

วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์  
ด้วยวงจรเรโซแนนซ์

SOFT-SWITCH ZCS-ZVS BOOST CONVERTER  
WITH A RESONANT CIRCUIT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-191

วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์  
ด้วยวงจรเรโซแนนซ์

SOFT-SWITCH ZCS-ZVS BOOST CONVERTER  
WITH A RESONANT CIRCUIT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-020-191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOFT-SWITCH ZCS-ZVS BOOST CONVERTER  
WITH A RESONANT CIRCUIT

JAKKRAWAN SIRIYOM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-EN-M-020-191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรระงับ  
Thesis Title Soft-Switching ZCS-ZVS Boost Converter with a Resonant Circuit  
นักศึกษา นายจักรวาล ศิริโยม  
รหัสประจำตัว 56601070  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-191

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สลิลทิพย์	สินธุสนธิชาติ	
รศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
ดร.ภาพ	จันทร์เจริญสุข	
รศ.ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น วันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2560 ยืนยันการดำเนินการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสสวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดัน ศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์
นักศึกษา	นายจักรวาล ศิริโยม
รหัสประจำตัว	56601070
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อนวัธน์ จางวนิชเลิศ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสสวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสสวิตช์ทั่วไปจะเกิดการสูญเสียในขณะสวิตช์หลักนำกระแสและไม่นำกระแสค่อนข้างสูงทำให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ลดลง วิธีการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นในสวิตช์หลักและเพิ่มประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้สวิตช์ช่วยและวงจรเรโซแนนซ์จึงถูกนำเสนอ ดังนั้นคอนเวอร์เตอร์แบบบัสสวิตช์นุ่มนวลที่นำเสนอจะมีการสูญเสียต่ำกว่าคอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปแบบสวิตช์มีการสูญเสียสูง นอกจากนี้สวิตช์ทุกตัวภายในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงการวิเคราะห์โหมดการทำงาน ผลการจำลองเพื่อที่จะยืนยันแนวคิดที่ได้นำเสนอ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าคอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแต่ละโหลดได้ที่ 1,000 วัตต์และ 600 วัตต์ตามลำดับที่ความถี่สวิตช์เท่ากับ 50 กิโลเฮิร์ตซ์

Thesis	Soft-Switching ZCS-ZVS Boost Converter with a Resonant Circuit
Student	Mr. Jakkrawan Siriyom
Student ID.	56601070
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2560
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Anuwat Jangwanitlert

### ABSTRACT

This thesis presents a Soft-Switching ZCS-ZVS Boost Converter with a Resonant Circuit. The conventional boost converter generates switching losses at turn on and off. Because of those, the whole converter efficiency is reduced. The proposed converter utilizes soft switching method using an auxiliary switch and resonant circuit. Therefore, the converter reduces switching losses lower than the hard switching. This thesis shows the analysis of operation modes, the simulation, and experimental results in order to prove the proposed concept. It is found that the proposed converter can provide the rated power of 1,000 W and 600 W for each output, at switching frequency of 50 kHz

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ต่องานวิจัยด้วยดีโดยตลอดและได้กรุณาตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณวาทัญญู มีศรีสุขและพี่น้องในห้องปฏิบัติการที่ให้คำชี้แนะต่างๆ ตลอดจนคอย ให้คำปรึกษาในทุกๆเรื่องทำให้ผู้จัดทำสามารถก้าวผ่านปัญหาต่างๆไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเรียนและให้กำลังใจตลอดจนครูอาจารย์ที่รักและเคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอด วิชาความรู้และประสบการณ์ให้กับผู้จัดทำ จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ii
กิตติกรรมประกาศ .....	iii
สารบัญ .....	iv
สารบัญรูป .....	vi
สารบัญตาราง .....	ix
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย .....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converters) .....	5
2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) .....	5
2.3 ทฤษฎีการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ .....	12
2.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์แบบนุ่มนวล .....	14
2.4.1 หลักการสวิตช์ด้วยกระแสศูนย์ .....	15
2.4.2 หลักการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ .....	17
2.5 หลักการพื้นฐานในการออกแบบอุปกรณ์แม่เหล็ก .....	23
2.5.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์แม่เหล็ก .....	23
2.6 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่สำหรับแกนเฟอร์ไรต์ .....	25
2.7 สรุป .....	28
บทที่ 3 หลักการทำงานและออกแบบวงจร .....	29
3.1 บทนำ .....	29
3.2 หลักการทำงานของวงจร .....	29
3.3 โหมดการทำงานของวงจร .....	30
3.4 การออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแส และแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ .....	38
3.4.1 โครงสร้างของวงจร .....	38
3.4.2 ส่วนของภาค DC ด้านอินพุท .....	39
3.4.3 ส่วนของภาคกำลังคอนเวอร์เตอร์ .....	39
3.4.4 ส่วนของตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง .....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.5 ส่วนของตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต .....	42
3.4.6 ส่วนของวงจรขับเกต .....	44
3.4.7 ส่วนของตัวสร้างสัญญาณไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 .....	46
3.5 สรุป .....	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	47
4.1 บทนำ .....	47
4.2 การวิเคราะห์บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ แบบสวิตช์นุ่มนวล .....	47
4.2.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกับ แบบสวิตช์นุ่มนวล .....	47
4.3 การวิเคราะห์การเกิดการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ในสวิตช์ .....	54
4.3.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลการจำลอง .....	54
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร .....	67
4.5 สรุป .....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	70
เอกสารอ้างอิง .....	71
ภาคผนวก ก.บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	72
ภาคผนวก ข.ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ .....	82
ภาคผนวก ค.โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ .....	85
ประวัติผู้เขียน .....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยแรงดันและกระแสศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ .....	2
2.1 โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ .....	6
2.2 วงจรสมมูลขณะสวิตช์นำกระแสและไม่นำกระแส .....	6
2.3 ลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์ .....	12
2.4 ลักษณะการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) .....	13
2.5 ลักษณะการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (ZCS) .....	13
2.6 ลักษณะการสวิตช์แบบนุ่มนวล .....	13
2.7 บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซีสวิตช์แบบนุ่มนวล .....	14
2.8 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยกระแสศูนย์แบบ L-type .....	15
2.9 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยกระแสศูนย์แบบ M-type .....	16
2.10 อุปกรณ์สวิตช์ผสมเฟสรวมไปถึงตัวไดโอดและตัวเก็บประจุแฝงภายในสวิตช์ .....	17
2.11 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยแรงดันศูนย์แบบ L-type .....	18
2.12 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยแรงดันศูนย์แบบ M-type .....	19
2.13 คอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE .....	20
2.14 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 1 .....	20
2.15 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 2 .....	20
2.16 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 3 .....	21
2.17 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 4 .....	21
2.18 วงจรอบฮีสเตอร์รีซิสสำหรับทำแม่เหล็กถาวรและสำหรับทำหม้อแปลงไฟฟ้า .....	24
3.1 หลักการทำงานของวงจร .....	29
3.2 โหมดการทำงานของวงจร .....	31
3.3 โหมดการทำงานที่ 1 .....	32
3.4 โหมดการทำงานที่ 2 .....	32
3.5 โหมดการทำงานที่ 3 .....	32
3.6 โหมดการทำงานที่ 4 .....	33
3.7 โหมดการทำงานที่ 5 .....	33
3.8 โหมดการทำงานที่ 6 .....	33
3.9 โหมดการทำงานที่ 7 .....	34
3.10 โหมดการทำงานที่ 8 .....	34
3.11 โหมดการทำงานที่ 9 .....	34
3.12 โครงสร้างของวงจรจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น .....	38
3.13 วงจรภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต .....	39
3.14 ส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์ .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ที่ใช้จริงในวงจร .....	40
3.16 ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงที่ใช้จริง .....	42
3.17 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ .....	43
3.18 วงจรขั้วเกิด .....	44
3.19 สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มจากวงจรขั้วสวิตช์ที่สวิตช์หลัก .....	45
3.20 สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มจากวงจรขั้วสวิตช์ที่สวิตช์ช่วย .....	45
3.21 สัญญาณที่ดับบลิวเอ็มจากวงจรขั้วสวิตช์ทั้งสวิตช์หลักและสวิตช์ช่วย .....	45
3.22 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 .....	46
4.1 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการจำลอง .....	47
4.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % ในช่วงนำกระแส .....	48
4.3 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % ในช่วงนำกระแส .....	48
4.4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % ในช่วงไม่นำกระแส .....	49
4.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % ในช่วงไม่นำกระแส .....	49
4.6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % ในช่วงนำกระแส .....	50
4.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % ในช่วงนำกระแส .....	50
4.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % ในช่วงไม่นำกระแส .....	51
4.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % ในช่วงไม่นำกระแส .....	51
4.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงนำกระแส .....	52
4.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบนุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงนำกระแส .....	52
4.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงไม่นำกระแส .....	53
4.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงไม่นำกระแส .....	53
4.14 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ที่ใช้ในการทดลอง .....	54

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 100 % .....	55
4.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % .....	55
4.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 100% .....	56
4.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % .....	56
4.19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 80 % .....	57
4.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % .....	57
4.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 80 % .....	58
4.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % .....	58
4.23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 60 % .....	59
4.24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % .....	59
4.25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 60 % .....	60
4.26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % .....	60
4.27 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองที่สภาวะโหลด 100 % .....	61
4.28 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % .....	61
4.29 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองที่สภาวะโหลด 100 % .....	62
4.30 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % .....	62
4.31 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองที่สภาวะโหลด 80 % .....	63
4.32 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % .....	63
4.33 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองที่สภาวะโหลด 80 % .....	64
4.34 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % .....	64
4.35 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองที่สภาวะโหลด 60 % .....	65
4.36 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % .....	65
4.37 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองที่สภาวะโหลด 60 % .....	66
4.38 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % .....	66
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับกระแสโหลด .....	68

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออก กับประสิทธิภาพการทำงานของวงจร .....	67
5.1 คุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ .....	69



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทรัพยากรพลังงานทดแทนได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทำให้ทรัพยากรที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าลดลง พลังงานทดแทนที่สามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าคือพลังงานจากแสงอาทิตย์และพลังงานลมแต่ที่นิยมและถูกนำมาใช้มากที่สุดจะเป็นพลังงานจากแสงอาทิตย์ เพราะเป็นพลังงานสะอาดไม่เสียค่าบำรุงรักษาและไม่มีวันหมด พลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ในการแปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและในงานวิจัยนี้ก็นำเอามาประยุกต์ใช้งานกับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับบูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์จ่ายผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน ในปัจจุบันวงจรแปลงผันก ึ่งไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converters) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายและปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ จะมาจากความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่มีผลมาจากการสวิทช์ของอุปกรณ์ (Switching losses) ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converters) ซึ่งถ้ามีความต้องการใช้งานกำลังงานไฟฟ้าในระดับที่สูงขึ้นก็จะมีผลทำให้เกิดความสูญเสีย ึ่งไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจนทำให้ประสิทธิภาพลดลงหรือไม่สามารถใช้งานได้เลย มีหลายงานวิจัยที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับการลดความสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้นโดยใช้เทคนิคการสวิทช์แบบนุ่มนวล (Soft Switching) [1],[2],[6]-[11] ในแบบต่างๆ หนึ่งในเทคนิคการสวิทช์แบบนุ่มนวลที่น่าสนใจก็คือการสวิทช์แบบเรโซแนนซ์ [1]-[3] ซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่สวิทช์ 2-3 เมกกะเฮิร์ตและในระดับกำลังงานไฟฟ้าและความถี่เดียวกันการสวิทช์แบบเรโซแนนซ์จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากวงจรรองความถี่จะมีค่าไม่สูงทำให้สามารถลดขนาด ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ ลดพื้นที่ลดน้ หนักให้มีขนาดเล็กกลงท ให้ไม่เปลืองพื้นที่และความสูญเสีย ึ่งไฟฟ้าที่อุปกรณ์จะมีค่าลดลงแต่ในงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งไม่ค่อยมีบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทช์นุ่มนวลแบบสวิทช์เรโซแนนซ์ในระดับพิกัดกำลังงานไฟฟ้าที่สูงเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านอยู่อาศัย ดังนั้นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิทช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์จึงได้ถูกนำมาทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อให้บูสต์คอนเวอร์เตอร์ งานได้ในพิกัด กำลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ที่เหมาะสมกับพลังงานทดแทนในระบบผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

1.2.2 เพื่อศึกษาและพัฒนาวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อให้สามารถเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ได้อย่างเหมาะสม เช่นการเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์ , การเลือกใช้ตัวเก็บประจุความถี่สูงในวงจร , การเลือกตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง เป็นต้น

1.2.4 เพื่อออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตซ์นี้ขึ้นมา

1.2.5 เพื่อศึกษาและประยุกต์นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์โดยใช้สัญญาณพีดีบีบลิเอ็ม

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 สามารถเข้าใจและอธิบายหลักการเกิดการทางานภายใต้แรงดันศูนย์ได้โดยอาศัยหลักการเรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ

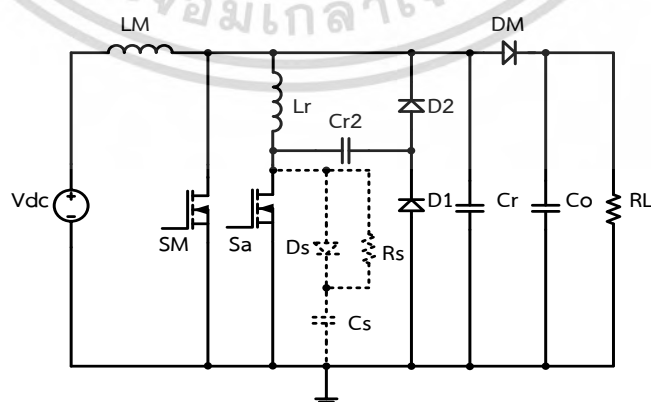
1.3.2 สามารถเลือกใช้อุปกรณ์สวิตซ์ , ตัวเก็บประจุในการสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้อย่างเหมาะสมกับพิกัดการทำงานขงวงจร

1.3.3 สามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้โดยประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 90 %

1.3.4 สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายโหลดในบ้านอยู่อาศัย

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แนวคิดที่ใช้ในการวิจัยนี้คือเป็นการสร้างวงจรดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์โดยการนำวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ซึ่งเป็นวงจรเพิ่มระดับแรงดันกับหลักการเรโซแนนซ์มาต่อกันเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตซ์นี้ขึ้นมาด้วยแรงดันและกระแสศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์เพื่อให้อุปกรณ์สวิตซ์ทำงานแบบสวิตซ์นี้ขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตซ์นี้ขึ้นมาด้วยแรงดันและกระแสศูนย์

ด้วยวงจรเรโซแนนซ์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนหรือหน่วยงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.1 จะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc) สวิตช์หลัก (Sm) สวิตช์ช่วย (Sa) ซึ่งจะใช้ออสเฟตในการสวิตช์เพื่อใช้งานในความถี่สูงโดยสวิตช์ช่วยจะสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่สวิตช์หลักได้ ตัวเก็บประจุ (Cr,Cr2 Resonant Capacitors) ใช้สำหรับการถ่ายโอนประจุระหว่างตัวเหนี่ยวนา (Lr Resonant Inductor) เพื่อใช้ในการทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในวงจรไดโอด (D1,D2) ต่อนุกรมกันและไปขานานระหว่างสวิตช์ช่วย (Sa) และตัวเหนี่ยวนา (Lr) เพื่อใช้เป็นทางเดินของกระแสที่ไหลและตัวเหนี่ยวนา (Lr) เพื่อแบ่งกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์หลัก (Lm) เพื่อลดการสูญเสีย

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการสร้างโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบการทำงานโดยการเขียนซอฟต์แวร์เพื่อสร้างสัญญาณโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์จากนั้นทำการทดสอบการทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า 200 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าด้านออก 400 โวลต์และความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ และใช้หลักการเรโซแนนซ์เพื่อให้สวิตช์ทำงานแบบสวิตช์นุ่มนวลหลังจากนั้นเป็นการเก็บบันทึก ผลการทดลองและค นวนหาประสิทธิภาพของวงจรโดยรวมพร้อมทั้งสรุปผลและขอเสนอแนะ

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับลำดับขั้นตอนของการงานวิจัยขั้นนี้ได้เริ่มการศึกษาในเรื่องที่จะทำวิจัยอย่างเป็นทางการ โดยมื่ออาจารย์ที่ปรึกษาเป็นผู้คอยให้คำแนะนำหรือชี้แนะแหล่งข้อมูลรวมทั้งวิธีการค้นหาจุดเด่นของงานที่จะมาเสนอซึ่งในแต่ละขั้นตอนนั้นก็ประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

1. ทาการเริ่มสืบค้นผลงานวิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ที่ใช้เทคนิคการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์แบบต่างๆ ทั้งจากบทความ วารสาร หนังสือ วิทยานิพนธ์ งานวิจัย งานประชุมวิชาการและทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทั้งภาษาไทยและภาษาต่างประเทศเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและถูกต้องในการท างานวิจัย

2. ศึกษาในรายละเอียดของข้อมูลที่ได้นั้นความมาจากข้อ 1 เพื่อหาประเด็นหรือจุดเด่นที่จะนำมาใช้ในการท านวิจัย โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาคอยแนะนำ

3. นำหัวข้อหรือประเด็นที่อาจารย์ที่ปรึกษาเห็นชอบที่จะนำมาใช้ศึกษาทางงานวิจัยมาวางแผนงานและจัดทำ ขอบเขตระยะเวลาการท างานงานให้ชัดเจน

4. เลือกเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีงานวนพอร์ตโมดูลพีดีดับลิวิตเอ็มรองรับการใช้งานกับงานวิจัยที่ต้องการใช้งานจำนวน 12 พอร์ตได้ โดยได้ทาการเลือกเบอร์ dsPIC30F4011 ของบริษัท Microchip จากนั้นได้ทาการศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี

5. ขั้นตอนของการสร้างโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ที่จะใช้ในการวิจัย ซึ่งจะต้องจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ มาประกอบขึ้นเป็นวงจรกลางรวมไปถึงวงจรควบคุม จากนั้นทำการเชื่อมต่อระหว่างวงจรควบคุมและวงจร กลัง
6. ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของฮาร์ดแวร์ส่วนต่างๆ วงจรกลางและวงจรควบคุมที่ได้สร้างขึ้น รวมทั้งทดสอบโปรแกรมที่ได้ทา การเขียนขึ้นด้วย
7. ขั้นตอนการทดลองและเก็บบันทึกผลการทดลอง รวมไปถึงวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองรวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converters) ที่สวิตช์ด้วยแรงดันและกระแสศูนย์นั้น จำเป็นที่จะต้องศึกษาและใช้หลักการทฤษฎีในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายๆด้านประกอบเข้าด้วยกัน อันได้แก่ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converters) เทคนิคการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบต่างๆ ตัวเหนี่ยวน ความถี่สูง นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้กล่าวถึงเทคนิคการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่สวิตช์หลักด้วยหลักการเรโซแนนซ์ ซึ่งหลักการดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเข้าใจเนื่องจากจำเป็นต้องใช้ความเข้าใจเหล่านี้ในการออกแบบและสร้างวงจรที่ได้มาเสนอ

### 2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converters)

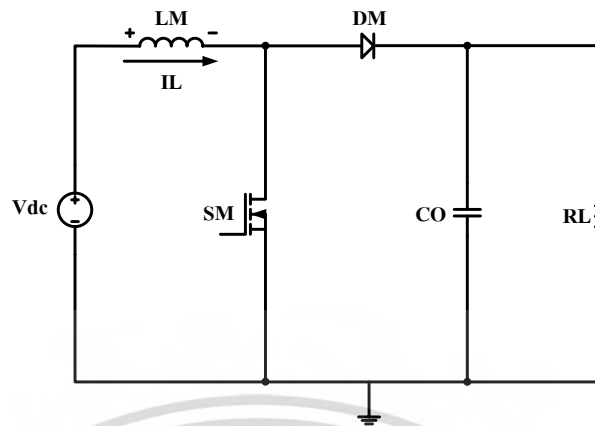
วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-DC Converters) เป็นวงจรที่รับไฟฟ้ากระแสตรง และแปลงออกเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดแรงดันด้านออกสูงหรือต่ำกว่าแรงดันด้านเข้าแล้วแต่ความเหมาะสมในแต่ละงานโดยจะประกอบไปด้วยวงจรแบบต่างๆ คือ วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) วงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Buck-Boost Converter) ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีวงจรถูกบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost-Converter) ในโหมดกระแสต่อเนื่อง (CCM) และโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (DCM) เทคนิคการสวิตช์ด้วยแรงดันและกระแสศูนย์ การลดการสูญเสียในสวิตช์ด้วยหลักการเรโซแนนซ์ และการนำหลักการเรโซแนนซ์มาใช้ในวงจรถูกบูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้สวิตช์หลักทำงานแบบสวิตช์นุ่มนวล

### 2.2 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) [4]

#### - โหมดกระแสต่อเนื่อง

วงจรถูกบูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรเพิ่มระดับแรงดันด้านออกให้สูงกว่าแรงดันด้านเข้าโดยจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญคือ สวิตช์กึ่ง ตัวเหนี่ยวน ตัวเก็บประจุ ไดโอด ดังแสดงในรูป 2.1 โดยแรงดันเฉลี่ยด้านออกจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้และสมมติสวิตช์เป็นอุดมคติ ตามทฤษฎีประสิทธิภาพจะเท่ากับ 100 % แต่ปัญหาหนึ่งของสวิตช์คือ แรงดันด้านออกจะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงๆ (chop) และมีแรงดันระลอกซึ่งจะเป็นปัญหากับงานบางอย่างที่ต้องการแรงดันด้านออกคงที่สม่ำเสมอ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นสามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ (Low Pass Filter) ต่อที่ด้านออกของวงจรเพื่อกรองแรงดันด้านออกของอุปกรณ์ความถี่สูง ในวงจรกรองจะประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวน ตัวเก็บประจุจะรักษาระดับแรงดันให้คงที่ ตัวเหนี่ยวนจะสะสมพลังงานจากแหล่งจ่ายด้านเข้าแล้วจ่ายไปยังโหลดด้านออกซึ่ง ในคอนเวอร์เตอร์ส่วนมากจะใช้วงจรกรองแต่รูปแบบการจัดวางตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวน อาจจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



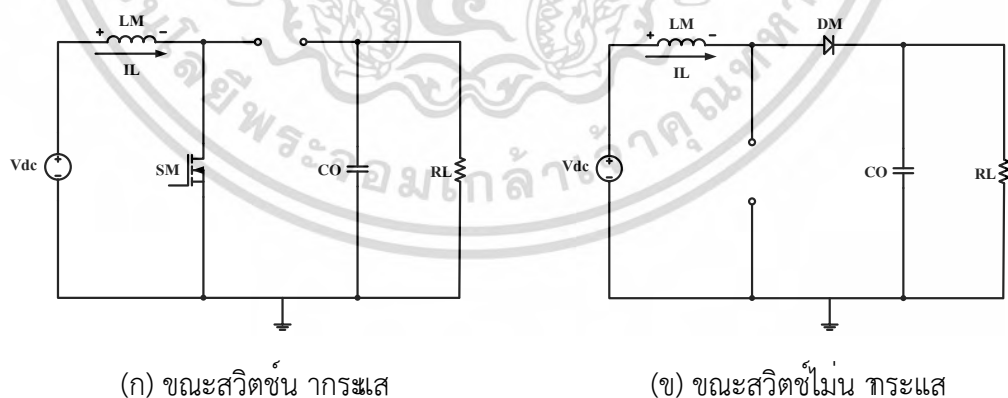
รูปที่ 2.1 โครงสร้างวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์

#### - ขณะสวิตช์นำกระแส

ในขณะที่สวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำผ่านสวิตช์ โดยในขณะเดียวกันไดโอดจะไม่นำกระแสเนื่องจากถูกไบอัสกลับทำให้พลังงานจะถูกสะสมอยู่ที่ตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

#### - ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะนำกระแส พลังงานที่สะสมอยู่ที่ตัวเหนี่ยวนำจะไหลอย่างต่อเนื่องผ่านตัวเก็บประจุเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้มีค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.2



(ก) ขณะสวิตช์นำ กระแส

(ข) ขณะสวิตช์ไม่นำ กระแส

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลขณะสวิตช์นำ กระแสและไม่นำ กระแส

จากวงจรสมมูลจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้า

$$i_L(t) = \frac{1}{L} V_{in} t + I_L(0) \quad 0 \leq t < DT \quad (2.1)$$

โดยที่  $I_L(0)$  คือกระแสตัวเหนี่ยวนำ เริ่มต้นที่เวลา  $t=0$  เมื่อสวิตช์ไม่ทำงาน วงจรสมมูลจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.3

แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ คือ  $V_{in} - V_o$  และกระแส  $i_L(t)$  หาได้จาก

$$i_L(t) = \frac{1}{L} (V_{in} - V_o)(t - DT) + I_L(DT) \quad DT \leq t < T \quad (2.2)$$

ที่  $t = DT$  และ  $t = T$  ตามลำดับจะได้ว่า

$$I_L(DT) - I_L(0) = \frac{1}{L} V_{in} (DT) \quad (2.3)$$

$$I_L(DT) - I_L(0) = -\frac{1}{L} (V_{in} - V_o)(1 - D)T \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ผลของการเปลี่ยนแรงดันจะได้ว่า

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.5)$$

จากสมการจะเห็นว่าอัตราขยายแรงดันจะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ และจากสมการ (2.3) และ (2.4) กระแสระลอกของตัวเหนี่ยวนำ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta I &= I_L(DT) - I_L(0) \\ &= I_{Lmax} - I_{Lmin} \\ &= \frac{1}{L} V_{in} DT \end{aligned} \quad (2.6)$$

แทนค่า  $V_{in}$  จากสมการ (2.5) จะได้ว่า

$$\Delta I = \frac{1}{L} V_o D(1 - D)T \quad (2.7)$$

กระแสเฉลี่ยขาเข้าและขาออก กระแสขาเข้าจะคล้ายกับกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นค่ากระแสขาเข้าจะเท่ากับ

$$I_{in} = \frac{I_{Lmax} + I_{Lmin}}{2} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเฉลี่ยขาออกจะคล้ายกับกระแสเฉลี่ยของไดโอด ดังนั้นค่ากระแสเฉลี่ยด้านออกจะเท่ากับ

$$I_o = \left( \frac{I_{L\max} + I_{L\min}}{2} \right) (1-D) = \frac{V_o}{R} \quad (2.9)$$

ใช้สมการ (2.4) และ (2.9) หาค่ากระแสเหนี่ยวนา สูงสุดและต่ำสุดได้ดังนี้

$$I_L(0) = I_{L\min} = V_{in} \left( \frac{1}{R(1-D)^2} - \frac{DT}{2L} \right) \quad (2.10)$$

$$I_L(0) = I_{L\max} = V_{in} \left( \frac{1}{R(1-D)^2} + \frac{DT}{2L} \right) \quad (2.11)$$

สำหรับค่าบวกของกระแสเหนี่ยวนาสูงสุดและต่ำสุดคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง เพื่อที่จะหาค่าต่ำสุดของตัวเหนี่ยวนาที่จะรักษาเสถียรภาพคอนเวอร์เตอร์ไว้ในโหมดกระแสต่อเนื่องจะตั้ง กระแสเหนี่ยวนาต่ำสุดไว้ที่ศูนย์  $I_{L\min} = 0$  ภายใต้ขอบเขตค่าตัวเหนี่ยวนา ขิกฤติจะได้ว่า

$$I_{crit} = \frac{RT}{2} (1-D)^2 D \quad (2.12)$$

แรงดันระลอกขาออก เมื่อไดโอดถูกไบอัสกลับกระแสที่ตัวเก็บประจุจะเป็นกระแสไหลลด ดังนั้นกระแสตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ

$$i_c = -I_o \quad 0 \leq t < DT$$

$$i_c = i_L - I_o \quad DT \leq t < T$$

$$i_c(t) = -\frac{\Delta I}{(1-D)T} (t-DT) + I_c(DT) \quad DT \leq t < T \quad (2.13)$$

โดยที่  $I_c(DT)$  คือ  $i_c(t)$  ที่สภาวะเริ่มต้นที่  $t = DT$  ค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุสำหรับ  $0 \leq t < DT$  จะได้ว่า

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int -I_o dt + V_c(0) \quad (2.14)$$

$$= -\frac{I_o}{C} t + V_c(0)$$

โดยที่  $V_c(0)$  คือแรงดันตัวเก็บประจุเริ่มต้นที่  $t = 0$

ที่  $t = DT$  จะได้

$$V_c(DT) = -\frac{I_o}{C} DT + V_c(0) \quad (2.15)$$

เนื่องจากแรงดันตัวเก็บประจุเฉลี่ยคือ  $V_o$  สามารถหา  $V_c(0)$  และ  $V_c(DT)$  ได้ดังนี้

$$V_c(0) = V_o + \frac{I_o DT}{2C}$$

$$V_c(DT) = V_o - \frac{I_o DT}{2C} \quad (2.16)$$

และการเปลี่ยนแปลงแรงดันตัวเก็บประจุหาได้จาก

$$\Delta V_c = V_c(0) - V_c(DT) = \frac{I_o DT}{C} \quad (2.17)$$

สำหรับ  $DT \leq t < 0$  แรงดันตัวเก็บประจุหาได้จาก

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{DT}^t \left[ \frac{-\Delta I}{(1-D)T} (t-DT) + I_c(DT) \right] dt + V_c(DT)$$

$$= \frac{\Delta I}{2C(1-D)T} (t-DT)^2 + \frac{I_c(DT)(1-D)T}{C} + V_c(DT) \quad (2.18)$$

แรงดันระลอกขาออกจะได้ว่า

$$|\Delta V_o| = |\Delta V_c| = I_o \frac{DT}{C} = \frac{V_o DT}{RC}$$

ดังนั้นแรงดันระลอกคลื่นหาได้จาก

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC}$$

$$= \frac{D}{RCf} \quad (2.19)$$

### - โหมตกระแสไม่ต่อเนื่อง

จากโหมตนากระแสต่อเนื่อง ค่ากระแสเหนี่ยวนาในวงจรมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แต่ในโหมตกระแสไม่ต่อเนื่องค่าขณะนากระแสน้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่าในช่วงเวลาหนึ่งค่ากระแสเหนี่ยวนจะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือค่ากระแสไม่ต่อเนื่องนั่นเอง การดเนินการในโหมตกระแสไม่ต่อเนื่องจะพบบ่อยในคอนเวอร์เตอร์ดีซี-ดีซีตั้งแต่ช่วงที่มีโหลดและไม่มีโหลด อัตราส่วนของคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะคงตัวและความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงในการประจุไดนามิกแบบป้อนกลับ ในการแสดงช่วงสั้นๆภายใต้อัตราขยายแรงดันคอนเวอร์เตอร์ โหมตนากระแสไม่ต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันไม่เพียงแต่ของดิวิตีไซเคิลเท่านั้นแต่จะมีทั้งโหลด ความถี่ของการสวิตซ์ และส่วนประกอบของวงจร

ในโหมตกระแสไม่ต่อเนื่องการวิเคราะห์สภาวะคงตัวโครงสร้างการทำงานของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำงานในโหมตกระแสไม่ต่อเนื่อง สิ่งที่แตกต่างจากการวิเคราะห์ในโหมตกระแสต่อเนื่องคือ ต้องการหาค่าช่วงเวลาระหว่างที่กระแสเป็นศูนย์ แต่กระบวนการวิเคราะห์ส่วนอื่นยังคงเหมือนกับโหมตกระแสต่อเนื่อง

ในการวิเคราะห์อัตราขยายแรงดัน  $M$  ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ในเวลาทีกระแสเหนี่ยวนาเป็นศูนย์  $DT$  และค่ากระแสเหนี่ยวนาสูงสุด  $I_{Lmax}$  ในช่วงเวลา  $0 \leq t < DT$  จะได้ว่า

$$i_L = \frac{V_{in}}{L} t \quad (2.20)$$

ในโหมตกระแสไม่ต่อเนื่องค่า  $I_L(0)$  เท่ากับศูนย์และค่ากระแสเหนี่ยวนาสูงสุดที่เกิดขึ้นที่  $t = DT$  จะได้ว่า

$$I_{Lmax} = I_L(DT) = \frac{V_{in}}{L} DT \quad (2.21)$$

ในขณะที่สวิตซ์ไม่นากระแส ในช่วงเวลา  $DT \leq t$  จะได้ว่า

$$i_L(t) = \frac{V_{in} - V_o}{L} [t - DT] + i_L(DT)$$

ในโหมตกระแสไม่ต่อเนื่องถ้า  $i_L(D_1T) = 0$  ดังนั้น

$$0 = \frac{V_{in} - V_o}{L} (D_1 - D)T + i_L(DT) \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.21) และ (2.22) จะได้อัตราขยายแรงดันคือ

$$\frac{V_o}{V_{in}} = M = \frac{D_1}{D_1 - D} \quad (2.23)$$

เพื่อหาค่า  $D_1$  ในเทอมของค่าพารามิเตอร์ในวงจร ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยด้านเข้า  $P_{in}$  จะเท่ากับ  $I_{in}V_{in}$  ซึ่ง  $I_{in} = \frac{1}{2}I_{Lmax}D_1$  ดังนั้น

$$P_{in} = \frac{1}{2}I_{Lmax}V_{in}D_1 \quad (2.24)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกหาได้จาก

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.25)$$

จากสมการ (2.24) และ (2.25) จะได้ว่า

$$I_{Lmax} = \frac{2V_o^2}{RV_{in}D_1} \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.23) และ (2.26) และน าสสมการ  $I_{in} = \frac{1}{2}I_{Lmax}D_1$  มาใช้จะได้ว่า

$$M = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2RTD^2}{L}} \right] \quad (2.27)$$

ในเทอมของ  $\tau_n$  จะได้

$$M = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2D^2}{\tau_n}} \right] \quad (2.28)$$

ค่าตัวชี้เซเคิล  $D_1$  ซึ่งอยู่ในสมการ (2.23) ในเทอมของ  $\tau_n$  จะได้

$$D_1 = \frac{\tau_n}{D} + D + \sqrt{\frac{\tau_n^2}{D^2} + 2\tau_n} \quad (2.29)$$

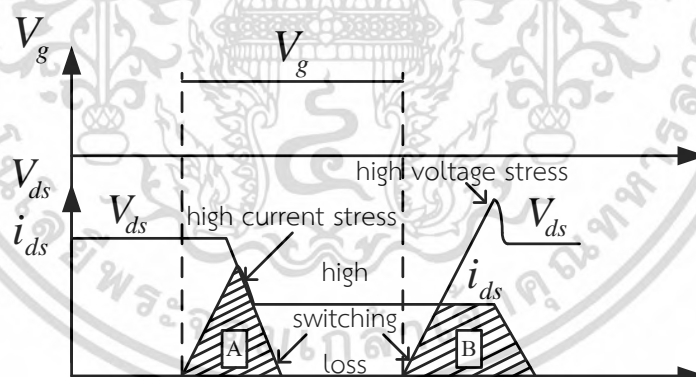
เซ็คค่า  $D_1 = 1$  และแก้สมการหาค่า  $L$  จะได้

$$L = L_{crit} = \frac{RTD}{2}(1-D)^2$$

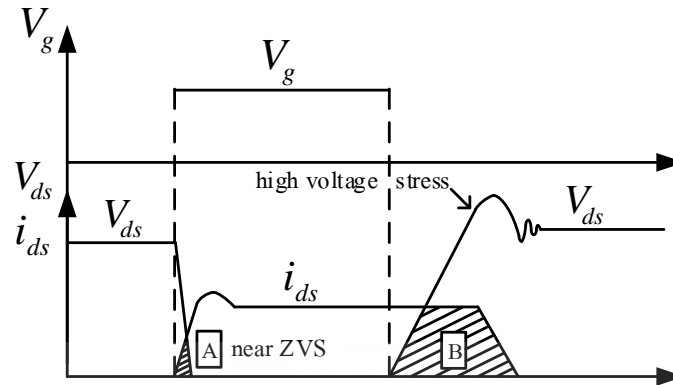
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ทฤษฎีการสวิตช์ของวงจรถอนเวอร์เตอร์

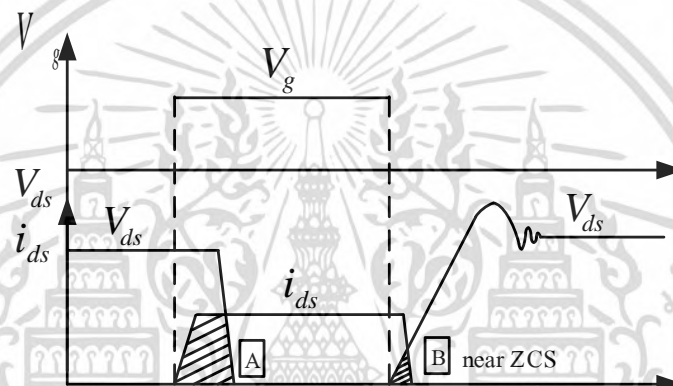
ในปัจจุบันวงจรถอนเวอร์เตอร์ได้มีการพัฒนาเทคนิคการสวิตช์หลายวิธีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรถอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากวงจรถอนเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่โดยเฉพาะที่มีพิกัดกำลังสูงนั้นมักจะเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงระหว่างการสวิตช์ (Switching losses) ซึ่งจะเรียกการสวิตช์ในลักษณะนี้ว่าการสวิตช์แบบรุนแรง (Hard switching) ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคการสวิตช์เพื่อที่จะลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการสวิตช์และเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรถอนเวอร์เตอร์ซึ่งเรียกว่าเทคนิคการสวิตช์แบบนุ่มนวล (Soft switching) ยกตัวอย่างเช่นการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (Zero-voltage switching : ZVS) , การสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (Zero-current switching : ZCS) และการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (Zero-voltage zero-current switching : ZVZCS) เป็นต้น โดยลักษณะของการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) นั้นจะเกิดในช่วงระหว่างการเริ่มนำกระแส (Turn on) สามารถสังเกตได้เมื่อทำการวัดรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะพบว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะกระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ดังรูปที่ 2.4 ทำให้ไม่เกิดการช้อนทับกันระหว่างแรงดันและกระแสดังนั้นจึงไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงของการเริ่มนำกระแส ส่วนลักษณะของการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (ZCS) นั้นจะเกิดในช่วงระหว่างการหยุดนำกระแส (Turn off) โดยรูปคลื่นกระแสจะลดลงจนเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีแรงดันตกคร่อมสวิตช์เกิดขึ้นดังนั้นจึงไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงของการหยุดนำกระแสซึ่งแสดงได้รูปที่ 2.5



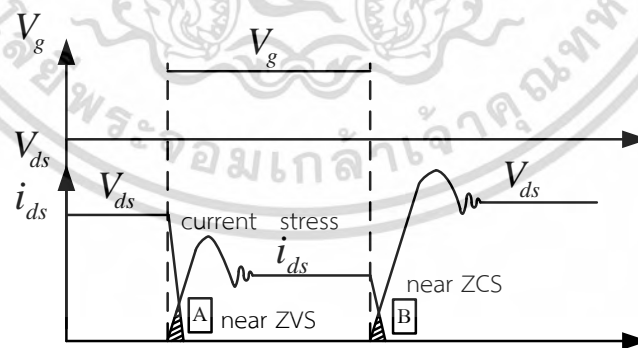
รูปที่ 2.3 ลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์



รูปที่ 2.4 ลักษณะการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS)



รูปที่ 2.5 ลักษณะการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (ZCS)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการสวิตช์แบบนุ่มนวล

การสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ (ZVZCS) เป็นการนำเทคนิคการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) และแบบกระแสศูนย์ (ZCS) รวมเข้าด้วยกันตั้งนั้นจึงทำให้ไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าทั้งในช่วงของการเริ่มนำกระแส (Turn on) และในช่วงของการหยุดนำกระแส (Turn off) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์แบบนุ่มนวล[4]

เทคนิคการสวิตช์แบบนุ่มนวลได้มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหัวข้อนี้จะได้ทำการนำเสนอ วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคการสวิตช์แบบนุ่มนวลด้วยวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งจะช่วยให้วงจร คอนเวอร์เตอร์นั้นท านานได้ถึงความถี่สูงและกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น คอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์จะใช้เพื่อ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันแตกต่างจากด้านเข้าโดยผ่านอุปกรณ์เรโซแนนซ์ซึ่ง สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงซึ่งมีข้อดีคือการ คอมมิวเตทของสวิตช์ด้วยธรรมชาติ (Natural Commutation) ทำให้กำลังงานสูญเสียที่สวิตช์อยู่ใน ระดับต่ำและลดความเครียดที่อุปกรณ์ลงทำให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ดีขึ้นและสามารถเพิ่ม ความถี่สวิตช์ลดขนาดและน้ำหนักอุปกรณ์ในวงจรและมีการตอบสนองเร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ลด ปัญหาของการเกิด EMI ในคอนเวอร์เตอร์

หลักการทางานของคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์หลักๆจะมีการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้า กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรเรโซแนนซ์และวงจรเรียงกระแสขาออกที่เปลี่ยนจากไฟฟ้า กระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะเปลี่ยนด้วยโครงสร้างการสวิตช์ซึ่งส่วนวงจรเรโซแนนซ์จะ เป็นบัฟเฟอร์พลังงานระหว่างขาเข้าและขาออกโดยวงจรจะเป็นโครงสร้างที่ไม่มีกำลังงานสูญเสียส่วน การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะเป็นวงจรเรียงกระแสที่ขาออกของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายประกอบได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมหลักๆได้ดังรูปที่ 2.7



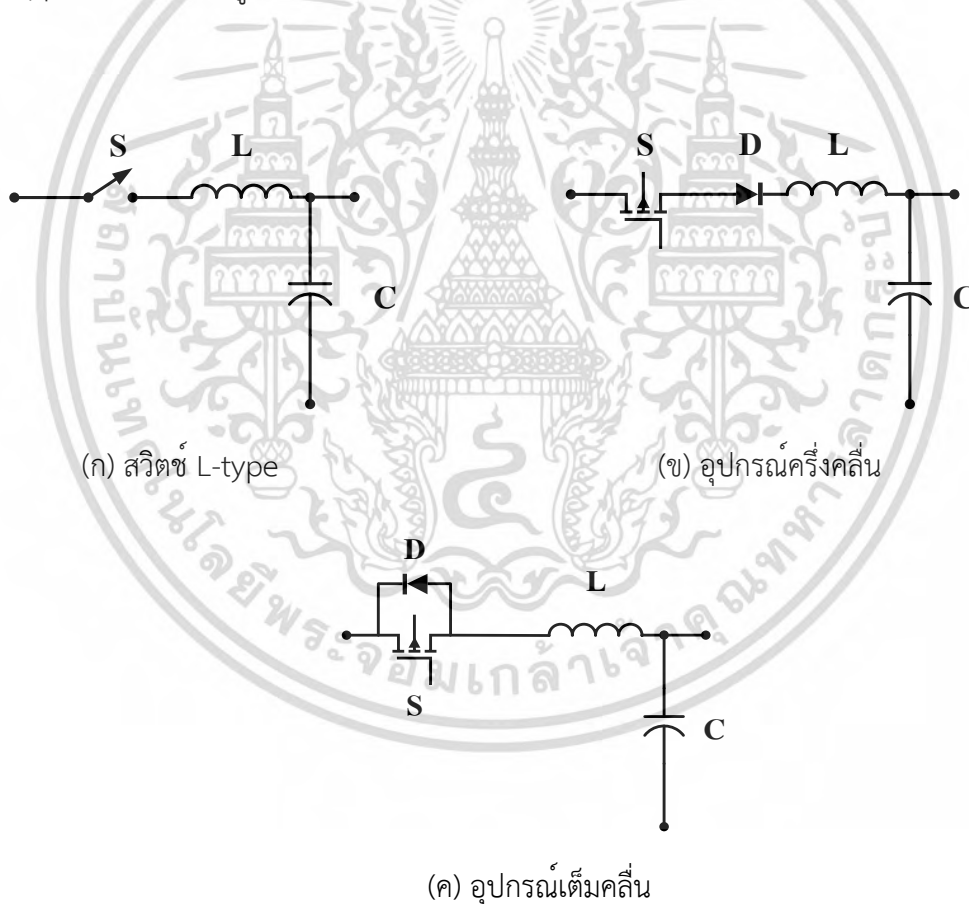
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซีสวิตช์แบบนุ่มนวล

ในอดีตที่ผ่านมาในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงทำได้โดยการใช้อุปกรณ์สารกึ่ง ตัวนำกำลังในวงจรสวิตช์โหมด ในคอนเวอร์เตอร์แบบพีดับลิวิตเอ็มในการสวิตช์ของอุปกรณ์ปกติจะ เกิดขึ้นที่กระแสไฟฟ้าระดับสูง ดังนั้นเมื่อทำงานที่ความถี่สูงคอนเวอร์เตอร์จะสัมพันธ์กับการสูญเสีย กำลังงานสูงในอุปกรณ์สวิตช์และยังได้รับความเสียหายจาก EMI เป็นสาเหตุจากอุปกรณ์ที่ทำให้ ฮาร์โมนิกความถี่สูงที่เกี่ยวข้องกับรูปคลื่นแรงดันหรือกระแสที่มีการสวิตช์เป็นแบบกึ่งสี่เหลี่ยม ในเทคโนโลยีของคอนเวอร์เตอร์โหมดพีดับลิวิตเอ็มถึงจะให้การสวิตช์ที่เร็วขึ้นแต่ความถี่จากการ ทางานจะถูกจำกัดด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในเทคนิคการเรโซแนนซ์กำลังงานที่เกิดขึ้นจากการ สวิตช์จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากกระแสที่ผ่านสวิตช์หรือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่สวิตช์จะมีค่า เท่ากับใกล้เคียงศูนย์เมื่อเทียบกับคอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์จะมีขนาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็ก , น้ำหนักเบาและสามารถลดองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นในวงจรทำงานที่ระดับกำลังงานและความถี่เดียวกัน ทำให้ได้การออกแบบรูปทรงที่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา และยังสามารถทำงานช่วงความถี่ 2-3 เมกกะเฮิร์ต ข้อดีอย่างหนึ่งของคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์ที่ดีกว่าแบบพีดับบลิวเอ็มคือสามารถลดองค์ประกอบของฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าต่ำทำงานที่ระดับกำลังงานและความถี่เดียวกัน

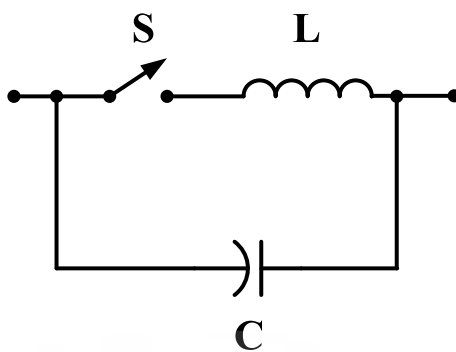
#### 2.4.1 หลักการสวิตช์ด้วยกระแสศูนย์

ในคอนเวอร์เตอร์การสวิตช์ด้วยเรโซแนนซ์การจัดเรียงตัวเหนี่ยวนา-ตัวเก็บประจุมีความเป็นไปได้ 2 แบบที่จะเป็นแบบสวิตช์เรโซแนนซ์คือแบบ L-type หรือ M-type โดยจะสามารถใช้ได้ ในวงจรครึ่งคลื่นหรือเต็มคลื่นซึ่งเชื่อมโยงไปถึงกระแสการสวิตช์ที่ไปในทางเดียวหรือสองทางตามลำดับขึ้นอยู่กับคอนเวอร์เตอร์ที่จะนำไปใช้งาน สวิตช์แบบ L-type จะแสดงได้ดังรูป 2.8 สวิตช์แบบ M-type จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ทั้งในแบบการใช้ครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น

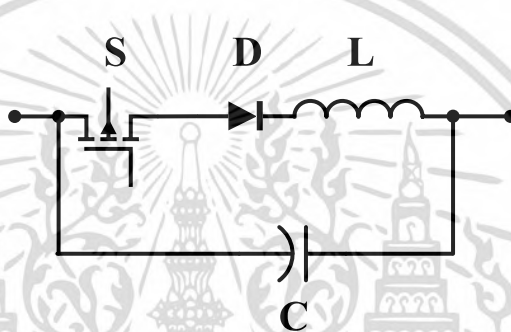


รูปที่ 2.8 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยกระแสศูนย์แบบ L-type

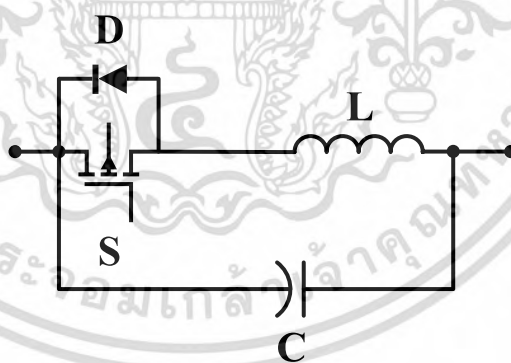
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สวิตช์ M-type



(ข) อุปกรณ์ครึ่งคลื่น



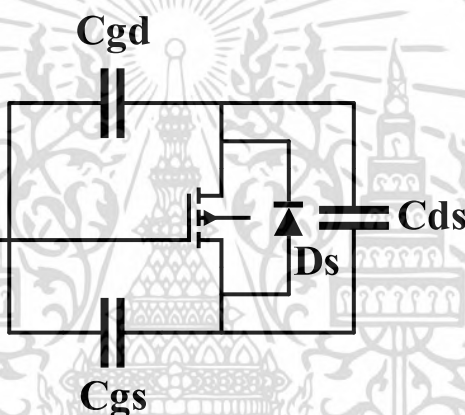
(ค) อุปกรณ์เต็มคลื่น

รูปที่ 2.9 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยกระแสศูนย์แบบ M-type

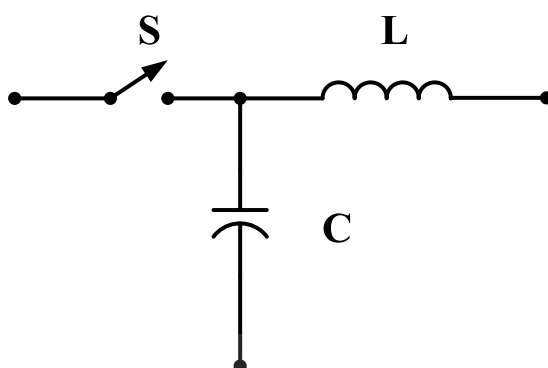
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 หลักการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์

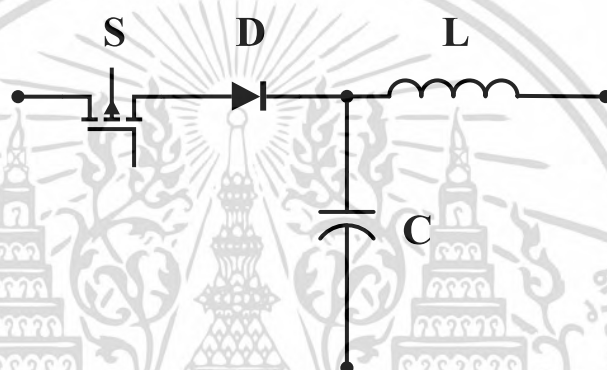
ในส่วนสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์จะนำคอนเวอร์เตอร์กึ่งเรโซแนนซ์มาวิเคราะห์เช่นเดียวกับการสวิตช์ด้วยกระแสศูนย์ ในหลักการทั่วไปสวิตช์จะนำกระแสที่แรงดันเป็นศูนย์ แต่ขณะสวิตช์หยุดนำกระแสแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะมีค่าสูงเป็นสาเหตุให้เกิดความเค้นสูงกว่าแบบสวิตช์แบบร่นแรง ในหลักการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ ไดโอดฟลายแบ็กคร่อมสวิตช์ถูกนำมาใช้เพื่อลดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ส่งผลให้แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ อุปกรณ์สวิตช์กำลังจะมีตัวเก็บประจุแฝงเกิดขึ้นและไดโอดฟลายแบ็กจะเป็นตัวไดโอดภายในของสวิตช์เอง อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตรวมไปถึงตัวไดโอดและตัวเก็บประจุแฝงภายในสวิตช์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ส่วนการจัดรูปแบบของสวิตช์เรโซแนนซ์จะสวิตช์เรโซแนนซ์แบบ L-type และ M-type เช่นเดียวกับการสวิตช์ด้วยกระแสศูนย์ดังรูปที่ 2.11 และ 2.12



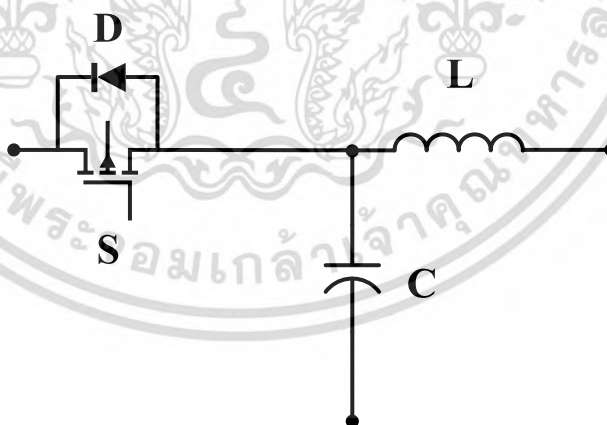
รูปที่ 2.10 อุปกรณ์สวิตช์มอสเฟตรวมไปถึงตัวไดโอดและตัวเก็บประจุแฝงภายในสวิตช์



(ก) สวิตช์ L-type



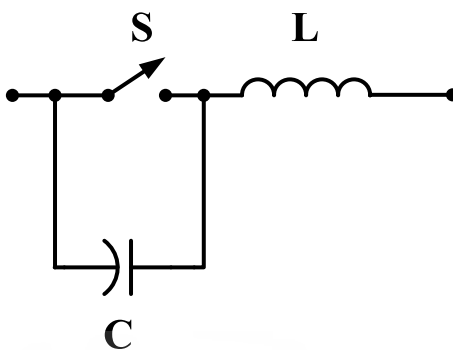
(ข) อุปกรณ์ครึ่งคลื่น



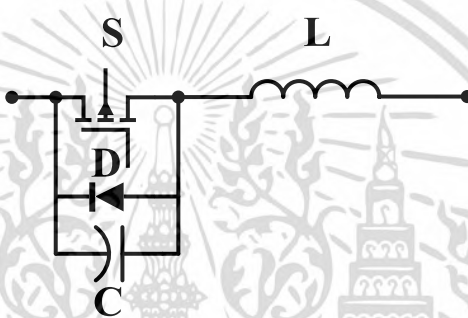
(ค) อุปกรณ์เต็มคลื่น

รูปที่ 2.11 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยแรงดันศูนย์แบบ L-type

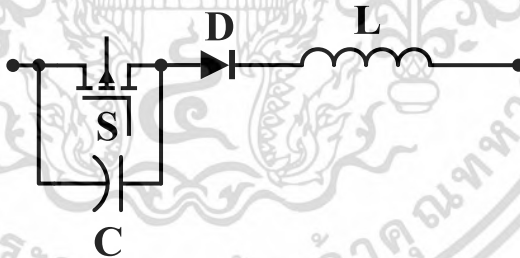
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สวิตช์ M-type



(ข) อุปกรณ์ครึ่งคลื่น

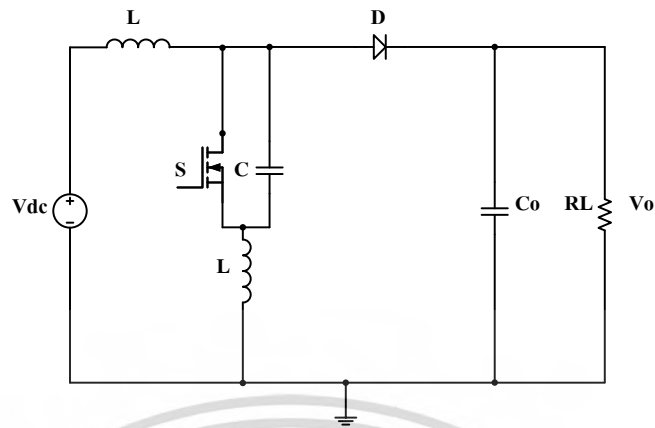


(ค) อุปกรณ์เต็มคลื่น

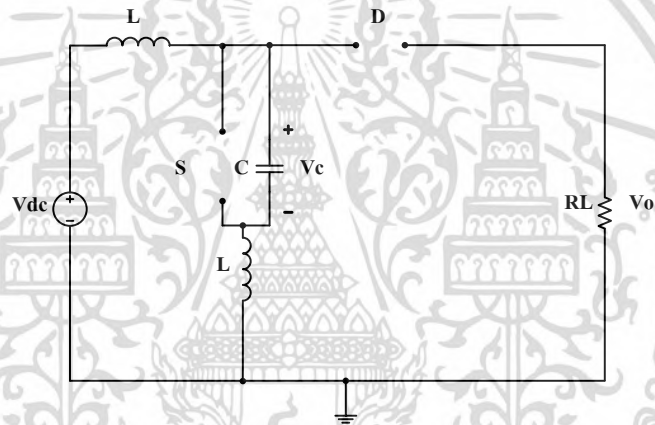
รูปที่ 2.12 การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ด้วยแรงดันศูนย์แบบ M-type

ในส่วนของคนเวอร์เตอร์แบบบูสต์แบบกึ่งเรโซแนนซ์จะพิจารณาโดยใช้สวิตช์แบบ M-TYPE แทนในสวิตช์หลักในคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจะมีโหมดการท างานหลักอยู่ 4 โหมดดังรูปที่ 2.14-2.17

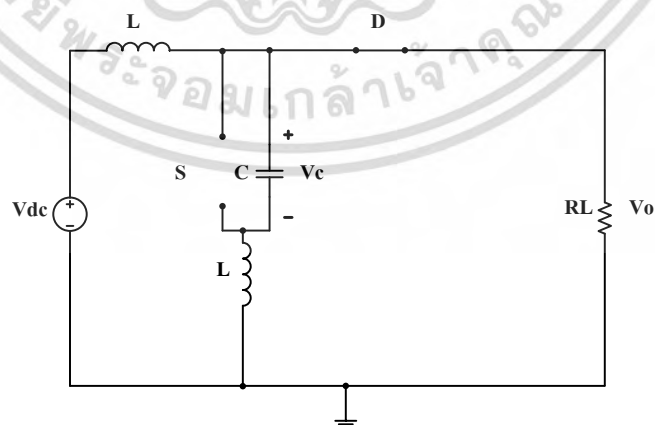
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 คอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE

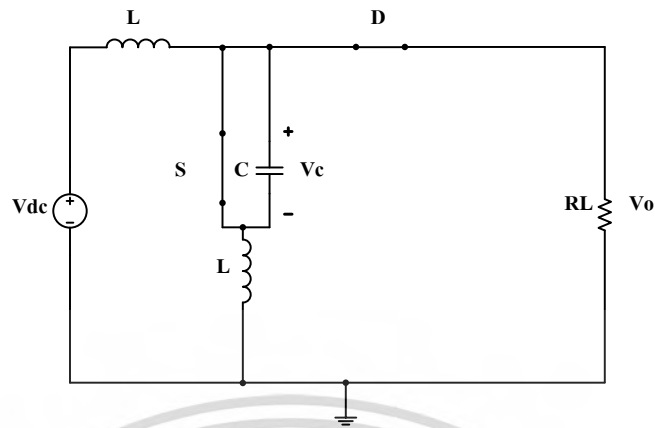


รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 1

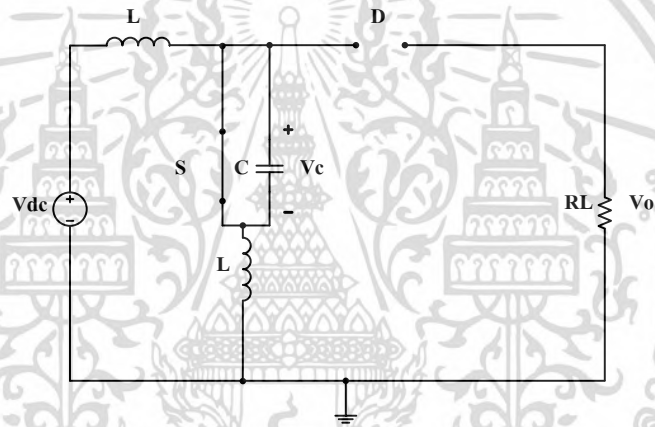


รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 3



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ กึ่งเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์แบบ M-TYPE โหมดที่ 4 โหมดที่ 1 ( $0 \leq t < t_1$ ) สมมติให้เวลา  $t < 0$  สวิตช์นำกระแสขณะที่ไดโอด D ยังไม่นำกระแสที่เวลา  $t=0$  สวิตช์จะหยุดนำกระแสในขณะที่ยังปล่อยให้ตัวเก็บประจุท การชาร์จด้วยกระแสคงที่ด้วยค่า  $I_{in}$

$$I_{in} = i_L(t) = i_C(t) = C \frac{dv_c}{dt} \quad (2.31)$$

เนื่องจากแรงดันตัวเก็บประจุเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ ( ) แสดงในรูป  $v_c(t)$  ได้ดังนี้

$$v_c(t) = \frac{I_{in}}{C} t \quad (2.32)$$

แรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าถึงแรงดันด้านออกที่เวลา  $t = t_1, v_c(t_1) = V_o$  จะเท่ากับ

$$t_1 = \frac{CV_o}{I_{in}} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดที่ 2 ( $t_1 \leq t < t_2$ ) ที่เวลา  $t = t_1$  สภาวะเรโซแนนซ์เริ่มที่ไดโอด D น ทรแสะและสวิตช์ S หยุดทำงานดังรูปที่ 2.13 (ข) เมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่าถึงแรงดันด้านออก ทรแสะ  $i_L$  จะมีค่าเป็นลบสูงสุดเงื่อนไขเริ่มต้นของแรงดันของตัวเก็บประจุ  $v_c(t_1) = V_o$  และ  $i_L(t_1) = I_{in}$  ซึ่งสามารถแสดงสมการของ  $v_c(t)$  ได้ดังนี้

$$v_c(t) = V_o + i_{in} Z_o \sin \omega_o(t - t_1) \quad (2.35)$$

และทรแสะตัวเหนี่ยวน วาคือ

$$i_L(t) = I_{in} [1 + \cos \omega_o(t - t_1)] \quad (2.36)$$

หาค่าสมการที่ (2.35) ที่เวลา  $t = t_2$  กับ  $v_c(t_2) = 0$  ช่วงเวลาระหว่าง  $t_1$  และ  $t_2$  สามารถหาได้จาก

$$(t_2 - t_1) = \frac{1}{\omega_o} \sin^{-1} \left( -\frac{V_o}{I_{in} Z_o} \right) \quad (2.37)$$

โหมดที่ 3 ( $t_2 \leq t < t_3$ ) โหมดที่ 3 เริ่มท างนที่เวลา  $t = t_2$  เมื่อ  $v_c(t_2) = 0$  เป็นศูนย์และสวิตช์ S น ทรแสะที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ ทั้งสวิตช์และไดโอดจะน ทรแสะและทรแสะตัวเหนี่ยวน วาจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น  $I_{in}$  ที่เวลา  $t = t_3$  ไดโอดจะน ทรแสะและตรึงแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไว้ที่ศูนย์

$$V_c(t_2) = 0 \quad (2.38)$$

$$I_L(t_2) = I_{in} (1 - \cos \omega_o(t_2 - t)) \quad (2.39)$$

เพราะแรงดันตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นแรงดันที่ตัวเหนี่ยวน วาจึงเท่ากับแรงดันด้านออก

$$L \frac{di_L}{dt} = V_o \quad (2.40)$$

เมื่อท ารอินทิเกรตสมการ () ทรแสะเหนี่ยวน วาจะได้

$$i_L(t) = \frac{V_o}{L} (t - t_2) + I_L(t_2) \quad (2.41)$$

เพื่อให้สวิตช์ สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์บรรลุผล สวิตช์จะสามารถน ทรแสะเวลาไหนก็ได้หลังจากเวลา  $t_2$  และก่อน  $t_2'$  ที่เวลา  $t = t_2$  ทรแสะที่ตัวเหนี่ยวน วาจะกลับขั้วแรงดันและสวิตช์จะน ทรแสะ ที่เวลา  $t = t_3$  ทรแสะ  $i_L$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ ()

$$(t_3 - t_2) = \frac{L}{V_o} i_L(t_2) \quad (2.42)$$

แทนค่าสมการด้วยเงื่อนไขเริ่มต้นจะได้

$$(t_3 - t_2) = \frac{L}{V_o} I_{in} (1 + \cos \omega_o (t_2 - t_1))$$

โหมดที่ 4 ( $t_3 \leq t < t_4$ ) ที่เวลา  $t_3$  กระแสที่ตัวเหนี่ยวนจะเป็นศูนย์และไดโอดด้านนอกจะหยุดทำงาน แต่สวิตช์จะยังคงน าระแสอยู่โดยรอบการท งานถัดไปจะท ำที่เวลา  $t = T_s$

## 2.5 หลักการพื้นฐานในการออกแบบอุปกรณ์แม่เหล็ก[5]

หม้อแปลงกำลังและตัวเหนี่ยวนาเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในวงจรคอนเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ชิ่ง โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะสร้างแม่เหล็กทำให้การออกแบบต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและคุณสมบัติของสารแม่เหล็กอย่างเพียงพอเพราะอุปกรณ์แม่เหล็กมีข้อจ ากัดมากมายเช่น พิกัดกำลังไฟฟ้า กระแสที่ไหลผ่าน การอิ่มตัวของสารแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่ใช้งาน โดยทั่วไปอุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะแบ่งออกเป็นสามชนิดได้แก่ แม่เหล็กถาวร หม้อแปลงไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนา แต่ละอุปกรณ์จะมีคานิยามเพื่อให้เกิดความเข้าใจคือ

นิยามของแม่เหล็กถาวรคือ อุปกรณ์แม่เหล็กที่ท ำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้แม้ว่าจะไม่ได้รับการท ำแม่เหล็ก (magnetization)

นิยามของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ อุปกรณ์แม่เหล็กที่ประกอบด้วยขดลวดทองแดงหลายขดท ำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากด้านเข้าไปสู่ด้านออกโดยที่ไม่มีการสะสมพลังงานในตัวเองแต่อย่างใด แต่ในทางปฏิบัติหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการสะสมพลังงานไฟฟ้าบางส่วนในตัวเหนี่ยวน ทาแม่เหล็กและตัวเหนี่ยวนารั่วซึ่งมีผลเสียกับหม้อแปลงดังนั้นการออกแบบที่ดีต้องท ำให้ค่าตัวเหนี่ยวนารั่วมีค่าน้อยที่สุด

นิยามของตัวเหนี่ยวนาคือ อุปกรณ์แม่เหล็กที่ท ำหน้าที่ในการสะสมและคายพลังงานไฟฟ้า และคุณสมบัติดังกล่าวสามารถน ามาใช้เป็นตัวรองกระแสไฟฟ้าได้

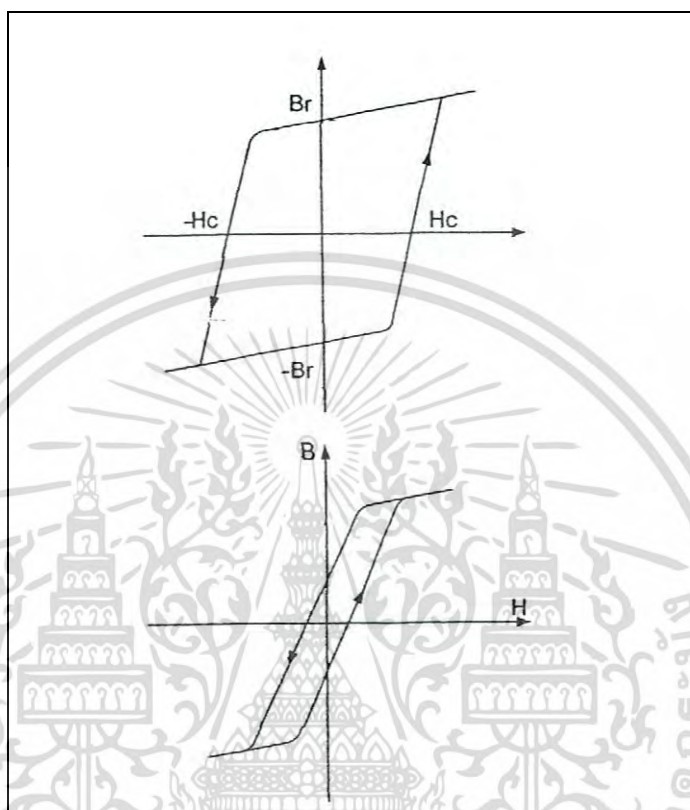
### 2.5.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์แม่เหล็ก

- แม่เหล็กถาวร คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรจะสามารถสร้างเส้นแรงแม่เหล็กได้ถึงแม้จะไม่ได้ป้อนแรงเคลื่อนแม่เหล็กและคุณสมบัติที่สำคัญของสารแม่เหล็กที่จะท ำแม่เหล็กถาวรคือ ค่าความหนาแน่นแม่เหล็กตกค้าง (Br) และค่า Hc (coercive force) จะมีค่าสูงและเพื่อให้ค่าทั้งสองมีค่าสูง วัสดุส่วนใหญ่ที่จะถูกน ามาใช้จะต้องมีวงรอบฮิสเตอร์ซิสที่เกือบจะเป็นรูปสี่เหลี่ยม

- หม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องมีค่าซาบซิมได้สูง เพื่อลดค่าสันแรงแม่เหล็กรั่วและเพื่อให้ค่ากระแสทาแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะท ำได้และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะต้องมีค่าต่ำโดยสารแม่เหล็กที่จะน ามาท ำหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องมีกราฟความสัมพันธ์ของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( B-H Curve ) ในลักษณะแคบเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดค่าก ล้างไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากวงรอบฮิสเตอรีซิส



รูปที่ 2.18 วงรอบฮิสเตอรีซิส สำหรับ แม่เหล็กถาวรและส าหรับท าหม้อแปลงไฟฟ้า

- **ตัวเหนี่ยวนำ** คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำคือ จะต้องมีการความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก ( B-H Curve ) จะต้องมีความเป็นเชิงเส้น (linearity) อย่างไรก็ตาม สารเฟอร์โรแมกเนติกจะมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีค่าความซึมซาบสูง ในขณะที่แกนอากาศหรือแกนที่ ทาจากสารที่ไม่ใช่เฟอร์โรแมกเนติก ค่าความซึมซาบมีค่า  $\mu = \mu_0$  ซึ่งจะมีค่าความเป็นเชิงเส้นสูง แต่จะท ให้ได้ค่าเหนี่ยวน ำต่ำ และด้วยข้อ จาคัดกล่าวจึงทำให้เป็นการยาก ในทางปฏิบัติที่จะออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำค่างที่ได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการแก้ปัญหา ดังกล่าวในทางปฏิบัติก็คือเพิ่มช่องอากาศในแกนแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้แกนแม่เหล็กที่ทาจากสาร เฟอร์โรแมกเนติกให้ค่าความซึมซาบได้ที่สูง ในขณะที่ช่องอากาศจะมีผลทำให้ค่าความซึมซาบ มี ค่าค่างที่ โดยที่ช่องอากาศที่เพิ่มเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์ นอกจากจะใช้ในการสะสมพลังงานแม่เหล็ก เท่านั้น แต่ยังทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีความเป็นเชิงเส้นอีกด้วย นอกจากสารเฟอร์โรแมกเนติกแล้ว ยังมีสารแกนโลหะแบบผง (powder metal core) ซึ่งมีสารแม่เหล็กที่มีช่องอากาศกระจายอยู่ภายใน ซึ่งจะให้ผลเหมือนกับการเพิ่มช่องอากาศเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่สำหรับแกนเฟอร์ไรต์[5]

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะมีความแตกต่างกับหม้อแปลงไฟฟ้าคือ กรณีตัวเหนี่ยวนำ เส้นแรงแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับกระแสไหลด กรณีหม้อแปลงไฟฟ้า เส้นแรงแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าทาแม่เหล็กเท่านั้น ( magnetizing current ) โดยกระแสไหลดจะไม่มีผลต่อเส้นแรงแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กแต่อย่างใด จากความแตกต่างดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เมื่อกระแสไหลดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นก็อาจจะมีผลทาให้แกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวได้และเมื่อแกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวก็จะทาให้ค่าความเหนี่ยวนำ ในแกนแม่เหล็กลดลงดังนั้นการออกแบบตัวเหนี่ยวนำมีความจาเป็นที่จะต้องกำหนดค่ากระแสไหลดสูงสุดเพื่อที่จะเลือกใช้ขนาดแกนแม่เหล็กที่จะไม่เกิดการอิ่มตัวและในกรณีกระแสไหลดมีค่าสูงขนาดของแกนจะใหญ่ตามขึ้นไปด้วยแต่จะสามารถลดลงได้ด้วยการเพิ่มเพิ่มช่องว่างอากาศ (air gap) ที่เหมาะสมในแกนแม่เหล็ก สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติจะมีหลายวิธีแต่ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีผลคูณพื้นที่สำหรับตัวเหนี่ยวนำที่ใช้แกนเฟอร์ไรต์ในการออกแบบเท่านั้น

### - คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ

สำหรับขั้นตอนแรกในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำคือการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำในวงจรเรโซแนนซ์จะกำหนดจากความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency) และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor : Q) ของวงจร

### - ผลคูณพื้นที่ (Ap)

พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ จะมีคเท่ากับ

$$E = \frac{1}{2} L I_m^2 \quad (2.43)$$

โดยที่  $E$  หมายถึง พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ (joules)

$L$  หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำ (H)

$I_m$  หมายถึงกระแสยอดของวงจร (A)

โดยพื้นที่ในการพันขดลวดจะต้องเหมาะสมกับจ นวนรอบ (N) และพื้นที่หน้าตัดของขดลวด (a)

$$K_w A_w = N \cdot a \quad (2.44)$$

แทนค่า  $a = \frac{I}{J}$  ลงในสมการที่จะได้

$$K_w A_w = N \cdot \frac{1}{J}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากนิยาม crest factor:  $K_C$  จะได้ว่า

$$K_C = \frac{I_m}{I}$$

$I_m$  หมายถึง ค่ากระแสยอด (A)

$I$  หมายถึง ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแส (A)

แทนค่า  $I = \frac{I_m}{K_C}$  ลงในสมการข้างต้นจะได้

$$K_W K_C A_W J = N \cdot I_m \quad (2.45)$$

และจากสมการแรงดันไฟฟ้าของฟาราเดย์จะได้

$$e = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} = N A_c \frac{dB}{dt}$$

และ

$$L I_m = N A_c B_m \quad (2.46)$$

แทนค่าสมการที่(2.46)ลงในสมการที่(2.43)จะได้

$$E = \frac{1}{2} N I_m A_c B_m \quad (2.47)$$

แทนค่า  $I_m$  ในสมการที่(2.46)ลงในสมการที่(2.43)จะได้

$$A_p = A_W A_C = \frac{2E}{K_W K_C J B_m} \quad (2.48)$$

- จำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ

จำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ จะสามารถหาได้จาก

$$N = \frac{L I_m}{A_C B_m} \quad (2.49)$$

- ขนาดของขดลวดตัวนำ

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ สามารถหาได้จากสมการ

$$a = \frac{I}{J} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเว็บไซต์หรือเอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่องอากาศ

จากสมการแรงดันไฟฟ้าของฟาราเดย์จะได้

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

$$B = \frac{LI}{NA_C} \quad (2.51)$$

โดย

$$B = \frac{\phi}{A_C}$$

จากกฎของแอมแปร์จะได้

$$H = \frac{NI}{l_m} \quad (2.52)$$

ดังนั้น

$$B = \mu \frac{NI}{l_m} \quad (2.53)$$

จากสมการที่(2.52)และ(2.53)จะได้

$$\frac{l_m}{\mu A_C} = \frac{N^2}{L} \quad (2.54)$$

โดยที่  $\frac{l_m}{\mu A_C}$  หมายถึงค่าความต้านทานแม่เหล็กซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{l_m}{\mu A_C} = \frac{l_C}{\mu_0 \mu_r A_C} + \frac{l_g}{\mu_0 A_C}$$

โดยที่  $l_C$  หมายถึง เส้นทางเดินแม่เหล็ก (m)

$l_g$  หมายถึง ระยะห่างของช่องอากาศ (m)

$A_C$  หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (m<sup>2</sup>)

ถ้าแกนแม่เหล็กมีค่าความซาบซึมแม่เหล็กสูงจะทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กที่เกิดจากช่องอากาศจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความต้านทานแม่เหล็กของแกนแม่เหล็ก

$$\frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} \ll \frac{l_g}{\mu_0 A_c}$$

ดังนั้นจากสมการที่(2.54)สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่เพื่อหาค่า  $l_g$  ได้ดังนี้

$$l_g = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{L} \quad (2.55)$$

ในการคำนวณเพื่อหาระยะของช่องว่างอากาศจะทำการสมมติค่า  $N$  และ  $B_m$  ซึ่งจะไม่เท่ากับค่าที่เป็นจริงของ  $B_m$  ในแกนแม่เหล็ก ทำให้ช่องว่างอากาศที่คำนวณได้อาจจะไม่เที่ยงตรง ดังนั้นในทางปฏิบัติ ค่าความเหนี่ยวนำที่ตัดการอาจจะต้องมีการปรับแต่งด้วยการปรับระยะช่องอากาศ

## 2.7 สรุป

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นิ่มนวลจะเห็นได้ว่ามีหลายทฤษฎีเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อที่จะทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้แบบสวิตช์นิ่มนวลและมีประสิทธิภาพที่ดี อย่างไรก็ตามในการทำให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานได้แบบสวิตช์นิ่มนวลนั้นต้องใช้เทคนิคการสวิตช์ด้วยแรงดันหรือกระแสศูนย์เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวอุปกรณ์ในช่วงที่สวิตช์นำกระแสและไม่นำกระแส อย่างเช่น การสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (Zero-voltage switching : ZVS) ซึ่งเป็นการลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการเริ่มนำกระแส (Turn-on) การสวิตช์แบบกระแสศูนย์ (Zero-current switching) ซึ่งเป็นการลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงระหว่างการหยุดนำกระแส (Turn-off) การสวิตช์นิ่มนวลแบบเรโซแนนซ์ (Soft switching resonant) ซึ่งสามารถลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้ทั้งในช่วงของการเริ่มนำกระแส (Turn-on) และในช่วงระหว่างการหยุดนำกระแส (Turn-off) อย่างที่สามในการเลือกขนาดตัวเหนี่ยวนำและแกนเหล็กที่ใช้ต้องสัมพันธ์กับค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้เพื่อป้องกันแกนเหล็กอิ่มตัวเพื่อที่จะสามารถทำให้วงจรบูสต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดการสูญเสียในการสวิตช์น้อยที่สุด (Switching losses)

## บทที่ 3

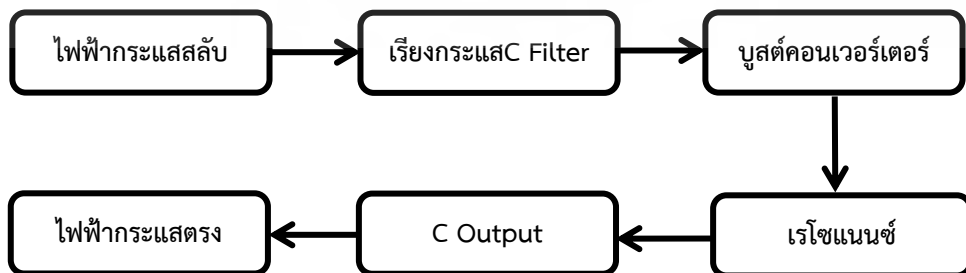
# หลักการงานและการออกแบบวงจร

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการงานและการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์ นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์โดยในงานวิจัยนี้จะนำวงจรเรโซแนนซ์มาต่อ ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้สามารถใช้งานได้เกือบแบบสวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดัน ศูนย์ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc) สวิตช์หลัก (Sm) สวิตช์ช่วย (Sa) ซึ่ง จะใช้มอสเฟตในการสวิตช์เพื่อใช้งานในความถี่สูงโดยสวิตช์ช่วยจะสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ สวิตช์หลักได้ ตัวเก็บประจุ (Cr,Cr2 :Resonant Capacitors) ใช้สำหรับการถ่ายโอนประจุระหว่างตัว เหนี่ยววนา (Lr :Resonant Inductor) เพื่อใช้ในการทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในวงจร ไดโอด (D1,D2) ต่อ อนุกรมกันและไปขนานระหว่างสวิตช์ช่วย (Sa) และตัวเหนี่ยววนา (Lr) เพื่อใช้เป็นทางเดินของกระแส ที่ไหลและตัวเหนี่ยววนา (Lr) เพื่อแบ่งกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์หลัก (Lm) เพื่อลดการสูญเสีย โดย เอาท์พุทที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์นั้นจะสามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้ 1,000 วัตต์ และ 600 วัตต์ ความถี่สวิตช์เท่ากับ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยการวิเคราะห์โหมดการทางานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ที่จะ ำเสนอในหัวข้อถัดไป

### 3.2 หลักการทางานของวงจร

หลักการทางานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ ด้วยวงจรเรโซแนนซ์นั้นจะเป็นการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกให้มีระดับแรงดัน มากกว่าด้านเข้าโดยอาศัยตัวเหนี่ยววนาหลักของวงจรรวมกับแรงดันที่ได้จากแหล่งจ่าย โดย แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะถูกกรองด้วยวงจร C ฟิวเตอร์ผ่านไปยังคอนเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มระดับ แรงดันให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ตัวเหนี่ยววนาเรโซแนนซ์ , ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์จะเกิดการเรโซแนนซ์ ในช่วงเวลาที่สวิตช์หลักนำกระแสและไม่นำกระแสเพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่สวิตช์หลักหลังจากนั้น แรงดันไฟฟ้าจากคอนเวอร์เตอร์จะถูกสะสมไว้ในตัวเก็บประจุและจ่ายให้กับโหลดอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.1 หลักการทางานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

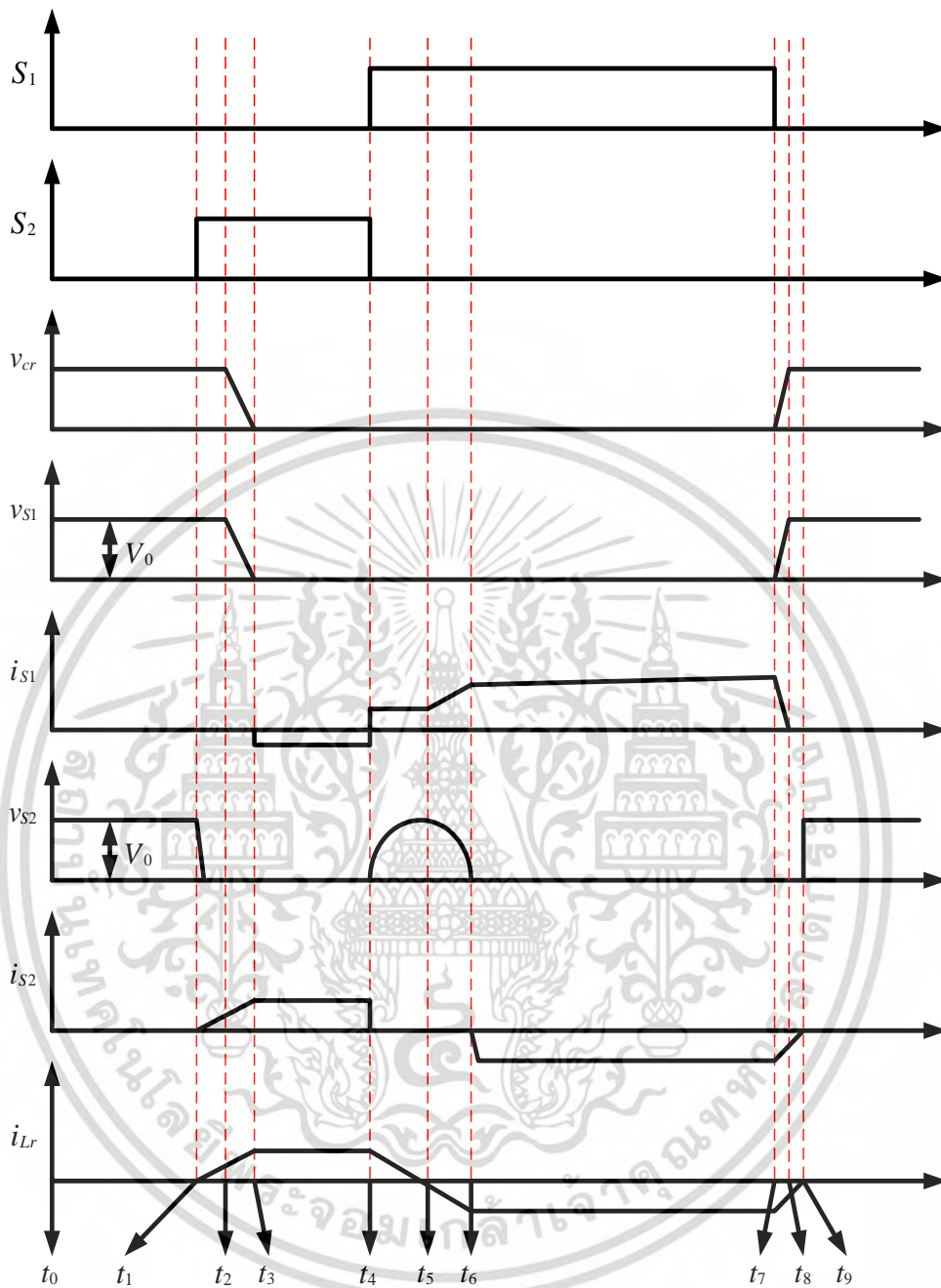
### 3.3 โหมดการทำงานของวงจร

การวิเคราะห์โหมดการท างานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 9 โหมดการท างานในหนึ่งไซเคิลดังรูปที่ 3.2 โดยในแต่ละโหมดจะท างานเป็นช่วงเวลาดังนี้

- โหมดที่ 1 ท างานในช่วงเวลา  $t_0 \leq t < t_1$
- โหมดที่ 2 ท างานในช่วงเวลา  $t_1 \leq t < t_2$
- โหมดที่ 3 ท างานในช่วงเวลา  $t_2 \leq t < t_3$
- โหมดที่ 4 ท างานในช่วงเวลา  $t_3 \leq t < t_4$
- โหมดที่ 5 ท างานในช่วงเวลา  $t_4 \leq t < t_5$
- โหมดที่ 6 ท างานในช่วงเวลา  $t_5 \leq t < t_6$
- โหมดที่ 7 ท างานในช่วงเวลา  $t_6 \leq t < t_7$
- โหมดที่ 8 ท างานในช่วงเวลา  $t_7 \leq t < t_8$
- โหมดที่ 9 ท างานในช่วงเวลา  $t_8 \leq t < t_9$

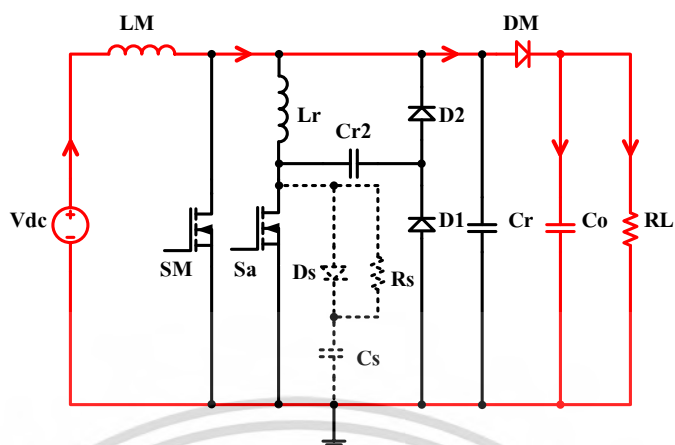
ในการวิเคราะห์โหมดการท างานแต่ละโหมดการท างานจะวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. อุปกรณ์การกรอง  $L_o$  ,  $L_m$  ,  $L_F$  และ  $C_o$  จะมีค่าใหญ่มากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์เรโซแนนซ์ L และ C
2. อุปกรณ์กรองด้านออก  $L_o - C_o - R$  จะทำตัวเหมือนกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่  $I_o$
3. อุปกรณ์กรองด้านออก  $C_o - R$  จะทำตัวเหมือนกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่  $V_o$
4. อุปกรณ์สวิตช์และไดโอดจะถือเป็นอุดมคติ
5. อุปกรณ์วงจรรีแอคทีฟจะถือเป็นอุดมคติ

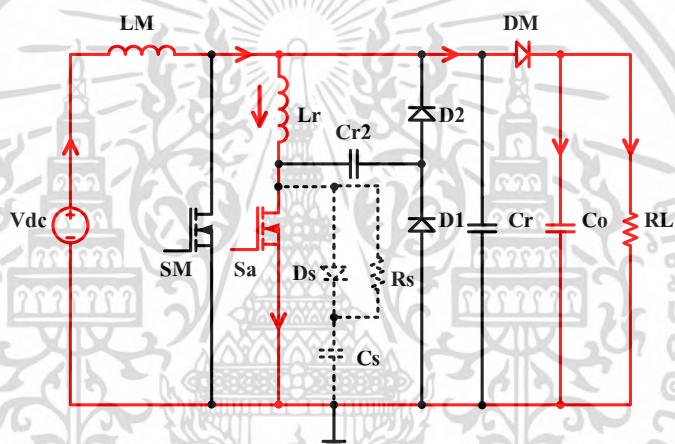


รูปที่ 3.2 โหมดการท งานของวงจร

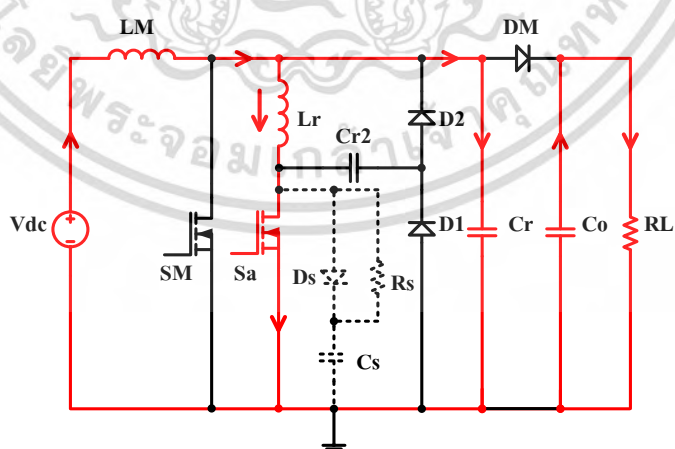
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 โหมดการท งานที่ 1

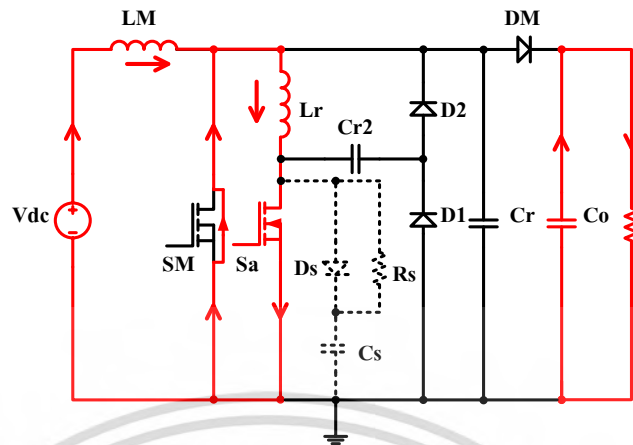


รูปที่ 3.4 โหมดการท งานที่ 2

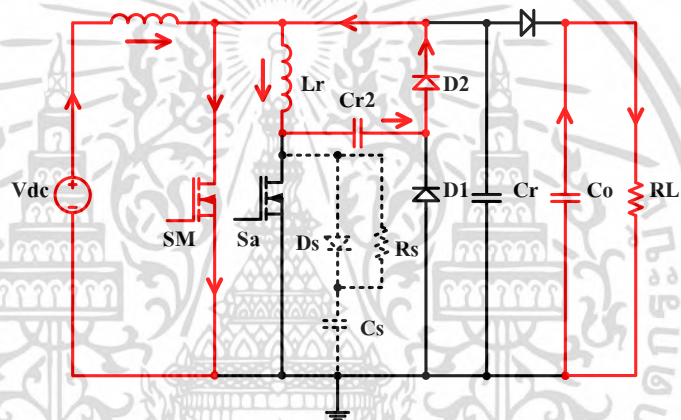


รูปที่ 3.5 โหมดการท งานที่ 3

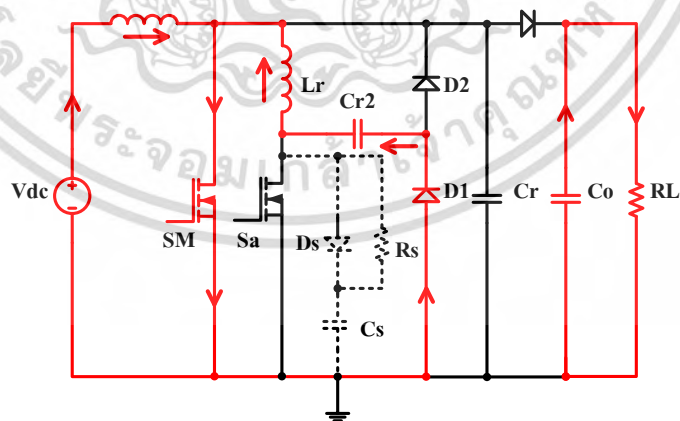
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โหมตการท งานที่ 4

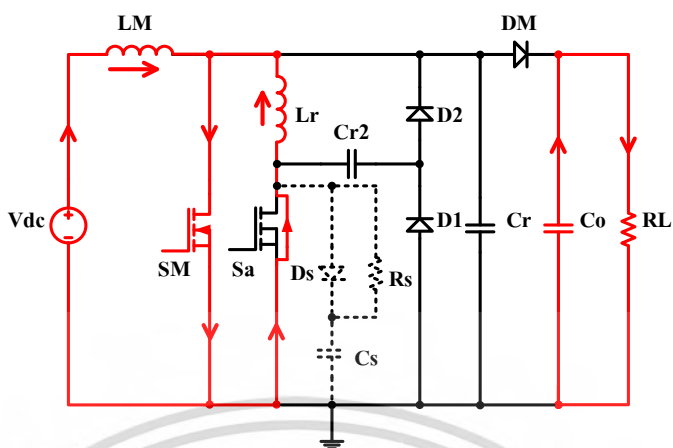


รูปที่ 3.7 โหมตการท งานที่ 5

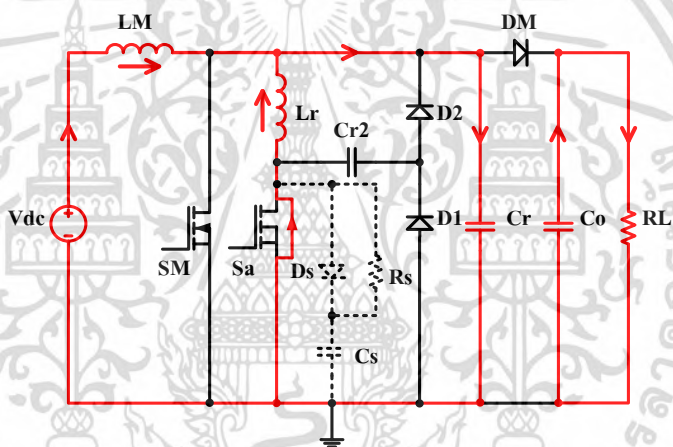


รูปที่ 3.8 โหมตการท งานที่ 6

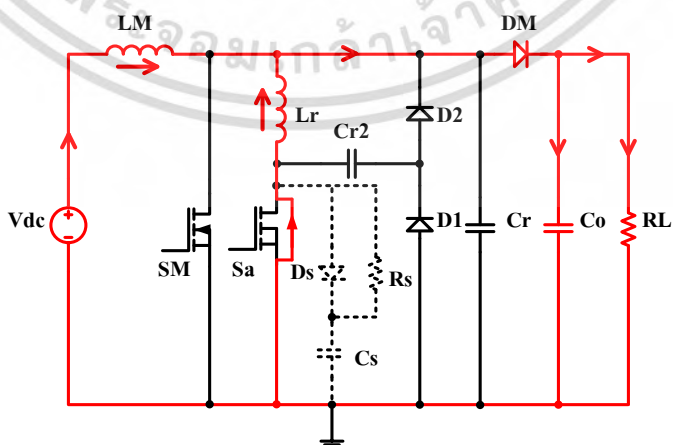
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 โหมตการท งานที่ 7



รูปที่ 3.10 โหมตการท งานที่ 8



รูปที่ 3.11 โหมตการท งานที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### โหมดการทำงานที่ 1

โหมดที่ 1 (รูปที่ 3.3  $t_0 \leq t < t_1$ ) สวิตช์หลัก ( $S_M$ ) และสวิตช์ช่วย ( $S_a$ ) อยู่ในสถานะไม่ ทาระแสโดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนาหลัก ( $L_M$ ) จะส่งผ่านไปยังโหลดโดยผ่านไดโอดหลัก ( $D_M$ ) ในโหมดนี้สมการกระแสของตัวเหนี่ยวนาหลัก ( $L_M$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3.3) ใน ระหว่างการถ่ายโอนพลังงานของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) และตัวเหนี่ยวนาหลัก ( $L_M$ ) จะอยู่ใน สภาวะเรโซแนนซ์

$$v_L(t) = V_{in} - V_o \quad (3.1)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int v_L dt \quad (3.2)$$

$$i_L(t) = \frac{V_{in} - V_o}{L} (t - t_0) + I(t_0) = I(t_0) - \frac{V_o - V_{in}}{L} (t - t_0) \quad (3.3)$$

$$i_{L_r}(t) = 0 \quad v_{C_r}(t) = V_o \quad v_{C_{r2}}(t) = 0 \quad (3.4)$$

### โหมดการทำงานที่ 2

โหมดที่ 2 (รูปที่ 3.4  $t_1 \leq t < t_2$ ) เมื่อสวิตช์ช่วย ( $S_a$ ) เริ่มนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะค่อยๆเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนาหลัก ( $L_M$ ) และแรงดันที่ผ่านตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเท่ากับกับแรงดันเอาต์พุตด้วยเช่นกันใน โหมดนี้

### โหมดการทำงานที่ 3

โหมดที่ 3 (รูปที่ 3.5  $t_2 \leq t < t_3$ ) ในโหมดนี้ไดโอดหลัก ( $D_M$ ) จะไม่นำกระแสหลังจากที่ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนาหลัก ( $S_M$ ) มีค่า เท่ากันแบบเชิงเส้นในโหมดที่ 2 โดยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) และตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเริ่มการเรโซแนนซ์เมื่อตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) คายประจุผ่านตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) หลังจากนั้นแรงดันที่ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) จะมีค่าเท่ากับศูนย์โหมดที่ 3 จะสิ้นสุดการท างานที่  $t_3$  ในช่วง  $t_2$  เมื่อแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) เท่ากับแรงดันเอาต์พุตตั้งนั้นช่วงเวลาก่อนที่ กระแสทั้งสองจะมีค่าเท่ากันหลังจากช่วง  $t_1$  สามารถหาได้จากสมการ (3.5) กระแสที่ไหลผ่านตัว เหนี่ยวนาเรโซแนนซ์หาได้จากสมการ (3.6) แรงดันที่ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์หาได้จากสมการ (3.7) ในโหมดนี้ค่าอิมพีแดนซ์เรโซแนนซ์ ( $Z_r$ ) แลความถี่เชิงมุม ( $\omega_r$ ) หาได้จาก  $Z_r$  และ  $\omega_r$

$$t_1 = \frac{I_L}{(V_o / L_r)} \quad (3.5)$$

$$i_{L_r}(t) = i_{min}(t) + \frac{V_o}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_2) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{C_r}(t) = V_o \cos \omega_r(t - t_2) \quad (3.7)$$

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad , \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.8)$$

#### โหมดการทำงานที่ 4

โหมดที่ 4 (รูปที่ 3.6  $t_3 \leq t < t_4$ ) ทันทันที่ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) คายประจุจนมีค่าเท่ากับศูนย์ไดโอดภายในสวิตช์หลักจะนำกระแสโดยธรรมชาติ ในกรณีนี้แรงดันที่สวิตช์หลักจะมีค่าเท่ากับศูนย์และจะนำกระแสภายใต้แรงดันใกล้เคียงศูนย์ ในโหมดนี้แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์หลัก ( $S_M$ ) จะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต ดังนั้นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3.9) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะมีค่าคงที่หลังจากโหมดการทำงานที่ 3 โดยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์จะคายประจุอย่างรวดเร็วและมีค่าเท่ากับศูนย์

$$i_L(t) = i_{\min} + \frac{V_m}{L}(t - t_3) \quad (3.9)$$

$$v_{C_r}(t) = 0 \quad , \quad v_{C_{r2}}(t) = 0 \quad (3.10)$$

#### โหมดการทำงานที่ 5

โหมดที่ 5 (รูปที่ 3.7  $t_4 \leq t < t_5$ ) ในโหมดนี้จะเริ่มต้นทำงานใกล้เคียงกับในโหมดที่ 4 โดยจะทำงานภายใต้แรงดันใกล้เคียงศูนย์และสวิตช์ช่วย ( $S_a$ ) จะไม่นำกระแสและในช่วงนี้ตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) เริ่มการเรโซแนนซ์หลังจากนั้นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะมีค่าเท่ากับศูนย์และตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ จะอัดประจุเต็มทีจากการเรโซแนนซ์และสิ้นสุดการทำงานในโหมดนี้ ดังนั้นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3.11)

$$i_L(t) = i_L(t_3) \cos \omega_a(t - t_4) \quad (3.11)$$

$$\omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{r2}}} \quad , \quad Z_a = \sqrt{\frac{L_r}{C_{r2}}} \quad (3.12)$$

#### โหมดการทำงานที่ 6

โหมดที่ 6 (รูปที่ 3.8  $t_5 \leq t < t_6$ ) หลังจากสิ้นสุดโหมดการทำงานที่ 5 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะไหลย้อนกลับผ่านตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) และไดโอด ( $D_2$ ) เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) ลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์การเรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) และตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ในโหมดนี้

### โหมดการทำงานที่ 7

โหมดที่ 7 (รูปที่ 3.9  $t_6 \leq t < t_7$ ) หลังจากทีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์ไดโอดภายในสวิตช์ช่วย ( $S_a$ ) จะนำกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และสวิตช์หลัก ( $S_M$ ) การทำงานในโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อสวิตช์หลัก ( $S_M$ ) หยุดนำกระแสโดยขนาดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนาหลัก ( $L_M$ ) และ ตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเป็นไปตามสมการ (3.13)

$$i_L(t) = I_{\min} + \frac{V_{in}}{L}(t - t_3) \quad (3.13)$$

$$i_L(t_7) = -i_L(t_3) \quad (3.14)$$

### โหมดการทำงานที่ 8

โหมดที่ 8 (รูปที่ 3.10  $t_7 \leq t < t_8$ ) เมื่อสวิตช์หลัก ( $S_M$ ) หยุดนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์โหมดการทำงานที่ 8 จะเริ่มขึ้นผลรวมของกระแสตัวของตัวเหนี่ยวนาทั้งสองคือกระแสอัดประจุของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) ในโหมดนี้ โหมดการทำงานที่ 8 จะสิ้นสุดลงเมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) มีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตโดยกระแสของตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และเงื่อนไขการทำงานแบบแรงดันศูนย์เป็นไปตามสมการ (3.15) และ (3.16)

$$i_L(t) = i_L(t_7) - \{i_L(t_7) + i_L(t_3)\} \cos \omega_r t \quad (3.15)$$

$$Z_r \{i_L(t_7) + i_L(t_3)\} > V_o \quad (3.16)$$

### โหมดการทำงานที่ 9

โหมดที่ 9 (รูปที่ 3.11  $t_8 \leq t < t_9$ ) ที่เวลา  $t_8$  ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) ยังคงถูกอัดประจุอย่างต่อเนื่องแรงดันที่ไดโอดหลักมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นไดโอดหลักจะนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์ กระแสของตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ จะลดลงแบบเชิงเส้นจนกระทั่งกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์โหมดที่ 9 จะสิ้นสุดการทำงานเพื่อเริ่มวัฏจักรการทำงานถัดไปอีกครั้งและกระแสของตัวเหนี่ยวนาหลัก ( $L_M$ ) และตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเป็นไปตามสมการ (3.17) และ (3.18)

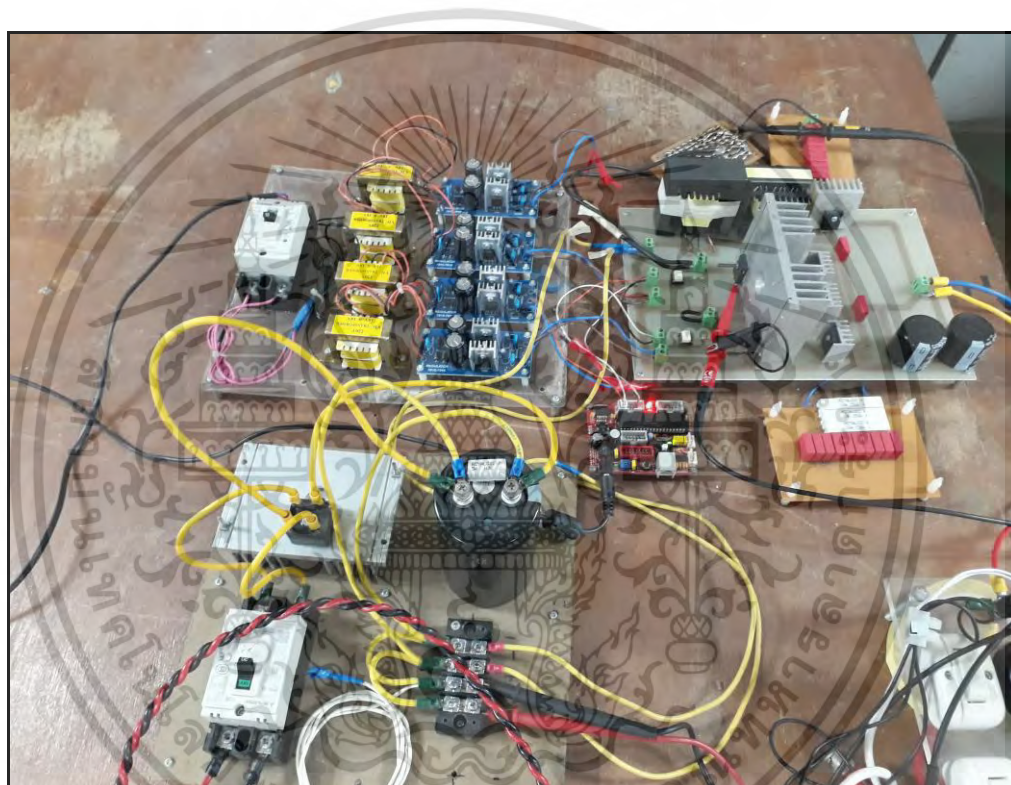
$$i_L(t) = i_L(t_7) - \frac{V_o - V_{in}}{L} t \quad (3.17)$$

$$i_L(t) = i_L(t_3) + \frac{V_o}{L} t \quad (3.18)$$

### 3.4 การออกแบบและสร้างวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสสวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์

#### 3.4.1 โครงสร้างของวงจร

สำหรับวงจรที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นจริงนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.12 รายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบรวมทั้งวิธีการออกแบบและแนวคิดในการสร้างของแต่ละส่วนจะได้ทำการอธิบายให้เห็นเป็นลำดับต่อไป



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของวงจรจริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น

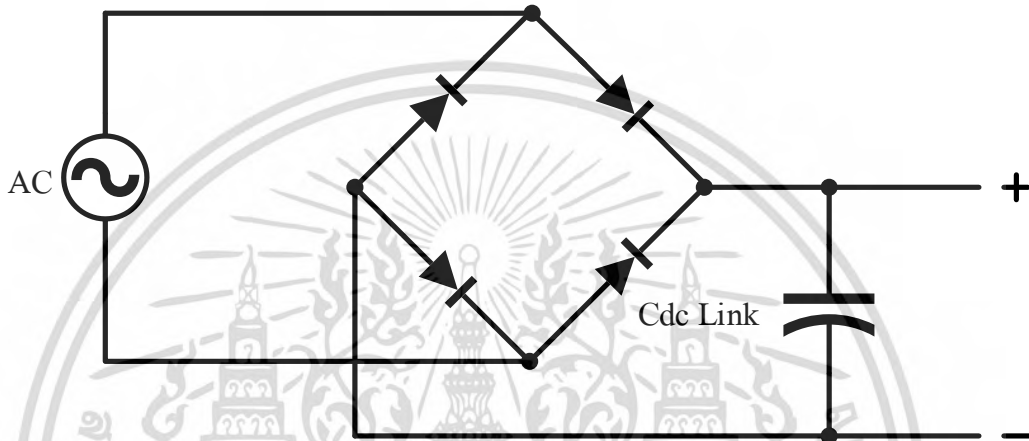
จากรูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างทั้งหมดของวงจรที่ถูกสร้างขึ้นจริงเพื่อทำการทดสอบในวิทยานิพนธ์โดยในแต่ละส่วนจะประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้

1. ส่วนของภาค DC ด้านอินพุต
2. ส่วนของภาคคอนเวอร์เตอร์
3. ส่วนของตัวเหนี่ยวน ความถี่สูง
4. ส่วนของ C เอาต์พุต
5. ส่วนของวงจรชั้บเกด
6. ส่วนของตัวควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 ส่วนของภาค DC ด้านอินพุต

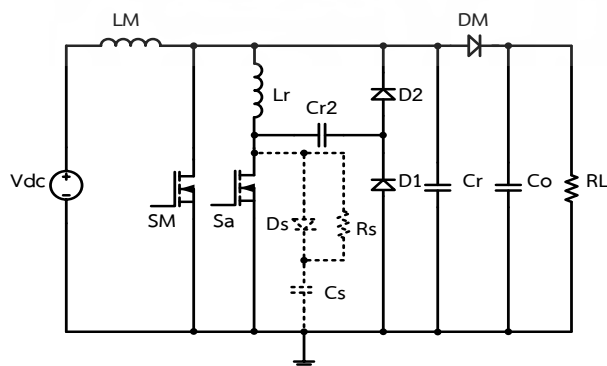
วงจรที่ใช้ในการทดสอบจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า 200 V นามาผ่านวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟสเพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยไดโอดเรียงกระแสแบบโมดูล และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกทำให้เป็นไฟตรงเรียบด้วยตัวเก็บประจุ  $C_{dc-link}$  เพื่อที่จะนำไปใช้งานเป็นอินพุตของภาคส่วนคอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรภาคเปลี่ยน AC เป็น DC ด้านอินพุต

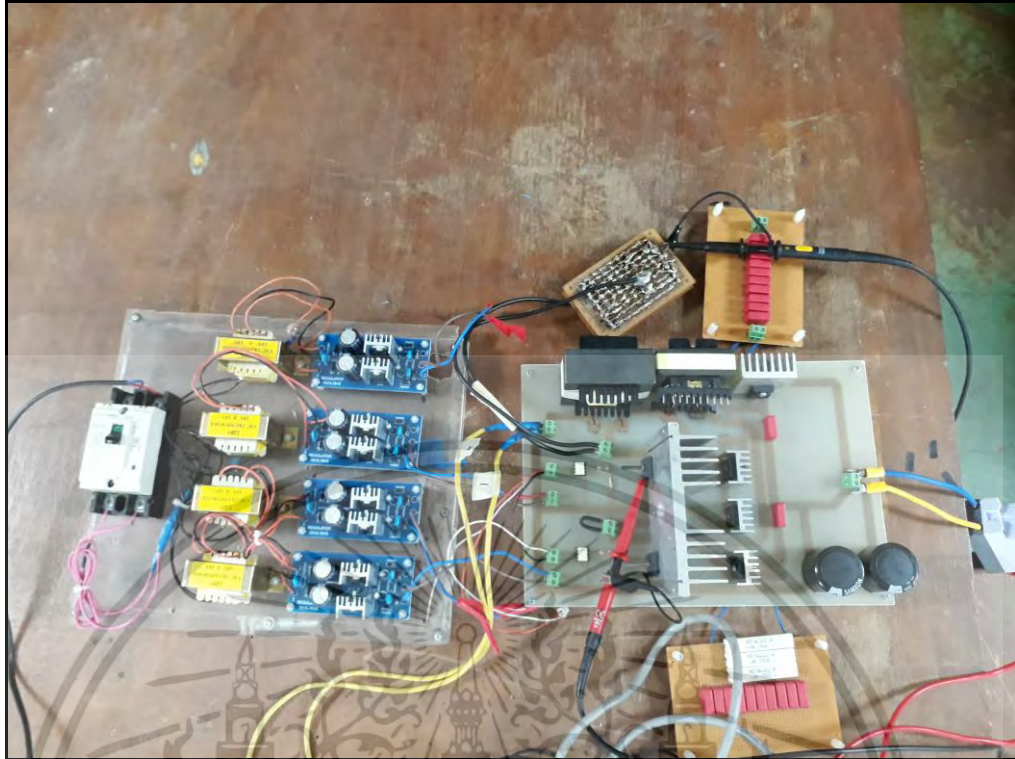
### 3.4.3 ส่วนของภาคกำลังคอนเวอร์เตอร์

ในรูปที่ 3.14 เป็นส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ โดยในวงจรจะมีสวิตช์ช่วย ตัวเหนี่ยวน และตัวเก็บประจุแบบเรโซแนนซ์เพื่อทำให้อุปกรณ์สวิตช์หลักลดความสูญเสียในช่วงของการนาคะแสและหยุดนาคะแสและรูปที่ 3.15 เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์จริงที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยสวิตช์หลักและสวิตช์ช่วยเลือกใช้โมสเฟตเบอร์ IRFP460PBF ตัวเหนี่ยวนาเรโซแนนซ์ 40 ไมโครเฮนรี่ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r, C_r2$ ) ใช้ขนาด 3.3 และ 33 นาโนฟารัด



รูปที่ 3.14 ส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ที่ใช้จริงในวงจร

#### 3.4.4 ส่วนของตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้นจะเลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ EE-65 ในการสร้างเพื่อให้เพียงพอกับกำลังงานที่ต้องการส่งผ่านและป้องกันแกนเหล็กอิ่มตัวโดยการออกแบบจะใช้วิธีผลคูณพื้นที่ซึ่งจะกำหนดตามปรดดังนี้

กำหนดให้

$$V_1 = 200 \text{ V}$$

$$V_2 = 150 \text{ V}$$

$$f_s = 50 \text{ kHz}$$

$$B_m = 0.3 \text{ Tesla}$$

$$K_w = 0.4$$

$$i_{in} = 5.25 \text{ A}$$

$$i_{out} = 2.5 \text{ A}$$

$$J = 4 \text{ A/mm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการออกแบบ

(ก) คำนวณหาค่าความถี่เหนี่ยวนำ

คำนวณหาค่าความถี่เหนี่ยวนำที่ตัดการส าห้ขั้ววงจรมุสท์คอนเวอร์เตอร์

$$L = \frac{(150 \times \sqrt{2})0.47}{1.98 \times (50 \times 10^3)}$$

$$L = 1007.091 \mu H$$

(ข) คำนวณหาค่า  $A_p$

$$A_p = \left( \frac{(250 \times 5.25)(200 \times 2.5)}{4 \times 0.3 \times (4 \times 10^6) \times 0.3 \times (50 \times 10^3)} \right) \quad m^4$$

$$A_p = 2.51 \times 10^{-8} \quad m^4$$

เมื่อทำการคำนวณ ได้ค่า  $A_p$  มาแล้วทำการเลือกแกนให้มีขนาดค่า  $A_p$  ให้มีขนาดมากกว่าค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงเลือกแกน EE-65 ซึ่งจากตารางข้อมูลของผู้ผลิตจะพบว่า

$$A_c = 239 \times 10^{-6} \quad m^2$$

$$A_w = 193 \times 10^{-6} \quad m^2$$

ดังนั้นค่า  $A_p$  ของแกน EE-65 ที่ได้ทำการเลือกจึงมีค่าเป็น

$$A_p = A_c \times A_w = 4.616 \times 10^{-8} \quad m^4$$

ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้แกน EE-65 ในการท ำวิจัยได้

(ค) หาคำนวณรอบของตัวเหนี่ยวนำ ความถี่สูง

$$N = \frac{(1007.091 \times 10^{-6}) \times 3.49}{(239 \times 10^{-6}) \times 0.3}$$

$$N = 49 \text{ รอบ}$$

(ง) คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ

$$a = \frac{2.5}{4 \times 10^6}$$

$$a = 0.625 \times 10^{-6} \quad m^2$$

(ฉ) ตรวจสอบความถูกต้อง

ตรวจสอบความเป็นไปได้ของการออกแบบดังสมการที่ (3.19)

$$A_w K_w > a \times N \quad (3.19)$$

$$A_w K_w = 193 \times 0.4 = 77.2 \quad \text{mm}^2$$

$$a \times N = (0.625 \times 10^{-6}) \times 49 = 30.625 \quad \text{mm}^2$$

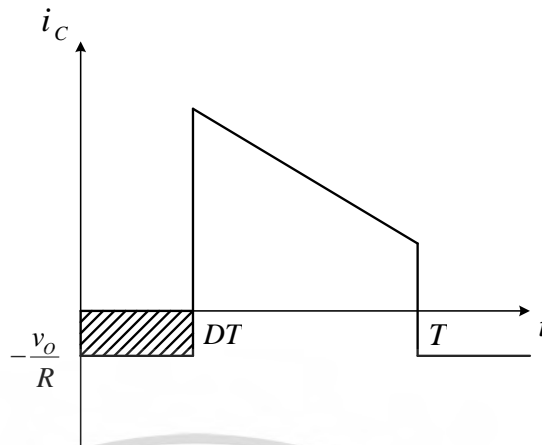
จะพบว่าค่าที่ได้เป็นไปตามสมการที่ (3.1) ซึ่งแสดงว่าการออกแบบมีความเป็นไปได้ จึงได้ทำการสร้างตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงจากนั้นนำมาใช้ในคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงที่ใช้จริง

#### 3.4.5 ส่วนของตัวเก็บประจุต้านเอาต์พุต

ในการออกแบบตัวเก็บประจุต้านเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาระดับแรงดันด้านออกให้คงที่ได้แต่ในทางปฏิบัติไม่นิยมเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากนักเนื่องจากมีราคาสูงและใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก จึงนิยมเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมและค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยในการคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 3.9 สามารถหาค่าตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$|\Delta Q| = C\Delta V_o = I_o\Delta t_{on} \quad (3.20)$$

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

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

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

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} \quad (3.21)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (3.22)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้ศูนย์หรือการเพิ่มค่าโหลดหรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุหรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตซ์ให้สูงขึ้น โดยในการหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้งานวิจัยนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.21) ซึ่งจะทำการกำหนดตัวแปรดังนี้

กำหนดให้  $\frac{\Delta V_o}{V_o} = 1\%$

$$D_{\max} = 0.47$$

$$R = 167\Omega$$

$$f_s = 50\text{kHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf}$$

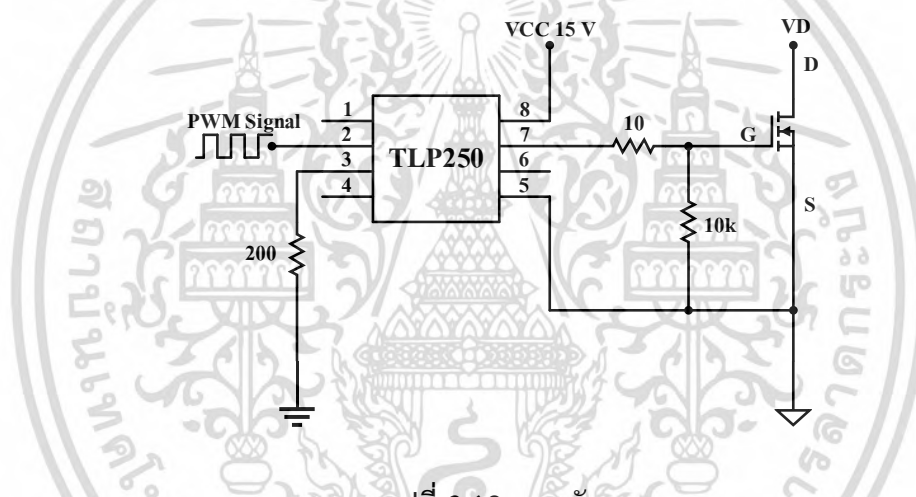
$$C = \frac{D}{\Delta V_o \times R \times f}$$

$$C = \frac{0.47}{(0.01 \times 167 \times 50000)}$$

$$C = 5.628 \mu F$$

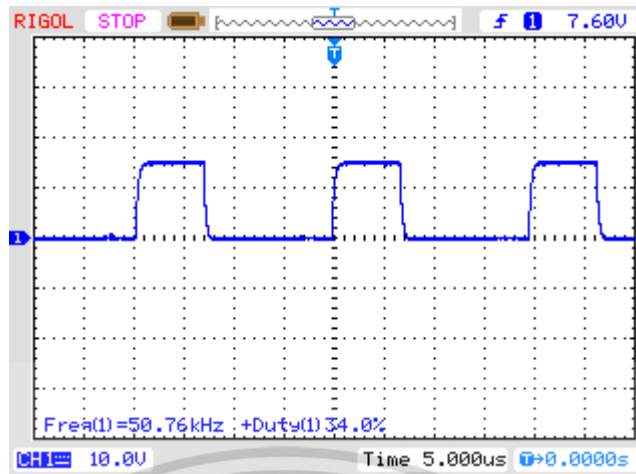
ดังนั้นจะได้ตัวเก็บประจุที่ ให้ค่าอัตราการลอคคลื่นเท่ากับ 1% และสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ด้านออกมีความเรียบและจ่ายให้กับโหลดอย่างต่อเนื่อง

### 3.4.6 ส่วนของวงจรขับเกต

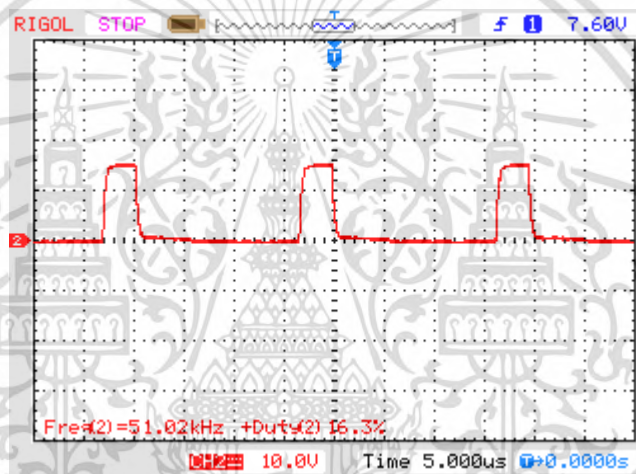


รูปที่ 3.18 วงจรขับเกต

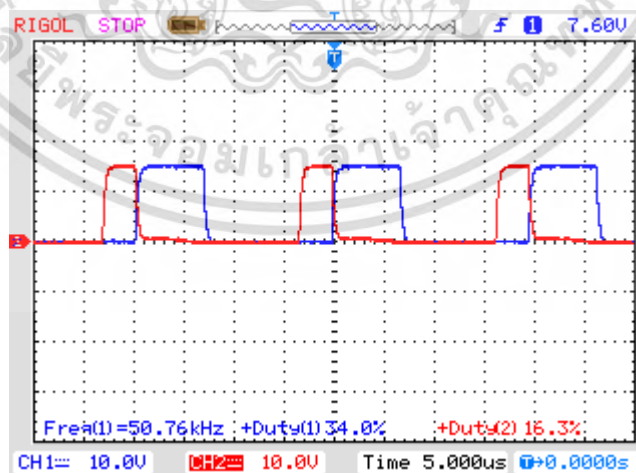
จากรูปที่ 3.18 เป็นวงจรขับเกตสวิตช์มอสเฟต โดยจะใช้การแยกโดดสัญญาณระหว่างวงจร ควบคุมกับวงจรกำลังด้วยการแยกโดดทางแสงโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 จำนวน 2 ชุดสำหรับสวิตช์ ทั้งหมด 2 ตัว สัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 จะถูกต่อเข้ากับขาที่ 2 ของ TLP250 จะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตของ TLP250 ออกที่ขา 7 โดยในวงจรนี้จะต่อสัญญาณไฟฟ้า กระแสตรง +15 V เข้าที่ขา 8 และ ไฟฟ้ากระแสตรง 0 V เข้าที่ขา 5 ของเพื่อจ่ายกระแสให้ TLP250



รูปที่ 3.19 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากวงจรขับสวิตช์ที่สวิตช์หลัก



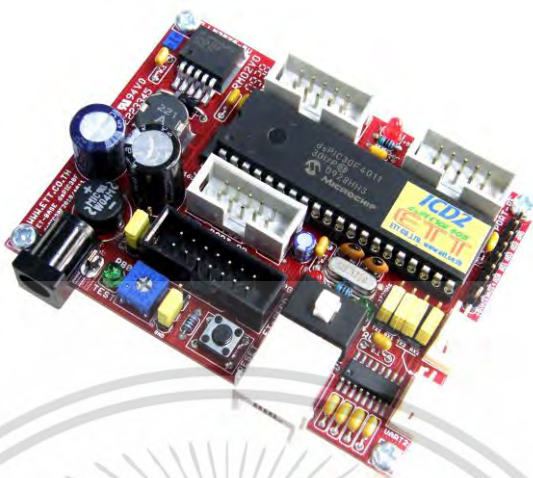
รูปที่ 3.20 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากวงจรขับสวิตช์ที่สวิตช์ช่วย



รูปที่ 3.21 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากวงจรขับสวิตช์ทั้งสวิตช์หลักและสวิตช์ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.7 ส่วนของตัวสร้างสัญญาณไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011



รูปที่ 3.22 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

การสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มเพื่อใช้ขับสวิตซ์ทั้ง 2 ตัว โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณได้ทั้งหมด 2 สัญญาณ โดยที่แต่ละสัญญาณจะมีค่าตัวตัดไซเกิ้ลประมาณ 35 % และ 15 % ตามลำดับ โดยตั้งค่าที่รีจิสเตอร์ PDCx โดยสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มที่มีความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซึ่งสามารถตั้งค่าได้ที่รีจิสเตอร์ PTPER จากนั้นจำเป็นต้องมีการตั้งค่าเวลาเดดไทม์ระหว่างคู่สัญญาณสวิตซ์ซึ่งสามารถเซตค่าได้ที่รีจิสเตอร์ DTRx และ ALTDTRx ภายในโมดูลสร้างสัญญาณ PWM ของไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.5 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทางานและการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตซ์ อนุกรมด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์โดยได้วิเคราะห์โหมดการทางานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตซ์อนุกรมภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์โดยอธิบายเป็นโหมดการทางานอธิบายถึงการทางานภายใต้เงื่อนไขการสวิตซ์ด้วยแรงดันและกระแสศูนย์ของสวิตซ์หลักและสวิตซ์ช่วย นอกจากนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรกำลังในภาคส่วนต่างๆได้แก่ วงจรเรียงกระแส วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง รวมไปถึงส่วนของวงจรควบคุม ได้แก่ วงจรขับเกต และไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

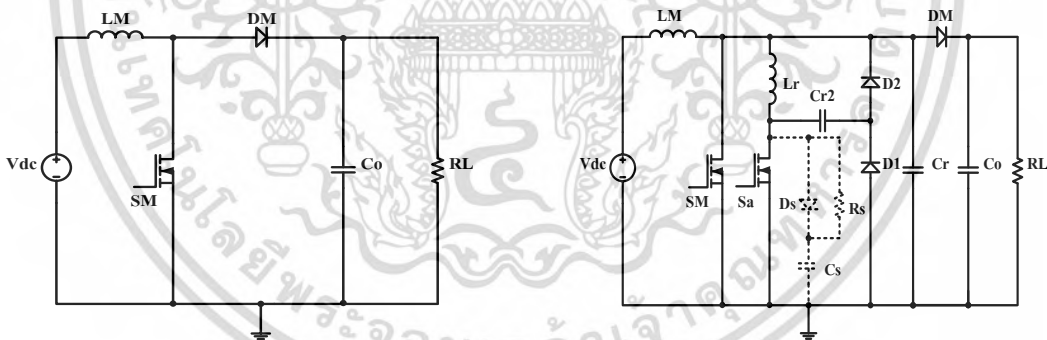
#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นผลการทดลองเพื่อทำการทดสอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์สวิตช์นิ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ที่สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กระแสศูนย์โดยใช้เทคนิคการเรโซแนนซ์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นโดยจะทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวงจร การเกิดการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ของสวิตช์หลัก โดยจะได้ทำการทดสอบโดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

#### 4.2 การวิเคราะห์บัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกับบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นิ่มนวล

เพื่อทดสอบว่าวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปมีการสูญเสียค่อนข้างสูงในขณะที่สวิตช์ซึ่งโดยจะเกิดการสูญเสียในช่วงเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส ดังนั้นจึงได้ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกับบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นิ่มนวลที่จะทำในงานวิจัยนี้ โดยจะทำการทดสอบที่พิกัดโหลดเท่ากันซึ่งผลการจำลองที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

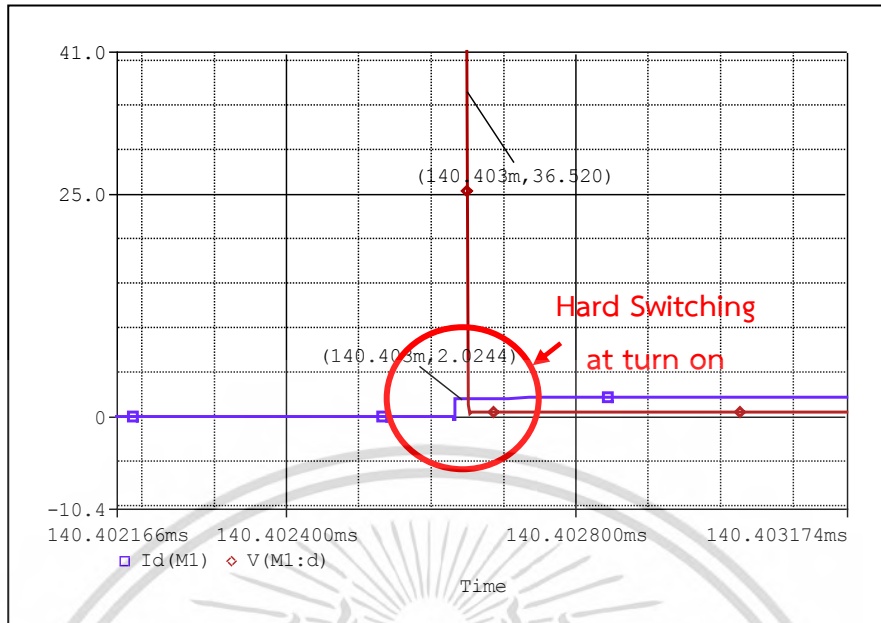
##### 4.2.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกับแบบสวิตช์นิ่มนวล



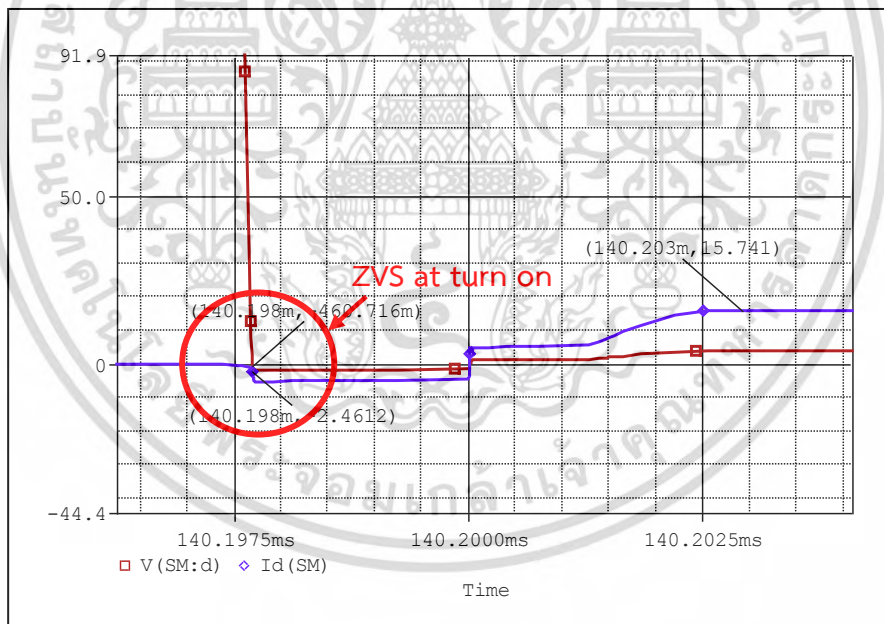
(ก) วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป

(ข) วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบนิ่มนวล

รูปที่ 4.1 วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สถานะโหลด 100 % ในช่วงนำกระแส

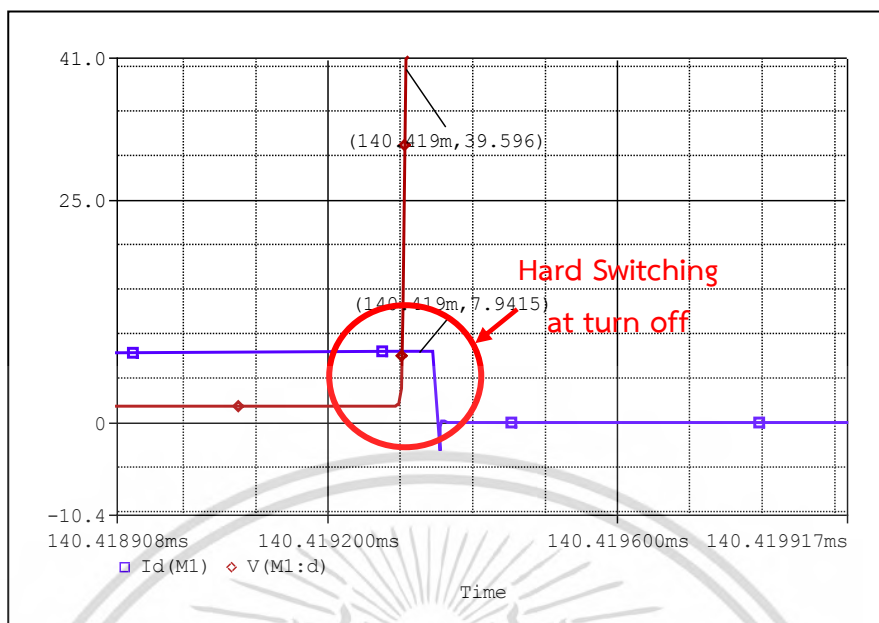


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล

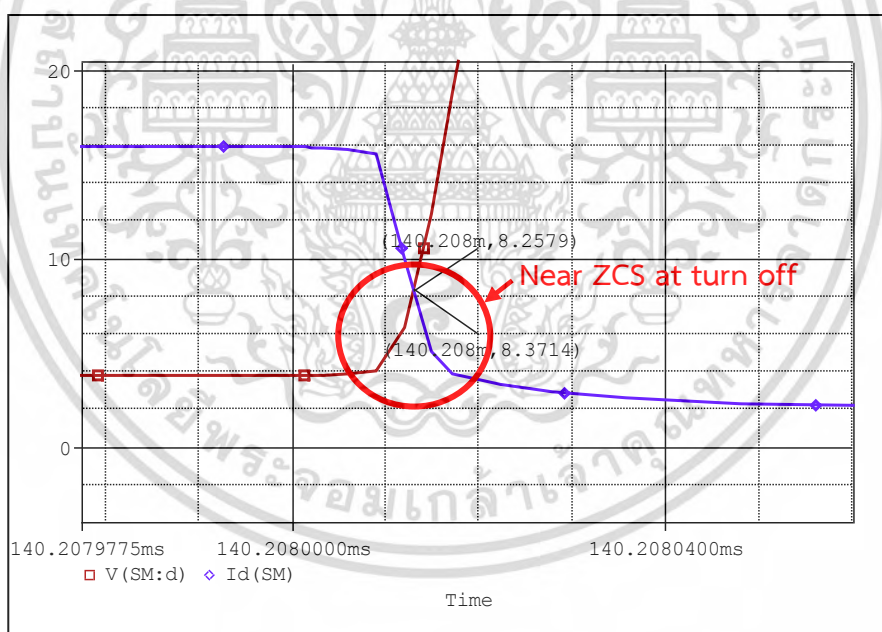
จากการจำลองที่สถานะโหลด 100 % ในช่วงนำกระแส

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 เป็นผลการจำลองที่สวิตช์หลักของวงจรในขณะสวิตช์นำกระแสที่สถานะโหลด 100 % ผลการจำลองในบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ยังคงไม่เป็นศูนย์มีผลทำให้เกิดความสูญเสียส่วนในบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวลแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ก่อนทำให้บัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวลไม่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

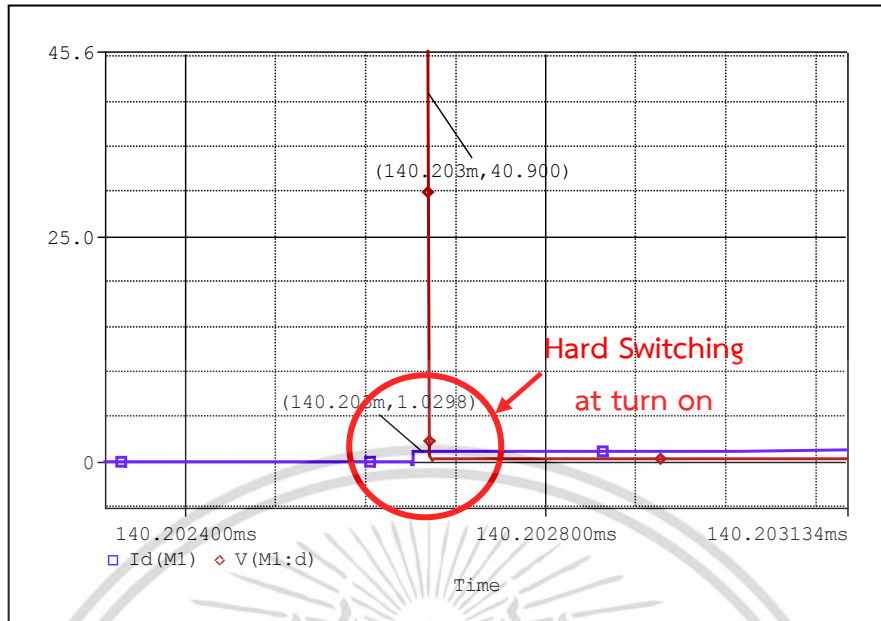


รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % ในช่วงไม่นำกระแส

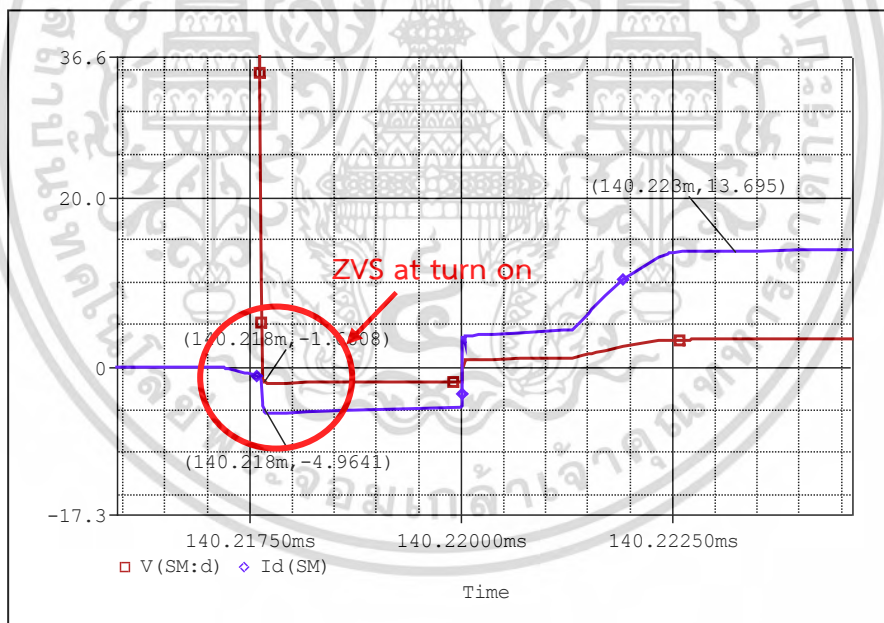


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 % ในช่วงไม่นำกระแส

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นผลการจำลองที่สวิตช์หลักของวงจรในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแสที่สภาวะโหลด 100 % ผลการจำลองในบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ยังคงไม่เป็นศูนย์มีผลทำให้เกิดความสูญเสียส่วนในบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวลกระแสมีค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์ก่อนทำให้บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวลมีการสูญเสียต่ำกว่าในแบบบูสต์แบบทั่วไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % ในช่วงนำกระแส

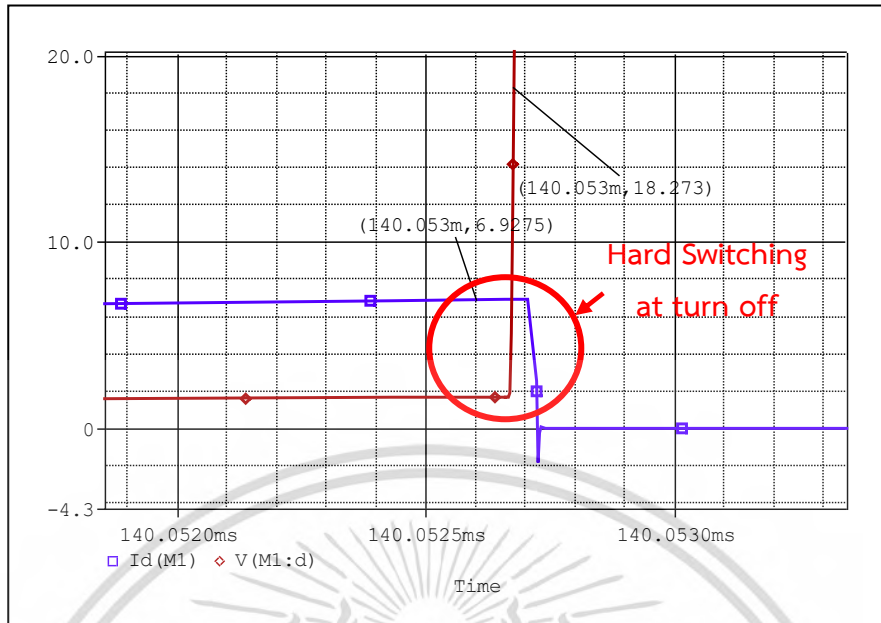


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล

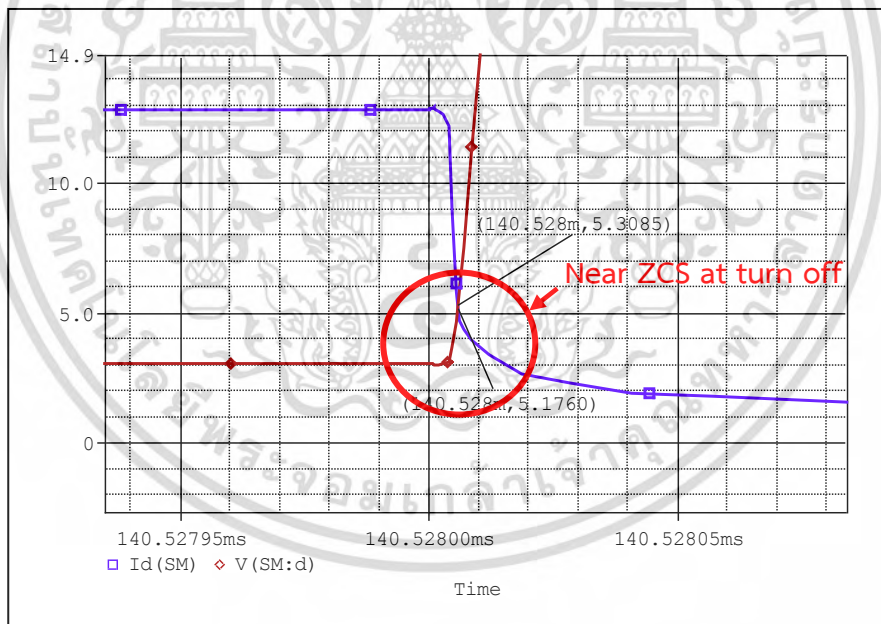
จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 % ในช่วงนำกระแส

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นผลการจำลองที่สวิตช์หลักของวงจรในขณะที่สวิตช์นำกระแสที่สภาวะโหลด 80 % ผลการจำลองในบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ยังคงไม่เป็นศูนย์คล้ายกับที่สภาวะโหลด 100 % ทำให้เกิดความสูญเสียอยู่ส่วนในบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวลยังคงทำงานได้แบบสวิตช์นุ่มนวลแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ก่อนทำให้ไม่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



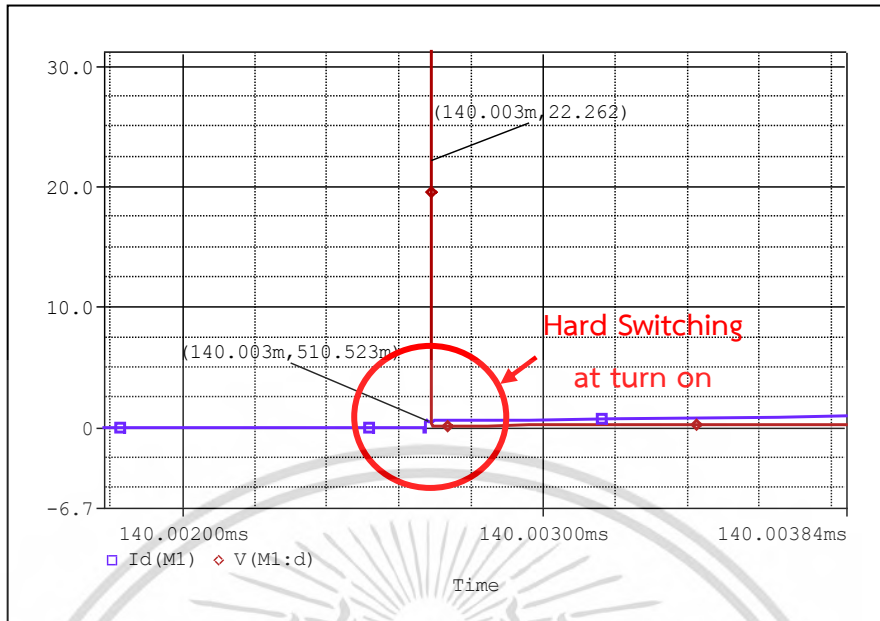
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สถานะโหลด 80 % ในช่วงไม่นำกระแส



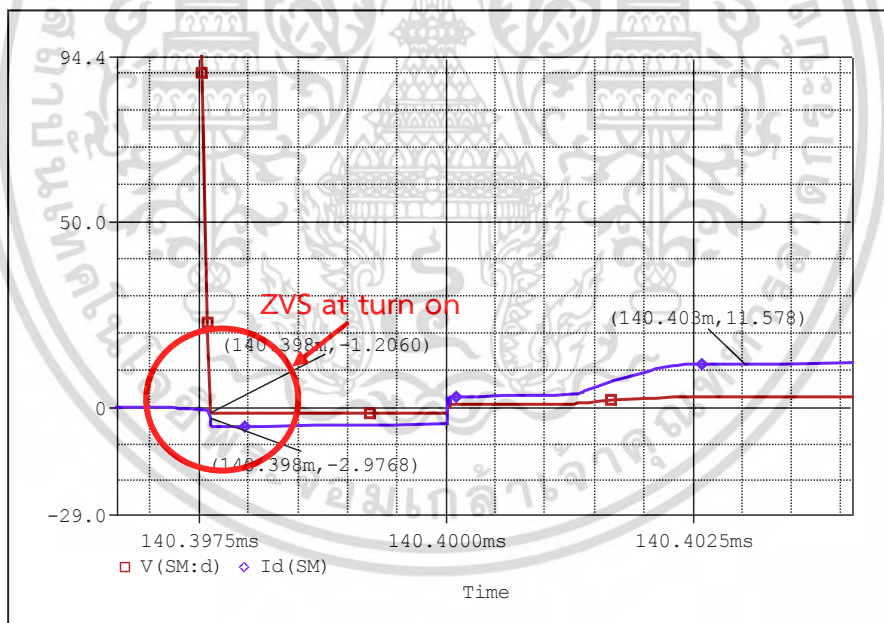
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล จากการจำลองที่สถานะโหลด 80 % ในช่วงไม่นำกระแส

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 เป็นผลการจำลองที่สวิตช์หลักของวงจรในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแสที่สถานะโหลด 80 % ผลการจำลองในบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ยังคงไม่เป็นศูนย์คล้ายกับที่สถานะโหลด 100 % ทำให้เกิดความสูญเสียส่วนในบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล กระแสมีค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์ก่อนทำให้มีการสูญเสียต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



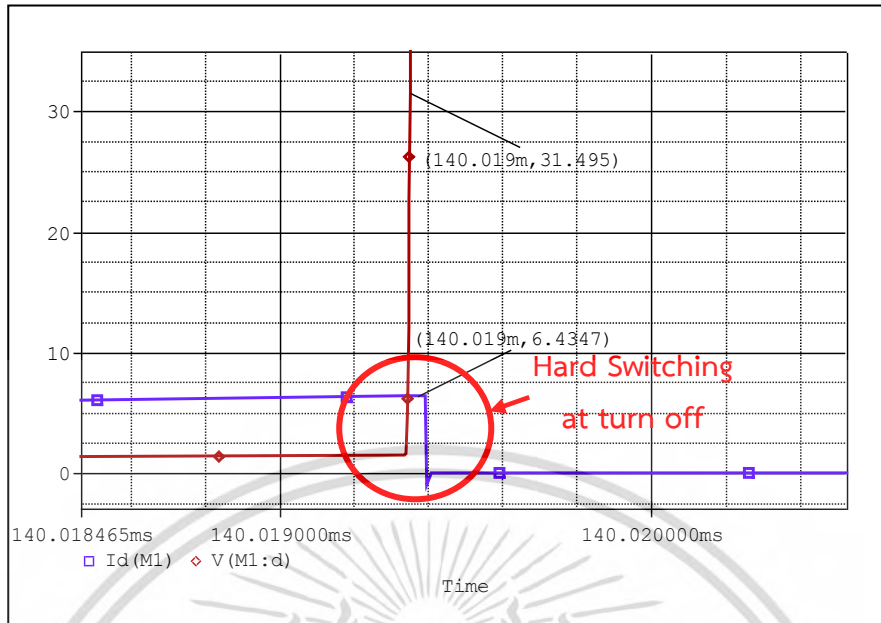
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงนำกระแส



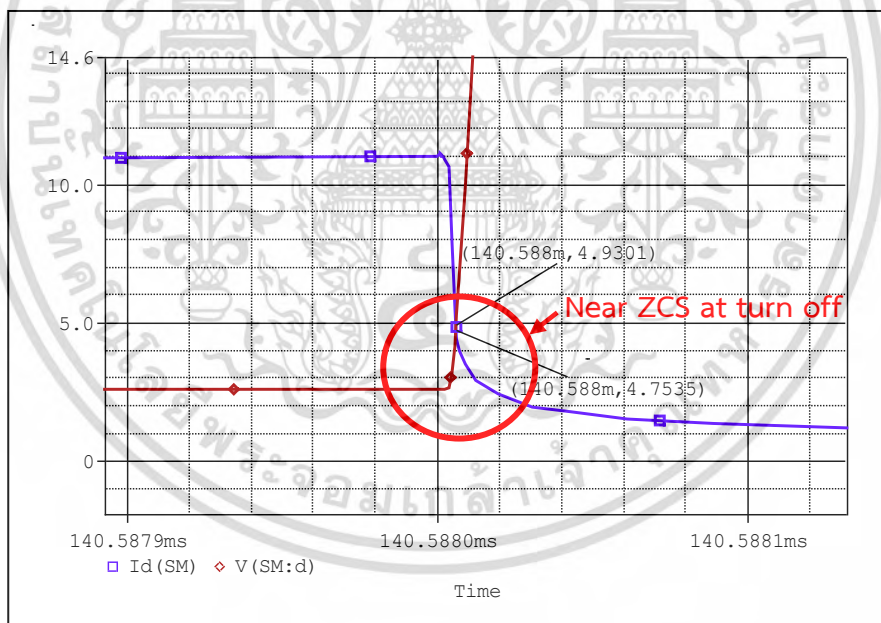
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบนุ่มนวล จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงนำกระแส

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นผลการจำลองที่สวิตช์หลักของวงจรในขณะสวิตช์นำกระแสที่สภาวะโหลด 60 % ผลการจำลองในบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ยังคงไม่เป็นศูนย์คล้ายกับที่สภาวะโหลด 80 % ทำให้เกิดความสูญเสียอยู่ส่วนในบัสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล ยังคงทำงานได้แบบสวิตช์นุ่มนวลแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ก่อนทำให้ไม่มีการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไป จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงไม่นำกระแส



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล

จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 % ในช่วงไม่นำกระแส

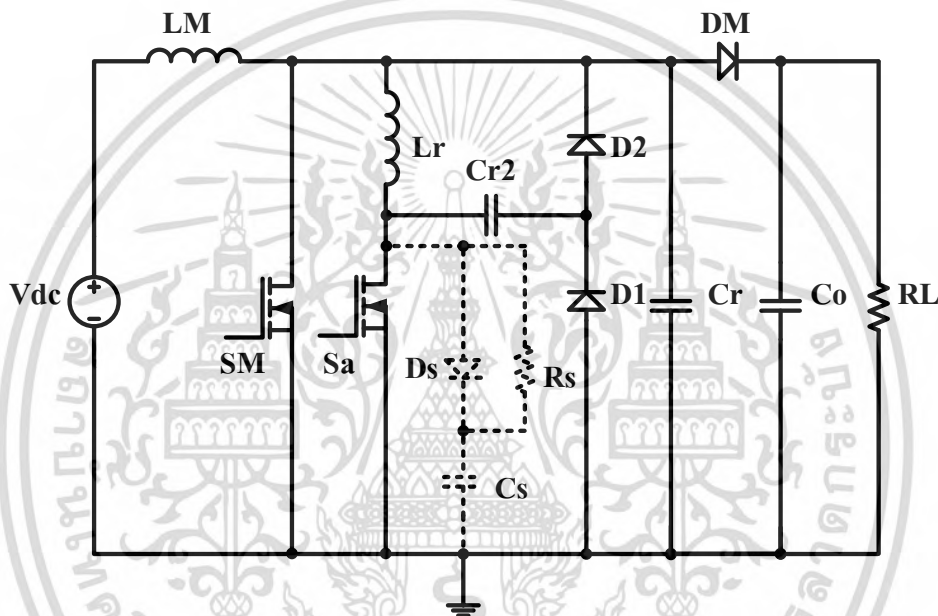
จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นผลการจำลองที่สวิตช์หลักของวงจรในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแสที่สภาวะโหลด 60 % ผลการจำลองในบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ยังคงไม่เป็นศูนย์คล้ายกับที่สภาวะโหลด 80 % ทำให้เกิดความสูญเสียส่วนในบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวล กระแสมีค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์ก่อนทำให้มีการสูญเสียต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวิเคราะห์การเกิดการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์ในสวิตช์

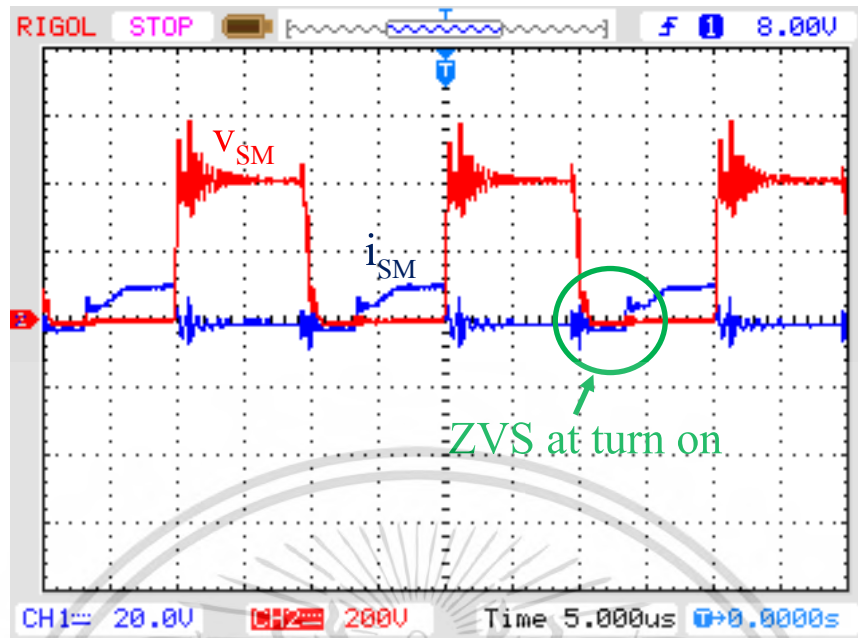
เพื่อทดสอบว่าสวิตช์หลักและสวิตช์ช่วยในวงจรมีลักษณะของการเกิดการสวิตช์แบบนุ่มนวลจริง จึงได้ทำการวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์หลักและสวิตช์ช่วยโดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice และทำการทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 200 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าขาออก 400 โวลต์และความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งผลการทดลองจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

#### 4.3.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลการจำลอง

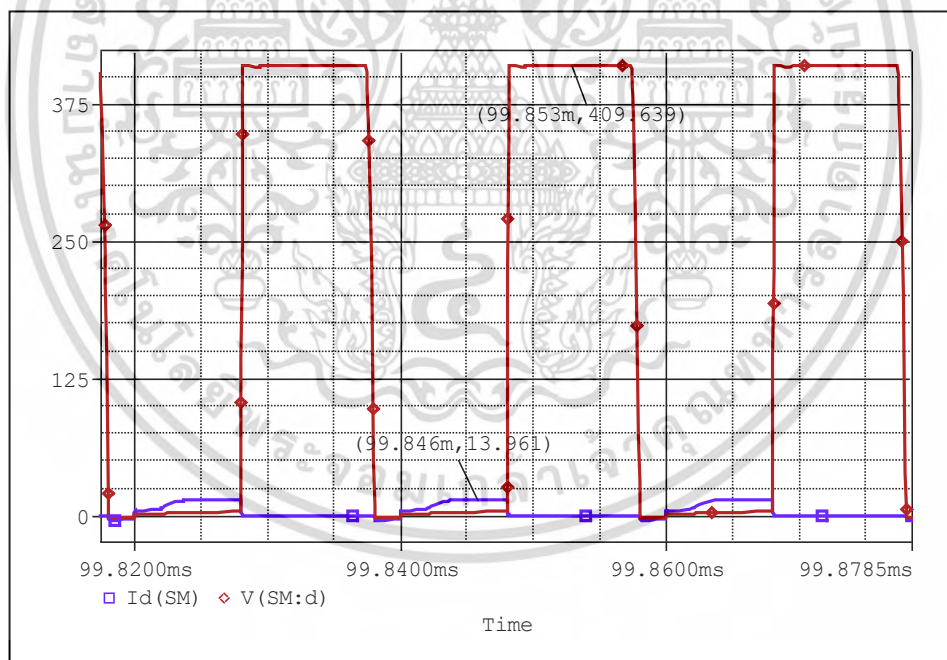


รูปที่ 4.14 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



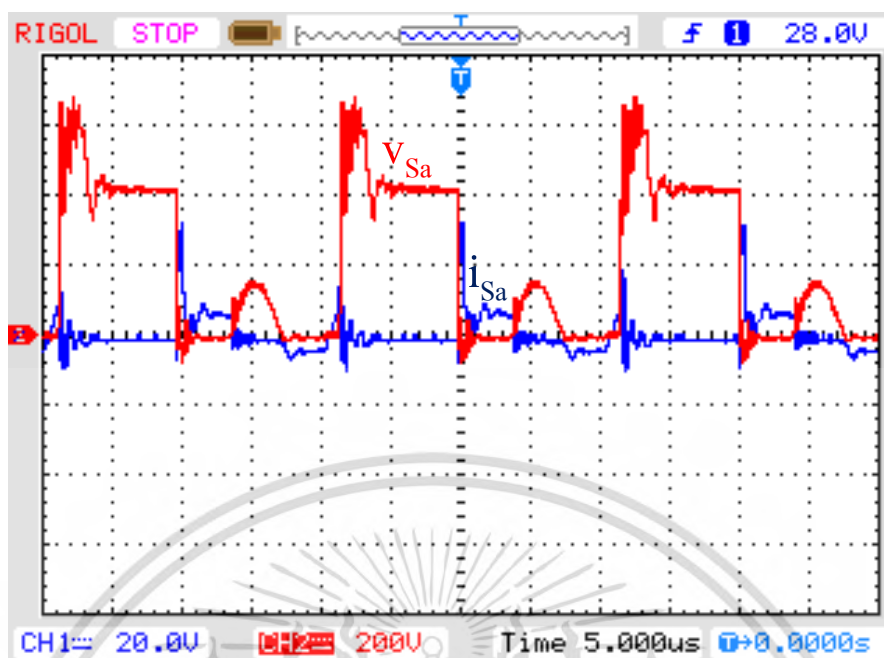
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 100 %



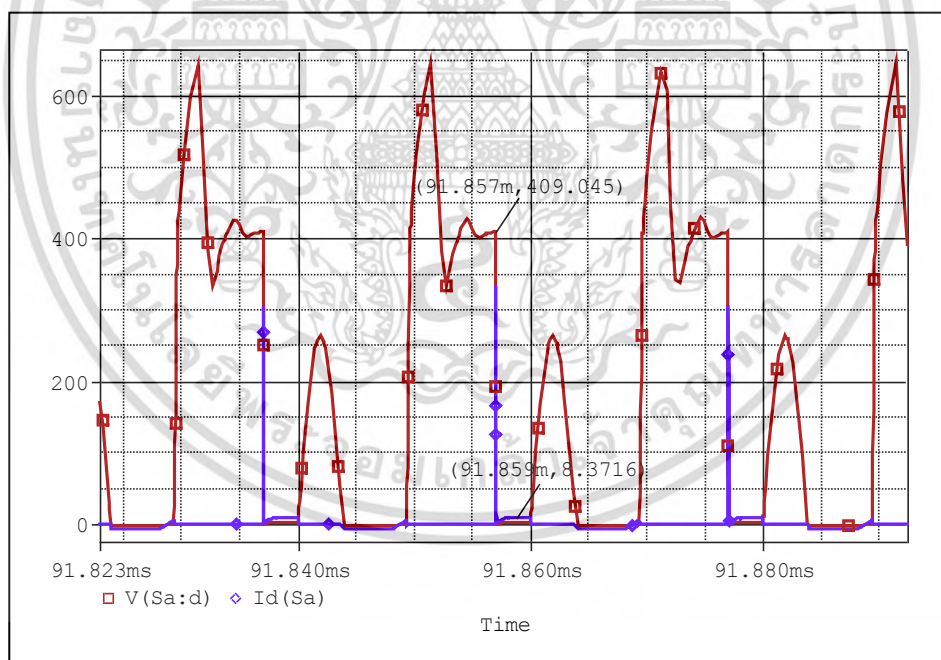
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 %

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองที่สวิตช์หลักของวงจรที่สภาวะโหลด 100 % ผลการทดลองรูปสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 400 โวลต์ และค่ากระแสเฉลี่ยที่ 12.3 แอมป์ รูปสัญญาณแรงดันและกระแสจะมีสไปก์เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดความเครียดของแรงดันในช่วงที่สวิตช์เริ่มหยุดนำกระแสและค่าอุปกรณ์แฝงที่เกิดขึ้นในสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

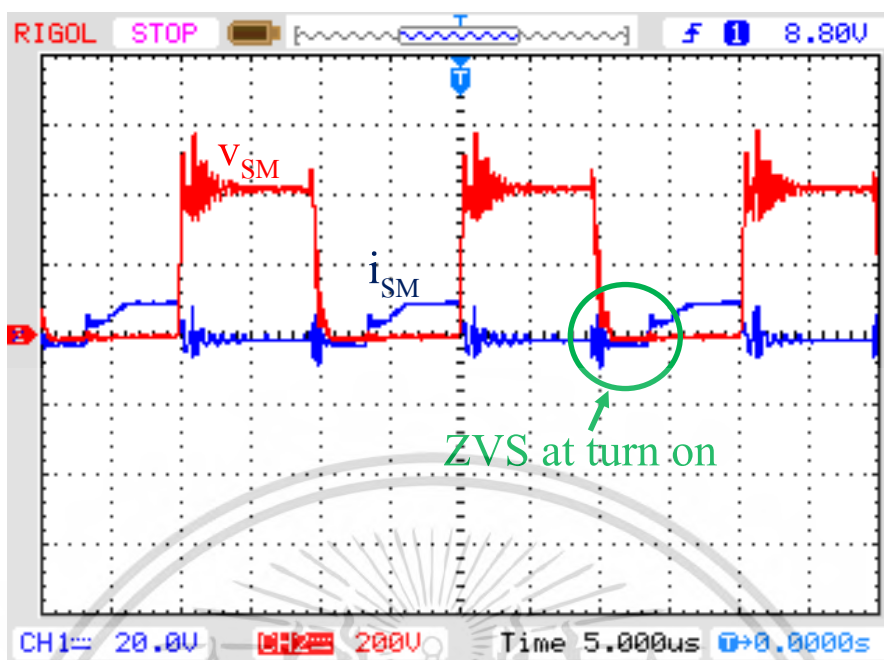


รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 100 %

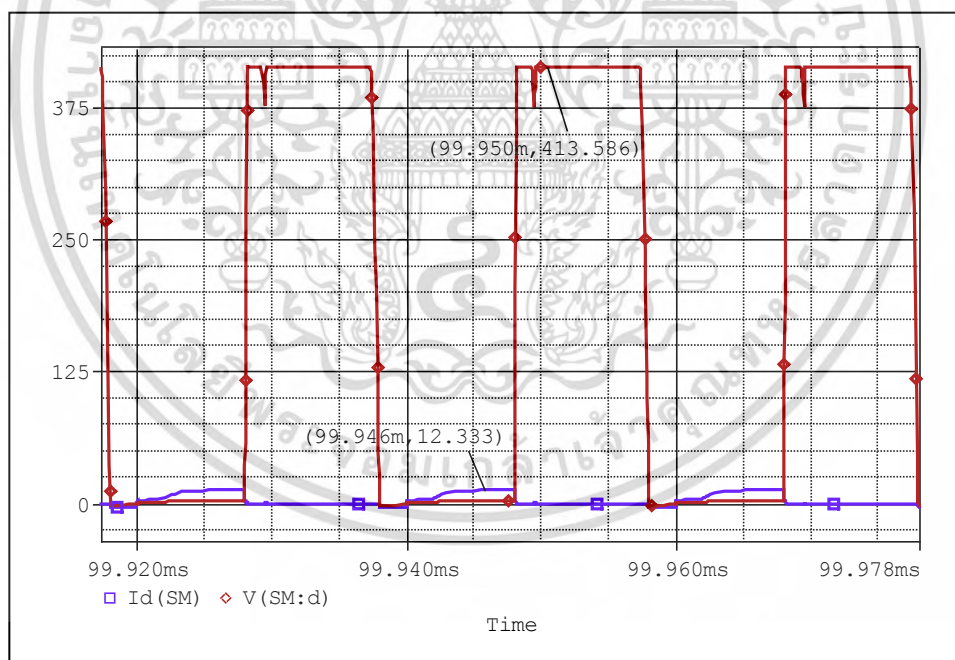


รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 %

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองที่สวิตช์ช่วยของวงจรที่สภาวะโหลด 100 % ผลการทดลองรูปสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 400 โวลต์ และค่ากระแสเฉลี่ยที่ 7.3 แอมป์ รูปสัญญาณแรงดันจะมีสไปก์เกิดขึ้นเนื่องจากสวิตช์ช่วยจะถ่ายโอนแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์หลักขณะเริ่มหยุดนำกระแสเพื่อให้สวิตช์หลักทำงานได้แบบสวิตช์นุ่มนวล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



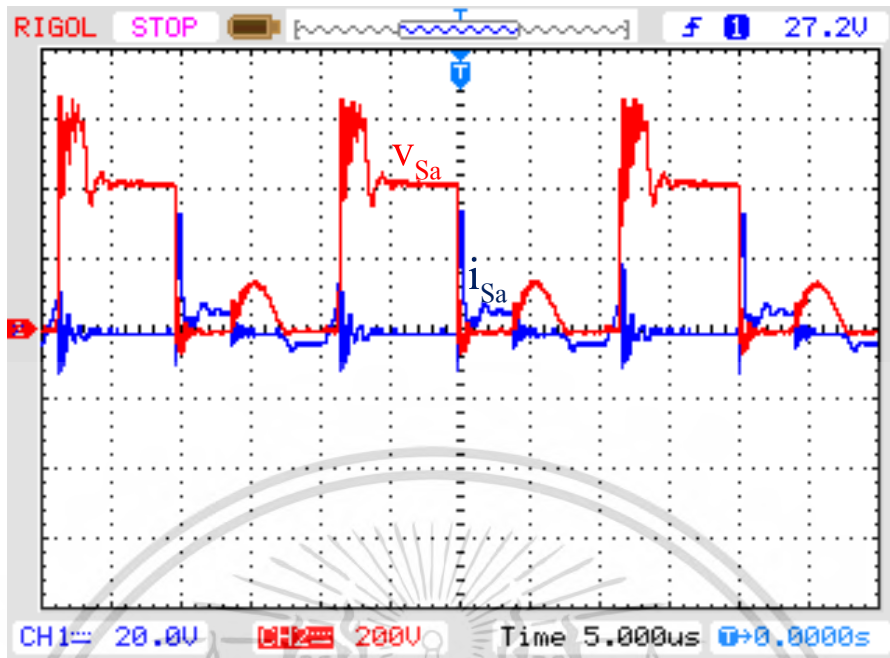
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 80 %



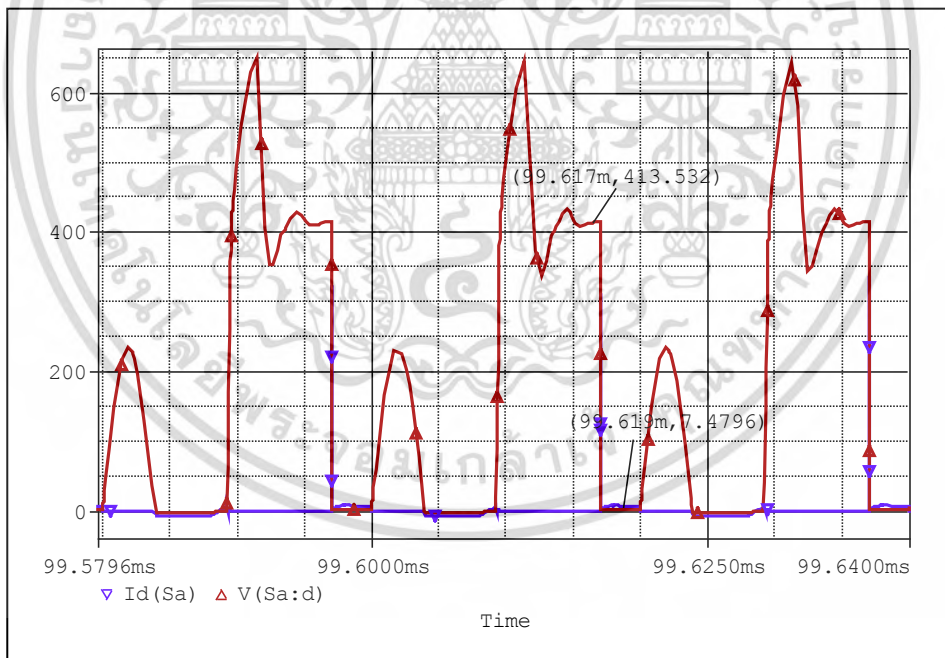
รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 %

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองที่สวิตช์หลักของวงจรที่สภาวะโหลด 80 % ผลการทดลองรูปสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 412 โวลต์ และค่ากระแสเฉลี่ยที่ 11.3 แอมป์ รูปสัญญาณแรงดันและกระแสจะมีสไปก์เกิดขึ้นคล้ายกับที่สภาวะโหลด 100 % แต่แรงดันด้านออกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นผลมาจากโหลดมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



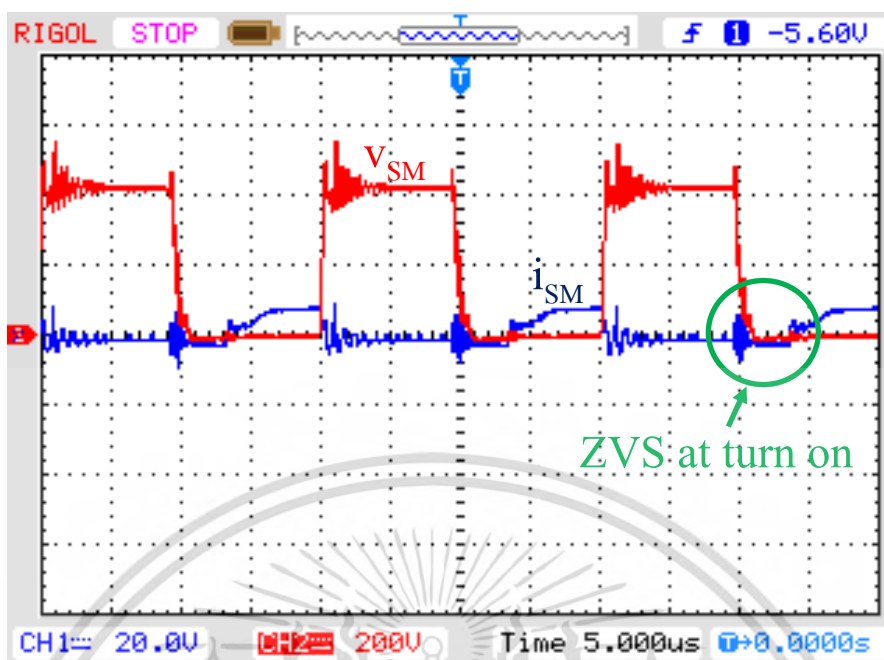
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div)  
ที่สภาวะโหลด 80 %



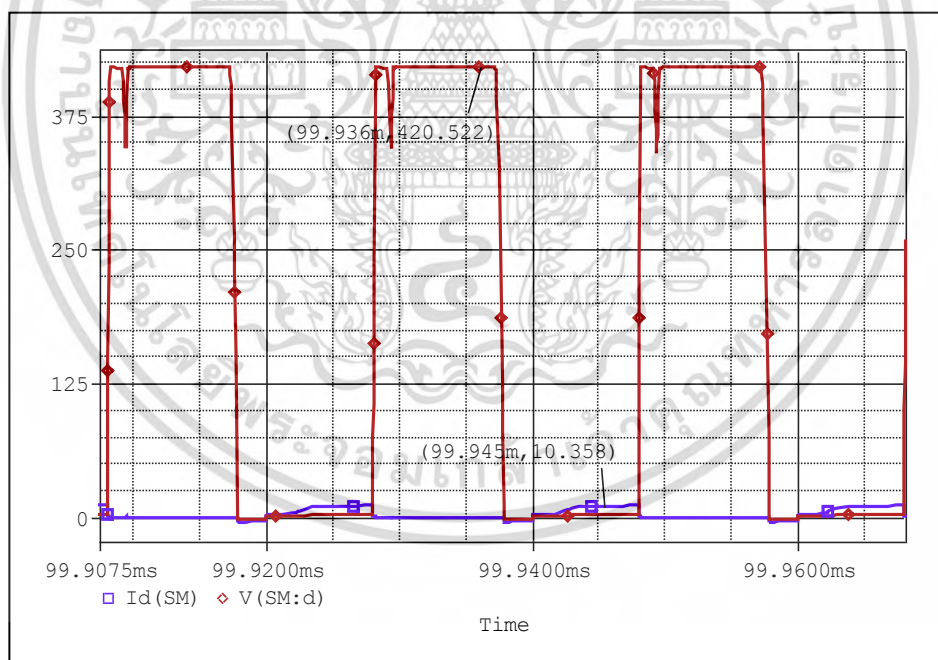
รูปที่ 4.22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 %

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองที่สวิตช์ช่วยของวงจรที่สภาวะโหลด 80 % ผลการทดลองรูปสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 410 โวลต์ และค่ากระแสเฉลี่ยที่ 6.4 แอมป์ รูปสัญญาณแรงดันจะคล้ายกับรูปที่ 4.18 เนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่เป็นชนิดเดียวกันทำให้รูปสัญญาณไม่ต่างกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



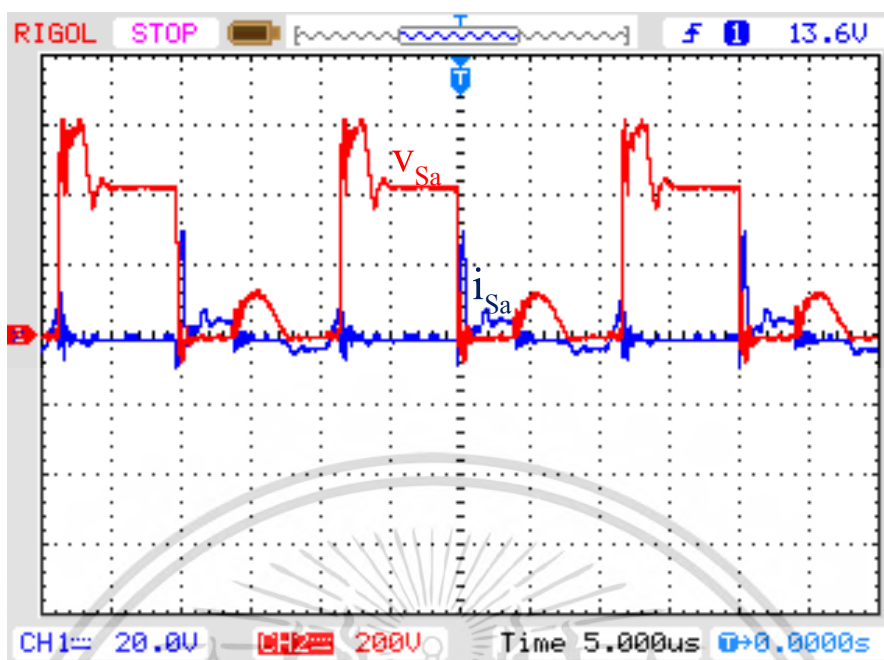
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div) ที่สภาวะโหลด 60 %



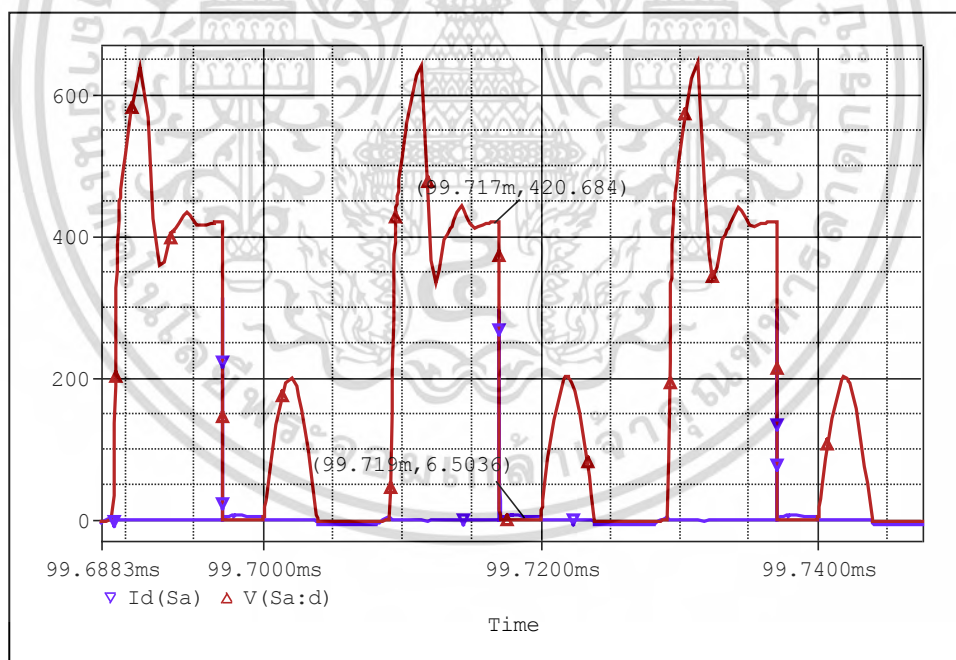
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์  $S_m$  จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 %

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองที่สวิตช์หลักของวงจรที่สภาวะโหลด 60 % ผลการทดลองรูปสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 420 โวลต์ และค่ากระแสเฉลี่ยที่ 9.2 แอมป์ รูปสัญญาณแรงดันคล้ายกับที่สภาวะโหลด 100 % , 80 % ดังรูปที่ 4.15 และ 4.19 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



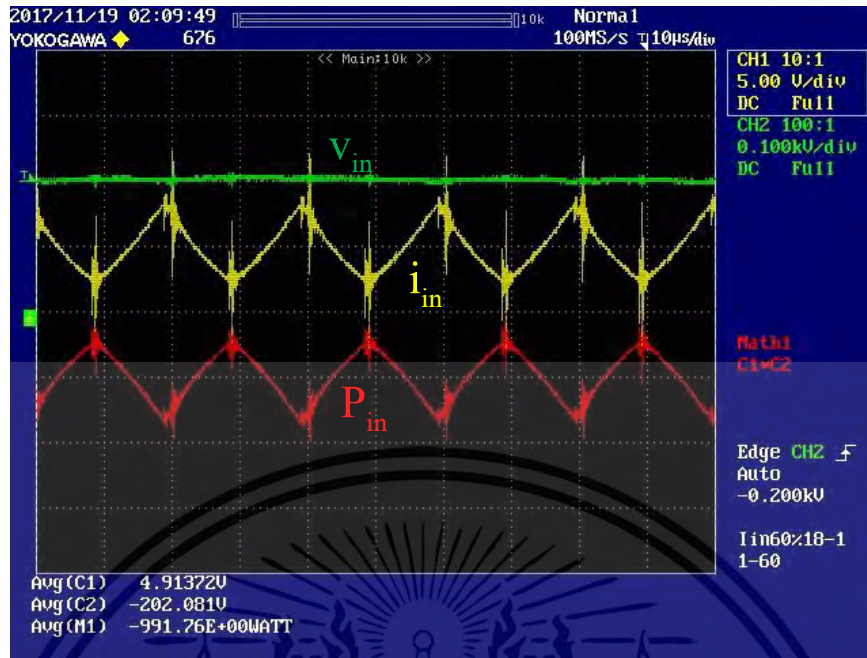
รูปที่ 4.25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sa จากผลการทดลอง (200V/div , 20A/div)  
ที่สภาวะโหลด 60 %



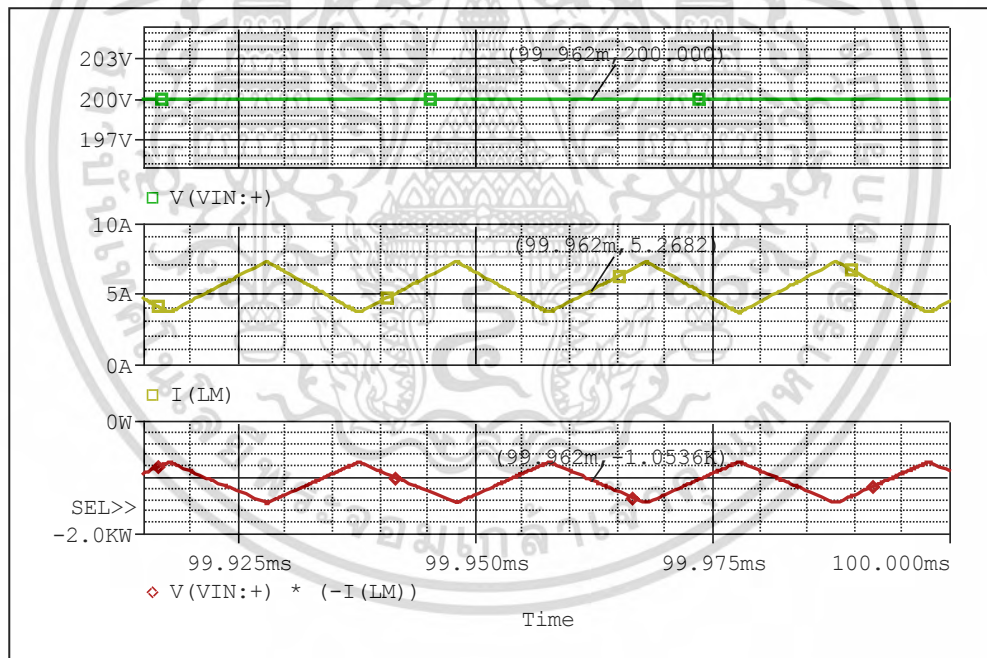
รูปที่ 4.26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของสวิตช์ Sm จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 %

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองที่สวิตช์ช่วยของวงจรที่สภาวะโหลด 60 % ผลการทดลองรูปสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 420 โวลต์ และค่ากระแสเฉลี่ยที่ 5.5 แอมป์ รูปสัญญาณแรงดันจะคล้ายกับที่สภาวะโหลด 100 % , 80 % ดังรูปที่ 4.17 และ 4.21 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



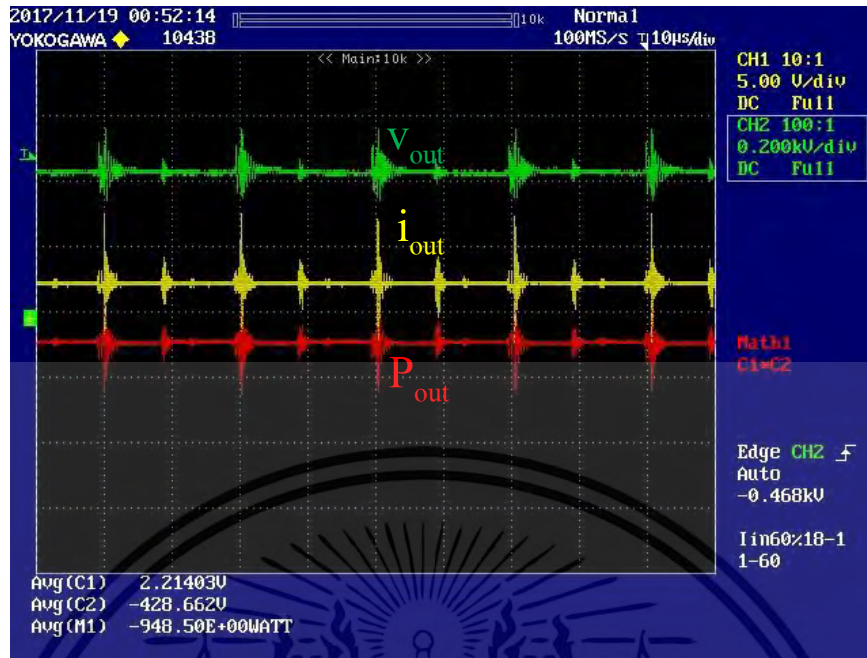
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นกระแสด้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองที่สภาวะโหลด 100 %



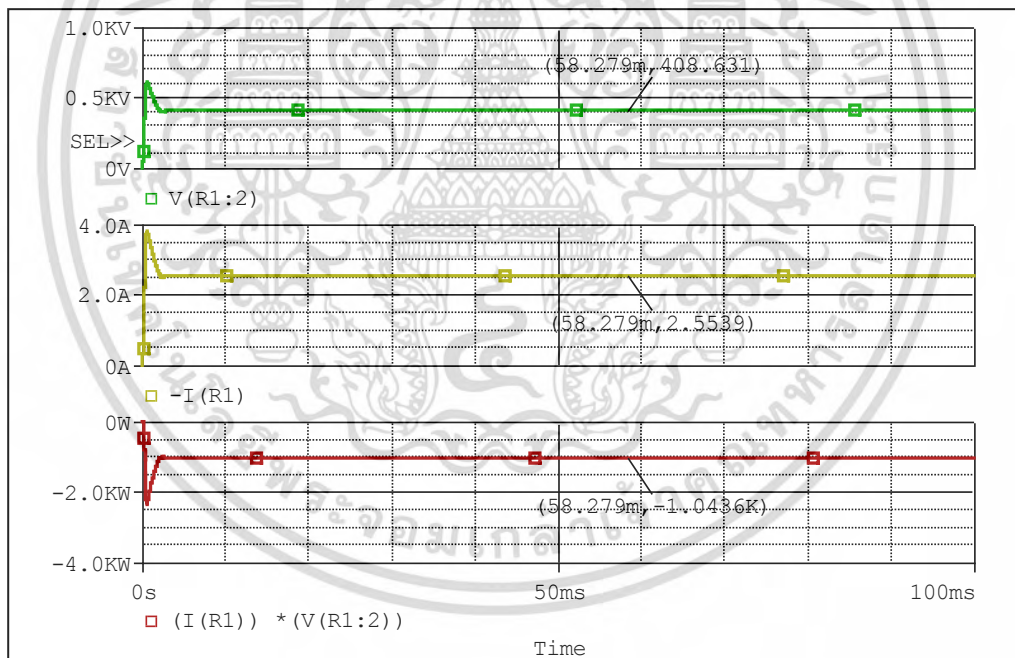
รูปที่ 4.28 รูปคลื่นกระแสด้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 %

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองวัดที่กระแสไฟฟ้าด้านเข้าของวงจรที่สภาวะโหลด 100 % ผลการทดลองรูปสัญญาณกระแสจะมีลักษณะเป็นรูปฟันเลื่อยโดยมีค่ากระแสเฉลี่ยที่ 4.9 แอมป์ ค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 991.76 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



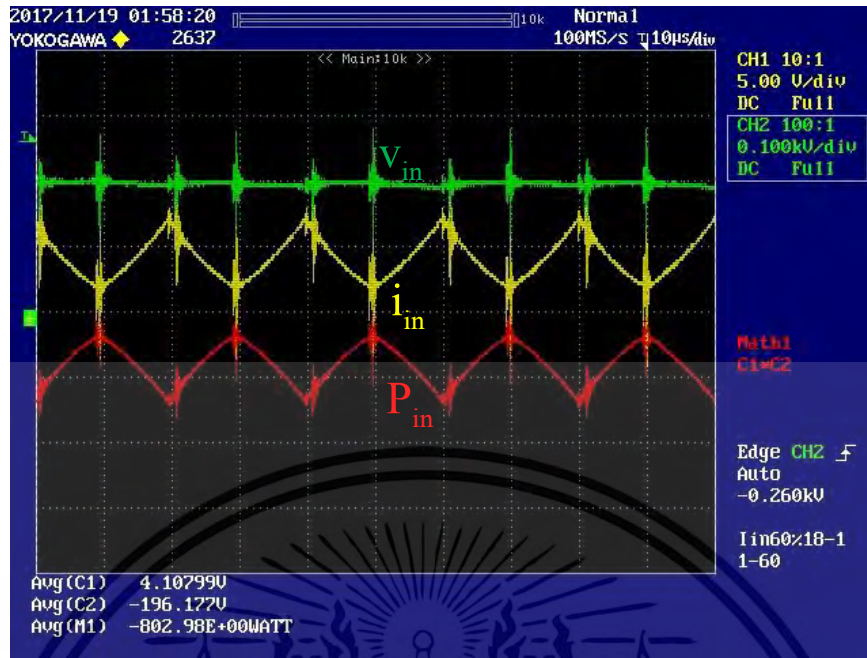
รูปที่ 4.29 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองที่สภาวะโหลด 100 %



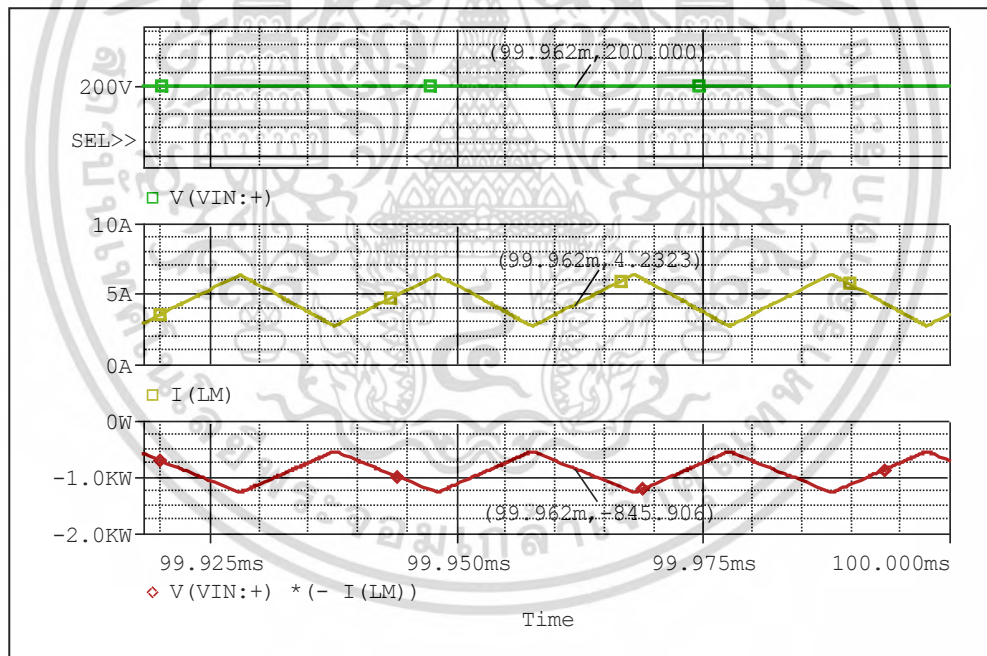
รูปที่ 4.30 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 100 %

จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองวัดที่กระแสไฟฟ้านำด้านออกของวงจรที่สภาวะโหลด 100 % ผลการทดลองรูปสัญญาณกระแสจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเป็นผลมาจากอุปกรณ์แฝงที่เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมีการสูญเสียทำให้ผลการทดลองแตกต่างจากผลการจำลองโดยมีค่ากระแสเฉลี่ยที่ 2.2 แอมป์ ค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 948.50 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



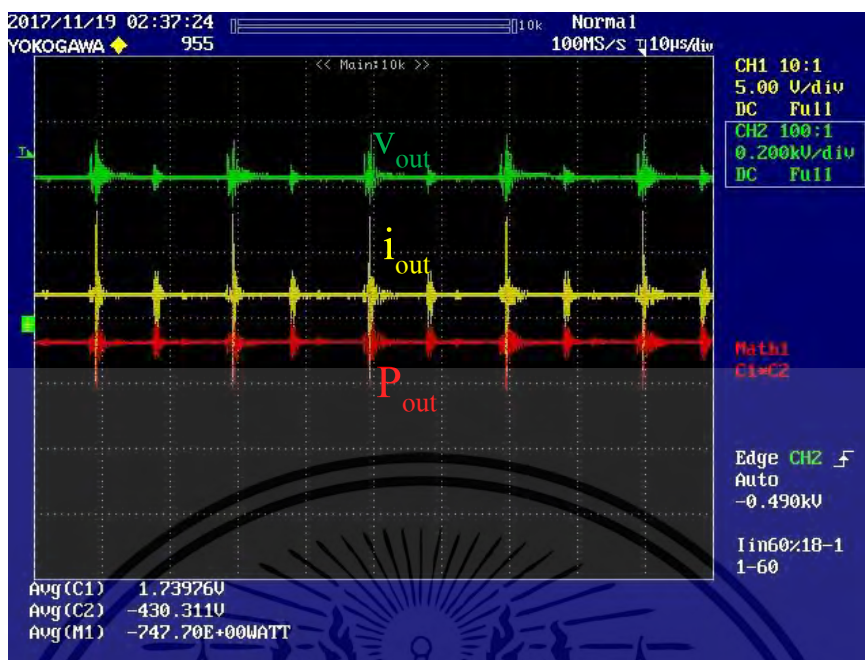
รูปที่ 4.31 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองที่สภาวะโหลด 80 %



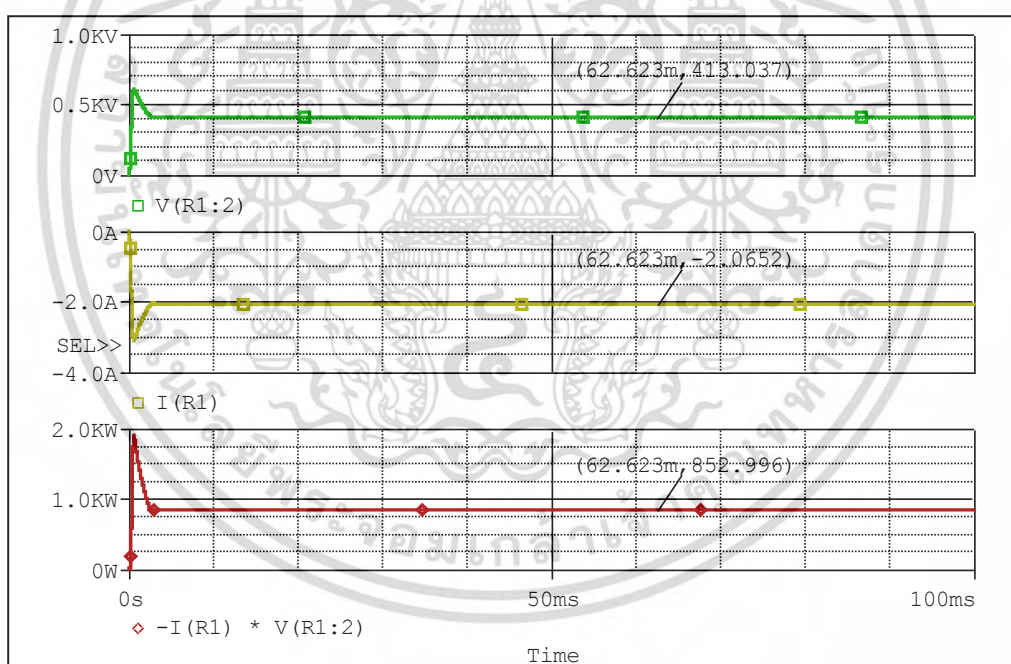
รูปที่ 4.32 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 %

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองวัดที่กระแสไฟฟ้าต้านเข้าของวงจรที่สภาวะโหลด 80 % ผลการทดลองรูปสัญญาณกระแสจะมีลักษณะคล้ายกับรูปสัญญาณที่สภาวะโหลด 100 % โดยมีค่ากระแสเฉลี่ยที่ 4.1 แอมป์ ค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 802.98 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



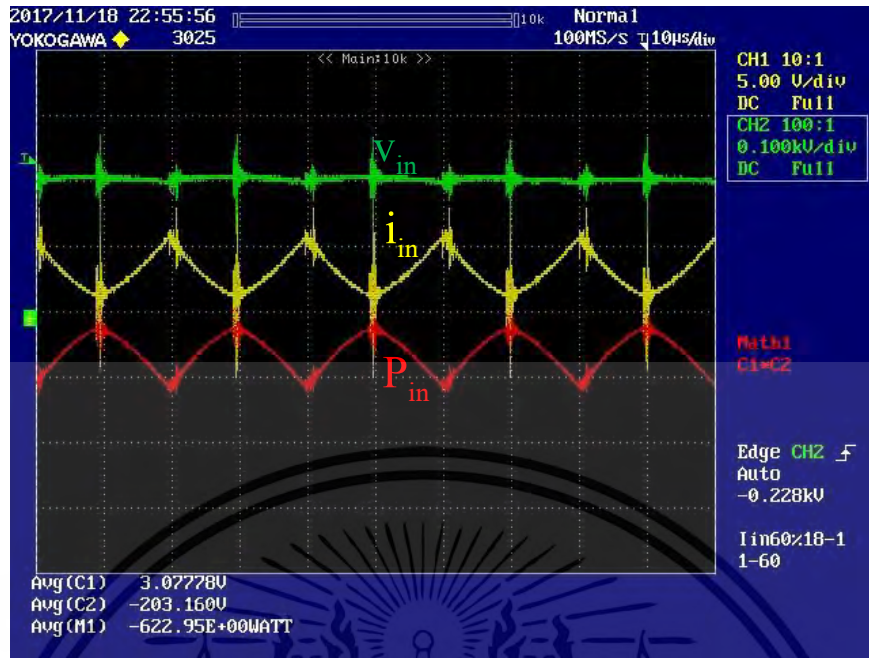
รูปที่ 4.33 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองที่สภาวะโหลด 80 %



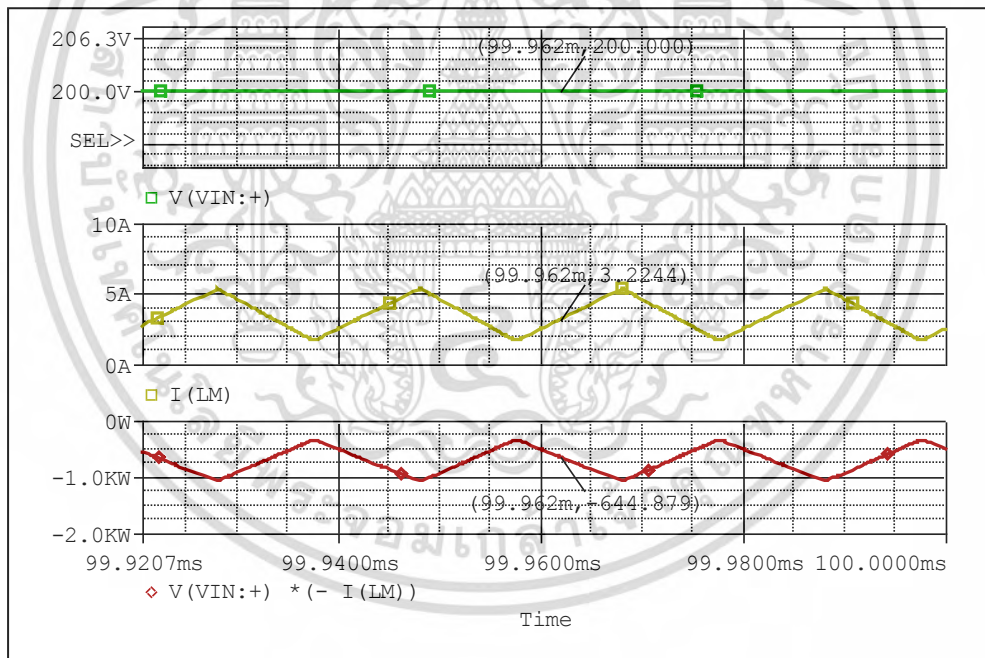
รูปที่ 4.34 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 80 %

จากรูปที่ 4.33 และ 4.34 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองวัดที่กระแสไฟฟ้าต้านออกของวงจรที่สภาวะโหลด 80 % ผลการทดลองรูปสัญญาณกระแสจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเป็นผลมาจากอุปกรณ์แฝงที่เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมีการสูญเสียทำให้ผลการทดลองแตกต่างจากผลการจำลองโดยมีค่ากระแสเฉลี่ยที่ 1.73 แอมป์ ค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 747.70 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



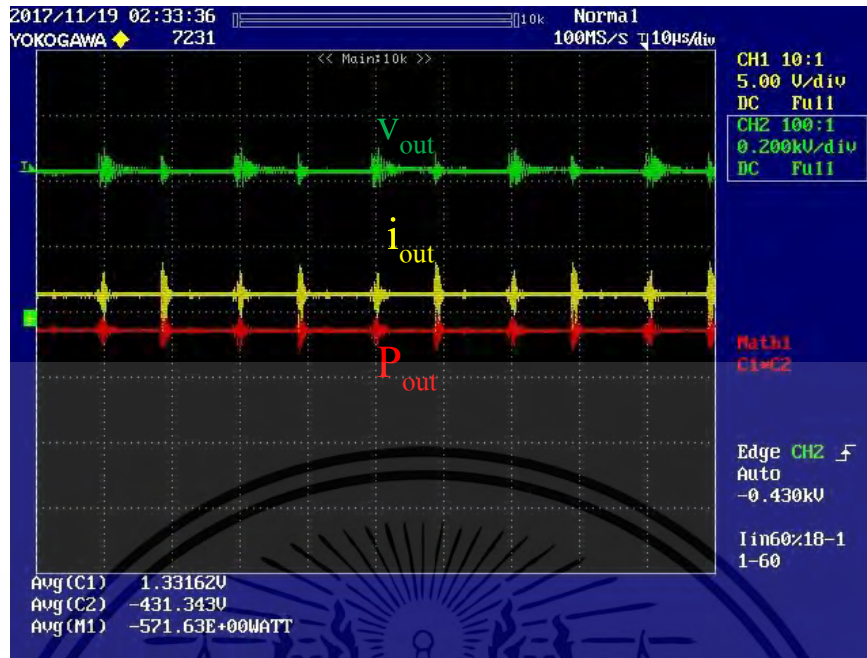
รูปที่ 4.35 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองที่สภาวะโหลด 60 %



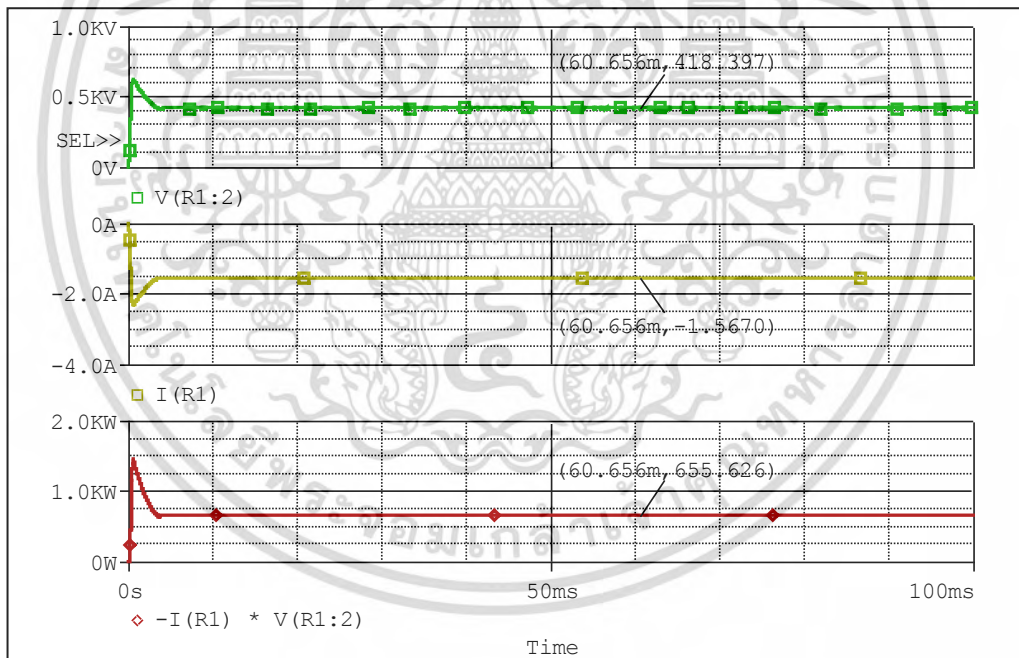
รูปที่ 4.36 รูปคลื่นกระแสต้านเข้าของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 %

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองวัดที่กระแสไฟฟ้าต้านเข้าของวงจรที่สภาวะโหลด 60 % ผลการทดลองรูปสัญญาณกระแสจะมีลักษณะคล้ายกับรูปสัญญาณที่สภาวะโหลด 100 % และ 80 % โดยมีค่ากระแสเฉลี่ยที่ 3.07 แอมป์ ค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 622.95 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการทดลองที่สภาวะโหลด 60 %



รูปที่ 4.38 รูปคลื่นกระแสต้านออกของบูสต์คอนเวอร์เตอร์ จากการจำลองที่สภาวะโหลด 60 %

จากรูปที่ 4.37 และ 4.38 เป็นผลการจำลองกับผลการทดลองวัดที่กระแสไฟฟ้าต้านออกของวงจรที่สภาวะโหลด 60 % ผลการทดลองรูปสัญญาณกระแสจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเป็นผลมาจากอุปกรณ์แผงที่เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมีการสูญเสียทำให้ผลการทดลองแตกต่างจากผลการจำลองโดยมีค่ากระแสเฉลี่ยที่ 1.33 แอมป์ ค่ากำลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 571.63 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.13 เป็นการตรวจสอบการเกิดลักษณะการทำงานแบบสวิตช์นุ่มนวลของสวิตช์หลักในวงจรที่โหลด 100 % , 80 % , 60 % ซึ่งพบว่าสวิตช์หลักและสวิตช์ช่วย (SM , Sa) เกิดการทำงานแบบสวิตช์นุ่มนวล โดยสวิตช์หลัก (SM) เกิดการทำงานแบบสวิตช์ด้วยแรงดันเป็นศูนย์ (Zero-voltage switching : ZVS) โดยจากรูปผลการทดลองและผลการจำลองจะพบว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์ทำให้ไม่เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการเริ่มนำกระแส แต่ในช่วงของการหยุดนำกระแสจะพบว่ายังเกิดการซ้อนทับกันของรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ ทำให้เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงของการหยุดนำกระแสดังที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23 และ 4.25 ตามลำดับ

#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร

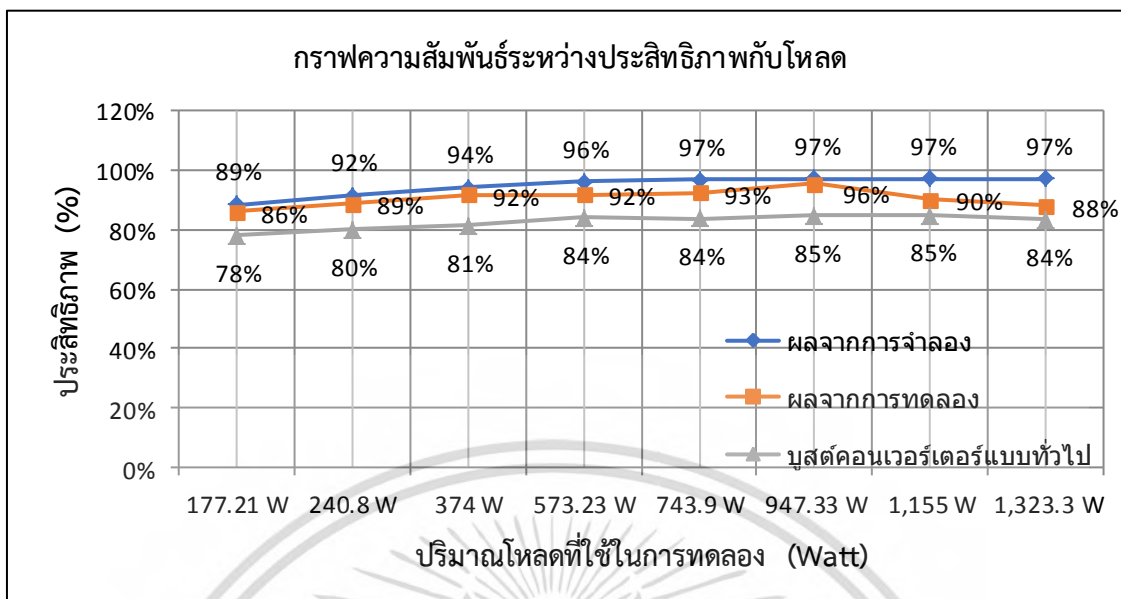
การทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้น ได้ทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 200 โวลต์และแรงดันไฟฟ้าขาออก 400 โวลต์ที่ความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำการทดสอบโดยเพิ่มโหลดทีละระดับแล้วทำการวัดแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออกของวงจรด้วย Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) รุ่น DL1620 (2 Channel) 200 Mhz Analog Bandwidth 200 MS/s on two channel โดยจะได้ค่าแรงดันและกระแสเฉลี่ยที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรแล้วใช้ฟังก์ชัน Math ที่อยู่ในออสซิลโลสโคปคำนวณค่ากำลังงานด้านเข้าและด้านออกเพื่อนำมาหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของวงจрдังสมการที่ 4.1

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{v_{out} \cdot i_{out}}{v_{in} \cdot i_{in}} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสขาเข้ากับแรงดันและกระแสขาออกกับประสิทธิภาพการทำงานของวงจร

$v_{in}$ (V)	$i_{in}$ (A)	$v_{out}$ (V)	$i_{out}$ (A)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$\eta$ (%)
196.870	1.12	435.670	0.46	220.49	202.150	91.68
195.140	2.09	425.640	0.88	408.27	376.81	92.29
198.697	3.12	431.343	1.33	617.40	571.63	92.54
196.177	4.10	430.310	1.73	802.98	747.70	93.14
202.081	4.91	428.662	2.21	991.76	948.50	95.66

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.1 เมื่อนำค่าที่ได้มาพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตที่โหลดของวงจรคอนเวอร์เตอร์จะได้กราฟดังรูปที่ 4.39 ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับกระแสโหลด

#### 4.5 สรุป

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 4.1 และกราฟประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์กับกระแสโหลดพบว่าวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 95.66 % ที่กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์และนอกจากนี้วงจรยังถูกทดสอบกับคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์รุนแรง (Hard Switching) โดยประสิทธิภาพของวงจรมีค่าลดลงเหลือเพียง 85.78 % อันเนื่องมาจากที่พิกัดกำลังงานไฟฟ้าสูงๆนั้นวงจรจะเกิดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการนำกระแสของอุปกรณ์และสวดตัวนำภายในวงจร (Conduction losses) อีกสาเหตุหนึ่งมาจากสภาวะอิมิตัวของตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงภายในวงจรทำให้ไม่สามารถส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์

พิกัดกำลังไฟฟ้า	1 kW
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	200 Vdc
แรงดันไฟฟ้าขาออก	400 Vdc
กระแสไฟฟ้าขาเข้า	5.2 A
กระแสไฟฟ้าขาออก	2.29 A
ความถี่สวิตช์	50 kHz
ประสิทธิภาพสูงสุด	95.66 %

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรที่ได้ทำการสร้างขึ้นพบว่าสวิตช์หลักในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะแบบสวิตช์นุ่มนวลภายใต้สภาวะแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) และวงจรสามารถทำงานได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 95.66 % ที่กำลังไฟฟ้าประมาณ 1 กิโลวัตต์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการสวิตช์แบบนุ่มนวลด้วยวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งจะช่วยให้วงจรคอนเวอร์เตอร์นั้นทำงานได้ที่ความถี่สูงและกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งจะมีข้อดีต่ออุปกรณ์สวิตช์คือในช่วงของการนำกระแสสวิตช์หลักจะไม่เกิดความร้อนสะสมและความเครียดแรงดันมีค่าลดลงและสวิตช์สามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ทำให้การสูญเสียที่สวิตช์ขณะสวิตช์หลักนำกระแสมีค่าต่ำซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่สวิตช์หลักและสวิตช์ช่วยขณะนำกระแส และในการเลือกใช้ออสเฟตมาเป็นสวิตช์หลักและสวิตช์ช่วยในวงจรทำให้บูสต์คอนเวอร์เตอร์สามารถตอบสนองในการทำงานที่ความถี่สวิตช์ 50 กิโลเฮิรตซ์ได้เป็นอย่างดีไม่เกิดอันตรายต่อออสเฟตเนื่องจากการสูญเสียในขณะการสวิตช์ของออสเฟตมีค่าต่ำ

เทคนิคการสวิตช์แบบนุ่มนวลด้วยวงจรเรโซแนนซ์ที่ได้นำมาใช้ในบูสต์คอนเวอร์เตอร์นั้นมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดค่าการสูญเสียจากการสวิตช์โดยเลือกใช้วงจรเรโซแนนซ์แบบผสมเนื่องจากรเป็นเทคนิคที่ประยุกต์ใช้ข้อดีและลดข้อเสียของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและแบบขนานโดยสามารถควบคุมแรงดันต้านออกให้มีค่าคงที่ในสภาวะไร้อโหลดและโหลดมีค่าต่ำในแบบอนุกรม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ยังเป็นเพียงงานวิจัยเริ่มต้นโดยยังไม่ได้มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบและในเรื่องของระบบป้องกันความสูญเสียที่เกิดกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งถ้าหากมีศึกษาวิจัยต่อก็จะทำให้งานวิจัยต่อยอดมีความสมบูรณ์มากขึ้น

2. เนื่องจากรางจรคอนเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมกับงานที่กำลังไฟฟ้าถึงค่าพิกัดเท่านั้น ซึ่งถ้าหากนำวงจรนี้ไปใช้กับงานที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงมากกว่าค่าพิกัดจำเป็นต้องมีการคำนวณถึงความสูญเสียอันเนื่องมาจากการนำกระแสของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งถ้าหากกระแสในวงจรมีค่าสูงมากๆก็จะทำให้มีความสูญเสียมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรมีค่าลดลง

3. ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการออกแบบให้คอนเวอร์เตอร์มีระบบการชดเชยแรงดันด้านออก (Close Loop Control System) ซึ่งถ้ามีการศึกษาวิจัยต่อยอดให้คอนเวอร์เตอร์มีการชดเชยแรงดันด้านออกจะทำให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S.-H. Park, S.-R. Park, J.-S. Yu, Y.-C. Jung, and C.-Y. Won, "Analysis and design of a soft-switching boost converter with an HI-Bridge auxiliary resonant" IEEE Trans. Power Electron., Vol. 25, No. 8, Aug 2010.
- [2] L. Jong-Jae, K. Jung-Min, K. Eung-Ho, and K. Bong-Hwan, "Dual series resonant active clamp converter," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 2, pp. 699–710, Feb. 2008.
- [3] จักรวาท ศิริโยม และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. 2559. วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบัสต์สวิตช์นุ่มนวล ด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12
- [4] อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. 2554. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ชิ่ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์ มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.
- [5] วีระเชษฐ ชื่นเงิน และวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. 2547. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. หางหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง.
- [6] G. Hua, E. X. Yang, Y. Jiang, and F. C. Y. Lee, "Novel zero-current transition PWM converters," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 9, No. 6, pp. 601–606, Nov. 1994.
- [7] H. Bodur and A. F. Bakan, "A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 19, No. 3, pp. 676–684, May 2004.
- [8] H. Bodur and A. F. Bakan, "A new ZVT-PWM DC-DC converter," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 17, No. 1, pp. 40–47, Jan. 2002.
- [9] S. S. Saha, B. Majumdar, T. Halder, and S. K. Biswas, "New fully softswitched boost-converter with reduced conduction losses," in Proc. PowerElectron. Drive Syst. 2005 Int. Conf., Jan 2006, Vol. 1, pp. 107–112.
- [10] N. Jain, P. K. Jain, and G. Joos, "A zero voltage transition boost converter employing a soft switching auxiliary circuit with reduced conduction losses," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 19, No. 1, pp. 130–139, Jan. 2004.
- [11] B.R. Lin and J. J. Chen, "Analysis and implementation of a soft switching converter with high-voltage conversion ration," IET Power Electron., Vol. 1, No. 3, pp. 386–394, Sep. 2008.



ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การประชุมวิชาการ**  
**เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย**

Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT)

ครั้งที่  
**12**  
12th

วันที่ 8-10 มิถุนายน 2559  
ณ โรงแรมวังจันทน์บรีออร์วิว จังหวัดพิษณุโลก

ดำเนินการจัดประชุมโดย  
มหาวิทยาลัยนเรศวร ร่วมกับ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

• **อุตสาหกรรม พลังงาน เพื่ออนาคตประเทศไทย**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENETT12-ET-55

## วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ Soft-Switching ZCS-ZVS Boost Converter with a Resonant Circuit

จักรวาล ศิริโยม<sup>1\*</sup> และอนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ<sup>2</sup><sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ถ. ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>1\*</sup> E-mail: jakkrawan\_777@windowslive.com โทรศัพท์: 0-2329-8330<sup>2</sup> E-mail: jkjanuwat@gmail.com โทรศัพท์: 0-2329-8330

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ทั่วไปจะเกิดการสูญเสียในขณะสวิตช์หลักนำกระแสและไม่นำกระแสค่อนข้างสูงทำให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ลดลง วิธีการลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นในสวิตช์หลักและเพิ่มประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์โดยใช้สวิตช์ช่วยและวงจรเรโซแนนซ์จึงถูกนำเสนอ ดังนั้นคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์นุ่มนวลที่นำเสนอจะมีการสูญเสียต่ำกว่าคอนเวอร์เตอร์แบบทั่วไปแบบสวิตช์ที่มีการสูญเสียสูง นอกจากนี้สวิตช์ทุกตัวภายในวงจรสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ โดยบทความนี้จะแสดงการวิเคราะห์โหมดการทำงาน ผลการจำลองเพื่อที่จะยืนยันแนวคิดที่ได้นำเสนอ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าคอนเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแต่ละโหลดได้ที่ 1,000 วัตต์และ 600 วัตต์ตามลำดับที่ความถี่สวิตช์เท่ากับ 50 กิโลเฮิร์ตซ์

**คำสำคัญ:** คอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ คอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ สวิตช์นุ่มนวล สวิตช์ช่วย วงจรเรโซแนนซ์

### Abstract

This paper presents a Soft-Switching ZCS-ZVS Boost Converter with a Resonant Circuit. The conventional boost converter generates switching losses at turn-on and off. Because of those, the overall converter efficiency is reduced. The proposed converter utilizes a soft switching method using an auxiliary switch and resonant circuit. Therefore, the converter reduces switching losses lower than the hard switching. This paper shows the analysis of operation modes, the simulation, and experimental results in order to prove the proposed concept. It is found that the proposed converter can provide the rated power of 1,000 W and 600 W for each output at switching frequency of 50 kHz.

**Keywords:** Boost converter, soft-switching ZCS-ZVS boost converter, auxiliary switch, resonant circuit

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ที่มีการใช้งานความถี่สวิตช์สูงจะมีขนาดเล็กกลงแต่ในการใช้งานความถี่สวิตช์สูงจะมีการสูญเสียที่สวิตช์หลักในช่วงนำกระแสและไม่นำกระแสค่อนข้างสูงทำให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ลดลง สำหรับการใช้งานความถี่สวิตช์สูง ความเครียดของอุปกรณ์ การสูญเสียในการสวิตช์ และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด ( $di/dt$ ) ในช่วงย้อนกลับของกระแสและอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ไหลผ่านขาแคโทด-ขอร์สของมอสเฟต ( $dv/dt$ ) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ลดลง มีหลายบทความที่นำเสนอเกี่ยวกับคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้

วงจรเรโซแนนซ์และสวิตช์ช่วยเพื่อลดการสูญเสียที่สวิตช์หลัก [1]-[8] แต่เมื่อมีการใช้งานความถี่สวิตช์สูงจะเกิดการสูญเสียขึ้นที่สวิตช์หลักและสวิตช์ช่วย ดังนั้นในการแก้ปัญหาดังกล่าววงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ [2],[5]-[8] จึงถูกนำมาใช้ โดยสามารถช่วยลดความเครียดของแรงดันและกระแสที่สวิตช์ได้อย่างไรก็ตามวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์จะมีสวิตช์ช่วยเพื่อรักษาพิคกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์หลักเพราะกระแสที่เหนี่ยวนำอินพุทจะไหลผ่านสวิตช์ช่วยในช่วงที่สวิตช์หลักหยุดนำกระแส ในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มีวงจรเรโซแนนซ์เพื่อลดความเครียดของแรงดันของสวิตช์ในขณะนำกระแส มันสามารถที่จะลดกำลังงานสูญเสียขณะหยุดนำกระแสของสวิตช์

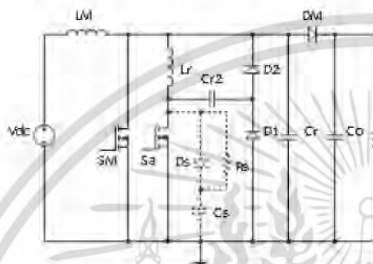
1352



คณะวิทยาศาสตร์ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
"อุตสาหกรรม-พลังงาน เพื่ออนาคตประเทศไทย"

และส่งผลให้สวิตช์ทำงานแบบสวิตช์นุ่มนวลภายใต้กระแสศูนย์ ขณะสวิตช์หลักหยุดนำกระแสและสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ขณะสวิตช์หลักนำกระแส

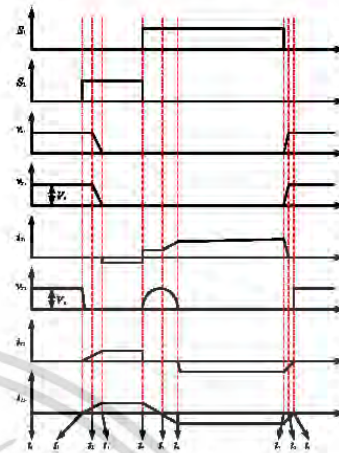
ในบทความนี้ส่วนที่สองจะกล่าวถึงบูสต์คอนเวอร์เตอร์และวงจรเรโซแนนซ์ที่สามารถนำเสนอการวิเคราะห์สมการ ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์ขนาด 1,000 วัตต์ และ 600 วัตต์ จะถูกนำเสนอในส่วนที่สี่ และสุดท้ายบทสรุปของการวิจัยจะอยู่ในส่วนที่ห้า



รูปที่ 1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยแรงดันและกระแสศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์

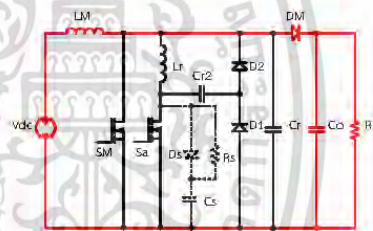
2. วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์

โดยในงานวิจัยนี้จะนำวงจรเรโซแนนซ์มาต่อในวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้สามารถใช้งานได้เกือบแบบสวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Vdc) สวิตช์หลัก (Sm) สวิตช์ช่วย (Sa) ซึ่งจะใช้มอสเฟตในการสวิตช์เพื่อใช้งานในความถี่โดยสวิตช์ช่วยจะสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่สวิตช์หลักได้ ตัวเก็บประจุ (Cr,Cr2 :Resonant Capacitors) ใช้สำหรับการถ่ายโอนประจุระหว่างตัวเหนี่ยวนำ (Lr :Resonant Inductor) เพื่อใช้ในการทำให้เกิดเรโซแนนซ์ในวงจร ไดโอด (D1,D2) ต่ออนุกรมกันและไปขนานระหว่างสวิตช์ช่วย (Sa) และตัวเหนี่ยวนำ (Lr) เพื่อใช้เป็นทางเดินของกระแสที่ไหลและตัวเหนี่ยวนำ (Lr) เพื่อแบ่งกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์หลัก (Lm) เพื่อลดการสูญเสีย โดยเอาท์พุทที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์นั้นจะสามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้ 1,000 วัตต์ และ 600 วัตต์ ความถี่สวิตช์เท่ากับ 50 กิโลเฮิรตซ์ โดยการวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตช์นุ่มนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ที่ได้นำเสนอนี้สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

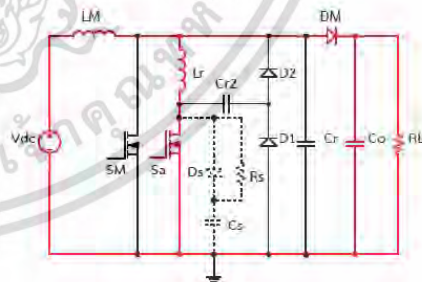


รูปที่ 2 โหมดการทำงานของวงจรที่ได้นำเสนอ

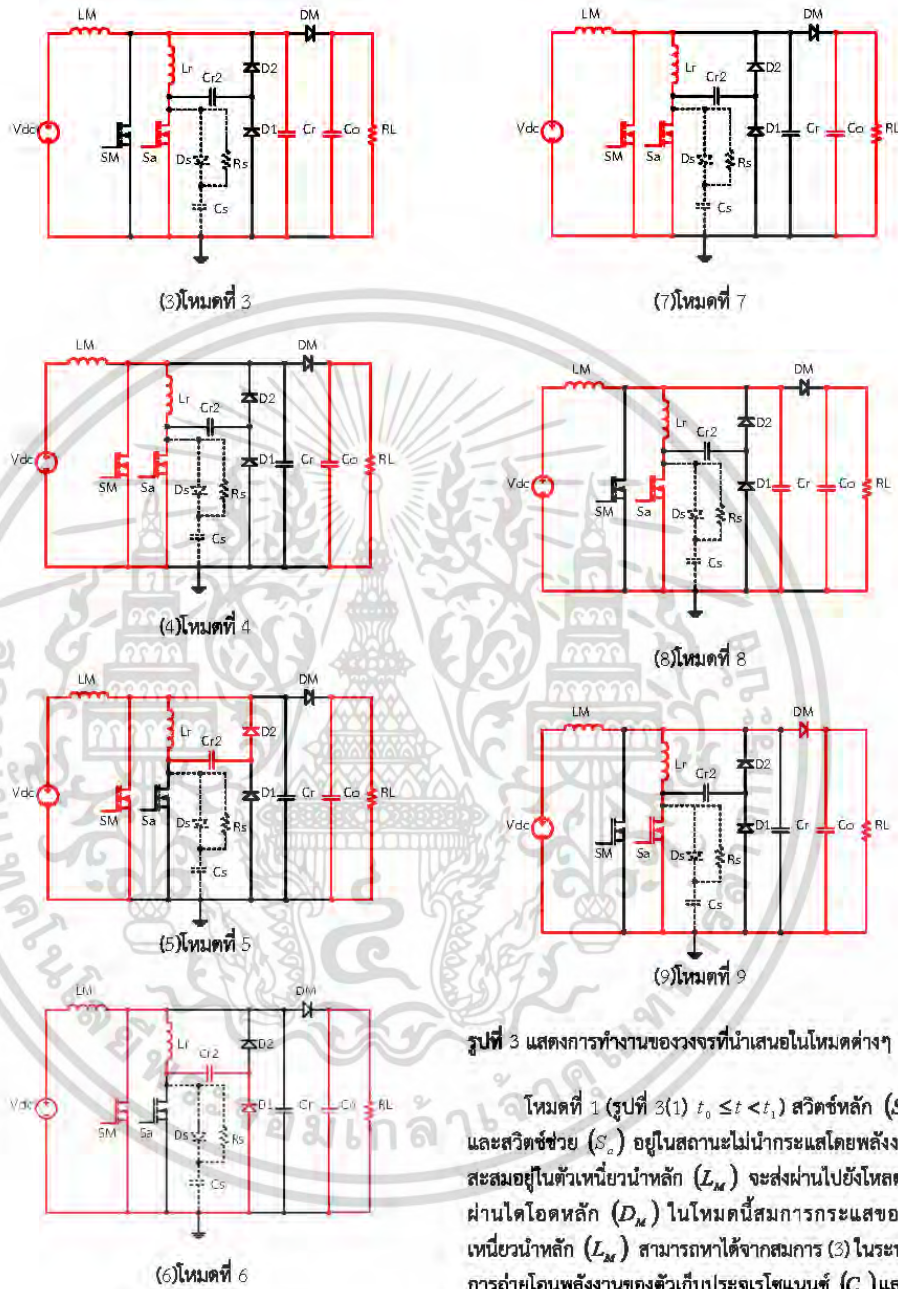
การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรที่ได้นำเสนอข้างต้นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 9 โหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิลดังรูปที่ 2 โดยแต่ละโหมดการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้



(1)โหมดที่ 1



(2)โหมดที่ 2



รูปที่ 3 แสดงการทำงานของวงจรที่นำเสนอนี้ในโหมดต่างๆ

โหมดที่ 1 (รูปที่ 3(1)  $t_0 \leq t < t_1$ ) สวิตช์หลัก ( $S_M$ ) และสวิตช์ช่วย ( $S_c$ ) อยู่ในสถานะไม่นำกระแสโดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำหลัก ( $L_M$ ) จะส่งผ่านไปยังโหลดโดยผ่านไดโอดหลัก ( $D_M$ ) ในโหมดนี้สมการกระแสของตัวเหนี่ยวนำหลัก ( $L_M$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3) ในระหว่างการถ่ายโอนพลังงานของตัวเก็บประจุโซแนนซ์ ( $C_r$ ) และตัวเหนี่ยวนำหลัก ( $L_M$ ) จะอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์

$$v_L(t) = V_m - V_o \quad (1)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int v_L dt \quad (2)$$

$$i_L(t) = \frac{V_m - V_o}{L} (t - t_1) + I(t_1) = I(t_1) - \frac{V_o - V_m}{L} (t - t_1) \quad (3)$$

$$i_L(t) = 0 \quad v_{C_1}(t) = V_o \quad v_{C_2}(t) = 0 \quad (4)$$

โหมดที่ 2 (รูปที่ 3(2)  $t_1 \leq t < t_2$ ) เมื่อสวิตช์ช่วย ( $S_o$ ) เริ่มนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะค่อยๆเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลัก ( $L_m$ ) และแรงดันที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเท่ากับกับแรงดันเอาต์พุตด้วยเช่นกันในโหมดนี้

โหมดที่ 3 (รูปที่ 3(3)  $t_2 \leq t < t_3$ ) ในโหมดนี้ไดโอดหลัก ( $D_m$ ) จะไม่นำกระแสหลังจากที่กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลัก ( $S_m$ ) มีค่าเท่ากับแบบเชิงเส้นในโหมดที่ 2 โดยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) และตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเริ่มการเรโซแนนซ์เมื่อตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) คายประจุผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) หลังจากนั้นแรงดันที่ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ในโหมดที่ 3 จะสิ้นสุดการทำงานที่  $t_3$  ในช่วง  $t_2$  เมื่อแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) เท่ากับแรงดันเอาต์พุตดังนั้นช่วงเวลาก่อนที่จะกระแสทั้งสองจะมีค่าเท่ากันหลังจากช่วง  $t_1$  สามารถหาได้จากสมการ (5) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์หาได้จากสมการ (6) แรงดันที่ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์หาได้จากสมการ (7) ในโหมดนี้ค่าอิมพีแดนซ์เรโซแนนซ์ ( $Z_r$ ) และความถี่เชิงมุม ( $\omega_r$ ) หาได้จาก  $Z_r$  และ  $\omega_r$

$$t_1 = \frac{I_L}{(V_o/L_r)} \quad (5)$$

$$i_L(t) = i_{min}(t) + \frac{V_o}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_2) \quad (6)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o \cos \omega_r (t - t_2) \quad (7)$$

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (8)$$

โหมดที่ 4 (รูปที่ 3(4)  $t_3 \leq t < t_4$ ) ทันทีที่ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_r$ ) คายประจุจนมีค่าเท่ากับศูนย์ไดโอดภายในสวิตช์หลักจะนำกระแสโดยธรรมชาติ ในกรณีนี้แรงดันที่สวิตช์หลักจะมีค่าเท่ากับศูนย์และจะนำกระแสภายใต้แรงดัน

โกล์เคียงศูนย์ ในโหมดนี้แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์หลัก ( $S_m$ ) จะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต ดังนั้นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) สามารถหาได้จากสมการ (9) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะมีค่าคงที่หลังจากโหมดการทำงานที่ 3 โดยตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์จะคายประจุอย่างรวดเร็วและมีค่าเท่ากับศูนย์

$$i_L(t) = i_{min} + \frac{V_m}{L} (t - t_3) \quad (9)$$

$$v_{C_r}(t) = 0, \quad v_{C_2}(t) = 0 \quad (10)$$

โหมดที่ 5 (รูปที่ 3(5)  $t_4 \leq t < t_5$ ) ในโหมดนี้จะเริ่มต้นทำงานโกล์เคียงกับในโหมดที่ 4 โดยจะทำงานภายใต้แรงดันโกล์เคียงศูนย์และสวิตช์ช่วย ( $S_o$ ) จะไม่นำกระแสและในช่วงนี้ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) เริ่มการเรโซแนนซ์หลังจากนั้นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะมีค่าเท่ากับศูนย์และตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์จะอัดประจุเต็มที่ได้จากการเรโซแนนซ์และสิ้นสุดการทำงานโหมดนี้ ดังนั้นกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) สามารถหาได้จากสมการ (11)

$$i_L(t) = i_{Lr}(t_4) \cos \omega_r (t - t_4) \quad (11)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{r2}}}, \quad Z_{r2} = \sqrt{\frac{L_r}{C_{r2}}} \quad (12)$$

โหมดที่ 6 (รูปที่ 3(6)  $t_5 \leq t < t_6$ ) หลังจากสิ้นสุดโหมดการทำงานที่ 5 กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะไหลย้อนกลับผ่านตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) และไดโอด ( $D_r$ ) เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) ลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์การเรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) และตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ในโหมดนี้

โหมดที่ 7 (รูปที่ 3(7)  $t_6 \leq t < t_7$ ) หลังจากทีแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ ( $C_{r2}$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์ ไดโอดภายในสวิตช์ช่วย ( $S_o$ ) จะนำกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และ สวิตช์หลัก ( $S_m$ ) การทำงานในโหมดนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อสวิตช์หลัก ( $S_m$ ) หยุดนำกระแสโดยขนาดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหลัก ( $L_m$ ) และ ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเป็นไปตามสมการ (13)

$$i_L(t) = I_{min} + \frac{V_m}{L} (t - t_5) \quad (13)$$

$$i_{Lr}(t) = -i_L(t_6) \quad (14)$$



โหมดที่ 8 (รูปที่ 3(8)  $t_7 \leq t < t_8$ ) เมื่อสวิตช์หลัก ( $S_M$ ) หยุดนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันต้นขั้วโหมดการทำงานที่ 8 จะเริ่มขึ้นผลรวมของกระแสในตัวเหนี่ยวนำทั้งสองคือกระแสอัดประจุของตัวเก็บประจุโซแนนซ์ ( $C_r$ ) ในโหมดนี้ โหมดการทำงานที่ 8 จะสิ้นสุดลงเมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุโซแนนซ์ ( $C_r$ ) มีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตโดยกระแสของตัวเหนี่ยวนำโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และเงื่อนไขการทำงานแบบแรงดันต้นขั้วเป็นไปตามสมการ (15) และ (16)

$$i_L(t) = i_L(t_7) - (i_L(t_7) + i_{L_r}(t_7)) \cos \omega_s t \quad (15)$$

$$Z_o (i_L(t_7) + i_{L_r}(t_7)) > V_o \quad (16)$$

โหมดที่ 9 (รูปที่ 3(9)  $t_8 \leq t < t_9$ ) ที่เวลา  $t_8$  ตัวเก็บประจุโซแนนซ์ ( $C_r$ ) ยังคงถูกอัดประจุอย่างต่อเนื่องแรงดันที่ไดโอดหลักมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นไดโอดหลักจะนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันต้นขั้ว กระแสของตัวเหนี่ยวนำโซแนนซ์จะลดลงแบบเชิงเส้นจนกระทั่งกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์โหมดที่ 9 จะสิ้นสุดการทำงานเพื่อเริ่มวัฏจักรการทำงานถัดไปอีกครั้งและกระแสของตัวเหนี่ยวนำหลัก ( $L_M$ ) และตัวเหนี่ยวนำโซแนนซ์ ( $L_r$ ) จะเป็นไปตามสมการ (17) และ (18)

$$i_L(t) = i_L(t_8) - \frac{V_o - V_{sm}}{L} t \quad (17)$$

$$i_{L_r}(t) = i_{L_r}(t_8) + \frac{V_o}{L} t \quad (18)$$

3. การวิเคราะห์หาสมการแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า

การวิเคราะห์หาสมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กระแสเอาต์พุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในสภาวะคงตัวของโหลดสามารถกระทำดังนี้

Duty Cycle ของบูสต์คอนเวอร์เตอร์

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} ; D = D_{max} + D_{min}$$

$$D = 50\% ; D_{max} = 35\% ; D_{min} = 15\%$$

ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_M$ ) และ ตัวเก็บประจุ ( $C_D$ )

$$L \geq \frac{(1-D)^2 \times DR}{2f}$$

$$L \geq 200 \mu H ; L_r \geq 560 \mu H$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC}$$

$$C = \frac{DV_o}{\Delta V_o * R * f}$$

$$C \geq 5.98 \mu F \cong 330 \mu F$$

ตัวเหนี่ยวนำโซแนนซ์ ( $L_r$ ) และตัวเก็บประจุโซแนนซ์ ( $C_r$ )

$$Z_o I_{M, max} \leq V_o$$

$$\pi \sqrt{L_r C_r} \leq 0.1 T_s$$

$$\omega_s \approx 942477.8 ; Z_o \leq \frac{1}{Z_o \omega_s}$$

$$L_r = 20 \mu H ; C_r = 30 nF$$

4. ผลการจำลอง

วงจรที่ได้ทำการนำเสนอขึ้นได้ถูกจำลอง สร้างและทำการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

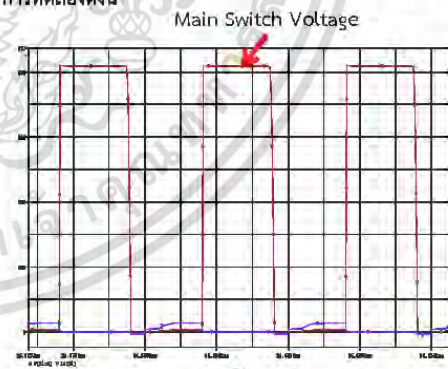
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ( $P_o$ ) = 1,000 วัตต์ และ 600 วัตต์

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) = 400 โวลต์

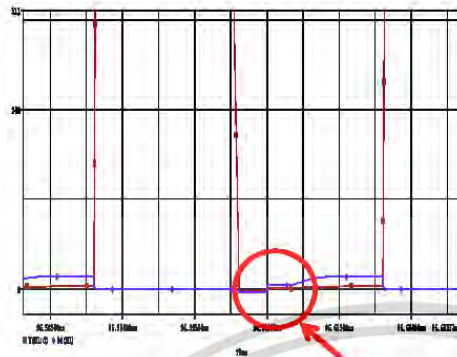
แรงดันไฟฟ้าอินพุต ( $V_{in}$ ) = 200 โวลต์

ความถี่สวิตช์ ( $f_s$ ) = 50 กิโลเฮิร์ตซ์

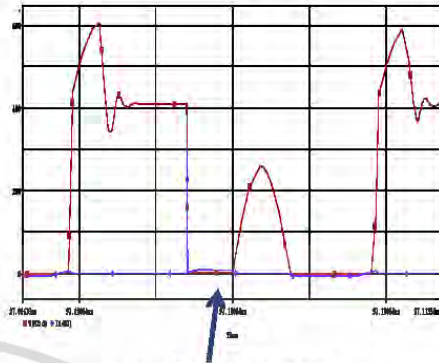
เพื่อที่จะเป็นการพิสูจน์แนวคิดที่ได้นำเสนอวงจรดังกล่าวได้ถูกจำลองการทำงานโดยโปรแกรม PSpice ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



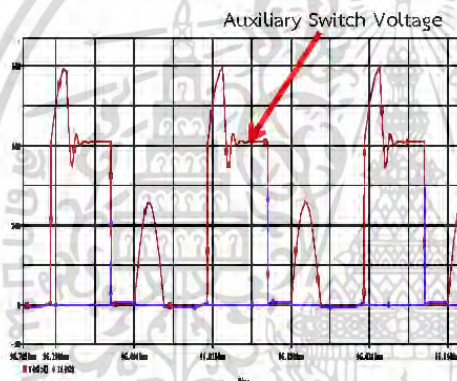
รูปที่ 4 แสดงผลรูปคลื่นแรงดันของสวิตช์หลัก (SM) ที่มีรูปร่างเป็น Square Wave โดยมีค่าแรงดันยอด 400 VDC ที่โหลด 1,000 วัตต์



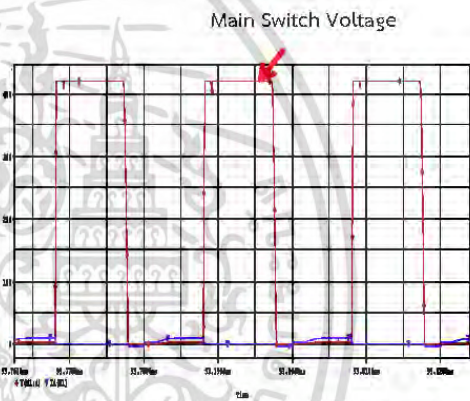
รูปที่ 5 แสดงผลรูปคลื่นกระแสและแรงดันของสวิตช์หลัก (SM) โดยรูปคลื่นสัญญาณแสดงให้เห็นว่ากระแสที่สวิตช์หลักเกิดสภาวะ Zero Voltage ทำให้เกิด ZVS



รูปที่ 7 แสดงผลรูปคลื่นกระแสของสวิตช์ช่วย (Sa) โดยมี ค่ากระแสเฉลี่ยอยู่ที่ 5.65 A



รูปที่ 6 แสดงผลรูปคลื่นแรงดันของสวิตช์ช่วย (Sa) โดยมีค่าแรงดันขั้วต่อ 400 VDC ที่โหลด 1,000 วัตต์

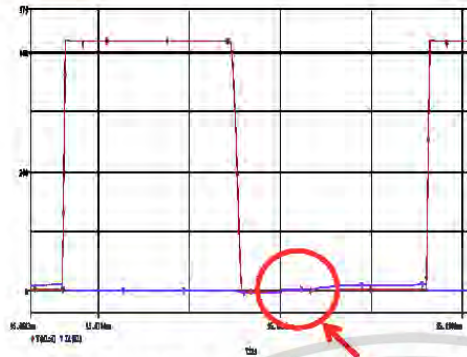


รูปที่ 8 แสดงผลรูปคลื่นแรงดันของสวิตช์หลัก (SM) ที่มีรูปร่างเป็น Square Wave โดยมีค่าแรงดันขั้วต่อ 420 VDC โหลด 600 วัตต์



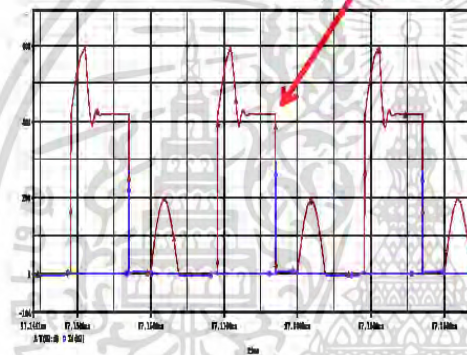
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
"อุตสาหกรรม-พลังงาน เพื่ออนาคตประเทศไทย"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

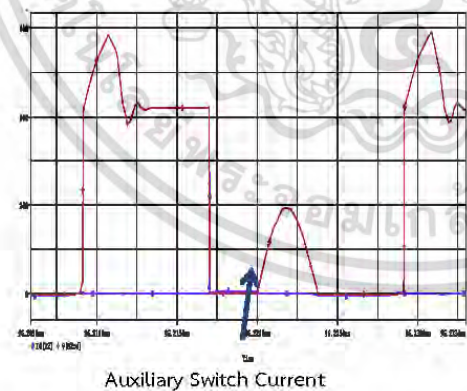


รูปที่ 11 แสดงผลรูปคลื่นกระแสของสวิตช์ช่วย (Sa) โดยมีค่ากระแสเฉลี่ยอยู่ที่ 4,45 A

รูปที่ 9 แสดงผลรูปคลื่นกระแสและแรงดันของสวิตช์หลัก (SM) โดยรูปคลื่นสัญญาณแสดงให้เห็นว่าการกระแสที่สวิตช์หลักเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ทำให้เกิด ZVS Auxiliary Switch Voltage



รูปที่ 10 แสดงผลรูปคลื่นแรงดันของสวิตช์ช่วย (Sa) โดยมีค่าแรงดันยอด 420 VDC ที่โหลด 600 วัตต์



5. บทสรุป

ในบทความนี้บรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่มีนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ได้จำลองและทดสอบตามแบบที่ได้นำเสนอ การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและขั้นตอนการออกแบบที่ได้นำเสนอในรายละเอียดรวมทั้งสมรรถนะของบรูสต์คอนเวอร์เตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับบรูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ และ 600 วัตต์ ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ให้เห็นว่าความเครียดแรงดันมีค่าลดลงขณะที่สวิตช์หลักนำกระแสและสวิตช์สามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะสวิตช์ด้วยแรงดันใกล้เคียงศูนย์ทำให้การสูญเสียที่สวิตช์ขณะสวิตช์หลักนำกระแสมีค่าต่ำซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะเรโซแนนซ์ที่สวิตช์หลักและสวิตช์ช่วยขณะนำกระแส โดยบรูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์ที่มีนวลด้วยกระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้กับคอนเวอร์เตอร์แบบ PWM อื่นๆ เพื่อให้สวิตช์ทำงานแบบสวิตช์ที่มีนวล และความเครียดของอุปกรณ์ (สวิตช์) มีค่าลดลง

เอกสารอ้างอิง

[1] S.-H. Park, S.-R. Park, J.-S. Yu, Y.-C. Jung, and C.-Y. Won, "Analysis and design of a soft-switching boost converter with an HI-Bridge auxiliary resonant" IEEE Trans. Power Electron., Vol. 25, No. 8, Aug 2010.  
 [2] G. Hua, E. X. Yang, Y. Jiang, and F. C. Y. Lee, "Novel zero-current transition PWM converters," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 9, No. 6, pp. 601–606, Nov. 1994.  
 [3] H. Bodur and A. F. Bakan, "A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 19, No. 3, pp. 676–684, May 2004.  
 [4] H. Bodur and A. F. Bakan, "A new ZVT-PWM DC-DC converter," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 17, No. 1, pp. 40–47, Jan. 2002.  
 [5] S. S. Saha, B. Majumdar, T. Halder, and S. K. Biswas, "New fully softswitched boost-converter with reduced conduction losses," in Proc. PowerElectron. Drive Syst. 2005 Int. Conf., Jan 2006, Vol. 1, pp. 107–112.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [6] N. Jain, P. K. Jain, and G. Joos, "A zero voltage transition boost converter employing a soft switching auxiliary circuit with reduced conduction losses," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 19, No. 1, pp. 130–139, Jan. 2004.
- [7] B. R. Lin and J. J. Chen, "Analysis and implementation of a soft switching converter with high-voltage conversion ratio," IET Power Electron., Vol. 1, No. 3, pp. 386–394, Sep. 2008.
- [8] L. Jong-Jae, K. Jung-Min, K. Eung-Ho, and K. Bong-Hwan, "Dual series resonant active clamp converter," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 2, pp. 699–710, Feb. 2008.

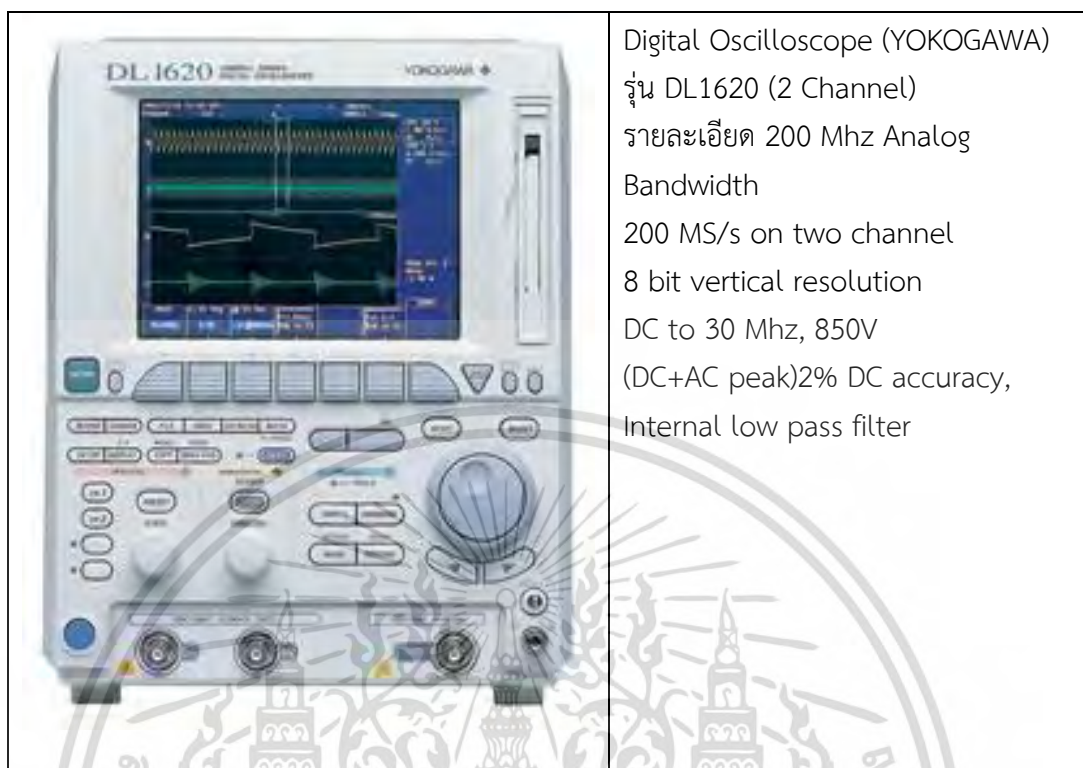


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลอุปกรณ์การวัด



Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)  
 รุ่น DL1620 (2 Channel)  
 รายละเอียด 200 Mhz Analog  
 Bandwidth  
 200 MS/s on two channel  
 8 bit vertical resolution  
 DC to 30 Mhz, 850V  
 (DC+AC peak)2% DC accuracy,  
 Internal low pass filter



Digital Oscilloscope (Rigol)  
 รุ่น DS1052E  
 2 Analog channels + external trigger  
 1 Million point deep memory  
 1 GSa/sec max sample rate  
 5.7" TFT QVGA (320X240) with 64K  
 color LCD backlit display  
 Trigger modes: edge, pulse width,  
 slope, video, pattern, continuous  
 time, and alternate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลิตภัณฑ์ Current Probe (FLUKE)  
 รุ่น 80i-110s AC/DC  
 รายละเอียด 10mV/A, 100mV/A  
 Input 100A peak Max  
 Frequency : DC to 100kHz .(@3 db)  
 Output 10mV/A, 100 mV/A CAT III



ผลิตภัณฑ์ Digital Multi Meter (Hewlett Packard)  
 รุ่น 973A  
 รายละเอียด Vac or Vdc : 0 to 1000/1000  
 Volts  
 Iac or Idc : 0 to 10 Amps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

}

// Delay 0.33 us (XT w/PLL 4x)

void Delay_uS2()

{

Nop(); // delay 1 mch cycle

}

//-----:main programm

//int main(void)

//{

//

// Init_PWM(); // Initialize PWM module

//

// while(1) // Loop forever

// {

//   PDC1 = 187; // This sets the duty cycle, for or servo (or motor) 1875 is

neutral.

//   PDC2 = 187 ;

//

//

//}

//}

//}

//}

//void Init_PWM(void)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//{

// /**** PTCON: PWM Time Base Control Register ****/

// PTCONbits.PTEN = 0; // Timer Enable bit:          DISABLE MCPWM

// PWMCON1bits.PEN1H = 1; // PWM1H (pin 37) is enabled for PWM output

// PWMCON1bits.PEN2H = 1; // PWM2H (pin 35) is enabled for PWM output

// PWMCON1 = 0x0FFF;

// DTCON1= 0x0003;

// PTCONbits.PTCKPS = 1; // Input Clock Prescale bits: 1:4

// PTCONbits.PTOPS = 0; // Output Clock Postscale bits: 1:1

// PTCONbits.PTSIDL = 1; // Stop in Idle Mode:        YES

// PTCONbits.PTMOD = 0; // Mode Select bits:         Free Running Mode

// PTCONbits.PTEN = 1; // Timer Enable bit:          ENABLE MCPWM

//

// /**** PTPER: PWM Time Base Period Register ****/

// PTPERbits.PTPER = 170; // Period Value bits

//}

int main (void)

{

TRISE = 0x0000 ;

TRISB = 0x0000 ;

LATE = 0x0000 ;

LATB = 0x0000 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while (1)
{
//-----t0-t1

_LATE0 = 1;

_LATE1 = 0;

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

_LATE0 = 0 ;

_LATE1 = 0 ;

Delay_uS2();

_LATE0 = 0 ;

_LATE1 = 1 ;

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

Delay_uS();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```
Delay_uS();  
  
Delay_uS();  
  
Delay_uS();  
  
Delay_uS();  
  
Delay_uS();  
  
}  
  
return 0 ;  
  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ - นามสกุล นายจักรวาท ศิริโยม

วัน เดือน ปีเกิด 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524

ที่อยู่ 52/161 ถ.พหลโยธิน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

ประวัติ การศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม

2556 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานทางวิชาการ

1. จักรวาท ศิริโยม และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบูสต์สวิตชิ่งนุ่มนวลด้วย กระแสและแรงดันศูนย์ด้วยวงจรเรโซแนนซ์ การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 หน้าที่ 1352-1359

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้