บทที่ 2

การแปลงผันเรโซแนนซ์ (Resonant Converters)

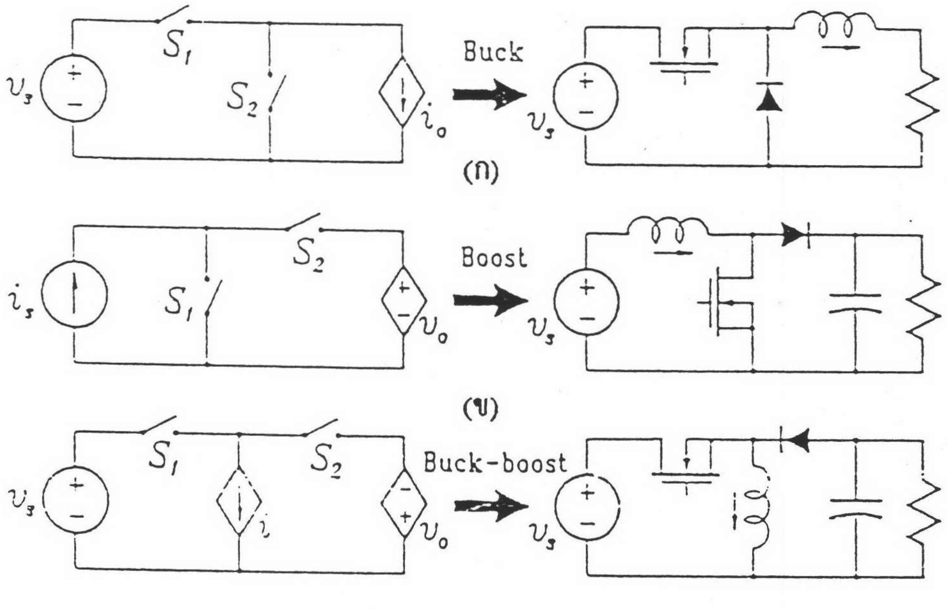
ลักษณะการแปลงผันเรโซแนนซ์

การแปลงผันพลังงานโดยเทคนิคเรโซแนนซ์จะมีอยู่ 2 แบบที่เป็นทวิภาวะของกันและกันคือการแปลงผันที่ใช้แหล่งแรงดัน (Voltage Source) และการแปลงผันที่ใช้แหล่งกระแส (Current Source) การแปลงผันที่ใช้แหล่งแรงดันมักจะเป็นวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรม (Series Resonant Converter, *SRC*) การแปลงผันแบบนี้สวิตช์จะทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) จากแหล่งไฟตรง วงจรเรโซแนนซ์จะทำหน้าที่กำจัดส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่ไม่ต้องการออกไป ความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรขึ้นอยู่กับตัวประกอบคุณภาพ (Quality Facter, Q) [7] ถ้าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูงพอจะทำให้แรงดันตกคร่อมความต้านทานที่เป็นโหลดมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์ ส่วนวงจรที่เป็นคู่อัลของการแปลงผันแบบอนุกรมคือวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบขนานหรือการแปลงผันที่ใช้แหล่งกระแส (Current Source Converter) สำหรับวงจรแปลงผันแบบนี้สวิตช์จะทำหน้าที่สร้างรูปคลื่นกระแสสลับแบบสี่เหลี่ยม

หลักการโดยทั่วๆไปของการแปลงผันเรโซแนนซ์

วัตถุประสงค์ของการแปลงผัน คือการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสเพื่อให้เหมาะสมและตรงกับวัตถุประสงค์และการใช้งานในกรณีที่แรงดันด้านเข้าจะเป็นแหล่งไฟตรงอันได้แก่แบตเตอรี่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือจากวงจรเรียงกระแสแรงดันด้านออกอาจเป็นไฟตรงหรือไฟสลับซึ่งตรงกับการแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงหรือไฟตรง-ไฟสลับในกรณีที่แหล่งไฟตรงมีความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่ เราเรียกกิ่งวงจรเช่นนี้ว่ากิ่งกระแสเนื่องจากกระแสเปลี่ยนทันทีไม่ได้ กิ่งกระแสที่มีแหล่งแรงดันอนุกรมจะอนุโลมเรียกเป็นแหล่งกระแสวงจรด้านออกก็เช่นเดียวกัน อาจจะเป็นกิ่งแรงดันหรือกิ่งกระแสก็ได้ กล่าวคือถ้ามีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมจะมีลักษณะเป็นกิ่งกระแส หรือถ้าวงจรด้านออกมีตัวเก็บประจุต่อขนานก็เป็นแรงดัน[8] โครงสร้างของวงจรแปลงผันส่วนใหญ่จะ

ประกอบด้วยวงจรด้านเข้าซึ่งอาจจะเป็นแหล่งแรงดันหรือแหล่งกระแสวิตช์ตัดวงจร และวงจรด้านออกซึ่งเป็นกิ่งกระแสหรือกิ่งแรงดัน สำหรับวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงพื้นฐานถ้าเป็นการแปลงผันโดยอ้อมซึ่งได้แก่วงจรแปลงผันแบบทอน-ทบระดับ (Buck-Boost Converter) และวงจรชุค (Cuk Converter) ระหว่างด้านเข้ากับด้านออกยังมีตัวเก็บสะสมพลังงาน (Energy Buffer) อีกด้วย แต่ถ้าเป็นการแปลงผันโดยตรงซึ่งได้แก่วงจรทอนระดับ (Buck Converter) วงจรทบระดับ (Boost Converter) และวงจรทอน-ทบระดับ (Buck-Boost Converter) ก็จะไม่มีตัวสะสมพลังงานอยู่ระหว่างกลางเพื่อส่งทอดพลังงาน (ดูรูปที่ 2.1) สวิตช์ของวงจรแปลงผันพื้นฐานจะตัดหรือต่อวงจรในขณะที่กระแสและแรงดันไม่เป็นศูนย์ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียอันเนื่องมาแต่การสวิตช์ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าสวิตช์รีแอกแตนซ์รวมอยู่ด้วยเช่นมีความประจุไฟฟ้าขนานอยู่กับสวิตช์หรือมีความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง (Leakage Reactance of Transformer) อนุกรมอยู่กับสวิตช์ การระบายความร้อนที่สะสมในรีแอกแตนซ์ทุกคาบสวิตช์จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลงโดยเฉพาะเมื่อต้องการจะให้วงจรทำงานที่ความถี่สูงขึ้น

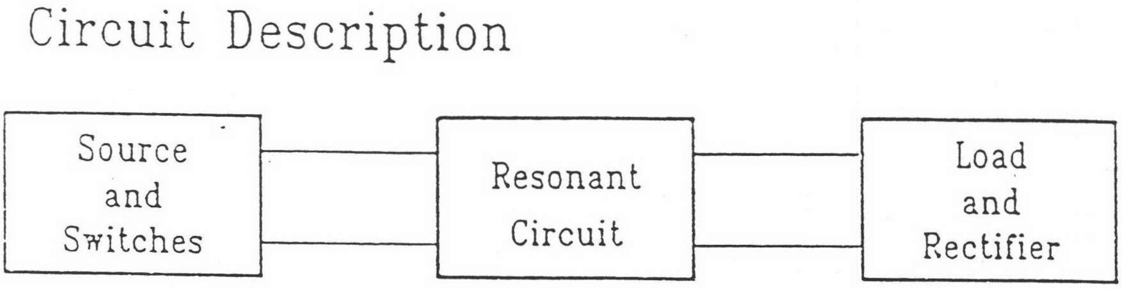


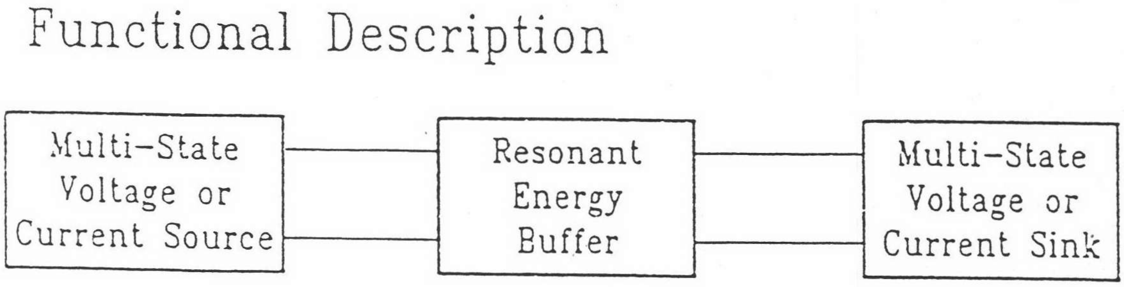
(ค)

รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงพื้นฐาน (ก)วงจรแปลงผันแบบทอนระดับ (ข)วงจรแปลงผันแบบทบระดับ (ค)วงจรแปลงผันแบบทอน-ทบระดับ

ค่าสูญเสียอันเนื่องมาแต่การสวิตช์สามารถจะลดได้ โดยใช้เทคนิคเรโซแนนซ์ขององค์ประกอบเรโซแนนซ์โดยอาศัยจังหวะการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ เพื่อหลีก

เลี่ยงการสูญเสียที่เกิดขึ้นในสวิตช์จะอาศัยช่วงจังหวะที่กระแสหรือแรงดันเป็นศูนย์ทำการสวิตช์ (Zero Current or Zero Voltage Switch) รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพการแปลงผันเรโซแนนซ์จะประกอบขึ้นด้วย 3 ส่วนด้วยกันคือวงจรด้านเข้า วงจรเรโซแนนซ์และวงจรด้านออกโดยจะจำแนกวงจรออกเป็นส่วนๆดังรูปที่ 2.2





รูปที่ 2.2 แผนภาพการแปลงผันพลังงานเรโซแนนซ์

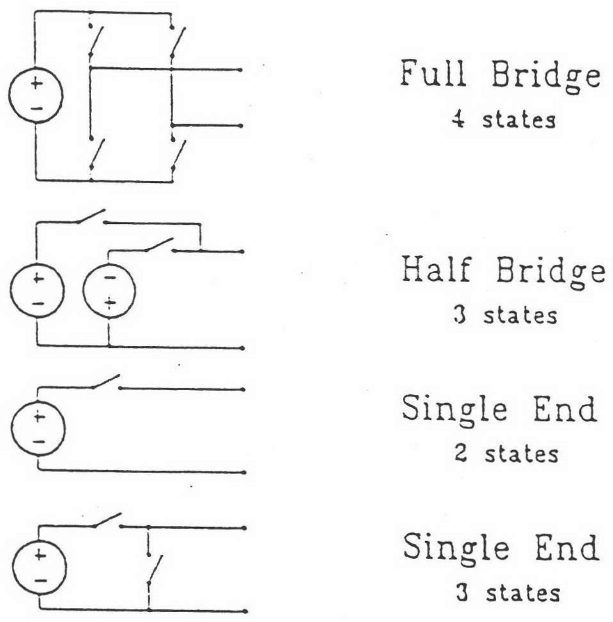
<u>ลักษณะของวงจร</u> (Circuit Description)

พิจารณาตามรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าการแปลงผันเรโซแนนซ์ประกอบขึ้นด้วยส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วนด้วยกันและมีลักษณะเหมือนกับการแปลงผันทั่วๆไป โดยวงจรด้านเข้าซึ่งจะประกอบด้วยแหล่งแรงดันหรือแหล่งกระแสและสวิตช์ ส่วนที่สองเป็นวงจรเรโซแนนซ์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเก็บตัวสะสมพลังงานไปด้วยส่วนสุดท้ายคือวงจรด้านออกจะประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสวงจรกรองแบบผ่านต่ำและโหลดซึ่งจะได้อธิบายแต่ละส่วนต่างๆดังนี้

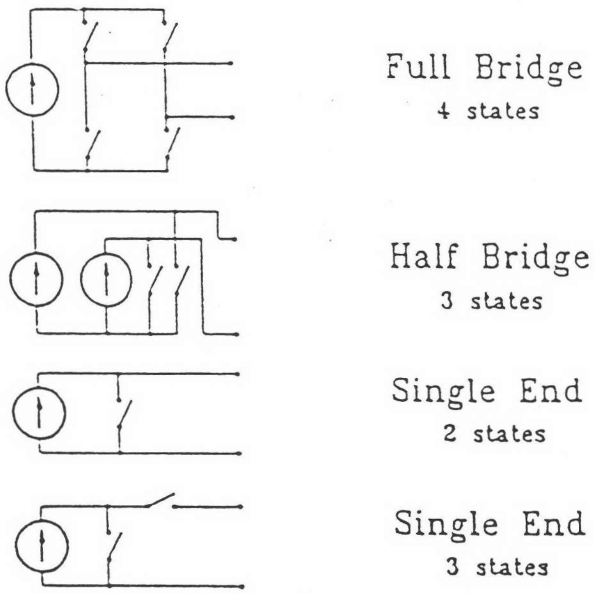
<u>วงจรด้านเข้า</u> (Input Circuit)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าแหล่งไฟตรงด้านเข้าอาจจะเป็นแหล่งแรงดันหรือแหล่งกระแสและรวมตลอดไปถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ซึ่งทำหน้าที่สร้างรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

กระตุ้นวงจรเรโซแนนซ์ ดังนั้นวงจรสมมูลของส่วนแรกตามรูปที่ 2.2 จะมีสถานะการลัดวงจร หรือสถานะเปิดวงจรรวมอยู่ด้วย[8]ขึ้นอยู่กับแหล่งไฟตรงที่จ่ายให้กับวงจรว่าเป็นแหล่งกระแส หรือแหล่งแรงดัน ในวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์วงจรด้านเข้าจะมีหลายรูปแบบเช่นวงจรบริดจ์เต็ม (Full Bridge) วงจรกึ่งบริดจ์ (Half Bridge)และวงจรปลายเดียว (Single- End) ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งใช้แหล่งแรงดันและแหล่งกระแสตามลำดับ

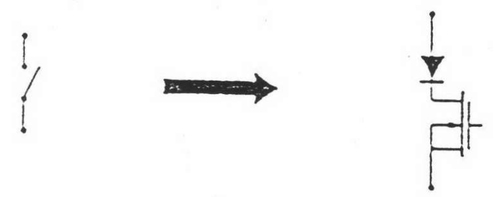


รูปที่ 2.3 ลักษณะวงจรด้านเข้าแบบแหล่งแรงดัน



รูปที่ 2.4 ลักษณะวงจรด้านเข้าแบบแหล่งกระแส

สวิตช์ในรูปที่ 2.4 เมื่อทำให้เป็นจริงในทางปฏิบัติ (Implement) จะได้ดังรูปที่ 2.5



(ก)

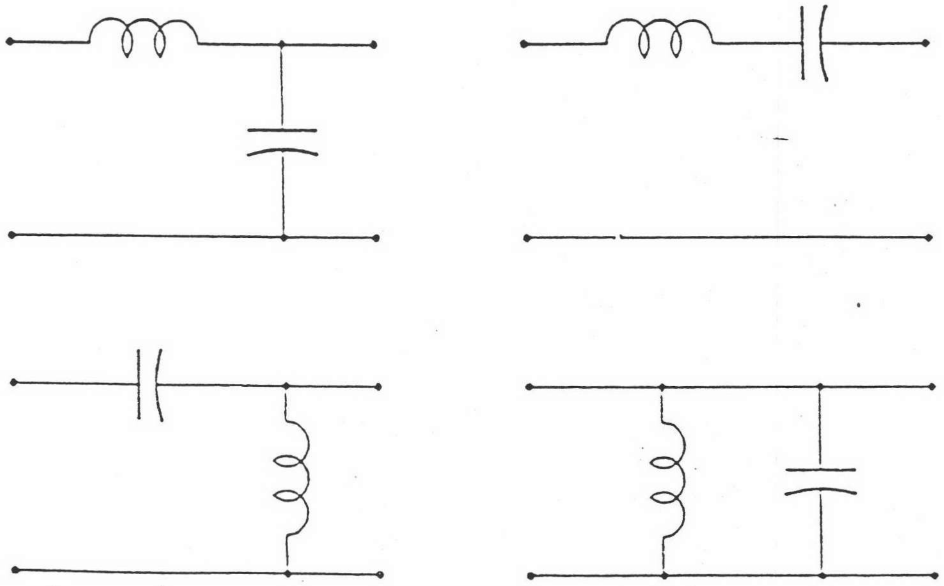
(ข)

รูปที่ 2.5 ลักษณะของสวิตช์

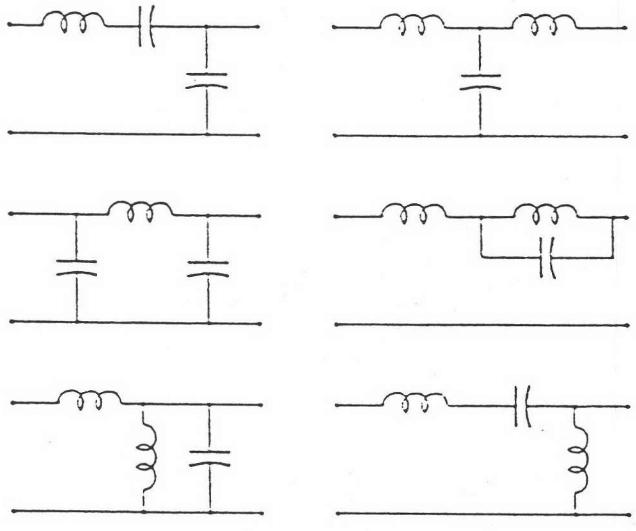
(ก) กระแสไหลทางเดียวทนแรงดันสองทาง (ข) กระแสไหลสองทางทนแรงดันทางเดียว

<u>วงจรเรโซแนนซ์</u> (Resonant Tank Circuit)

วงจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยองค์ประกอบรีแอคทีฟซึ่งได้แก่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุโดยจะทำหน้าที่สะสมพลังงานและจะสร้างแรงดันหรือกระแสที่มีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์ วงจรเรโซแนนซ์จะต้องประกอบขึ้นด้วยวงจรอันดับสอง (Second Order) หรือมากกว่า โดยทั่วๆไปจะประกอบด้วย L และ C อย่างละ1 ตัว ในทางปฏิบัติจำเป็นจะต้องนำค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์และค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงมาพิจารณาด้วยเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าองค์ประกอบของวงจรเรโซแนนซ์จะประกอบด้วยวงจรอันดับสอง (Second Order Circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 แสดงวงจรเรโซอันดับสามตามลำดับ



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างวงจรเรโซแนนซ์อันดับสอง

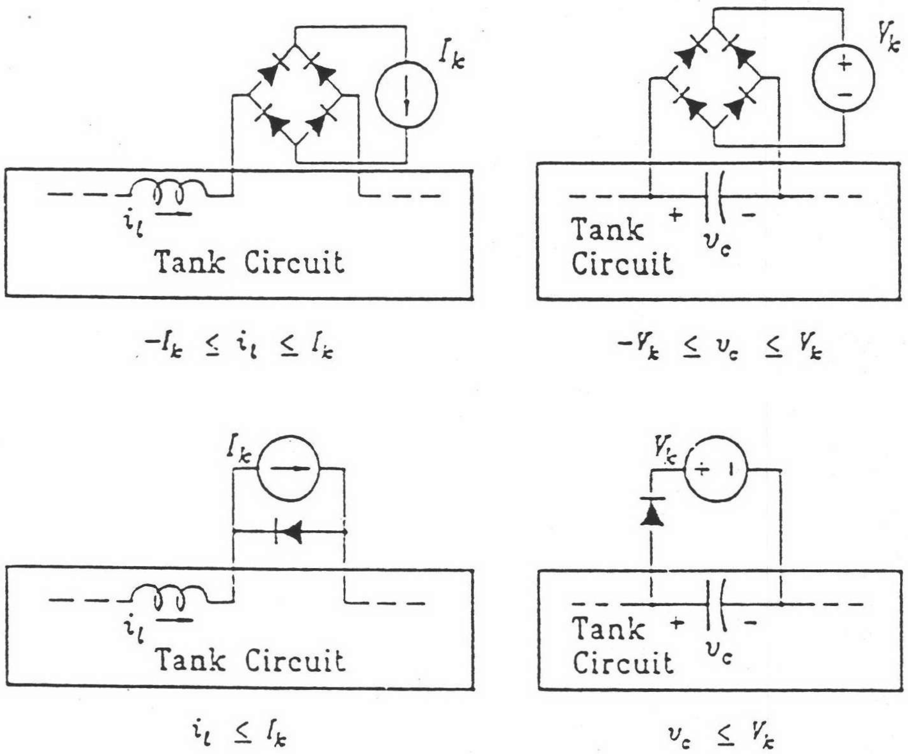


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างวงจรเรโซแนนซ์อันดับสาม

<u>วงจรตรึงค่า</u> (Clamping Circuit)

เพื่อประสิทธิภาพของวงจรและความน่าเชื่อถือของการแปลงผันเรโซแนนซ์จะต้องพิจารณาถึงความเค้นของอุปกรณ์ (Component Stress) ตลอดถึงปริมาณกระแสไหลผ่านสวิตช์หรือแรงดันตกคร่อมสวิตช์ ความสามารถในการทนต่อกระแสของสวิตช์จะต้องมีค่าที่

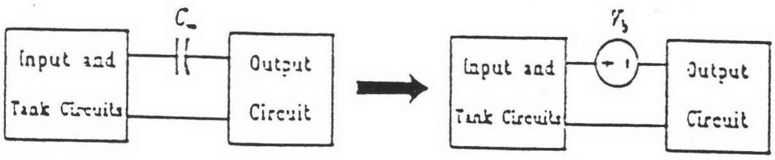
สูงกว่าค่ายอดของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำในทำนองเดียวกันสวิตช์จะต้องมีความทนต่อค่ายอดของแรงดันได้ โดยทั่วไปการจำกัดค่ากระแสและแรงดันในวงจรเรโซแนนซ์จะใช้วงจรตรึงค่ายอดดังรูปที่ 2.8



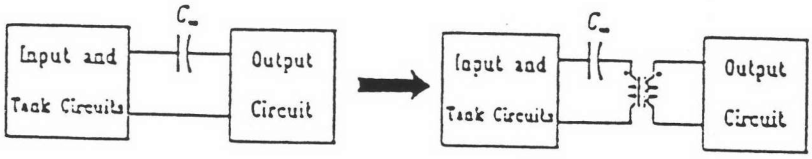
รูปที่ 2.8 วงจรตรึงค่ายอดของกระแสและแรงดัน

<u>การแยกโดดในวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์</u> (Converter Isolation)

การแยกโดด (Isolation) ทางไฟฟ้าระหว่างวงจรด้านเข้าและด้านออกของการแปลงผันถือได้ว่ามีส่วนสำคัญ โดยทั่วไปหม้อแปลงจะเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมและได้รับความเชื่อถือ ซึ่งได้มีการนำมาใช้ในวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ทั้งแบบวงจรบริดจ์เต็มและวงจรกึ่งบริดจ์ โดยวงจรดังกล่าวจะไม่มีส่วนประกอบของไฟตรงซึ่งจะง่ายและสะดวกที่จะใช้หม้อแปลงมาเป็นตัวแยกโดด ส่วนการแปลงผันในวงจรปลายเดียว (Single-End) วงจรประเภทนี้จะมีส่วนประกอบไฟตรงอยู่ดังนั้นถ้าจะนำหม้อแปลงเป็นตัวแยกโดดก็จะต้องกำจัดส่วนประกอบไฟตรงออกโดยใช้ค่าตัวประจุค่าใหญ่เข้าไปกรองส่วนประกอบไฟตรงออกการแยกโดดโดยหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 2.9 ก.



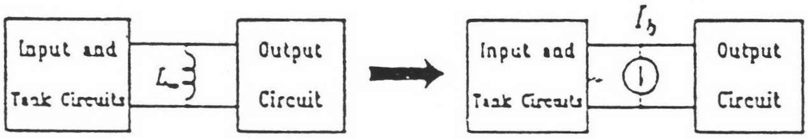
(ก)



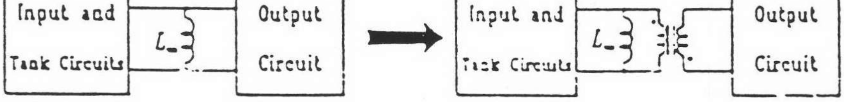
(ข)

รูปที่ 2.9 การใช้ตัวประจุกั้นองค์ประกอบแรงดันไฟตรง
(ก) แสดงวงจรสมมูล (ข) การแยกโดดวงจรด้วยหม้อแปลง

ในกรณีของวงจรที่ใช้แหล่งกระแสก็จะใช้ตัวเหนี่ยวนำค่าใหญ่ต่อขนานกับวงจรเพื่อให้กระแสคงที่ซึ่งทำให้เกิดสมดุลระหว่างแรงดันกับเวลา (Volt-Second Balance) สามารถที่จะใช้หม้อแปลงบินกลับ (Flyback Transformer) เข้าแยกโดดโดยแสดงดังรูปที่ 2.10



(ก)

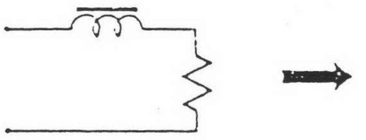


(ข)

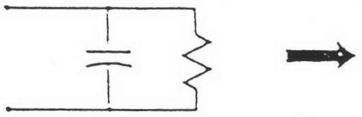
รูปที่ 2.10 การใช้ตัวเหนี่ยวนำค่าใหญ่กั้นองค์ประกอบกระแสไฟตรง
(ก)แสดงวงจรสมมูล (ข)การแยกโดดด้วยหม้อแปลงบินกลับ

<u>วงจรด้านออก</u> (Output Circuit)

ส่วนสุดท้ายของการแปลงผันโดยเทคนิคเรโซแนนซ์คือวงจรด้านออกจะประกอบด้วยไดโอดเรียงกระแสและตัวกรองซึ่งเป็นตัวกรองแบบผ่านต่ำ (Low Pass Filter) โดยตัวกรองอาจจะเป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ ในสถานะอยู่ตัวจะแทนด้วยกึ่งกระแสหรือกึ่งแรงดันไฟตรงซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรแต่ละแบบดังแสดงในรูปที่ 2.11 หน้าที่หลักของวงจรด้านออกจะเป็นตัวส่งผ่านพลังงานจากแหล่งเรโซแนนซ์ซึ่งเป็นไฟสลับแล้วเปลี่ยนเป็นไฟตรงเพื่อจ่ายโหลด ในส่วนของวงจรเรียงกระแสก็จะมีลักษณะเป็นวงจรบริดจ์เต็มหรือวงจรกึ่งบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสจะเห็นว่าจะประกอบด้วยสองสถานะด้วยกันโดยวงจรที่มีลักษณะเป็นกึ่งกระแสจะมีสถานะวงจรลัดวงจรและวงจรที่มีลักษณะเป็นกึ่งแรงดันจะมีสถานะวงจรเปิดอยู่ด้วยตามลำดับ



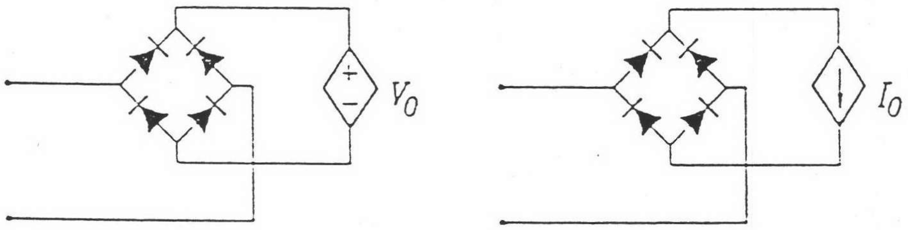
(ก)



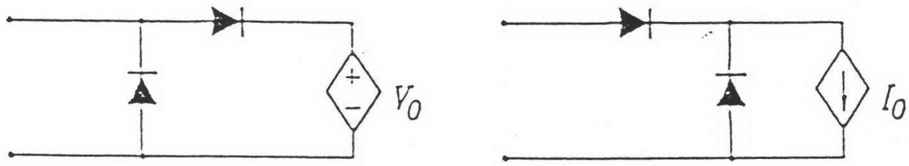
(ข)

รูปที่ 2.11 แสดงวงจรสมมูลวงจรกรองแบบผ่านต่ำ

(ก) ตัวกรองเป็นตัวเหนี่ยวนำ (ข) ตัวกรองเป็นตัวเก็บประจุ



Full Bridge



Single End

รูปที่ 2.12 รูปแบบของวงจรด้านออก

<u>การจำแนกการแปลงผันเรโซแนนซ์</u> (Classification of Resonant Converters)

1. <u>การขับนำจากแหล่งและการเชื่อมโยงกับโหลด</u>

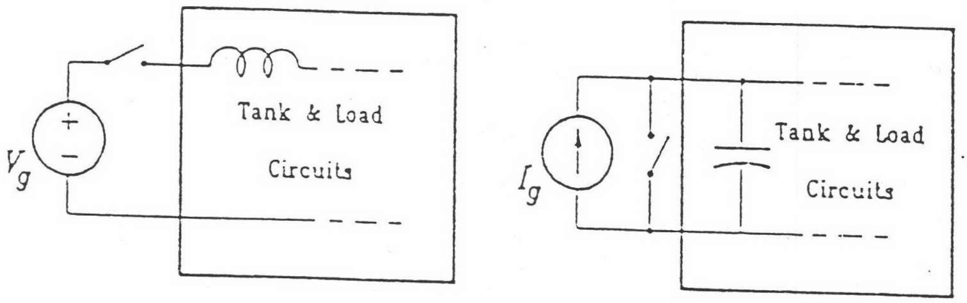
การแปลงผันเรโซแนนซ์จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆด้วยกันดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าแต่ละส่วนก็ทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการจำแนกชนิดการแปลงผันเรโซแนนซ์ [8] โดยจะพิจารณาส่วนการขับนำจากแหล่ง (Source Driving) และการเชื่อมโยงกับโหลด (Load Coupling)

การขับนำจากแหล่งหมายถึงการโอนย้ายพลังงานจากแหล่งไฟตรงไปสู่วงจรเรโซแนนซ์และแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ

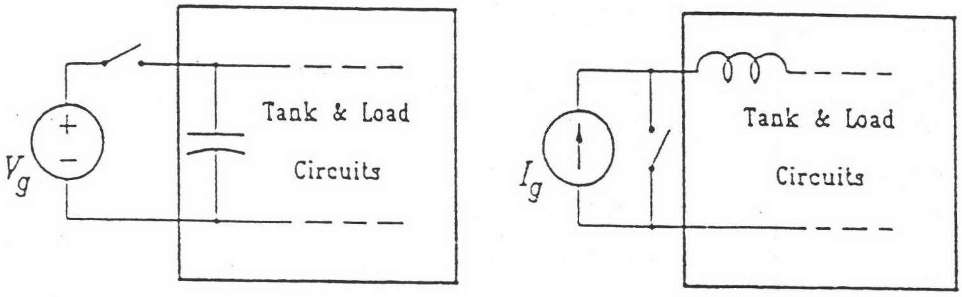
1.1การขับนำที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Driving) ในกรณีนี้ความถี่ในการสวิตซ์จะเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์

1.2การขับนำที่ความถี่อื่น (Non- Resonant Driving) ซึ่งความถี่ในการสวิตซ์จะมีค่าใกล้เคียงแต่ต่างจากความถี่เรโซแนนซ์

แผนภาพการขับนำจากแหล่งแสดงดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 แสดงถึงขับนำพลังงานที่เรโซแนนซ์และที่ความถี่อื่นตามลำดับโดยสัญลักษณ์แหล่งและสวิตซ์เป็นสัญลักษณ์กึ่งที่ใช้แทนวงจรด้านเข้าตามรูปที่ 2.3 หรือ 2.4 ในรูปที่ 2.13 พลังงานจะถูกโอนย้ายจากแหล่งเรโซแนนซ์ไปสู่ส่วนต่างๆของวงจรลักษณะเป็นสัญญาณไซน์ขนาดของแรงดันหรือกระแสจะขึ้นอยู่กับค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยพลังงานจะถูกโอนย้ายที่ความถี่ธรรมชาติ รูปที่ 2.14 เป็นการโอนย้ายพลังงานที่ความถี่อื่นซึ่งกระแสและแรงดันจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการสวิตซ์ด้วย หรือช่วงระยะเวลาการโอนย้ายจะไม่เต็มคาบคือมีพลังงานโอนย้ายกลับทางในบางช่วงเวลา



รูปที่ 2.13 แสดงการขับนำจากแหล่งที่ความถี่เรโซแนนซ์



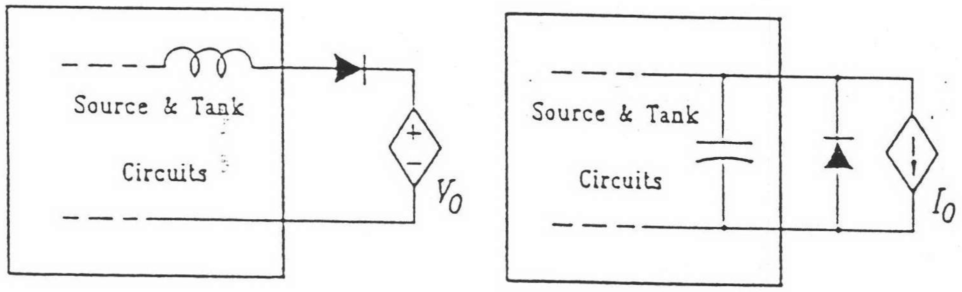
รูปที่ 2.14 แสดงการขับนำจากแหล่งที่คาบน้อยกว่าเรโซแนนซ์

2.ส่วนเชื่อมโยงกับโหลด (Load Coupling)

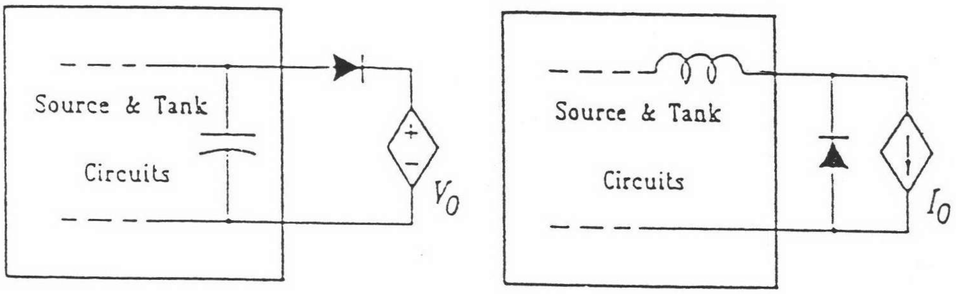
จะจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ

2.1การเชื่อมโยงที่เรโซแนนซ์ (Resonant Coupling) พลังงานจากวงจรเรโซแนนซ์จะถูกส่งต่อให้กับโหลดที่ความถี่เรโซแนนซ์

2.2การเชื่อมโยงที่ที่ความถี่อื่น(Non-Resonant Coupling) เป็นการโอนย้ายพลังงานจากวงจรเรโซแนนซ์ไปยังโหลดที่ความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์รูปที่ 2.15 และ 2.16 แสดงการเชื่อมโยงกับโหลดที่ความถี่เรโซแนนซ์ และที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ของไดโอดและกิ่งกระแสหรือกิ่งแรงดันเป็นสัญลักษณ์กิ่งแทนวงจรด้านออกดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.15 แสดงการเชื่อมโยงวงจรเรโซแนนซ์สู่โหลดที่ความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2.16 แสดงการเชื่อมโยงวงจรเรโซแนนซ์สู่โหลดที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์

<u>กลุ่มของวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์</u> (Family of Resonant Converters)

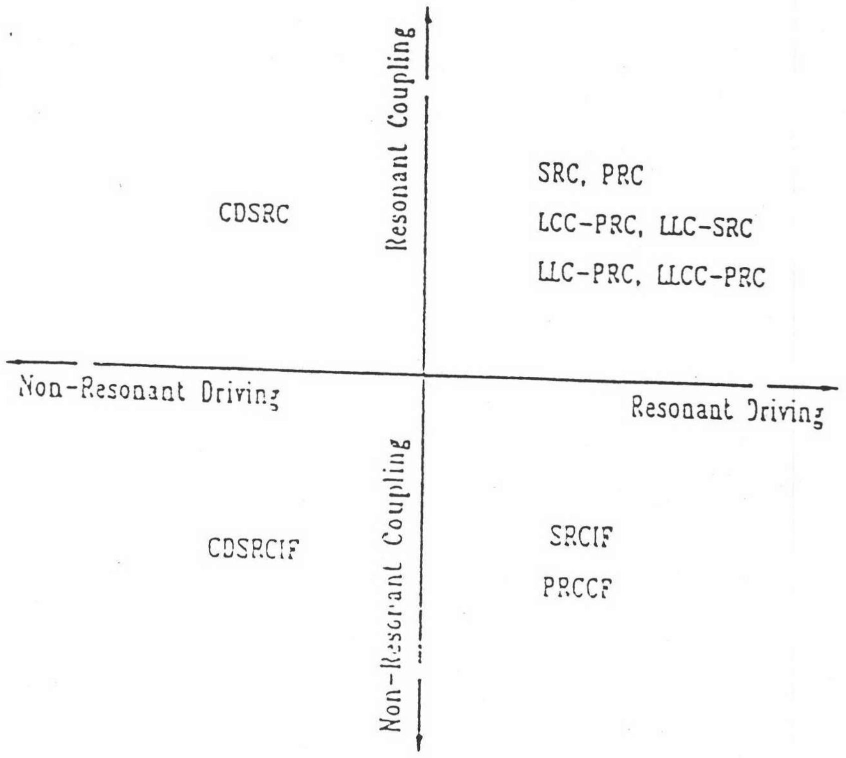
เกณฑ์การจำแนกคือการขับนำจากแหล่งและการเชื่อมโยงกับโหลดของการแปลงผันเรโซแนนซ์จะจำแนกออกเป็น 4 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 2.17 [8]

ควอแดรนต์ที่ 1. แสดงกลุ่มของการขับนำและการเชื่อมโยงกับโหลดที่ความถี่เดียวกับความถี่เรโซแนนซ์

ควอแดรนต์ที่ 2. แสดงวงจรที่ขับนำที่ความถี่ต่างจากความเรโซแนนซ์แต่มีการเชื่อมโยงกับโหลดที่ความถี่เรโซแนนซ์

ควอแดรนต์ที่ 3.แสดงการขับนำจากแหล่งและการเชื่อมโยงกับโหลดที่ความถี่อื่นไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์

ควอแดรนต์ที่ 4. แสดงการขับนำที่ความถี่เรโซแนนซ์แต่มีการเชื่อมโยงกับโหลดที่ความถี่อื่นไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์



รูปที่ 2.17 แสดงการจำแนกแปลงผันแบบเรโซแนนซ์เป็นสี่ควอแดรนต์

SRC	*Series Resonant Converter*
PRC	*Parallel Resonant Converter*
CDSRC	*Current Driven Series Resonant Converter*
CDSRCIF	*Current Driven Series Resonant Converter with Inductive Output Filter*
SRCIF	*Series Resonant Converter with Inductive Output Filter*
PRCCF	*Parallel Resonant Converter with Capacitive Output Filter*

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าการแปลงผันแต่ละแบบแต่ละควอแดรนต์จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการแปลงผันในควอแดรนท์ที่ 1 วงจร (Series Resonant Converter *SRC*)และ (Parallel Resonant Converter *PRC*)ก็จะมีคุณสมบัติเทียบเท่าวงจรอื่นๆในควอแดรนต์เดียวกันสำหรับการแปลงผันในควอแดรนท์ที่ 2 หรือ 3 ซึ่งเป็นการขับนำที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์และมีข้อดีคือจะส่งผลให้ทำการสวิตช์ทำงานที่แรงดันหรือกระแสศูนย์คุณสมบัติเหล่านี้คือเป้าหมายหลักในการลดการสูญเสียอันเนื่องมาแต่การสวิตช์ ส่วนในควอแดรนท์ที่ 3 และ 4 จะเป็นลักษณะการเชื่อมโยงกับโหลดซึ่งแรงดันและกระแสจะถูกตรึงค่า (Clamping) โดยตัวกรองแบบแรงดันและกระแสตามลำดับ การแปลง

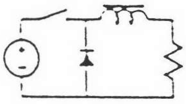
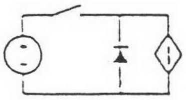
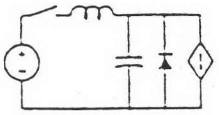
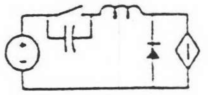
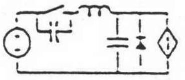
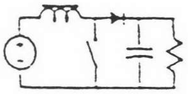
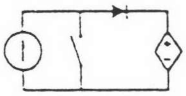
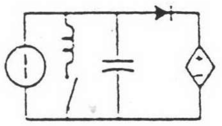
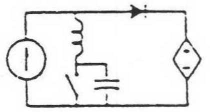
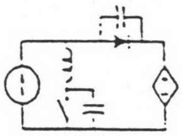
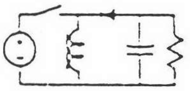
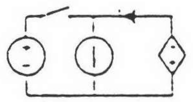
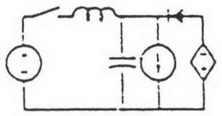
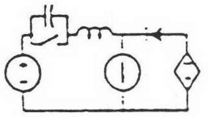
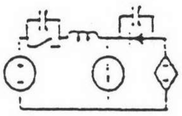
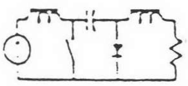
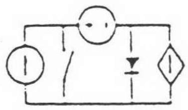
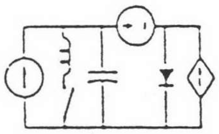
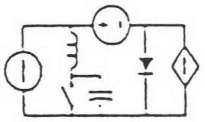
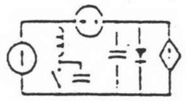
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผันที่มีการตรึงค่ายอดกระแสในตัวเหนี่ยวนำเหมาะสำหรับการแปลงผันกำลังงานสูงๆในทางตรงกันข้ามการตรึงค่ายอดแรงดันในตัวเก็บประจุจะเหมาะะกับวงจรที่ต้องการแรงดันด้านออกค่าสูง

<u>วงจรแปลงผันเกือบเรโซแนนซ์</u> (Quasi-Resonant nt Converters *QRC*)

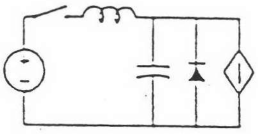
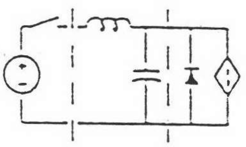
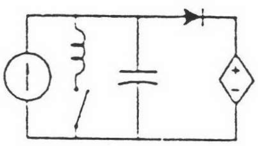
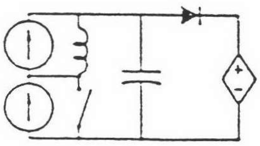
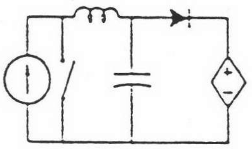
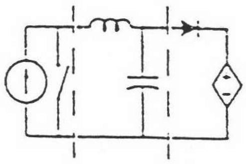
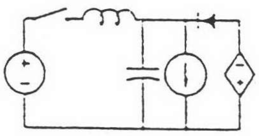
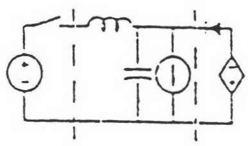
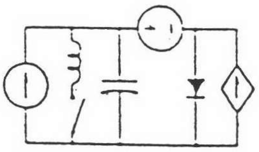
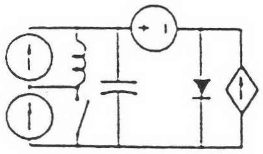
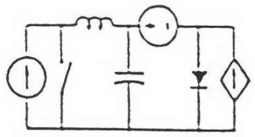
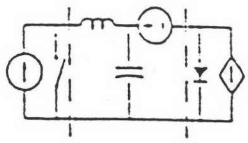
การแปลงผันเกือบเรโซแนนซ์ (*QRCs*) แบ่งเป็นชนิด *ZVS* และ *ZCS* ตารางที่ 2.1 , 2.2 , 2.3 และ 2.4 แสดงวงจรแปลงผันเกือบเรโซแนนซ์ที่พัฒนาจากวงจรแปลงผันพื้นฐานและสวิตช์ที่ทำงานที่แรงดันศูนย์ (*ZVS*) หรือกระแสศูนย์ (*ZCS*) เมื่อวงจรเรโซแนนซ์มี L และ C รวม 3 ตัวจะมีชื่อเรียกว่าวงจรแปลงผันหลาย
(Multi-resonant Converter *MRC*)

ตารางที่ 2.1 วงจรแปลงผันเกือบเรโซแนนซ์ที่พัฒนาจากวงจรแปลงผันพื้นฐาน[8]

Switchmode Converter	Simplified Circuit	with Resonant Switch		
		ZCS	ZVS	ZVS MRC
 Buck				
 Boost				
 Buck-Boost				
 Cuk				

ตารางที่ 2.2 วงจรแปลงผันเกือบเรโซแนนซ์ชนิดกระแสศูนย์[8]

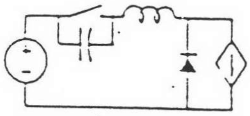
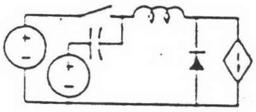
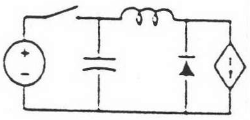
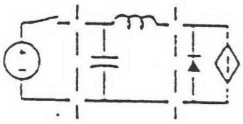
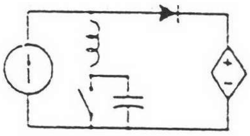
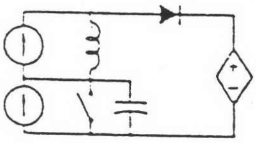
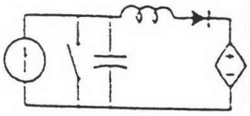
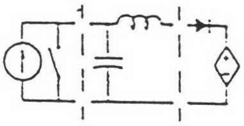
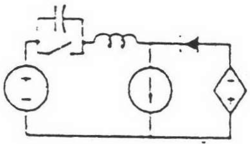
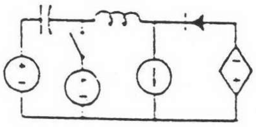
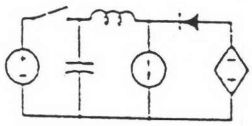
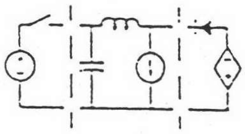
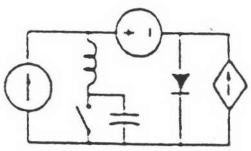
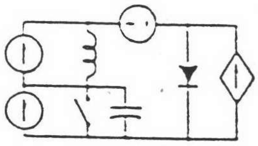
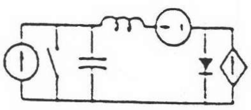
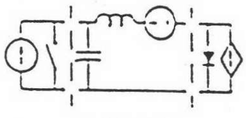
CLASSIFICATION OF ZCS QUASI-RESONANT CONVERTERS

ZCS QRC	Source Transformation	Dc Source Elimination	Classification
 Buck			 RD[a]-RC[b]
 Boost			 ND[c]-NC[d]
 Buck-Boost			 RD-NC
 Cuk			 ND-RC

[a] Resonant Driving
[b] Resonant Coupling
[c] Non-Resonant Driving
[d] Non-Resonant Coupling

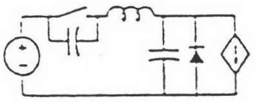
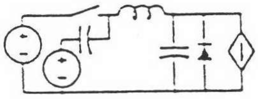
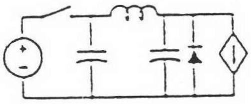
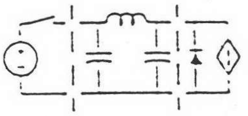
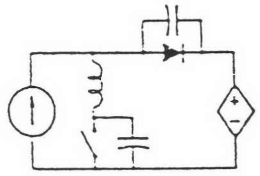
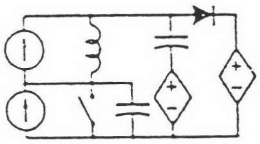
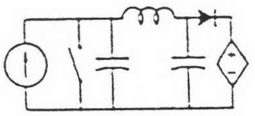
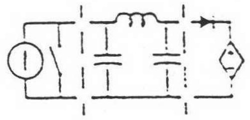
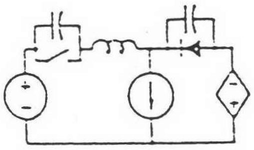
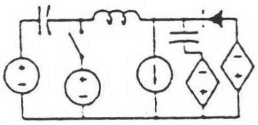
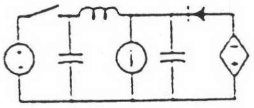
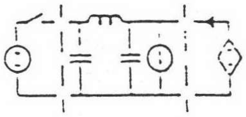
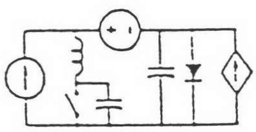
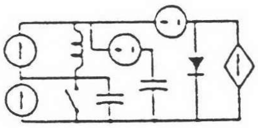
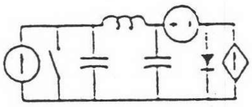
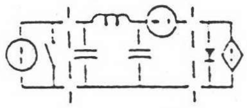
ตารางที่ 2.3 วงจรแปลงผันเกือบเรโซแนนซ์ชนิดแรงดันศูนย์[8]

CLASSIFICATION OF ZVS QUASI-RESONANT CONVERTERS

ZVS QRC	Source Transformation	Dc Source Elimination	Classification
 Buck			 ND-NC
 Boost			 RD-RC
 Buck-Boost			 ND-RC
 Cuk			 RD-NC

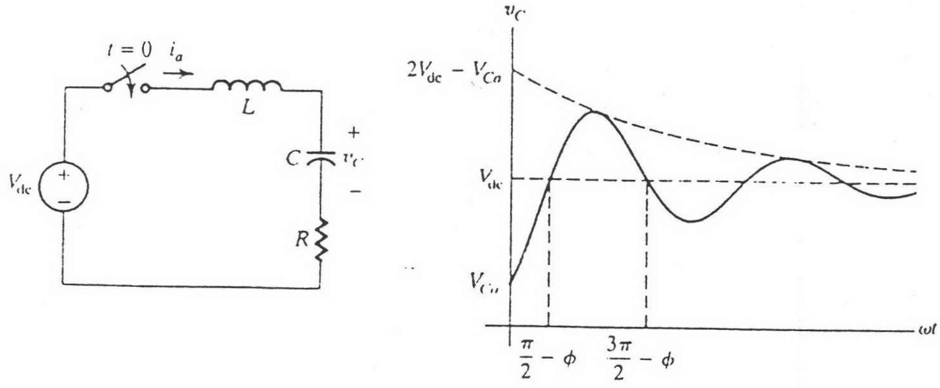
ตารางที่ 2.4 วงจรแปลงผันหลายเรโซแนนซ์โดยสวิตช์ที่แรงดันศูนย์[8]

CLASSIFICATION OF ZVS MULTI-RESONANT CONVERTERS

ZVS MRC	Source Transformation	Dc Source Elimination	Classification
 Buck			 ND-RC
 Boost			 RD-NC
 Buck-Boost			 ND-NC
 Cuk			 RD-RC

<u>พฤติกรรมของวงจรเรโซแนนซ์อันดับสอง</u>

การแปลงผันเรโซแนนซ์จะประกอบด้วยวงจรอันดับสองหรือมากกว่า รูปที่ 2.15 (ก) แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมอันดับสอง



(ก) (ข)

รูปที่ 2.1 (ก) วงจรอนุกรม *RLC* (ข) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C

<u>ผลการตอบสนองในอาณาจักรเวลา</u> (Time-Domain Response)

ในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองในอาณาจักรเวลา โดยใช้กฎ *KVL* [7] ทำการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันของตัวเก็บประจุ v_c ตามรูปที่ 2.15 ข. โดยการพิจารณาแรงดันของตัวเก็บประจุ v_c กำหนดค่าเริ่มต้นดังนี้ $i_a(0) = 0$ และ, $v_c(0) = V_{co}$ i_a จะมีค่าเท่ากับ $C\frac{dv_c}{dt}$ เมื่อ $t > 0$ ซึ่งจะเขียนสมการของแรงดันของตัวเก็บประจุ v_c ได้ดังนี้

$$\frac{d^2v_c}{dt^2} + \frac{R}{L}.\frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{LC}.v_c = \frac{V_{dc}}{LC} \qquad (2.1)$$

ให้ $\frac{R}{2L} = \alpha$ และ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ จากสมการที่ (2.1) จะได้

$$\frac{d^2v_c}{dt^2} + 2\alpha.\frac{dv_c}{dt} + \omega_0^2 v_c = \omega_0^2 V_{dc} \qquad (2.2)$$

ถ้า $\omega_o > \alpha$ ขั้ว (Pole) $S_a \& S_a^*$ จะเป็นปริมาณเชิงซ้อนสังยุค (Complex Conjugate)

$$s_a, s_a^* = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \tag{2.3}$$

หรือ

$$s_a, s_a^* = -\alpha \pm j\omega_d \tag{2.4}$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \tag{2.5}$$

จะได้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ $$v_c = e^{-\alpha t}(A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t) + V_{dc} \tag{2.6}$$

เงื่อนไขเริ่มต้นคือ $v_c(0) = V_{co}$ และ $$\frac{dV_c}{dt} = 0 \tag{2.7}$$

และคำนวณหาค่า A และ B จะมีค่าดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ

$$A = \frac{\alpha.(V_{co} - V_{dc})}{\omega_d} \tag{2.8}$$

$$B = V_{co} - V_{dc} \tag{2.9}$$

เมื่อแทนค่า A และ B ลงในสมการที่ 2.6 จะได้สมการของแรงดันของตัวเก็บประจุ v_c ดังสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.12)

$$v_c = \left[(V_{co} - V_{dc}).e^{-\alpha t}\left(\frac{\alpha}{\omega_d}\sin \omega_d t + \cos \omega_d t\right)\right] + V_{dc} \tag{2.10}$$

ถ้า

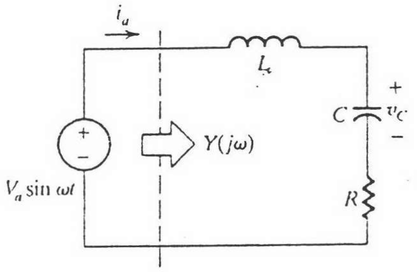
$$\phi = \tan^{-1}\frac{\alpha}{\omega_d} \tag{2.11}$$

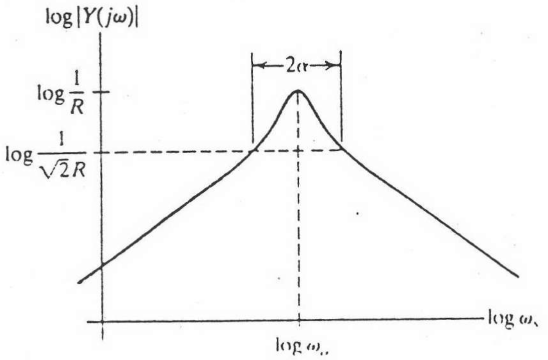
$$v_c = e^{-\alpha t}.\left[(V_{co} - V_{dc}).\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\omega_d}\right)^2}\cos(\omega_d t + \phi)\right)\right] + V_{dc} \tag{2.12}$$

ลักษณะการแรงดันของตัวเก็บประจุ v_c จะเป็นไปตามสมการที่ (2.12) ดังรูปที่ 2.15 (ข)

<u>ผลการตอบสนองในอาณาจักรความถี่</u> (Frequency-Domain Response)[7]

ในการควบคุมแรงดันด้านออกของวงจรเรโซแนนซ์ให้เป็นไปตามความต้องการ พบว่าแรงดันด้านออกหรือแรงดันที่โหลดจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการสวิตช์ฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) และความสามารถกรององค์ประกอบถี่ฮาร์มอนิกโดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่ 3 อันเนื่องมาจากแรงดันไฟสลับรูปสี่เหลี่ยมทำได้โดยการเลือกขนาดของตัวประกอบคุณภาพ Q ซึ่งถ้าขนาดของตัวประกอบคุณภาพของวงจรสูงพอก็จะทำให้รูปคลื่นของแรงดันคร่อมโหลดมีลักษณะใกล้เคียงไซน์ [7] รูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) แสดงวงจรเรโซแนนซ์และแอมพลิจูดของแอดมิตแตนซ์ (Admittance) ตามลำดับ





รูปที่ 2.19 (ก) วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม (ข) แอดมิตแตนซ์

จากรูปที่ 2.19 (ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมจะมีค่าตามสมการที่ (2.13) คือ

$$Y(s) = \frac{sC}{s^2LC + sRC + 1} \tag{2.13}$$

$$Y(s) = \frac{1}{R}.\left[\frac{2\alpha s}{s^2 + 2\alpha s + \omega o^2}\right] \tag{2.14}$$

$$Y(s) = \frac{1}{R}.\left[\frac{\frac{1}{Q}.\frac{s}{\omega_o}}{\left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2 + \frac{1}{Q}.\frac{s}{\omega_o} + 1}\right] \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.15) ถ้าสวิตช์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ($\omega_s = \omega_o$) แอมพลิจูดของแอดมิตแตนซ์จะมีค่าเท่ากับ *1/R* อันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากัน การควบคุมแรงดันด้านออกจะทำได้โดยเลือกความถี่ในการสวิตช์ (ω_s) และพิจารณาขนาดของตัวประกอบคุณภาพ Q ไปด้วย เพราะค่า Q มีค่าสูงเกินไปจะส่งผลทำให้ค่ายอดของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสูงดังสมการที่ (2.16)

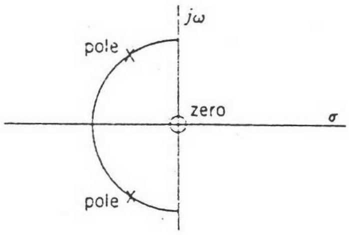
ที่ $\omega_s = \omega_o$: $$\left|\frac{v_e}{v_a}\right| = \left|\frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\alpha s + \omega_o^2}\right| = Q \qquad (2.16)$$

<u>ตัวประกอบคุณภาพ</u> (Quality Factor, Q) [7],[11]

จากรูปที่ 2.16 (ก) ซึ่งค่าแอดมิตแตนซ์จากสมการที่ (2.14) จะมีค่าดังสมการที่ (2.17)

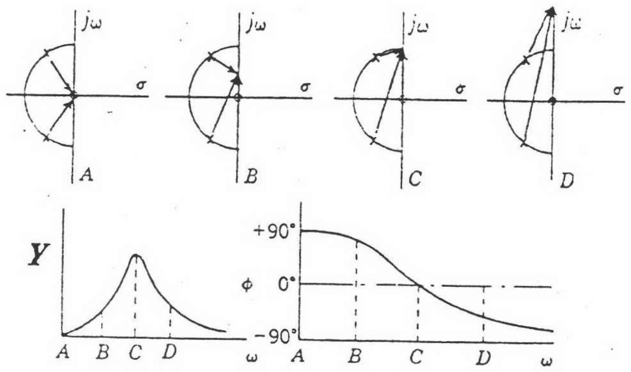
$$Y(s) = \frac{1}{L}.\left[\frac{s}{(s-s_a).(s-s_a^*)}\right] \qquad (2.17)$$

s_a และ s_a^* คือขั้ว (Pole) ของวงจรและศูนย์ (Zero) จะอยู่บนจุดกำเนิดของแกนบนระนาบ S (S-Plane)พอดีดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงขั้วและศูนย์บนระนาบ S (S-Plane)

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าผลการตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.21 แสดงขนาดและเฟสของแอดมิตแตนซ์เมื่อแปรค่าความถี่

ขนาดของแอดมิตแตนซ์มีค่าตามสมการที่ (2.18) และมีค่าสูงสุดที่ความถี่สวิตซ์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ($\omega_s = \omega_o$)

$$Y(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \qquad (2.18)$$

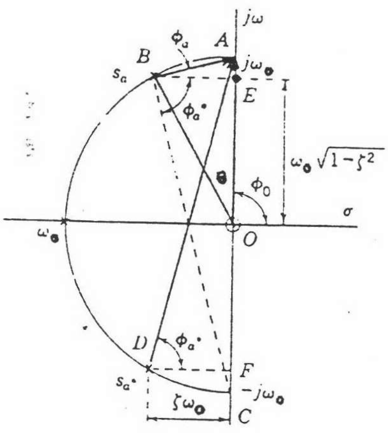
ตัวประกอบคุณภาพของวงจรอนุกรม *RLC* จะมีค่าดังสมการที่ (2.19)

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_o}{\left(R/2L\right)} \qquad (2.19)$$

ในการคำนวณเฟสที่ความถี่ $\omega = \omega_o$ เราอาจพิจารณาจากสามเหลี่ยม *ABC* ซึ่งอยู่บนครึ่งวงกลมดังรูปที่ 2.22 เฟสจะเป็นดังนี้

$$\phi_o - \phi_a - \phi_a^* = +90 - (+90) = 0 \qquad (2.20)$$

แสดงว่าเฟสของ $|Y|$ ที่ เท่ากับ $\omega = \omega_o$ 0 องศา



$$\zeta = \alpha/\omega_o$$

$$Q = 1/2\zeta = 1/2\sin\theta$$

รูปที่ 2.22 แสดงตัวประกอบคุณภาพ *Q* กับอัตราหน่วง ζ

จากสมการที่ (2.19) จะได้ $$Q = \frac{1}{2}.\frac{OA}{EB} = \frac{1}{2}.\frac{OB}{EB} \tag{2.21}$$

เพราะฉะนั้น $$Q = \frac{1}{2\sin\theta} \tag{2.22}$$

จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) จะสรุปได้ว่า [11] ถ้าขั้ว (Pole) อยู่ชิดแกน $j\omega$ ค่า Q จะมีค่าสูงและจะแปรค่ากลับกับความยาว EB ค่า Q จะแปรผันกลับอัตราหน่วง (Damping Ratio) ค่าความถี่ครึ่งกำลังหรือความถี่ 3 dB (Half-Power or 3 dB Frequencies) คือความถี่ที่ให้แอมพลิจูดของกระแสเท่ากับ $\frac{V_o}{\sqrt{2}R}$

เพราะฉะนั้นที่ความถี่ครึ่งกำลัง $$\sqrt{2}R = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \tag{2.23}$$

หรือ $$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = \pm R \tag{2.24}$$

จากสมการที่ (2.24) จะได้ $$\omega^2 \pm \frac{R}{L}.\omega - \frac{1}{\omega C} = 0 \tag{2.25}$$

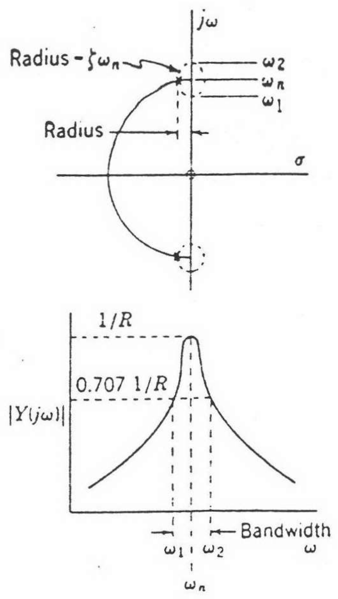
จากสมการที่ (2.25) จะได้ความถี่ครึ่งกำลัง ω_1 และ ω_2 ดังสมการที่ (2.26) คือ

$$\omega_1, \omega_2 = \pm\alpha + \left(\sqrt{\alpha + \omega_o^2}\right) \tag{2.26}$$

จะเห็นได้ว่า $\omega_2 - \omega_1$ คือแถบความถี่ครึ่งกำลัง (Bandwidth,B)

โดยที่ $$B = \omega_2 - \omega_1 = 2\alpha = \frac{\omega_0}{Q} \tag{2.25}$$

จากสมการที่ (2.27) จะเห็นได้ว่าตัวประกอบคุณภาพจะแปรผันกลับกับแถบความถี่ครึ่งกำลังผลตอบเชิงความถี่และความถี่ครึ่งกำลังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.23

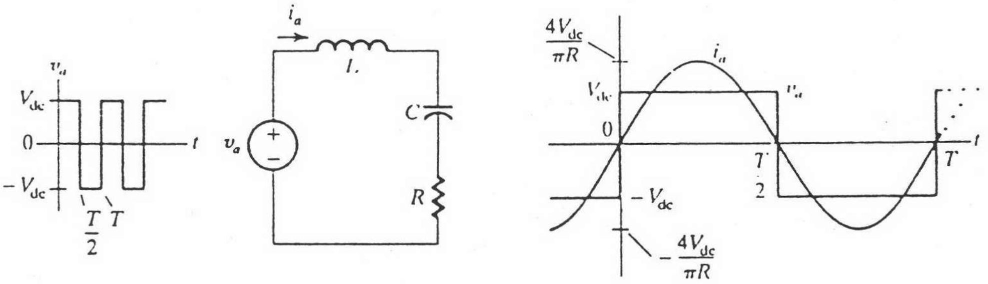


รูปที่ 2.23 แสดงแถบความถี่ครึ่งกำลัง

<u>วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรมที่ใช้แหล่งแรงดัน</u> (The Voltage-Source Resonant Converter)

วงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์อนุกรมใช้แหล่งแรงดันไฟตรงสวิตช์ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

<u>รูปคลื่น</u>



(ก) (ข)

รูปที่ 2.24 (ก) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่กระตุ้นวงจรอนุกรม *RLC*
(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อ $\omega_s = \omega_0$

เมื่อความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ($\omega_s = \omega_0$) กระแสโหลด i_a จะมีรูปคลื่นสัญญาณไซน์ซึ่งค่ารีแอกแตนซ์ของ L และ C จะลบล้างกัน ทำให้ค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับ R ดังนั้นองค์ประกอบหลักมูลของสัญญาณสี่เหลี่ยมซึ่งตกคร่อมโหลด R

จะมีค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบหลักมูลเท่ากับ $V_{a1} = \frac{4V_{dc}}{\pi}$ ถ้า Q ของวงจรมีค่าสูง [7] องค์ประกอบฮาร์มอนิกของ i_a จะมีค่าต่ำและ i_a จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ดังสมการที่ (2.28) และเฟสของกระแสจะตรงกับแรงดัน

$$i_a \approx \frac{1}{R} . \frac{4.V_{dc}}{\pi} . \sin \omega_s t \qquad (2.28)$$

<u>การควบคุมรูปคลื่นด้านออก</u>

ในด้านความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิกนั้น วงจรอนุกรม LC ไม่จำเป็นที่จะต้องทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ ($\omega_s = \omega_o$) ความถี่ในการสวิตช์(ω_s)สามารถที่จะแปรค่าอยู่รอบๆความถี่เรโซแนนซ์ (ω_o) ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมโหลดลดขนาดลงถ้าค่า Q มีค่าสูงเราสามารถเลือกความถี่ในการสวิตช์อยู่ในช่วงแคบๆเพื่อจะควบคุมกำลังที่จะจ่ายให้กับโหลด

ถ้าค่าตัวประกอบคุณภาพ Q มีค่าสูงการแปรค่าความถี่เพียงเล็กน้อยอาจทำให้กำลังด้านออกเปลี่ยนไปมาก ปัญหานี้แก้โดยการลดขนาดของ Q ลงแต่จะส่งผลให้กราฟของค่าแอดมิตแตนซ์กว้างออกซึ่งอาจทำให้ให้รูปคลื่นของแรงดันด้านออกเพี้ยนดังนั้นจะต้องไม่ปรับค่า Q ให้มีค่าเกินไปหรือจำกัดพิสัยความถี่ให้เหมาะสม

<u>การเลือกค่า Q</u>

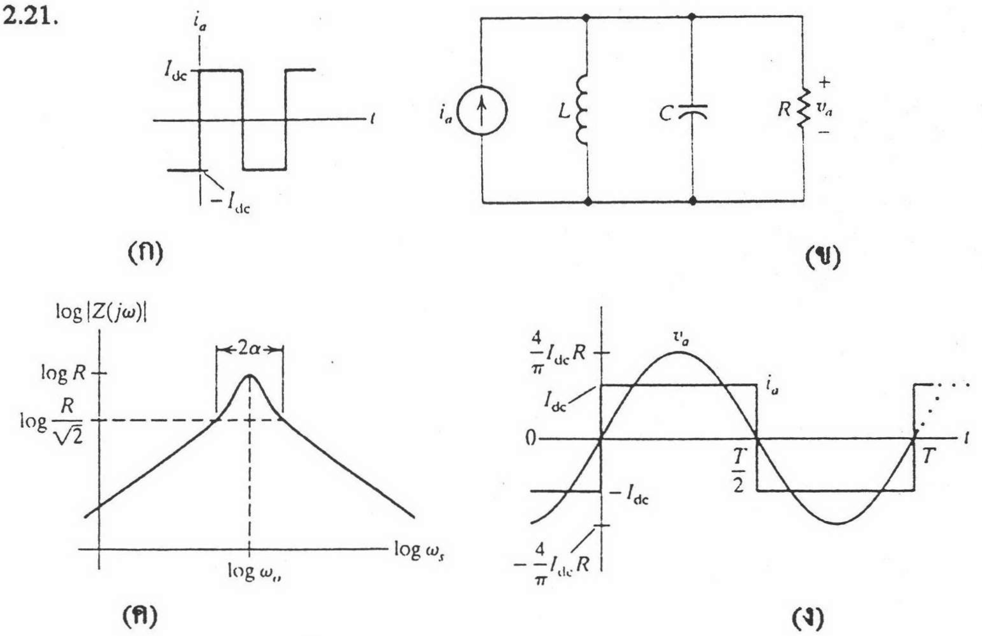
เมื่อต้องการลดขนาดของกระแสฮาร์มอนิกโดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่ 3 หรือลำดับที่สูงกว่าอันเนื่องมาจากแรงดันไฟสลับรูปสี่เหลี่ยมจะต้องเลือกค่าตัวประกอบคุณภาพ Q ที่มีค่าสูงอย่างไรก็ดีถ้า Q มีค่าสูงเกินไปค่าพลังงานสะสมที่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะต้องสูงด้วยดังสมการที่ (2.29)

$$Q = \frac{2\pi . Peak - Storaged - Energy}{Energe - Dissipated - per - Cycle} \qquad (2.29)$$

<u>วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ขนานที่ใช้แหล่งกระแส</u> (The Current Source Parallel resonant converter)

วงจรที่เป็นดูอัล (Dual)[7] ของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์อนุกรมที่ใช้แหล่งแรงดัน ก็คือวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ขนานที่ใช้แหล่งกระแส แหล่งกระแสได้แก่ตัวเหนี่ยวนำ

ขนาดใหญ่ที่ต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งแรงดันดังนั้นถ้าแทนสวิตช์และแหล่งกระแสด้วยรูปคลื่นกระแสไฟสลับด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งส่งไปกระตุ้นวงจร *RLC* ขนานก็จะได้รูปคลื่นดังรูปที่ 2.21.



รูปที่ 2.25 การแปลงผันเรโซแนนซ์ขนาน

(ก) รูปคลื่นกระแสที่เกิดจากการสวิตช์ (ข) วงจร *RLC* ขนาน

(ค) กราฟของค่าอิมพีแดนซ์ (ง) รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดกรณี $\omega_s = \omega_o$

รูปที่ 2.25 (ค) และ (ง) แสดงแอมพลิจูดของอิมพีแดนซ์และแรงดันตกคร่อมโหลดตามลำดับ อิมพีแดนซ์ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับค่าแอดมิตแตนซ์ในรูปที่ 2.19 (ข) จากรูปที่ 2.25 (ข) สามารถคำนวณอิมพิแดนซ์ของวงจรได้ดังสมการที่ (2.30)

$$Z(s) = R.\left[\frac{\frac{1}{Q}.\frac{s}{\omega_o}}{\frac{s^2}{\omega_o^2}+\frac{1}{Q}.\frac{s}{\omega_o}+1}\right] \qquad (2.29)$$

โดยที่ $Q = \omega_o CR$ สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ขนานแรงดันตกคร่อมโหลดจะเป็นผลคูณของกระแสหลักมูลและค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อสวิตช์ถูกขับนำที่ความถี่เรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าเป็น R เพียงอย่างเดียวและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สูงกว่าจะถูกกำจัดทำให้แรงดันตกคร่อมโหลด v_a มีค่าใกล้เคียงสัญญาณไซน์และเฟสจะตรงกันกับกระแสดังรูปที่ 2.7 (ง) การควบคุมกำลังด้านออกของวงจรเรโซแนนซ์ขนานโดยแปรค่าความถี่สวิตช์รอบๆ ω_o กรณี $\omega_s > \omega_o$ วงจร *RLC* ขนานจะเทียบเคียงได้กับวงจร *RC* และแรงดันที่

ตกคร่อมโหลดจะมีขนาดลดลงจากที่กระตุ้นวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์ $(\omega_s = \omega_0)$ และจะมีเฟสที่ล้าหลังกระแส สำหรับในกรณีที่ $\omega_s < \omega_0$ วงจรจะเทียบเคียงได้กับวงจร *RL* และจะทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดจะมีเฟสนำหน้ากระแส i_a

i17023750