดโซเดียมแรงดันสูงที่ยังไม่ขาดต่อชั่วโมงการเปิดใช้งานขนาด 1 วัตต์

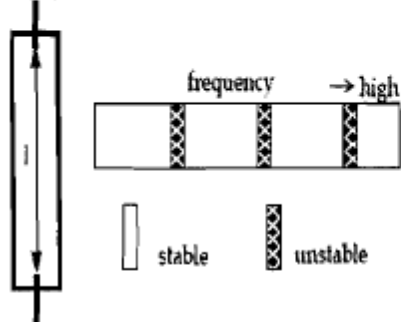
2.2 บัลลาสต์

ในปัจจุบันที่ได้เน้นเรื่องการประหยัดพลังงานมากขึ้นวงจรบัลลาสต์แกนเหล็กที่ใช้กันส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพต่ำ จึงได้เริ่มพัฒนาการวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้กับหลอดโซเดียมแรงดันสูงมากขึ้นและมีจำหน่ายตามท้องตลาดแล้ว ซึ่งสามารถแบ่งบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ตามลักษณะการทำงานได้ 2 ลักษณะคือ แบบสองภาค (Two Stage) และพัฒนามาเป็นแบบภาคเดียว (Single Stage) ซึ่งวงจรแบบสองภาคจะเหมาะกับหลอดโซเดียมแรงดันสูงที่มีกำลังไฟฟ้าขนาดปานกลาง และขนาดสูง แบบภาคเดียวเหมาะกับหลอดไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าขนาดต่ำ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ที่ขยับความถี่ต่ำ (ประมาณ 400 เฮิร์ตซ์) จะใช้สัญญาณด้านออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) การทำงานในความถี่ระดับนี้จะไม่เกิดปัญหาของปฏิกิริยาอะคูสติกเรโซแนนซ์ (Acoustic resonance) กับหลอดอาร์ก แต่จะมีข้อเสียในเรื่องของขนาดและมีน้ำหนักมาก แต่ถ้าเป็นการใช้ขยับความถี่สูง (20 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์) จะใช้สัญญาณด้านนอกเป็นสัญญาณไซน์ (Sine wave) โดยในขยับความถี่นี้จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาอะคูสติกเรโซแนนซ์ได้ ซึ่งจำเป็นที่เราจะต้องหลีกเลี่ยงการเลือกใช้ขยับความถี่ และถ้าเราใช้ขยับความถี่สูงมาก (มากกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์) จะใช้สัญญาณด้านนอกเป็นสัญญาณไซน์ เช่นเดียวกัน แต่จะสามารถเลี่ยงปัญหาการเกิดปฏิกิริยาอะคูสติกเรโซแนนซ์ได้ และยังสามารถทำให้วงจรมีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาว่าวงจรที่ใช้ขยับความถี่สูง

HPS lamp

- Narrow band AR

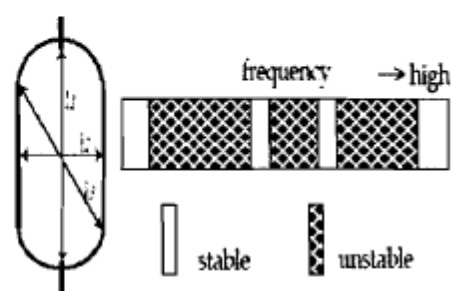
- bands of
acoustic resonance



MH lamp

- Wide band AR

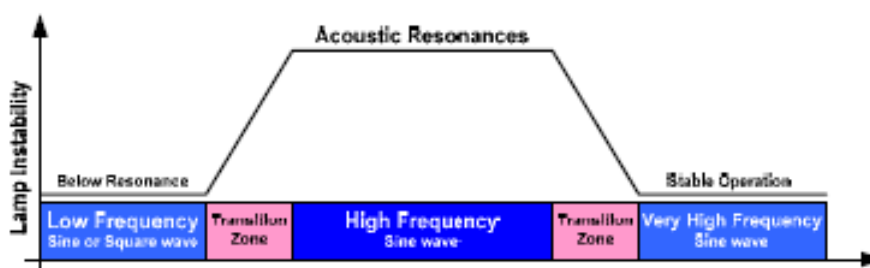
- bands of
acoustic resonance



ภาพที่ 2.7 แถบของปฏิกริยาอะคูสติกรีโซแนนซ์ของหลอดโซเดียมความดันสูงและหลอดเมทัลฮาไลด์

2.2.1 อะคูสติกรีโซแนนซ์

การใช้งานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ในย่านความถี่สูงจะมีปัญหาในเรื่องของปฏิกริยาอะคูสติกรีโซแนนซ์ ซึ่งปฏิกริยานี้จะมีผลกับหลอดอาร์ก คือเมื่อคลื่นอะคูสติกรีที่เกิดขึ้นในหลอดอาร์กนั้นเกิดจากพลังงานที่จ่ายไปไม่สม่ำเสมอมีผลทำให้การแตกตัวของก๊าซ ความร้อนของก๊าซ รวมไปถึงแรงดันภายในหลอดอาร์กจะไม่สม่ำเสมอไปด้วย ทำให้คลื่นนี้สะท้อนไปมาที่ตัวหลอดอาร์ก ในส่วนที่เป็นส่วนกระจก ถ้าค่านี้เกิดขึ้นมากๆแล้ว จะทำให้การอาร์กที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดไม่คงที่ แรงดันที่ขั้วหลอดจะมีค่าสูงขึ้น และอาจส่งผลทำให้หลอดเกิดความเสียหายได้ ซึ่งค่าอะคูสติกรีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของหลอด รูปแบบของหลอดอาร์กของผลิตภัณฑ์แต่ละบริษัทผู้ผลิตจำหน่าย ดังนั้นการหลีกเลี่ยงปัญหาข้างต้นวิธีหนึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูงมาก ดังภาพที่ 2.8



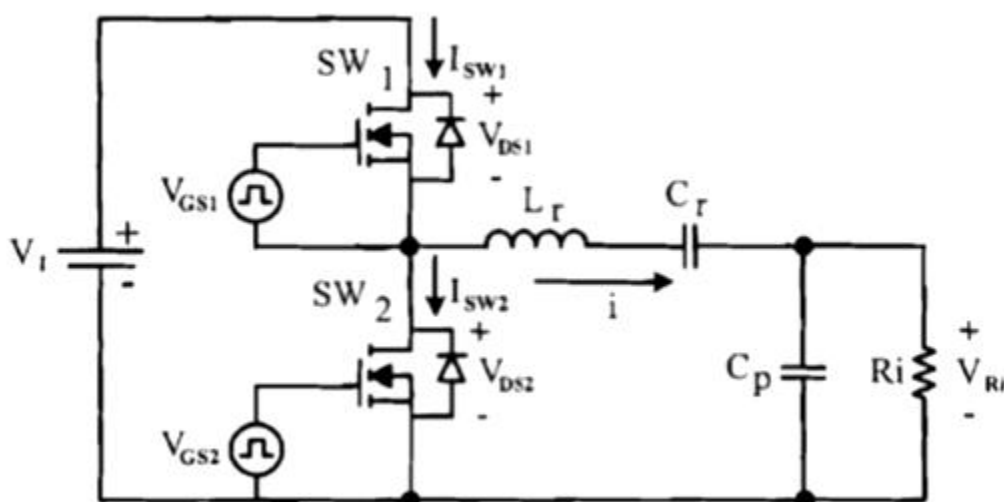
ภาพที่ 2.8 ย่านความถี่ที่มีผลต่อปฏิกิริยาอะคูสติกเรโซแนนซ์

2.3 วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม – ขนานคลาสดี

วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์คลาสดีมีพื้นฐานวงจรเป็นวงจรแปลงผันแบบกึ่งบริดจ์ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อทำการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ยกตัวอย่างเช่น บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ตัวสร้างความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงเพื่อไปใช้งานเชื่อม การผลิตไฟเบอร์ออปติก การเชื่อมพลาสติก และเป็นส่วนหนึ่งของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เป็นต้น

คุณสมบัติที่ดีของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์คลาสดี คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวสวิตช์จะมีค่าต่ำ คือมีค่าแรงดันตกคร่อมตัวสวิตช์เท่ากับแรงดันด้านขาเข้าด้วยคุณสมบัตินี้วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์คลาสดี จึงเหมาะกับการประยุกต์ไปใช้กับงานแรงดันสูงๆ ได้ หรือจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านวงจรเรียงกระแสมาจากไฟฟ้า 220 โวลต์ได้เลย จึงสามารถเลือกใช้สวิตช์ที่มีพิสัยการทนแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนักได้ โดยทั่วไปสวิตช์ที่นำมาใช้งานจะเป็นมอสเฟต และภายในตัวมอสเฟตนี้ $R_{DS(on)}$ ซึ่งค่านี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่รอยต่อภายในมอสเฟตเพิ่มมากขึ้น อันจะทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสของมอสเฟต ตาม $I_{rms}^2 \cdot R_{DS(on)}$ ดังนั้นจากคุณสมบัติของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์คลาสดีที่ได้กล่าวมาแล้ว ถ้าเราเลือกใช้ $R_{DS(on)}$ ต่ำ และค่าของอุณหภูมิที่รอยต่อต่ำด้วยแล้ว จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรได้ ซึ่งเป็นการลดการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสของสวิตช์ (Conduction Loss) จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดขีดจำกัดความสามารถของแปลงผันเรโซแนนซ์คลาสดี คือ การสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ (Switching Loss) และการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสของสวิตช์

(Conduction Loss) จะส่งผลกับประสิทธิภาพของวงจรให้มีประสิทธิภาพที่ต่ำได้ วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสติ (Series-Parallel Resonant Inverter : SPRI) จะคล้ายกับวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ขนาน (Parallel Resonant Inverter : PRI) ยกเว้นค่าตัวเก็บประจุที่เพิ่มเข้ามาอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ หรือก็จะคล้ายกับวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม (Series Resonant Inverter : SRI) ยกเว้นตัวเก็บประจุที่เพิ่มเข้ามาขนานกับโหลดความต้านทาน ดังนั้นรูปแบบคุณลักษณะการทำงานของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนาน คลาสติจะอยู่ระหว่างรูปแบบคุณลักษณะการทำงานของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม และ วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ขนาน

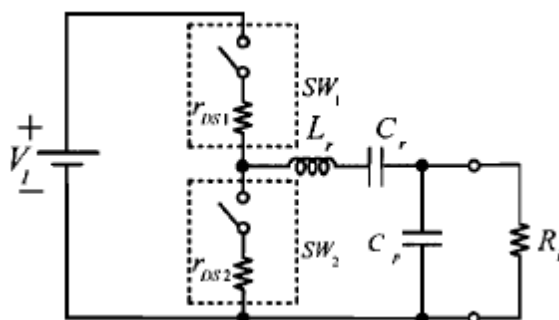


ภาพที่ 2.9 วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสติ

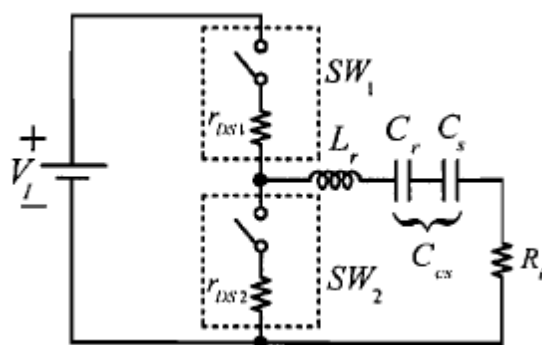
2.3 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม - ขนานคลาสติ

วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสติแสดงดังภาพที่ 2.9 โดยวงจรดังกล่าวจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟตรง V_i อยู่ทางด้านขาเข้าสวิตช์กำลัง 2 ทิศทาง (bidirectional Switch) ได้แก่สวิตช์ SW_1 และ SW_2 วงจรเรโซแนนซ์ L_r , C_p , C_r , R_i และมีโหลดความต้านทาน R_i เป็นโหลดกระแสสลับโดยตัวเก็บประจุ C_p ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ L_r เป็นส่วนของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและตัวเก็บประจุ C_r ที่ต่อขนานอยู่กับโหลดความต้านทาน R_i เป็นส่วนของวงจรเรโซแนนซ์ขนานและสวิตช์กำลัง SW_1 และ SW_2

จะแทนด้วยมอสเฟตซึ่งมีแอนติพาราเรลไดโอดอยู่ในตัวอยู่แล้ว โดยช่วงเวลาที่นำกระแส มอสเฟตจะยอมให้กระแสวิตซ์ที่บวกและลบผ่านได้ แต่ถ้าเป็นช่วงเวลาที่หยุดนำกระแส มอสเฟตจะยอมให้กระแสไหลกลับไหลผ่านเพียงอย่างเดียว โดยผ่านบอดีไดโอดที่มีอยู่ในตัว มอสเฟตจะถูกขับด้วยสัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า V_{GS1} และ V_{GS2} โดยไม่มีส่วนการทำงานที่ซ้อนทับกัน และมีความถี่การทำงาน $f = \omega/2\pi$ ซึ่งมอสเฟตทั้งสองจะสลับกันนำกระแส และหยุดนำกระแสด้วยวัฏจักรการทำงานเท่ากับ 50 และถ้าตัวเก็บประจุ C_r มีขนาดใหญ่หลายๆ เราสามารถแทนตัวเก็บประจุ C_r เป็นตัวเก็บประจุกรองไฟตรงได้ เพราะฉะนั้นวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสสิกจะทำงานเป็นแบบวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ขนานเช่นเดียวกัน ถ้าตัวเก็บประจุ C_p มีค่าเป็นศูนย์ สามารถตัดตัวเก็บประจุ C_p ออกจากวงจรได้ ดังนั้นวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสสิกจะทำงานเป็นวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรมได้เช่นเดียวกัน วงจรสมมูลของ วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ อนุกรม-ขนานคลาสสิก แสดงไว้ในภาพที่ 2.10 โดยมอสเฟตที่ใช้ในการออกแบบจะมีความต้านทานขณะนำกระแสเป็น r_{DS1}, r_{DS2} และวงจรขนาน R_L, C_r แสดงดังภาพที่ 2.10 ก. วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ขนานคลาสสิก และแทนวงจรเรโซแนนซ์ด้วยวงจรอนุกรม R_s, C_s ดังภาพที่ 2.10 ข. วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรมคลาสสิกแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง V_i และสวิตซ์ SW_1 และ SW_2 จะแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีค่าแรงดันต่ำสุดคือศูนย์และสูงสุดคือค่ายอดของแรงดันไฟตรง V_i และ r คือค่าความต้านทานอนุกรมแฝง (Equivalent Series Resistance, ESR) รวมของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสสิกจะแสดงไว้ในภาพที่ 2.11

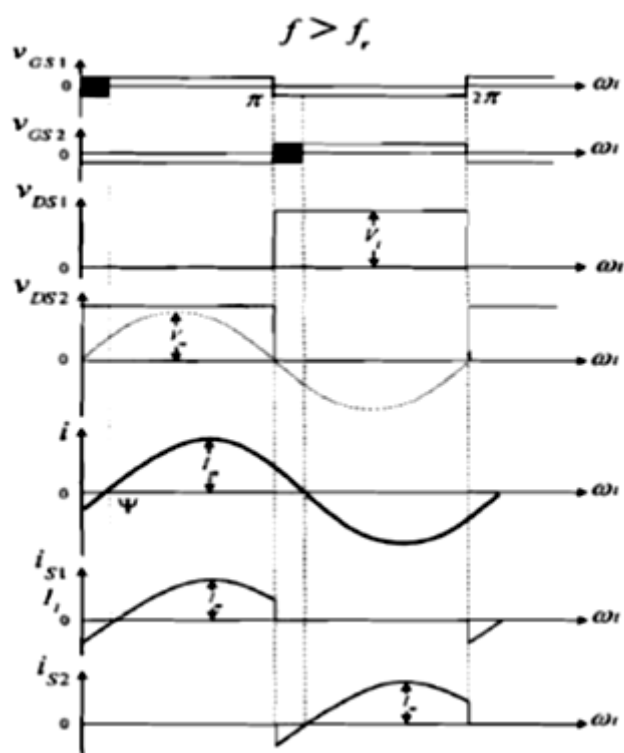


ก. วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ขนานคลาสสิก



ข. วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรมคลาสดี

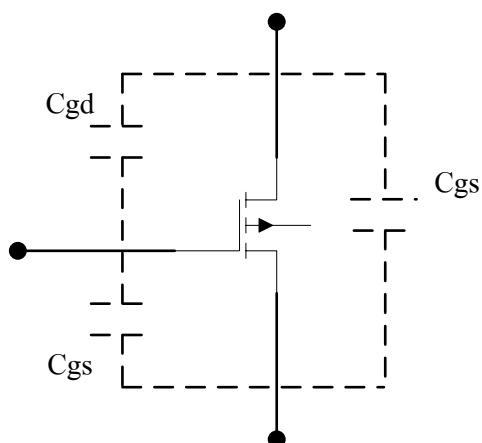
ภาพที่ 2.10 วงจรสมมูลของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสดี



ภาพที่ 2.11 คลื่นการทำงานของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนานคลาสดี

2.4 การสูญเสียจากการขับขาคเกต (Gate Drive Losses)

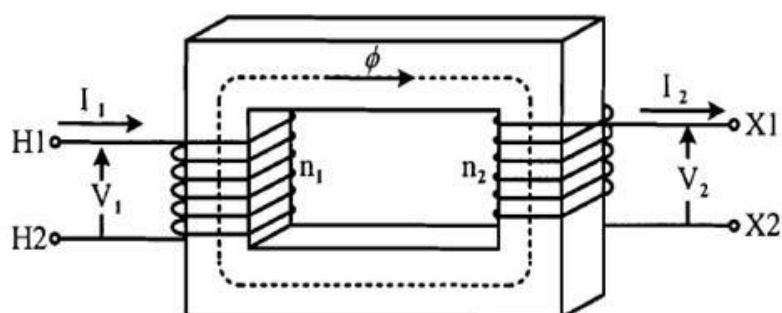
ในการออกแบบวงจรนั้น ประสิทธิภาพถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เพราะว่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้วงจรต้องดึงกำลังงานด้านขาเข้าให้เพียงพอ เพื่อจ่ายกำลังงานขาออกให้ได้ตามต้องการ การที่วงจรดึงกำลังงานด้านขาเข้ามากกว่ากำลังงานด้านขาออกนี้ เพราะต้องไปชดเชยการสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรนั่นเอง จึงส่งผลให้วงจรประสิทธิภาพของวงจรลดลง การสูญเสียนี้นั้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากการสูญเสียจากการสวิตช์ซิ่ง และเกิดจากการสูญเสียจากการนำกระแส ถ้าพิจารณาที่ความถี่ต่ำ สิ่งที่ต้องคำนึงเรื่องการสูญเสียอาจมีเพียงเท่านั้น แต่ถ้าใช้ความถี่ในการสวิตช์ซิ่งสูงๆ สิ่งที่ต้องคำนึงเพิ่มขึ้น มาคือ การสูญเสียกำลังงานในการขับขาคเกตของสวิตช์กำลัง (Gate Drive Losses) โดยกำลังงานที่ใช้นั้นจะต้องใช้ในการเก็บประจุ และคายประจุให้กับตัวเก็บประจุแฝง เพื่อให้สวิตช์สามารถที่จะหยุดและนำกระแสได้ตามความต้องการ โดยสัญญาณขับนำที่ใช้ส่วนใหญ่จะมีอยู่สองแบบ คือ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและแบบที่สองคือสัญญาณไซน์ สวิตช์กำลังที่ใช้ในปัจจุบัน ด้วยโครงสร้างภายในระหว่างแต่ละขาของสวิตช์ จะมีตัวเก็บประจุแฝงอยู่ในตัวสวิตช์ เช่น ระหว่างขาเกตกับเดรน ก็จะมีตัวเก็บประจุแฝงที่เรียกว่า C_{gd} ดังนั้นในการขับสวิตช์จะต้องมีแรงดันไปจ่ายให้สวิตช์ทำงานที่ขาเกต และขาซอส จะเห็นได้ว่ามีตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรม แฝงอยู่ คือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างขาเกต และ ขาซอส เรียกตัวเก็บประจุนี้ว่า C_{gs} การขับสวิตช์กำลังด้วยสัญญาณขับนำสี่เหลี่ยม การต่อในลักษณะนี้จะมีการใช้พลังงานที่สูงมากในช่วงเริ่มการทำงานของสวิตช์เริ่มนำกระแส ซึ่งจะต้องใช้กระแสสูงมากๆ ในช่วงแรกของการทำงาน ในช่วงแรกๆ การเริ่มทำให้สวิตช์เริ่มนำกระแสจะต้องใช้กระแสในการขับสูงถึง 5 แอมป์ โดยค่านี้อาจจะเกิดขึ้นนานแค่ไหนขึ้นอยู่กับการประจุพลังงานของ ให้เต็มกระแสที่มีค่าสูงนี้จึงจะลดลง ดังนั้นถ้าเป็นความถี่สูงๆ นั้น ในการสั่งให้สวิตช์ทำงานในแต่ละรอบการทำงานจะต้องใช้พลังงานเพื่อไปประจุกตัวเก็บประจุ C_{gs}



ภาพที่ 2.12 ตัวเก็บประจุแฝงในสวิตช์กำลัง

2.5 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นหรือลดลง หรือในบางกรณีใช้ในการแยกการต่อถึงกันทางไฟฟ้า โดยมีอัตราการแปลงแรงดันเป็น 1:1 โครงสร้างของหม้อแปลงแสดงดัง ภาพที่ 2.14 ในรูปขดลวด H1-H2 เป็นขดลวดปฐมภูมิ (Primary) หรือขดลวดด้านไฟรับ ส่วนขดลวด X1-X2 เป็นขดลวดทุติยภูมิ (Secondary) หรือขดลวดด้านจ่ายไฟปลายขดลวดด้านนั้น มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกหรือลบพร้อมๆ กัน



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของหม้อแปลง

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับหม้อแปลงจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งจากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

$$e_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

$$e_2 = n_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

เมื่อ $e_1 =$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ

$e_2 =$ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดปฐมภูมิ

ดังนั้น

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.3)$$

ถ้าสมมุติให้หม้อแปลงเป็นหม้อแปลงในอุดมคติ คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวด N_1 คล้องขดลวด N_2 ด้วย ไม่คิดความต้านทานของขดลวด ไม่คิดการสูญเสียในแกนเหล็กและกระแสไฟฟ้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าน้อยมาก ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงดัน กระแส และจำนวนรอบของขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นไปดังนี้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (2.4)$$

เมื่อ

$a =$ อัตราส่วนการแปลง (Transformation Ratio) ของหม้อแปลง

$n_1 =$ จำนวนรอบของขดลวดไฟรับ

$n_2 =$ จำนวนรอบของขดลวดจ่ายไฟ

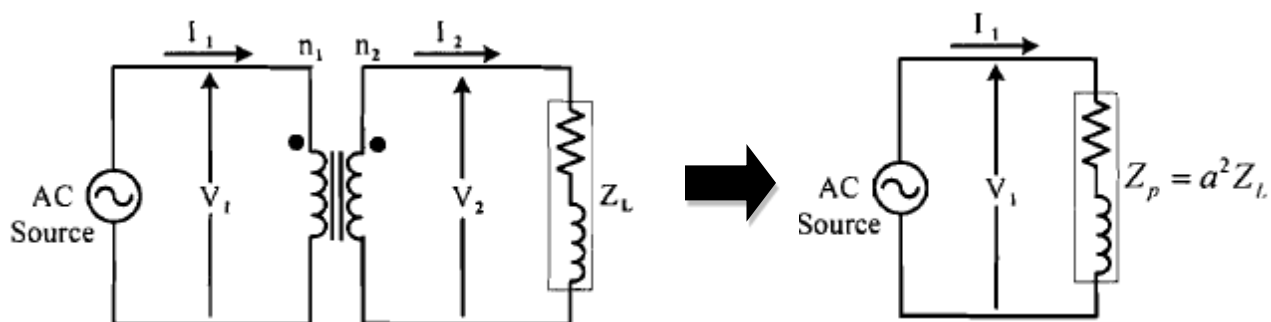
$V_1, V_2 =$ ค่า rms ของแรงดันที่ขั้วของขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิตามลำดับ

$I_1, I_2 =$ ค่า rms ของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิตามลำดับ

ในกรณีของหม้อแปลงลง (Step-down transformer) ค่า a จะมีค่ามากกว่า 1 ส่วนหม้อแปลงขึ้น (Step-up transformer) ค่า a จะมีค่าน้อยกว่า 1

2.5.1 อิมพีแดนซ์ในวงจรหม้อแปลง

เมื่ออิมพีแดนซ์ Z_L ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรง อิมพีแดนซ์ที่เห็น โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้า คือ Z_L เมื่อมีหม้อแปลงต่ออยู่ในวงจรดังภาพที่ 2.15 ก. โหลด Z_L ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายผ่านหม้อแปลง อิมพีแดนซ์ที่เห็น โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะไม่เท่ากับ Z_L แต่จะมีค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_P



ก. โหลด Z_L ได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายผ่านหม้อแปลง

ข. แหล่งจ่ายมองเห็นอิมพีแดนซ์กลายเป็น Z_P

ภาพที่ 2.14 อิมพีแดนซ์ในวงจรหม้อแปลง

สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อกับขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} \quad (2.5)$$

และแหล่งจ่ายแรงดันจะมองเห็นอิมพีแดนซ์คือ

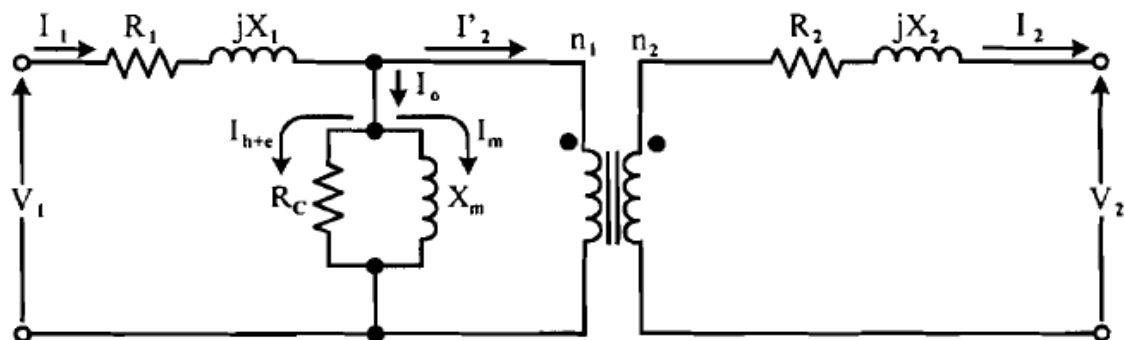
$$Z_P = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.6)$$

จากสมการจะได้ความสัมพันธ์ $V_1 = aV_2$ และ $I_1 = I_2/a$ ดังนั้น

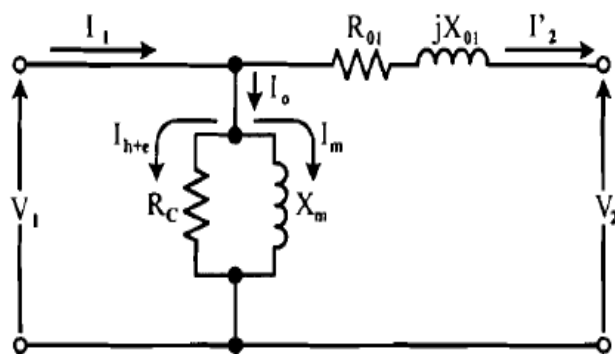
$$Z_P = \frac{V_1}{I_1} = \frac{aV_2}{\left(\frac{I_2}{a}\right)} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_L \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 คือหม้อแปลงจะมีคุณสมบัติในการแปลงอิมพีแดนซ์

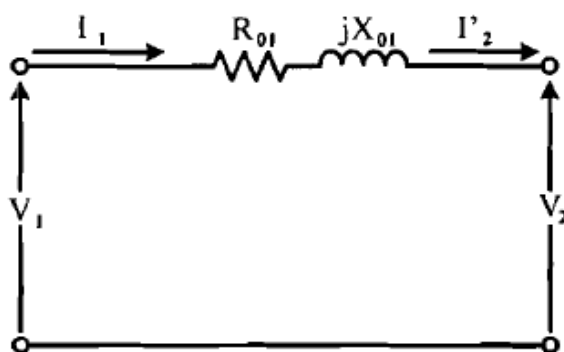
2.5.2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 2.15 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อแยกพารามิเตอร์ออก

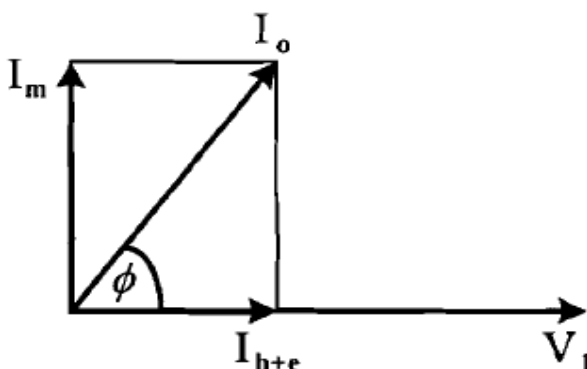


ภาพที่ 2.16 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อย้ายพารามิเตอร์ทางขดลวดทุติยภูมิมาได้



ภาพที่ 2.17 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อไม่คิดกระแสขณะไร้ภาระ

จากภาพที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไม่มีภาระไฟฟ้า นั่นคือ เมื่อขดลวดทุติยภูมิไม่มีกระแสไหล จะยังคงมีกระแสไหลเข้าสู่หม้อแปลงทางด้านขดลวดปฐมภูมิ กระแสนี้เรียกว่า กระแสขณะไร้ภาระ (No Load Current) เวกเตอร์ของกระแสและแรงดันของหม้อแปลงจะแสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 เวกเตอร์ของกระแสและแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไร้โหลด

กระแสไร้ภาระนี้จะมีขนาดประมาณร้อยละ 2 ถึง 10 ของกระแสพิกัดทางปฐมภูมิของหม้อแปลง และกระแส I_0 นี้ยิ่งน้อยยิ่งดี (หม้อแปลงในอุดมคติจะมี $I_0 = 0$) เราสามารถแตกกระแส I_0 เป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนที่อยู่ในแกนเดียวกับ V_1 คือ I_{h+e} และส่วนที่อยู่ในแกนตั้งฉากกับ V_1 คือ I_m กระแส I_{h+e} เป็นส่วนที่ทำให้แกนเหล็กร้อน เนื่องจากการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) ซึ่งประกอบไปด้วยการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) และการสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) การลดกระแสไหลวนนี้ทำได้โดยการเลือกใช้แกนเหล็กที่ประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กบางๆ เคลือบผิวด้วยฉนวนไฟฟ้าหลาย ๆ แผ่นมาวางซ้อนกัน แผ่นเหล็กนี้ยิ่งบางก็ยิ่งทำให้การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนลดลง ส่วนกระแส I_m เป็นกระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก กระแส I_m นี้สามารถลดได้ถ้าใช้แกนเหล็กที่มีความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) สูง คือ มีสภาพเป็นแม่เหล็กง่ายเนื่องจากเราพบว่ากระแส I_{h+e} และ I_m มีค่าแปรผันตรงกับแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลง ดังนั้นวงจรกระแสสองส่วนนี้จึงควรต่อขนานกัน V_1 เราจึงได้วงจรสมมูลย์ซึ่งประกอบไปด้วย R_C และ X_m ต่อขนานกับ V_1 ดังภาพที่ 2.17 และ 2.18 ค่า R_C และ X_m หาได้จากการทำการทดสอบเปิดวงจร (Open circuit test) การทำการทดสอบทำได้โดยการเปิดวงจรทางด้านขดลวดจ่ายไฟ แล้วป้อนแรงดันที่พิกัดให้แก่ขดลวดด้านรับไฟ ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ที่ด้านขดลวดจ่ายไฟ ซึ่งคือกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาทำการคำนวณหาค่า R_C และ X_m ต่อไปจากภาพที่ 2.17 และ 2.18 ค่า

R_{01} และ X_{01} เป็นค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์อนุกรมของหม้อแปลง เมื่อมองเข้าไปทางด้านขดลวดปฐมภูมิ ค่า R_{01} นี้ประกอบไปด้วยความต้านทาน R_1 บวกกับความต้านทาน R'_2 ซึ่งคือความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิที่ย้ายค่ามา ส่วนค่า X_{01} ก็เช่น เดียวกันคือประกอบด้วยรีแอกแตนซ์ X_1 บวกกับรีแอกแตนซ์ X_2 ที่ย้ายค่ามา ค่า R_{01} และ X_{01} นี้ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วด้านจ่ายไฟของหม้อแปลง แรงดันตกที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Impedance Voltage Drop ซึ่งค่าในส่วนนี้ ถ้ายิ่งน้อยยิ่งดี แต่ในกรณีของหม้อแปลงขนาดใหญ่ (ขนาด 100 kVA ขึ้นไป) ถ้าต้องการคุณสมบัติในการจำกัดขนาดกระแสลัดวงจร ต้องทำให้หม้อแปลงมีค่า X_{01} มากและ R_{01} น้อย เพื่อให้ X_{01} เป็นตัวจำกัดกระแสลัดวงจร R_{01} นี้ยิ่งน้อยจะยิ่งดี เพราะถ้ามีค่าสูงขดลวดของหม้อแปลงจะเกิดความร้อนสูงเนื่องจากผลของ I^2R ในขดลวดนั่นเอง ค่า R_{01} และ X_{01} สามารถหาได้โดยการลัดวงจรขดลวดด้านจ่ายไฟของหม้อแปลง และทำการป้อนแรงดันทางด้านขดลวดรับไฟอย่างช้าๆ จนกระทั่งแอมป์มิเตอร์วัดกระแสให้เท่ากับกระแสพิคคของขดลวดทางด้านรับไฟ การทดลองนี้มักใช้แรงดันไม่เกินร้อยละ 10 ของแรงดันที่พิคคของขดลวดด้านรับไฟ และทำการวัดค่าแรงดัน ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ด้านขดลวดจ่ายไฟ ซึ่งคือกำลังสูญเสียในขดลวด (Copper loss) แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาทำการคำนวณหาค่า R_{01} และ X_{01} ต่อไป

2.5.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ ถ้ารู้วงจรสมมูลของหม้อแปลง การสูญเสียของหม้อแปลงมี 2 ส่วนคือ การสูญเสียที่แกนเหล็กของหม้อแปลง ซึ่งการสูญเสียนี้อาจเกิดขึ้นที่ R_c ซึ่งมีค่าแปรตามกำลังสองของแรงดันที่ป้อนให้หม้อแปลง ถ้าแรงดันที่ป้อนในหม้อแปลงคงที่ การสูญเสียที่แกนเหล็กจะมีค่าคงที่ การสูญเสียส่วนที่สองคือ การสูญเสียที่ขดลวดของหม้อแปลง การสูญเสียในส่วนนี้เกิดขึ้นที่ R_{01} การสูญเสียในขดลวดแปรตามกำลังสองของกระแสไหลค ถ้ากระแสไหลคมีค่าคงที่ การสูญเสียในส่วนนี้จะคงที่ การสูญเสียทั้งสองนี้ที่สถานะใดๆ สามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

การสูญเสียในแกนเหล็กที่แรงดันใดๆ

$$P_{core} = \left(\frac{V}{V_{DC}}\right)^2 P_{oc} \quad (2.8)$$

การสูญเสียในขดลวดที่กระแสใดๆ

$$P_{copper} = \left(\frac{V}{V_{SC}}\right)^2 P_{SC} \quad (2.9)$$

ดังนั้นการสูญเสียทั้งหมดในหม้อแปลงที่สถานะใดๆ คือ

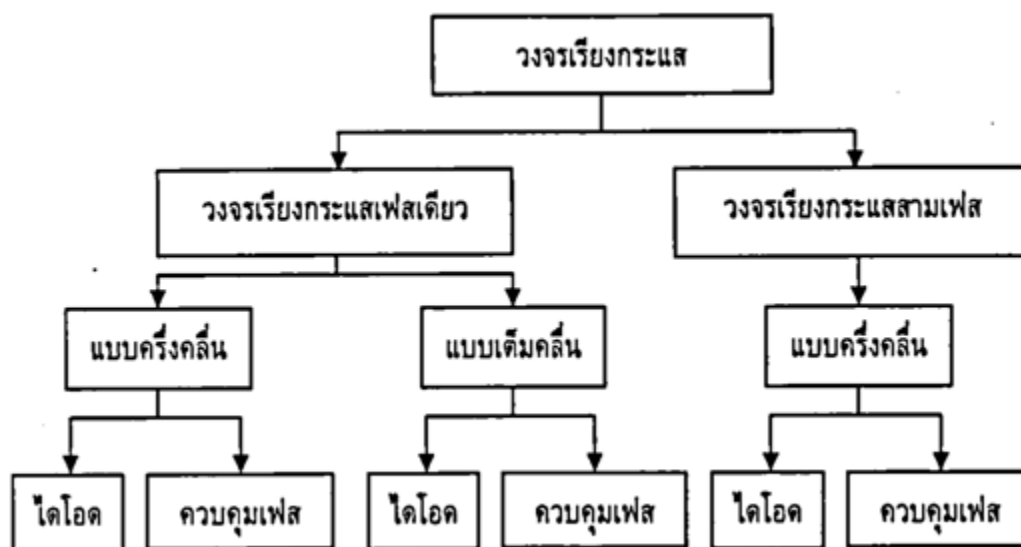
$$P_{OPSC} = P_{core} + P_{copper} \quad (2.10)$$

ดังนั้นเราสามารถหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \\ &= \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{copper} + P_{copper}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.6 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสมีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้า จากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยต้องการให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีความเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุด วงจรเรียงกระแสมีทั้งที่เป็นแบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น แบบครึ่งคลื่น มักจะใช้เมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น จะมีกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้ามีค่าไม่เป็นศูนย์ทำให้เกิดปัญหาที่หม้อแปลงอิ่มตัวได้ง่าย ในบทนี้จึงจะมุ่งเน้นการศึกษาวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเป็นหลักเพราะสามารถนำไปใช้งานที่มีขนาดพิกัดกำลังสูงได้ และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ทำให้เกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงที่ต่อกับวงจรด้านเข้าอิ่มตัวยากกว่าแบบครึ่งคลื่น แผนการศึกษาในบทนี้ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวกับวงจรเรียงกระแสสามเฟส ในวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวจะศึกษาแบบครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น โดยในแต่ละแบบจะควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกโดยใดโอดกับแบบควบคุมเฟสโดยใช้ไครสเตอร์ ส่วนในวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะเน้นเฉพาะแบบเต็มคลื่น ซึ่งจะควบคุมโดยใดโอดกันแบบควบคุมเฟสเช่นกันดังในภาพ 2.19



ภาพที่ 2.19 แผนผังการศึกษาวงจรเรียงกระแส

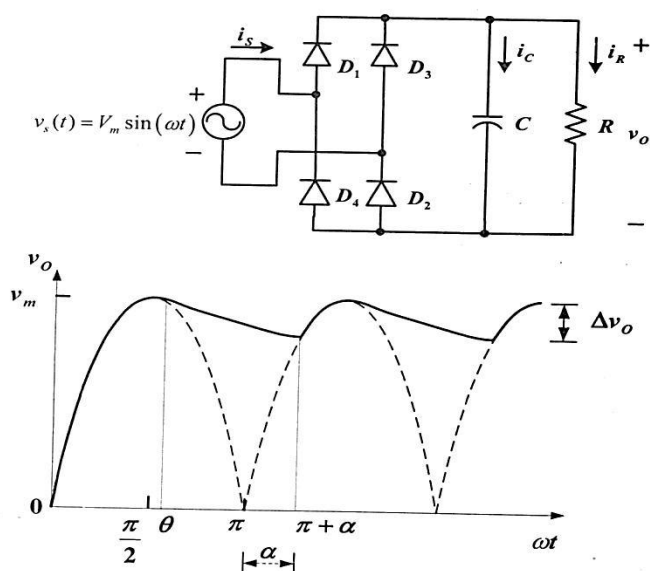
2.6.1 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่น

วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวแบบเต็มคลื่น จะคล้ายกับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น แต่วงจรดังกล่าวจะมีข้อดีเหนือกว่าวงจรครึ่งคลื่นคือ วงจรแบบนี้จะมีไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้า หรือ ด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อหม้อแปลงไฟฟ้า และข้อดีอีกข้อคือ จะมีค่าตัวประกอบระลอกคลื่น (ripple factor) ต่ำกว่าแบบวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น ทำให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้านอกสูงกว่าวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น

2.6.2 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดพร้อมตัวกรองความถี่ด้วยตัว

การต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุสูงๆขนานกับโหลดตัวต้านทานของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่น ไดโอด จะสามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ดังภาพ 2.21 สำหรับวิเคราะห์จะคล้ายกับกรณีวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่นแบบไดโอดพร้อมตัวกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ เว้นเพียงแต่การคายประจุของตัวเก็บประจุจะมีช่วงเวลาที่สั้นกว่ากรณีวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น ค่าระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งของกรณีวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น นอกจากนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้านออก

จะมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับวงจรเรียงกระแสเฟสเดียวครึ่งคลื่น อันเป็นผลมาจากแรงดันตกคร่อมไดโอดที่ทำงานพร้อมกันทีละสองตัว



ภาพที่ 2.20 วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวเต็มคลื่นแบบบริดจ์ไดโอดพร้อมตัวกรองความถี่ด้วยตัวเก็บประจุ

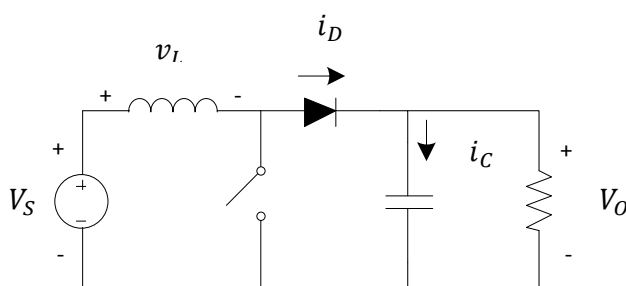
2.7 วงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

วงจรทระดับหรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ คือ วงจรที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ที่เรียกว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) ก็เพราะแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้านั่นเอง

2.7.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในช่วงสภาวะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เช่นเดียวกับวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
2. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา ในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์
3. ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
4. กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของวงจรเป็นหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์



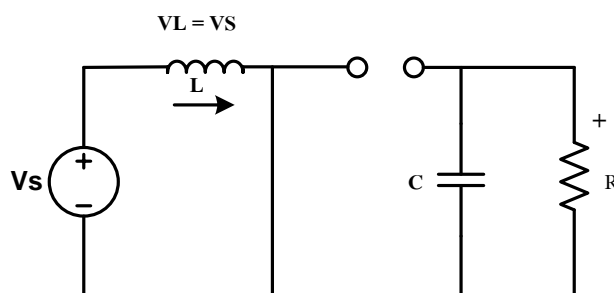
ภาพที่ 2.21 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

2.7.2 หลักการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

หลักการทำงานของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกตามต้องการจะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้ การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัว ดังนี้

2.7.2.1 ขณะสวิตช์นำกระแส

จากภาพที่ 2.21 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกัน ไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ดังแสดงในภาพที่ 2.22 จากกฎของเคอร์ซอพฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้า ดังนี้



ภาพที่ 2.22 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

$$-V_s + v_L = 0 \quad (2.12)$$

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.13)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

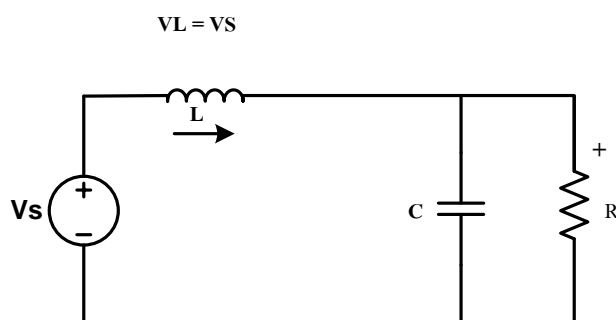
ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (2.14)$$

$$\Delta i_{L, on} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.15)$$

$\Delta i_{L, on}$ หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

2.7.2.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



ภาพที่ 2.23 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ใดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-V_s + V_L + V_o = 0 \quad (2.16)$$

$$V_L = V_s - V_o$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.17)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1 - D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้นทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L, \text{ off}} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) (1 - D)T \quad (2.18)$$

ที่สภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.18) จะได้ว่า

$$\Delta i_{L, \text{ on}} + \Delta i_{L, \text{ off}} = 0 \quad (2.19)$$

$$\left(\frac{V_s}{L} \right) DT + \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} = 0 \quad (2.20)$$

$$V_s D (V_s - V_o) (1 - D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o (1 - D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.21)$$

จากการหาความสัมพันธ์ ของอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าที่เรียกว่า อัตราการขยายแรงดัน สามารถหาได้โดยวิธีง่ายๆ โดยใช้สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และได้ผลเช่นเดียวกับสมการที่ (2.21) ดังนี้

$$V_{L,av} = V_{L,on}(t_{on}) + V_{L,off}(t_{off}) = 0 \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.13 $V_{L,on} = V_s$

และสมการที่ 2.17 $V_{L,off} = V_s - V_o$

$$V_{L,av} = (V_s)(t_{on}) + (V_s - V_o)(t_{off}) = 0$$

$$(V_s)(DT) + (V_s - V_o)(1 - D)T = 0$$

$$V_s D + (V_s - V_o)(1 - D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o(1 - D) = 0$$

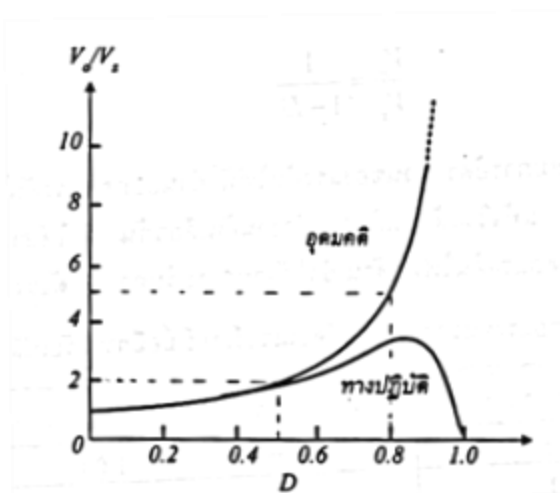
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.23)$$

การได้มาซึ่งสมการอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า จากสมการที่ (2.21) หรือ (2.23) แท้จริงแล้วมีหลักการทำงานอันเดียวกัน ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าได้จากการปรับค่า D ดังแสดงในตารางที่ 2.1

Duty ratio (D)	อัตราขยายแรงดัน (Voltage gain) (V_o/V_s)
0.0	1.00
0.1	1.10
0.2	1.25
0.3	1.43
0.4	1.67
0.5	2.00
0.6	2.50
0.7	3.33
0.8	5
0.9	10
1.0	Infinity

ตารางที่ 2.1 อัตราขยายแรงดันวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการปรับค่า D

จากกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 2.24 เมื่อเพิ่มขึ้นค่าอัตราขยายแรงดัน ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 4 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีความเสถียรภาพ ในอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำสุด คือ หนึ่งหรือแรงดันไฟฟ้าด้านออกเท่ากับแรงดัน ไฟฟ้าด้านเข้าในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดและตัวอุปกรณ์สวิตซ์



ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับ D

2.7.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

สมมติการสูญเสียภายใน วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ เงื่อนไขดังนี้ จะได้

$$P_s = P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.24)$$

$$P_s = V_s I_s = V_s I_L \quad (2.25)$$

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R}$$

$$V_o = \frac{V_s}{1-D}$$

$$V_s I_L = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R}$$

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad (2.26)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด หาได้จากค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส ดังในสมการที่ (2.15)

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s D T}{L}$$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุดคือ

$$I_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,max} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad (2.27)$$

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) \quad (2.28)$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดค่าให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ดัง สมการที่ (2.29)

$$I_{L,min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right) = 0 \quad (2.29)$$

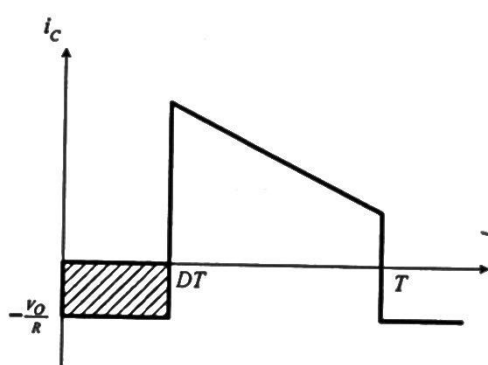
$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_s D T}{L} \right)$$

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.30)$$

การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด จากสมการที่ (2.30) สามารถทำได้โดยการปรับที่ค่า D หรือค่าความต้านทานโหลด R หรือค่าความถี่สวิตซ์ f

2.7.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = C\Delta V_o = I_o\Delta t_{on} \quad (2.31)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

$$\Delta t_{on} = DT$$

$$\Delta V_o = \frac{I_o\Delta t_{on}}{C} = \frac{V_oDT}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} \quad (2.32)$$

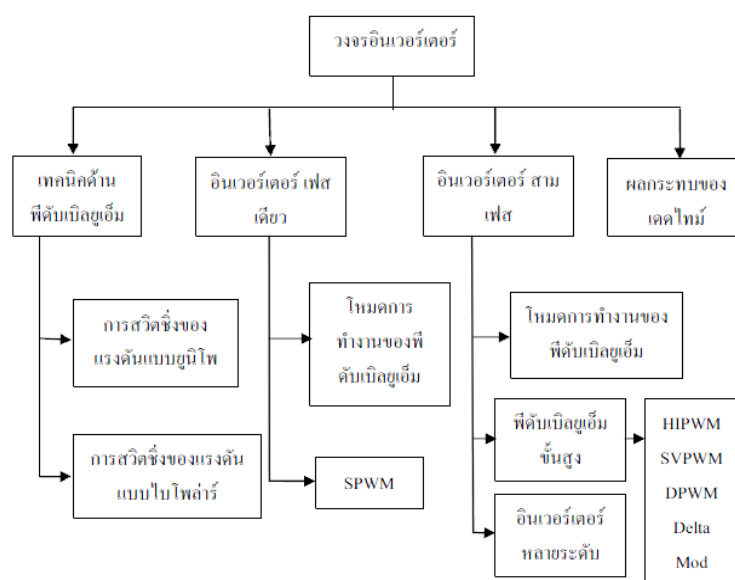
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (2.33)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้ศูนย์ หรือการเพิ่มค่าโหลดหรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุหรือเพิ่มค่าความถี่การสวิตซ์ให้สูงขึ้น

2.8 คอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนท์

ทำไมจึงต้องมีวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนท์ เพราะมีความต้องการออกแบบวงจรที่มีสวิตชิ่งที่ความถี่สูงมากขึ้น และด้วยการทำงานที่ความถี่สูงดังกล่าวจะทำให้เกิดผลเสียจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะเกิดการสวิตช์ (หรือเรียกว่าขณะสวิตชิ่ง) ทั้งในขณะเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแสสำหรับกรณีวงจรมีการสวิตช์ขณะที่แรงดันและกระแสมีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลคูณของแรงดันและกระแสไฟฟ้า คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะเกิดการสวิตช์ มีผลทำให้คอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพต่ำ จึงได้มีการวิจัยค้นหาวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการสูญเสียต่ำ หนึ่งในวิธีการที่มีการพัฒนาขึ้น คือ การทำให้แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ขณะเกิดการสวิตช์ ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะเกิดการสวิตช์มีค่าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะผลทำให้คอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การสวิตช์ในวงจรสวิตชิ่งแบบเรโซแนนท์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันและ/กระแสค่าเป็นศูนย์ การสวิตช์แบบนี้อาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การสวิตช์แบบนุ่มนวล (Soft switching) จะได้กล่าวถึงหลักการเบื้องต้น และการวิเคราะห์การทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนท์ตามผังในภาพที่ 2.26 ดังนี้



ภาพที่ 2.26 แผนผังวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนท์

2.9 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

2.9.1 หลักการทำงานเบื้องต้น

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมก็คือ คอนเวอร์เตอร์ที่แปลงกำลังจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับดังแสดงในภาพที่ 2.27 ซึ่งจะเรียกว่าเป็น วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม เพราะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุวางอนุกรมกันกับโหลดความต้านทาน การสวิตช์จะทำให้เกิดแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยที่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ C จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความถี่สวิตช์

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

1. พิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจร R-L-C ดังแสดงในภาพที่ 2.28 จะได้อัตราขยายแรงดันของวงจรซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

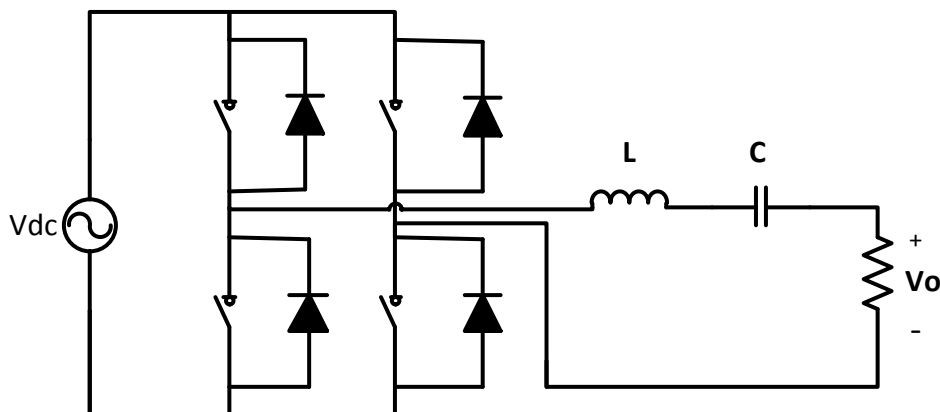
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad (2.34)$$

2. ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.35)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหักล้างกัน จึงมองเห็นเป็นโหลดมีค่าเฉพาะความต้านทานเท่านั้น เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ f_o ผลของ L – C จะทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวกรองความถี่ คือทำให้ความถี่หลักมูลผ่านไป และจะลดขนาดสัญญาณของฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ทำให้รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมความต้านทานเป็นรูปคลื่นสัญญาณไซน์ ที่มีความถี่เดียวกันกับความถี่ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 2.27 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

3. ขนาดของแรงดันความถี่หลักมูลของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม $\pm V_{dc}$ จะมีขนาดเท่ากับ

$$V_i = \frac{4V_{dc}}{\pi} \quad (2.36)$$

4. ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่ จะแสดงในพจน์ของแบนด์วิดท์ โดยแสดงในรูปตัวประกอบคุณภาพ (quality factor: Q) ดังนี้

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o RC} \quad (2.37)$$

5. อัตราขยายแรงดันในสมการที่ (2.34) สามารถแสดงในพจน์ของ ω_o และ Q ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_o}-\frac{\omega_o}{\omega}\right)^2}} \quad (2.38)$$

6. ผลตอบสนองเชิงความถี่แสดง อัตราขยายแรงดันของผลตอบสนองเชิงความถี่บรรทัดฐาน (Normalized frequency: f_s/f_o) ที่ค่า Q ต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานจะลดลงเมื่อค่า Q มีค่าสูงขึ้น ขณะที่การเพิ่มค่า L และลดค่า C จะมีผลทำให้ Q มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน

2.9.2 การสูญเสียจากการสวิตซ์

จุดเด่นของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ คือ การลดการสูญเสียของสวิตซ์เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป หากความถี่เรโซแนนซ์และค่า Q ของวงจรมีค่าสูง สวิตซ์จะทำงานเมื่อกระแสโหลดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์มีการสูญเสียต่ำ วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จึงมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง

2.9.3 การควบคุมขนาดแรงดัน

หากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดไม่ใช่จุดสำคัญขนาดสัญญาณของความถี่หลักมูลที่ตกคร่อมความต้านทานจะถูกควบคุมโดยการเลื่อนความถี่สวิตซ์จากจุดเรโซแนนซ์ ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่โหลดความต้านทานจะถูกควบคุมด้วยความถี่สวิตซ์ ซึ่ง หลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบทำความร้อนจากการเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ขณะควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออก ควรจะควบคุมให้ความถี่สวิตซ์ปรับเปลี่ยนให้มีความถี่มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ เพราะจะย้ายฮาร์มอนิกความถี่สูงของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมออกไป