

การศึกษาและการออกแบบระบบแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบแอดดิชีเร โซลูชันซ์

นายจตุรงค์ สายพงษ์พรรรณ

นายจักรกฤษณ์ แก่นทิพย์

ปริญญาในพนธน์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2561

Investigation and Design of LLC Resonant DC-DC Converter

Mr. Jaturong Saipongpan

Mr. Jakkrid Kanthip

A PROJECT REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK
ACADEMIC YEAR 2018

ปริญญาอินพนธ์เรื่อง : การศึกษาและการออกแบบแบบวางจำลองผันไฟตรง-ไฟตรงแบบแอลแอลซีริโอชเนนซ์

ชื่อ : นายจตุรงค์ สายพงษ์พรรรณ
นายจักรกฤษณ์ แก่นทิพย์

สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา : วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะ : วิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลิวานกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดล วิวัฒน์ไก่เศศ

ปีการศึกษา : 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ พระนครเหนือ อนุมัติให้ปริญญาอินพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


.....

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
และคอมพิวเตอร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดล วิวัฒน์ไก่เศศ)


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลิวานกุล)

ประธานกรรมการ


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภดล วิวัฒน์ไก่เศศ)

กรรมการ


.....
(รองศาสตราจารย์ ไชยันต์ สุวรรณชีวะศิริ)

กรรมการ

ถิ่นที่ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ พระนครเหนือ

Project : Investigation and Design of LLC Resonant DC-DC Conveter
Name : Mr. Jaturong Saipongpan
Mr. Jakkrid Kanthip
Major Field : Electrical Engineering
Department : Electrical and Computer Engineering
Faculty : Engineering
Project Advisor(s) : Assoc. Prof. Dr. Pisit Liutanakul
Project Co-Advisor(s) : Asst. Prof. Dr. Nophadon Wiwatcharagoses
Academic Year : 2018

Accepted by the Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Bachelor of Electrical Engineering.

..... Chairperson of Department of Electrical
(Asst. Prof. Dr. Nophadon Wiwatcharagoses) and Computer Engineering

..... Chairperson
(Assoc. Prof. Dr. Pisit Liutanakul)

..... Member
(Asst. Prof. Dr. Nophadon Wiwatcharagoses)

..... Member
(Assoc. Prof. Chaiyan Suwancheewasiri)

Copyright of the Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

บทคัดย่อ

ปัจจุบันตลาดของเพาเวอร์ซัพพลายมีการแข่งขันในหลาย ๆ องค์ประกอบ อาทิเช่น ประสิทธิภาพ ความหนาแน่นกำลัง ความน่าเชื่อถือ ขนาด อายุการใช้งานและราคาทำให้เกิดการแข่งขันที่สูงของผู้ผลิตซึ่งการสร้างเพาเวอร์ซัพพลายที่ครบองค์ประกอบดังที่กล่าวไปเป็นเรื่องที่ยากสำหรับเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในปัจจุบันล้วนใช้เพาเวอร์ซัพพลายเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ดังนั้นธุรกิจเพาเวอร์ซัพพลายจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและเติบโตมากในงานอุตสาหกรรมในอีกหลาย ๆ ปีข้างหน้า แน่นอน ด้วยเหตุผลนี้ทำให้เกิดการคิดค้นโครงสร้างง่าย (Topology) ใหม่ ๆ มากมาย หนึ่งในนั้นคือ คือวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแออลซีซี ได้รับความนิยมมาก เพราะมีข้อดีหลาย ๆ ประการ โดยปริญญาโนนันฟันธ์นี้ได้อธิบายรายละเอียดในการออกแบบวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแออลซีซี ด้วยหลักของการประมาณหาร์มอนิกอันดับหนึ่ง (First Harmonic Approximation) และทำการหาค่าparametric ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างวงจรชาาร์ดแวร์รวมถึงการหาฟังก์ชันอัตรายอย่างดัน (Voltage-gain function) นำผลที่ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นแสดงผลทดลองจากวงจรชาาร์ดแวร์ที่ถูกสร้างขึ้นในเรื่องของประสิทธิภาพ การรักษาระดับแรงดันขณะทำงานในโหมดควบคุมแบบวงบีด สุดท้ายนี้เป็นการสรุปผลการทดลอง ปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่จะทำในอนาคตข้างหน้า

Abstract

Nowadays, small size, light weight, high power density [w/m³] and high efficiency are the trends and the important factors of Switch Mode Power Supply (SMPS) development, that can be achieved by increasing switching frequency of power switches in the converter. Unfortunately, switching power losses is however depended on the switching frequency when the hard switching methodology is used. This is because of the crossing signals of current and voltage at the power switches. Consequently, the invention of resonant power converters is proposed in recently twenty years. In this report, for overcoming the above obstacle, the well know LLC resonant topology of DC-DC converter is investigated and designed. For getting some of converter's transfer functions, the first harmonic approximation method is applied. However, in this project, without any using of transfer functions, the converter's output voltage is regulated by varying of switching frequency. The standard Matlab/Simulink program is used for verifying the studies. The 200 watts of prototype is constructed and realized. The experimental results show that the proposed method can regulate well the converter's output voltage. This can be confirmed by less than 2 seconds of output voltage recovery time when there are the sudden changes of step load from 13% to 100% and from 100% to 13%.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาอันพิเศษบันนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลิวานกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นกคล วิวัชร โภเศษ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ท่านทั้งสองได้ให้ห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยพลังงานสีเขียว (Greenergy Research Group) ในการทำปริญญานิพนธ์และได้ให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมาไม่ว่าจะเป็นทางด้านเทคนิค ทฤษฎี และแนวคิด ตลอดจนวิธีการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้ปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอกราบขอบพระคุณพ่อแม่ และบุคคลในครอบครัวที่ได้ให้คำปรึกษาต่าง ๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ขอกราบขอบพระคุณ นายประเสริฐ ดาวโลย เจ้าหน้าที่ประจำห้องแล็บภาควิชาริลีกTHON ที่ร่วมกันทำงาน ให้มีอุปกรณ์ใช้ในการทดลอง ให้คำปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณบริษัท เดลต้า อิเลคทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้อุปกรณ์และสนับสนุนการศึกษาสำหรับการทำปริญญานิพนธ์ สุดท้ายนี้ ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ทำให้ผู้ศึกษาได้ค้นคว้าหาข้อมูล เรียนรู้เทคโนโลยีที่ไม่มีสอนในห้องเรียน เรียนรู้การทำงานกับเพื่อนร่วมงาน แบ่งหน้าที่ในการทำงาน และความรับผิดชอบในส่วนที่ตนเองได้รับมอบหมายทำให้งานนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ในที่สุด

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการทำปริญญานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

จตุรงค์ สายพงษ์พรผล

จักรกฤษณ์ แก่นทิพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๑
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๒
กิตติกรรมประกาศ	๓
สารบัญตาราง	๔
สารบัญภาพ	๕
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	๖
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 แนวเหตุผลทฤษฎีสำคัญหรือสมมติฐาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency)	3
2.2 เทคนิคการซอฟต์สวิตช์ (Soft switching techniques)	7
2.3 พื้นฐานของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ (Basic types of resonant converter)	8
2.4 วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี (LLC Resonant DC-DC Converter)	13
2.5 การออกแบบวงจรสด้วยหลักของการประมาณหารมอนิกอันดับหนึ่ง (First Harmonic Approximation)	18
2.6 กฎเกณฑ์การซอฟต์สวิตช์ (Soft-Switching Criteria)	20
2.7 การวัดกระแส (current sensing)	22
บทที่ 3. การออกแบบและการจำลอง	25
3.1 การออกแบบวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี	25
3.2 จำลองวงจรสมมูลด้วยโปรแกรม MATLAB	35
3.3 การออกแบบการควบคุมแบบวงปิดด้วยการปรับความถี่การสวิตช์	37
3.4 การเลือกอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4. ผลการทดสอบ	40
4.1 การทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงเปิด (Open loop control)	40
4.2 การทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิดด้วยการปรับความถี่สวิตช์ (Closed-loop control)	42
4.3 การทดสอบการสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS)	46
บทที่ 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผล	48
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก ก วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี วงจรขั้บเกต วงจรวัดกระแส และวงจรวัดแรงดัน	51
ภาคผนวก ข การคำนวณกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี	53
ภาคผนวก ค การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	57
ประวัติผู้แต่ง	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 เปรียบเทียบการวัดกระระยะทั้ง 3 วิธี	24
3-1 แสดงค่าสุดท้ายของการออกแบบโครงข่ายเรโซแนนซ์	33
4-1 แรงดันเอาต์พุตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดและทำงานใกล้ความถี่เรโซแนนซ์	41
4-2 การควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตโดยการปรับเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์	42
ค-1 การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 วงจรเรโซนเนนซ์อนุกรมแอลซี (SRC) และแผนภาพเฟสเซอร์	3
2-2 ค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงความถี่ต่าง ๆ	4
2-3 วงจรเรโซนเนนซ์ขนานแอลซี (PRC) และแผนภาพเฟสเซอร์	5
2-4 ค่าซัลเชปแตนซ์ในช่วงความถี่ต่าง ๆ	6
2-5 รูปแบบการซอฟต์สวิตช์และอาร์ดสวิตช์	7
2-6 การสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ (ZVS) และการสวิตช์ที่กระแสศูนย์ (ZCS)	8
2-7 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซนเนนซ์อนุกรมแบบชาร์ฟบริดจ์	9
2-8 คุณลักษณะอัตราขยายของ SRC	9
2-9 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซนเนนซ์ขนานแบบชาร์ฟบริดจ์	10
2-10 คุณลักษณะอัตราขยายของ PRC	11
2-11 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซนเนนซ์อนุกรม-ขนานแบบชาร์ฟบริดจ์	12
2-12 คุณลักษณะอัตราขยายของวงจรเรโซนเนนซ์อนุกรมขนาน (SPRC)	12
2-13 แทงค์เรโซนเนนซ์ของ LCC และ LLC	13
2-14 คุณลักษณะอัตราขยายของ LCC	14
2-15 คุณลักษณะอัตราขยายของ LLC	14
2-16 วงจรแปลงผันเรโซนเนนซ์แอลแอลซีแบบชาร์ฟบริดจ์	15
2-17 พื้นที่ซอฟต์สวิตช์ของแทงค์เรโซนเนนซ์แบบ LLC	17
2-18 การประมาณวงจรแปลงผันเรโซนเนนซ์แอลแอลซีแบบชาร์ฟบริดจ์โดยใช้ FHA	18
2-19 พื้นที่อินดักทีฟในอัตราขยายแรงดันและค่าอิมพีเดนซ์	21
2-20 High-side Current sensing และ Low-side current sensing	22
2-21 หลักการวัดด้วยหม้อแปลงกระแส	23
2-22 ไพรบวัดกระแส (Current Probe)	24
3-1 การสร้างแบบจำลองด้วยการประมาณชาร์มอนิกอันดับหนึ่ง	25
3-2 ผังงาน (Flowchart) ขั้นตอนการออกแบบโดยใช้เทคนิคการประมาณชาร์มอนิกอันดับหนึ่ง	27
3-3 แสดงกราฟอัตราขยายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง Q และการเปลี่ยนแปลง m	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตในช่วงที่สามารถรักษาระดับแรงดันอินพุตได้โดยตัวแปร Q° หรือโหลดคงที่	30
3-5 ผังงานในการเขียนโค้ด	31
3-6 แสดงค่ายอดอัตราขยายกับอัตราขยายสูงสุด	31
3-7 ทิศทางการไหลของกระแสในโครงข่ายเรโซแนนซ์และหม้อแปลง	34
3-8 อัตราขยายแรงดันที่โหลดเต็มพิกัด	35
3-9 อัตราขยายแรงดันที่โหลดค่าต่าง ๆ	36
3-10 ผังงานหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	37
4-1 กราฟแสดงประสิทธิภาพเทียบกับการเปลี่ยนแปลงโหลด	40
4-2 ผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแรงดันจุดที่กำหนด	44
4-3 ผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลด	45
4-4 การป้องกันเมื่อเกิดโหลดเกิน	46
4-5 แรงดัน (V_{DS}) ของเพาเวอร์มอสเฟตและกระแส (I_D) ของเพาเวอร์มอสเฟต	47
4-6 แรงดัน (V_{GS}) ของเพาเวอร์มอสเฟต M_1 (สีเขียว) แรงดัน (V_{GS}) ของเพาเวอร์มอสเฟต M_2 (สีชมพู) และแรงดัน (V_{DS}) ของเพาเวอร์มอสเฟต M_2 (สีเหลือง)	47

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบาย

V_{in}	แรงดันอินพุต
V_{in}^{max}	แรงดันอินพุตสูงสุด
V_{in}^{min}	แรงดันอินพุตต่ำสุด
V_o	แรงดันเอาต์พุต
I_o	กระแสเอาต์พุต
P_{in}	กำลังไฟฟ้าอินพุต
P_o	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต
M	อัตราขยายแรงดัน
M^{max}	อัตราขยายแรงดันสูงสุด
M^{min}	อัตราขยายแรงดันต่ำสุด
$M_{@fo}$	อัตราขยายแรงดันที่ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์
M^V	พิงก์ชันอัตราขยายแรงดันที่ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์
E_{ff}	ประสิทธิภาพ
T_{HU}	เวลาการหดชะงัก
C_{DL}	ตัวเก็บประจุลิงค์ไฟตรงของเอาต์พุต PFC
n	อัตราส่วนรับ
N_p	จำนวนรอบผึ้งปฐมภูมิ
N_p^{min}	จำนวนรอบผึ้งปฐมภูมิต่ำสุด
N_s	จำนวนรอบผึ้งทุติยภูมิ
R_{load}	ค่าความต้านทานโหลด
R_{ac}	ค่าความต้านทานโหลดสมมูล
V_F	แรงดันต่อกรร่อง ไอโอดีนะ ไบอัลตรاجี
L_r	ค่าตัวหนี่ยวนำเรโซแนนซ์อนุกรม
C_s	ค่าตัวหนี่ยวนำเรโซแนนซ์
L_{lkp}	ค่าตัวหนี่ยวนำร้าวไฟล์ผึ้งปฐมภูมิ
L_{lks}	ค่าตัวหนี่ยวนำร้าวไฟล์ผึ้งทุติยภูมิ
L_m	ค่าตัวหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และคำย่อ	คำอธิบาย
L_p	ค่าตัวเหนี่ยวนำเรโซไซแนนซ์บนนา
m	อัตราส่วนค่าเหนี่ยวนำ
Q_e	ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)
f_{sw}	ความถี่การสวิตช์
f_s^{\min}	ความถี่การสวิตช์ต่ำสุด
f_o	ความถี่เรโซไซแนนซ์
ΔB	การเบี่ยงเบนความหนาแน่นของฟลักซ์
A_e	ส่วนของพื้นที่แม่เหล็กประสีทิชผล
I_{Cr}	กระแสที่ไฟลผ่านตัวเก็บประจุเรโซไซแนนซ์
I_{Lm}	กระแสที่ไฟลผ่านตัวเหนี่ยวน้ำทำแม่เหล็ก
I_{TR}	กระแสที่ไฟลผ่านหม้อแปลงฟิลเตอร์
V_D	แรงดันตกคร่อมไคโอดฟั่งทุติยกมิ
I_D	กระแสที่ไฟลผ่านไอโอดฟั่งทุติยกมิ
I_{CO}	กระแสที่ไฟลผ่านตัวเก็บประจุอาทิตพุต
$R_{ds(on)}$	ตัวต้านทานเมื่อเพาวอร์มอสเฟตนำกระแส
V_{oe}^F	แรงดันอาทิตพุตแทงค์เรโซไซแนนซ์ของวงจรสมมูลโดยใช้ FHA
V_{ge}^F	แรงดันอินพุตแทงค์เรโซไซแนนซ์ของวงจรสมมูลโดยใช้ FHA
ω_o	ความถี่เชิงบูรณาการที่ดำเนินการความถี่เรโซไซแนนซ์
C_{oss}	ตัวเก็บประจุแฟรงก์ไนเพาวอร์มอสเฟตฟังอาทิตพุต
V_{ds}	แรงดันขาเดรนเทียบกับขาซอร์สของเพาวอร์มอสเฟต

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผลทฤษฎีสำคัญหรือสมมติฐาน

ปัจจุบันตลาดของเพาเวอร์ซัพพลาย (Switching Mode Power Supply : SMPS) มีการแปร่ขึ้นในหลาย ๆ องค์ประกอบอาทิเช่น ประสิทธิภาพ ความหนาแน่นกำลัง ความน่าเชื่อถือ ขนาด อายุการใช้งานและราคาทำให้เกิดการแปร่ขึ้นที่สูงของผู้ผลิตซึ่งการสร้างเพาเวอร์ซัพพลายที่ครบองค์ประกอบดังที่กล่าวไว้ข้างต้นเป็นเรื่องที่ท้าทาย สำหรับเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในปัจจุบันต่างต้องการเพาเวอร์ซัพพลายเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ดังนั้นเพาเวอร์ซัพพลายจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและเติบโตมากในงานอุตสาหกรรม โดยวงจรพื้นฐานสำหรับการปรับความกว้างของพัลส์ (pulse-width modulation) ที่ถูกใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการเพิ่มแรงดันหรือลดแรงดัน เช่น วงจรแปลงผันบัก วงจรแปลงผันบูส วงจรแปลงผันฟลายแบค [1], [2] เป็นต้นแต่ทว่าวงจรประเภทนี้ยังมีข้อจำกัดหรือข้อเสียอยู่คือการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสารกึ่งตัวนำในการสวิตช์ส่งผลให้เกิดการกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ (Power loss) ที่ค่อนข้างสูง โดยกำลังสูญเสียมีด้วยกันสองแบบคือกำลังสูญเสียจากการนำกระแส (Conduction loss) และกำลังสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching loss) ก่อให้เกิดการสูญเสียจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ เป็นเหตุผลที่ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรลดลง (กรณีไม่รวมความสูญเสียจากการนำกระแส) โดยปริญานินพนธ์ได้นำเสนอวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ (Resonant converter) [3] ซึ่งได้เลือกใช้วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น วงจร มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงการเปลี่ยนแปลงโหลดที่กว้าง วงจร มีขนาดเล็กและวงจรสามารถแก้ปัญหากำลังสูญเสียจากการสวิตช์ได้โดยกระทำการสวิตช์แบบแรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switching : ZVS) หรือที่เรียกว่าซอฟต์สวิตช์ (Soft switching) นอกจากนี้ยังสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของโหลดและแรงดันอินพุตที่กว้าง

ปริญานินพนธ์เล่นนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและการทำงานของวงจรแปลงผันผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีรวมถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรด้วยหลักของการประมาณหาร์มอนิกอันดับหนึ่ง (First Harmonic Approximation) จากนั้นทำการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรและทำการป้องกันการเกิดกระแสเกิน (Overload current) ของกระแสฟั่งปัจจุบันด้วยตัวควบคุม (Controller)

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพัฒนาระบบและหลักการทำงานของวงจรแปลงผันเรโซซแนนซ์แบบแอลเอลซี
- 1.2.2 วิเคราะห์และออกแบบวงจรตามจุดประสงค์ที่ต้องการ

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

- 1.3.1 การจำลองการทำงานทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม MATLAB
- 1.3.2 การสร้างวงจรด้านแบบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริงกับผลการทดลองด้วยแบบจำลองเพื่อศึกษาพัฒนาระบบของวงจร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ความรู้การวิเคราะห์วงจรและการออกแบบวงจร
- 1.4.2 เข้าใจหลักการและสามารถใช้เครื่องมือวัดต่าง ๆ หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ได้มากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับ

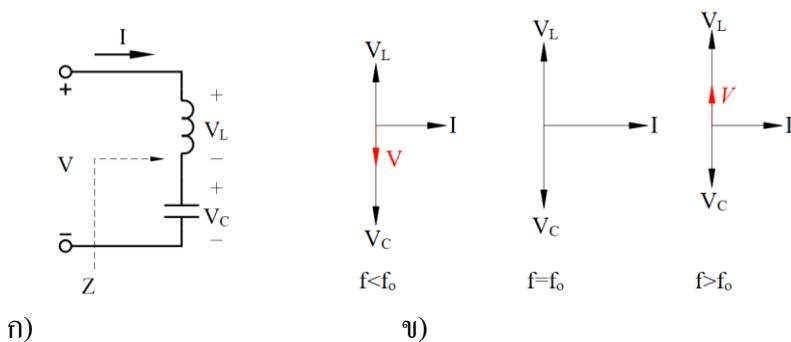
2.1 ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency)

เรโซแนนซ์เกิดขึ้น เพราะ พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในรูปของสนามไฟฟ้าโดยตัวเก็บประจุ และ พลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ พลังงานสามารถส่งจากตัวหนึ่งไปยังอีกด้วยนิ่งภายในวงจร และ สิ่งนี้คือการแกว่ง (Oscillatory)

ความถี่เรโซแนนซ์ถูกนิยามว่า เป็นความถี่ที่ซึ่งค่าอิมพีเดนซ์ (Impedance) ของวงจร มีค่าต่ำสุด หรือ มีความสามารถดักจูนนิยาม ได้เป็นความถี่ที่ซึ่งค่าอิมพีเดนซ์ เป็นเพียงค่าความต้าน (Purely resistive) เนื่องจากค่าอิมพีเดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ มีค่าเท่ากันแต่มี เครื่องหมายตรงกันข้ามทำให้เกิดการหักล้างกัน

วงจรเรโซแนนซ์ เป็นวงจรที่นำตัวเก็บประจุ และ ตัวเหนี่ยวนำมาต่อใช้งานร่วมกัน โดยพื้นฐาน สามารถต่อได้สองแบบคือแบบอนุกรมและแบบขนาน

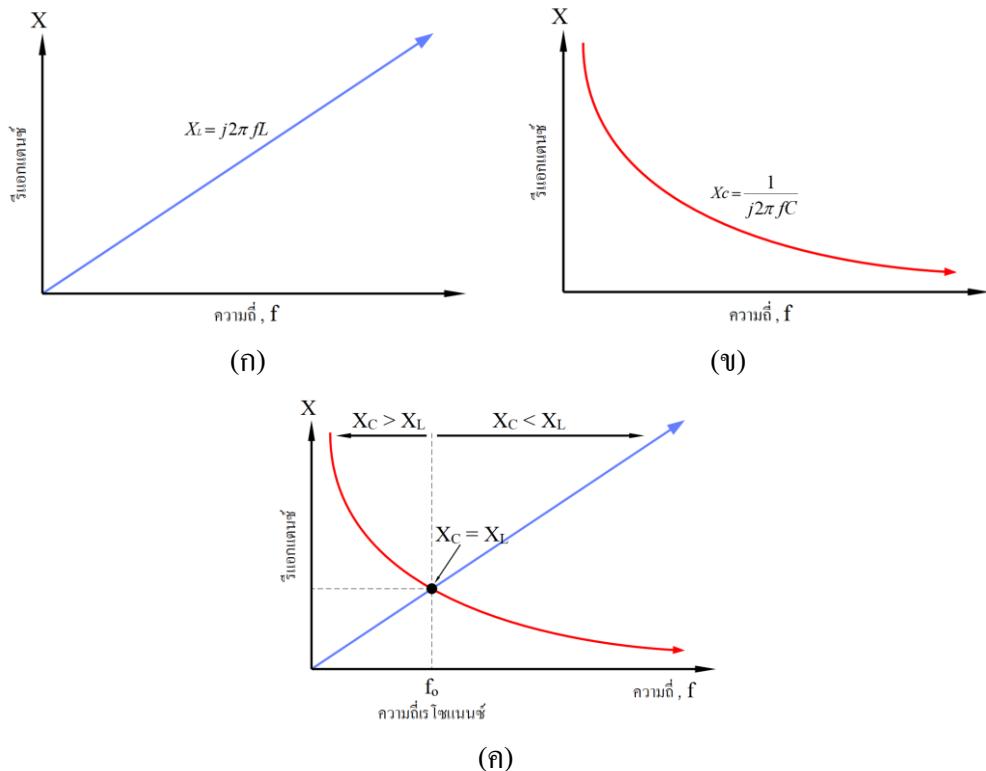
2.1.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมแอลซี (SRC)



ภาพที่ 2-1 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมแอลซี (SRC) และแผนภาพเฟสเซอร์

จากภาพที่ 2-1 ก) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์รีแอคทีฟ (Reactive) สองตัว ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ (L) และ ตัวเก็บประจุ (C) ทำการต่อร่วมกันแบบอนุกรม ในการวิเคราะห์วงจรจะใช้ แผนภาพเฟสเซอร์มาอธิบายประกอบ จากภาพที่ 2-1 ข) แสดงค่าแรงดันที่ตอกคร่อมและกระแสที่ ไหลภายในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมแอลซี โดยแรงดันที่ตอกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_C) ลักษณะแสดง

(I) 90 องศาและแรงดันที่ตอกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (V_L) นำหน้ากระแส (I) 90 องศา ทำให้ V_C ต่างเฟส กับ V_L 180 องศา ที่ความถี่ใด ๆ ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุและค่าแรงดันของตัวเหนี่ยวนำจึงเป็นผลต่างกันเสมอ



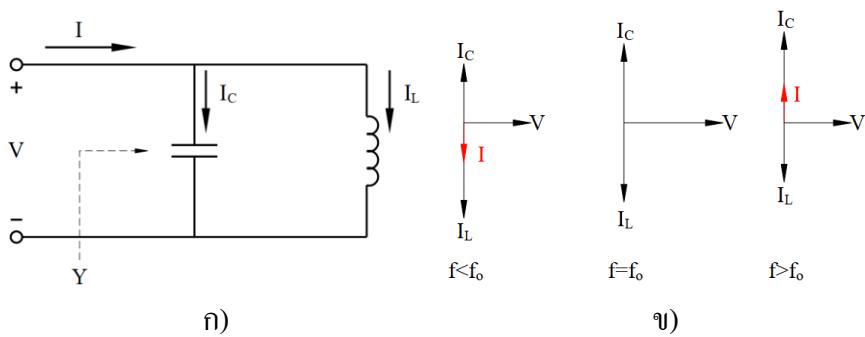
ภาพที่ 2-2 ค่ารีซิสแตนซ์ในช่วงความถี่ต่างๆ ก) ค่ารีซิสแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ข) ค่ารีซิสแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ค) แสดงจุดที่รีซิสแตนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากันที่ความถี่เรโซแนนซ์

ค่ารีซิสแตนซ์ (Reactance) ในแต่ละช่วงความถี่ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุถูกแสดงดังภาพที่ 2-2 ก) และ 2-2 ข) ตามลำดับ เมื่อนำภาพทั้งสองมาซ้อนทับกันจะได้จุดตัดของค่าทั้งสอง โดยจุดนี้เรียกว่าจุดความถี่เรโซแนนซ์ เป็นจุดที่ค่ารีซิสแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (X_L) และค่ารีซิสแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (X_C) มีขนาดเท่ากันหรือคล้ายกันนั่นเอง คือ $V_L = V_C$ แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกันทำให้ค่าทั้งสองหักล้างกันเป็นศูนย์ที่ความถี่เรโซแนนซ์แสดงดังภาพที่ 2-2 ค)

บริเวณความถี่ของแหล่งจ่ายต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ($f < f_0$) X_C มีค่ามากกว่า X_L ส่งผลทำให้ V_C มากกว่า V_L ดังนั้นผลรวมของแรงดัน V ทางเฟสเซอร์จะเป็นเฟสเดียวกับเฟสของ V_C และกระแสที่ไหลในวงจรจะก่อให้เกิดการลดลงของตัวเก็บประจุ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจากเดิม X_C จะเริ่มลดลงในขณะที่ X_L เริ่มเพิ่มขึ้น ในช่วงนี้กระแสที่ไหลผ่านวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้น หากความถี่

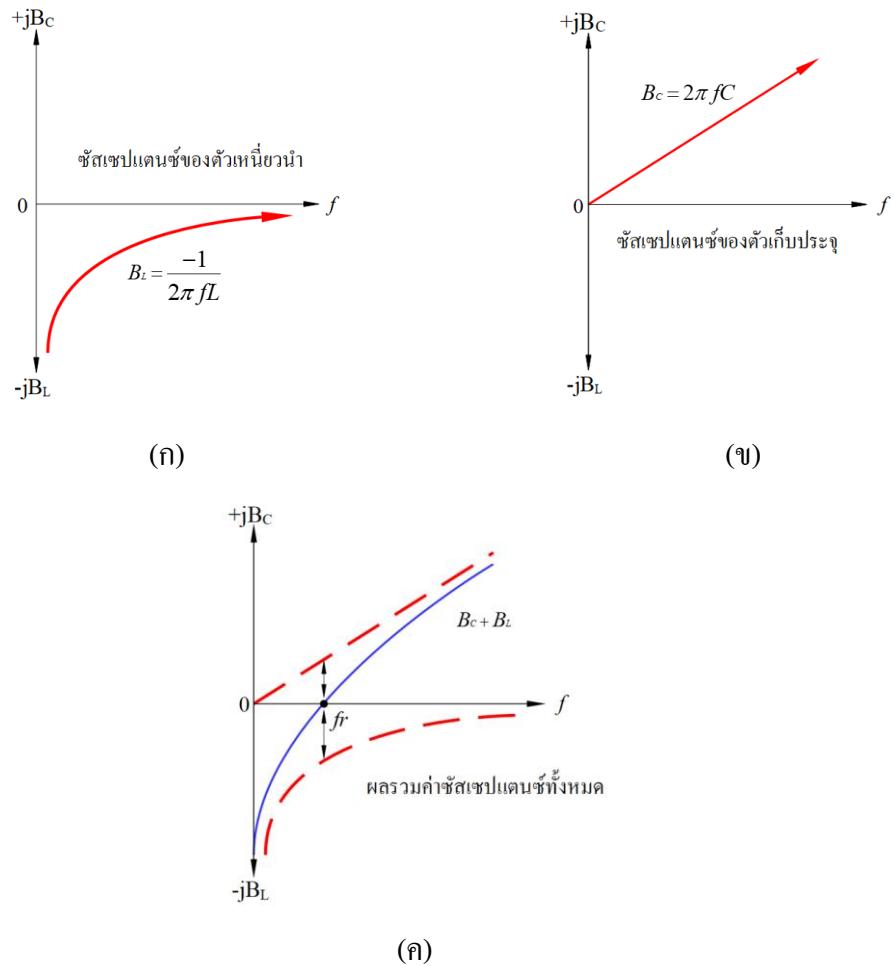
ของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ($f = f_o$) ทำให้ $X_L = X_C$ ส่งผลให้ $V_L = V_C$ ผลรวมของแรงดัน V ทางเฟสเซอร์เป็นศูนย์ ($V = V_L - V_C = 0$) ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านวงจรเรโซแนนซ์จะเป็นอนันต์ที่ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์ (ในทางปฏิบัติไม่เป็นอนันต์เนื่องจากมีค่าความต้านทาน) เมื่อเพิ่มความถี่ของแหล่งจ่ายมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ($f > f_o$) ทำให้ X_L มากกว่า X_C ส่งผลให้ $V_L > V_C$ ผลรวมของแรงดัน V ทางเฟสเซอร์จะเป็นเฟสเดียวกับเฟสของ V_L และกระแสที่ไหลในวงจรจะถูกกำหนดด้วยริエอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ

2.1.2 วงจรเรโซแนนซ์ขานานแอลซี (PRC)



ภาพที่ 2-3 วงจรเรโซแนนซ์ขานานแอลซี (PRC) และแผนภูมิเฟสเซอร์

จากภาพที่ 2-3 ก) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ริエอกที่ฟส่องตัวได้แก่ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ทำการต่อร่วมกันแบบขานาน ในการวิเคราะห์วงจรจะใช้แผนภูมิเฟสเซอร์มาอธิบายประกอบ จากภาพที่ 2-3 ข) แสดงค่าแรงดันที่ตอกคร่อมและกระแสที่ไหลภายในวงจรเรโซแนนซ์ขานานแอลซี โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) ล้าหลังแรงดัน (V) อยู่ 90 องศาและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (I_C) นำหน้าแรงดัน (V) 90 องศา ทำให้ I_C ต่างเฟสกับ I_L 180 องศา ที่ความถี่ใด ๆ ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจึงเป็นผลต่างกันเสมอ



ภาพที่ 2-4 ค่าซัพเพนเดนซ์ในช่วงความถี่ต่าง ๆ ก) ค่าซัพเพนเดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ข) ค่าซัพเพนเดนซ์ของตัวเก็บประจุ ค) จุดที่ค่าซัพเพนเดนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากันที่ความถี่เรโซแนนซ์

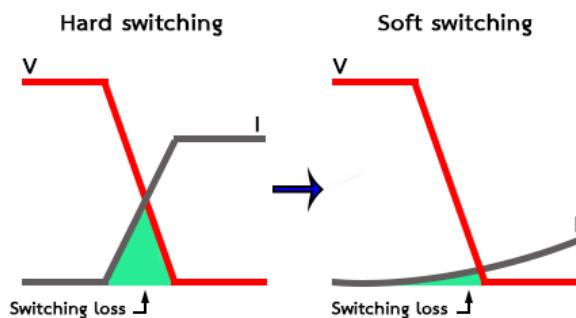
ค่าซัพเพนเดนซ์ (Susceptance) ในแต่ละช่วงความถี่ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ถูกแสดงดังภาพที่ 2-4 ก) และ 2-4 ข) ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าจะมีจุดหนึ่งที่ค่าซัพเพนเดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (B_L) และค่าซัพเพนเดนซ์ของตัวเก็บประจุ (B_C) มีขนาดเท่ากันหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ $I_C = I_L$ แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกันทำให้ค่าทั้งสองหักล้างกันเป็นศูนย์โดยจุดนี้เรียกว่า จุดความถี่เรโซแนนซ์แสดงดังภาพที่ 2-4 ค)

บริเวณความถี่แหล่งจ่ายต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ($f < f_0$) B_L มีค่ามากกว่า B_C ส่งผลให้ I_L มากกว่า I_C ดังนั้นผลรวมของกระแส I ทางเฟสเซอร์จะเป็นเฟสเดียวกับเฟสของ I_L และแรงดันที่ต่อคร่อมในวงจรจะถูกกำหนดด้วยซัพเพนเดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ เมื่อความถี่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น B_L จะเริ่มลดลงในขณะที่ B_C เริ่มเพิ่มขึ้น ในช่วงนี้แรงดันที่ต่อคร่อมวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้น หากความถี่ของ

แหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับความถี่เรโซนแนนซ์ ($f = f_o$) ทำให้ $B_L = B_C$ ส่งผลให้ $I_L = I_C$ ผลรวมของกระแส I ทางเฟสเซอร์เป็นศูนย์ ($I = I_L - I_C = 0$) ดังนั้นแรงดันที่ต่อกครองวงจรเรโซนแนนซ์จะเป็นอนันต์ที่ตำแหน่งความถี่เรโซนแนนซ์ (ในทางปฏิบัติไม่เป็นอนันต์แต่มีขนาดเท่ากับแหล่งจ่าย) เมื่อเพิ่มความถี่แหล่งจ่ายมากกว่าความถี่เรโซนแนนซ์ ($f > f_o$) ทำให้ B_C มากกว่า B_L ส่งผลให้ $I_C > I_L$ ผลรวมของกระแส I ทางเฟสเซอร์จะเป็นเฟสเดียวกับเฟสของ I_C และแรงดันที่ต่อกครองในวงจรจะถูกกำหนดด้วยซัพเพนซ์ของตัวเก็บประจุ

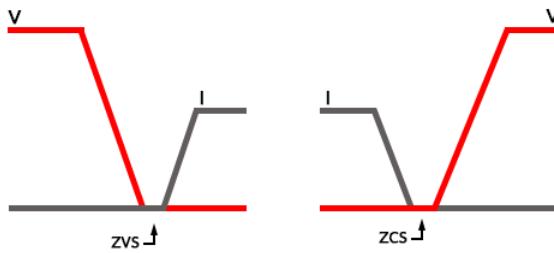
2.2 เทคนิคการซอฟต์สวิตช์ (Soft switching techniques)

การสวิตช์ซิงที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อาทิเช่น เพาเวอร์มอเตอร์และไอจีบีที เป็นต้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือซอฟต์สวิตช์ (Soft switching) และฮาร์ดสวิตช์ (Hard switching) โดยฮาร์ดสวิตช์คือการสวิตช์ที่ส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียในการเปลี่ยนแปลง (Transition) เนื่องจากกระแสและแรงดันช่วงการเปลี่ยนแปลงมีค่าไม่เป็นศูนย์ ทำให้จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง ตรงข้ามกับซอฟต์สวิตช์ที่ส่งผลให้กระแสและแรงดันช่วงการเปลี่ยนแปลงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ทำให้จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 รูปแบบการซอฟต์สวิตช์และฮาร์ดสวิตช์

การซอฟต์สวิตช์ในที่นี้แบ่งเป็นสองกรณีคือ การสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switching : ZVS) เป็นการสวิตช์ในช่วงการเปลี่ยนแปลง โดยแรงดันลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีกระแสไหล หรือทำการปิดสวิตช์ (Turn-on) และการสวิตช์ที่กระแสศูนย์ (Zero Current Switching : ZCS) เป็นการสวิตช์ในช่วงการเปลี่ยนแปลง โดยกระแสลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีแรงดันต่อกครองหรือทำการเปิดสวิตช์ (Turn-off) และคงได้ดังภาพที่ 2-6 ซึ่งการซอฟต์สวิตช์ที่เกิดขึ้นในวงจรไม่ได้เกิดขึ้นกับทั้งหมดของโครงสร้างวงจร ในบริเวณนี้จะเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผ่านเรโซนแนนซ์ที่มีข้อดีหลายประการและได้รับความนิยมเนื่องจากบรรลุการสวิตช์แบบ ZVS, ZCS หรือทั้งสองกรณี



ภาพที่ 2-6 การสวิตช์ที่แรงดันศูนย์ (ZVS) และการสวิตช์ที่กระแสศูนย์ (ZCS)

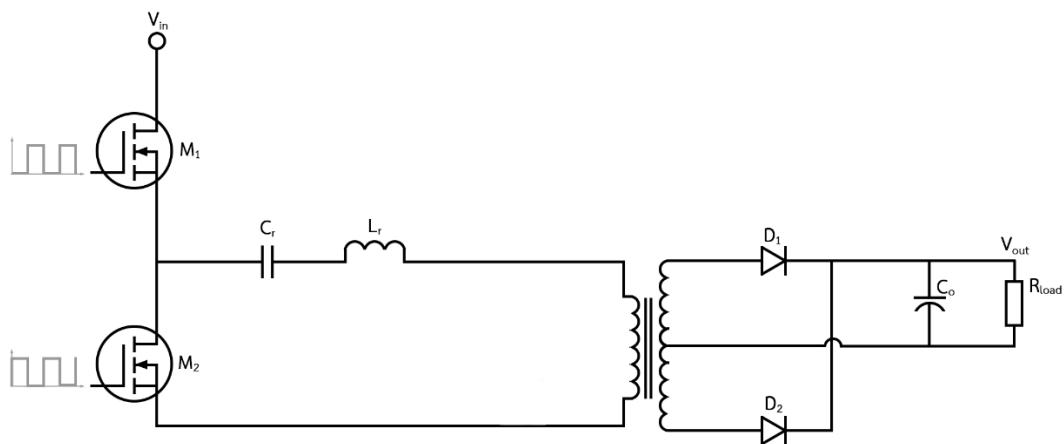
2.3 พื้นฐานของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์ (Basic types of resonant converter)

ในปัจจุบันมีโครงสร้างของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์เกิดขึ้นมากหลายชั้น โครงสร้างทั้งหมดเหล่านี้มีหลักการทำงานเหมือนกันคือใช้เพาเวอร์สวิตช์ในการสร้างแรงดันสี่เหลี่ยมหรือกระแสเพื่อป้อนเข้าวงจรเรโซแนนซ์ (Resonant circuit) จากนั้นจะเกิดพลังงานหมุนเวียน (Energy circulation) ในวงจรเรโซแนนซ์โดยพลังงานที่หมุนเวียนนี้บางส่วนหรือทั้งหมดจะถูกถ่ายโอนไปสู่负载

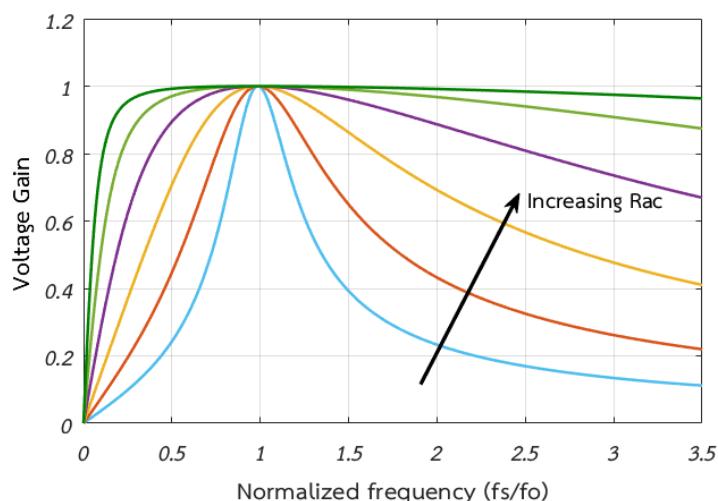
ชนิดพื้นฐานของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง เรโซแนนซ์แบบอนุกรม, วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์แบบขนานและ วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์แบบอนุกรม-ขนาน ซึ่งทั้งสามแบบสามารถปรับแต่งด้วย แรงดัน负载 โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency variation) ในการสวิตช์ซึ่งส่งผลทำให้ค่าอิมพีเดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลง

2.3.1 วงจรแปลงผันผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (The Series Resonant DC-DC Converter : SRC)

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์แบบอนุกรมแบบหารฟบริจจ์แสดงดังภาพที่ 2-7 และคุณลักษณะอัตราขยายของ SRC แสดงดังภาพที่ 2-8 โดยตัวหนีบวนนำแบบเรโซแนนซ์ (L_r) และตัวเก็บประจุแบบเรโซแนนซ์ (C_r) ต่ออนุกรมกันเป็นรูปแบบที่เรียกว่าแทงค์เรโซแนนซ์ (Resonant tank) ซึ่งแทงค์เรโซแนนซ์จะต่ออนุกรมกับโหลด กระทำเป็นตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) โดยถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าแทงค์เรโซแนนซ์จะทำให้ค่าอิมพีเดนซ์ของแทงค์เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงไป แสดงว่าแรงดันที่ตอกคร่อมโหลดสามารถเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนความถี่ได้ โดยอัตราขยายแรงดันของ SRC จะมีค่าต่ำกว่า 1 เสมอ เพราะฉะนั้นที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดอัตราขยายสูงสุด เนื่องจากค่าเรียกแตกต่างของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ (X_{Cr}) มีค่าเท่ากับค่าเรียกแตกต่างของตัวหนีบวนนำเรโซแนนซ์ (X_{Lr}) แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน ทำให้แรงดันอินพุตตอกคร่อมที่โหลดทั้งหมด



ภาพที่ 2-7 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์อนุกรมแบบ hairy พนวิดจ์



ภาพที่ 2-8 คุณลักษณะอัตราขยายของ SRC

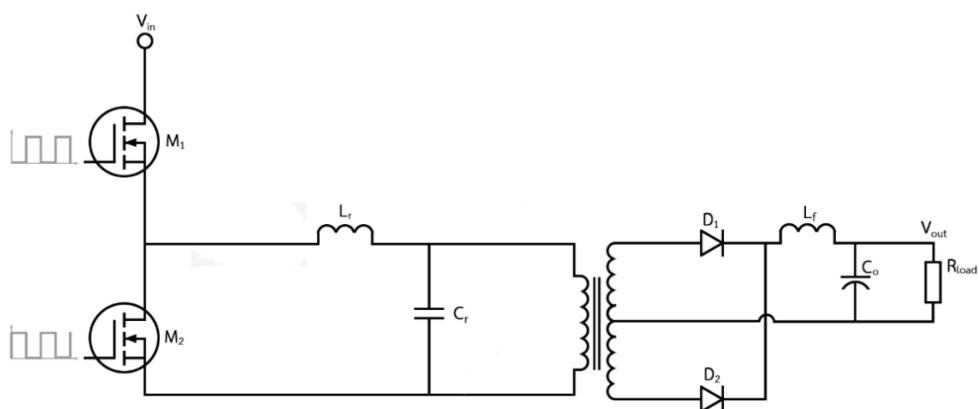
จากภาพที่ 2-8 ถ้าทำงานที่ความถี่การสวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) ส่งผลทำให้ตัววงจรทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) แต่ถ้าทำงานที่ความถี่การสวิตช์ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ส่งผลทำให้ตัววงจรทำงานภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์ที่กระแสเป็นศูนย์ (ZCS) สำหรับเพาเวอร์มอสเฟตในปริญญาอนิพนธ์เล่มนี้เลือกทำงานภายใต้ ZVS

จะเห็นได้ว่าการต่อโหลดที่เบา (Light load) ค่าอิมพีเดนซ์ของโหลดมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีเดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ดังนั้นทำให้ยากในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต เพราะว่าต้องการความถี่การสวิตช์สูงเข้าใกล้ล้อนัตเพื่อที่จะทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ซึ่งสิ่งนี้เป็นปัญหาสำหรับ SRC

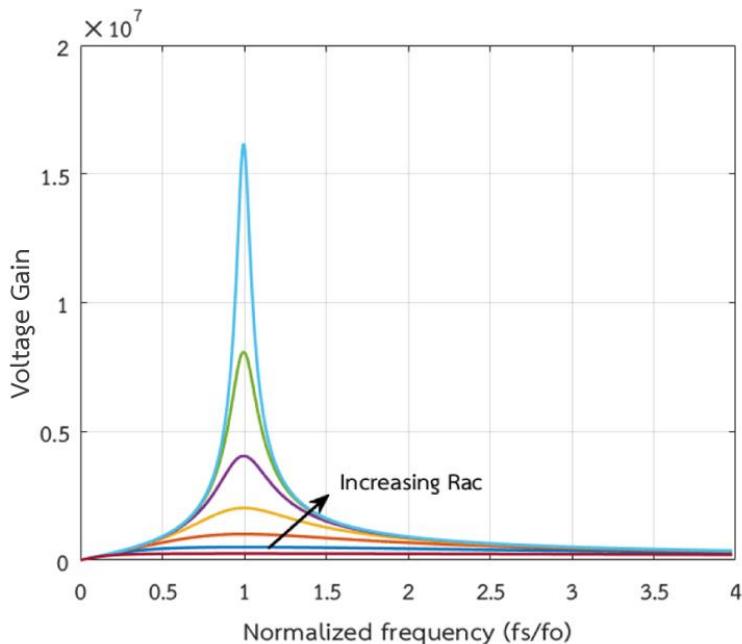
ถ้าหากเพิ่มความถี่การสวิตช์สูงขึ้นค่าอิมพีเดนซ์ของแทงค์เรโซแนนซ์จะมีค่าสูงขึ้น เช่นกัน สิ่งนี้หมายความว่าจะมีพลังงานส่วนมากหมุนเวียนอยู่ในแทงค์เรโซแนนซ์แทนที่ควรจะถูกส่งไปสู่负载 โดยพลังงานที่หมุนเวียนถูกกำหนดเป็นพลังงานที่ส่งกลับมาที่แหล่งจ่ายอินพุตในแต่ละรอบของการสวิตช์ ล่งผลให้เกิดการสูญเสียบนนำกระแสที่สูง

2.3.2 วงจรแปลงผันผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์แบบบานาน (The Parallel Resonant DC-DC Converter : PRC)

วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์บานานแบบบาร์ฟบริดจ์แสดงดังภาพที่ 2-9 และคุณลักษณะอัตราขยายของ PRC แสดงดังภาพที่ 2-10 สำหรับ PRC ตัวแทงค์เรโซแนนซ์ยังคงเป็นการต่อร่วมแบบอนุกรมกันของตัวเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ (L_r) และตัวเก็บประจุแบบเรโซแนนซ์ (C_r) แต่เหตุที่เรียกว่าวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์บานาน เพราะว่าโหลดต่อข้างกับตัวเก็บประจุแบบเรโซแนนซ์



ภาพที่ 2-9 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์บานานแบบบาร์ฟบริดจ์



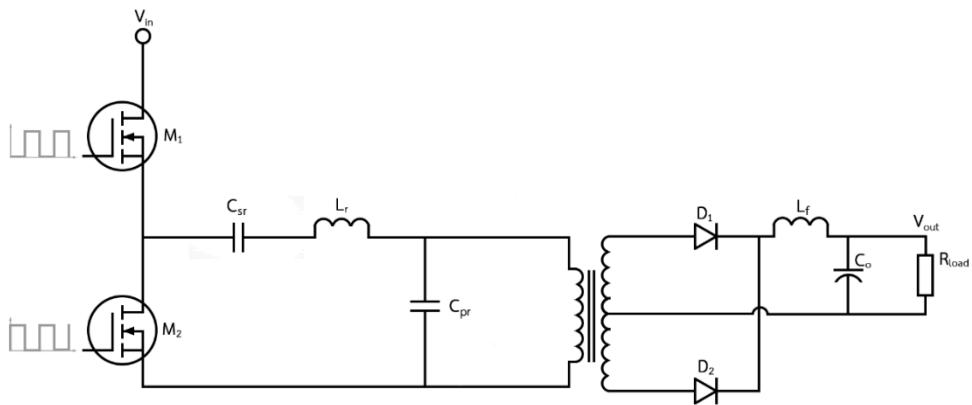
ภาพที่ 2-10 คุณลักษณะอัตราข่ายของ PRC

หากเปรียบเทียบกับ SRC จะเห็นว่าที่โหลดเบา ความถี่ของการสวิตช์ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงสูงเพื่อที่จะรักษาระดับของแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นการรักษาระดับแรงดันที่โหลดเบา ไม่ใช่ปัญหาของ PRC แต่พลังงานที่หมุนเวียนในแทงค์เรโซแนนซ์ค่อนข้างสูงซึ่งมีมากกว่า SRC

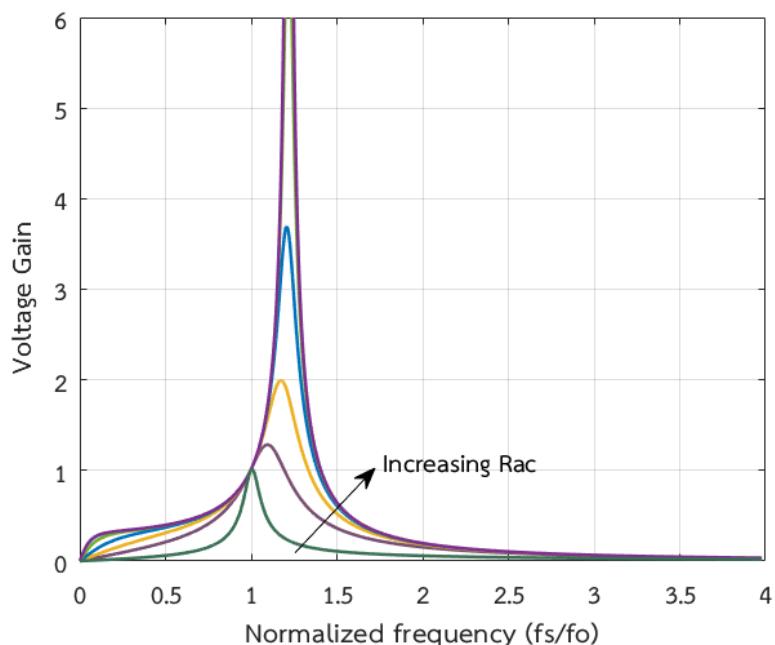
ดังนั้นปัญหาใหญ่ของ PRC คือพลังงานที่หมุนเวียนในแทงค์เรโซแนนซ์สูงมากแม้ว่าที่โหลดเบาเนื่องจากตัวเก็บประจุแบบเรโซแนนซ์ต่อขนาดกับโหลด

2.3.3 วงจรแเปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์แบบอนุกรมขนาด (The Series Parallel DC-DC Converter : SPRC)

วงจรแเปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์อนุกรมขนาดแบบสาร์ฟบริดจ์แสดงดังภาพที่ 2-11 และคุณลักษณะอัตราข่ายของ SPRC แสดงดังภาพที่ 2-12 ตัวแทงค์เรโซแนนซ์ประกอบไปด้วยสามส่วนประกอบของเรโซแนนซ์คือ L_r , C_s และ C_p โดยแทงค์เรโซแนนซ์ของ SPRC ถูกมองเป็นการรวมกันของ SRC กับ PRC เพื่อนำคุณลักษณะที่ดีหรือข้อดีของทั้งสองมารวมกันคือการนำโหลดต่ออนุกรมกับ L_r และ C_s ซึ่งทำให้พลังงานหมุนเวียนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ PRC และการทำ C_p ขนาดนานเพื่อที่จะทำให้ SPRC สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ขณะไม่มีโหลด (No-load) หรือโหลดเบา



ภาพที่ 2-11 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงเรโซแนนซ์อนุกรม-ขนาดแบบหาร์ฟบริคจ์



ภาพที่ 2-12 คุณลักษณะอัตราขยายของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมขนาด (SPRC)

จากภาพที่ 2-12 เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 2-8 จะเห็นได้ว่า SPRC มีช่วงความถี่สวิตช์ที่แคบกว่า SRC เมื่อโหลดเปลี่ยนซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของการรักษากระแสดับแรงดัน

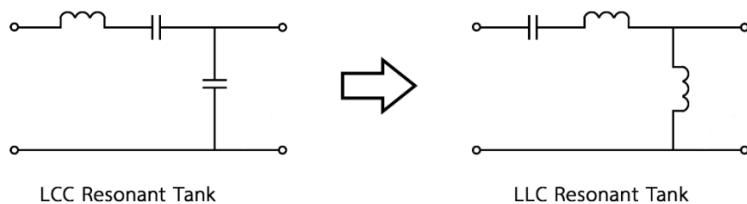
กระแสหมุนเวียน (Circulating current) ของ SPRC มีค่าน้อยกว่า PRC แต่มีค่าสูงกว่า SRC เเละน้อยกว่า PRC ทำให้พลังงานหมุนเวียนในแทงค์เรโซแนนซ์ถูกลดลงเมื่อเทียบกับ PRC

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่า SPRC รวมคุณลักษณะที่ดีของ SRC กับ PRC แต่ในความเป็นจริงมีปัญหาอยู่กับช่วงความกว้างของแรงดันอินพุต เพราะว่าความสูญเสียที่เกิดจากการสวิตช์และความสูญเสียที่เกิดจากการนำกระแสจะเพิ่มสูงขึ้นที่แรงดันของอินพุตที่มีค่าสูง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า SRC, PRC และ SPRC ไม่สามารถหาจุดการทำงานที่เหมาะสม (Optimal) ที่แรงดันอินพุตมีค่าสูงได้ เพื่อที่จะบรรลุการทำงานที่ความถี่สูงและประสิทธิภาพที่สูงจึงจำเป็นต้องมองหาโครงการสร้างของวงจรเรโซโนนเซอร์ใหม่ [4]

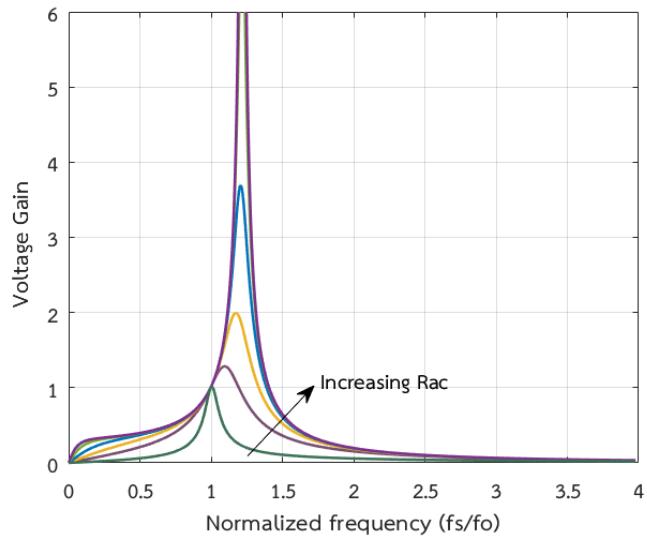
2.4 วงจรแปลงผันเรโซโนนเซอร์แบบแอลแอลซี (LLC Resonant DC-DC Converter)

จากที่กล่าวมาในส่วนของหัวข้อ 2.3 แม้ว่า SPRC รวมข้อดีของ SRC และ PRC ไว้ด้วยกันโดยมีความถี่เรโซโนนเซอร์ 2 ความถี่ ซึ่งความถี่เรโซโนนเซอร์ที่ต่ำกำหนดโดย L_r และ C_s ส่วนความถี่เรโซโนนเซอร์ที่สูงถูกกำหนดโดย L_r และตัวเก็บประจุสมมูลระหว่าง C_s กับ C_p โดย SPRC สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า LCC เนื่องมาจากการจัดเรียงของแทงค์เรโซโนนเซอร์ที่ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำหนึ่งตัวและตัวเก็บประจุสองตัวที่ใช้งานจะมีขนาดใหญ่และราคาแพง

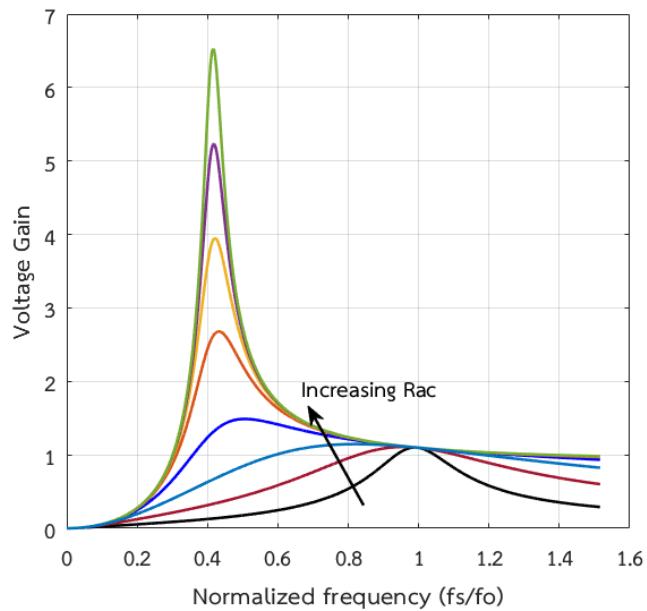
เพื่อที่จะทำให้ได้คุณลักษณะอัตราขยายที่เหมือนเดิมและความถี่เรโซโนนเซอร์ที่ต่ำไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากอยู่ในพื้นที่ ZCS ทำให้เกิดความคิดศักดิ์สิทธิ์ที่ว่าทำยังไงให้ความถี่เรโซโนนเซอร์ทั้งสองอยู่ในพื้นที่ ZVS จากภาพที่ 2-13 แสดงการแทนที่ตัวเก็บประจุด้วยตัวเหนี่ยวน้ำทำให้เกิดโครงการสร้างวงจรใหม่ที่เรียกว่างจราจรแปลงผันเรโซโนนเซอร์แบบแอลแอลซี (LLC resonant converter) โดยคุณลักษณะอัตราขยายของ LLC คือการสะท้อนกราฟคุณลักษณะอัตราขยายของ LCC ดังที่แสดงดังภาพที่ 2-14 และ 2-15 ทำให้ยังคงมีความถี่เรโซโนนเซอร์อยู่ 2 ความถี่เช่นเดิม ซึ่งความถี่เรโซโนนเซอร์ที่สูงกำหนดโดย L_r และ C_r ส่วนความถี่เรโซโนนเซอร์ที่ต่ำถูกกำหนดโดย C_r และตัวเหนี่ยวน้ำ L_m กับ L_r ที่อนุกรมกัน ซึ่งตัวเหนี่ยวน้ำทั้งสองนี้มีความถี่ต่ำกว่าตัวเหนี่ยวน้ำแฟรงก์เฟลด์ที่ทำให้ได้เปรียบในเรื่องของจำนวนอุปกรณ์ที่ลดลงโดยมีแค่ตัวเก็บประจุเรโซโนนเซอร์เพียงตัวเดียว



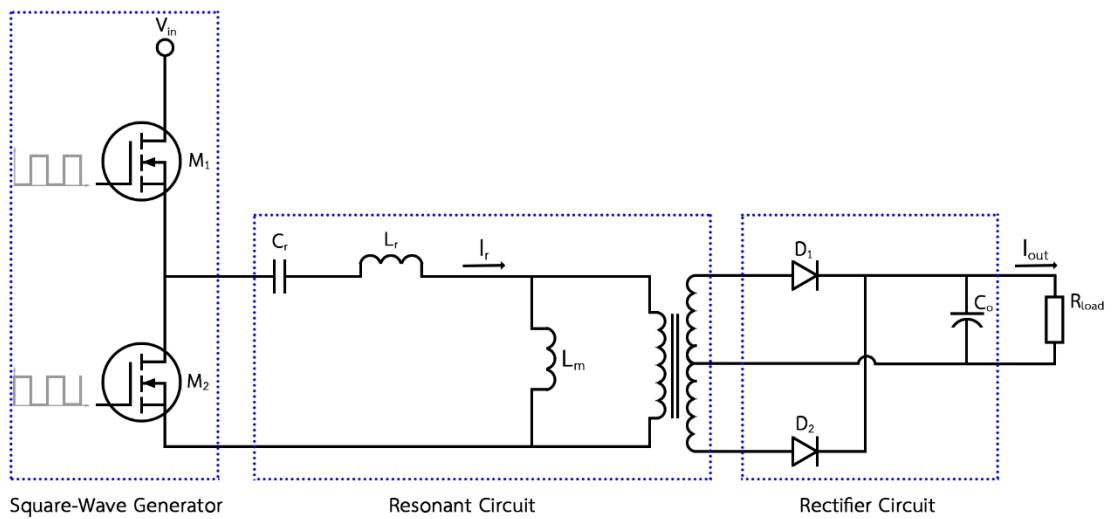
ภาพที่ 2-13 แทงค์เรโซโนนเซอร์ของ LCC และ LLC



ภาพที่ 2-14 คุณลักษณะอัตราข่ายของ LCC



ภาพที่ 2-15 คุณลักษณะอัตราข่ายของ LLC



ภาพที่ 2-16 วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แอลโลล็อกซีแบบชาร์ฟบริดจ์

วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบชาร์ฟบริดจ์ (LLC resonant converter) ถือกำเนิดมานานแล้วและมีความพยายามในการจัดเรียงแท่งค์เรโซแนนซ์ใหม่ๆ มากมายหลากหลายการจัดเรียงแต่สุดท้ายวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบชาร์ฟบริดจ์ได้รับความนิยม เพราะว่ามีข้อดีหลายประการอาทิเช่น

1. สามารถรักษากระแสดับแรงดันเอาต์พุตเมื่อแรงดันอินพุตหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ไม่สูงในขณะที่วงจรยังคงมีประสิทธิภาพที่สูง

2. มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากเกิด ZVS ขณะทำการสวิตช์และการส่งสัญญาณระบบควบคุมน้อย (Low EMI)

3. ขนาดเล็กและราคาถูกเนื่องจากใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงมาเป็นส่วนประกอบของแท่งค์เรโซแนนซ์

2.4.1 องค์ประกอบของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แอลโลล็อกซี (Configuration of LLC resonant converter)

จากภาพที่ 2-16 แสดงองค์ประกอบของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แอลโลล็อกซีแบบชาร์ฟบริดจ์โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ส่วนกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-Wave Generator), ส่วนวงจรเรโซแนนซ์ (Resonant Circuit) และส่วนวงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)

1. ส่วนกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-Wave Generator) ประกอบด้วยเพาเวอร์มอสเฟต M₁ และ M₂ ทำการสร้างแรงดันสี่เหลี่ยมโดยการขับเพาเวอร์มอสเฟตที่ขาเกทสลับกันด้วยคิวตี้ไซเคิล (duty cycle) 50 เปอร์เซนต์ของแต่ละสวิตช์และต้องมีเวลาตาย (dead time) เพื่อป้องกันการลัดวงจรแหล่งจ่ายและเป็นช่วงเวลาที่ทำให้บรรลุการเกิด ZVS

2. ส่วนวงจรเรโซนэнซ์ (Resonant Circuit) หรือโครงข่ายเรโซนэнซ์ประกอบไปด้วยค่าเก็บประจุเรโซนэнซ์ (C_r) และค่าเหนี่ยวนำเรโซนэнซ์ (L_r) และค่าเหนี่ยวนำแม่เหล็กของแม่ข่าย (L_m) โดยในวงจรเรโซนэнซ์นี้จะมีกระแสหมุนเวียนอยู่ทำให้พลังงานจะถูกหมุนเวียนหรือถูกจ่ายไปสู่โหลดผ่านแม่ข่ายเปลงที่มีอัตราส่วนรอบ (turn ratio : n)

3. ส่วนวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) : ในส่วนนี้สามารถจัดรูปได้สองแบบคือวงจรเรียงกระแสเม้มแม่ข่ายเปลงแทบกลาง (Full-Wave Rectifier with Tapping Transformer) และวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Full-Wave Bridge Rectifier) จากภาพที่ 2-16 เป็นวงจรเรียงกระแสเม้มแม่ข่ายเปลงแทบกลางโดยเรียงกระแสแบบเดิมคลื่นเพื่อแปลงสัญญาณไฟสลับเป็นสัญญาณไฟตรงและถ่ายโอนไปสู่โหลด (R_{load}) หรือเอาต์พุต โดยตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C_o) ใช้สำหรับทำให้แรงดันกระแสเพื่อมั่นคง

2.4.2 การทำงานของวงจรแปลงผันเรโซนэнซ์แอลแอลซี

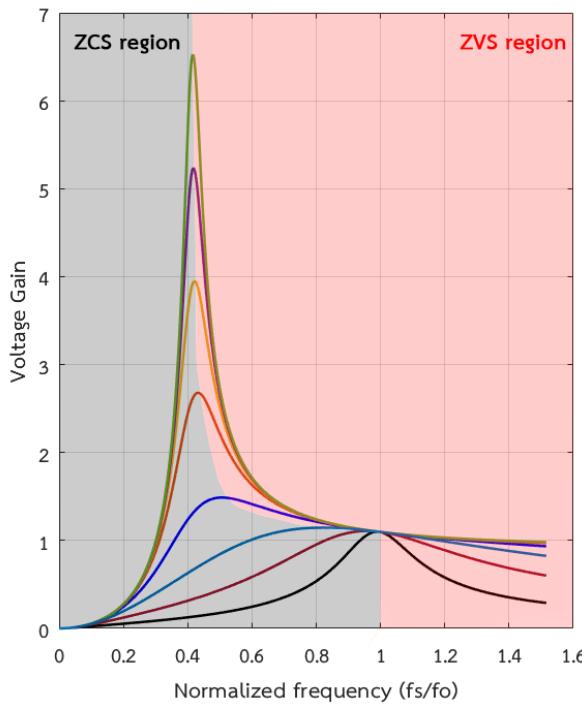
คุณลักษณะอัตราขยายของวงจรแปลงผันเรโซนэнซ์แอลแอลซีสามารถแบ่งเป็น 2 พื้นที่คือพื้นที่ของ ZVS และพื้นที่ของ ZCS และดังภาพที่ 2-17 สำหรับวงจรแปลงผันเรโซนэнซ์แอลแอลซีจากที่กล่าวไว้ข้างต้นจะพบว่ามีความถี่เรโซนэнซ์สองความถี่คือความถี่เรโซนэнซ์ที่ถูกกำหนดโดย L_r และ C_r และดังสมการที่ 2-1 ส่วนความถี่เรโซนэнซ์ที่ถูกกำหนดโดย C_r และตัวเหนี่ยวนำ L_m กับ L_r ที่อนุกรมกันแสดงดังสมการที่ 2-2

$$f_{o1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (2-1)$$

$$f_{o2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}} \quad (2-2)$$

กรณีแรงดันอินพุตมีค่าสูงวงจรควรทำงานที่ความถี่ f_{o1} และในกรณีที่แรงดันอินพุตลดลง อัตราขยายควรเพิ่มขึ้น (ลดความถี่ลงมาจากการถูกกำหนดโดย f_{o1} เพื่อเพิ่มอัตราขยาย) เพราะฉะนั้นการเลือกแทงค์เรโซนэнซ์ให้เหมาะสมจะทำให้วงจรสามารถทำงานในพื้นที่ ZVS ได้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตและโหลดที่กว้าง

การทำงานที่ความถี่การสวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซนэнซ์จะจะทำงานเหมือนกับ SRC แต่การทำงานที่ความถี่สวิตช์ระหว่าง f_{o1} และ f_{o2} จะทำให้ SRC กับ PRC ต่อสู้แข่งกันเด่น โดยที่โหลดหนัก (Heavy load) SRC จะเด่นขึ้นมา โดยคุณสมบัติที่น่าสนใจข้างต้นนี้ ทำให้เราสามารถออกแบบวงจรให้ทำงานที่ความถี่เรโซนэнซ์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงและยังคงสามารถทำงานที่ความถี่การสวิตช์ต่ำกว่าความถี่เรโซนэнซ์ f_{o1} เพื่อเพิ่มอัตราขยายของวงจร โดยที่สามารถอยู่ในพื้นที่ของ ZVS



ภาพที่ 2-17 พื้นที่ของฟต์สวิตช์ของแทงค์เร โซนแนนซ์แบบ LLC

การทำงานที่ความถี่การสวิตช์มีค่าเท่ากับความถี่เร โซนแนนซ์ f_{O_1} เมื่อเพาเวอร์มอสเฟต M1 เปิดสวิตช์ (turn-off) กระแสเร โซนแนนซ์ (I_r) จะคงลงมีค่าเท่ากับกระแสเหนี่ยวนำของหม้อแปลง (I_{Lm}) ในช่วงนี้จะไม่มีการโอนถ่ายกำลังไปสู่ฝั่งทุติยภูมิจากนั้นทำการหน่วงเวลาในการปิดสวิตช์ (turn on) ของเพาเวอร์มอสเฟต M2 เพื่อให้กระแส I_{LM} ทำการคลายประจุของตัวเก็บประจุ แฟงที่อยู่ภายในเพาเวอร์มอสเฟตจนทำให้ไอโอดแฟงภายในเพาเวอร์มอสเฟตนำกระแส ดังนั้น ส่งผลให้บรรลุเงื่อนไข ZVS แต่อย่างไรก็ตามการทำงานที่ความถี่การสวิตช์มีค่ากับความถี่เร โซนแนนซ์เป็นเพียงจุดทำงานเพียงจุดเดียว เพื่อที่จะให้วงจรแปลงผันเร โซนแนนซ์แบบแอลแอลซีสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ในกรณีแรงดันอินพุตหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ความถี่การสวิตช์จะต้องถูกปรับให้ใกล้ออกจากความถี่เร โซนแนนซ์

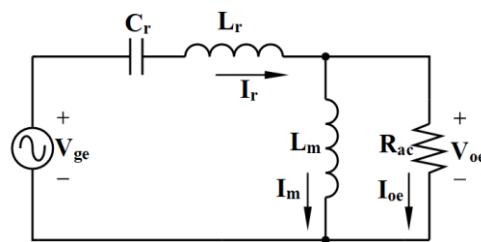
การทำงานที่ความถี่การสวิตช์มีค่าต่ำกว่าความถี่เร โซนแนนซ์ f_{O_1} กระแสเร โซนแนนซ์จะคงลงมีค่าเท่ากับกระแสเหนี่ยวนำของหม้อแปลงก่อนที่เพาเวอร์มอสเฟต M1 เปิดสวิตช์ (turn-off) และนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้การโอนถ่ายกำลังถูกหยุดก่อนแม้ว่ากระแสเหนี่ยวนำของหม้อแปลงยังคงนำกระแสย่างต่อเนื่อง การทำงานในช่วงความถี่นี้ยังคงบรรลุ ZVS ในช่วงปิดสวิตช์ (turn-on) ของเพาเวอร์มอสเฟตและได้ไอโอดฝั่งทุติยภูมิได้รับการแลกเปลี่ยนที่อ่อนนุ่ม (Soft commutation) โดยกระแสที่โหลดผ่านได้ไอโอดอยู่ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องและต้องการกระแสหมุนเวียนที่มากใน

วงจรเรโซโนนซ์เพื่อที่จะส่งพลังงานเท่ากับพลังงานที่โหลดต้องการ ทั้งนี้ทั้งนั้นกระแสในโใหมดนี้นำไปสู่กำลังสูญเสียจากการนำที่สูงทั้งฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิ สุดท้ายนี้ถ้าความถี่การสวิตช์มีค่าต่ำมากเกินไปจะส่งผลให้สูญเสียการเกิด ZVS ได้

การทำงานที่ความถี่การสวิตช์มีค่าสูงกว่าความถี่เรโซโนนซ์ f_{01} ในโใหมดนี้กระแสหมุนเวียนฝั่งทุติยภูมิมีค่าน้อย สิ่งนี้ทำให้ลดกำลังสูญเสียจากการนำเพราะว่ากระแสเรโซโนนซ์อยู่ในโใหมดกระแสต่อเนื่องดังนั้นกระแสค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms) น้อยลงสำหรับความต้องการกำลังที่โหลดเท่าเดิม ในโใหมดนี้ที่ได้โดยผ่านทุติยภูมิไม่ซอฟต์สวิตช์และเกิดกำลังสูญเสียการกู้คืนแบบย้อนกลับ (reverse recovery losses) แต่ในโใหมดนี้ก็ยังคงบรรลุ ZVS ในช่วงปิดสวิตช์ (turn-on) ของเพาเวอร์มอสเฟต โใหมดนี้อาจจะสำคัญในการณ์โหลดเบา

2.5 การออกแบบวงจรด้วยหลักของการประมาณหาร์มอนิกอันดับหนึ่ง (First Harmonic Approximation)

จากวงจรภาพที่ 2-16 แสดงวงจรแปลงผันเรโซโนนซ์แอลแอลซีแบบหาร์ฟบริดจ์ สามารถเปลี่ยนอัตราขยายโดยการเปลี่ยนความถี่การสวิตช์โดยคงที่ดูดีไซด์ (duty cycle) ไว้ที่ 50 เปอร์เซนต์ และเนื่องจากสมการของอัตราขยายซับซ้อนซึ่งขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงความถี่ การวิเคราะห์วงจรในโคอมเมนเวลาทำได้ยากเนื่องจากวงจรไม่เป็นเชิงเส้น เพราะฉะนั้นจึงเป็นเหตุผลในการวิเคราะห์วงจรด้วยโคอมเมนความถี่ผ่านการประมาณหาร์มอนิกอันดับหนึ่ง (First Harmonic Approximation : FHA) ทำให้ได้วงจรสมมูลดังแสดงในภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 การประมาณวงจรแปลงผันเรโซโนนซ์แอลแอลซีแบบหาร์ฟบริดจ์โดยใช้ FHA

เนื่องจากแรงดันที่เอาต์พุตของส่วนกำเนิดคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-Wave Generator) หรือแรงดันอินพุตของแทงค์เรโซโนนซ์ที่แสดงดังภาพที่ 2-16 เป็นสัญญาณแรงดันสี่เหลี่ยม $V_{ge}(t)$ ที่มีขนาดแอมปลิจูดเท่ากับ V_{in} โดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยเท่ากับ $V_{in}/2$ โดยตัวเก็บประจุแบบเรโซโนนซ์ทำ

หน้าที่กันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Blocking) ผลลัพธ์นี้ทำให้แรงดันเฉลี่ยตกคร่อม C_r มีค่าเท่ากับ $V_{in}/2$

ผึ่งด้านอินพุต แรงดันอินพุต $V_{ge}(t)$ ของแทงค์เรโซแนนซ์ที่เป็นสัญญาณพัลส์เมื่อใช้อุปกรณ์เรียร์จะได้สมการที่ 2-3

$$V_{ge(t)} = \frac{Vdc}{2} + \frac{4\left(\frac{Vin}{2}\right)}{\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots n} \frac{1}{\sin(k2\pi f_s t)} \quad (2-3)$$

โดยส่วนประกอบมูลฐานของแรงดันอินพุต $V_{ge}(t)$ (fundamental voltage : $V_{ge(1st)}(t)$) แสดงในสมการที่ 2-4

$$V_{ge(1st)}(t) = \frac{4\left(\frac{Vin}{2}\right)}{\pi} \sin(2\pi f_s t) \quad (2-4)$$

ผึ่งด้านเอาต์พุต แรงดันเอาต์พุตของแทงค์เรโซแนนซ์เมื่อนำไปหาส่วนประกอบมูลฐาน (fundamental component : $V_{oe}(t)$) แสดงดังสมการที่ 2-5

$$V_{oe(1st)}(t) = \frac{4(nV_{out})}{\pi} \sin(2\pi f_s t - \partial_v) \quad (2-5)$$

ซึ่ง ∂_v คือมุมไฟสระห่วง $V_{ge(1st)}$ และ $V_{oe(1st)}$ และแรงดันเอาต์พุตค่าเฉลี่ยกำลังสองแสดงดังสมการที่ 2-6

$$V_{oe(1st)rms} = \frac{4(nV_{out})}{\pi\sqrt{2}} \quad (2-6)$$

เนื่องจากเป็นหม้อแปลงแบบมีแทปกลางทำให้กระแสที่ไหลผ่านไอดิโอดนำกระแส 50 เปอร์เซ็นต์ของกระแสเอาต์พุตของวงจร สมมุติว่ากระแสเอาต์พุต (I_{oe}) ของแทงค์เรโซแนนซ์เป็นคลื่นไอน์ฟอร์มนาคสูงสุดของกระแส I_{oe} สามารถหาจากสมการกระแสเฉลี่ยดังสมการที่ 2-7

$$\frac{2}{T_s} \int_0^{Ts/2} I_{oe(peak)} \sin(2\pi f_s t) dt = \frac{I_{out}}{n} \quad (2-7)$$

สมการกระแสเอาต์พุตของแทงค์เรโซแนนซ์ $I_{oe(1st)}(t)$ ดังสมการที่ 2-8

$$I_{oe(1st)}(t) = \frac{\pi}{2} \frac{I_{out}}{n} \sin(2\pi f_s t - \sigma_i) \quad (2-8)$$

ซึ่ง σ_i คือ มุมไฟสระห่วง I_{oe} และ V_{oe} และกระแสเอาต์พุตค่าเฉลี่ยกำลังสองแสดงดังสมการที่ 2-9

$$I_{oe(1st)rms} = \frac{\pi}{2} \times \frac{I_{out}}{n} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2-9)$$

เพราจะนั่นวงจรเรียงกระแสฟังทุติกูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือส่วนวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) ที่แสดงดังภาพที่ 2-16 สามารถแทนด้วยความต้านทานโหลดสมมูลไฟสลับ (R_{ac}) ดังแสดงได้จากสมการที่ 2-10

$$R_{ac} = \frac{V_{oe(1st)rms}}{I_{oe(1st)rms}} = \frac{\frac{4 \times (n \times V_{out})}{\pi \times \sqrt{2}}}{\frac{\pi \times I_{out}}{2 \times n \times \sqrt{2}}} = \frac{8n^2}{\pi^2} \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2-10)$$

2.6 กฎเกณฑ์การซอฟต์สวิตช์ (Soft-Switching Criteria)

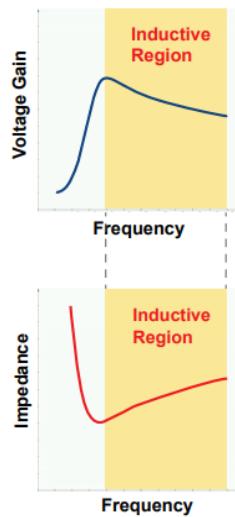
ข้อดีหลักของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอดซีคือสามารถลดสวิตช์ชิงแบบซอฟต์สวิตช์ ในช่วงการเปลี่ยนแปลงโหลดที่กว้างได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับ การซอฟต์สวิตช์ ซึ่งในที่นี้คือการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) โดยเราต้องการกระแสที่สามารถ คลายประจุตัวเก็บประจุแห่งที่อยู่ภายในเพาเวอร์มอสเฟตให้สมบูรณ์ก่อนที่เพาเวอร์มอสเฟตจะปิด สวิตช์ (turn-on) โดยมี 3 เงื่อนไขที่ต้องการเพื่อให้บรรลุ ZVS ในช่วงเพาเวอร์มอสเฟตทำการปิด สวิตช์ (ไม่สามารถขาดหัวข้อใดหัวหนึ่งได้)

1. อินพีเดนซ์อินพุตแบบเหนี่ยวนำ (Inductive input impedance)
2. พลังงานที่เพียงพอที่ถูกเก็บในแทงค์เรโซแนนซ์ (Sufficient energy stored in the resonant tank)

3. เวลาตายที่เพียงพอ (Sufficient dead-time)

2.6.1 อินพีเดนซ์อินพุตแบบเหนี่ยวนำ (Inductive input impedance)

สิ่งแรกที่สำคัญคือต้องมั่นใจว่ากระแสที่โหลดผ่านแทงค์เรโซแนนซ์ในช่วงเวลาตายต้อง สามารถชาร์จประจุและคลายประจุของตัวเก็บประจุแห่งที่อยู่ภายในเพาเวอร์มอสเฟตได้ ซึ่งทำได้ โดยการปรับความถี่ให้สูงพอเพื่อให้แทงค์เรโซแนนซ์แสดงพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำ สิ่งนี้จะทำ ให้กระแสเกิดการล้าหลังแรงดันอินพุตของแทงค์เรโซแนนซ์ดังแสดงในภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 พื้นที่อินดักทิฟในอัตราขยายแรงดันและค่าอิมพีเดนซ์

2.6.2 พลังงานที่เพียงพอที่ถูกเก็บในแทงค์เรโซแนนซ์ (Sufficient energy stored in the resonant tank)

จากหัวข้อ 2.5.1 แทงค์เรโซแนนซ์ที่แสดงพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำ (Inductive) จะสามารถมั่นใจได้โดยว่าตัวเก็บประจุ放กายนิพ%A เวอร์มอสเฟตถูกชาร์จและถูกคลายประจุโดยกระแสของแทงค์เรโซแนนซ์ $I_r(t)$ อย่างไรก็ตามเพียงแค่ทำงานในพื้นที่ตัวเหนี่ยวนำก็ไม่สามารถยืนยันได้แน่นอนว่าจะเกิด ZVS บนนิพ%A เวอร์มอสเฟตดังนั้นต้องมั่นใจว่าพลังงานที่เก็บไว้ในแทงค์เรโซแนนซ์ต้องมีค่ามากกว่าพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ放กายนิพ%A เวอร์มอสเฟตตามสมการที่ 2-11

$$L_m I_{Lm(\text{peak})}^2 > C_{oss} V_{DS(M2)}^2 \quad (2-11)$$

2.6.3 เวลาตายที่เพียงพอ (Sufficient dead-time)

เวลาตายต้องเหมาะสมถึงจะสามารถเกิด ZVS ได้ถ้าเวลาตายมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะส่งผลให้ไม่เกิด ZVS ได้เนื่องจากการชาร์จประจุหรือการคลายประจุที่ตัวเก็บประจุของนิพ%A เวอร์มอสเฟตไม่สมบูรณ์

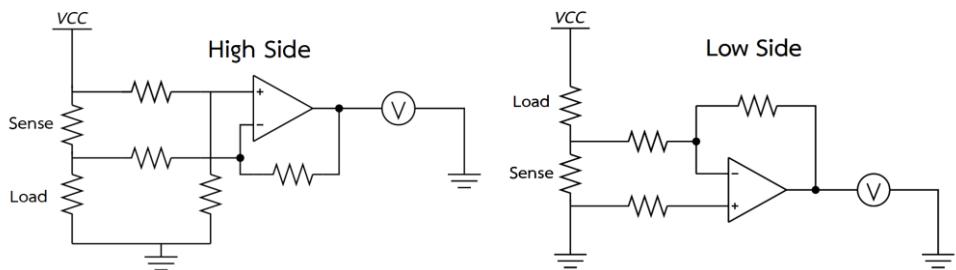
2.7 การวัดกระแส (current sensing)

การวัดกระแสในวงจรเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะการที่ทราบขนาดของกระแสหรืออัตราปริมาณของกระแสที่จ่ายไปยังโหลดนั้น เป็นประ予以ชนอย่างยิ่งในการนำไฟฟ้าจากภาระต่อวงจร การทำการป้องกันความเสียหายกรณีโหลดเกิน (Overload protection) การป้องกันวงจรไฟฟ้าจากการลัดวงจร (Short circuit current protection) และการตั้งการนำข้อมูลกระแสไปทำการควบคุมอย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นในแบตเตอรี่ตรวจสอบกระแสเพื่อนำไปใช้งานหรือตรวจสอบกระแสเพื่อการป้องกันความเสียหายต่อวงจร การวัดกระแสสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี

1. การวัดด้วยความต้านทานขนาดน้อย (Shunt resistor)
2. การวัดด้วยหม้อแปลงกระแส (Current transformer)
3. การวัดด้วยไพรบวัดกระแส (Current Probe)

2.7.1 การวัดด้วยความต้านทานขนาดน้อย (shunt resistor)

วิธีในการวัดด้วยความต้านทานขนาดน้อยคือนำตัวต้านทานต่ออนุกรมกับชุดที่ต้องการวัดกระแส เมื่อกระแสไหลผ่านจะเกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน โดยนำแรงดันที่ตกคร่อมที่ได้นี้น ผ่านไอซีอปแอมป์เพื่อต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น ซึ่งประเภทการวัดกระแส ด้วยตัวต้านทานนั้นแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือวัดกระแสแบบทิศทางเดียว (Uni-direction) และวัดกระแสแบบสองทิศทาง (Bi-direction) โดยการวางแผนการวัดนั้นมี 2 ประเภทเช่นกันคือ High-side Current sensing และ Low-side current sensing ดังภาพที่ 2-20



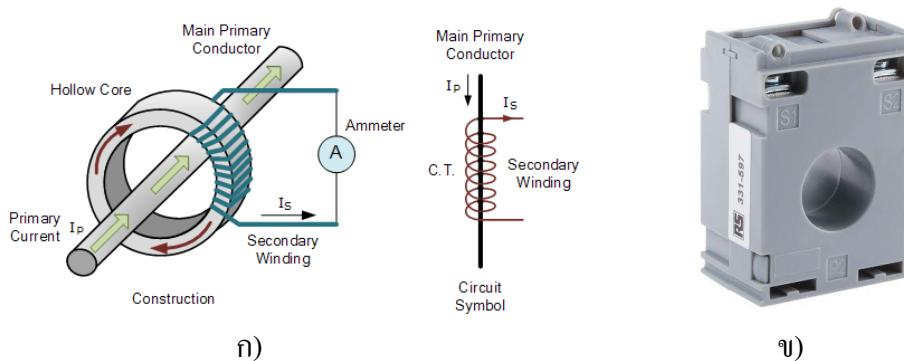
ภาพที่ 2-20 High-side Current sensing และ Low-side current sensing

ข้อแตกต่างระหว่างการวางแผนการวัดทั้งสองนี้คือ ถ้าเป็นกรณีของ Low-side หากเกิดการลัดวงจรที่โหลด ไอซีอปแอมป์จะไม่สามารถตรวจจับได้ เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานขนาดน้อย แต่ในกรณีของ High-side หากเกิดการลัดวงจร ไอซีอปแอมป์จะสามารถตรวจจับได้เนื่องจากมีกระแสในปริมาณที่มากไหลผ่านตัวต้านทานขนาดน้อย

ข้อดีของวิธีการวัดด้วยตัวต้านทานขนาดคือง่ายต่อการใช้งาน ราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ เกิดกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานขนาดและไม่สามารถแยกวงจร (Isolation) ตรวจจับกระแสกับวงจร หลักได้ ทั้งนี้ตัวต้านทานที่นำมาใช้จะต้องมีความแม่นยำสูงและต้องทนต่อการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิได้

2.7.2 การวัดด้วยหม้อแปลงกระแส (Current transformer : CT)

หลักการทำงานของตัวหม้อแปลงกระแส (Current transformer) ดังภาพที่ 2-21 จะใช้ สายตัวนำจากวงจรหลักล้อมผ่านตัว CT เสมือนเป็นชุดปฐมภูมิแล้ววัดแรงดันขาออกที่บดทุติยภูมิ ข้อดีของวิธีนี้คือการวัดกระแสจะแยกออกจากวงจรหลัก (isolation) โดยสื่อเชิงและมีความต้านทาน ต่ำส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียน้อยกว่าวัดกระแสด้วยความต้านทานขนาด ส่วนข้อเสียของการทำ ด้วยวิธีนี้คือสามารถวัดได้แค่ส่วนที่เป็นสัญญาณไฟลับเท่านั้น ยุ่งยากในการพัฒนาคุณภาพใช้ แกนประเภททอรอยด์และมีปรสิต (Parasitic) ในวงจรสมมูลของ CT



ภาพที่ 2-21 หลักการวัดด้วยหม้อแปลงกระแส

2.7.3 การวัดด้วยไพรบวัดกระแส (Current Probe)

การวัดโดยใช้ไพรบวัดกระแสเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดจากที่กล่าวมาจากสามวิธีข้างต้น โดย สามารถนำไพรบวัดกระแสมาคล้องสายไฟที่จะทำการวัดกระแสจากนั้นอ่านค่ากระแสได้ผ่าน ออสซิลโลสโคป โดยการใช้งานก็จะต้องเลือกย่านความถี่ (Bandwidth) ของสายไพรบวัดกระแส และย่านขนาดพิกัดกระแสที่วัดให้เหมาะสมกับการใช้งานกับวงจรที่ทำการวัด ข้อดีคือสามารถอ่าน กระแสได้ทันที มีความละเอียดและแม่นยำตรงที่สุดจากสามวิธี ข้อเสียคือไม่สามารถนำค่าที่วัดได้เข้า ไปในครอตอนโทรลเดอร์และราคาของตัวอุปกรณ์มีราคาสูง โดยไพรบวัดกระแสแสดงดังภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-22 โพรบวัดกระแส (Current Probe)

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบการวัดกระแสทั้ง 3 วิธี

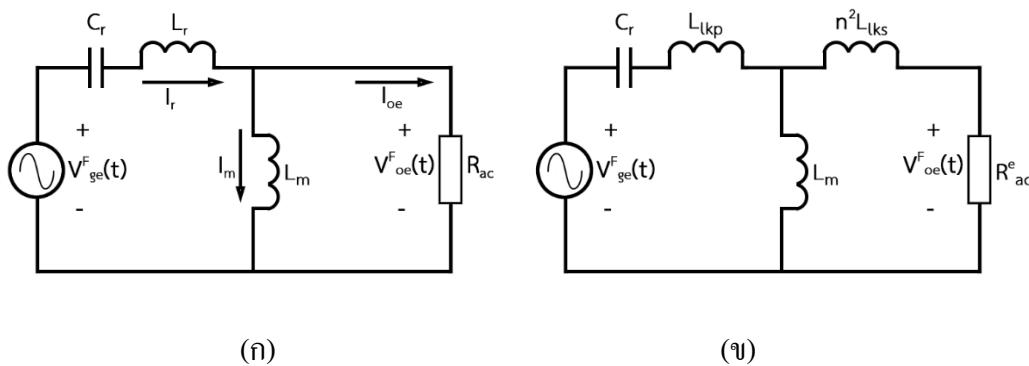
ชนิดการวัด	ข้อดี	ข้อเสีย	ราคา
การวัดด้วยความต้านทาน ขนาด	ง่าย	ไม่ Isolate กับวงจรหลัก เกิดกำลังสูญเสียสูงสุด	ถูก
การวัดด้วยหน้มือแปลงกระแส	Isolate กับวงจร	ยุ่งยากในการทำ วัดได้เฉพาะสัญญาณไฟสลับ	ปานกลาง
การวัดด้วยโพรบวัดกระแส	ตรวจวัดได้ทันที	นำค่าไปใช้งานไม่ได้	แพง

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองผล

3.1 การออกแบบวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี

จากการจำลองด้วยเทคนิคการประมาณหารมอนิกอันดับหนึ่งที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 แสดงดังภาพที่ 3-1 ก) สามารถปรับเปลี่ยนเป็นภาพที่ 3-1 ข) เพื่อให้ผลลัพธ์การออกแบบแม่นตรงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการออกแบบจริงในทางปฏิบัติมีผลของค่าเหนี่ยวนำร่ววไอลที่มีอยู่ทั้งผั่งปฐมภูมิ (L_{lkp}) และ ทุติยภูมิ (L_{lks})



ภาพที่ 3-1 การสร้างแบบจำลองด้วยการประมาณหารมอนิกอันดับหนึ่ง

จากการประมาณในภาพที่ 3-1 ข) ที่ใช้ในการจำลองในการออกแบบทำการหาอัตราขยายแรงดัน (M) โดยใช้กฎของเครอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Law) แสดงดังสมการที่ 3-1 ซึ่งเป็นสมการที่ถูกใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุต

$$\frac{V_{oe}^F(s)}{V_{ge}^F(s)} = \frac{(C_r L_m R_{ac}) s^2}{C_r [L_{lkp} L_m + L_{lkp} (n^2 L_{lks}) + L_m (n^2 L_{lks})] s^3 + [C_r R_{ac} (L_{lkp} + L_m)] s^2 + [L_m + n^2 L_{lks}] s + R_{ac}} \quad (3-1)$$

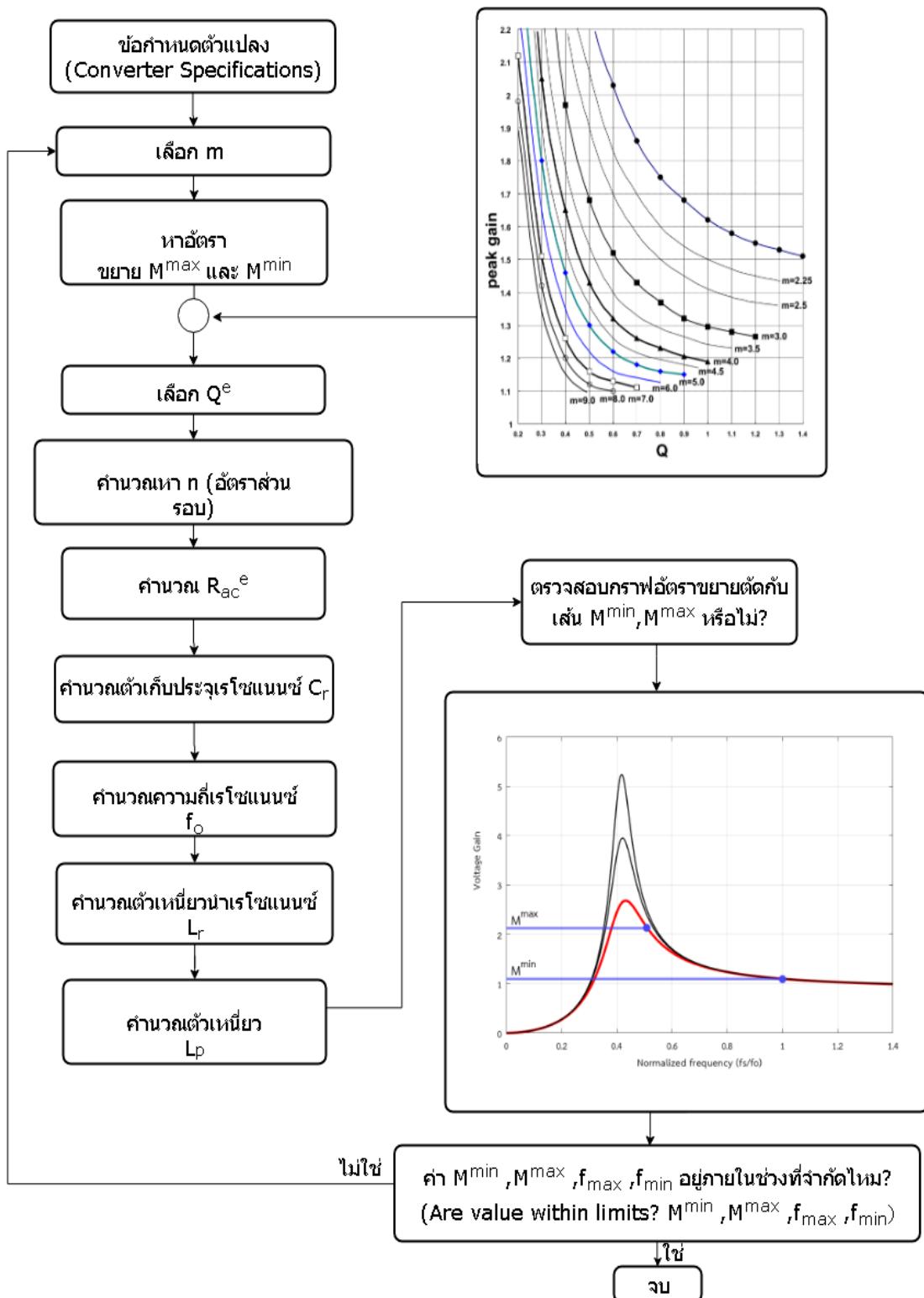
จากสมการที่ 3-1 แทนค่า $s = j\omega_0$ ซึ่ง ω_0 คือความถี่เชิงมุมที่ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์ เนื่องจากการจำลองและการออกแบบในปริญญาณพน์เล่มนี้ได้กำหนดให้วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์

แบบแอลแอลซีทำงานในบริเวณความถี่เรโซนансเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้ผลลัพธ์แม่นตรงกับที่ออกแบบดังนี้อัตราขยายที่ความถี่เรโซนанс ($M_{@f_0}$) แสดงดังสมการที่ 3-2

$$M_{@f_0} = \frac{V_{oe}^F(j\omega_0)}{V_{ge}^F(j\omega_0)} = \frac{L_m + n^2 L_{lks}}{L_m} = \sqrt{\frac{m}{m-1}} \quad (3-2)$$

จากสมการที่ 3-2 แสดงให้เห็นถึงอัตราขยายแรงดันที่ความถี่เรโซนансมีค่ามากกว่าหนึ่ง เล็กน้อย ทั้งนี้ทั้งนั้นถ้าหากจำลองด้วยเทคนิคการประมาณสารมอนิกอันดับหนึ่งที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 แสดงในภาพที่ 3.1 ก) จะมีค่าอัตราขยายแรงดันเท่ากับหนึ่งที่ความถี่เรโซนансเนื่องจากค่า เหนี่ยวนำร่ววไฟล์ผู้ทุติยภูมิมีค่าเป็นศูนย์สามารถพิสูจน์ได้จากการแทนค่า $L_{lks} = 0$ ลงในสมการ 3-2

ไฟล์ชาร์ตขั้นตอนการออกแบบโดยใช้เทคนิคการประมาณสารมอนิกอันดับหนึ่งแสดงดัง ภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ไฟล์วิชาชีร์ตขั้นตอนการออกแบบโดยใช้เทคนิคการประมาณหารมอนิกอันดับหนึ่ง

ข้อกำหนดของวงจรแปลงผัน (Converter Specifications)

$$\text{กำหนด } V_{in} = 380 - 400 \text{ V}_{dc}$$

$$V_{out} = 26 \text{ V}$$

$$P_{out} = 208 \text{ W } (I_{out} = 8 \text{ A})$$

$$E_{ff} \geq 94 \%$$

$$f_o = 100 \text{ kHz}$$

3.1.1 เลือกอัตราส่วนค่าเหนี่ยวนำ (m)

อัตราส่วนค่าเหนี่ยวนำเป็นตัวแปรที่สำคัญมากในการออกแบบวงจรแปลงผัน เร โโซนนช์แบบแอลแอลซีซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าตัวเหนี่ยวนำ เร โโซนนช์แบบขนาน (L_p) ต่อค่าตัวเหนี่ยวนำเร โโซนนช์แบบอนุกรม (L_r) แสดงดังสมการที่ 3-4

จากสมการที่ 3-3 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ขึ้นอยู่กับอัตราขยายแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ ตัวแปร m และตัวแปร Q ถ้าหากการออกแบบเสร็จสิ้นตัวแปร f_o , m และ n จะเป็นค่าคงที่ เพราะฉะนั้นแรงดันเอาต์พุตสามารถเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันอินพุต (V_{in}) หรือตัวประกอบคุณภาพ (Q) ซึ่งสื่อถึงโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตเกิดการรักษาระดับแรงดัน (voltage regulation) ความถี่การสวิตช์ (f_{sw}) ต้องเปลี่ยนแปลงเพื่อทำการลดเชยbalance มีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน อินพุตหรือโหลดดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

$$V_{out} = M(f_{sw}/f_o, m, Q) \times \frac{1}{n} \times \frac{V_{in}}{2} \quad (3-3)$$

$$m = \frac{L_p}{L_r} \quad (3-4)$$

$$Q^e = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_{ac}^e} \quad (3-5)$$

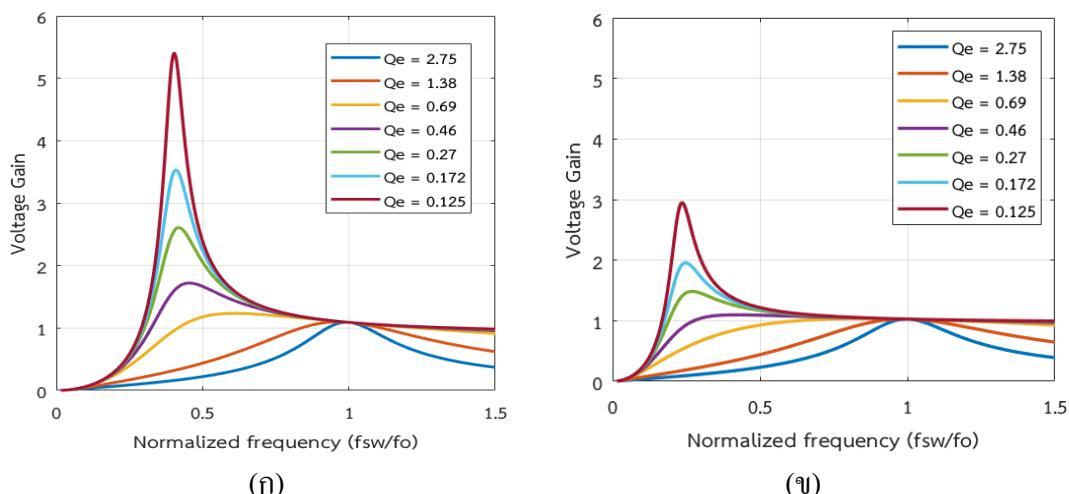
หมายเหตุ L_p และ L_r สามารถถูกวัดโดยใช้เครื่อง LCR Meter โดยทำการวัดที่ผ่านปฐมภูมิ และเบิดวงจรหรือปิดวงจรในผ่านทุกภูมิตามลำดับ ดังนั้นจากแบบจำลองในภาพที่ 3-1 ข) ค่า L_p และ L_r สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3-6 และ 3-7 ตามลำดับ

$$L_p = L_{lkp} + L_m \quad (3-6)$$

$$L_r = L_{lkp} + L_m / (n^2 L_{lks}) \quad (3-7)$$

จากภาพที่ 3-3 แสดงการเปลี่ยนค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q^e) ซึ่งสื่อถึงการเปลี่ยนแปลง โหลดส่งผลให้อัตราขยายแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง จากภาพที่ 3-3 ก) แสดงถึงค่า $m = 6.287$ และ

ภาพที่ 3-3 ข) แสดงค่า $m = 19.166$ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าค่า m เป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกเนื่องจากถ้าค่า m มีค่าสูงจะส่งผลให้วงจรมีประสิทธิภาพสูงขึ้นแต่อาจจะส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตไม่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามที่ต้องการและการเกิด ZVS ทำได้ยากเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน L_m มีค่าต่ำลงทำให้พลังงานที่เก็บไว้ใน L_m อาจจะมีค่าน้อยเกินกว่าจะคลายพลังงานที่อยู่ในตัวเก็บประจุแห้งในเพาเวอร์มอสเฟตได้สำเร็จ ถ้าค่า m มีค่าต่ำการทำให้เกิด ZVS ทำได้ง่ายเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน L_m เพื่อกีบพลังงานมีค่าสูงพอที่จะสามารถคลายพลังงานที่อยู่ในตัวเก็บประจุแห้งในเพาเวอร์มอสเฟตได้และประสิทธิภาพวงจรจะต่ำลงเนื่องจากเกิดกำลังสูญเสียจากการนำสูงขึ้นแต่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้



ภาพที่ 3-3 แสดงกราฟอัตราขยายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง Q และการเปลี่ยนแปลง m

ก) $m = 6.287$ ห) $m = 19.166$

เลือกค่า $m = 6$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับผู้ออกแบบเริ่มต้น

3.1.2 กำหนดอัตราขยายแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของโครงข่ายเรโซแนนซ์

ในการออกแบบครั้งนี้กำหนดให้อัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราขยายต่ำสุดจากสมการที่ 3-2

$$M^{\min} = M_{@f_0} = \sqrt{\frac{m}{m - 1}} \quad (3-8)$$

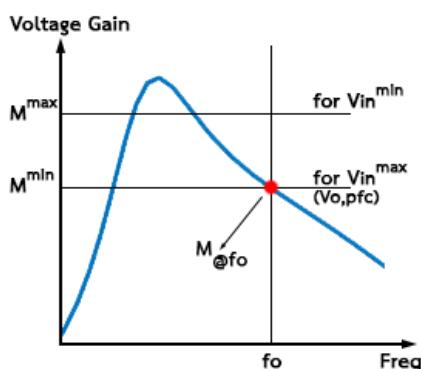
$$M^{\min} = \sqrt{\frac{6}{6 - 1}} = 1.0954$$

เพื่อให้เกิดการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตเมื่อแรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง (Line regulation) จึงสามารถคำนวณหาอัตราขยายสูงสุดได้จากสมการที่ 3-4

$$M^{\max} = \frac{V_{in}^{\max}}{V_{in}^{\min}} M^{\min} \quad (3-9)$$

$$M^{\max} = \frac{400}{380} \times 1.0954 = 1.153$$

เพราะฉะนั้นถ้าแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 380 V อัตราขยายแรงดันจะมีค่าเท่ากับ 1.153 แต่ถ้าหากแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 400 V อัตราขยายแรงดันจะมีค่าเท่ากับ 1.0954 ทำให้วงจรแปลงผันเรโซซแนนซ์แบบแอลแอลซีสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ดังภาพที่ 3-4 โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราขยาย M ซึ่งเป็นพิฟ์ชันของความถี่การสวิตช์ f_{sw}



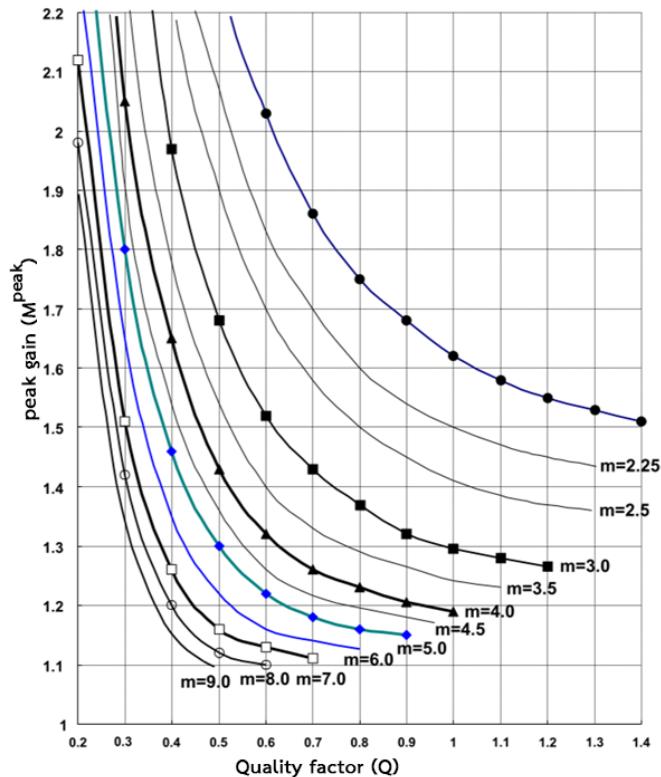
ภาพที่ 3-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตในช่วงที่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้โดยตัวแปร Q° หรือโหลดคงที่

3.1.3 เลือกตัวประกอบคุณภาพ

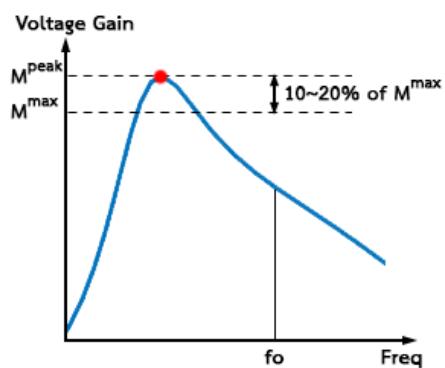
จากหัวข้อ 3.1.1 ค่า m ที่ถูกเลือกคือ 6 และจากหัวข้อที่ 3.1.2 อัตราขยายสูงสุดที่คำนวณ มีค่าเท่ากับ 1.153 ในกราฟต้องการออกแบบต้องกำหนดให้อัตราขยายสูงสุด (M^{\max}) มีค่ามากกว่าค่าออดอัตราขยาย (M^{peak}) โดยต้องกำหนดส่วนเพิ่ม (margin) เพื่อป้องกันการเข้าสู่พื้นที่ตัวเก็บประจุ (capacitive region) และการออกแบบครั้งนี้คือการออกแบบที่โหลดเต็มพิกัด (Full load) ดังนั้นถ้าหากมีการกำหนดส่วนเพิ่มแล้วนั่นหมายความว่าจะรับแรงดันผันเรโซซแนนซ์แบบแอลแอลซีสามารถดึงโหลดมากเกินกว่าโหลดเต็มพิกัดได้ ทั้งนี้ทั้งนั้นวงจรแปลงผันเรโซซแนนซ์แบบแอลแอลซีต้องไม่เข้าสู่พื้นที่ตัวเก็บประจุ เพราะจะทำให้สูญเสียการเกิด ZVS และทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรได้ กำหนดส่วนเพิ่ม 10% และดังสมการที่ 3-10

$$M^{\text{peak}} = M^{\text{max}} \times 110\% \quad (3-10)$$

$$M^{\text{peak}} = 1.153 \times 110\% = 1.2683$$



ภาพที่ 3-5 ค่ายอดของอัตราขยายเทียบกับตัวประกอบคุณภาพสำหรับความแตกต่างของ m



ภาพที่ 3-6 แสดงค่ายอดอัตราขยายกับอัตราขยายสูงสุด

จากภาพที่ 3-5 ทำการลากเส้นจากแกนค่ายอดอัตราขยาย (peak gain) ที่มีค่าเท่ากับ 1.2683 มาตัดกับเส้นโถง m เท่ากับ 6 ดังนั้น Q^* ที่เลือกคือ 0.45

3.1.4 กำหนดอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{in}^{max}}{2(V_o + V_F)} M_{@f_0} \quad (3-11)$$

$$n = \frac{400}{2(26 + 0.48)} = 1.0954 = 8.2734$$

เลือก $n = 8.3$

3.1.5 คำนวณค่าความต้านทานโหลดสมมูล

หลักการพิสูจน์สูตรค่าความต้านทานโหลดสมมูลที่แสดงในหัวข้อที่ 2.5 สามารถนำมาใช้กับแบบจำลองในภาพที่ 3-1 ข) ได้ทุกประการ เพียงแต่ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้มีพจน์ของ $M_{@f_0}$ เพิ่มขึ้นมาแสดงดังสมการที่ 3-12

$$R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} \times \frac{V_o^2}{P_o} \times \frac{1}{M_{@f_0}^2} \quad (3-12)$$

$$R_{ac} = \frac{8(8.3)^2}{\pi^2} \times \frac{(26)^2}{208} \times \frac{1}{1.0954^2} = 151.246 \Omega$$

3.1.6 ออกแบบโครงข่ายเรโซแนนซ์

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_o Q R_{ac}} \quad (3-13)$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi \times (100 \times 10^3) \times (0.45) \times (151.246)} = 23.384 nF$$

เลือก $C_r = 22 nF$

$$f_o = \frac{1}{2\pi C_r Q R_{ac}} \quad (3-14)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi \times (22 \times 10^{-9}) \times (0.45) \times (151.246)} = 106.292 kHz$$

$$L_r = \frac{Q R_{ac}}{2\pi f_o} \quad (3-15)$$

$$L_r = \frac{(0.45) \times (151.246)}{2\pi \times (106.292 \times 10^{-3})} = 101.9098 \mu H$$

$$L_p = mL_r \quad (3-16)$$

$$L_p = 6 \times (101.9098 \times 10^{-6}) = 611.4588 \mu\text{H}$$

3.1.7 ค่าสูดท้ายของการออกแบบโครงข่ายเรโซแนนซ์

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าสูดท้ายของการออกแบบโครงข่ายเรโซแนนซ์

ตัวแปร	ค่าที่ได้จากการคำนวณ	ค่าที่ได้จากการทดลอง
L_p	$611.4588 \mu\text{H}$	$656.46 \mu\text{H}$
L_r	$101.9098 \mu\text{H}$	$104 \mu\text{H}$
C_r	22 nF	22 nF
f_o	106.292 kHz	105.22 kHz
m	6	6.312
M^{\min} หรือ $M_{@f_0}$	1.0954	1.09
M^{\max}	1.1531	1.147368
n	8.3	8.31
Q	0.45	0.449
f_{\min}	93.5 kHz	91.17 kHz

หมายเหตุ L_p และ L_r สามารถถูกวัดโดยใช้เครื่อง LCR Meter ซึ่งวัดที่ผังปฐมภูมิและเปิดวงจรหรือปิดวงจรในผังทุติยภูมิตามลำดับ

3.1.8 ออกแบบหน้อแปลง

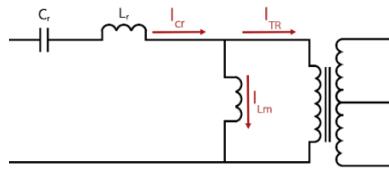
เลือกใช้เกนเฟอร์ไรท์วัสดุ N87 เนื่องจากเกนมีช่วงความถี่การทำงาน 25-500 kHz และโดยปกติเกนเฟอร์ไรท์จะมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กโดยประมาณเท่ากับ 0.3 T

$$N_p^{\min} = \frac{n(V_o + V_F)}{2f_{sw}^{\min} \times M_v \times V_B \times A_e} \quad (3-17)$$

$$N_p^{\min} = \frac{8.31 \times (26 + 0.48)}{2 \times (91.17 \times 10^3) \times (1.09) \times (0.32) \times (173 \times 10^{-6})} = 19.999 \text{ turns}$$

เลือก $N_p = 31.5 \text{ turns}$

3.1.7 เลือกตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์



ภาพที่ 3-7 ทิศทางการไหลของกระแสในโครงข่ายเรโซแนนซ์และหนึ่งแปลง

$$\begin{aligned}
 I_{Cr}^{rms} &= \frac{1}{E_{ff}} \sqrt{(I_{Tr})^2 + (I_{Lm})^2} \\
 I_{Cr}^{rms} &= \frac{1}{E_{ff}} \sqrt{\left(\frac{\pi I_o}{2n\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{n(V_o + V_F)}{4\sqrt{2}f_o M_v (L_p - L_r)}\right)^2} \\
 I_{Cr}^{rms} &= \frac{1}{0.94} \sqrt{\left[\frac{\pi(8)}{2(8.31)\sqrt{2}}\right]^2 + \left[\frac{8.31(26 + 0.48)}{4\sqrt{2}(105.22k)(1.09)[(656.49\mu) - (104\mu)]}\right]^2}
 \end{aligned} \tag{3-18}$$

$$I_{Cr}^{rms} = 1.31168A$$

คำนวณหาแรงดันตกคลื่นตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ (C_r)

$$V_{Cr}^{nom} = \frac{V_{in}^{max}}{2} + \left(\sqrt{2} \times I_{Cr}^{rms}\right) \times \frac{1}{2\pi f_o C_r} \tag{3-19}$$

$$V_{Cr}^{nom} = \frac{400}{2} + \left(\sqrt{2} \times (1.31168)\right) \times \frac{1}{2\pi \times (105.22k) \times (22n)} = 327.5387V$$

เลือกตัวเก็บประจุแบบฟิล์มที่มีพิกัดแรงดันสูงสุด 630 V และมีค่า ESR ค่าต่ำ

3.1.8 ออกแบบโครงข่ายเร็กติไฟออร์

$$V_D = 2(V_o + V_F) \tag{3-20}$$

$$V_D = 2(26 + 0.48) = 52.96V$$

$$I_{D_{rms}} = \frac{\pi}{4} I_o \sqrt{\frac{f_o}{f_s}} \tag{3-21}$$

$$I_{D_{rms}} = \frac{\pi}{4} \times (8) \times \sqrt{\frac{(105.2 \times 10^3)}{(105.2 \times 10^3)}} = 6.283A$$

$$I_{CO_{rms}} = I_o \sqrt{\frac{\pi^2 f_o}{8f_s} - 1} \tag{3-15}$$

$$I_{CO_{rms}} = (8) \sqrt{\frac{\pi^2 \times (105.22k)}{8 \times (105.22k)}} - 1 = 3.867A$$

3.2 จำลองวงจรสมมูลด้วยโปรแกรม MATLAB

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3-1 สามารถถูกนำมาคำนวณหาค่า L_{lkp} , L_{lks} และ L_m โดยแทนค่า $L_r = 104.433\mu H$ และ $L_p = 656.59\mu H$ ลงในสมการที่ 3-6 และสมการที่ 3-

7 และตั้งสมมุติฐาน $n^2 L_{lks} = L_{lkp}$

$$104.433 \times 10^{-6} = L_{lkp} + L_m / L_{lkp}$$

$$656.59 \times 10^{-6} = L_{lkp} + L_m$$

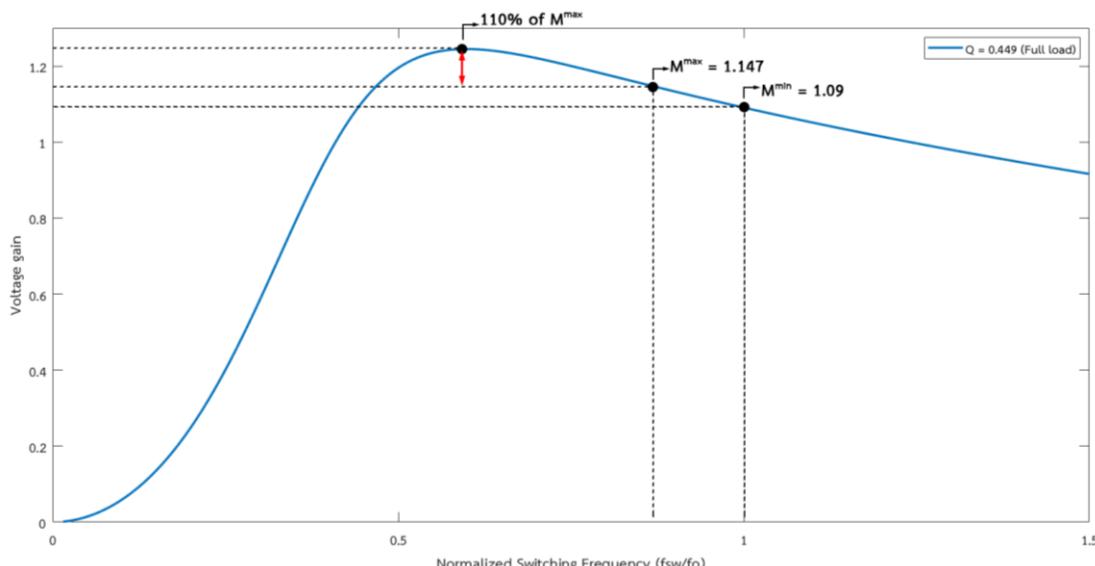
แก้สมการหาค่า L_{lkp} , L_{lks} และ L_m

$$L_{lkp} = 54.26595354\mu H$$

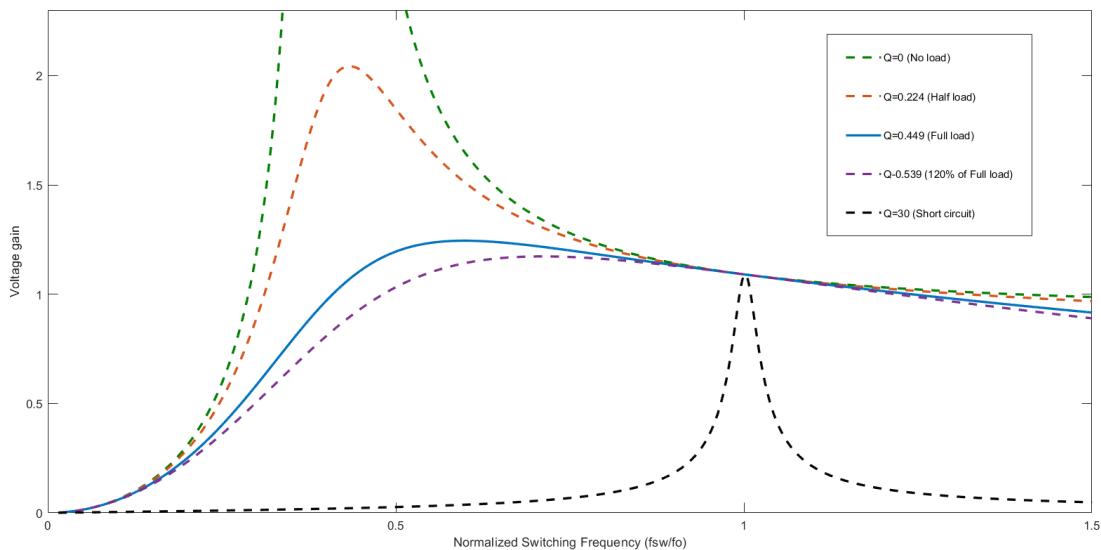
$$L_m = 602.3240465\mu H$$

$$n^2 L_{lks} = L_{lkp} = 54.26595354\mu H$$

จากนั้นนำสมการที่ 3-1 แทนค่า $C_r=22\text{ nF}$, $L_m=602.3240465\mu H$, $R_{ac}=151.246\Omega$, $L_{lkp}=54.26595354\mu H$ และ $n^2 L_{lks}=54.26595354\mu H$ ทำการพล็อตในโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์แสดงดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 อัตราขยายแรงดันที่โหลดเต็มพิกัด



ภาพที่ 3-9 อัตราขยายแรงดันที่โหลดค่าต่าง ๆ

จากภาพที่ 3-8 แสดงให้เห็นว่าค่า M^{\min} ที่ถูกคำนวณในสมการที่ 3-8 และค่า M^{\max} ที่ถูกคำนวณในสมการที่ 3-9 เกิดการตัดกันกับกราฟอัตราขยายที่พล็อตด้วยโปรแกรม MATLAB ในช่วงความถี่ 91.17–105.22 kHz ดังนั้นล่งผลให้วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีเกิดการรักษาะดับแรงดันเอาต์พุตในช่วงการทำงานที่กำหนดได้

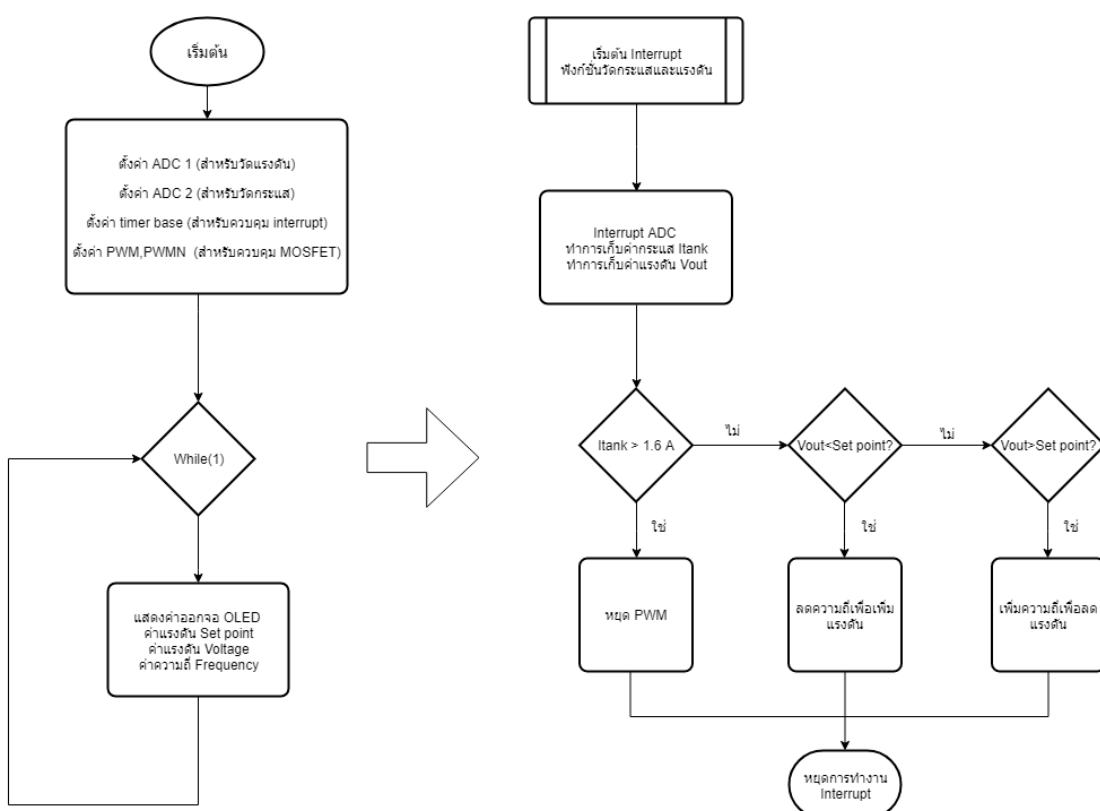
จากภาพที่ 3-9 แสดงให้เห็นว่าถ้าหากวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีเริ่มต้นทำงานที่โหลดเต็มพิกัด ($Q = 0.449$) และเปลี่ยนแปลงโหลดเป็นโหลดครึ่งพิกัด ($Q = 0.224$) หรือไม่มีโหลด ($Q = 0$) วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีจะยังคงสามารถรักษาะดับแรงดันได้ในช่วงความถี่ที่กำหนด ($f^{\min} - f^{\max}$) และถ้าวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีทำการดึงโหลดที่มากขึ้นเป็น 120% ของโหลดเต็มพิกัดจะทำให้วงจรสามารถทำงานได้อยู่เนื่องจากการออกแบบได้มีการกำหนดส่วนเพิ่ม 10% แต่ถ้าหากเกิดการดึงโหลดมากขึ้นหรือเกิดการลัดวงจรจะทำให้วงจรไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากวงจรได้เข้าสู่พื้นที่ตัวเก็บประจุ (capacitive region) ในทางปฏิบัติถ้าเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ต้องทำงานหยุดป้อนสัญญาณໄคฟ์ที่ป้อนให้วงจรทันทีหรือเพิ่มความถี่การสวิตช์ให้สูงขึ้นเพื่อลดอัตราขยายของวงจรแล้วให้วงจรเข้าสู่พื้นที่ตัวเหนี่ยวนำ (inductive region) ไม่เช่นนั้นจะเกิดความเสียหายกับวงจรได้

3.3 การออกแบบการควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop)

การควบคุมวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลเอลซีในปริญญาอินพันธ์เล่นนี้คือการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อทำการรักษาแรงดันไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงหากมีการเปลี่ยนโหลดหรือเปลี่ยนแรงดันอินพุต และตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านแทงค์เรโซแนนซ์ เพื่อทำการป้องกันความเสียหายหากโหลดมีความต้องการกระแสมากเกินไปโดยกระแสที่ไหลผ่านโครงข่ายเรโซแนนซ์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสเอาต์พุตของวงจร [3]

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อทำการรักษาแรงดันโดยการเปลี่ยนอัตราขยาย (M) ผ่านการเปลี่ยนแปลงความถี่การสวิตช์ (f_{sw}) เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตขึ้นกับตัวแปร f_{sw} โดยที่ตัวแปร m , n เป็นค่าคงที่หลังจากการออกแบบเสร็จลิ้นดังที่แสดงในสมการที่ 3-3

สำหรับการควบคุมเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ P ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงไว้ในบทที่ 4 โค๊ดที่ใช้ในการควบคุมแสดงได้ในภาคผนวก ค โดยแนวทางการเขียนถูกแสดงไว้ในภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-10 ผังงานหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.4 การเลือกอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี

3.4.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ด้วยเหตุผลของความหยาดหยุ่นในการโปรแกรม ความไวในด้านของการสร้างสัญญาณ พลัต์ความถี่สูงรวมถึงการเก็บผล (sampling) เราจึงเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แทนการใช้ วงจรรวม (integrated circuit) แบบอนาล็อกทั่วๆไป โดยเลือกใช้ STM32F407VG เนื่องจากเป็น ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 32 บิต และมีความเร็วในการประมวลผลถึง 168 MHz ซึ่งสามารถ เชื่อมต่อ กับ โปรแกรม MATLAB ได้โดยใช้บล็อกเซ็ต ที่ชื่อว่า Waijung Blockset และ ใน ปริญานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วิธีเขียนโค้ดแทนผ่านโปรแกรม STM32CubeMX ผนวกกับ Keil uVision 5

3.4.2 วงจรขับเกต (Gate drive circuit)

จากภาพที่ 2-16 ในภาคคำแนะนำลีนส์เหลี่ยม (Square-Wave Generator) ประกอบไปด้วย เพาเวอร์มอสเฟตจำนวน 2 ตัว ทำการต่อเป็นรูปแบบวงจรสวิตช์ชิงขาไฟบริดจ์โดยเพาเวอร์มอสเฟต M_1 วางตำแหน่งเป็นฝั่งสูง (high side) และเพาเวอร์มอสเฟต M_2 วางตำแหน่งเป็นฝั่งต่ำ (low side) จะเห็นได้ว่าถ้าหากต้องการขับเกตที่เพาเวอร์มอสเฟต M_1 ที่ขาเดрен (drain) ของ M_2 หรือขาซอร์ส (source) ของ M_1 มีศักย์แรงดันสูงซึ่งเป็นเหตุผลในการเลือกใช้อิซีที่มีฟังก์ชันการขับมอสเฟตที่มี การต่อแบบฝั่งสูง (high side) และฝั่งต่ำ (low side) พร้อมทั้งสามารถต่อวงจรบูตสูตร (bootstrap) ร่วมเข้าไปด้วยได้และนี้เป็นเหตุผลที่เลือกใช้ IR2110 เป็นวงจรขับเกต

3.4.3 เพาเวอร์มอสเฟต

เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟตเบอร์ SPW20N60S5 เนื่องจากมีแรงดันเดрен-ซอร์สสูงสุด 600V (แรงดันอินพุต 400V) ค่า $R_{DS(on)}$ มีค่าต่ำทำให้เกิดกำลังสูญเสียการนำกระแสปิดสวิตช์ (turn-on) มีค่าน้อย

3.4.4 หม้อแปลง

เลือกแกนเพอร์ไทร์วัสดุ N87 เนื่องจากแกนมีช่วงความถี่การทำงาน 25-500 kHz โดย วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีทำงานในช่วงความถี่ไม่เกิน 150kHz

3.4.5 ไอดีโอด

เลือกใช้ไอดีโอดเบอร์ STPS10L60 เนื่องจากเป็นไอดีโอดแบบชอทท์กี้ (Schottky) ที่มีพิกัด แรงดันหนาแน่นกับวงจรและที่สำคัญคือมีแรงดันตกคลื่นขณะไอบัตตร (forward voltage drop) เพียง 0.48V

3.5.4 วงจรวัดกระแสและวงจรวัดแรงดัน

ในส่วนของวงจรวัดกระแสเลือกใช้การวัดด้วยหม้อแปลงกระแส (Current transformer : CT) เพื่อทำการแยกกระแสต่อร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบคริ่งคลีนเพื่อส่งเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการใช้ข้อมูลกระแสสำหรับการป้องกันโหลดเกิน (Overload protection)

ในส่วนของวงจรวัดแรงดันใช้ตัวต้านทานต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดันจากนั้นต่อร่วมกับไอโซเมเตอร์ ACPL-C87A-00E ซึ่งเป็นไอโซเมเตอร์สำหรับแยกกระแสและขยาย (Isolation Amplifier) เพื่อส่งเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการใช้ข้อมูลแรงดันที่ทำการวัดสำหรับรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตดังสมการ 3-3 วงจรวัดกระแสและวงจรวัดแรงดันแสดงดังภาพที่ ก-1

บทที่ 4

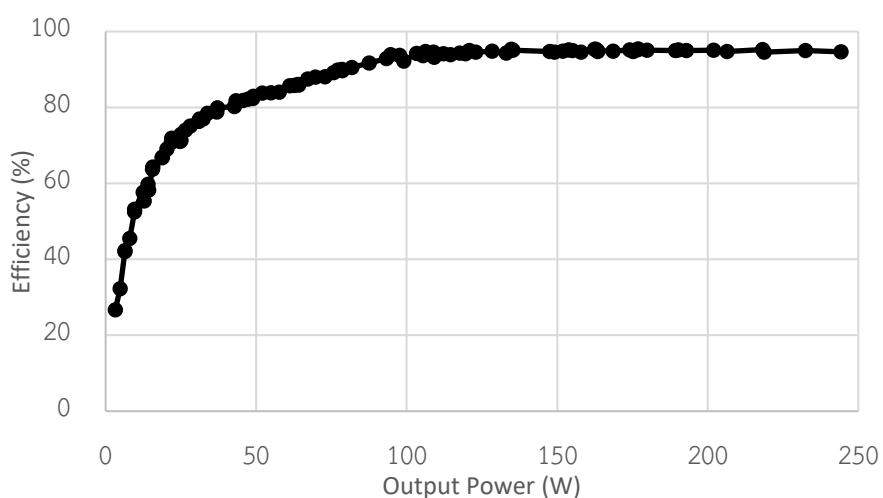
ผลการทดสอบ

บทนี้จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของจ่ายเปลี่ยนเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี โดยแบ่งเป็นการทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิด (Open-loop control) และการทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control) โดยมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันเอาต์พุต โดยการปรับเปลี่ยนความถี่สวิตช์และมีระบบการป้องกันเมื่อกระแสไฟลดเกินพิกัด โดยแบ่งการทดสอบและสรุปผลใน 3 หัวข้อได้แก่ การทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิด การทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิดและการทดสอบการสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS)

4.1 การทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิด (Open loop control)

4.1.1 ประสิทธิภาพเทียบกับการเปลี่ยนแปลงโหลด

กำหนดความถี่การสวิตช์มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ($f_s = f_o = 105.2 \text{ kHz}$)



ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงประสิทธิภาพเทียบกับการเปลี่ยนแปลงโหลด

สรุปผลที่ได้คือ สังเกตเห็นว่าที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในช่วง 100-250 วัตต์ ประสิทธิภาพเฉลี่ยประมาณ 94 เปอร์เซนต์และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 80 วัตต์ ประสิทธิภาพมีค่า 90 เปอร์เซนต์ และหลังจากนั้นลดลงต่อไปตามลำดับเนื่องจากวงจรสูญเสียกำลังไฟฟ้าภายในโดยประมาณ 10 วัตต์ ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเสมอไม่ว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตเท่าใดก็ตาม เพราะฉะนั้นที่กำลังไฟฟ้าอินพุตมีค่ามาก โดยกำลังสูญเสียภายในวงจรยังคงเท่าเดิม จึงทำให้ประสิทธิภาพสูง เพราะว่ากำลังสูญเสียภายในมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าอินพุต แต่ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าอินพุตมีค่าน้อย โดยกำลังสูญเสียภายในวงจรยังคงเท่าเดิม จึงทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่ากำลังสูญเสียภายในมีค่ามากขึ้นหรือใกล้เคียงเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าอินพุต ซึ่งถ้าต้องการประสิทธิภาพที่มากกว่า 90 เปอร์เซนต์วางแผนผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีต้องทำงานในช่วงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตตั้งแต่ 80 วัตต์ขึ้นไปดังแสดงในภาพที่ 4-1

4.1.2 การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตแบบวงเวียน

ตารางที่ 4-1 แรงดันเอาต์พุตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดและทำงานใกล้ความถี่เรโซแนนซ์

I_{out} (A)	V_{out} (V)	P_{out} (W)	Freq (kHz)	duty (%)
8.67	26.2	227.154	105.4	41.1-41.2
8.13	26.23	213.2499	105.4	41.1
7.57	26.27	198.8639	105.4	41.1
7.02	26.3	184.626	105.4	41.1
6.79	26.32	178.7128	105.4	41.1
6.57	26.33	172.9881	105.4	41.1
6.35	26.34	167.259	105.4	41.1
6.03	26.37	159.0111	105.4	41.1
5.92	26.38	156.1696	105.4	41.1
4.045	26.49	107.1521	105.4	41.1
3.475	26.53	92.19175	105.4	41.1
2.908	26.56	77.23648	105.4	41.1
2.343	26.6	62.3238	105.4	41.1
1.74	26.65	46.371	105.4	41.1
1.174	26.72	31.36928	105.4	41.1
0.95	26.7	25.365	105.4	41.1

ตารางที่ 4-1 (ต่อ) แรงดันเอาต์พุตเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดและทำงานใกล้ความถี่เรโซแนนซ์

I_{out} (A)	V_{out} (V)	P_{out} (W)	Freq (kHz)	duty (%)
0.714	26.85	19.1709	105.4	41.1
0.471	26.96	12.69816	105.4	41.1
0.241	27.15	6.54315	105.4	41.1
0.118	27.33	3.22494	105.4	41.1
0.059	27.47	1.62073	105.4	41.0-41.1

สรุปผลที่ได้คือ จากภาพที่ 2-17 แสดงกราฟอัตราขยายของจรวจแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซี แต่ละเส้นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงโหลดซึ่งพบว่าทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงของโหลดจะมีอัตราขยายเท่ากันที่ความถี่เรโซแนนซ์ แต่จากการทดลองดังแสดงตารางที่ 4-1 พบว่า ถ้าทำการเปลี่ยนโหลด แรงดันเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลง ทำให้ได้ข้อสรุปที่ว่า วงจรไม่ได้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ แต่ทำงานที่บริเวณใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้วงจรสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้ ดังนั้นจึงใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VG เป็นตัวควบคุมซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-2

4.2 การทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิดด้วยการปรับความถี่สวิตช์ (Closed-loop control)

ทดสอบโดยใช้บอร์ด STM32F407VG เป็นตัวควบคุมแบบพี (P control) ซึ่งมีการรับค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรวัดแรงดันเพื่อทำการรักษาระดับแรงดันและมีการรับค่ากระแสที่แท่งค์เรโซแนนซ์เพื่อทำการป้องกันเมื่อเกิดโหลดเกิน (Overload protection) ดังภาพที่แสดงในภาคผนวก ก และโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนดังแสดงในภาคผนวก ก

4.2.1 การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตแบบวงปิดด้วยการปรับความถี่สวิตช์

ตารางที่ 4-2 การควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตโดยการปรับเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์

I_{out} (A)	V_{out} (V)	P_{out} (W)	freq (kHz)	duty (%)
8.67	26.17	226.8939	105.8	41.1
8.11	26.17	212.2387	106	41.1
7.54	26.18	197.3972	16.4	41
6.99	26.17	182.9283	106.7	41
6.75	26.17	176.6475	106.8	41

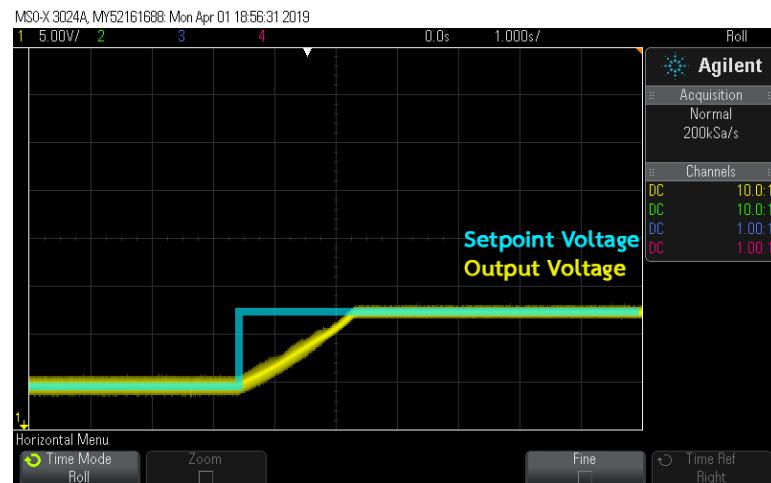
ตารางที่ 4-2 (ต่อ) การควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตโดยการปรับเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์

I_{out} (A)	V_{out} (V)	P_{out} (W)	freq (kHz)	duty (%)
6.54	26.17	171.1518	107	40.9
6.32	26.17	165.3944	107.1	40.9
5.99	26.17	156.7583	107.3	40.9
5.88	26.17	153.8796	107.4	40.9
4	26.17	104.68	108.5	40.8
3.43	26.17	89.7631	108.8	40.7
2.865	26.17	74.97705	109.3	40.7
2.305	26.17	60.32185	109.6	40.7
1.705	26.17	44.61985	110.1	40.7
1.15	26.17	30.0955	110.8	40.6
0.929	26.18	24.32122	111.3	40.5
0.696	26.17	18.21432	112.2	40.4
0.457	26.17	11.95969	113.4	40.3
0.232	26.17	6.07144	115.9	40.1
0.113	26.17	2.95721	118.1	39.9
0.056	26.17	1.46552	119.9	39.8

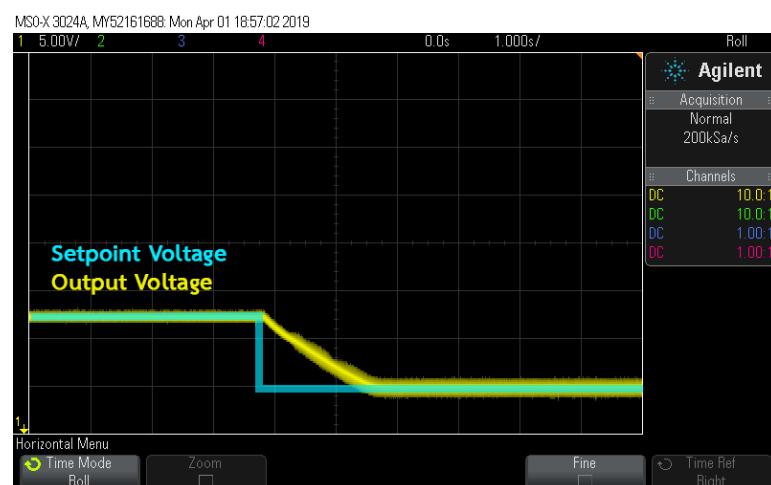
สรุปผลที่ได้คือ จากตารางที่ 4-2 สังเกตเห็นว่าเมื่อตั้งแรงดันจุดที่กำหนด (Setpoint voltage) ไว้ที่ 26.17 โวลต์ หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงโหลดส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป แต่แรงดันเอาต์พุตไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเปลี่ยนความถี่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความถี่ส่งผลให้อัตราขยายมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงสมการที่ 3-18 เพื่อทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดกำหนดหรือเป็นการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

4.2.2 ทดสอบโดยการเปลี่ยนแรงดันจุดที่กำหนด (Setpoint voltage)

ภาพที่ 4-2 ก) แสดงการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตจาก 21 โวลต์ เป็นแรงดันเอาต์พุต 29 โวลต์ และภาพที่ 4-2 ข) แสดงการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตจาก 29 โวลต์ เป็นแรงดันเอาต์พุต 21 โวลต์ ตามลำดับ



(ก)



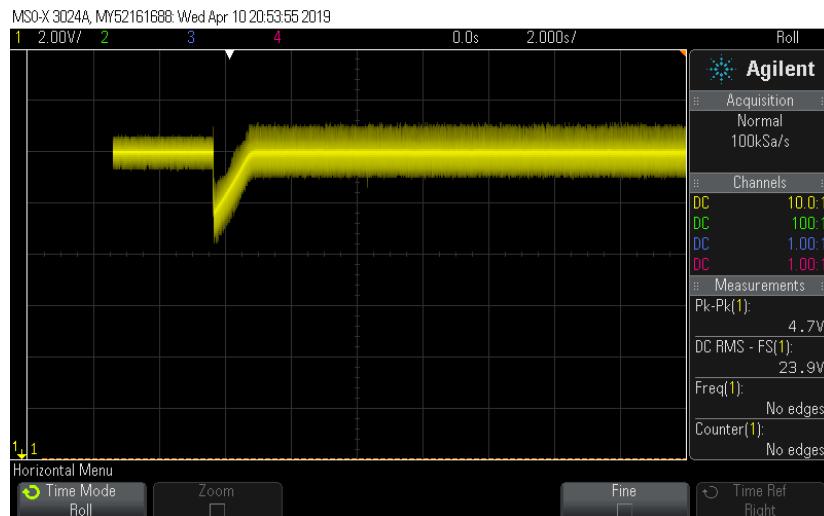
(ข)

ภาพที่ 4-2 ผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนแรงดันจุดที่กำหนด

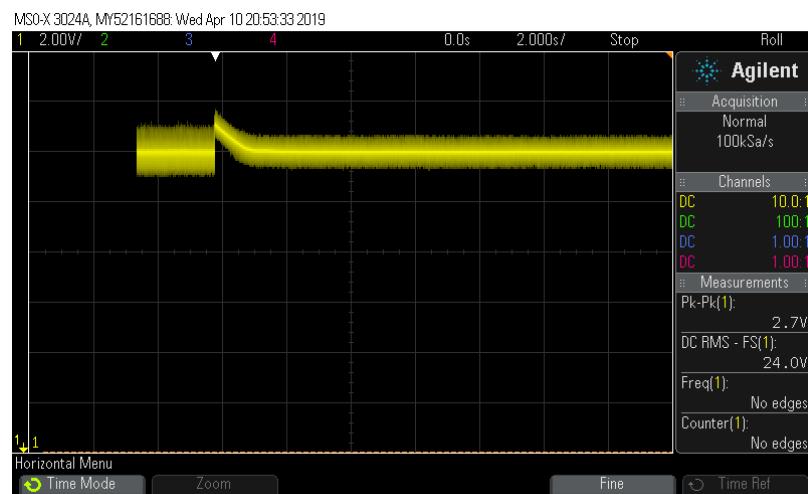
สรุปผลที่ได้คือผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตเข้าสู่สภาวะคงตัวใช้เวลาไม่เกิน 2 วินาที โดยไม่เกิดโอเวอร์ชูต (Overshoots)

4.2.3 ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลด

ภาพที่ 4-3 ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 18.8 โอห์มเป็น 3.1 โอห์มและภาพที่ 4-3 ข) แสดงการเปลี่ยนโหลดจาก 3.1 โอห์มเป็น 18.1 โอห์มตามลำดับ



(ก)

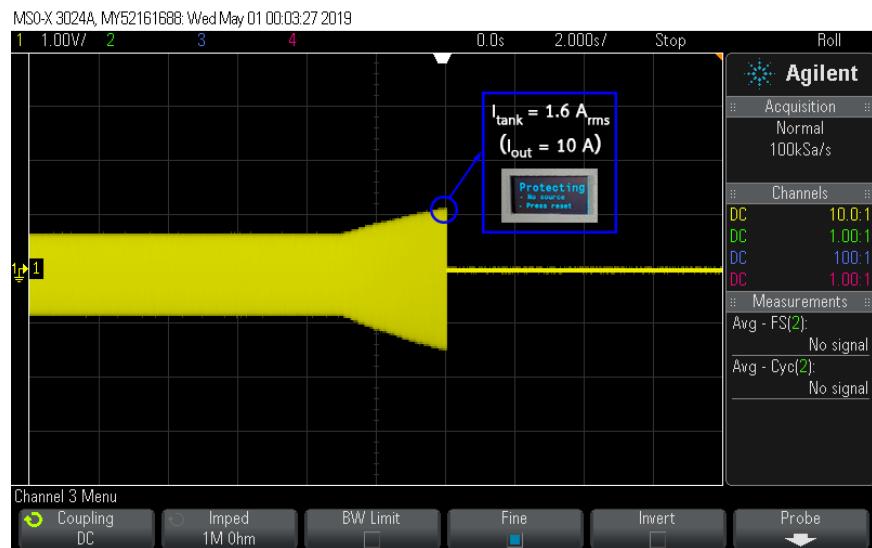


(ข)

ภาพที่ 4-3 ผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนโหลด

สรุปผลที่ได้คือผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตเข้าสู่สภาวะคงตัวจากภาพ ก เป็นการเปลี่ยนแปลงโหลดที่ 13 เบอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นเป็น 100 เบอร์เซ็นต์ ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวใช้เวลาไม่เกิน 2 วินาที ภาพ ข เป็นการลดโหลดจาก 100 เบอร์เซ็นต์ เหลือ 13 เบอร์เซ็นต์ใช้เวลาไม่เกิน 2 วินาทีเช่นกัน

4.2.4 ทดสอบการป้องกันเมื่อเกิดโหลดเกิน (Overload protection)

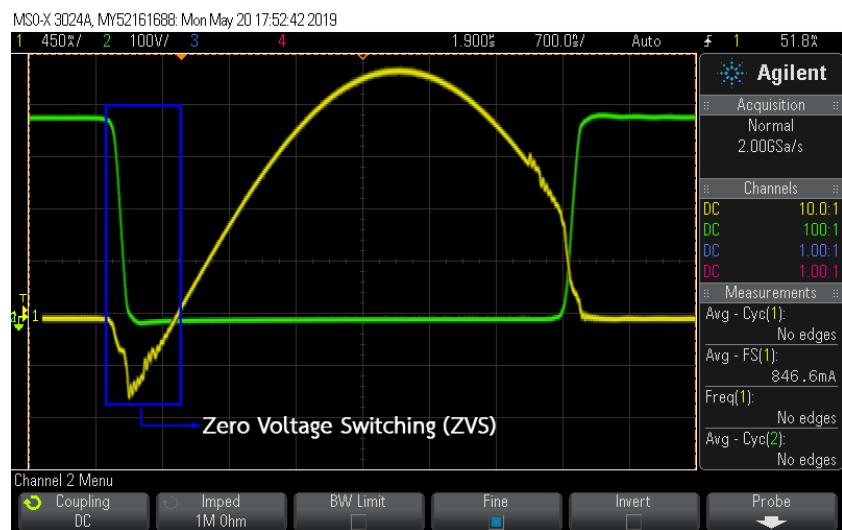


ภาพที่ 4-4 การป้องกันเมื่อเกิดโหลดเกิน

สรุปผลที่ได้คือ ในสภาวะปกติมีกระแสในแทงค์เร โซชแนนซ์เท่ากับ 0.862 แอมป์ แต่เมื่อเกิดโหลดเกินทำให้กระแสในแทงค์เร โซชแนนซ์มีค่าเท่ากับ 1.6 แอมป์ ($I_{out} = 10A$) บอร์ดไม่ได้รับสัญญาณ PWM ให้วงจรขับゲต (Gate drive circuit) ทันทีทำให้เพาเวอร์มอเตอร์หยุดการทำงานแสดงดังภาพที่ 4-4

4.3 การทดสอบการสวิตช์ขณะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS)

จากที่กล่าวในหัวข้อ 2.5 กฎเกณฑ์การขอฟ์สวิตช์จะเกิดขึ้นได้ต้องบรรลุ 3 เงื่อนไข โดยผลลัพธ์การทดลองที่แสดงให้เห็นถึงการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์แสดงภาพที่ 4-5 และภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-5 แรงดัน (V_{DS}) ของเพาเวอร์มอสเฟต และกระแส (I_D) ของเพาเวอร์มอสเฟต



ภาพที่ 4-6 แรงดัน (V_{GS}) ของเพาเวอร์มอสเฟต M1 (ลีเปี้ยว), แรงดัน (V_{GS}) ของเพาเวอร์มอสเฟต M2 (ลีชมนพุ) และแรงดัน (V_{DS}) ของเพาเวอร์มอสเฟต M2 (ลีเหลือง)

จากภาพที่ 4-5 แสดงให้เห็นว่าเพาเวอร์มอสเฟตเกิดการซื้อฟลัตช์ขณะปิดสวิตช์ (turn off) และ เกิดอาร์ดสวิตช์ขณะเปิดสวิตช์ (turn on) และในภาพที่ 4-6 แสดงให้เห็นว่าแรงดันขาเดренเทียบกับขาซอร์สของเพาเวอร์มอสเฟต M2 ลดลงเหลือศูนย์ก่อนที่ทำการปิดสวิตช์ (turn off) ซึ่งคือ คุณสมบัติของการเกิด ZVS

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การออกแบบวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีด้วยหลักของการประมาณสาร์มอนิกอันดับหนึ่งให้ผลลัพธ์ค่อนข้างแม่นตรงขณะการทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์แต่จะให้ผลลัพธ์ไม่แม่นตรงถ้าหากวงจรทำงานที่ความถี่มากกว่าหรือน้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์

ผลการทดสอบวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1. ทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิด (Open loop control) ให้ผลลัพธ์แรงดันเอาต์พุต 26.18 โวลต์ กำลังเอาต์พุต 210 วัตต์ ประสิทธิภาพของวงจร 94 เปอร์เซ็นต์ ขณะการทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 2.8-15.2 โอม ซึ่งคือข้อดีของวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีที่มีประสิทธิภาพสูงในช่วงการเปลี่ยนแปลงโหลดที่กว้าง 2. ทดสอบในโหมดการควบคุมแบบวงปิด (Close loop control) โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407VG เป็นตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อทำการรักษาแรงดันโดยการปรับความถี่สวิตช์ ผลตอบสนองที่ได้คือไม่เกิดโอเวอร์ชูตและมีช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) ไม่เกิน 2 วินาที (ทดสอบโดยการเปลี่ยนแรงดันจุดที่กำหนดและทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลด) และควบคุมกระแสผ่านปุ่มภูมิเพื่อทำการป้องกันกรณีกระแสเกินพิกัดโดยตั้งค่ากระแสที่แทรกเรโซแนนซ์ไว้ไม่เกิน 1.6 แอมป์ (กระแสเอาต์พุต 10 แอมป์)

วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลแอลซีให้ประสิทธิภาพที่สูงเนื่องจากสวิตช์ผ่านปุ่มภูมิหรือเพาเวอร์มอเตฟเฟคทำการสวิตช์ที่แรงดันเป็นสูญญากาศ (ZVS) ขณะปิดสวิตช์ (turn-on) ล่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ตัวและด้วยเหตุผลนี้จึงเลือกทำงานที่ความถี่สูงคือ 105 กิโลเฮิร์ตซ์ทำให้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟมีขนาดเล็กลง

สุดท้ายนี้ในภาคอุตสาหกรรมเพาเวอร์ซัพพลายต้องการความน่าเชื่อถือสูง อาทิ เช่น ในงานของเซิร์ฟเวอร์ (server) ในงานของระบบเก็บข้อมูล (storage) เพื่อให้ระบบต่าง ๆ ที่มีความสำคัญเหล่านี้ไม่เกิดการขัดข้องขณะทำงาน แหล่งจ่ายเพาเวอร์ซัพพลายต้องมีการออกแบบให้มีการป้องกันหลายอย่างมาก อาทิ เช่น ป้องกันแรงดันเกิน (over voltage protection) ป้องกันแรงดันต่ำเกิน (under voltage protection) ป้องกันกระแสเกิน (over current protection) ป้องกันอุณหภูมิเกิน (over temperature protection) ป้องกันไม่ให้เพาเวอร์ซัพพลายหยุดทำงานหรือสามารถถูกดัดแปลงได้เมื่อเกิด

พื้นที่ เพาเวอร์ซัพพลายต้องมีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตไว้ได้มื่อสูญเสียแรงดันอินพุตในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (hold-up time) เพาเวอร์ซัพพลายต้องมีเทคนิคการแชร์กระแส (current sharing) เพราะจะนั่นแสดงว่าในโหลดหนึ่งตัวต้องมีเพาเวอร์ซัพพลายอย่างน้อยสองตัวขึ้นไปเพื่อแชร์กระแสกัน โดยถ้าหากเพาเวอร์ซัพพลายตัวใดตัวหนึ่งหยุดทำงาน เพาเวอร์ซัพพลายอีกตัวต้องสามารถทำงานหรือจ่ายกำลังแทนกันได้ ทำให้เพาเวอร์ซัพพลายต้องสามารถดึงเข้าดึงออกจากระบบได้ตลอดเวลาเพื่อทำการซ่อมหรือบำรุงรักษา (hot plug & hot swap) ทั้งหมดนี้ก็ทำเพื่อความน่าเชื่อถือของระบบ

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากการวัดค่าความเหนี่ยวนำด้วยเครื่อง LCR meter ให้ผลลัพธ์ไม่ตรงเนื่องจากกระแสไฟอัสของเครื่อง LCR meter มีค่าต่ำแต่กระแสในวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลซี มีค่าสูงซึ่งส่งผลให้ค่าที่วัดจากเครื่อง LCR meter ให้ผลลัพธ์ไม่ตรง

5.2.2 การออกแบบวงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลซีด้วยหลักของการประมาณสารมอนิก้อนดับหนึ่งให้ผลลัพธ์ค่อนข้างแม่นตรงขณะการทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์

5.2.3 ในอนาคตจะทำการหาสมการอัตราขยาย (Voltage-gain function) ด้วยวิธี Extended Describe Function (EDF method)

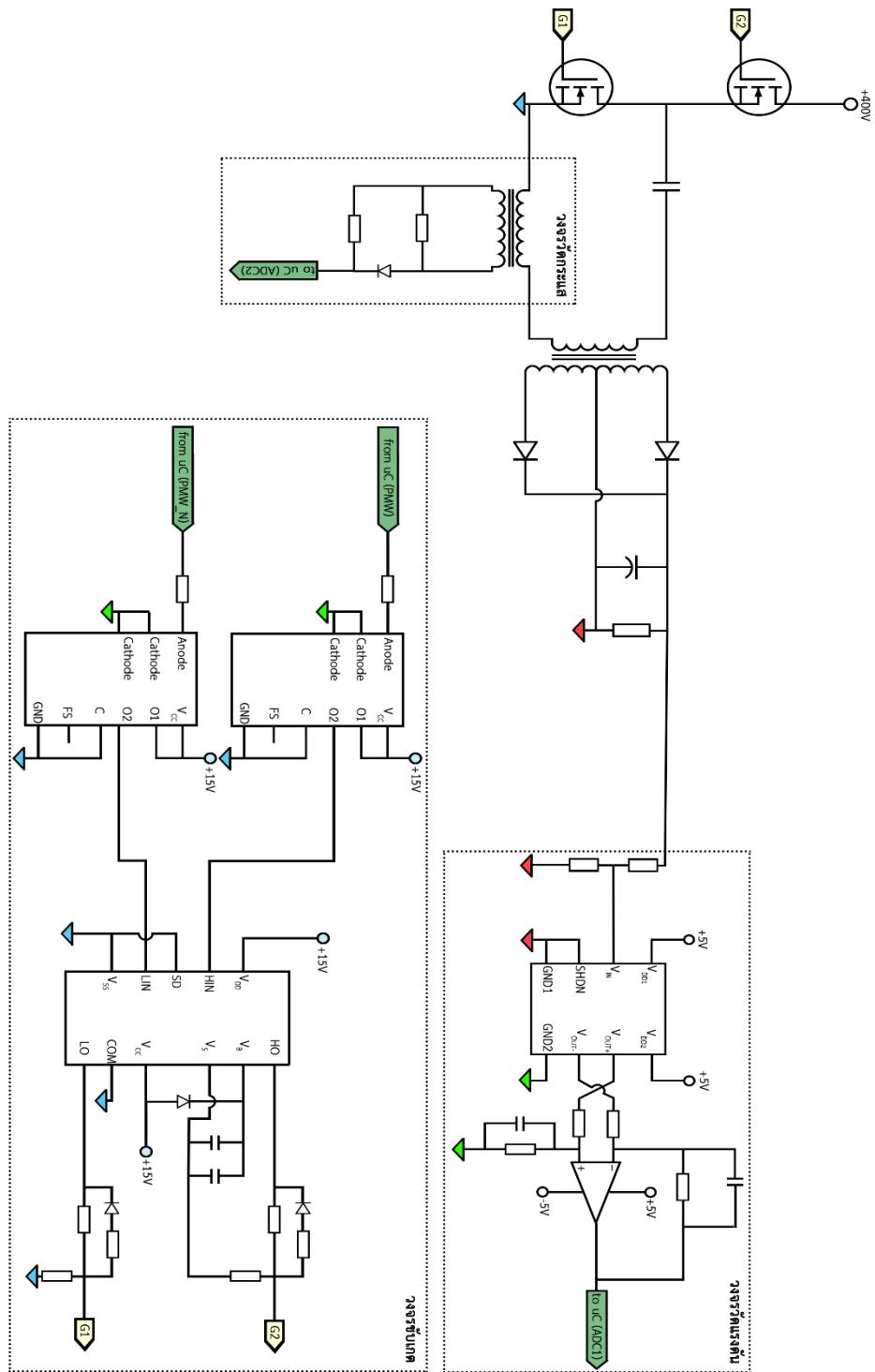
5.2.4 คำนวณ วัดผล กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรเพื่อหาจุดที่เกิดกำลังสูญเสียสูงสุดโดยสมการการหากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นแสดงในภาคผนวก ๖ และทำการปรับปรุงแก้ไขหาสาเหตุที่เกิดขึ้นต่อไป

ເອກສາຣ໌ອ້າງອີງ

1. D. W. Hart, *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
2. “Kazimierczuk - Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters.pdf.”
3. “Kazimierczuk - Resonant Power Converters.pdf.” .
4. Bo Yang, Topology Investigation for Front End DC/DC Power Conversion for Distributed Power System.

ภาคผนวก ก

งจรแปลงผันเร โซชแนนซ์แบบแอลแอลซี งจรขับเกต งจรวัดกระเสและงจรวัดแรงดัน

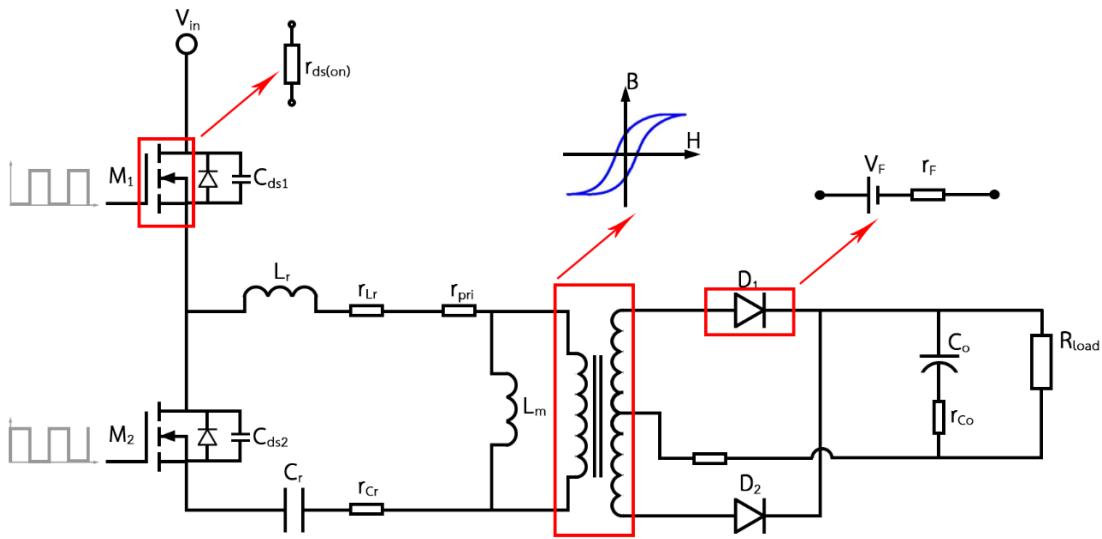


ภาพที่ ก-1 วงจรแปลงผันเรโซแนนซ์แบบแอลเอลซี วงจรขับเกต

วงจรวัดกระแสและวงจรวัดแรงดัน

ภาคผนวก ข

การคำนวณกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันเรโซซแนนซ์แบบแอลแอลซี



ภาพที่ ๗-๑ โนมเดลจำลองกำลังสูญเสียของอุปกรณ์ในวงจรแปลงผันเร โชแวนนช์แบบแอลแอลซี

กำลังสูญเสียการนำของวงจรแปลงผันเร โชแวนนช์แบบแอลแอลซี สัมพันธ์กับการออกแบบแทงค์เร โชแวนนช์เป็นหลัก โดยกำลังสูญเสียจากการนำ (Conduction loss) พิจารณาได้ดังภาพที่ ๗-๑

กำลังสูญเสียการนำของไดโอดเรกติไฟ D1 และ D2

กระแสที่ไหลผ่านไดโอดเรกติไฟ D1 และ D2

$$I_{D_{ave}} = \frac{I_o}{2} \quad (\text{๗-1})$$

$$I_{D_{rms}} = \frac{\pi \times I_o}{4} \sqrt{\frac{f_o}{f_s}} \quad (\text{๗-2})$$

กำลังสูญเสียการนำของแต่ละไดโอดจากผลของ V_F และ r_F

$$P_{V_F} = V_F \times I_{D_{ave}} \quad (\text{๗-3})$$

$$P_{r_F} = I_{D_{rms}}^2 \times r_F \quad (\text{๗-4})$$

ดังนั้นกำลังสูญเสียการนำรวมในໄอโอด D1 และ D2 คือ

$$\begin{aligned} P_D = P_{D1} + P_{D2} &= \left[(V_F \times I_{D1_{ave}}) + (I_{D1_{rms}}^2 \times r_F) \right] \\ &+ \left[(V_F \times I_{D2_{ave}}) + (I_{D2_{rms}}^2 \times r_F) \right] \end{aligned} \quad (\text{๗-5})$$

กำลังสูญเสียการนำของตัวเก็บประจุอาจต่ำ

กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุอาจต่ำ

$$I_{Co_{rms}} = I_o \sqrt{\left[\frac{\pi^2}{8} \times \frac{f_o}{f_s} \right] - 1} \quad (\text{U-6})$$

กำลังสูญเสียการนำในตัวเก็บประจุอาจต่ำคือ

$$P_{r_{Co}} = I_{Co_{rms}}^2 \times r_{Co} \quad (\text{U-7})$$

กำลังสูญเสียการนำของหม้อแปลง

กระแสที่ไหลผ่านแทงค์เรโซโซนนซ์

$$I_{Lr_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{48} \left(\frac{n \times V_o}{f_s \times L_m} \right)^2 + \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{I_o}{n} \sqrt{\frac{f_o}{f_s}} \right)^2 - I_o \times \frac{V_o}{L_m} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{f_o} \right)} \quad (\text{U-8})$$

กำลังสูญเสียการนำของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ

$$P_{pri} = I_{Lr_{rms}}^2 \times r_{pri} \quad (\text{U-9})$$

กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงผู้ถือภูมิ

$$I_{sec_{rms}} = \sqrt{2} \times I_{D1_{rms}} = \frac{\sqrt{2} \times \pi \times I_o}{4} \sqrt{\frac{f_o}{f_s}} \quad (\text{U-10})$$

กำลังสูญเสียการนำของหม้อแปลงด้านทุติภูมิ

$$P_{sec} = I_{sec_{rms}}^2 \times r_{sec} \quad (\text{U-11})$$

ดังนั้น กำลังสูญเสียการนำรวมของหม้อแปลงคือ

$$P_{cu} = P_{pri} + P_{sec} \quad (\text{U-12})$$

กำลังสูญเสียการนำในโครงข่ายเรโซโซนซ์หรือแทงค์เรโซโซนซ์

กำหนดให้ I_{rms} ของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับกระแสในแทงค์เรโซโซนซ์ ดังนั้น กำลังสูญเสียการนำในโครงข่ายเรโซโซนซ์คือ

$$P_{tank} = I_{Lr_{rms}}^2 \times (r_{ds(on)} + r_{Lr} + r_{Cr}) \quad (\text{U-13})$$

เมื่อเวลาเริ่มต้นมอเตอร์ในวงจรแปลงผันเรโซโซนซ์กระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบอนุกรม แลดและซี Turn-on ด้วยการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) แต่ Turn-off จะเกิดกำลังสูญเสียและการนำกระแสของไดโอดภายในเวลาเริ่มต้นมอเตอร์ก็ยังคงมีกำลังสูญเสียเช่นกัน

กำลังสูญเสียในการขับเพาเวอร์มอสเฟต

กำลังสูญเสียในการขับเพาเวอร์มอสเฟตมีสาเหตุมาจากการชาร์จประจุและการคายประจุของตัวเก็บประจุระหว่างขาเกตกับขาซอร์สของเพาเวอร์มอสเฟต

$$P_{\text{drive}} = 2 \times \left(\frac{1}{2} \times C_{\text{gs}} \times V_{\text{gs}}^2 \right) \times f_s \quad (\Psi-14)$$

กำลังสูญเสียของไดโอดภายในเพาเวอร์มอสเฟต

$$P_{\text{body}} = 2 \times V_{\text{bF}} \times \left[\frac{n \times V_o}{L_m} \left(\frac{1}{4} \times \frac{1}{f_{\text{sw}}} - t_{\text{dis}} \right) \right] \times t_{\text{body(on)}} \times f_s \quad (\Psi-15)$$

กำลังสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะ Turn-off

$$P_{\text{tf}} = 2 \times f_s \times \int_0^{t_{\text{dis}}} v_{\text{ds}}(t) \times i_{\text{ds}}(t) \times dt = \frac{n \times V_o \times t_{\text{dis}} \times (V_{\text{in}} + 2 \times V_{\text{ds(on)}})}{12 \times L_m} \quad (\Psi-16)$$

กำลังสูญเสียในแกนของหม้อแปลง

$$P_{\text{tf}} = K_h \times B_{\text{ac}}^n \times f_s^m \times M_{\text{core}} \quad (\Psi-17)$$

ภาคผนวก ค

การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ตารางที่ ค-1 การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

	โค้ดโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
1	#include "main.h" #include "stm32f4xx_hal.h" #include "ssd1306.h"	เป็นการประกาศไลบรารีของบอร์ด STM32F4xx_hal.h ซึ่งหมายถึงใช้ได้กับบอร์ด F4 รุ่นใดก็ได้ที่เป็นตระกูล F4 ssd1306.h เป็นการประกาศใช้ไลบรารีของ OLED
2	/* Private variables*/ ADC_HandleTypeDef hadc1; ADC_HandleTypeDef hadc2; ADC_HandleTypeDef hadc3; I2C_HandleTypeDef hi2c1; TIM_HandleTypeDef htim1; TIM_HandleTypeDef htim2;	เป็นการประกาศใช้ฟังก์ชันของ ADC, I2C, TIM
3	void SystemClock_Config(void); static void MX_GPIO_Init(void); static void MX_ADC1_Init(void); static void MX_TIM1_Init(void); static void MX_TIM2_Init(void); static void MX_ADC2_Init(void); static void MX_ADC3_Init(void); static void MX_I2C1_Init(void);	เปิดใช้ฟังก์ชันของ ADC, TIM, GPIO
4	int Voltage ; //กำหนดแรงดันเป็นจำนวนเต็ม int *Voltage_pointer;//กำหนดให้เป็นพ้อยเตอร์ float Voltage_display ; //ค่าที่แสดงเป็นทศนิยม int Setpoint ; int Setpoint_now=102 ; // ----- int *Setpoint_pointer; float Setpoint_display; int Frequency = 105000; // freq = 105 khz int *Frequency_pointer; float Frequency_display; int Iavg;	กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมทั้งหมด

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

	โค้ดโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
5	<pre>uint16_t Vout[32]; uint16_t Itank[32]; uint16_t Control_push = 0; uint16_t Protection = 0 ; uint16_t j = 0 ; uint16_t i = 0 ; uint16_t Imax = 210;</pre>	ประกาศตัวแปรแบบอาร์เรย์ 32 ตัว ขนาด 16 บิต ไม่มีเครื่องหมาย
6	<pre>int CNT; int PUL; int shift = 30; char Voltage_string[30] = ""; char Setpoint_string[30] = ""; char Frequency_string[30] = ""; Frequency_pointer = &Frequency ; Setpoint_pointer = &Setpoint ; Voltage_pointer = &Voltage ;</pre>	กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณเพื่อ สร้าง PWM
7	<pre>int main(void) { HAL_Init(); SystemClock_Config(); MX_GPIO_Init(); MX_ADC1_Init(); MX_TIM1_Init(); MX_TIM2_Init(); MX_ADC2_Init(); MX_DAC_Init(); MX_ADC3_Init(); MX_I2C1_Init();</pre>	ประกาศเริ่มฟังก์ชันต่าง ๆ เป็น การประกาศเพื่อบอกว่าจะเรียก คำสั่งต่าง ๆ ในฟังก์ชันนี้มาใช้

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

	โค้ดโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
8	<pre> SSD1306_Init(); SSD1306_GotoXY(20,20); SSD1306_Puts("LLC RESONANT",&Font_7x10,1); SSD1306_GotoXY(10,30); SSD1306_Puts("DC-DC CONVERTER",&Font_7x10,1); SSD1306_UpdateScreen(); HAL_Delay(1000); SSD1306_Fill(0); for(int a=0;a<10;a++) //Loading Display { shift = shift + 5 ; SSD1306_GotoXY(30,10); SSD1306_Puts("Loading",&Font_11x 18,1); SSD1306_GotoXY(shift,30); SSD1306_Puts(".",&Font_11x18,1); SSD1306_UpdateScreen(); } SSD1306_Fill(0); SSD1306_GotoXY(6,9); SSD1306_Puts("Setp. Volt. Freq.",&Font_7x10,1); SSD1306_GotoXY(70,20); SSD1306_Puts("Volt.",&Font_7x10,1); SSD1306_GotoXY(70,35); SSD1306_Puts("Volt.",&Font_7x10,1); SSD1306_GotoXY(70,50); SSD1306_Puts("Hz.",&Font_7x10,1); </pre>	<p>เริ่มฟังก์ชัน OLED</p> <p>เข็มตำแหน่งของพิกเซลที่แสดง</p> <p>แสดงคำที่ตำแหน่ง X = 20, Y = 20</p> <p>ไปที่ตำแหน่ง X = 10 , Y = 30</p> <p>แสดงคำที่ตำแหน่ง X=10, Y = 30</p> <p>อัพเดตหน้าจอ</p> <p>ใช้คำสั่งดีเลย์</p> <p>สั่งปิดพิกเซลทุกจุด</p> <p>สร้างฟังก์ชันโหลดหน้าจอ</p> <p>หมายเหตุ : Font_7x10 คือการแสดงคำที่ขนาด 7x10 ส่วน 1 ที่อยู่ท้ายสุดคือ สั่งให้พิกเซลติด</p>

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

	โค้ดโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
9	<pre>HAL_TIM_Base_Start(&htim2); HAL_ADC_Start_IT(&hadc1); HAL_ADC_Start_IT(&hadc2); HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3); HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3); HAL_DAC_Start(&hdac,DAC_CHANNEL_1);</pre>	เปิดการใช้งานฟังก์ชัน ADC และ INTERRUPT และเปิดใช้งาน PWM
10	<pre>while (1) { HAL_ADC_Start(&hadc3); if(HAL_ADC_PollForConversion(&hadc3,5 == HAL_OK) Setpoint = HAL_ADC_GetValue(&hadc3); HAL_ADC_Stop(&hadc3); if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_ 0)==1) {Control_push = 1 ;} else if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_ 2)==1) {Setpoint_now = Setpoint ;} else if(Protection == 1) { SSD1306_Fill(0); SSD1306_UpdateScreen(); SSD1306_GotoXY(13,10); } }</pre>	<ul style="list-style-type: none"> - อ่านค่าแรงดันจากตัวด้านหน้าปรับค่าได้ - ถ้ามีการกดค่อน โทรลจะทำให้ Close loop เริ่มทำงานในฟังก์ชัน Interrupt - กดปุ่มสำหรับกำหนดค่าแรงดัน Set point - การแสดงผลเมื่อมีการปรับแรงดันเกิดขนาดจะแสดงคำเตือนที่จอ OLED

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

โค้ดโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
<pre> SSD1306_Puts("Protecting",&Font_11x18,1); SSD1306_GotoXY(12,30); SSD1306_Puts("- No source",&Font_7x10,1); SSD1306_GotoXY(10,45); SSD1306_Puts("- Press reset",&Font_7x10,1); SSD1306_UpdateScreen(); while(Protection==1); }else; Voltage_display = *Voltage_pointer ; Setpoint_display = *Setpoint_pointer ; Frequency_display = *Frequency_pointer ; //Voltage_display = Voltage_display *0.2155; sprintf(Setpoint_string,"%2f",Setpoint_displa y); sprintf(Voltage_string,"%3f",Voltage_display); sprintf(Frequency_string,"%1f",Frequency_di splay); SSD1306_GotoXY(10,20); SSD1306_Puts(Setpoint_string,&Font_7x10,1); SSD1306_GotoXY(10,35); SSD1306_Puts(Voltage_string,&Font_7x10,1); SSD1306_GotoXY(10,50); SSD1306_Puts(Frequency_string,&Font_7x1 0,1); SSD1306_UpdateScreen(); } } </pre>	

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ลำดับ	โค้ดโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
11	<pre>void SystemClock_Config(void) { static void MX_ADC1_Init(void) { static void MX_ADC2_Init(void) { static void MX_ADC3_Init(void) { static void MX_I2C1_Init(void) { static void MX_TIM1_Init(void) { static void MX_TIM2_Init(void) { static void MX_GPIO_Init(void) { </pre>	<ul style="list-style-type: none"> - การเปิดใช้งานและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตอนเริ่มต้น (มาจากโปรแกรม Cube MX)
14	<pre>Void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDefTypeDef* hadc) { UNUSED(hadc); Itank[j] = HAL_ADC_GetValue(&hadc2); Vout[i] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1); i++; j++; while(j==8){ j=0 ; Iavg = Itank[0] + Itank[1] + Itank[2] + Itank[3] + Itank[4] + Itank[5] + Itank[6] + Itank[7]; Iavg = (Iavg/8) ; if(Iavg >28) { Protection = 1 ; HAL_TIM_PWM_Stop(&htim1, TIM_CHANNEL_3); </pre>	<ul style="list-style-type: none"> - การเรียกใช้ฟังก์ชัน Interrupt ของ ADC โดยจะทำการเก็บค่าจาก ADC ทั้ง 2 ชานแนลไว้ในรูปแบบอาร์เรย์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยเนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการรบกวนที่มี Noise ปนจึงหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่นิ่ง มิฉะนั้นจะไม่สามารถทำการควบคุมได้ โดยชานแนลที่ 1 เก็บค่าแรงดัน ชานแนลที่ 2 เก็บค่ากระแส - ถ้ากระแสเกินค่าที่ได้กำหนดไว้ Protection = 1 จะทำให้ออกแสดงคำสั่งเตือนและ PWM หยุดการทำงานทันที เพื่อป้องกันวงจรเสียหาย

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) การโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

โค้ดโปรแกรม	คำอธิบายโปรแกรม
<pre> }else; } while(i==16){ i=0 ; Voltage = Vout[0] + Vout[1] + Vout[2] + Vout[3] + Vout[4] + Vout[5] + Vout[6] + Vout[7] + Vout[8]+ Vout[9] + Vout[10] + Vout[11] + Vout[12] + Vout[13] + Vout[14] + Vout[15] ; Voltage = (Voltage/16) ; if(Control_push ==1) { if(Voltage<Setpoint_now) { Frequency = Frequency-1; CNT = 168000000/Frequency; PUL = CNT/2 ; TIM1->ARR = CNT; TIM1->CCR3 = PUL; } else if(Voltage>Setpoint_now) { Frequency = Frequency+1; CNT = 168000000/Frequency; PUL = CNT/2 ; TIM1->ARR = CNT; TIM1->CCR3 = PUL; } }else; }}</pre>	<ul style="list-style-type: none"> - ถ้ามีการกดปุ่มคอนโทรลจะทำการเช็คหันที่ว่าแรงดันเอาต์พุต - ถ้าแรงดันน้อยกว่าที่กำหนดจะทำการลดความถี่ - ถ้าแรงดันมากกว่าที่กำหนดจะทำการเพิ่มความถี่

ประวัติผู้แต่ง

ปริญญาบัณฑิตเรื่อง : การศึกษาและการออกแบบของจราจรแบบพื้นที่ไฟฟ้า-ไฟฟาร์มแบบแลลเอลซีริโอชันนิสต์

สาขาวิชา	: วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	: วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะ	: วิศวกรรมศาสตร์
ชื่อ	: นายจตุรงค์ สายพงษ์พรรรณ

ประวัติ

เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน 2539 ภูมิลำเนา บ้านเลขที่ 33/1 ต.บ้านสิงห์ อ.โพธาราม จ.ราชบุรี รหัสไปรษณีย์ 70120 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคโนโลยีราชบุรี ปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี แขนงวิชาช่างวิศวกรรมควบคุมอัตโนมัติ สาขาวิชาช่างวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาช่างวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2561

ชื่อ : นายจักรกฤษณ์ แก่นทิพย์

ประวัติ

เกิดวันที่ 28 พฤศจิกายน 2539 ภูมิลำเนา บ้านเลขที่ 399 หมู่ 1 ตำบลบางซื่อ จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ รหัสไปรษณีย์ 10800 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง จากโรงเรียนช่างฝีมือทหาร ปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี แขนงวิชาช่างวิศวกรรมควบคุมอัตโนมัติ สาขาวิชาช่างวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาช่างวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2561