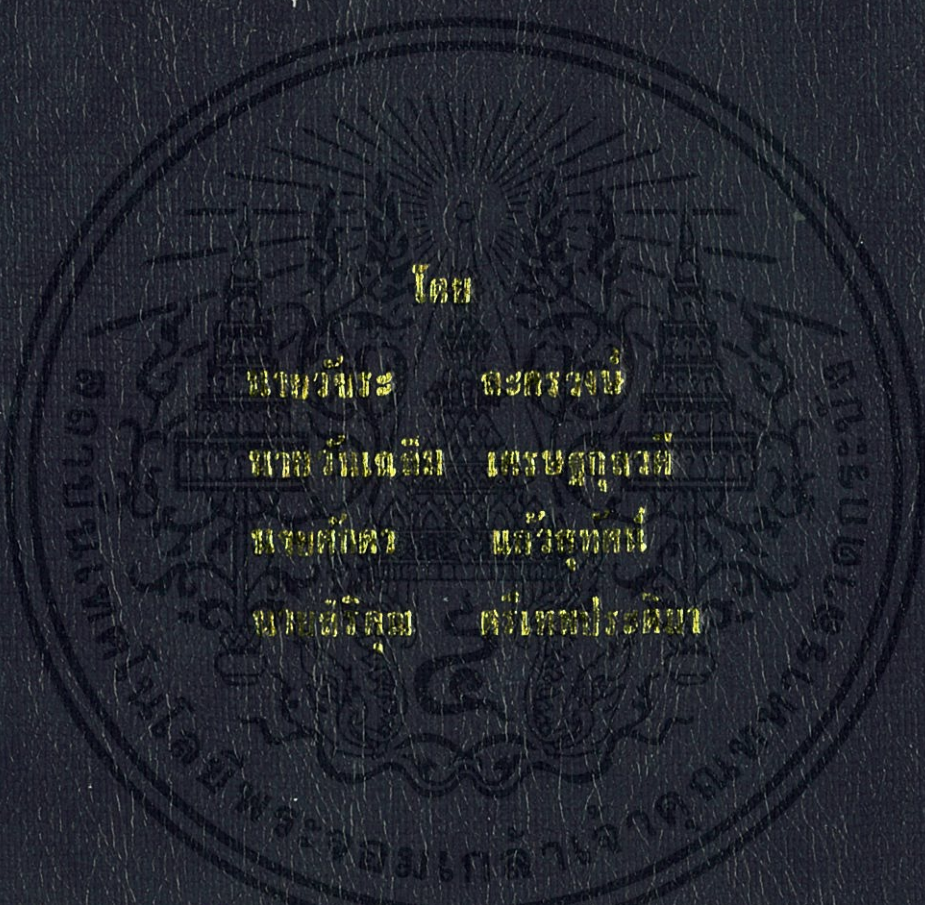


วิทยานิพนธ์การศึกษาระดับปริญญาโท
ชื่อเรื่อง: การออกแบบอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาท์พุต
ระดับห้าระดับ ZVS Resonant Inverter
สำหรับงานหลอมโลหะด้วยไฟฟ้า

A Two-Phase Two-Output Five-Level ZVS Resonant Inverter
for Induction Melting Applications



โดย

นายวันระ

ตะกรวงษ์

นายวันเดอ

เดชสุภะ

นายศักดิ์

แก้วสุทัศน์

นายสุวิเศษ

ศรีเทพประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ปีการศึกษา 2557

อินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์
สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

A Two - Phase Two - Output Five - Level ZVS Resonant Inverter
for Induction Melting Applications



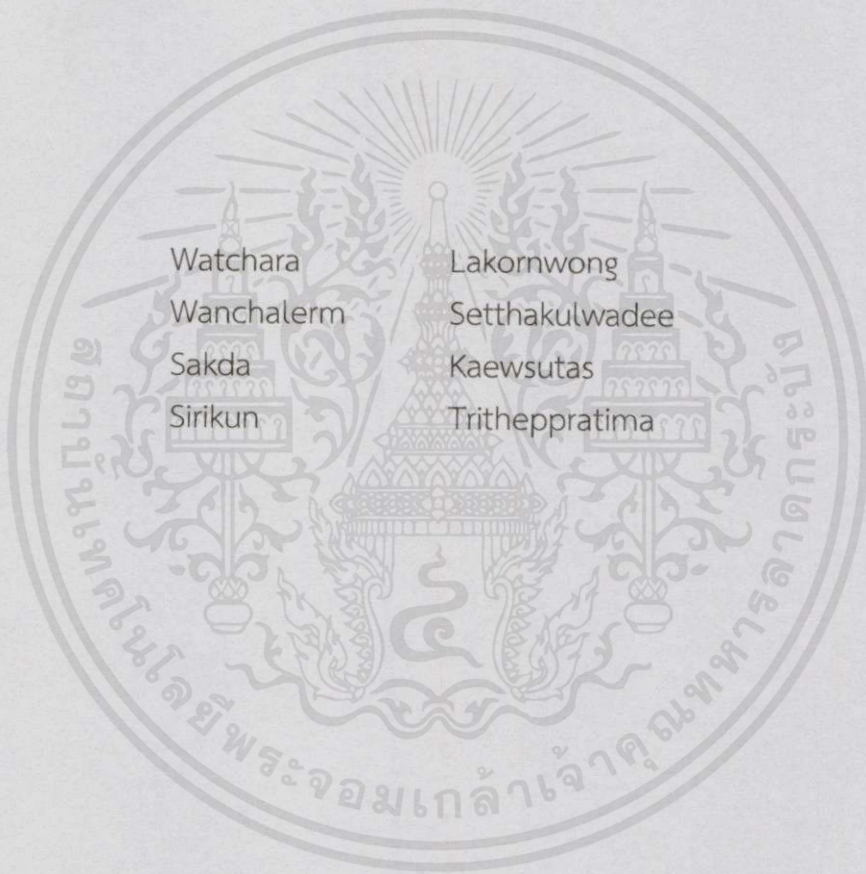
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์เท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในการนำปริญญานิพนธ์นี้ไปใช้

ปีการศึกษา 2557

A Two - Phase Two - Output Five - Level ZVS Resonant Inverter
for Induction Melting Applications



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

ปีการศึกษา 2557

อินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

A Two-Phase Two-Output Five-Level ZVS Resonant Inverter
for Induction Melting Applications



โดย
นาย วัชร ละครวงษ์
นาย วันเฉลิม เศรษฐกุลวดี
นาย ศักดา แก้วสุทัศน์
นาย สิริคุณ ตรีเทพประติมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก อาจารย์ที่ปรึกษา อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

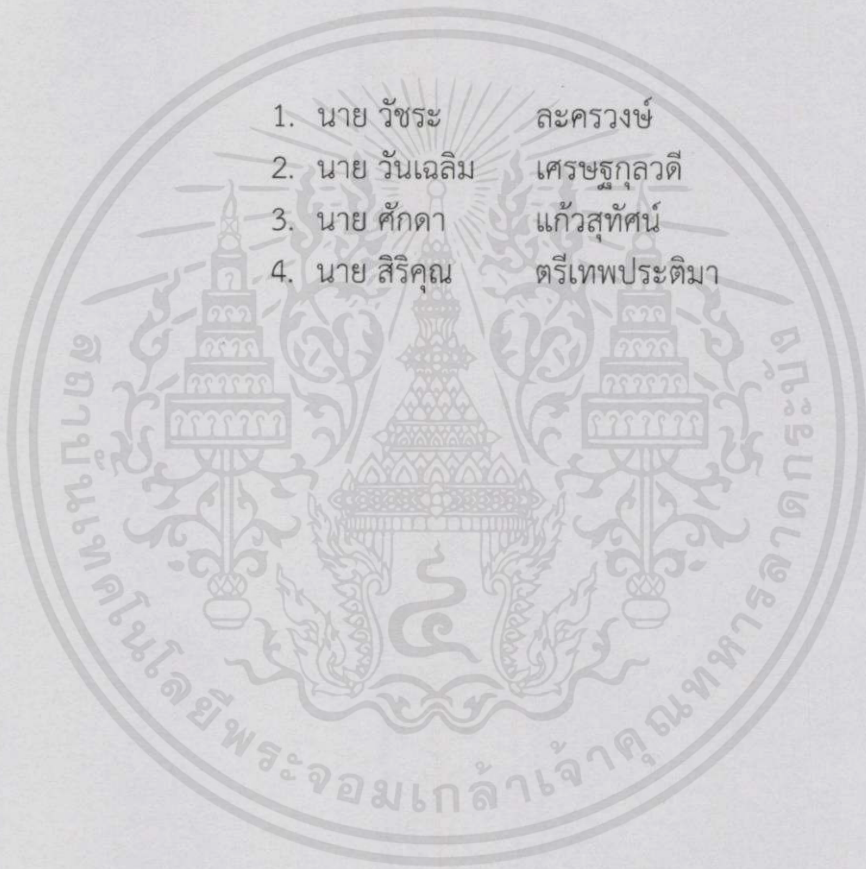
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอ๊าท์พุทห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์
สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

1. นาย วัชร ละครวงษ์
2. นาย วันเฉลิม เศรษฐกุลวดี
3. นาย ศักดา แก้วสุทัศน์
4. นาย สิริคุณ ตรีเทพประติมา



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการ
หลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

นายวัชร ละครวงษ์

นายวันเฉลิม เศรษฐกุลวดี

นายศักดิ์ แก้วสุทัศน์

นายสิริคุณ ตรีเทพประติมา

รศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับซึ่งนำมาใช้สำหรับเครื่องหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำซึ่งสามารถจ่ายกำลังงานได้สองเอาต์พุตได้อย่างพร้อมกัน โดยใช้หลักการเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและสัญญาณควบคุมพีดับบลิวเอ็มแบบที่มีการเลื่อนเฟสเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจร โดยจะได้ทำการอธิบายการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอ การจำลองผล รวมไปถึงการออกแบบเครื่องหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ โดยเครื่องหลอมโลหะดังกล่าวได้ถูกสร้างและทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเท่ากับ 3 กิโลวัตต์ จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าเครื่องหลอมโลหะสามารถหลอมทองแดงได้ตามขอบเขตงาน สวิตช์ทุกตัวในวงจรยังสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์ (ZVS) ซึ่งนำไปสู่การลดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการสวิตช์ รวมถึงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ยังถูกลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเนื่องจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับโดยมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดอยู่ที่ 91.33 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Two-phase Two-output Five-level ZVS Resonant Inverter for Induction melting application

Watchara	Lakornwong
Wanchalerm	Settakulwadee
Sakda	Kaewsutas
Sirikun	Trithepratima
Assoc.Prof.Dr.Anuwat	Jangwanitlert Advisor
Year 2014	

Abstract

This senior project introduces a multi-level inverter for using in induction melting application that can provide two-output units simultaneously. The series resonant principle and phase-shift pulse width modulation (PSPWM) signals are used for controlling the output power. The operation principle, simulation, and design of proposed inverter are shown in this senior project. The prototype of inverter was built and tested at input voltage of 220 V, line frequency of 50 Hz and rated power of 3kW. From the experiments demonstrated in laboratory, the induction melting can melt copper according to the scopes of this project. In addition, all switches can operate under ZVS condition that lead to reduce the switching losses and the voltage across switches is also decreased to a half of input voltage due to the use of multi-level inverter. The maximum efficiency of prototype is 91.33 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษารศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างเต็มที่มาโดยตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณ วัทธัญ มีศรีสุขที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอต่างๆ ตลอดจนคอยให้คำปรึกษาในทุกๆเรื่องทำให้คณะผู้จัดทำสามารถก้าวผ่านปัญหาต่างๆไปได้ด้วยดี

นอกจากนั้นคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกจ่ายเครื่องมือ ห้องปฏิบัติการ PEARL Lab และห้องปฏิบัติการ High Voltage Lab ที่ได้อนุเคราะห์ให้ยืมอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดตลอดจนบริษัท ละมุล วิศวกรรม จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อต่อผู้หม้อแปลงสำหรับใช้ในโครงการรวมไปถึงคุณอุกฤษณ์ ใจงาม และคุณกานต์ โพธิพันธ์ ที่ได้เสียสละเวลามาช่วยในการถ่ายทำฟรีเซ็นต์

และขอขอบคุณหน่วยงานที่ได้อนุเคราะห์ทุนวิจัยสำหรับใช้ในโครงการดังต่อไปนี้

- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน
- ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเรียน และให้กำลังใจตลอดจนครูอาจารย์ที่รักและเคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้กับผู้จัดทำ จนทำให้การทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน เรียงตามลำดับดังนี้	1
1.5 แผนการดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
1.7 รายละเอียดที่จะทำในโครงการฉบับนี้	3
บทที่ 2	4
2.1 บทนำ	4
2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ (Neutral-point Clamped Inverter)	4
2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แรงดันแบบห้าระดับ	7
2.4 ทฤษฎีการสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์แบบต่างๆ	7
2.4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์แบบฮาร์ดสวิตชิง	8
2.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVS	9
2.5 มอสเฟตกำลังและวงจรกับเกต	10
2.5.1 โครงสร้างของมอสเฟต	11
2.5.2 การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับมอสเฟตกำลัง	12
2.6 หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็ก	16
2.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้า	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณพื้นที่ (High-Frequency Transformer Design Using Area Product Design)	19
2.7 ทฤษฎีกำลังไฟฟ้า	23
2.8 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	24
2.9 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม	26
2.9.1 การสูญเสียในการสวิตช์	28
2.9.2 การควบคุมค่ายอด	28
2.10 วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟส	28
2.11 การควบคุมโดยวิธีการล็อกมูมเฟส (Phase Lock-loop)	30
2.12 การให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำ	30
2.13 รูปแบบการทำงานของการทำงานให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำ	32
2.14 สรุป	32
บทที่ 3	33
3.1 บทนำ	33
3.2 หลักการทำงานของวงจร	33
3.3 ลักษณะโครงสร้างของวงจร	34
3.4 โหมดการทำงานของวงจร	35
3.5 การออกแบบ และสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ	45
3.5.1 ส่วนวงจรเรียงกระแส AC เป็น DC ด้านอินพุต	46
3.5.2 ส่วนตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน	46
3.5.3 ส่วนภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์	47
3.5.4 ส่วนวงจรขับเคลื่อน	48
3.5.5 ชุดโหลด	49
3.5.6 ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ	54
3.5.7 ส่วนของวงจรวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออก	54

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การจำลองระบบของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์ที่มีสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ	55
3.7 สรุป	56
บทที่ 4	57
4.1 บทนำ	57
4.2 การนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์ของสวิตช์	57
4.2.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริง และผลที่ได้จากการจำลอง	58
4.3 การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณแรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์	61
4.3.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสของโหลดชุดที่1	62
4.4 การทดสอบการทำงาน และประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ	65
4.5 ภาพรวมการทำงานของวงจร	71
4.6 สรุป	71
บทที่ 5	72
5.1 สรุปผลการวิจัย	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก.	76
ภาคผนวก ข.	81
ภาคผนวก ค.	86
ภาคผนวก ง.	89
ภาคผนวก จ.	92
ประวัติผู้ทำวิจัย	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ผ่านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสองระดับ	6
รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ	6
รูปที่ 2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ	6
รูปที่ 2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบสามระดับ	7
รูปที่ 2.5 ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ของสวิตช์	7
รูปที่ 2.6 ลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์โดยในพื้นที่แรงเงาแสดงถึง Switching loss	8
รูปที่ 2.7 ลักษณะการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS)	8
รูปที่ 2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบฮาร์ดสวิตช์ขั้ว และสัญญาณควบคุม	9
รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVS และสัญญาณควบคุม	9
รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟต	11
รูปที่ 2.11 คุณลักษณะระหว่างกระแสและแรงดัน	12
รูปที่ 2.12 (a) ลักษณะกระแสแรงดันขณะนำกระแส (b) ลักษณะกระแสแรงดันขณะหยุดนำกระแส	14
รูปที่ 2.13 (ก) พื้นที่ปลอดภัยในสภาวะไบแอส (ข) พื้นที่ปลอดภัยในสภาวะไบแอสกลับ	15
รูปที่ 2.14 หม้อแปลงไฟฟ้า และวงจรสมมูลทางอุดมคติ	17
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ	18
รูปที่ 2.16 วงจรฮิสเตอร์ซิสสำหรับทำแม่เหล็กถาวร	19
รูปที่ 2.17 วงจรฮิสเตอร์ซิสสำหรับทำหม้อแปลงไฟฟ้า	19
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างนิยาม (A_c) และ (A_w) สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่างๆ	20
รูปที่ 2.19 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า	24
รูปที่ 2.20 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	25
รูปที่ 2.21 กราฟของอิมพีแดนซ์ Z	25
รูปที่ 2.22 (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (ข) วงจรสมมูลของการอนุกรม RLC (ค) การตอบสนองที่ความถี่ปกติ	27
รูปที่ 2.23 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มูเลี่ยนเฟสต่างๆ (ก) 0 องศา (ข) 60 องศา (ค) 90 องศา	29
รูปที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบทั้งหมดของการให้ความร้อน แบบเหนี่ยวนำและการควบคุม	30
รูปที่ 2.25 การเกิดกระแสไหลวนที่เข้าหาลอม	31
รูปที่ 2.26 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความร้อน	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของวงจร	34
รูปที่ 3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ	35
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมเวลาโหมดการทำงานของวงจร	37
รูปที่ 3.4 โหมดการทำงานที่ 1	38
รูปที่ 3.5 โหมดการทำงานที่ 2	38
รูปที่ 3.6 โหมดการทำงานที่ 3	39
รูปที่ 3.7 โหมดการทำงานที่ 4	39
รูปที่ 3.8 โหมดการทำงานที่ 5	40
รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานที่ 6	40
รูปที่ 3.10 โหมดการทำงานที่ 7	41
รูปที่ 3.11 โหมดการทำงานที่ 8	41
รูปที่ 3.12 โหมดการทำงานที่ 9	42
รูปที่ 3.13 โครงสร้างของวงจรถูกได้สร้างขึ้นจริง	45
รูปที่ 3.14 วงจรเรียงกระแสด้านอินพุต	46
รูปที่ 3.15 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน	47
รูปที่ 3.16 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์	47
รูปที่ 3.17 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น และใช้งานจริง	48
รูปที่ 3.18 วงจรขับเคลื่อนโดยใช้ TLP 350	48
รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลของชุดโหลด ประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่สูง, ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ และ เข้าหลอม	49
รูปที่ 3.20 (ก) และ(ข) หม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองตัวที่สร้างขึ้นจริงของชุดโหลดทั้งสองชุด	51
รูปที่ 3.21 (ก) และ(ข) ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ของชุดโหลดทั้งสองชุด	52
รูปที่ 3.22 (ก) และ(ข) เข้าหลอมโลหะกราไฟต์ของชุดโหลดทั้งสองชุด	53
รูปที่ 3.23 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33EP512MU810	54
รูปที่ 3.24 วงจรวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออก	55
รูปที่ 3.25 วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำที่ได้ทำการจำลองในโปรแกรม OrCAD Capture CIS	56
รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S1 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S2 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	58
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S5 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	59
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S6 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	59
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S9 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	60
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S10 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	60
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่1 (200V/div , 10A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	62
รูปที่ 4.8 ฮาร์มอนิกส์เปกตรัมของแรงดัน (ก.) และกระแส (ข.) จากชุดโหลดชุดที่ 1	63
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่2 (200V/div , 10A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	64
รูปที่ 4.10 ฮาร์มอนิกส์เปกตรัมของแรงดัน (ก.) และกระแส (ข.) จากชุดโหลดชุดที่ 2	64
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่ 1 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 40 องศา (ก.) จากผลการทดลอง(ข.) จากการจำลอง	66
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 40 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	66
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่ 1 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 30 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	67
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 30 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดัน และกระแสขาออกของโพลดชุดที่ 1 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 20 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	68
รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดัน และกระแสขาออกของโพลดชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 20 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	68
รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดัน และกระแสขาออกของโพลดชุดที่ 1 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 10 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	69
รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดัน และกระแสขาออกของโพลดชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 10 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง	69
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางไฟฟ้า กับมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์	70
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของเบ้าหลอมกับเวลาของโพลดชุดที่ 1 และชุดที่ 2	71
รูปที่ 5.1 เบ้าที่ 1 และเบ้าที่ 2 ขณะทำการทดลอง	73
รูปที่ 5.2 สัญญาณแรงดัน และกระแสขาเข้า (AC) ของวงจร (0.200kV/div , 20A/div)	73
รูปที่ 5.3 สัญญาณแรงดัน และกระแสขาเข้า (DC) ของวงจร (0.200kV/div , 20A/div)	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แบบสองระดับกับวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ	5
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ แบบฮาร์ดสวิตชิง และแบบแรงดันศูนย์ (ZVS)	10
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงความถี่สูงตัวที่ 1	50
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงความถี่สูงตัวที่ 2	50
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของเข้าหลอมโลหะ	53
ตารางที่ 4.1 การเกิด ZVS ในสวิตช์แต่ละตัว	57
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่างเฟสของกระแส และต้นขาออกต่างๆของอินเวอร์เตอร์	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้การหลอมโลหะโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก เป็นที่นิยมในวงกว้างในภาคอุตสาหกรรม การหลอมโลหะด้วยวิธีการเหนี่ยวนำเป็นวิธีการให้ความร้อนที่ใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีข้อดีอย่างมากมาเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง มีการสูญเสียที่ต่ำ และมีความสามารถในการให้ความร้อนได้รวดเร็วกว่าเป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้การให้ความร้อนเป็นวิธีเหนี่ยวนำเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในงานอุตสาหกรรมและในชีวิตประจำวัน ในโครงงานนี้จะพูดถึงถึงหนทางในการประหยัดต้นทุน โดยการทำเป็นสองเอาต์พุตโดยใช้อินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว โดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตทำระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ ซึ่งมีโครงสร้างของวงจรที่คล้ายกับอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับแบบ NPC (Neutral-point Clamped Inverter)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของและวิเคราะห์การทำงานของการทำงานของการหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ
2. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์การสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ ในลักษณะการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ของอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตทำระดับแบบเรโซแนนซ์
3. เพื่อศึกษาการปรับกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความถี่ และการปรับมุมเฟสชฟิตที่ดับเบิลยูเอ็ม

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

ในโครงงานนี้จะเป็นการศึกษาหลักการทำงานและสร้างเครื่องอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตทำระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ โดยกำหนดค่าพิกัด 310 V พิกัดกำลังประมาณ 3 kW ความถี่สวิตช์ 48-60 kHz

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน เรียงตามลำดับดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการทำงานของเครื่องอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตทำระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ และการหลอมโลหะด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. จำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตทำระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ด้วยโปรแกรม Cadence[®] OrCAD Capture และตรวจสอบผลที่ได้กับทางทฤษฎี

3. หาพิกัดของอุปกรณ์แต่ละตัว และจัดซื้ออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในโครงการ
4. ดำเนินการสร้างเครื่องอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์
5. สร้างชุดโหลดคือชุดเข้าหาลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ
6. ทำการทดสอบการทำงานของเครื่องอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์กับชุดเข้าหาลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือผลการจำลองหรือไม่
7. สรุปผลการทดลองจากโครงการ

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ระยะเวลาในการดำเนินงาน									
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2. จำลองการทำงานโดยใช้ MATLAB [®] Simulink และ Cadence Orcad Simulink [®]										
3. ออกแบบวงจรและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ										
4. สร้างวงจรจริงตามที่ได้ออกแบบ										
5. ปรับแก้วงจรเพื่อให้มีประสิทธิภาพ										
6. ทดลองและบันทึกผลการทำงาน										
7. สรุปผลงานและนำเสนอโครงการ										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของเครื่องอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ
2. นำเทคโนโลยีนี้ไปพัฒนาการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำในภาคอุตสาหกรรม

1.7 รายละเอียดที่จะทำในโครงการฉบับนี้

ในโครงการฉบับนี้ได้แบ่งรายละเอียดศึกษาและค้นคว้าออกเป็นบท ทั้งหมด 5 บท โดยเริ่มจากพื้นฐานและรายละเอียดของหลักการทำงานควบคู่กันไปพร้อมกันระหว่างทฤษฎีและปฏิบัติซึ่งในทางทฤษฎีจะประกอบไปด้วยหลักการคำนวณและการ Simulation ด้วยโปรแกรมทั้งโปรแกรม MATLAB[®] Simulink และโปรแกรม Cadence[®] OrCAD Capture CIS โดยเนื้อหาต่างๆได้ถูกแบ่งออกเป็นบทต่างๆดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา และความน่าสนใจของโครงการฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับโครงการฉบับนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการทำงาน การออกแบบวงจร และการจำลองระบบ

บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการศึกษาวิจัยอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนียว จำเป็นต้องใช้หลักการทฤษฎีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายๆทฤษฎีมาประกอบเข้าด้วยกัน อันได้แก่ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง การคำนวณและออกแบบอิมพีแดนซ์เพื่อให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ และเทคนิคการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบต่างๆ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Phase-shift pulse width modulation) อีกด้วย รวมถึงการให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนียวนำ ซึ่งหลักการและทฤษฎีที่กล่าวมานั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเข้าใจซึ่งจำเป็นต่อการออกแบบเพื่อสร้างวงจรที่ได้นำเสนอให้มีประสิทธิภาพ

2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ (Neutral-point Clamped Inverter)

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ หรือที่เรียกว่าอินเวอร์เตอร์แบบ NPC (Neutral-point Clamped) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดเช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับคือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (Half-bridge inverter)
2. อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (Full-bridge inverter)
3. อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส (Three-phase inverter)

ในกรณีอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับในแต่ละกึ่งสวิตช์จะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัว แต่ในกรณีของอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับจะประกอบไปด้วยสวิตช์เพียง 2 ตัวเท่านั้น ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 โดยทางด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นจะมีตัวเก็บประจุสองตัวซึ่งมีขนาดเท่ากันต่ออนุกรมกันและจะต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้ากับอินเวอร์เตอร์ ตัวเก็บประจุสองตัวนี้จะเรียกว่า “ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน” เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน คือ $\frac{V_{dc}}{2}$ ซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{dc}) ซึ่งจะส่งผลต่อสวิตช์ภายในวงจรอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากในวงจรแบบสามระดับนั้นสวิตช์ในวงจรจะแบกรับภาระแรงดันในช่วงการหยุดนำกระแสเพียงครั้งเดียวของแรงดันขาเข้าทำให้สามารถลดความเสียหายของตัวสวิตช์ในวงจรได้และยังสามารถลดพิกัดของสวิตช์ลงได้เมื่อเทียบกับวงจรสองระดับ และยังสามารถให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน (THDV : Total harmonics distortion voltage) ต่ำขึ้นเมื่อ

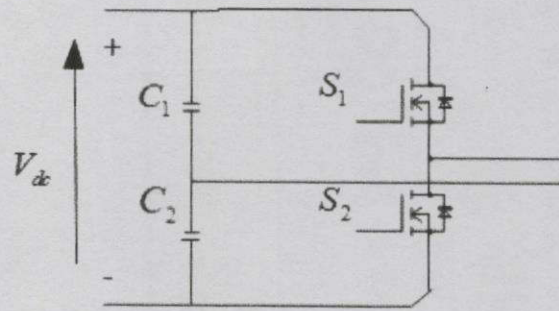
เทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ (Full-bridge inverter) นั้นจะประกอบไปด้วยสวิตช์สองกิ่ง คือ leading - leg และ lagging - leg ซึ่งในแต่ละกิ่งนั้นจะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เช่นเดียวกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์แบบสามระดับ (Half-bridge inverter) แต่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์แบบสามระดับนั้นจะมีเพียงกิ่งเดียว เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่า วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ 2 เท่า จึงมีความเหมาะสมที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีภาระสูงขึ้น ดังนั้นหากต้องการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรให้สูงขึ้น สามารถทำได้โดยนำอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับหรืออินเวอร์เตอร์แบบ NPC ต่อขนานกันให้มีลักษณะเป็นวงจรเต็มบริดจ์หรือวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส ดังรูปที่ 2.4

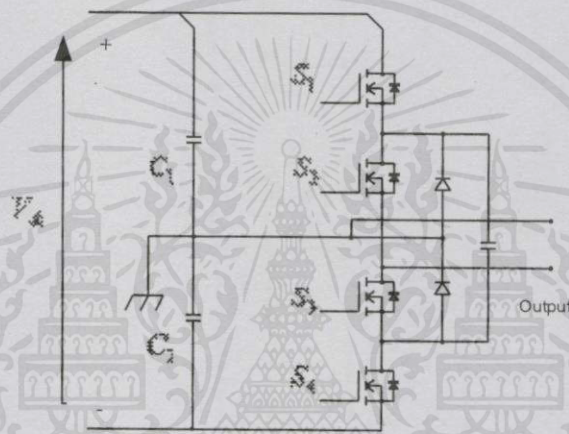
เงื่อนไขที่สำคัญอีกข้อหนึ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นคือการทำงานของสวิตช์ในกิ่งเดียวกันจะต้องไม่ทำงานพร้อมกัน มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกและบัสลบ ซึ่งในทางอุดมคตินั้น เวลาของการสวิตช์ของคู่สวิตช์จะตรงข้าม แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีช่วงเวลาที่มีสวิตช์ทั้งคู่ไม่นำกระแส ซึ่งจะเรียกว่าช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) โดยเดดไทม์จะอยู่ในช่วงเวลาก่อนการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์จากการนำกระแสเป็นช่วงในการไม่นำกระแส หรือ จากช่วงไม่นำกระแสเป็นช่วงนำกระแส ซึ่งวงจรเป็นแบบสามระดับ ซึ่งจะนำมาศึกษาในวิจัยนี้ โดยจะมีการเผื่อช่วงเวลาเดดไทม์ของคู่สวิตช์ ดังรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

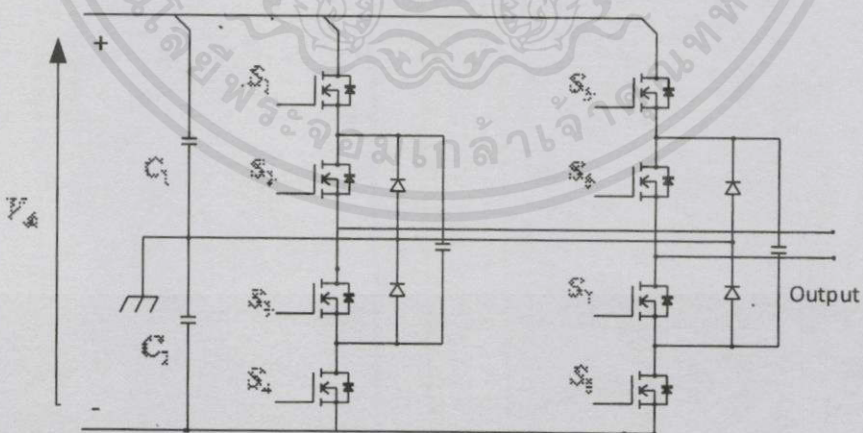
	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ
แรงดันตกคร่อมสวิตช์ ในช่วงของการหยุดนำกระแส	มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์เท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า	มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์เพียงครึ่งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีเพียงสองระดับ	แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีเพียงสามระดับ
จำนวนสวิตช์ต่อกิ่งที่ใช้ในหนึ่งสวิตช์	ใช้สวิตช์ 2 ตัว	ใช้สวิตช์ 4 ตัว
ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ พิกัดเท่ากัน	สูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า เนื่องจากจำนวนสวิตช์น้อยกว่า	สูญเสียกำลังไฟฟ้ามากกว่า



รูปที่ 2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสองระดับ

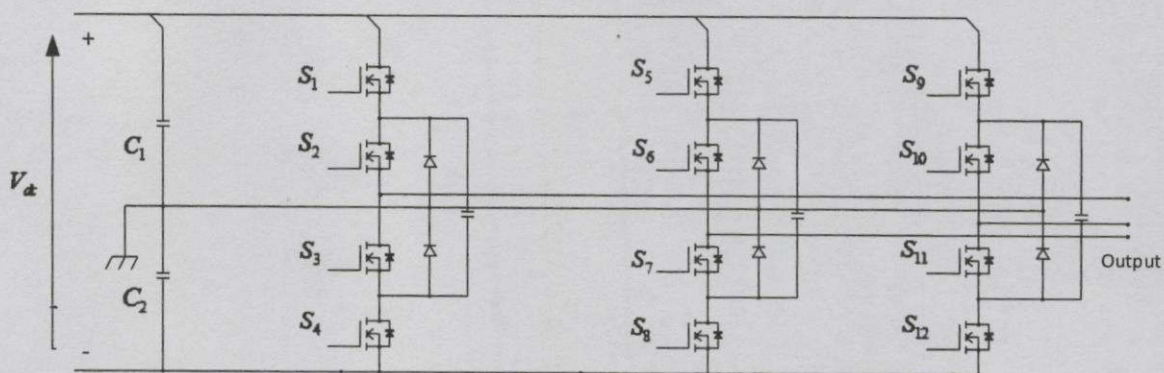


รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบสามระดับ

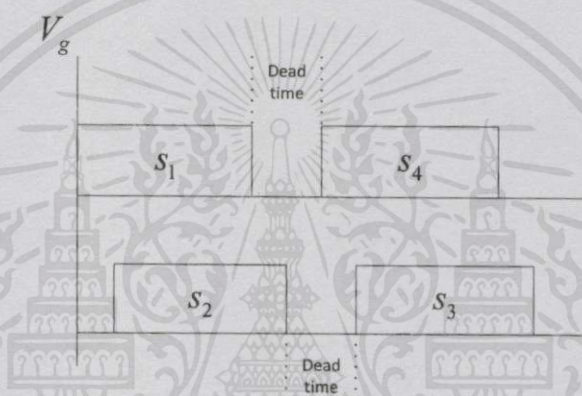


รูปที่ 2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสามระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบสามระดับ



รูปที่ 2.5 ช่วงเวลาเดดไทม์ (Dead time) ของสวิตช์

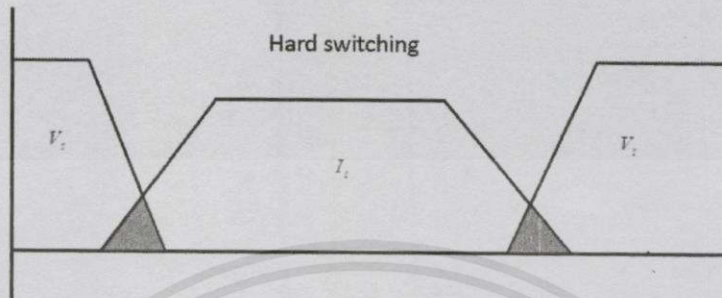
2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แรงดันแบบห้าระดับ

จะอาศัยหลักการการทำงานเหมือนของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ คือโดยปกตินั้นจะได้สัญญาณแรงดันจากแรงดันขาออกระหว่างเฟสกับนิวทรัล แต่คลื่นสัญญาณแรงดันแบบห้าระดับนั้นจะได้จากแรงดันขาออกระหว่างเฟส (Phase to Phase output Voltage)

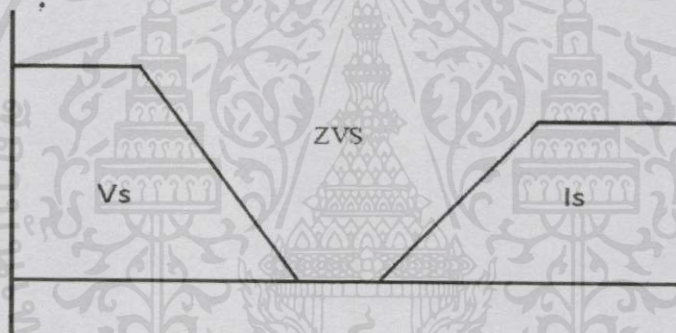
2.4 ทฤษฎีการสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์แบบต่างๆ

ในปัจจุบันนี้ได้มีเทคนิคการสวิตช์ซึ่งหลายวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยเฉพาะอินเวอร์เตอร์กำลังสูง สัญญาณควบคุมโดยส่วนใหญ่จะใช้สัญญาณ พีดีบีเบิลยูเอ็ม แบบธรรมดา และ พีดีบีเบิลยูเอ็ม แบบเลื่อนเฟส เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่โดยเฉพาะวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงนั้นมักจะเกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงระหว่างการสวิตช์ (Switching loss) ซึ่งจะเรียกการสวิตช์ในลักษณะนี้ว่า การสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์ (Hard switching) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเพื่อที่จะลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในช่วงการสวิตช์และเพิ่ม

ประสิทธิภาพวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยการพัฒนาเทคนิคการสวิตช์ ซึ่งเรียกว่าเทคนิคการซอฟต์สวิตช์ (Soft switching) โดยเราจะเริ่มอธิบายการสวิตช์ในลักษณะฮาร์ดสวิตช์ซึ่งก่อนเพื่อเป็นพื้นฐาน สำหรับการสวิตช์แบบ ZVS ต่อไป



รูปที่ 2.6 ลักษณะการสวิตช์แบบฮาร์ดสวิตช์โดยในพื้นที่แรเงาแสดงถึง Switching loss

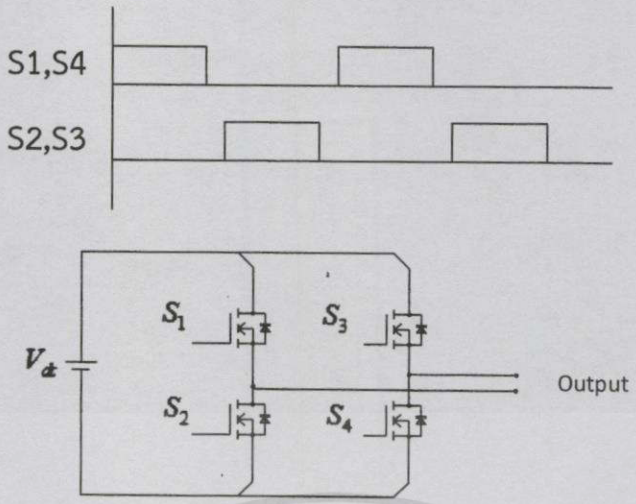


รูปที่ 2.7 ลักษณะการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS)

2.4.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์แบบฮาร์ดสวิตช์

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์แบบฮาร์ดสวิตช์ซึ่งนั้นจะมีการควบคุมด้วยรูปคลื่นพัลส์โดยจะทำงานพร้อมกันเป็นคู่สลับกันไปคือ S_1, S_4 และ S_2, S_3 ซึ่งจะมีเพียงช่วงเดดไทม์ระหว่างคู่เอาไว้มือเพื่อป้องกันการ Shoot - through ในกึ่งเท่านั้น โดยจะมีข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือมีการสูญเสียขณะเปลี่ยนสภาวะระหว่าง Turn on และ Turn off แต่จะมีข้อดีอยู่คือได้พิกัดกำลังเอาท์พุทมาก

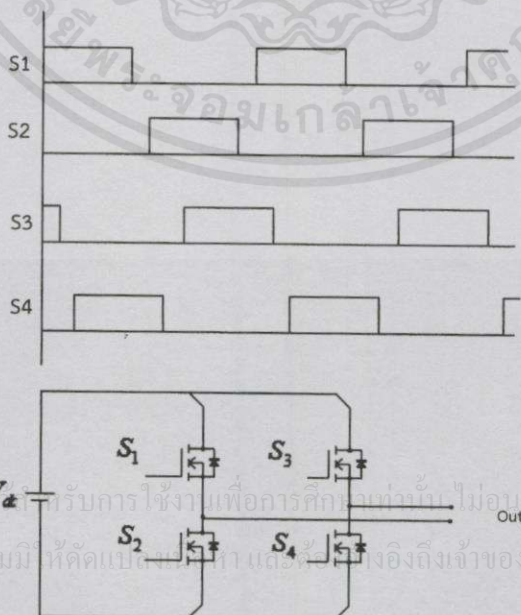
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบฮาร์ดสวิตชิง และสัญญาณควบคุม

2.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVS

โดยลักษณะของการสวิตช์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) นั้นจะเกิดในช่วงระหว่างเริ่มนำกระแส (turn on) สามารถสังเกตได้เมื่อทำการวัดรูปคลื่นแรงดันตกรวมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์จะพบว่า แรงดันตกรวมสวิตช์ตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่กระแสจะเริ่มไหลผ่านสวิตช์ ทำให้ไม่เกิดการช้อนทับกันระหว่างแรงดันและกระแส ดังนั้นจึงไม่เกิดกำลังไฟฟ้ายูสูญเสียในช่วงการเริ่มนำกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ ZVS โดยอินเวอร์เตอร์แบบนี้จะทำงานโดยใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม แบบเลื่อนเฟส แทนสัญญาณควบคุมแบบฮาร์ดสวิตชิง โดยจะมีข้อเสียคือ จะเกิดกระแสไหลวนในอุปกรณ์สวิตช์และหม้อแปลงในช่วงฟรีวีลลิ่ง ทำให้มีการสูญเสียเกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบ ZVS และสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบเทคนิคการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ แบบฮาร์ดสวิตซิง และแบบแรงดันศูนย์ (ZVS)

เทคนิคการสวิตช์	ข้อดี	ข้อเสีย
ฮาร์ดสวิตซิง	1. ได้พิกัดกำลังเอาต์พุตมาก	1. เกิดกำลังสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตช์ 2. อุปกรณ์ต้องทนพิกัดสูง 3. ส่วนการระบายความร้อนมีขนาดใหญ่ 4. ต้นทุนรวมสูง
แบบแรงดันศูนย์ (ZVS)	1. ลดกำลังการสูญเสียขณะเริ่มนำกระแส (turn on) สวิตช์ได้ 2. ราคาต้นทุนต่ำกว่าแบบฮาร์ดสวิตซิง	1. ไม่สามารถลดกำลังการสูญเสียช่วงหยุดนำกระแส (turn off) สวิตช์ได้ 2. กระแสไหลวนในอุปกรณ์สวิตช์และหม้อแปลงช่วงฟรีวิลลิ่งจะมีค่าสูง

จากข้อดี-ข้อเสียต่างๆข้างต้น จึงเลือกที่จะทำแบบแรงดันศูนย์ (ZVS) อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากต้องการลดกำลังสูญเสียในช่วงเริ่มนำกระแส (turn on) ให้ลดลง

2.5 มอสเฟตกำลังและวงจรกับเกต

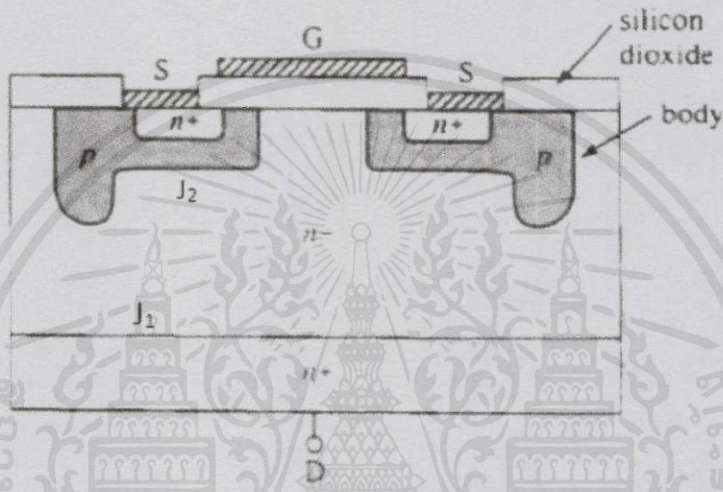
หากจะกล่าวถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานในด้านเพาเวอร์กำลังหรือเพาเวอร์คอนโทรลก็เห็นจะมีอยู่ไม่กี่ชนิด ซึ่งในแต่ละชนิดก็มีข้อจำกัดและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของการนำไปใช้ควบคุมซึ่งการเลือกมอสเฟตจึงเลือกใช้ตามการควบคุม โดยพิจารณาได้จาก กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดัน (I - V characteristic) ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบควรพิจารณา ซึ่งมอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่สูงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 โครงสร้างของมอสเฟต

โครงสร้างของมอสเฟตจะประกอบด้วย

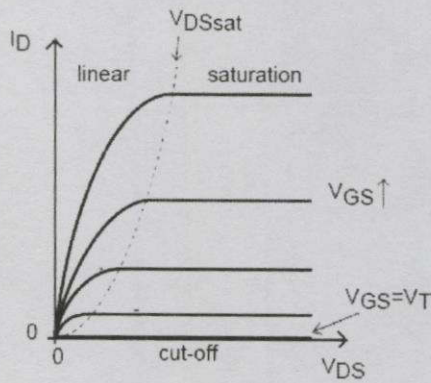
1. เกต (gate) : เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ โดยสร้างให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นสองแผ่นเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้า
2. ซอร์ส (source) : เป็นส่วนขาออกของกระแส
3. เดรน (drain) : เป็นส่วนขาเข้าของกระแส



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟต

จากการที่ขาคเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุทที่ขาคเกต (gate) มีค่าสูงมาก โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 109 โอห์ม จากผลดังกล่าวทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของมอสเฟตมีลักษณะคล้ายกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเดรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาคเกต (gate) กับขาสอร์ส (source) โดยการควบคุมกระแสที่ขานี้เหมือนกับทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 คุณลักษณะระหว่างกระแสและแรงดัน

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่จะเริ่มโค้งที่กระแสเดรนมีค่าต่ำๆ นั่นก็คือจุดที่แรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สต่ำลง ใกล้แรงดันจุดเริ่มเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (จุด threshold voltage : $V_{gs(th)}$) โดยถ้าแรงดันระหว่างขานำกระแส (turn off) หรือตัดออฟ (cut off) ในกรณีนี้ชนิดพีแชนแนลนั้น คุณสมบัติจะคล้ายกับเอ็นแชนแนล แต่โครงสร้างและสัญลักษณ์จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับเอ็นแชนแนล เช่น ชนิดของสารที่กระตุ้นจากเอ็นแชนแนลก็จะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม สัญลักษณ์ลูกศรก็จะกลับเอาหัวลูกศรกลับไปในทางตรงกันข้าม

2.5.2 การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับมอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังเป็นสวิตช์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดัน ทำให้ง่ายต่อการเริ่มนำ (turn on) หรือหยุดนำกระแส (turn off) มอสเฟตกำลังจะนำกระแสก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมขาเกตเทียบกับขาซอร์ส (V_{gs}) มีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม เป็นผลให้มอสเฟตกำลังเข้าสู่การทำงานโหมดโอห์มมิก (ohmic region) โดยทั่วไปแรงดัน V_{gs} ถ้าจะให้ เป็นสวิตช์เริ่มนำกระแสจะมีค่าระหว่าง 10-20 โวลต์ ถ้าเพื่อให้สวิตช์ไม่นำกระแส สามารถทำได้โดยให้แรงดัน V_{gs} มีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม และในขณะที่สวิตช์นำกระแสและไม่นำกระแส กระแสที่ป้อนเข้าขาเกต (gate) จำมีค่าเท่ากับศูนย์ ความเร็วในการสวิตช์ จะหาได้จาก การเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุแฝงด้านขาเข้าของมอสเฟตกำลัง (parasitic input capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงจะต้องทำการสะสมประจุเพื่อให้สวิตช์นำกระแส และต้องการคายประจุเพื่อให้สวิตช์ไม่นำกระแส

2.5.2.1 สภาวะนำกระแส

เมื่อขาเดรน (drain) ได้รับแรงดันไบแอสตรงคือเป็นบวกเทียบกับซอร์ส (source) และแรงดันระหว่างเกต (gate) กับซอร์ส (source) มีค่าเกิน $V_{gs(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกต (gate) จะดึงเอาอิเล็กตรอนให้มารวมกันอยู่ในบริเวณภายใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ (body layer) ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n- (drift region) เข้ากับบริเวณ n+ (source region) กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากขาซอร์ส (source) ผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณลอยเลื่อน n- จะรวมกับโฮล เพราะรอยต่อ ได้รับแรงดันไบแอสตรงทำให้มอสเฟตอยู่ใน

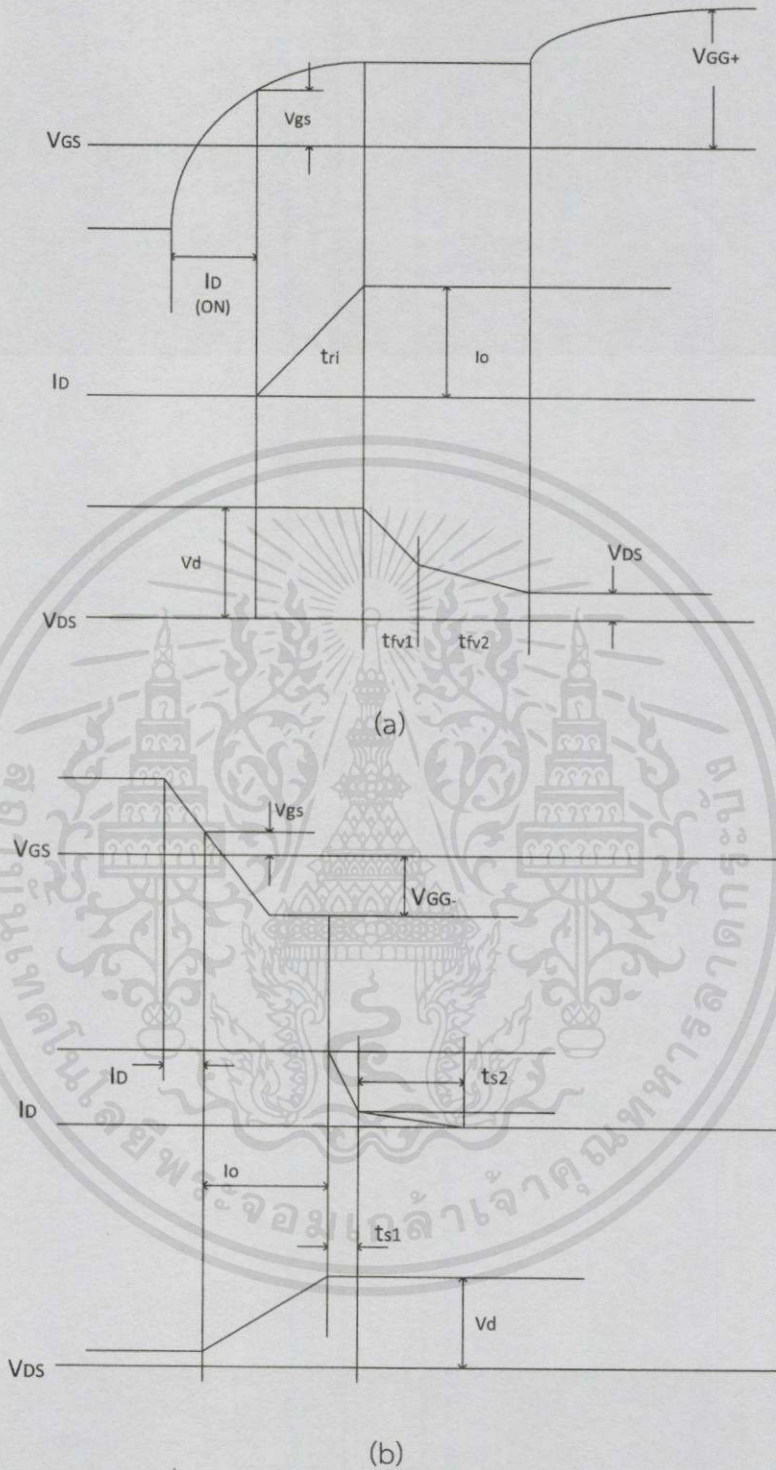
สภาวะนำกระแสเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้ การรวมกันของโฮสและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n- เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (conductivity modulation) ผลของการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n- มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับทรานซิสเตอร์กำลัง ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมที่สภาวะนำกระแสลดลง การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วย ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน และโฮส

2.5.2.2 สภาวะหยุดนำกระแส

เมื่อแรงดันระหว่างเกตและซอร์สลดต่ำกว่าแรงดัน $V_{gs(th)}$ จะทำให้มีแรงดันไม่เพียงพอสำหรับการแปรสภาพชั้นบอดี้ p และ n ได้ ทำให้ n- ไม่ต่อกับบริเวณซอร์ส n+ จึงอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ในสภาวะนี้รอยต่อ J_2 ที่ได้รับแรงดันไบแอสกลับจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ขึ้นที่รอยต่อ J_2 ด้วยบริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายบริเวณกว้างขึ้นจนเกินเข้ามายังบริเวณ n- ที่จะขยายไปยังบริเวณชั้นบอดี้ p ทั้งนี้เพราะชั้นบอดี้ p มีความหนาแน่นในการโด๊ป สารมากกว่า ถ้าความหนาแน่นของสารที่โด๊ปในบริเวณลอยเลื่อน n- มากเพียงพอ ก็จะทำให้การขยายของบริเวณปลอดพาหะ ชั้นบัฟเฟอร์ n+ (buffer layer) ไม่จำเป็นต้องทำให้เกิดขึ้นหรือไม่จำเป็นต้องโด๊ปสาร ทั้งนี้เพราะการแตะกันของบริเวณทั้งสองจะทำให้เกิดการพังทลายทางด้านไบแอสตรง สำหรับมอสเฟตที่ไม่มีสารโด๊ปในชั้นบัฟเฟอร์ n+ นี้จะเรียกว่า แบบสมมาตรทนแรงดันย้อนกลับ (V_{m} หรือ BV_{ds}) สูงพอกับค่าอัตราทนแรงดันไหลตรง (BV_{dss}) เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ การลดความหนาของบริเวณ n- ลงแต่ยังคงความสามารถของอัตราทนแรงดันไหลตรงไว้สามารถทำได้โดยเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n+ เข้าไปและจากการลดความหนาของบริเวณลอยเลื่อน n- ลงจะช่วยส่งผลให้เกิดข้อดีสองประการคือทำให้แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำลง เป็นผลให้การสูญเสียกำลังงานลดน้อยลงด้วยและช่วยลดช่วงเวลาหยุดนำกระแสให้สั้นลงด้วย แต่ข้อเสียของการเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ n+ ก็มี คือจะลดความสามารถของอัตราทนแรงดันย้อนกลับให้น้อยลงเหลือเพียงไม่กี่สิบลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.3 ลักษณะการสวิตช์ของ MOSFET



รูปที่ 2.12 (a) ลักษณะกระแสแรงดันขณะนำกระแส (b) ลักษณะกระแสแรงดันขณะหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

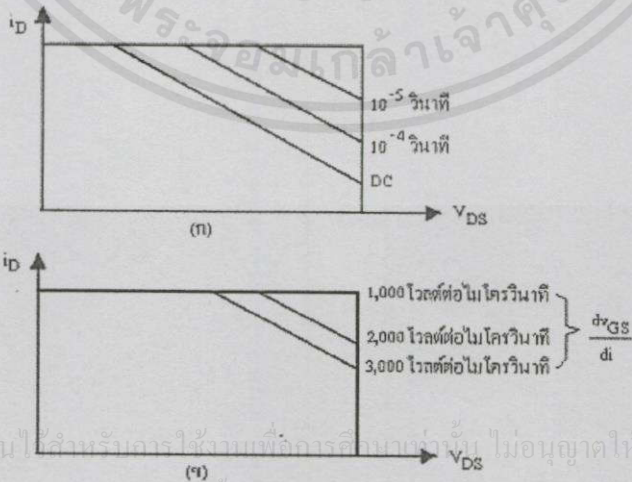
ลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่เกิดการนำกระแสและหยุดนำกระแสแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 โดยช่วงเวลาในการนำกระแสของมอสเฟต แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (a) คือจะมีเวลาก่อนการนำกระแส T_d (on) นับตั้งแต่เวลาที่แรงดันเกิดกับซอร์สอยู่ในช่วง v_{gs-} จนถึง $v_{gs(th)}$ ความจริงแล้วการป้อนแรงดันนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนทันทีทันใดจากค่า v_{gs-} เป็น v_{gs+} แต่กลับมีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล

เหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลการชาร์จประจุของตัวเก็บประจุระหว่างเกตกับซอร์สและเกตกับเดรนภายในมอสเฟต แรงดันที่ขาเดรนจะยังคงอยู่ในช่วงเวลาที่ขาขึ้น (Tri) หรือในช่วงเวลาที่กระแสเดรนยังไม่ถึงค่ากระแสทำงาน (I_o) หลังจากนั้นกระแสเดรนก็จะคงที่ แต่แรงดันจะตกลงสู่ค่า ($V_{ds(on)}$) โดยแบ่งช่วงเวลาลงเป็นสองช่วง คือช่วง T_{fv1} เป็นช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานสูง (R channel) ส่วน T_{fv2} ช่วงที่ทำงานอยู่ในย่านความต้านทานต่ำ (R channel)

ในรูปที่ 2.12 (b) จะเป็นรูปแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันในช่วงเวลาที่มอสเฟตหยุดนำกระแส จะเห็นว่ากระแสเดรนจะยังคงที่อยู่ตลอดเวลาที่แรงดันขาเดรนเพิ่มขึ้น และมีช่วงเวลาลงของกระแสเดรนที่แตกต่างชัดเจนสองช่วง โดยช่วงแรก T_{fv1} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของมอสเฟต และช่วง T_{fv2} จะเป็นช่วงหยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพี ซึ่งจะช้ากว่ามอสเฟต ทำให้ช่วงเวลานี้นานกว่าช่วงแรก และมีการสูญเสียกำลังงานมากในช่วงนี้

2.5.2.4 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยระหว่างนำกระแสและหยุดนำกระแส

พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยทั้งในระหว่างนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยพื้นที่การทำงานปลอดภัยในขณะไบแอสของ (Forward bias safe operating area : FBSOA) ที่กว้างมาก เปรียบเทียบได้กับเกือบเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับเวลาในการสวิตซ์ที่สั้นๆ แต่จะแคบลงเมื่อเวลาในการสวิตซ์ยาวนานขึ้น



รูปที่ 2.13 (ก) พื้นที่ปลอดภัยในสภาวะไบแอส (ข) พื้นที่ปลอดภัยในสภาวะไบแอสกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

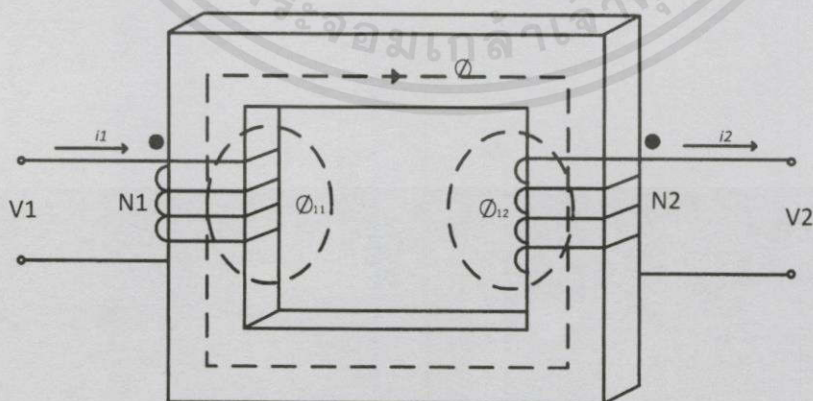
ในช่วงระหว่างเริ่มนำกระแสและขณะที่นำกระแสแล้วจุดการทำงานของมอสเฟตจะต้องมีขนาดแรงดันและกระแสที่ขาเดรนอยู่ในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบแอสตรงเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) หากไม่เช่นนั้นแล้วจะทำให้เกิดการเสียหายขึ้นที่มอสเฟต จากรูปพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของมอสเฟตนี้จะแสดงถึงขีดจำกัดของกระแสเดรน อัตราการทนแรงดันโวลตรงและอุณหภูมิรอยต่อของมอสเฟตตามลำดับ สำหรับพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยในช่วงไบแอสกลับ (Reverse bias safe operating area : RBSOA) จะแตกต่างจากค่าจำกัดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขาเดรนต่อเวลา ($\frac{dv_{ds}}{dt}$) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างหยุดนำกระแสแทนขีดจำกัดทางด้านอุณหภูมิรอยต่อและจะมีพื้นที่แคบลงถ้า $\frac{dv_{ds}}{dt}$ มีค่าสูงมากขึ้น ส่วนเหตุผลที่ถูกจำกัดโดยค่านี้นี้เพราะไม่ต้องการให้เกิดการแลตซ์ขึ้นที่มอสเฟต ค่า $\frac{dv_{ds}}{dt}$ นี้จะมีผลโดยตรงกับช่วงเวลาหยุดนำกระแส หมายความว่าถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วจะทำให้ช่วงเวลาหยุดนำกระแสสั้น แต่ก็ยังถือว่าขีดจำกัด $\frac{dv_{ds}}{dt}$ ของมอสเฟตมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ตัวอื่นๆ ดังนั้นความจำเป็นในการใช้วงจร snubber เพื่อป้องกันการแลตซ์ก็ไม่มีควมจำเป็นต้องใช้ และการควบคุมค่า $\frac{dv_{ds}}{dt}$ ที่เกิดขึ้นยังทำได้ง่ายขึ้นด้วยการออกแบบวงจรขั้วเบสที่มีค่าความต้านทานที่ต่อกับขาเบสและค่า V_{gs} ที่เหมาะสม

2.6 หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็ก

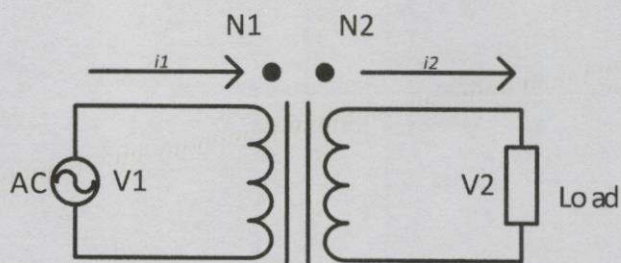
อุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้ในการทำงานนี้ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (High frequency transformer) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

2.6.1.1 ทฤษฎีพื้นฐานหม้อแปลงไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 หม้อแปลงไฟฟ้า และวงจรสมมูลทางอุดมคติ

หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดทองแดงสองขดพันรอบแกนแม่เหล็กโดยที่ขดลวดทองแดงด้านที่รับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะเรียกว่า “ขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ” ในขณะที่ขดลวดทองแดงที่ต่ออยู่กับด้านโหลดจะเรียกว่า “ขดลวดทองแดงด้านทุติยภูมิ” นอกจากนี้การถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากด้านแหล่งจ่ายไปยังโหลดจะอาศัยสนามแม่เหล็กเป็นตัวกลางในการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้างกล่าวจากรูปที่ 2.14 สามารถเขียนสมการวงจรแม่เหล็กได้เป็น $N_1 i_1 - \phi R = N_2 i_2$ โดยกำหนดให้ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability: μ) มีค่ามากเพียงพอ ซึ่งกรณีหม้อแปลงในอุดมคติจะมีค่าเท่ากับค่าอนันต์ จะเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก ($R \approx 0$) ทำให้ได้ว่า $N_1 i_1 = N_2 i_2$ และจากกฎของฟาราเดย์จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดปฐมภูมิเท่ากับ $V_1 = e_1 = (d\phi / dt) N_1$ และเนื่องจากที่ขดทุติยภูมิ เส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นตัวเดียวกับที่ขดปฐมภูมิ ดังนั้นจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดทุติยภูมิเท่ากับ $V_2 = e_2 = (d\phi / dt) N_2$ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติคือ

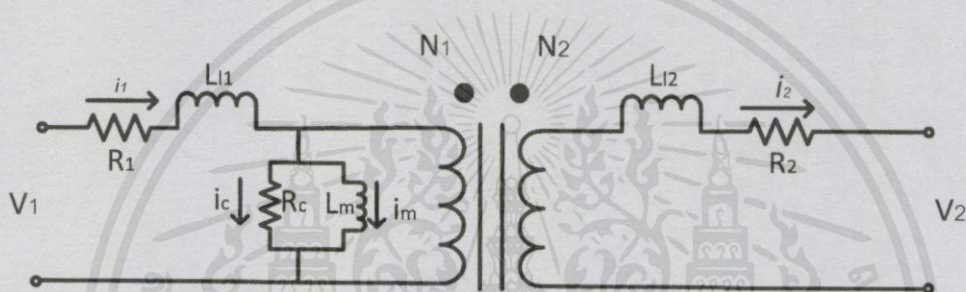
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1}, (\frac{d\phi}{dt} \neq 0) \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงในอุดมคติต้องมีค่าอนุพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กต่อเวลาไม่เท่ากับศูนย์ กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับไฟฟ้าด้านออกซึ่งหมายความว่าไม่มีการสูญเสีย ค่าของกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ด้วยการเปลี่ยนอัตราส่วนจนวนรอบในการพันขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิต่อด้านทุติยภูมิ (turn ratio)

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถละทิ้งค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance: R) ได้กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านขดปฐมภูมิถึงแม้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิจะเป็นศูนย์ก็ตาม และเมื่อกำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิเป็นศูนย์จะได้ค่าความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก (magnetizing inductance: L_m) มีค่าเท่ากับ $L_m = N_1^2 / R$ และเนื่องจากในทางปฏิบัติค่าความซึมซาบได้ของแกนแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เท่ากับอนันต์เหมือนกับกรณีอุดมคติ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนจะไม่ไหลผ่านแกนแม่เหล็กแต่จะไหลวนผ่านอากาศแทน ดังนั้นที่ขดปฐมภูมิจะได้เส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ

$\phi = \phi_{11} + \phi$ โดยที่ ϕ_{11} คือเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วผ่านอากาศ ในขณะที่ ϕ คือเส้นแรงแม่เหล็กที่ไหลผ่านแกนแม่เหล็กและตัดผ่านขดลวดทองแดงทุติยภูมิ ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรั่วด้านปฐมภูมิเท่ากับ $L_{11} = N_1^2 / \mathcal{R}_{leak}$ ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิก็จะหาได้ในทำนองเดียวกัน

นอกจากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจะแทนด้วยสัญลักษณ์ตัวต้านทานในวงจรสมมูล โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงที่ใช้พันรอบแกนแม่เหล็กจะแทนด้วยค่าความต้านทาน ได้แก่ R_1 แทนความต้านทานขดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิและ R_2 แทนความต้านทานขดลวดทองแดงด้านทุติยภูมิซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวดทองแดง อุณหภูมิ และความถี่ในการใช้งาน ในขณะที่ตัวต้านทาน R_c แทนค่ากำลังการสูญเสียในแกน (core loss) ซึ่งวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติดังรูปที่ 2.15

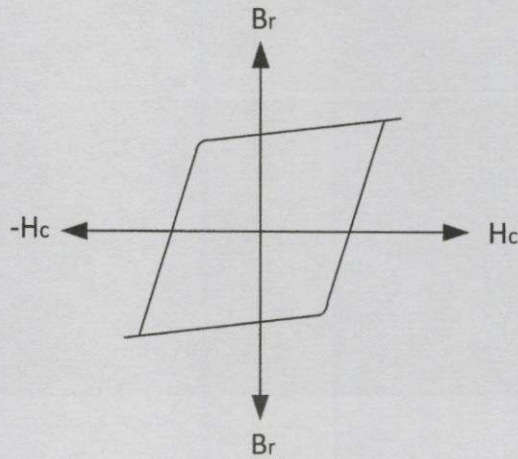


รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติ

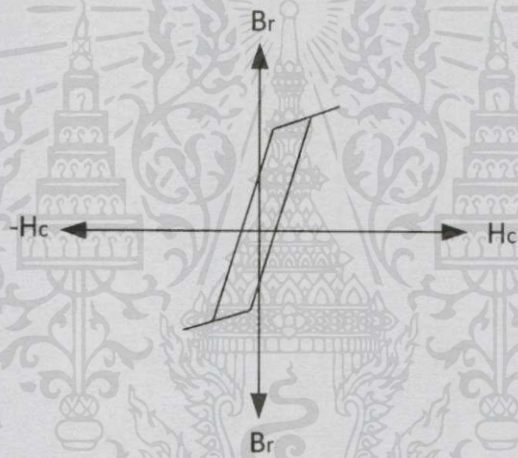
2.6.1.2 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงก็คือ จะต้องมีความซึมซาบแม่เหล็กได้สูง เพื่อลดค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลและเพื่อให้ค่ากระแสกระตุ้นสนามเหล็ก (Magnetizing current) มีค่าน้อยที่สุด รวมถึงต้องทำให้มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าน้อย โดยที่สารแม่เหล็กที่นิยมใช้ทำเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องแสดงกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก (B-H curve) ให้มีลักษณะแคบเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ซึ่งโดยทั่วไปที่ความถี่ในช่วงกิโลเฮิร์ตซ์ถึงเมกะเฮิร์ตซ์จะใช้แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงรอบฮิสเตอร์ิซิสสำหรับทำแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 2.17 วงรอบฮิสเตอร์ิซิสสำหรับทำหม้อแปลงไฟฟ้า

2.6.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงด้วยวิธีผลคูณพื้นที่ (High-Frequency Transformer Design Using Area Product Design)

หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กพื้นฐานที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง เป็นต้น โดยจะกล่าวถึงการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง และด้วยหลักการเดียวกันก็จะสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงสำหรับงานอื่นๆได้ โดยทั่วไปแล้ว ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะนิยมใช้วิธีผลคูณพื้นที่ (area product) ซึ่งนิยามไว้ในสมการดังนี้

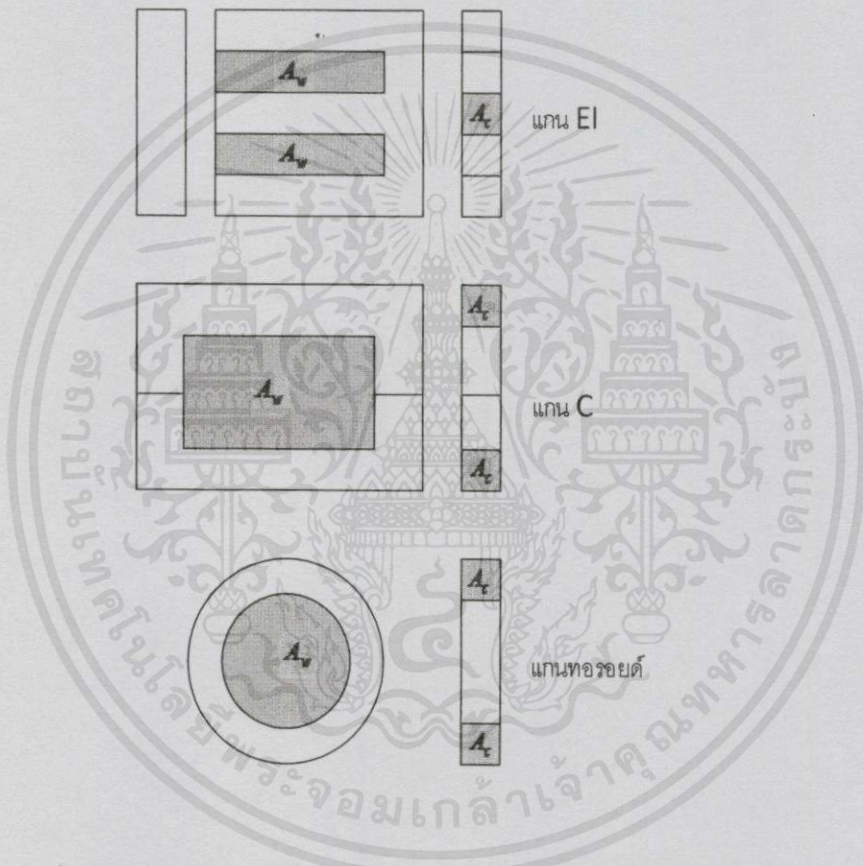
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า มีอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Area product } (A_p) = \text{core cross section } (A_c) \times \text{window area } (A_w) \quad (2.2)$$

เมื่อ (A_c) หมายถึง พื้นที่หน้าตัดแกน (core cross section area)

(A_w) หมายถึง พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน (window area)

เมื่อนิยาม (A_c) และ (A_w) ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างนิยาม (A_c) และ (A_w) สำหรับแกนแม่เหล็กแบบต่างๆ

จากสมการแรงดันเหนี่ยวนำย้อนกลับของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $E_{rms} = K_f \cdot E_{av} = 4K_f \cdot f \cdot B_m \cdot A_c$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.3) ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ K_f มีค่า 1 สำหรับกรณีรูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม

K_f มีค่า 1.11 สำหรับกรณีรูปคลื่นแรงดันไซน์

N หมายถึง จำนวนรอบขดลวด

f หมายถึง ความถี่ (Hz)

B_m หมายถึง ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (wb/m^2)

A_c หมายถึง พื้นที่หน้าตัดแกน (m^2)

จะได้ค่าจำนวนรอบด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าเท่ากับ

จะได้

$$N_1 = \frac{E_1}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f}$$

และ

$$N_2 = \frac{E_2}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.4)$$

และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมีค่าเท่ากับ

$$I = J \cdot a_{wire} \quad (2.5)$$

โดยที่ J หมายถึง ความหนาแน่นกระแส (A/m^2)

a_{wire} หมายถึง พื้นที่หน้าตัดตัวนำซึ่งกระแสไหลผ่าน (m^2)

N_1 หมายถึง จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

N_2 หมายถึง จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

โดยกำหนดให้ขดลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ (N_1) มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ a_1 และขดลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ (N_2) มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ a_2 ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมด จะมีค่าเท่ากับ $N_1 a_1 + N_2 a_2$ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทั้งหมดควรจะพอดีกับพื้นที่หน้าต่าง (window area : K_w) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ขดลวดไม่ได้ประกอบด้วยตัวนำเท่านั้น แต่จะ

ประกอบด้วยอย่างอื่นอีก เช่น ฉนวนของขดลวดกระตาศฉนวนระหว่างขดลวดและช่องว่างอากาศเพื่อระบายความร้อนเป็นต้น และถ้า K_w หมายถึง ขีดจำกัดของหน้าต่าง (window utilization) ซึ่งเป็นแฟคเตอร์ที่ใช้ในการชดเชยผลดังกล่าวและโดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K_w \cdot A_w = N_1 \cdot a_1 + N_2 \cdot a_2 \quad (2.6)$$

เมื่อแทนค่า $a_{wire} = I/J$ ลงในสมการที่ (2.6) จะได้ว่า

$$K_w \cdot A_w \cdot J = N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 \quad (2.7)$$

โดยที่ I_1 หมายถึง ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสปฐมภูมิ (A)

I_2 หมายถึง ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสทุติยภูมิ (A)

แทนค่า N_1 และ N_2 ในสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.7) จะได้

$$K_w \cdot A_w \cdot J = \frac{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2}{4K_f \cdot A_c \cdot B_m \cdot f} \quad (2.8)$$

และ

$$A_p = A_w \cdot A_c = \frac{E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2}{4K_f \cdot K_w \cdot B_m \cdot f \cdot J} \quad (2.9)$$

เมื่อ K_f หมายถึง form factor (มีค่าเท่ากับ 1.11 สำหรับรูปคลื่นสัญญาณไซน์และเท่ากับ 1 สำหรับ รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม)

K_w หมายถึง ขีดจำกัดของหน้าต่าง (window utilization)

ซึ่งโดยทั่วไปในทางปฏิบัติจะกำหนดให้ค่า K_w มีค่าประมาณ 0.3 – 0.6 และค่าความหนาแน่นกระแส (J) มีค่าประมาณ 3 – 5 A/m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการเลือกแกนแม่เหล็กให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำได้โดยการคำนวณหาค่า A_p จากสมการที่ (2.9) เพื่อเปรียบเทียบค่า A_p ที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิตจากนั้นทำการเลือกแกนเหล็กที่มีค่า A_p ให้มากกว่า A_p ที่ได้จากการคำนวณ

การเลือกเบอร์ของลวดตัวนำ จะหาได้จากการคำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ (A_w) โดยที่จะเลือกค่า A_w ให้มีขนาดที่มากกว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณ โดยที่เลือกกรรมของลวดตัวนำให้มีค่าน้อยกว่าความลึกผิวของลวดตัวนำ (skin depth) ที่ความถี่สูงสุดที่ใช้งาน โดยที่จะคิดได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\delta_{(m)} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (2.10)$$

โดยที่	$\delta_{(m)}$	หมายถึง ความลึกเชิงผิวของลวดตัวนำ
	ρ	หมายถึง สภาพต้านทานของลวดตัวนำ ($\Omega \cdot m$)
	μ	หมายถึง ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ($\mu = \mu_r \cdot \mu_0$)
	ω	หมายถึง ความถี่เชิงมุม ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$)

2.7 ทฤษฎีกำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้า คือ พลังงานไฟฟ้าที่ไหลหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าใช้ในเวลา 1 วินาที ในการทำให้เกิดพลังงานหรือการสูญเสียพลังงานไป ในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานแสงสว่าง พลังงานกล เป็นต้น

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับมีกำลังไฟฟ้า 3 ชนิด (3 หน่วย) มีรายละเอียดดังนี้

Average Power (P) หรือ Real Power หน่วยเป็น Watt

$$P = I \cdot V \cos \theta \quad (2.11)$$

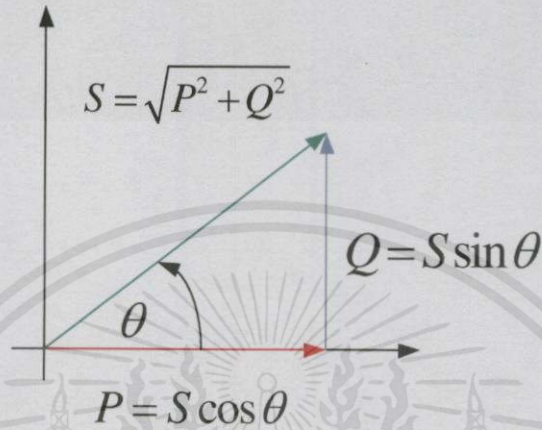
Reactive Power (Q) หน่วยเป็น Var

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$Q = I \cdot V \sin \theta \quad (2.12)$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Apparent Power (S) หน่วยเป็น VA

$$S = V \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.19 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า

θ คือมุมระหว่าง V กับ I ไม่เจาะจงว่า Lead หรือ Lag เป็นมุมเดียวกับ θ ในสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า เรียกค่า $\cos \theta$ ว่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) หรือ PF ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยจะแสดงได้ว่ายิ่งมุม θ มีค่าน้อยหรือค่าตัวประกอบกำลังมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่า P (Average power) มีค่ามากขึ้น

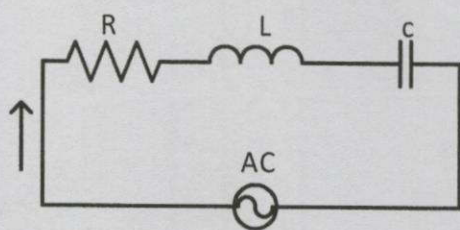
2.8 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

วงจรไฟฟ้าที่เกิดสภาวะเรโซแนนซ์หรือวงจรไฟฟ้าที่เรียกว่า วงจรเรโซแนนซ์ นั้นจะหมายถึงวงจรที่มีกระแสที่ไหลในวงจรเกิดอินเฟสกับแรงดัน ที่จ่ายให้กับวงจรมานั้น ดังนั้นในขณะเกิดเรโซแนนท์ค่าอิมพีแดนซ์เทียบเท่าภายในวงจรจะเหลือแต่ค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ภายในวงจรจะหักล้างกันหมดไป และเนื่องจากกระแสกับแรงดันที่เกิดอินเฟสกันจะทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของวงจรเรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับหนึ่ง เมื่อพิจารณาวงจร RLC อนุกรมตามรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรคือ Z จะมีค่าเท่ากับ

$$Z = R + j\omega L - j1/\omega C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $= R + j(\omega L - 1/\omega C)$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= R + jX \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.20 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

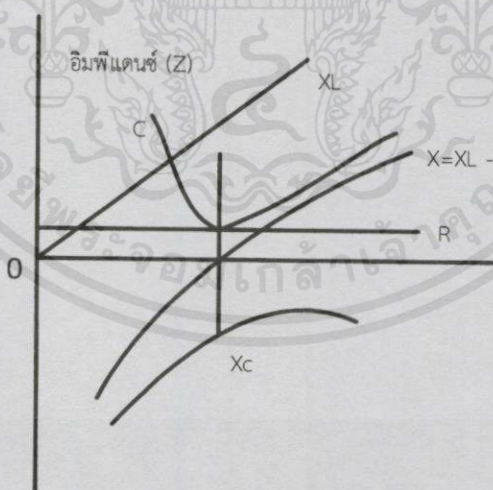
เมื่อเกิดภาวะเรโซแนนซ์จะได้ $X = 0$ นั่นคือ $\omega L = 1/\omega C$ หรือ $\omega^2 = 1/LC$ หรือ $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

ความถี่เรโซแนนซ์จะมีความถี่ดังสมการ

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_r \quad (2.15)$$

ซึ่งจะได้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.21 กราฟของอิมพีแดนซ์ Z

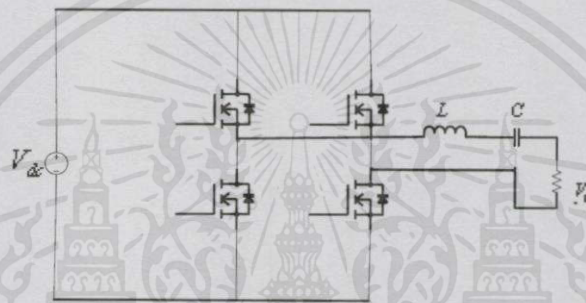
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ในรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นถึงกราฟของอิมพีแดนซ์ โดยพล็อตในฟังก์ชันของ ω และที่ $\omega = \omega_r$ จะเห็นได้ว่าค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ จะเกิดภาวะเรโซแนนซ์จะได้อิมพีแดนซ์ของวงจรน้อยที่สุด เพราะฉะนั้นจะได้กระแสไหลในวงจรมากที่สุด จากพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

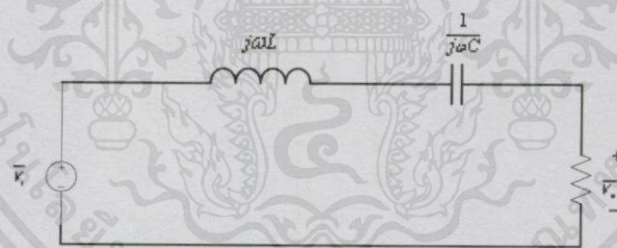
การควบคุมกำลังไฟฟ้าจะทำได้โดยการลดแรงดันที่ป้อนให้วงจรหรือเลื่อนความถี่การใช้งานให้ต่ำกว่าหรือสูงกว่าตำแหน่งเรโซแนนซ์

2.9 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

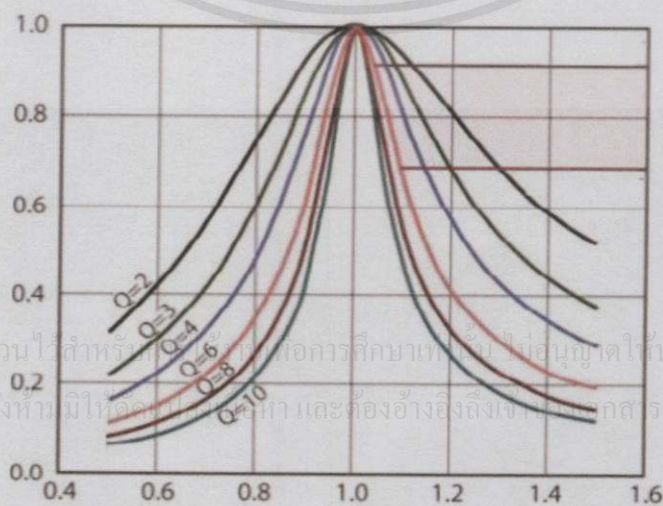
อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (DC-to-AC คอนเวอร์เตอร์) ในอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะถูกต่อแบบอนุกรมกับโหลดตัวต้านทาน อินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันรูปสี่เหลี่ยม ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะถูกใช้งานร่วมกัน โดยจะเลือกทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งเป็นความถี่เดียวกันกับความถี่สวิตช์



(ก)



(ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega_s}{\omega_o} = \frac{f_s}{f_o}$$

(ค)

รูปที่ 2.22 (ก) วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (ข) วงจรสมมูลของการอนุกรม RLC (ค) การตอบสนองที่ความถี่ปกติ

การวิเคราะห์เริ่มจากการพิจารณาการตอบสนองความถี่ของ วงจร RLC ค่ายอดของแรงดันขาเข้า และขาออก โดยจะถูกกำหนดจาก

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

โดยความถี่เรโซแนนซ์หาได้จาก

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

หรือ

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุไม่ส่งผล และโหลดจะเสมือนว่ามีเพียงความต้านทาน ถ้าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่ความถี่ f_o LC ที่ทำงานร่วมกันจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรองส่งผ่านความถี่มูลฐาน และลดทอนค่าฮาร์มอนิก ถ้าค่าฮาร์มอนิกอันดับที่สาม และลำดับที่สูงกว่าของอินเวอร์เตอร์ถูกกำจัด แรงดันที่ตกคร่อมโหลดความต้านทานจะเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่มูลฐานของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

ค่ายอดของแรงดันที่ความถี่มูลฐานรูปสี่เหลี่ยมของ $\pm V_{dc}$ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่า การตอบสนองความถี่ของตัวกรองสามารถแสดงได้ในเชิงของแบนด์วิธซึ่งเป็นลักษณะของ Quality

factor : Q

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (5)$$

จากสมการที่(1) สามารถแสดงในเทอมของ ω_0 และ Q ได้ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2((\omega/\omega_0)-(\omega_0/\omega))^2}}$$

แรงดันที่ตกคร่อมโพลิตัวต้านทานถูกลดโดยการเพิ่มของ Quality factor : Q ในตัวกรอง การเพิ่มค่าของตัวนำ และการลดค่าของตัวเก็บประจุจะทำให้ค่า Quality factor : Q เพิ่มขึ้น

2.9.1 การสูญเสียในการสวิตช์

ถ้าทำการสวิตช์ที่ความถี่เรโซแนนซ์และค่าของควอลิตี้แฟกเตอร์ Q ในวงจรมีค่าสูง สวิตช์ทำงานเมื่อกระแสของโพลิตัวต้านทานหรือเข้าใกล้ศูนย์ สิ่งนี้เป็นสิ่งสำคัญเพราะพลังงานที่สูญเสียโดยสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์นั้นจะน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์ที่ไม่ใช่แบบเรโซแนนซ์

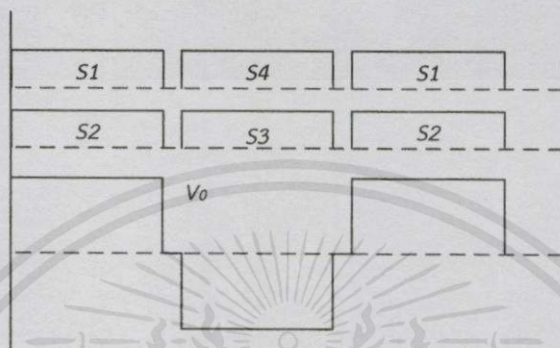
2.9.2 การควบคุมค่ายอด

ถ้าความถี่ของแรงดันโพลิตัวต้านทานไม่วิกฤต ค่ายอดของความถี่มูลฐานที่ตกคร่อมโพลิตัวต้านทานสามารถควบคุมได้โดยการเลื่อนความถี่สวิตช์ออกจากความถี่เรโซแนนซ์ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากโพลิตัวต้านทานถูกควบคุมโดยความถี่สวิตช์ซึ่ง การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำเป็นการประยุกต์ใช้ ความถี่สวิตช์ควรจะถูกเลื่อนให้สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ แทนที่จะต่ำกว่าเมื่อควบคุมเอาท์พุท การสวิตช์ที่ความถี่สูงกว่านำมาซึ่งฮาร์โมนิกของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่สูงกว่าต้องเพิ่มประสิทธิภาพของตัวกรองเพื่อกำจัด ในทางตรงกันข้ามการเลื่อนความถี่ให้ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์นำมาซึ่งฮาร์โมนิกโดยเฉพาะฮาร์โมนิกอันดับสาม ยิ่งใกล้ความถี่เรโซแนนซ์จะยิ่งเป็นการเพิ่มค่ายอดของเอาท์พุท

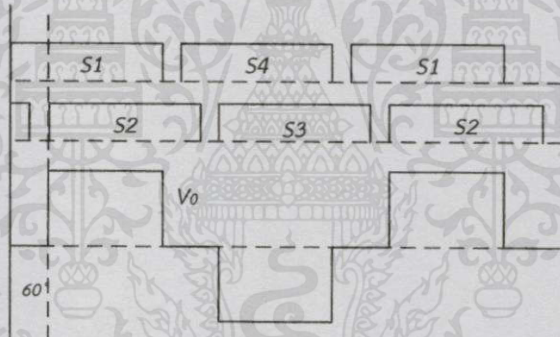
2.10 วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟส

การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถทำได้โดยการปรับกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดีบีแอลเอ็ม ซึ่งการปรับมุมเลื่อนเฟส (phase shift angle) ระหว่างสวิตช์วงในและสวิตช์วงนอกนี้จะทำให้แรงดันเอาท์พุทของวงจรอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้กำลังไฟฟ้านำเข้าของวงจรมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ด้วยกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังรูป

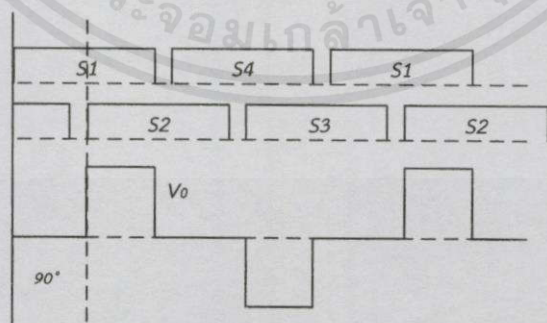
2.23 (ก) และเมื่อทำการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณให้มีมามีค่าที่มากขึ้นเป็น 60 และ 90 องศา ตามลำดับ ดังรูป 2.23 (ข) และ 2.23 (ค) ตามลำดับ ก็จะทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต อินเวอร์เตอร์ลดน้อยลง ทำให้กระแสเอาต์พุตน้อยลงไปด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์ จึงมีค่าน้อยลงเมื่อปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณมากขึ้น



(ก)



(ข)



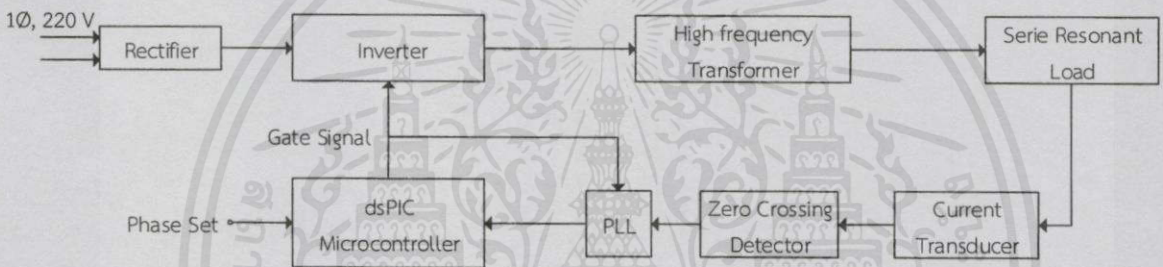
(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.23 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีมุมเลื่อนเฟสต่างๆ (ก) 0 องศา (ข) 60 องศา (ค) 90 องศา

(ค) 90 องศา

2.11 การควบคุมโดยวิธีการล็อกมูมเฟส (Phase Lock-loop)

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการควบคุมมูมต่างเฟสอย่างง่ายสำหรับเครื่องหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำโดยใช้ dsPIC ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ โดยความถี่ในการทำงานของสวิตช์จะถูกเปลี่ยนแปลงอย่างอัตโนมัติตามความถี่เรโซแนนซ์ในวงจรที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะใช้ความสามารถทางด้านซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยเพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนของวงจรแบบอนาล็อกรวมทั้งลดขนาดและจำนวนอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ ของวงจร โดยในการทำงาน จะควบคุมมูมต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันที่ค่ามูมต่างเฟสใดๆที่ตลอดการทำงานโดยที่สวิตช์จะทำงานด้วยความถี่ใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์เสมอ โดยค่ากำลังเอาต์พุตสูงสุดจะอยู่ที่มูมต่างเฟสเท่ากับศูนย์องศาและกำลังจะลดลงเมื่อมูมต่างเฟสเพิ่มขึ้น (ในงานวิจัยใช้ค่าสุดที่ 10 องศาเพื่อความปลอดภัย)



รูปที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบทั้งหมดของการให้ความร้อน แบบเหนี่ยวนำและการควบคุม

2.12 การให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำ

การให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำเป็นการให้ความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การถ่ายเทพลังงานผ่านสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นในโลหะ โดยสามารถใช้กับกระบวนการให้ความร้อนในลักษณะต่างๆได้แก่ การให้ความร้อนโลหะทั้งชิ้น การให้ความร้อนเฉพาะผิวโลหะ และการหลอมโลหะ

การหลอมโลหะโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำอาศัยหลักการเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ทำงานโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายผ่านขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งพันอยู่รอบๆเบ้าหลอม โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด จะเหนี่ยวนำกับตัวเบ้าแกรไฟต์ซึ่งมีคุณสมบัติ ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) โดยตามทฤษฎีแล้ววัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไดอะแมกเนติกนั้น เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านจะทำให้เกิดไหลวน (Eddy current) ในขนาดที่มากกว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นพาราแมกเนติก (Paramagnetic) และเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ซึ่งกระแสไหลวนนี้เองจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเบ้าหลอม

การเหนี่ยวนำจากขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลวนในทิศทางกันข้ามกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่เข้าหลอม โดยตัวเข้าหลอมจะมีค่าความต้านทานทำให้เกิดเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปของความร้อนดังสมการที่ 2.17 ซึ่งจะนำความร้อนนี้ไปใช้ในการหลอมโลหะ

$$P = \frac{\pi^2 K^2 W^2 B_{\max}^2 f^2 \times 10^{-16}}{8\rho(K^2 + 1)} \quad (2.17)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss): Watt

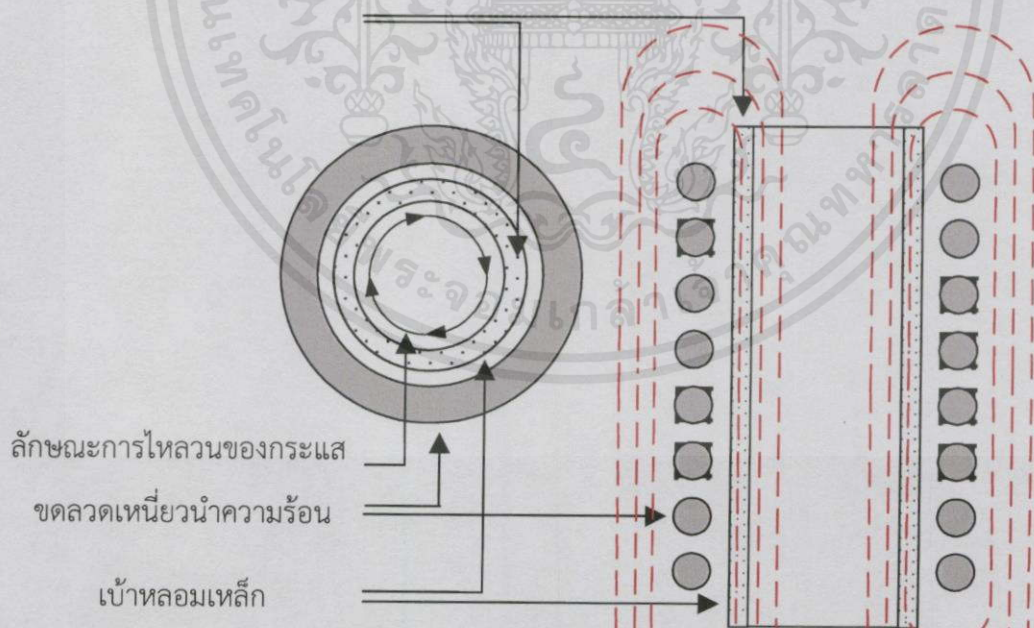
K = ค่าคงที่ของรูปร่างแรงดันที่ป้อนไหล

W = ความกว้างของการพันขดลวด: cm

B_{\max} = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก: Tesla

f = ความถี่: Hz

ρ = สภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงาน: Ω/cm

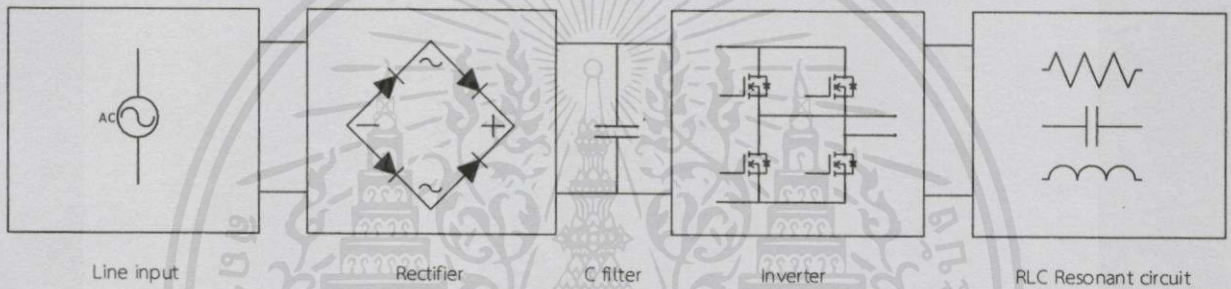


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.25 การเกิดกระแสไหลวนที่เข้าหลอม

2.13 รูปแบบการทำงานของการทำงานให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์ในงานการให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำจะมีหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยอินเวอร์เตอร์ที่มีการใช้งานในทางอุตสาหกรรมจะมีอยู่หลายรูปแบบแตกต่างกันตามแต่ละผู้ผลิตซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าออกได้เป็น 2 แบบคือแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Fed) และแหล่งจ่ายกระแส (Current Fed) และสามารถแบ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนของวงจรออกได้อีกหลายรูปแบบทั้งในส่วนของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง, รูปแบบของการควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์และลักษณะการต่อวงจร เรโซแนนซ์ ซึ่งลักษณะของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปสามารถเขียนได้ดังรูป 2.26 ซึ่งจะมี ส่วนประกอบสำคัญด้วยกันดังนี้คือ Rectifier , C Filter , Inverter และ RLC Resonant ตามลำดับ สำหรับ Line input คือแหล่งจ่ายกระแสสลับจากการไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ



รูปที่ 2.26 โครงสร้างโดยทั่วไปของแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความร้อน

2.14 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้ ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับความแตกต่างและข้อเปรียบเทียบระหว่างคุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับและวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับเพื่อจะนำไปกล่าวถึงวงจรอินเวอร์เตอร์ห้าระดับซึ่งจะพบว่าสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับจะมีแรงดันตกคร่อมในช่วงของการหยุดนำกระแสเพียงครึ่งเดียวของแรงดันขาเข้าซึ่งทำให้มีความปลอดภัยต่อสวิตช์มากกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับและยังสามารถลดค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของแรงดันได้เหลือน้อยกว่า ทฤษฎีการสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์แบบต่างๆ โดยโครงงานนี้จะใช้การสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์แบบแรงดันศูนย์ (ZVS) และจะมีอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์คือมอสเฟตกำลัง โดยโครงงานนี้ยังได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์แม่เหล็กที่ใช้ในวงจร ทั้งหลักการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง การเลือกขดลวดตัวนำเพื่อนำไปใช้ในการพันหม้อแปลง และการทำให้วงจรเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการให้ความร้อนโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำซึ่งความร้อนที่ได้นั้นเกิดจากการเหนี่ยวนำจากขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลวน อีกทั้งยังอธิบายถึงการปรับกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มอีกด้วย

บทที่ 3

หลักการทํางาน และการออกแบบวงจร

3.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงหลักการทํางาน และการออกแบบของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ ซึ่งจะใช้โครงสร้างแบบเดียวกันกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ โดยวงจรที่จะได้นำเสนอนั้นจะประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับชนิด NPC (Neutral-point Clamped) จำนวน 3 กิ่ง แต่ละกิ่งจะประกอบไปด้วยสวิตช์ซึ่งใช้เป็นมอสเฟต (MOSFET) จำนวน 4 ตัว โดยมอสเฟตที่ใช้นั้นจะต้องมีไดโอด และตัวเก็บประจุแฝงอยู่ในเพื่อใช้ในการลดค่ากระแสสุดท้ายภายในตัวสวิตช์ โดยที่สวิตช์วงนอกอันได้แก่ S_1, S_4, S_5, S_8, S_9 และ S_{12} ซึ่งจะทํางานภายใต้เงื่อนไขแรงดันเป็นศูนย์ (ZVS) ส่วนสวิตช์วงในอันได้แก่ $S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10}$ และ S_{11} ด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์จะมีตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน (C_{dc1} และ C_{dc2}) เพื่อทำให้เกิดความเป็นสามระดับของแรงดันเอาต์พุตเทียบกับจุดนิวทรัล (Neutral point) ของอินเวอร์เตอร์ ทั้งนี้แรงดันเอาต์พุตแบบห้าระดับจะเกิดขึ้นจากแรงดันเอาต์พุตระหว่างเฟสของอินเวอร์เตอร์ (Phase to phase output voltage) ซึ่งจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ และในบทนี้จะได้แสดงถึงการจำลองการทํางานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วย

3.2 หลักการทํางานของวงจร

หลักการทํางานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำนั้น จะเป็นการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแบ่งแรงดันเป็นสามระดับด้วยตัวเก็บประจุสองตัว (C_{dc1} และ C_{dc2}) ที่ต่ออนุกรมกันจากนั้นรูปคลื่นที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสห้าระดับ และรูปคลื่นที่ได้จะถูกลดทอนระดับแรงดันลงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงโดยมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมอยู่เพื่อให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series-resonant) จากนั้นจึงนำมาจ่ายโหลดที่เป็นเข้าลอมซึ่งมีลักษณะทางไฟฟ้าเสมือนกับวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกันอยู่ (R-L circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



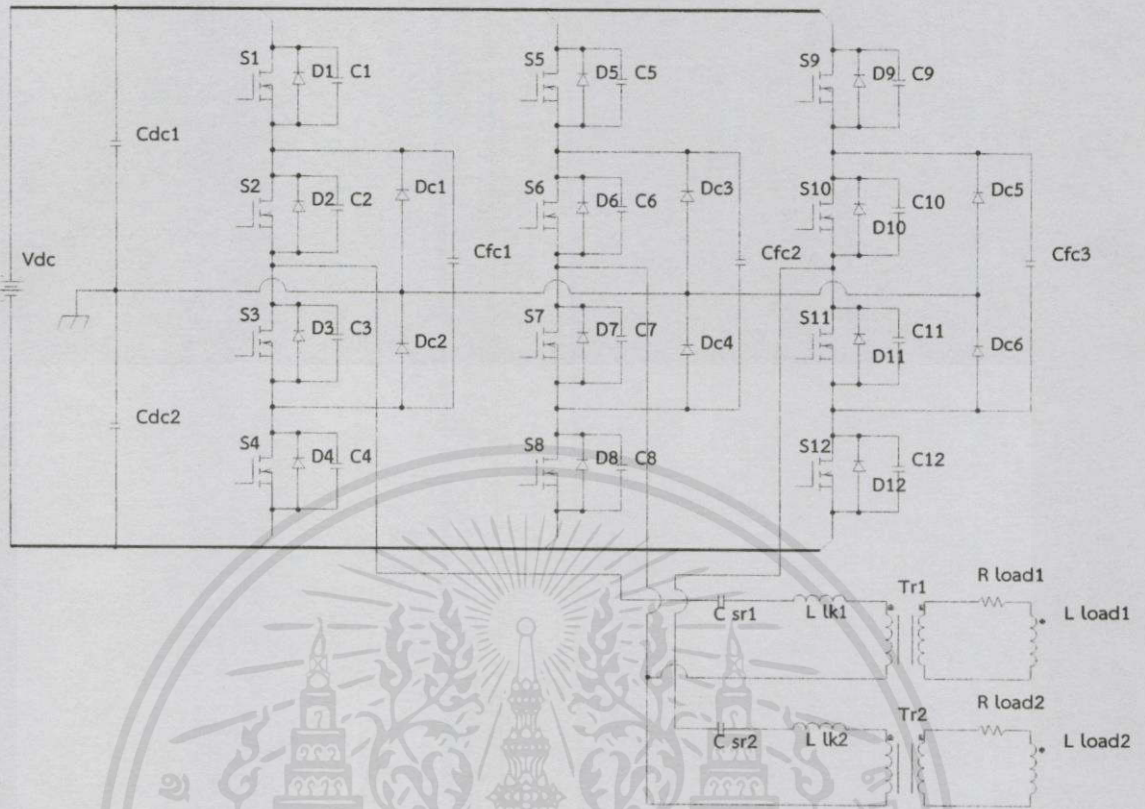
รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของวงจร

ในการควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำนั้น จะควบคุมด้วยด้วยวิธีการล็อกเฟส (Phase lock-loop) โดยจะใช้ตัว Current transducer แบบ Hall effect ในการวัดปริมาณ และรูปคลื่นของกระแสขาออก จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันขาออกเพื่อหามุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแส เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานต่อไป

3.3 ลักษณะโครงสร้างของวงจร

ตามรูปที่ 3.2 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์พร้อมด้วยวงจรโหลด โดยวงจรกิจักำลังนั้นจะประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์แบบห้าระดับจำนวนสามกึ่งไดโอดเฟส A จำนวน 2 กึ่ง และเฟส B จำนวน 1 กึ่งโดยแต่ละกึ่งจะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัว โดยสวิตช์วงนอกได้แก่ S_1, S_4, S_5, S_8, S_9 และ S_{12} ส่วนสวิตช์วงในได้แก่ $S_2, S_3, S_6, S_7, S_{10}$ และ S_{11} โดยทั้งหมดจะใช้ MOSFET เป็นตัวสวิตช์ซึ่งจะต้องมีไดโอด และตัวเก็บประจุแฝงอยู่ในตัว MOSFET ด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบที่เป็นฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ($C_{fc1} - C_{fc3}$) จากนั้นจึงผ่าน LC ฟิลเตอร์โดยมีขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำของฟิลเตอร์และตัวเบ้าหลอมจะต่อเข้ากับขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ สำหรับการโหลดแบบเหนี่ยวนำ

3.4 โหมดการทำงานของวงจร

สำหรับโหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์นั้น จะสามารถแบ่งได้ทั้งหมด 18 โหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิลดังรูปที่ 3.3 ในการวิเคราะห์โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์นั้นจะวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

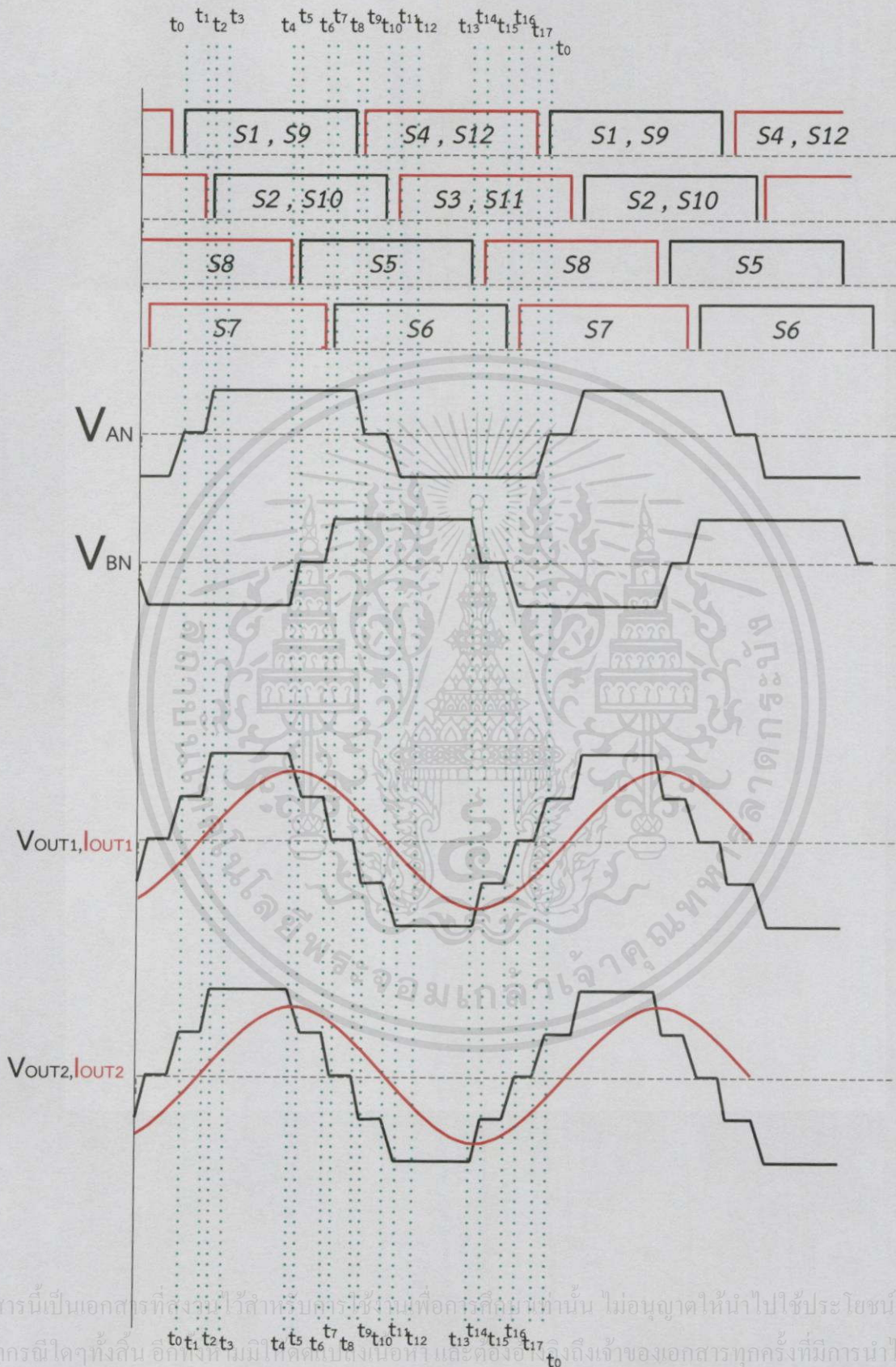
1. สวิตช์ขนานจะถูกพิจารณาว่ามีตัวเก็บประจุแฝง (Parasitic capacitor) อยู่ในภายในตัวมอสเฟตเพื่อที่จะวิเคราะห์การเกิด ZVS
2. ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำทั้งหมดเป็นอุดมคติ (Ideal)
3. ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2} จะต้องมีขนาดใหญ่มากพอที่จะรักษาระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ แรงแดันไว้ที่ค่า $\frac{V_{dc}}{2}$ คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตัวเก็บประจุฟลายอิง $C_{fc1} - C_{fc3}$ จะต้องมีความถี่สูงพอที่จะรักษาระดับแรงดันไว้ที่ $\frac{V_{dc}}{2}$
5. ตัวเหนี่ยวนำแมกนีไตซิ่ง (Magnetizing inductance) ของหม้อแปลงความถี่สูงของเอาต์พุตจะไม่ถูกนำมาพิจารณา โดยจำพิจารณาแต่เพียงตัวเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage inductance) เท่านั้น



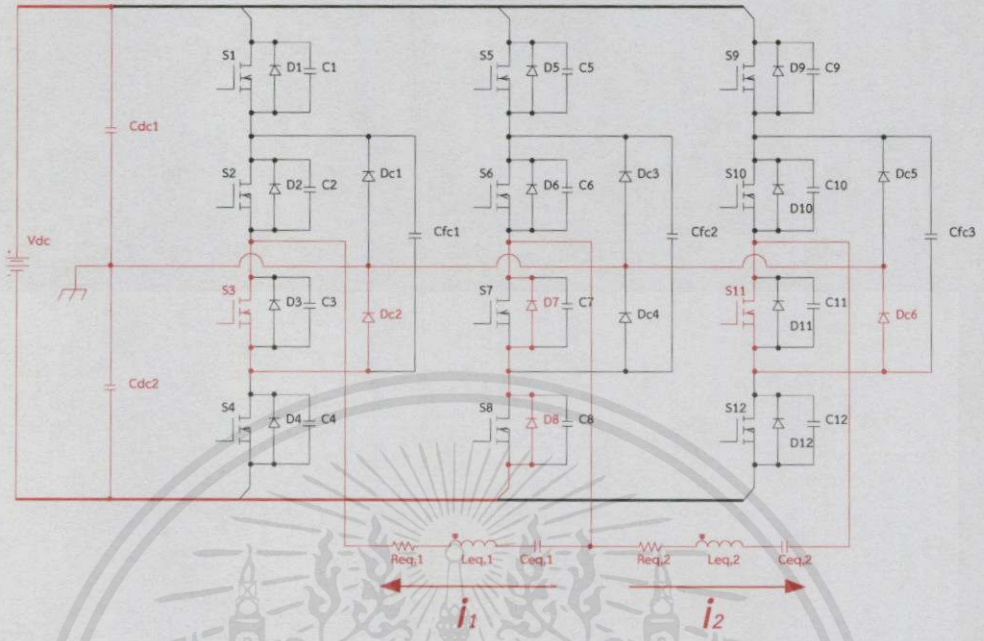
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์สงวนไว้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

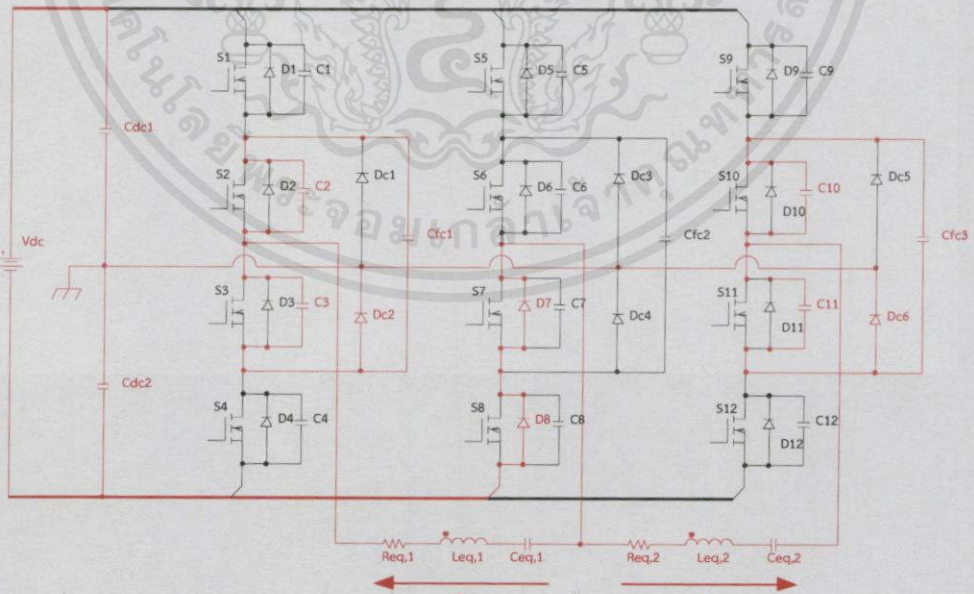
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมเวลาโหมดการทำงานของวงจร

โหมดการทำงานที่ 1 ($t_0 - t_1$)



รูปที่ 3.4 โหมดการทำงานที่ 1

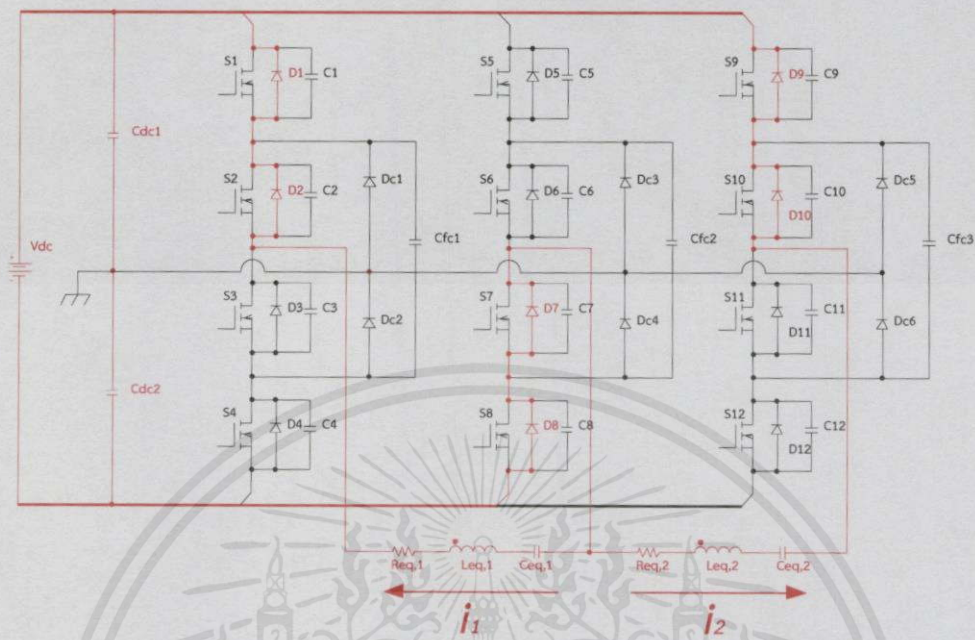
โหมดการทำงานที่ 2 ($t_1 - t_2$)



รูปที่ 3.5 โหมดการทำงานที่ 2

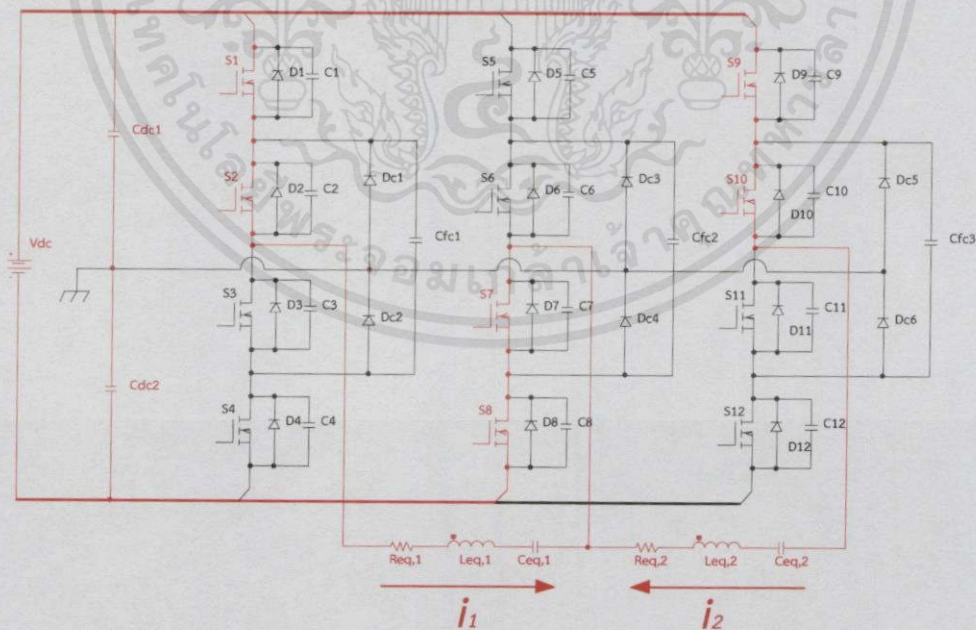
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดการทำงานที่ 3 ($t_2 - t_3$)



รูปที่ 3.6 โหมดการทำงานที่ 3

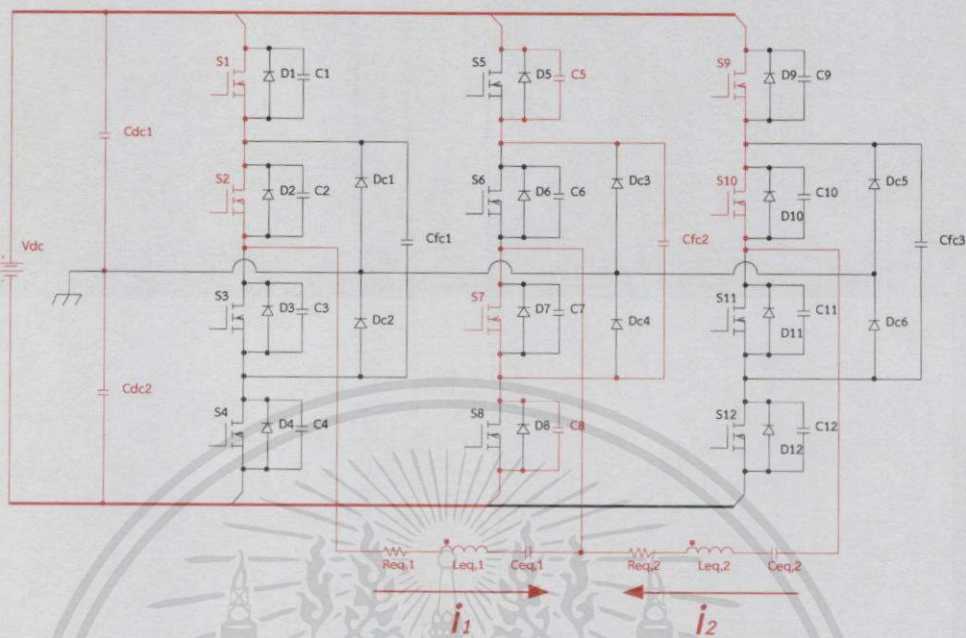
โหมดการทำงานที่ 4 ($t_3 - t_4$)



รูปที่ 3.7 โหมดการทำงานที่ 4

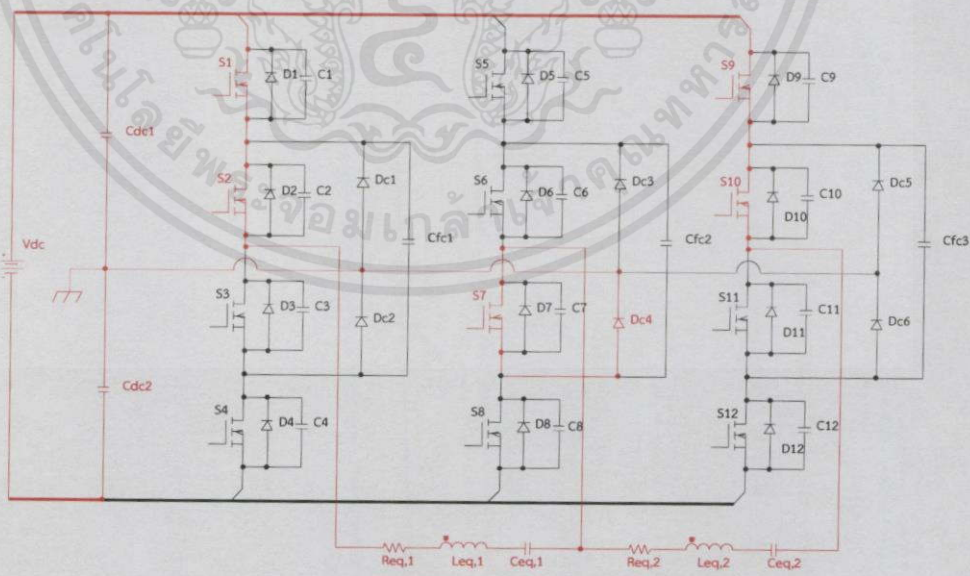
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเนื้อหาใดๆและต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

โหมดการทำงานที่ 5 ($t_4 - t_5$)



รูปที่ 3.8 โหมดการทำงานที่ 5

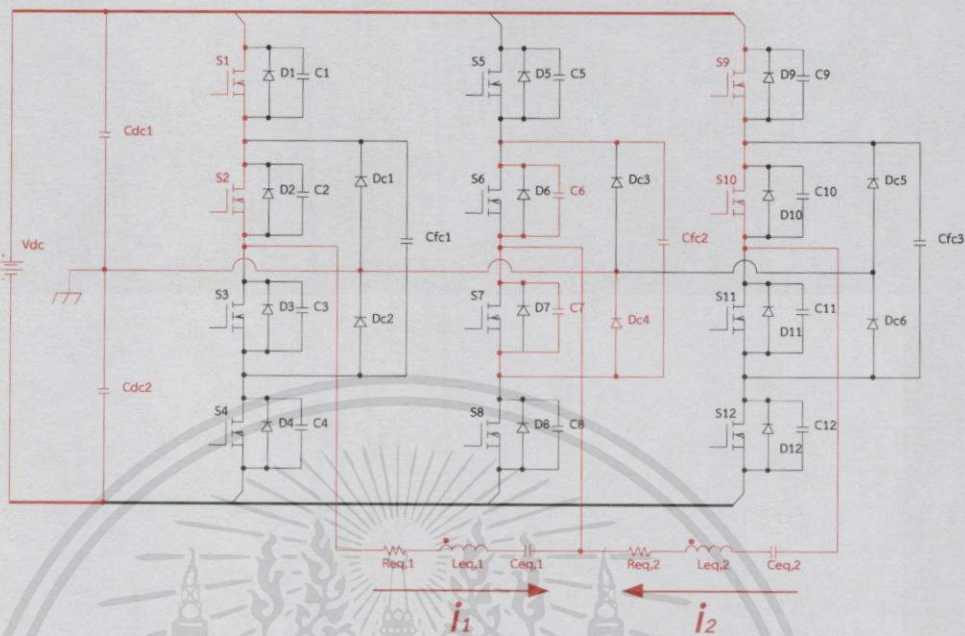
โหมดการทำงานที่ 6 ($t_5 - t_6$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา i_1 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ i_2 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

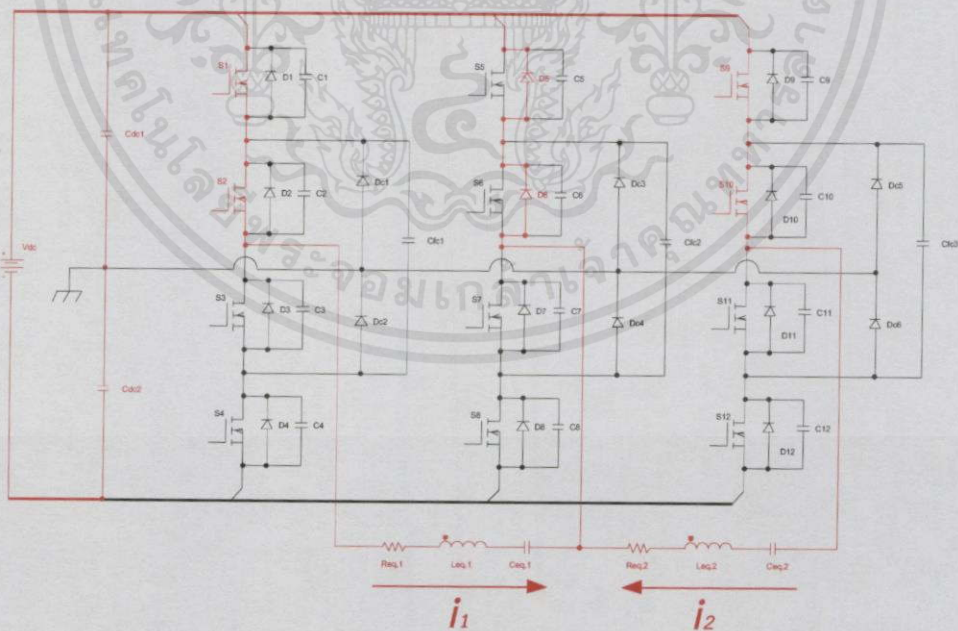
รูปที่ 3.9 โหมดการทำงานที่ 6

โหมดการทำงานที่ 7 ($t_6 - t_7$)



รูปที่ 3.10 โหมดการทำงานที่ 7

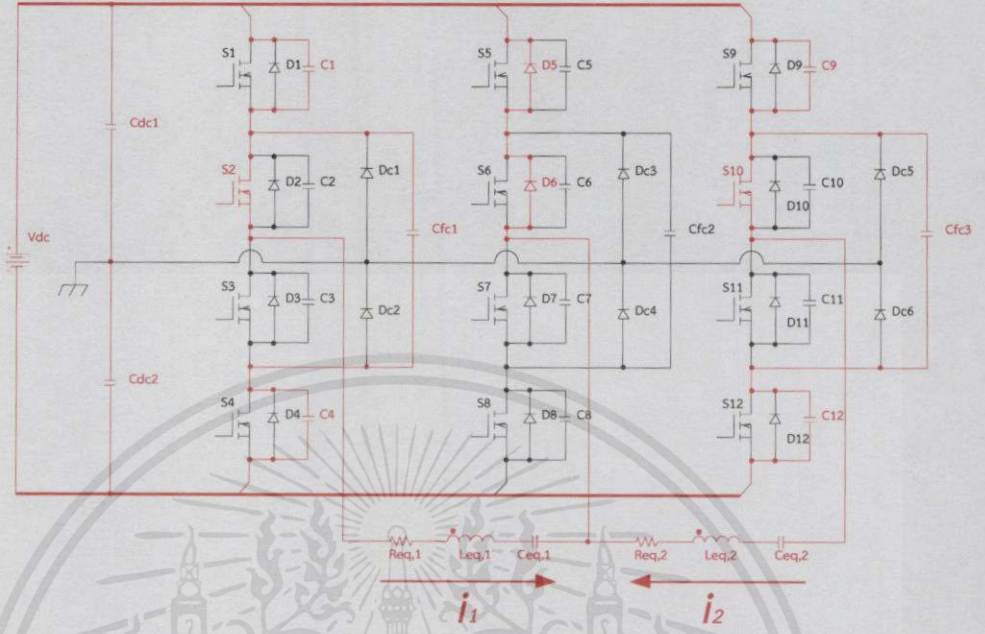
โหมดการทำงานที่ 8 ($t_7 - t_8$)



รูปที่ 3.11 โหมดการทำงานที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

โหมดการทำงานที่ 9 ($t_8 - t_9$)



รูปที่ 3.12 โหมดการทำงานที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดการทำงานที่ 1 ($t_0 - t_1$)

ในโหมดการทำงานนี้กระแส i_1 จากโหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดแรกจะไหลผ่านไดโอดแคลัมป์ตัวล่างคือไดโอด Dc_2 , สวิตช์ S_3 ของกิ่งแยก และไดโอดแฝงของสวิตช์ S_7 และ S_8 ของกิ่งร่วม ในขณะที่กระแส i_2 จากโหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดที่สองจะไหลผ่านไดโอดแคลัมป์ตัวล่างของกิ่งแยกอีกกิ่งหนึ่งคือไดโอด Dc_6 , สวิตช์ S_{11} ของกิ่งแยกอีกกิ่งหนึ่ง และไดโอดแฝงของสวิตช์ S_7 และ S_8 โดยแรงดันตกคร่อมโหลดแบบเรโซแนนซ์ทั้งสองชุดจะเท่ากับ $\frac{V_{dc}}{2}$

โหมดการทำงานที่ 2 ($t_1 - t_2$)

ที่เวลา t_1 ทั้งสวิตช์ S_3 และ S_4 จะหยุดนำกระแส กระแส i_1 ชาร์จ C_3 และดิสชาร์จ C_2 ในกิ่งเดียวกันผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง C_{fc} ในโหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดแรก ในขณะที่กระแส i_2 ชาร์จ C_{11} และดิสชาร์จ C_{10} ในกิ่งเดียวกันผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง C_{fc} ในโหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดที่สอง ไดโอดแฝงของสวิตช์ S_7 และ S_8 ในกิ่งร่วมยังคงนำกระแสทั้ง i_1 และ i_2 เหมือนการทำงานในโหมดการทำงานที่ 1 โดยแรงดันตกคร่อมของโหลดทั้งสองชุดจะเปลี่ยนเป็นเท่ากับ V_{dc} ในโหมดการทำงานนี้

โหมดการทำงานที่ 3 ($t_2 - t_3$)

เมื่อการขนถ่ายประจุระหว่างสวิตช์คู่ในเสร็จสิ้น โหลดแบบเรโซแนนซ์ทั้งสองชุดจะทำการคายพลังงานที่ถูกสะสมไว้กลับไปสู่แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง ซึ่งเรียกโหมดการทำงานนี้ว่า “โหมดรีเจนเนอเรทีฟ” กระแส i_1 ไหลผ่านไดโอดแฝง D_1 , D_2 , D_7 และ D_8 ในโหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดแรก กระแส i_2 ไหลผ่านไดโอดแฝง D_7 , D_8 , D_9 และ D_{10} ในโหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดที่สอง โดยโหมดการทำงานนี้จะสิ้นสุดเมื่อทั้งกระแส i_1 และ i_2 เท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อมของโหลดทั้งสองชุดในโหมดการทำงานนี้เท่ากับ V_{dc}

โหมดการทำงานที่ 4 ($t_3 - t_4$)

ที่เวลา t_3 โหมดรีเจนเนอเรทีฟจะเสร็จสิ้น หลังจากนั้นสวิตช์ S_1 , S_2 , S_7 และ S_8 จะเริ่มนำกระแส i_1 ไปสู่โหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดแรก สวิตช์ S_7 , S_8 , S_9 และ S_{10} จะเริ่มนำกระแส i_1 ไปสู่โหลดแบบเรโซแนนซ์ชุดที่สอง ในโหมดการทำงานนี้สามารถพิจารณาได้ว่าสวิตช์ S_1 , S_2 , S_7 , S_8 , S_9 และ S_{10} ทำงานภายใต้เงื่อนไขของสภาวะสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ (ZVS : Zero-voltage switching) ซึ่งจะไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากสวิตช์ (Switching loss) และแรงดันตกคร่อมโหลดทั้งสองชุดยังคงเท่ากับ V_{dc}

โหมดการทำงานที่ 5 ($t_4 - t_5$)

ที่เวลา t_4 สวิตช์ S_8 หยุดนำกระแส ประจุในตัวเก็บประจุแฝง C_8 จะถูกขนถ่ายไปยัง C_5 ผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง C_{fc2} ดังนั้นแรงดันตกคร่อมโพลดแบบเรโซแนนซ์ทั้งสองชุดจะลดลงเกือบเป็นเชิงเส้นเหลือ $\frac{V_{dc}}{2}$ ในโหมดการทำงานนี้ โดยกระแส i_1 และ i_2 ยังคงไหลในทิศทางเดียวกันกับโหมดการทำงานก่อนหน้า

โหมดการทำงานที่ 6 ($t_5 - t_6$)

หลังจากการขนถ่ายประจุระหว่างสวิตช์ S_5 กับ S_8 ในกึ่งร่วมเสร็จสิ้นแล้ว S_8 จะหยุดนำกระแส กระแส i_1 และ i_2 จึงไหลผ่านสวิตช์ S_7 และไดโอดแคลัมป์ D_4 แทน

โหมดการทำงานที่ 7 ($t_6 - t_7$)

ที่เวลา t_6 สวิตช์ S_7 หยุดนำกระแส จากนั้นกระแส i_1 และ i_2 จะชาร์จ C_7 และดิสชาร์จ C_6 ในกึ่งร่วมโดยผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง C_{fc2} ดังนั้นแรงดันตกคร่อมโพลดจึงลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อการขนถ่ายประจุเสร็จสิ้น โดยกระแส i_1 และ i_2 ยังคงไหลในทิศทางเดียวกันกับโหมดการทำงานที่ 6 แต่ขนาดจะลดลงอย่างต่อเนื่อง

โหมดการทำงานที่ 8 ($t_7 - t_8$)

ที่เวลา t_7 แรงดันตกคร่อมโพลดแบบเรโซแนนซ์ทั้งสองชุดมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นกำลังจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงจะไม่ถูกส่งถ่ายไปยังโพลดใดๆในโหมดการทำงานนี้ อย่างไรก็ตามกระแส i_1 และ i_2 จะยังคงไหลอย่างต่อเนื่องเนื่องด้วยพลังงานที่ถูกเก็บสะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำของโพลดแต่ละชุด สำหรับโพลดแบบเรโซแนนซ์ชุดแรก กระแส i_1 จะไหลผ่านสวิตช์ S_1, S_2 และไดโอดแฝงในสวิตช์อีกสองตัวคือ D_5 และ D_6 ในขณะที่กระแส i_2 จะไหลผ่านสวิตช์ S_9, S_{10} และไดโอดแฝงในสวิตช์อีกสองตัวคือ D_5 และ D_6 สำหรับโพลดชุดที่สอง

โหมดการทำงานที่ 9 ($t_8 - t_9$)

ที่เวลา t_8 สวิตช์ S_8 และ S_9 หยุดนำกระแส ดังนั้นกระแส i_1 จะชาร์จตัวเก็บประจุแฝง C_1 และดิสชาร์จ C_4 ในกึ่งเดียวกันผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง C_{fc1} สำหรับโพลดแบบเรโซแนนซ์ชุดแรก ในขณะที่

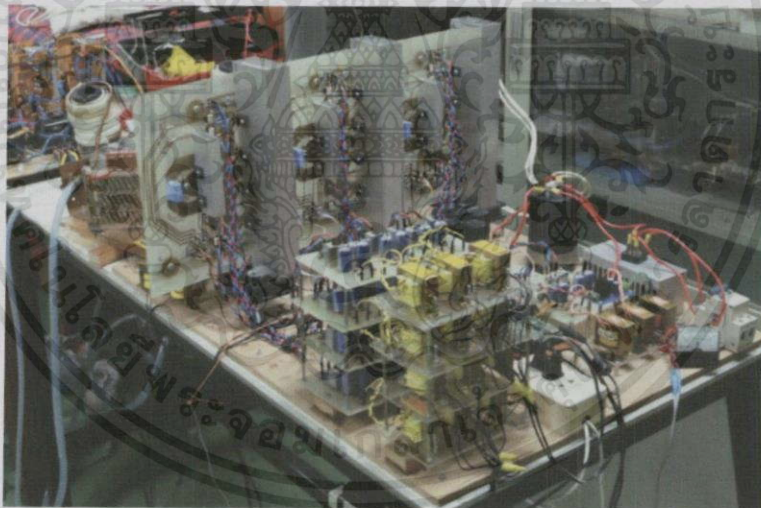
กระแส i_2 จะซาร์จตัวเก็บประจุแฝง C_9 และดิซซาร์จ C_{12} ในกึ่งเดี่ยวกันผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง C_{fc3} สำหรับโหลดชุดที่สอง เมื่อการขนถ่ายประจุเสร็จสิ้นลง แรงดันตกคร่อมโหลดแบบเรโซแนนซ์ทั้งสองจะเปลี่ยนแปลงเป็น $-\frac{V_{dc}}{2}$ เมื่อสิ้นสุดโหมดการทำงานนี้

ในโหมดการทำงานที่ 10 – 18 จะมีลำดับการทำงานที่คล้ายคลึงกับในโหมดการทำงานที่ 1 – 9 แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เครื่องหมายของแรงดัน และกระแสจะกลับกันกับโหมดการทำงานที่ 1 – 9 อยู่

3.5 การออกแบบ และสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์ สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

โครงสร้างวงจร

สำหรับวงจรที่ได้ออกแบบ และสร้างขึ้นจริงนั้นจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.13 โยจะได้มีการแสดงรายละเอียดของส่วนประกอบในแต่ละส่วนของวงจร รวมทั้งวิธีการออกแบบในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.13 โครงสร้างของวงจรที่ได้สร้างขึ้นจริง

วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตซ์ด้วยแรงดันศูนย์นั้นจะประกอบไปด้วย 6 ส่วนดังนี้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

1. ส่วนวงจรเรียงกระแส AC เป็น DC ด้านอินพุต
2. ส่วนตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน C_{dc1} และ C_{dc2}

3. ส่วนภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์
4. ส่วนวงจรขับเคลื่อน
5. ส่วนชุดโหลด
6. ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์
7. ส่วนวงจรวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออก

3.5.1 ส่วนวงจรเรียงกระแส AC เป็น DC ด้านอินพุต

สำหรับวงจรเรียงกระแสด้านอินพุตนั้นจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full-wave Rectifier) และตัวเก็บประจุลดแรงดันกระเพื่อม (Ripple voltage) ขนาด $3300 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 450 V

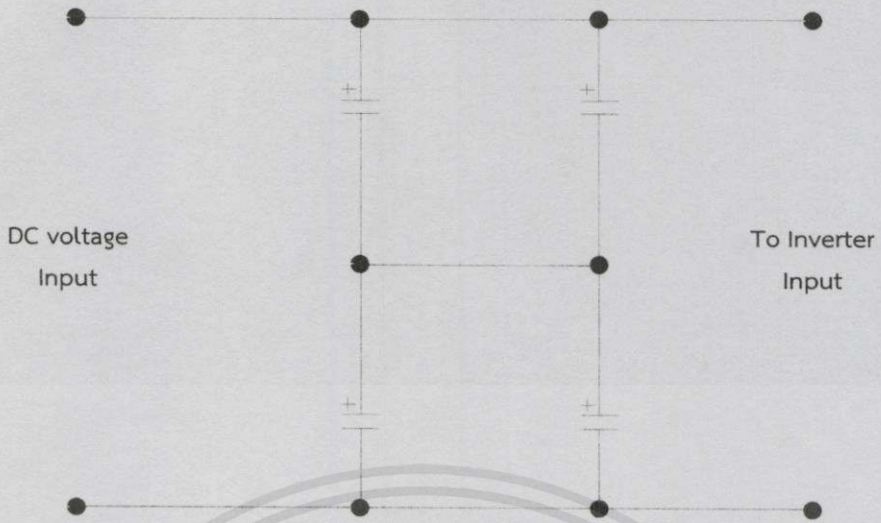


รูปที่ 3.14 วงจรเรียงกระแสด้านอินพุต

3.5.2 ส่วนตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

ในส่วนตัวเก็บประจุแบ่งแรงดันนั้นจะอยู่ด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะใช้ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์ที่มีขนาดเท่ากันจำนวน 2 ตัวมาต่อขนานกันจำนวน 2 ชุด แล้วจึงนำมาต่ออนุกรมกัน โดยจะใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาด $680 \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 450 V

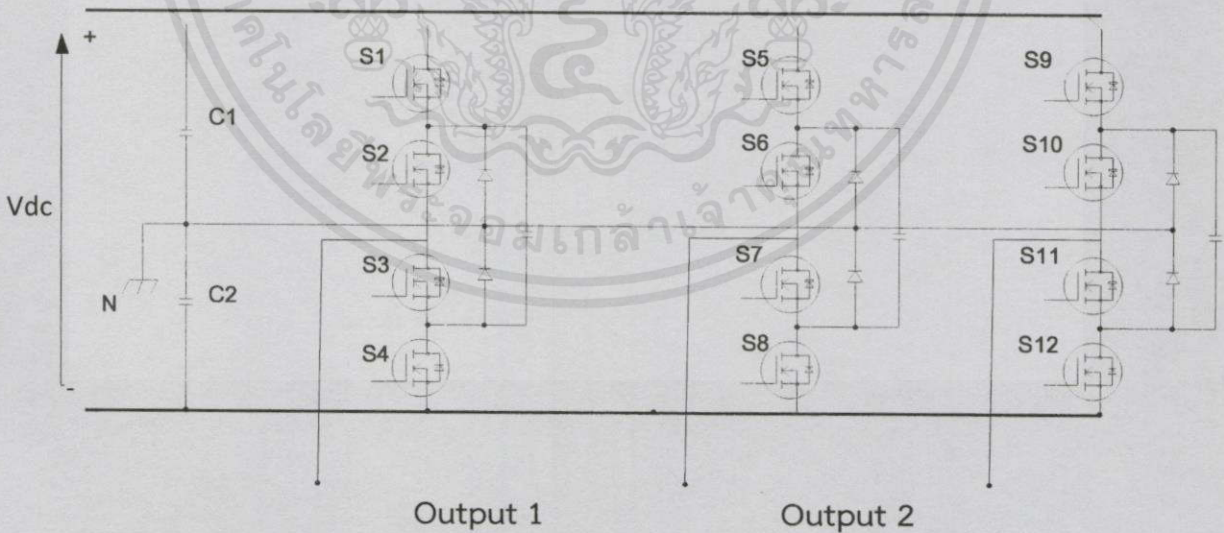
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน

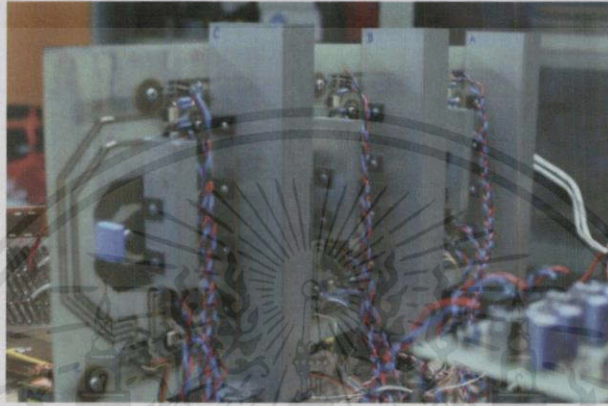
3.5.3 ส่วนภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จะเป็นแบบ NCP : Neutral clamp point inverter แบบสองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับ ซึ่งมีสามกิ่ง 12 สวิตช์ ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.16 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

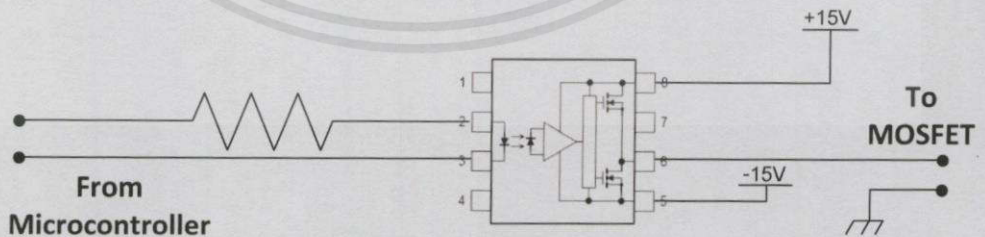
ด้วยความเป็นอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับนี้เอง จะช่วยลดภาระของสวิตซ์ในการรับแรงดันในช่วงที่หยุดนำกระแสให้เหลือเพียงครึ่งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเท่านั้น และในรูปที่ 3.17 แสดงวงจรกำลังที่ได้สร้างขึ้นจริง โดยใช้สวิตซ์ทั้ง 12 ตัวเป็นมอสเฟต (SPW47N60C3) และไดโอดแคสึมป์ เป็นไดโอดเบอร์ RURG5060 และตัวเก็บประจุหลายอั้ง เลือกใช้ตัวเก็บประจุแบบเมทัลฟิล์มโพลีโพรพิลีน ขนาด 1 ไมโครฟารัด



รูปที่ 3.17 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น และใช้งานจริง

3.5.4 ส่วนวงจรขั้วเกต

วงจรขั้วเกตที่ออกแบบจะมีการแยกกราวด์ของระบบกำลังออกจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการขยายสัญญาณพัลส์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปด้วยในตัว โดยจะใช้ IC OPTO เบอร์ TLP 350 ซึ่งจะทำทั้งหมด 12 ชุด

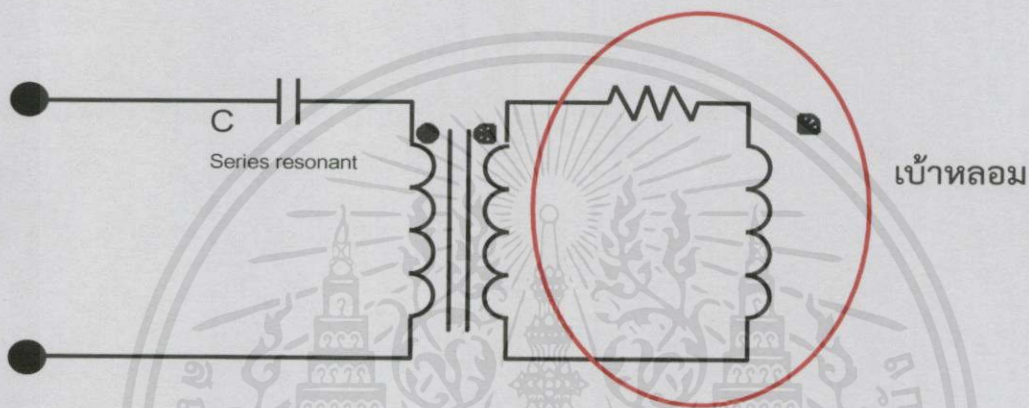


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.18 วงจรขั้วเกตโดยใช้ TLP 350 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 ชุดโหลด

ในส่วนของชุดโหลด ซึ่งมี 2 ชุดนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆในแต่ละชุด ดังนี้

- หม้อแปลงความถี่สูง
- ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonant capacitor)
- เบ้าหลอมกราไฟต์ขนาด 10 cm



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลของชุดโหลด ประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่สูง,ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ และ เบ้าหลอม

ในรูปที่ 3.19 แสดงให้เห็นถึงวงจรสมมูลของชุดโหลดที่จะมีตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ต่ออนุกรมอยู่ที่ฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง และในส่วนของเบ้าหลอมซึ่งมีลักษณะของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกันอยู่ที่ฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง โดยในส่วนของหม้อแปลงความถี่สูงนั้น จะเป็นหม้อแปลงแบบลดระดับแรงดัน (Step-down transformer) เพื่อใช้ในการเพิ่มกระแสที่ไหลเข้าสู่เบ้าหลอม ทั้งนี้เนื่องจากการจากการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำนั้นจำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าในปริมาณมากพอสมควร

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของชุดโหลดในแต่ละชุดนั้นได้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ EE80 จำนวนสองคู่ประกบกันในแต่ละชุดเพื่อเพิ่มพิกัดในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ไปสู่เบ้าหลอม และใช้ท่อทองแดงเป็นขดลวดฝั่งทุติยภูมิเพื่อให้สามารถรับกระแสที่ไหลผ่านในปริมาณมากได้ อีกทั้งยังช่วยลดผลจากปรากฏการณ์เชิงผิว (Skin effect) และใช้ประโยชน์ในเอกสากัรหล่อเย็นตัวเบ้าด้วยการเดินสารหล่อเย็นให้ไหลผ่านในตัวท่อ โดยจะได้แสดงค่าพารามิเตอร์ทางไม่ว่ากไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้งสองตัวดังต่อไปนี้ เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงความถี่สูงตัวที่ 1

หม้อแปลงตัวที่ 1		
จำนวนรอบของขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (N_1)	22	Turns
จำนวนรอบของตัวนำฝั่งทุติยภูมิ (N_2)	2	
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (l_{11})	3.42	mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งทุติยภูมิ (l_{22})	28.478	μ H
ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลฝั่งปฐมภูมิ (l_{kp})	64.114	
ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลฝั่งทุติยภูมิ (l_{ks})	0.533	
ค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก (l_m)	3.36	mH
อัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดในทางทฤษฎี (N)	11	-
อัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดที่คำนวณได้ (N)	10.965	

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงความถี่สูงตัวที่ 2

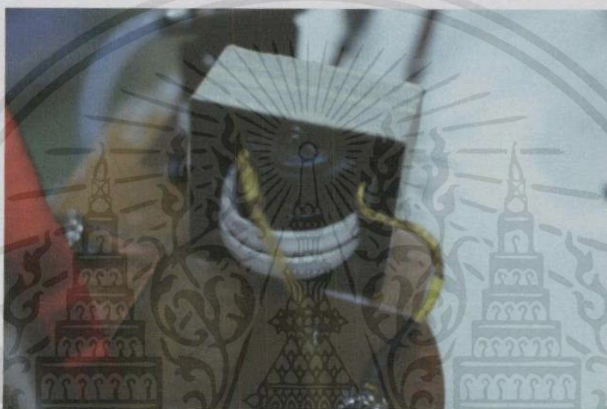
หม้อแปลงตัวที่ 2		
จำนวนรอบของขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (N_1)	22	Turns
จำนวนรอบของตัวนำฝั่งทุติยภูมิ (N_2)	2	
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (l_{11})	3.556	mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งทุติยภูมิ (l_{22})	26.64	μ H
ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลฝั่งปฐมภูมิ (l_{kp})	72.595	
ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลฝั่งทุติยภูมิ (l_{ks})	0.544	
ค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก (l_m)	3.483	mH
อัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดในทางทฤษฎี (N)	11	-
อัตราส่วนของจำนวนรอบขดลวดที่คำนวณได้ (N)	11.553	

ในการได้มาซึ่งตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทั้งสองตัวที่ได้แสดงไว้ข้างต้นนั้นจะเริ่มต้นจากการวัดค่าความเหนี่ยวนำจำนวนสามค่าของในแต่ละหม้อแปลง คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งปฐมภูมิ (l_{11}), ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งทุติยภูมิ (l_{22}) และจะมีเพิ่มมาอีกค่าที่ไม่ได้แสดงไว้ในตาราง คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดฝั่งปฐมภูมิ เมื่อตัวนำฝั่งทุติยภูมิถูกลัดวงจรไว้ (l_{11s}) โดยค่าความเหนี่ยวนำทั้งสามค่าจะถูกนำมาคำนวณตามสมการดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

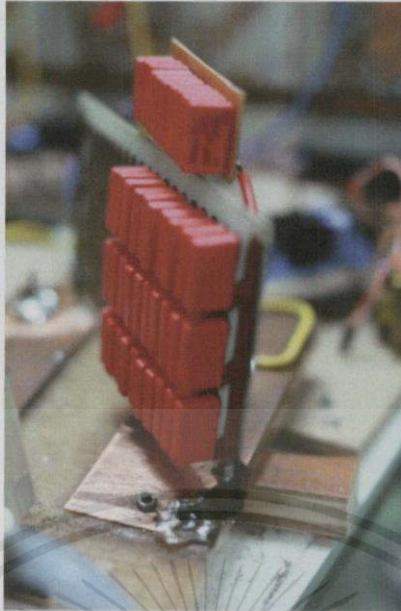


(ข)

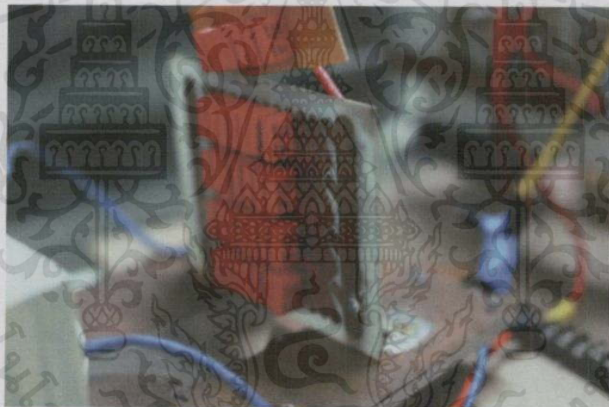
รูปที่ 3.20 (ก) และ(ข) หม้อแปลงความถี่สูงทั้งสองตัวที่ได้สร้างขึ้นจริงของชุดโพลิตองสองชุด

สำหรับในส่วนของตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ในโพลิตองชุดที่ 1 ใช้ตัวเก็บประจุแบบพัลส์ (Pulse capacitor) ชนิดเมทัลฟิล์มโพลีโพรพิลีนขนาดประมาณ 40.285 นาโนฟารัด และ 40 นาโนฟารัดในชุดโพลิตองชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

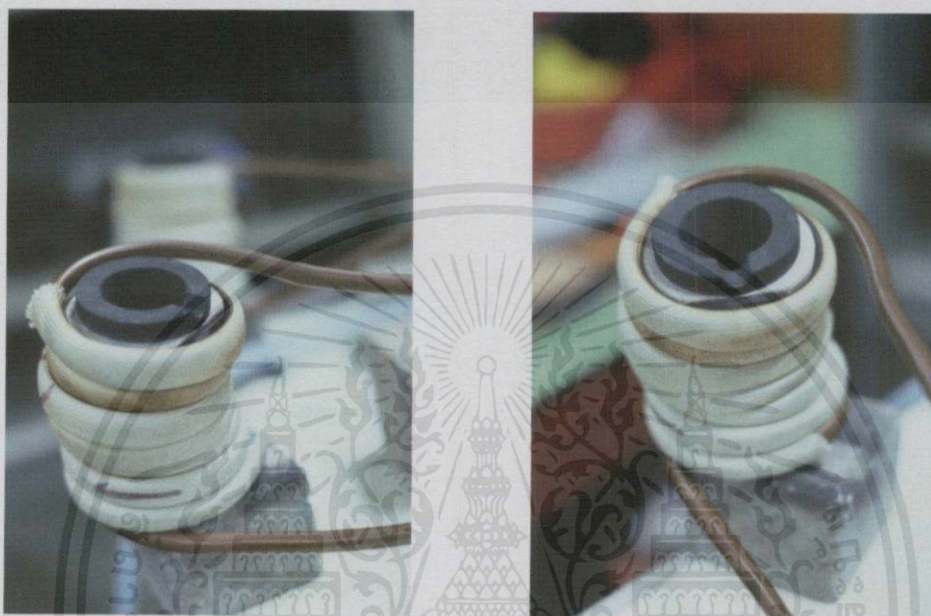
รูปที่ 3.21 (ก) และ(ข) ตัวเก็บประจุโซเลนซ์ของชุดโพลิตทั้งสองชุด

ในส่วนของเข้าหลอมโลหะนั้นใช้เข้ากราไฟต์ขนาด 10cm โดยมีวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกันอยู่ ซึ่งสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของเบ้าหลอมโลหะ

เบ้าหลอมของชุดโหลดที่	ค่าความต้านทานสมมูล (Ω)	ค่าความเหนี่ยวนำสมมูล (μH)
1	10.632	4.433
2	12.172	4.278



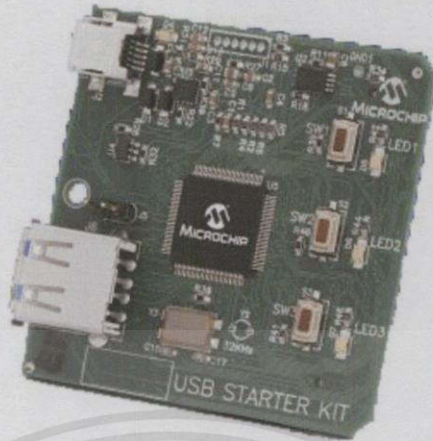
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.22 (ก) และ(ข) เบ้าหลอมโลหะกราฟไฟต์ของชุดโหลดทั้งสองชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์



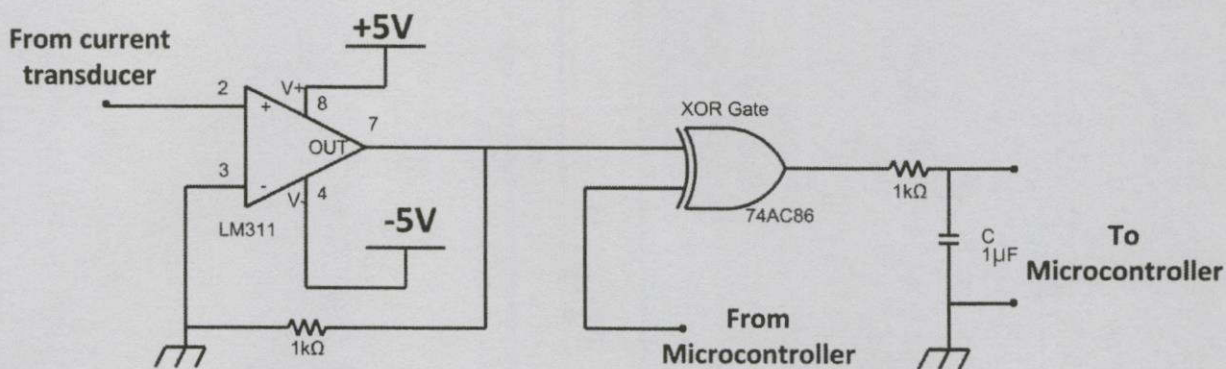
รูปที่ 3.23 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33EP512MU810

ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อใช้ขับสวิตซ์ทั้ง 12 ตัวนั้นจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33EP512MU810 ซึ่งมีความสามารถในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มได้ 12 สัญญาณ

3.5.7 ส่วนของวงจรวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออก

ในการวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกนั้นจะใช้ตัว Current transducer แบบ Hall effect สำหรับวัดปริมาณ และรูปคลื่นของกระแสขาออก จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาผ่านวงจร Zero crossing detector ซึ่งประกอบไปด้วยไอซีออปแอมป์เบอร์ LM311 จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาทำการเทียบกับสัญญาณการทำงานของสวิตซ์ซึ่งได้จากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วย XOR-Gate สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของเนื้อพัลส์ (Duty) มากน้อยตามมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ จากนั้นจึงนำมาผ่านวงจร RC filter เพื่อให้สัญญาณขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันตามความกว้างของเนื้อพัลส์ก่อนจะผ่านวงจรกรอง จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้ไปเป็นสัญญาณขาเข้าของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการควบคุมความถี่สวิตซ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 วงจรวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออก

3.6 การจำลองระบบของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์ที่มี สวิตช์ด้วยแรงดันคู่สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

ในโครงการนี้ใช้โปรแกรม Cadence[®] OrCAD Capture CIS และโปรแกรม PSpice A/D ในการจำลองระบบ และวิเคราะห์ห้วงจร โดยตัววงจรสามารถปรับกำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดได้โดย 2 วิธีดังนี้

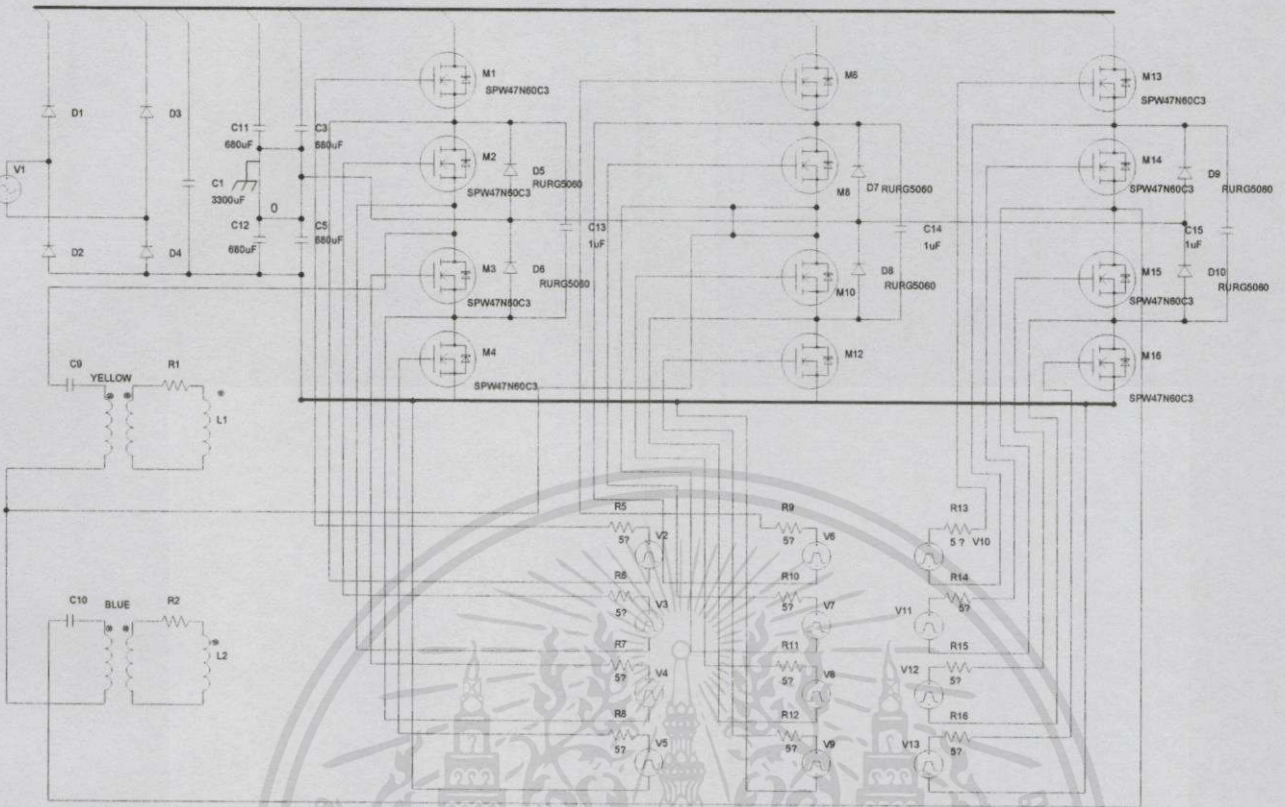
- การปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์

การปรับความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้น จะส่งผลโดยตรงต่อผลต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสที่ขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นผลให้กำลังไฟฟ้าจริงแปรผันไปตามขนาดผลต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสดังสมการที่ 2.11

- การปรับมุม Phase – shifted PWM

จากทฤษฎีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase – shifted PWM ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันมีค่าลดลงจึงทำให้กำลังไฟฟ้ามี่ค่าลดลงไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนียวน้ำที่ได้ทำการจำลองในโปรแกรม OrCAD Capture CIS

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการทํางาน และการวิเคราะห์โหมดการทํางานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์การสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ โดยได้อธิบายถึงโหมดการทํางานทั้ง 18 โหมด และการทํางานภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์ของสวิตช์ทั้ง 12 ตัว และอธิบายถึงส่วนประกอบต่างๆของวงจรรวมไปถึงการออกแบบส่วนต่างๆของวงจรโดยละเอียด อันได้แก่ วงจรเรียงกระแสขาเข้า วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟต วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ รวมไปถึงส่วนประกอบต่างๆของชุดโหลด และยังได้แสดงถึงการจำลองการระบบทํางานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์การสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ ด้วยโปรแกรม Cadence® OrCAD CaptureCIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นผลการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์เพื่อการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำที่ได้สร้างขึ้น โดยจะทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจร การนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์ของสวิตช์ การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน และกระแสขาออก รวมไปถึงอุณหภูมิของเบ้าลอมโลหะที่กำลังไฟฟ้าในปริมาณต่างๆ ซึ่งจะแบ่งหัวข้อของการทดสอบดังนี้

4.2 การนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์ของสวิตช์

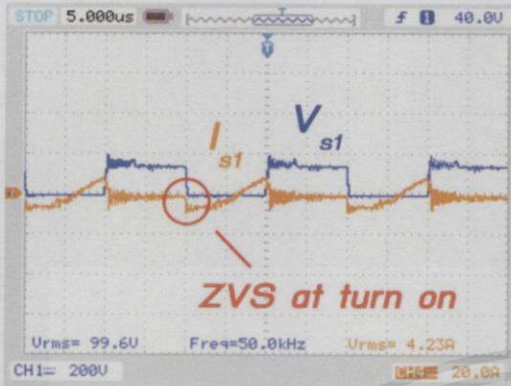
เพื่อนแสดงให้เห็นว่าสวิตช์ทั้งหมดภายในวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์นั้น ทำงานภายใต้เงื่อนไขสภาวะแรงดันศูนย์จริง จึงได้ทำการวัดรูปแรงดันตกคร่อมสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านตัวสวิตช์ในขณะที่สวิตช์เริ่มนำกระแส และหยุดนำกระแส มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม Cadence® OrCAD Capture CIS โดยทำการทดสอบที่แรงดันใช้งานคือ 220V ขาเข้า และความถี่สวิตช์ 50kHz ซึ่งสวิตช์ 6 ตัวล่านั้น มีการทำงานที่เหมือนกันกับสวิตช์ทั้ง 6 ตัวบน ดังนั้นจึงทำการเก็บรูปคลื่นมาเทียบเพียง 6 ตัวบนเท่านั้น

ตารางที่ 4.1 การเกิด ZVS ในสวิตช์แต่ละตัว

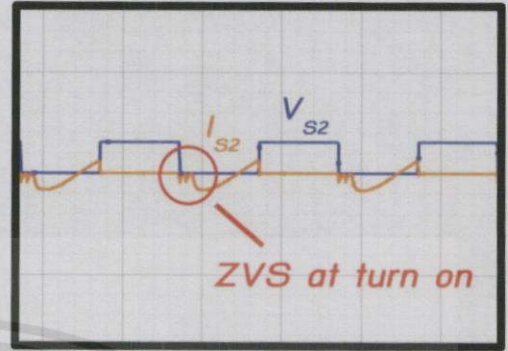
สวิตช์	ZVS at turn on
S1	✓
S2	✓
S3	✓
S4	✓
S5	✓
S6	✓
S7	✓
S8	✓
S9	✓
S10	✓
S11	✓
S12	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของลิขสิทธิ์

4.2.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริง และผลที่ได้จากการจำลอง

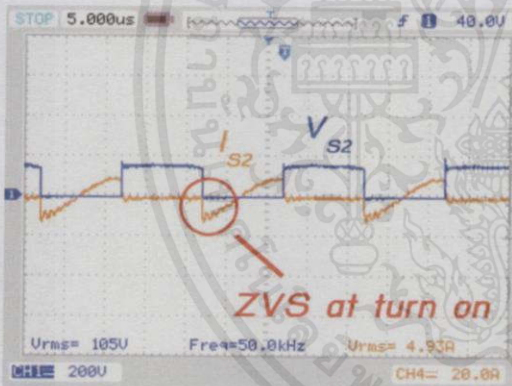


(ก.)

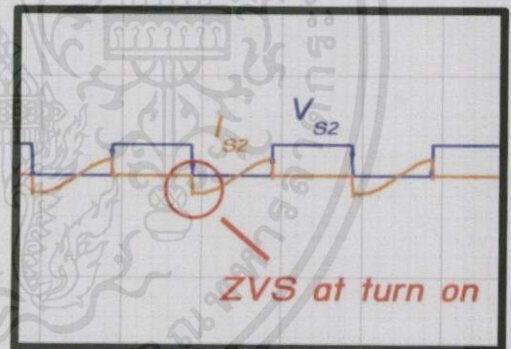


(ข.)

รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S1 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง



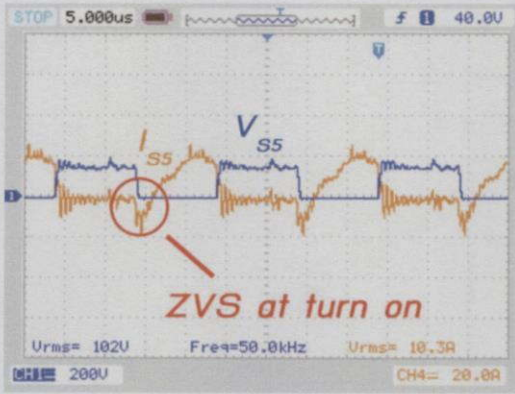
(ก.)



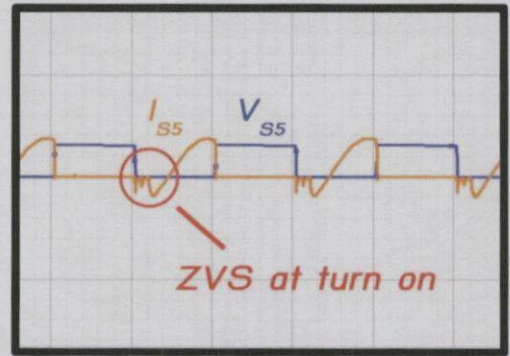
(ข.)

รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S2 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

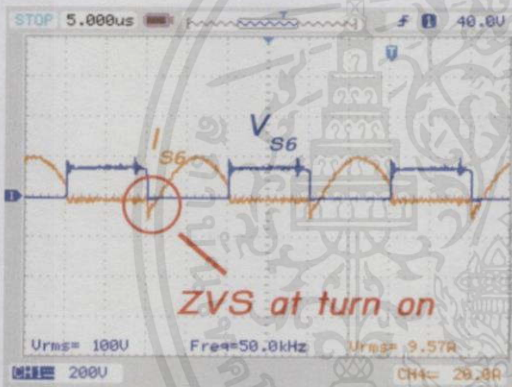


(ก.)

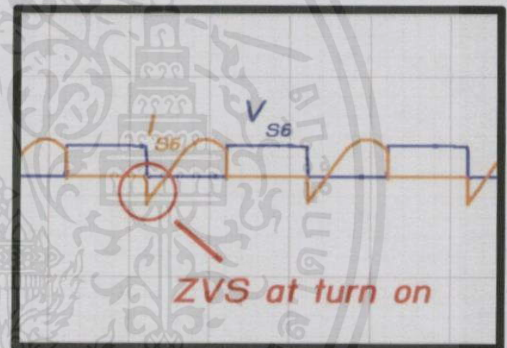


(ข.)

รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S5 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง



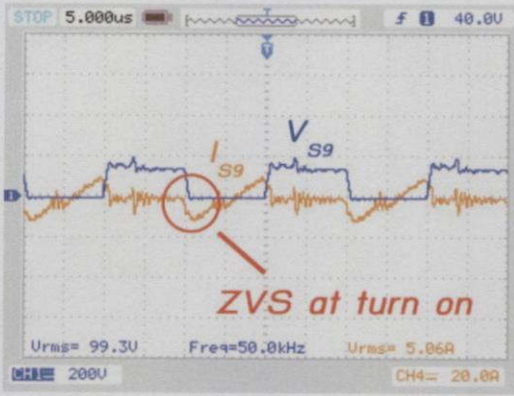
(ก.)



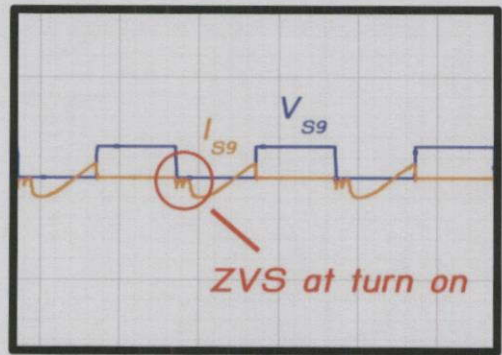
(ข.)

รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S6 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

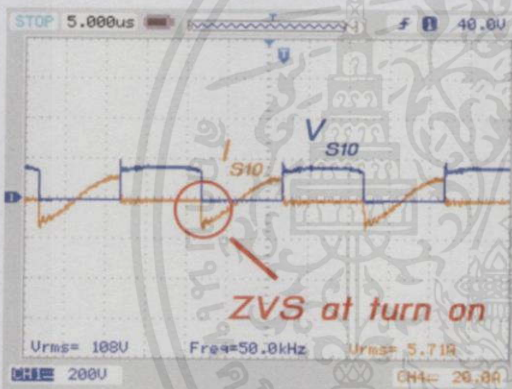


(ก.)

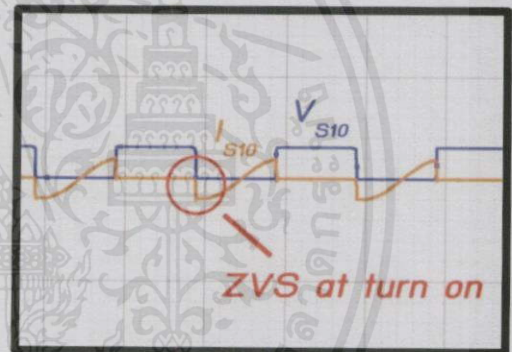


(ข.)

รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S9 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสของสวิตช์ S10 (200V/div , 20A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ถึง 4.6 เป็นการตรวจสอบการนำกระแสภายใต้เงื่อนไขแรงดันศูนย์ของสวิตช์ ซึ่งสวิตช์ทุกตัวนั้นมีการทำงานภายใต้เงื่อนไขสภาวะแรงดันศูนย์ (Zero - voltage switching : ZVS) โดยจากรูปคลื่นสัญญาณแรงดันตกคร่อมสวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ จะเห็นว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์นั้นจะตกลงเป็นศูนย์ก่อนที่สวิตช์จะเริ่มนำกระแสทำให้ไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขณะที่สวิตช์เริ่มนำกระแส แต่ในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแส นั้น ยังมีการทับซ้อนของรูปคลื่นกระแสกับแรงดันตกคร่อมสวิตช์ ซึ่งหมายถึงสวิตช์ยังคงเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงหยุดนำกระแสอยู่ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงที่สวิตช์หยุดนำกระแส นั้นจะมีแบกรับภาระแรงดันตกคร่อมเพียงครั้งเดียวของแรงดันขาเข้า ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter)

4.3 การวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของสัญญาณแรงดัน และกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตหาระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์

เพื่อศึกษาความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของสัญญาณแรงดัน และกระแส (THD_v และ THD_i) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้สร้างขึ้น เนื่องจากความเป็นอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ แรงดันขาออกที่ได้จะแตกต่างจากแรงดันขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ทั่วไป จึงได้ทำการวัดรูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์มาทำการคำนวณ และวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิก (Total Harmonics Distortion) และเนื่องจากวงจรเป็นอินเวอร์เตอร์สองเอาต์พุต จึงทำการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสของทั้งสองโพลตมาทำการวิเคราะห์

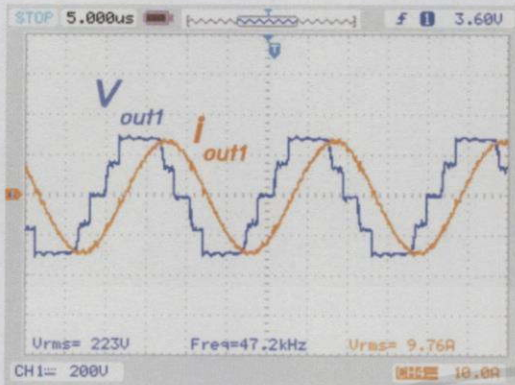
$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{1,rms}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_{h,rms}^2}}{i_{1,rms}} \times 100 \quad (4.2)$$

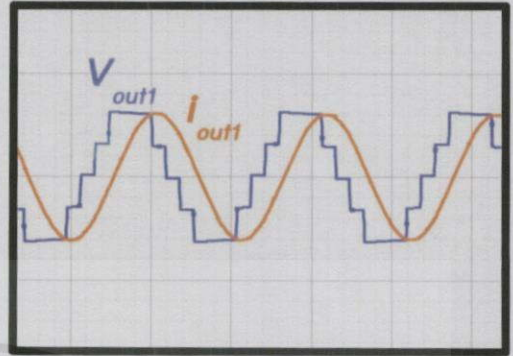
โดยที่ค่า	THD _v	คือ	ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของแรงดัน
	THD _i	คือ	ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของกระแส
	h	คือ	อันดับของฮาร์มอนิก
	V ₁	คือ	องค์ประกอบหลักมูลของแรงดัน
	V ₂	คือ	องค์ประกอบหลักมูลของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสของโหลดชุดที่1



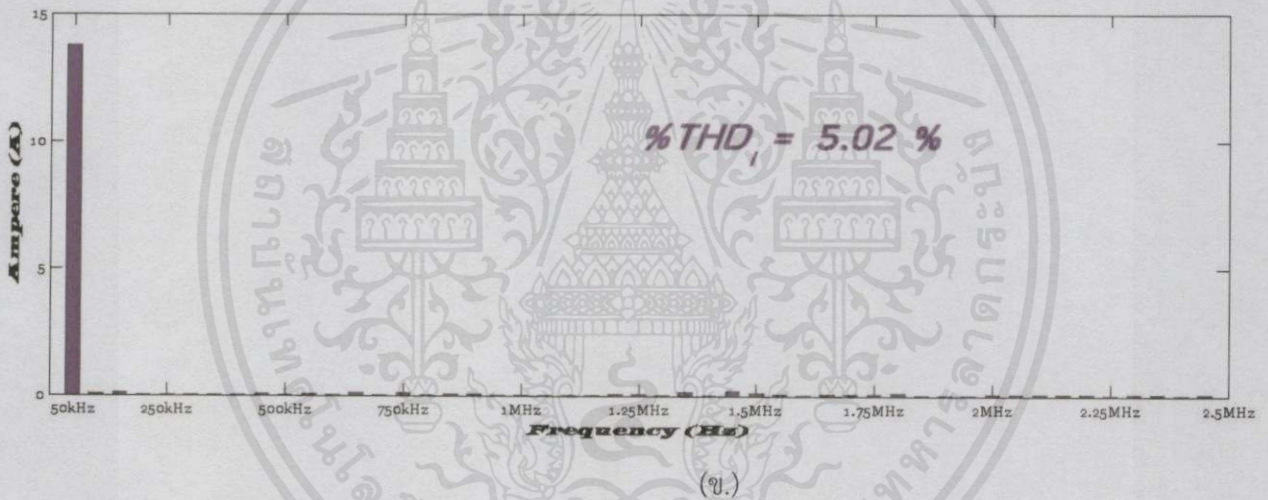
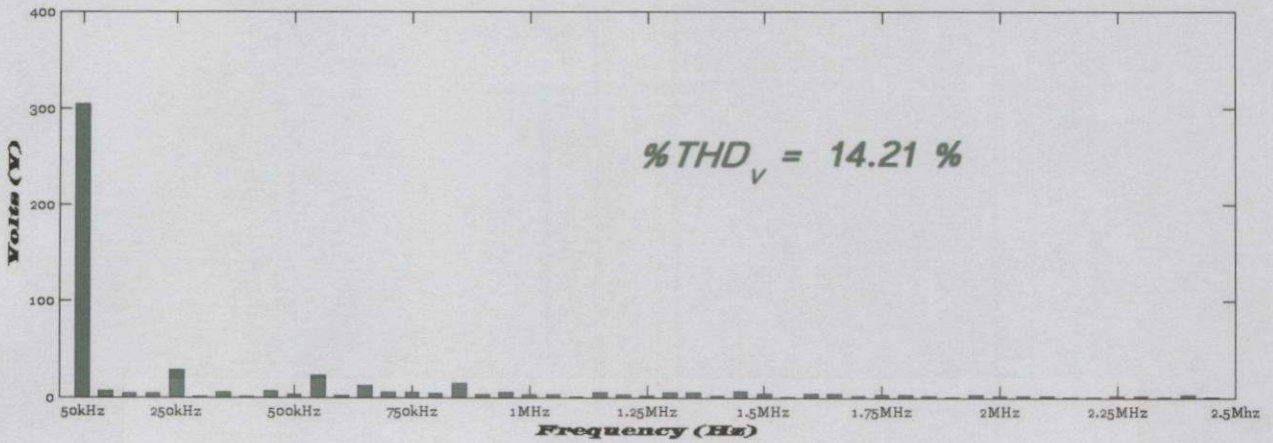
(ก.)



(ข.)

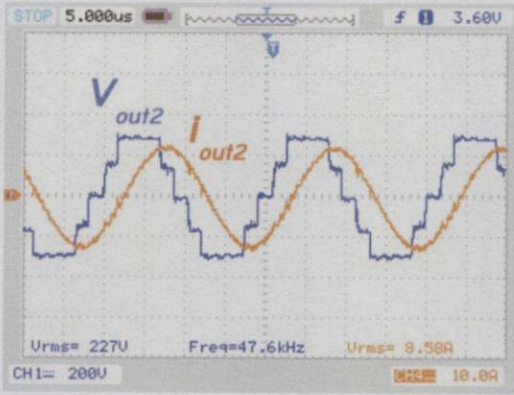
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่1 (200V/div , 10A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

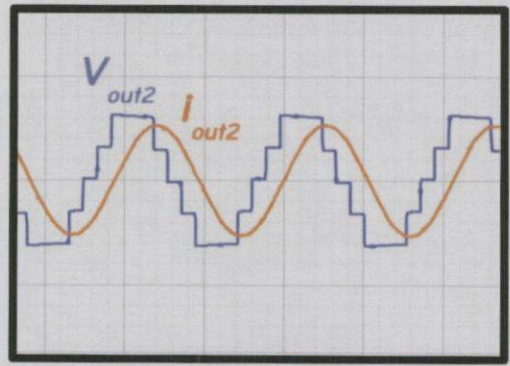


รูปที่ 4.8 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของแรงดัน (ก.) และกระแส (ข.) จากชุดโหลดชุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

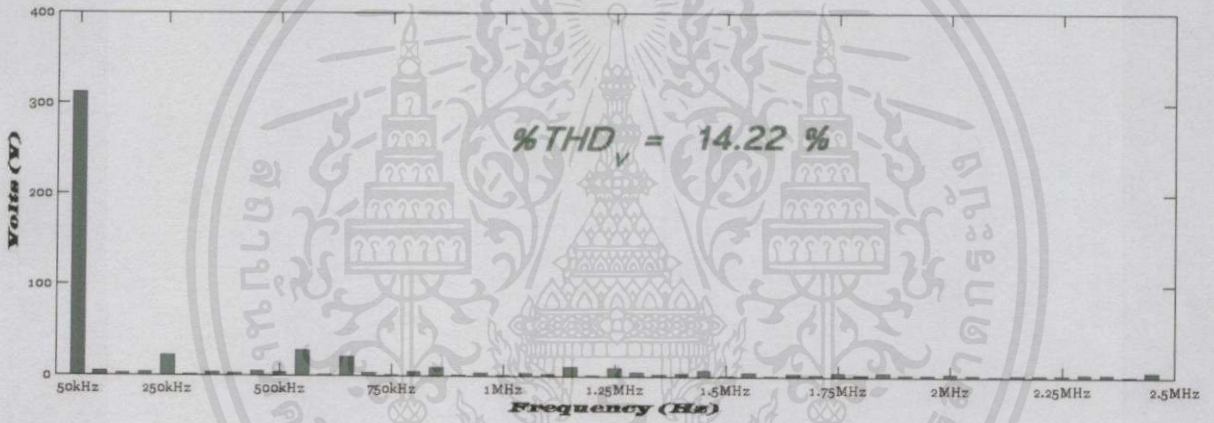


(ก.)

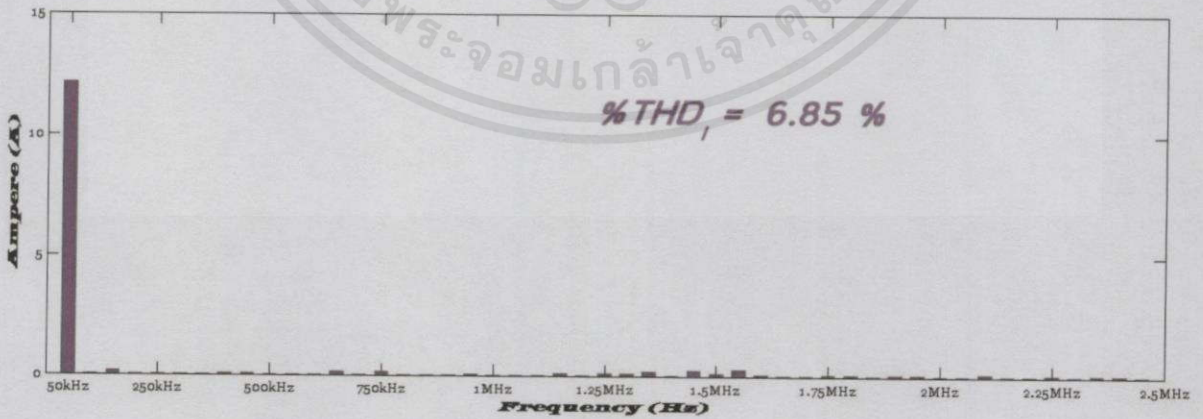


(ข.)

รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง



(ก.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา (ข.) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของแรงดัน (ก.) และกระแส (ข.) จากชุดโหลดชุดที่ 2

จากผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสของชุดโพลต์ทั้งสองที่ระดับแรงดันอินพุตใช้งาน คือ 220 โวลต์ จะเห็นได้ว่าด้วยความเป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) นั้นจะทำให้มีค่าความผิดเพี้ยนรวมฮาร์มอนิกส์ของแรงดันจะน้อยกว่า เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป และด้วยความเป็นอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์ทำให้กระแสขาออกมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเป็นผลให้มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ที่ค่อนข้างจะน้อย เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป

4.4 การทดสอบการทำงาน และประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้น จะได้ทำการวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้า และอุณหภูมิของเข้าลอมทั้งสองเข้า โดยจะทำการทดสอบที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันทั้งหมดห้ามุม ซึ่งในแต่ละมุมจะมีกำลังไฟฟ้าขาออกที่แตกต่างกันไป และในการวัดประสิทธิภาพทางไฟฟ้าจะทำได้โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสขาเข้า และขาออกมาทำการคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้า และนำมาคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพทางไฟฟ้างดสมการที่ 4.3

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.3)$$

โดยที่ค่า η คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า
 P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าขาเข้า
 P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าขาออก

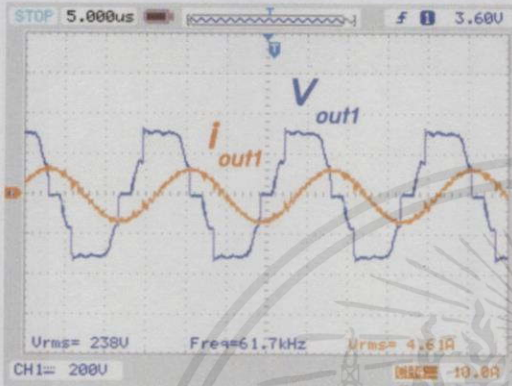
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน และกระแสมีค่าเท่ากับ 40 องศา

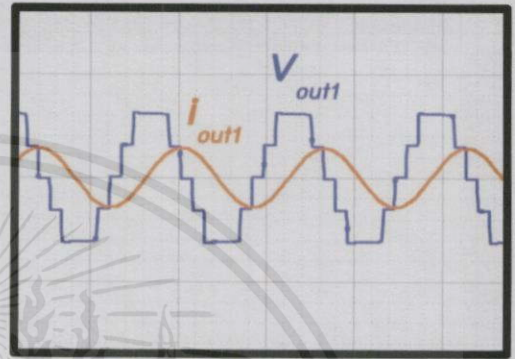
กำลังขาเข้ารวม 1344 W

ชุดโหลดที่ 1

กำลังขาออก 584.20 W



(ก.)

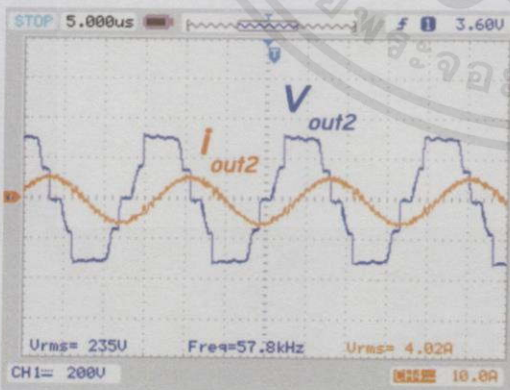


(ข.)

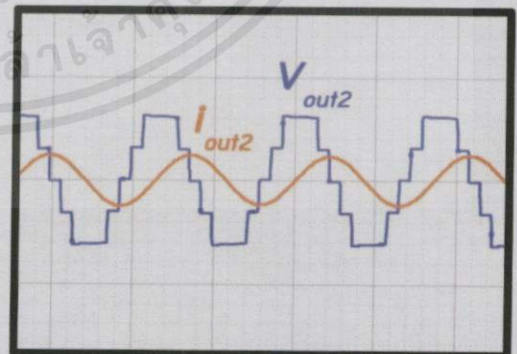
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่ 1 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 40 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ชุดโหลดที่ 2

กำลังขาออก 385.8 W



(ก.)



(ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

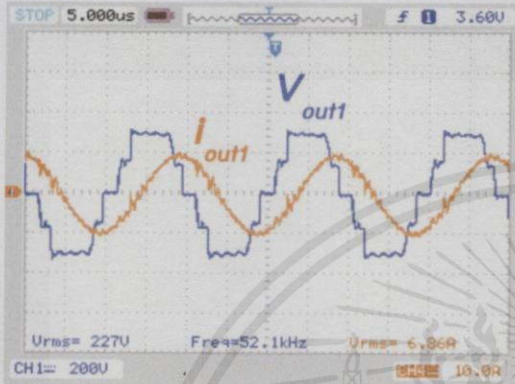
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหลดชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 40 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ที่มุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน และกระแสมีค่าเท่ากับ 30 องศา

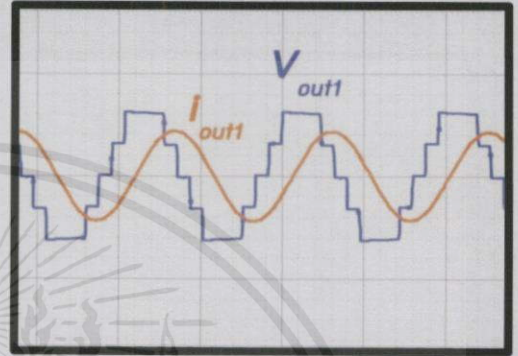
กำลังขาเข้ารวม 1818 W

ชุดโพลต์ที่ 1

กำลังขาออก 920.77 W



(ก.)

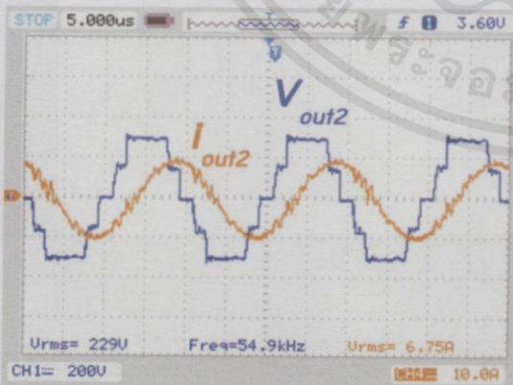


(ข.)

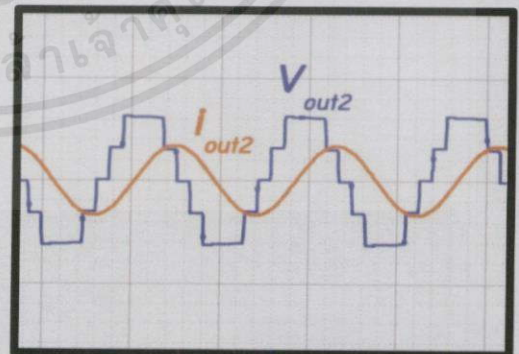
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโพลต์ชุดที่ 1 (200V/div, 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 30 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ชุดโพลต์ที่ 2

กำลังขาออก 739.54 W



(ก.)



(ข.)

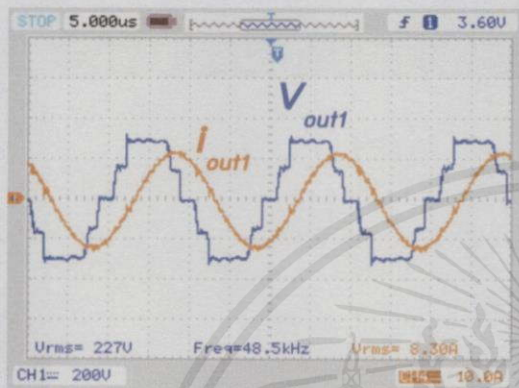
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่่ว่ารูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโพลต์ชุดที่ 2 (200V/div, 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 30 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ที่มุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน และกระแสมีค่าเท่ากับ 20 องศา

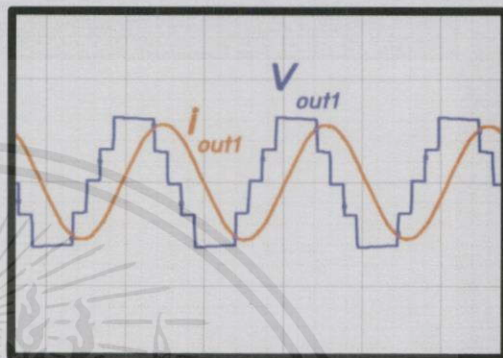
กำลังขาเข้ารวม 2687 W

ชุดโพลต์ที่ 1

กำลังขาออก 1370 W



(ก.)

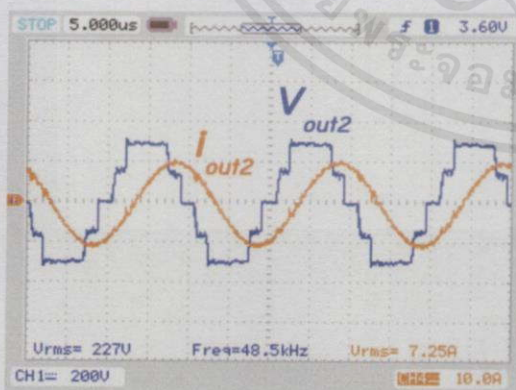


(ข.)

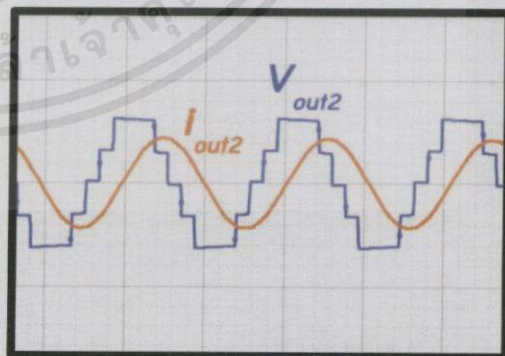
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโพลต์ชุดที่ 1 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 20 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ชุดโพลต์ที่ 2

กำลังขาออก 1014.1 W



(ก.)



(ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

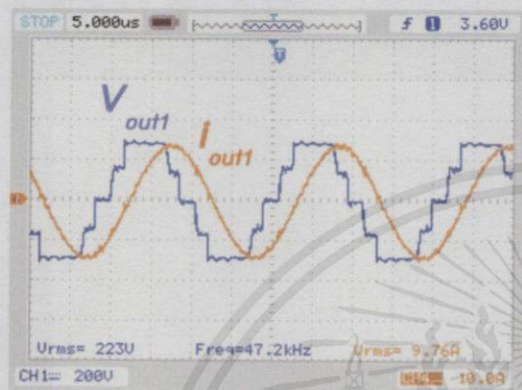
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโพลต์ชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 20 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ที่มุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน และกระแสมีค่าเท่ากับ 10 องศา

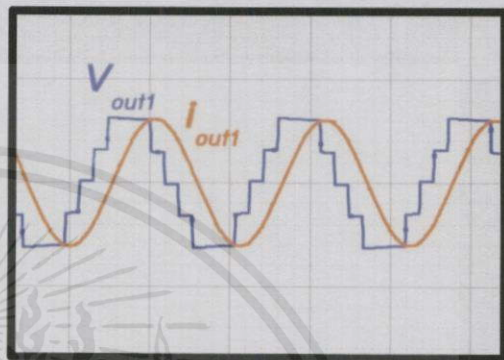
กำลังขาเข้ารวม 3399 W

ชุดโหนดที่ 1

กำลังขาออก 1565 W



(ก.)

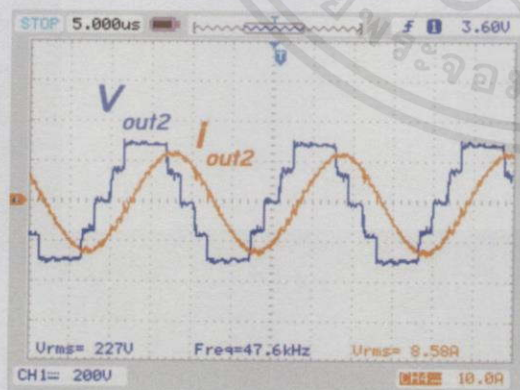


(ข.)

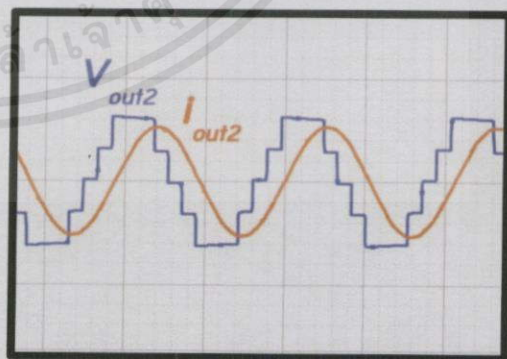
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหนดชุดที่ 1 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 10 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ชุดโหนดที่ 2

กำลังขาออก 1208.7 W



(ก.)



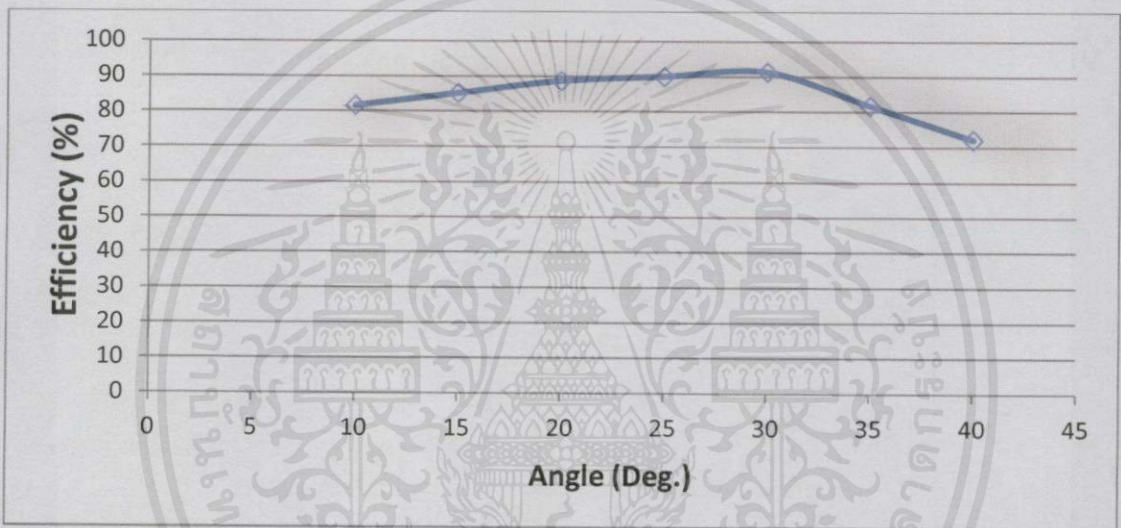
(ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาออกของโหนดชุดที่ 2 (200V/div , 10A/div) ที่มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 10 องศา (ก.) จากผลการทดลอง (ข.) จากการจำลอง

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำที่ค่ามุมต่างเฟสของกระแส และดันขาออกต่างๆของอินเวอร์เตอร์

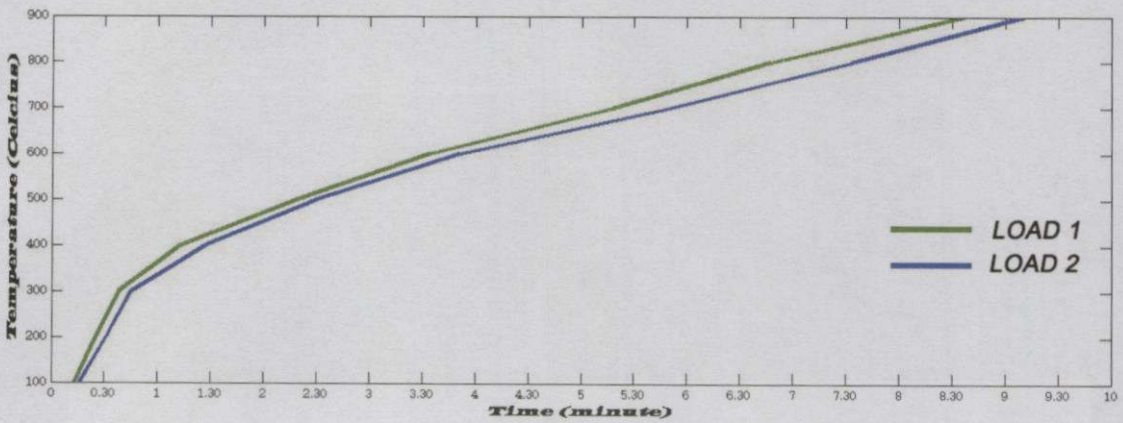
มุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออก (องศา)	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (%)
40	72.17
30	91.33
20	88.73
10	81.63



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพทางไฟฟ้า กับมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำที่มุมต่างเฟส 20 องศา

Temp (°C)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	P_{out1} (W)	P_{out2} (W)	Freq. (kHz)	Time1 (min)	Time2 (min)
100	311	8.545	2657.49	1365	993	53.1	00.13	00.16
200	311	8.605	2674.60	1377	996	52.6	00.25	00.31
300	311	8.673	2697.30	1385	1008.3	52.9	00.38	00.45
400	311	8.684	2700.72	1401	995.4	52.1	01.13	01.27
500	311	8.623	2681.75	1370	1010	50.7	02.19	02.30
600	311	8.591	2671.80	1369	1001.6	50.3	03.34	03.51
700	311	8.704	2706.94	1405	996.8	51.6	05.18	05.50
800	311	8.573	2666.20	1343	1022.7	51.4	06.47	07.33
900	311	8.614	2678.90	1378	1001.1	50.8	08.37	09.11



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของเบ้าหลอมกับเวลาของโหลดชุดที่ 1 และชุดที่ 2

จากผลการทดสอบพบว่ากระแสไฟฟ้าของทั้งสองชุดโหลดนั้นจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปรับมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกให้น้อยลง เนื่องจากอินเวอร์เตอร์นั้นทำงานเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์มากขึ้น เป็นผลโดยตรงให้กำลังไฟฟ้าขาออกมีปริมาณที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในทำนองเดียวกันยิ่งกำลังไฟฟ้าขาออกยิ่งมาก ก็จะส่งผลให้เวลาที่เบ้าหลอมใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้อยลงไปด้วย ดังตารางที่แสดงไว้ในข้างต้น โดยใช้ทองแดงซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ $1084.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ มาใช้เป็นวัสดุในการทดสอบ และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์จะแปรผกผันกับมุมต่างเฟสระหว่างกระแส แรงดันไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์

4.5 ภาพรวมการทำงานของวงจร

จากที่ได้ทำการทดสอบการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้นพบว่ารูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาเข้าของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.13, 4.16, 4.19, 4.22, 4.25 โดยขึ้นอยู่กับมุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน และกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเห็นการกระเพื่อมของกระแส ที่เกิดจากการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะเห็นว่ามีการสะท้อนกลับเป็นผลมาจากการทำงานในโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) ซึ่งจะมีการไหลกลับของกระแสคืนสู่แหล่งจ่าย

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดสอบการทำงานของวงจรที่ได้สร้างขึ้นเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการทดสอบนั้นแสดงให้เห็นถึงการทำงานภายใต้เงื่อนไขการนำกระแสในสถานะแรงดันศูนย์ของสวิตช์ นอกจากนั้นยังได้วิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกส์ของแรงดัน และกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ จากนั้นได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวงจรซึ่งพบว่ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 91.33%

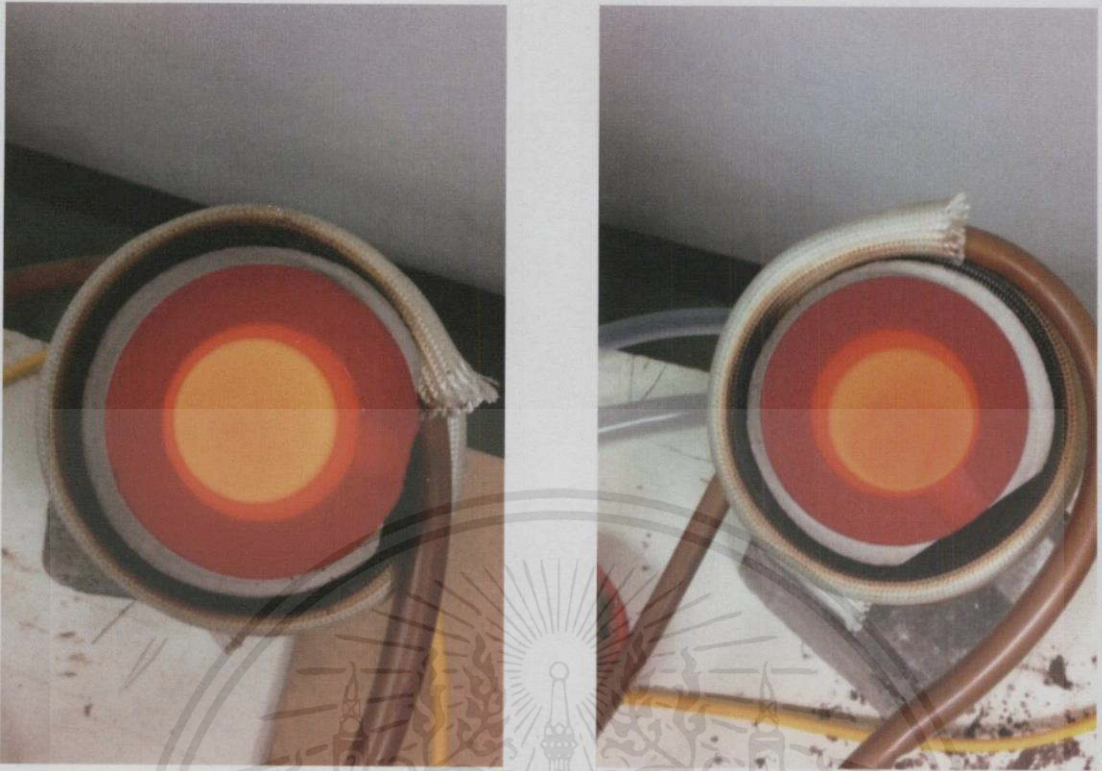
บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

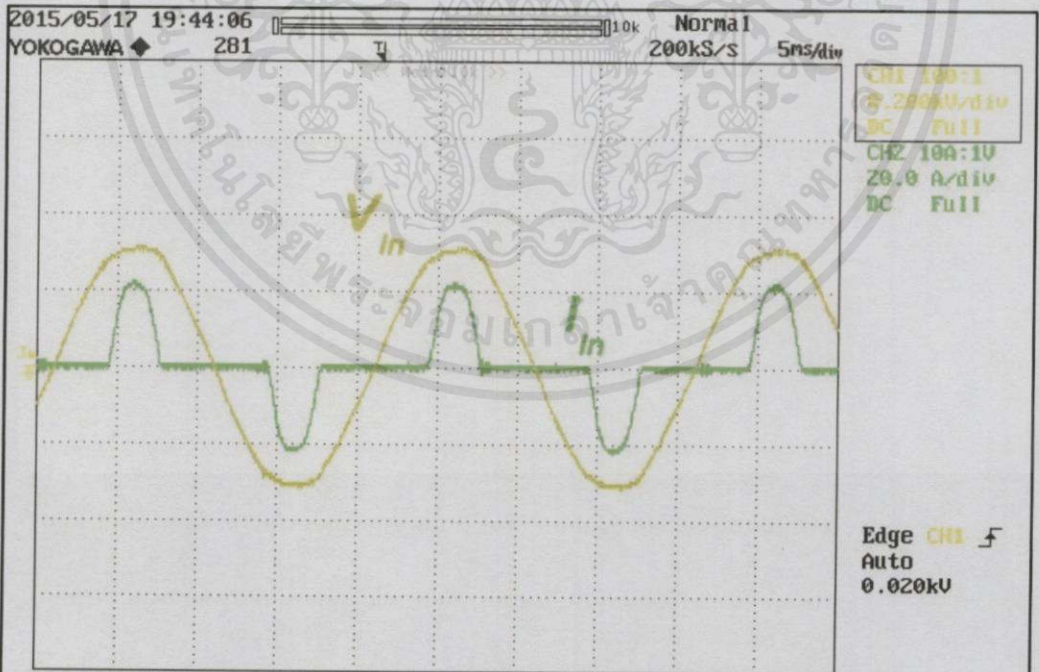
5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรที่ได้สร้างขึ้นพบว่าสวิตช์ทุกตัวสามารถทำงานแบบซอฟต์แวร์สวิตช์ กล่าวคือมอสเฟตทั้ง 12 ตัวมีการเริ่มนำกระแสภายใต้เงื่อนไขสภาวะแรงดันศูนย์ (ZVS) ได้เป็นอย่างดี และวงจรสามารถทำงานได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 91.33 % ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ ซึ่งจะมีข้อดีต่ออุปกรณ์สวิตช์คือ ในช่วงหยุดนำกระแสสวิตช์จะแบกรับภาระแรงดันตกคร่อมเพียงครั้งเดียวของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งจะเป็นผลดีต่ออุปกรณ์สวิตช์ รวมไปถึงค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของแรงดัน (THD_V) จะมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไป และด้วยความเป็นอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์นั้นส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของกระแส (THD_I) มีค่าน้อยลง ในส่วนของกำลังไฟฟ้าขาออกนั้นจะขึ้นอยู่กับมุมต่างเฟสระหว่างกระแส และแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการทำงานของสวิตช์กับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรอีกทอดหนึ่ง โดยยิ่งความถี่ในการทำงานของสวิตช์เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรมาก อุณหภูมิของเบ้าลอมก็ยิ่งสูงขึ้นเร็วเป็นผลมาจากกระแสที่สูงขึ้น สำหรับแรงดัน และกระแสขาเข้าในด้านของ(AC) และ(DC) นั้นจะเป็นดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าในส่วนของกระแส (DC) ขาเข้านั้นจะมีการกระเพื่อมของกระแสซึ่งเกิดจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยในส่วนของการกระเพื่อมที่เป็นขาลบนั้นเกิดมาจากการทำงานในโหมดที่ 3 และในโหมดที่ 12 ซึ่งเป็นโหมดรีเจนเนอเรทีฟที่มีการโอนถ่ายพลังงานคืนสู่แหล่งจ่ายของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

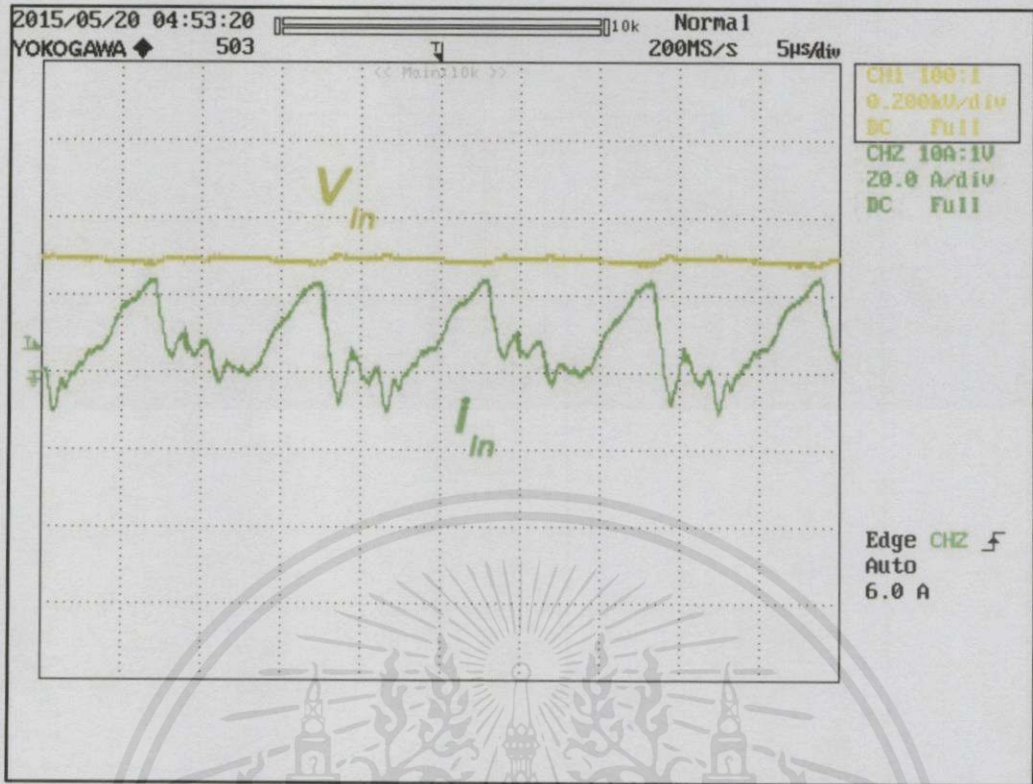


รูปที่ 5.1 เบ้าที่ 1 และเบ้าที่ 2 ขณะทำการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อนึ่ง ข้อมูลข้างต้นอาจเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้า

รูปที่ 5.2 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาเข้า (AC) ของวงจร (0.200kV/div , 20A/div)



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสขาเข้า (DC) ของวงจร (0.200kV/div, 20A/div)

5.2 ข้อเสนอแนะ

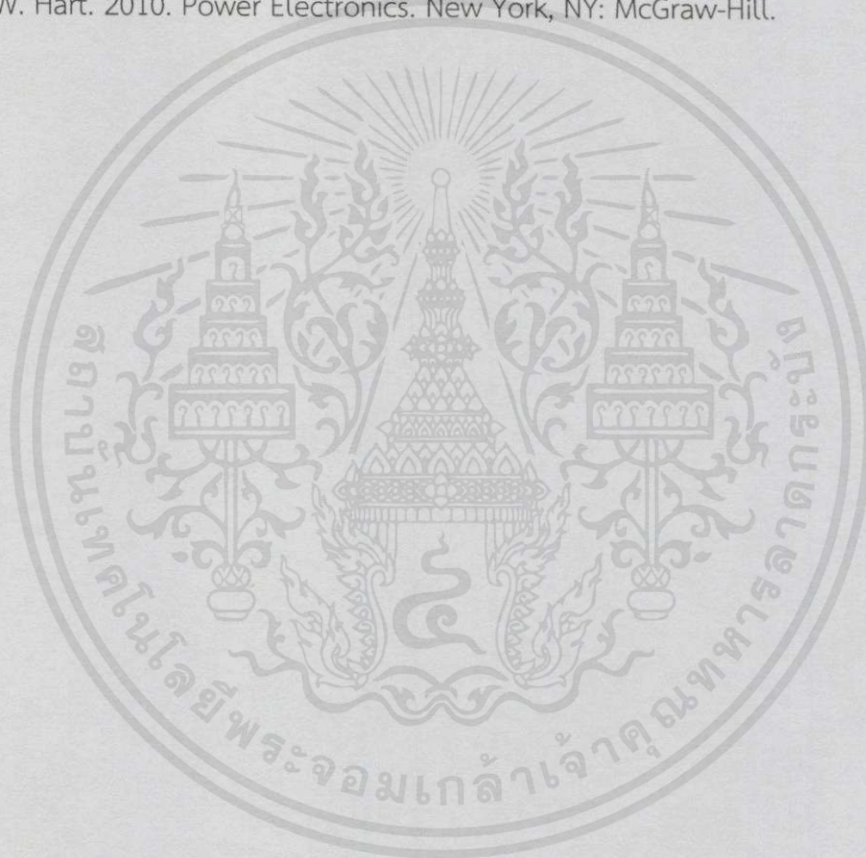
1. ในงานวิจัยนี้ยังขาดการเก็บผลการทดสอบที่อุณหภูมิมากกว่า 500°C เนื่องจากขาดแคลนเครื่องมือสำหรับการวัดอุณหภูมิที่มีพิสัยในการวัดสูงกว่า 500°C ดังนั้นการทดสอบจึงทำได้เพียงวัดค่าอุณหภูมิจนถึง 500°C เท่านั้น หลังจากนั้นจึงปล่อยให้อุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดหลอมเหลวของโลหะทดสอบ ซึ่งในที่นี้คือทองแดง ซึ่งหากมีเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่มีพิสัยสูงกว่านี้ก็จะทำให้โครงการนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

2. เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์จำพวกสารกึ่งตัวนำเป็นจำนวนมากดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเท่านั้น เนื่องจากหากนำไปใช้งานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงๆ อาจจะต้องมีการคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

3. ในงานวิจัยนี้ยังขาดการปรับปรุงในเรื่องผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) ที่เชื่อมต่อเข้าสู่ตัววงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งหากมีการต่อยอดในด้านนี้ก็จะเป็นการดียิ่งนักการคำนวณเนื่องจากคุณภาพกำลังไฟฟ้านั้นถือเป็นสิ่งสำคัญมากสิ่งหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. 2547. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง.
- [2] วทัญญู มีศรีสุข และอนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. 2556 “วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส 3 ระดับ แบบใหม่ที่มีการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์โดยใช้การเลื่อนเฟสที่ดับเบิลยูเอ็ม.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36. หน้า 367-370.
- [3] Daniel W. Hart. 2010. Power Electronics. New York, NY: McGraw-Hill.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์สำหรับการหลอมโลหะแบบ เหนี่ยวนำ

A Two-phase Two-output Five-level ZVS Resonant Inverter for Induction melting application

วัชร ละครวงษ์¹ วันเฉลิม เศรษฐกุลดี¹ สักดา แก้วสุทัศน์¹ สิริคุณ ตรีเทพประติมา¹ และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ดลทองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 Email: s4011376@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับซึ่งนำมาใช้สำหรับเครื่องหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำซึ่งสามารถจ่ายกำลังงานได้สองเอาต์พุตได้อย่างพร้อมกัน โดยใช้หลักการเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและสัญญาณควบคุมที่ดับลิวดิเอ็มแบบที่มีกระแสเฟสเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้ของวงจร โดยจะได้ทำการอธิบายการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอ การจำลองผล รวมไปถึงการออกแบบเครื่องหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ โดยเครื่องหลอมโลหะดังกล่าวได้ถูกสร้างและทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ พิกัดกำลังไฟฟ้รวมเท่ากับ 3 กิโลวัตต์ จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าเครื่องหลอมโลหะสามารถหลอมทองแดงได้ตามขอบเขตงานสวิตช์ทุกตัวในวงจรยังสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะแรงดันศูนย์ (ZVS) ซึ่งนำไปสู่การลดความสูญเสียอันเนื่องมาจากการสวิตช์ รวมถึงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ซึ่งถูกลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเนื่องจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับโดยมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดอยู่ที่ 91.33%

คำสำคัญ: สภาวะแรงดันศูนย์, อินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ

Abstract

A paper introduces a multi-level inverter for using in induction melting application that can provide two-output units simultaneously. The series resonant principle and phase-shift pulse width modulation (PSPWM) signals are used for controlling the output power. The operation principle, simulation, and design of proposed inverter are shown in this senior project. The prototype of inverter was built and tested at input voltage of 220 V, line frequency of 50 Hz and rated power of 3kW. From the experiments demonstrated in laboratory, the induction melting can melt copper according to the scopes of this project. In addition, all switches can operate under ZVS condition that lead to reduce the switching losses and the voltage across switches is

also decreased to a half of input voltage due to the use of multi-level inverter. The maximum efficiency of prototype is 90%.

Index Term: Zero Voltage Switching (ZVS), Multi-level inverter

1. บทนำ

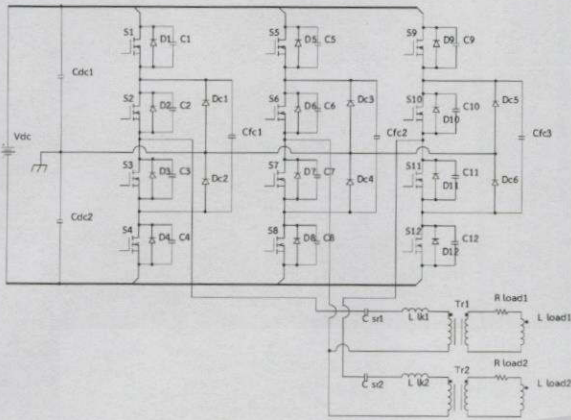
การหลอมโลหะด้วยวิธีการเหนี่ยวนำเป็นวิธีการให้ความร้อนที่ใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีข้อดีอย่างมากเมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพที่สูง มีการสูญเสียที่ต่ำ ให้ความร้อนได้รวดเร็วกว่าเป็นต้น โดยในบทความนี้จะกล่าวถึง การใช้อินเวอร์เตอร์แบบสองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์มาใช้ในการหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

2. วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และการควบคุมโดยวิธีการล็อกมุมเฟส (Phase Lock-loop)

วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์จะมีโครงสร้างแบบเดียวกันกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ โดยวงจรจะประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับชนิด NPC (Neutral-point Clamped) จำนวน 3 กิ่ง แต่ละกิ่งจะประกอบไปด้วยสวิตช์ซึ่งใช้ MOSFET จำนวน 4 ตัว ปลายอ็อกปาซิเตอร์ 1 ตัว และไดโอดแค้มป์จำนวน 2 ตัว โดยด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์จะมีตัวเก็บประจุแบ่งแรงดัน (Cdc1 และ Cdc2) เพื่อทำให้เกิดความเป็นสามระดับของแรงดันเอาต์พุตเทียบกับจุดนิวทรัล (Neutral point) ของอินเวอร์เตอร์ ทั้งนี้แรงดันเอาต์พุตแบบห้าระดับจะเกิดจากแรงดันเอาต์พุตระหว่างเฟสของอินเวอร์เตอร์ (Phase to phase output voltage) ทางด้านโหนดจะประกอบไปด้วย หม้อแปลงความถี่สูง, เบ้าหลอมโลหะ และตัวเก็บประจุเพื่อให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ ดังรูปที่ 1

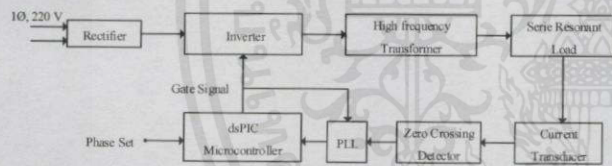
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์ สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์

โดยจะใช้การควบคุมมอดูเลตเฟสระหว่างกระแสและแรงดันที่ค่ามอดูเลตเฟสใดค่าหนึ่งที่ตลอดการทำงาน (Phase Lock-loop) เพื่อควบคุมความถี่ในการทำงานของสวิตช์ใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์เสมอโดยทางทฤษฎีค่ากำลังเอาต์พุตสูงสุดจะอยู่ที่มอดูเลตเฟสเท่ากับศูนย์ของสวและกำลังจะลดลงเมื่อมอดูเลตเฟสเพิ่มขึ้น (ในงานวิจัยใช้ค่าสุดท้าย 10 องศาเพื่อความปลอดภัย)ดังรูปที่ 2



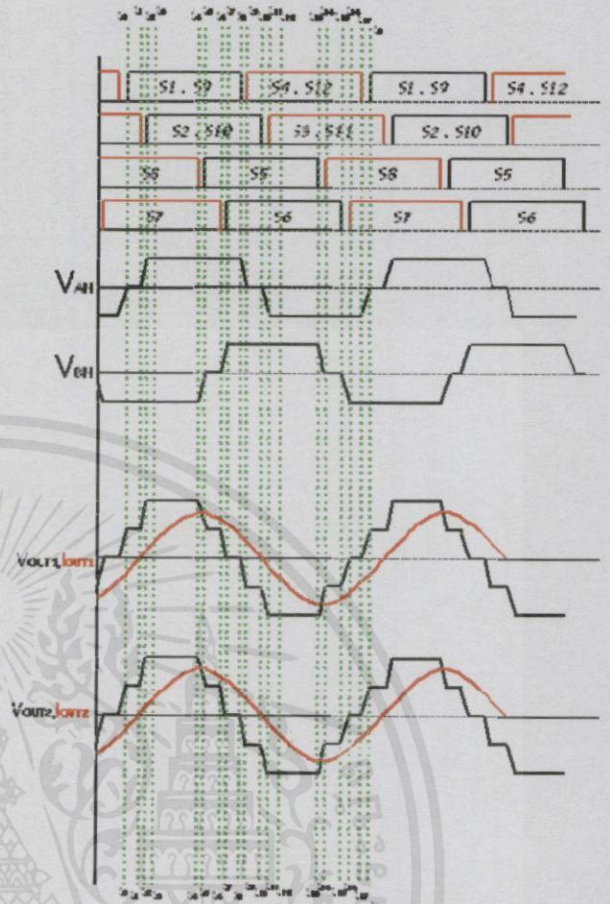
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบทั้งหมดของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและการควบคุม

3. การวิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจร

สำหรับโหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์นั้นจะสามารถแบ่งได้ทั้งหมด 18 โหมดการทำงานในหนึ่งไซเคิลดังรูปที่ 3

โหมดการทำงานที่ 1 ($t_0 - t_1$)

ในโหมดการทำงานนี้กระแส i_e จากโหนดชุดแรกจะไหลผ่านไดโอดแคสลับปัดล่างคือ ไดโอด D_{c1} , สวิตช์ S_4 ของกิ่งแยก และไดโอดแฝงของสวิตช์ S_1 และ S_2 ของกิ่งร่วม ในขณะที่กระแส i_e จากโหนดชุดที่สองจะไหลผ่าน ไดโอดแคสลับปัดล่างของกิ่งแยกอีกกิ่งหนึ่งคือ ไดโอด D_{c2} , สวิตช์ S_{10} ของกิ่งแยกอีกกิ่งหนึ่ง และ ไดโอดแฝงของสวิตช์ S_9 และ S_8 โดยแรงดันตกคร่อมโหนดทั้งสองชุดจะเท่ากับ $\frac{V_{dc}}{2}$



รูปที่ 3 ไดอะแกรมเวลาโหมดการทำงานของวงจร

โหมดการทำงานที่ 2 ($t_1 - t_2$)

ที่เวลา t_1 ทั้งสวิตช์ S_1 และ S_2 จะหยุดนำกระแส กระแส i_e ชาร์จ C_1 และดีสชาร์จ C_1 ในกิ่งเดียวกันผ่านฟลายอิงคาปาซิเตอร์ C_{fc} ในโหนดชุดแรก ในขณะที่กระแส i_e ชาร์จ C_2 และดีสชาร์จ C_2 ในกิ่งเดียวกันผ่านฟลายอิงคาปาซิเตอร์ C_{fc} ในโหนดชุดที่สอง ไดโอดแฝงของสวิตช์ S_1 และ S_2 ในกิ่งร่วมยังคงนำกระแสทั้ง i_e และ i_e เหมือนการทำงานในโหมดการทำงานที่ 1 โดยแรงดันตกคร่อมของโหนดทั้งสองชุดจะเปลี่ยนเป็นเท่ากับ V_{dc} ในโหมดการทำงานนี้

โหมดการทำงานที่ 3 ($t_2 - t_3$)

เรียกโหมดการทำงานนี้ว่า “โหนดรีเจนเนอเรทีฟ” กระแส i_e ไหลผ่าน ไดโอดแฝง D_{10}, D_9, D_8 และ D_7 ในโหนดชุดแรก กระแส i_e ไหลผ่าน ไดโอดแฝง D_4, D_3, D_2 และ D_1 ในโหนดชุดที่สอง โดยโหมดการทำงานนี้จะสิ้นสุดเมื่อทั้งกระแส i_e และ i_e เท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อมของโหนดทั้งสองชุดในโหมดการทำงานนี้เท่ากับ V_{dc}

โหมดการทำงานที่ 4 ($t_3 - t_4$)

สวิตช์ S_9, S_8, S_7 และ S_6 จะเริ่มนำกระแส i_e ไปสู่โหนดชุดแรก สวิตช์ S_1, S_2, S_3 และ S_4 จะเริ่มนำกระแส i_e ไปสู่โหนดชุดที่สอง สวิตช์ $S_5,$

s_7, s_8, s_9, s_6 และ s_{10} จะทำงานแบบ ZVS และแรงดันตกคร่อมโพลด์ทั้งสองชุดยังคงเท่ากับ V_{dc}

โหมดการทำงานที่ 5 ($t_4 - t_5$)

ที่เวลา t_4 สวิตช์ s_8 หยุดนำกระแส ประจุในตัวเก็บประจุแผ่น C_2 จะถูกขนถ่ายไปยัง C_1 ผ่านฟลายอิงคาปาซิเตอร์ Crc_2 ดังนั้นแรงดันตกคร่อมโพลด์ทั้งสองชุดจะลดลงเหลือ $\frac{V_{dc}}{2}$ โดยกระแส i_1 และ i_2 ยังคงไหลในทิศทางเดิม

โหมดการทำงานที่ 6 ($t_5 - t_6$)

หลังจากการขนถ่ายประจุระหว่างสวิตช์ s_7 กับ s_8 ในกึ่งร่วมเสร็จสิ้นแล้ว s_8 จะหยุดนำกระแส กระแส i_1 และ i_2 จึงไหลผ่านสวิตช์ s_7 และไดโอดแอสซิมเมตริก D_1 แทน

โหมดการทำงานที่ 7 ($t_6 - t_7$)

ที่เวลา t_6 สวิตช์ s_7 หยุดนำกระแส จากนั้นกระแส i_1 และ i_2 จะชาร์จ C_1 และดิสชาร์จ C_2 ในกึ่งร่วมโดยผ่านฟลายอิงคาปาซิเตอร์ Crc_2 ดังนั้นแรงดันตกคร่อมโพลด์จึงลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อการขนถ่ายประจุเสร็จสิ้น โดยกระแส i_1 และ i_2 ยังคงไหลในทิศทางเดิมแต่มีขนาดลดลง

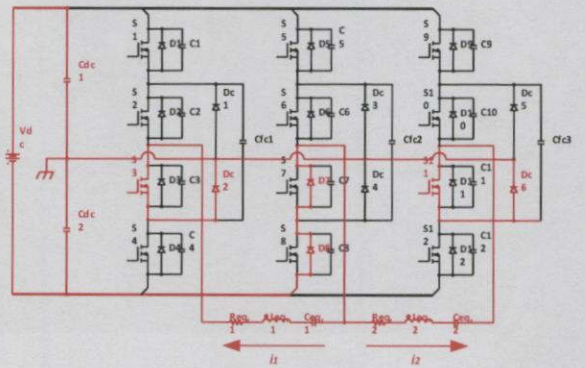
โหมดการทำงานที่ 8 ($t_7 - t_8$)

ที่เวลา t_7 จะไม่มีแรงดันตกคร่อมโพลด์ โดยกระแส i_1 และ i_2 ยังคงไหลอย่างต่อเนื่องเนื่องจากพลังงานที่ถูกเก็บสะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำของโพลด์แต่ละชุด สำหรับโพลด์ชุดแรก กระแส i_1 จะไหลผ่านสวิตช์ s_7, s_8 และไดโอดแฝงในสวิตช์อีกสองตัวคือ D_4 และ D_6 ในขณะที่กระแส i_2 จะไหลผ่านสวิตช์ s_8, s_{10} และไดโอดแฝงในสวิตช์อีกสองตัวคือ D_5 และ D_9 สำหรับโพลด์ชุดที่สอง

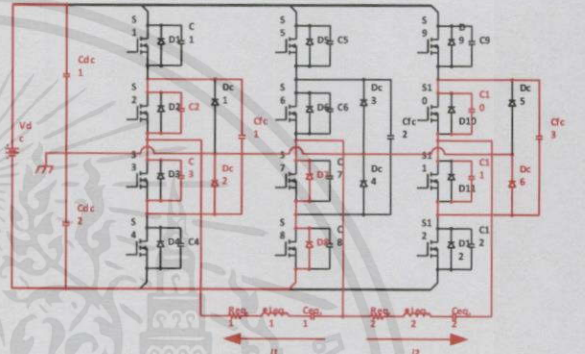
โหมดการทำงานที่ 9 ($t_8 - t_9$)

ที่เวลา t_8 สวิตช์ s_8 และ s_9 หยุดนำกระแส ดังนั้นกระแส i_1 จะชาร์จตัวเก็บประจุแผ่น C_1 และดิสชาร์จ C_2 ในกึ่งเดียวกันผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง Crc_1 สำหรับโพลด์ชุดแรก ในขณะที่กระแส i_2 จะชาร์จตัวเก็บประจุแผ่น C_2 และดิสชาร์จ C_1 ในกึ่งเดียวกันผ่านตัวเก็บประจุฟลายอิง Crc_2 สำหรับโพลด์ชุดที่สอง เมื่อการขนถ่ายประจุเสร็จสิ้นลง แรงดันตกคร่อมโพลด์ทั้งสองจะกลายเป็น $-\frac{V_{dc}}{2}$ เมื่อสิ้นสุดโหมดการทำงานนี้

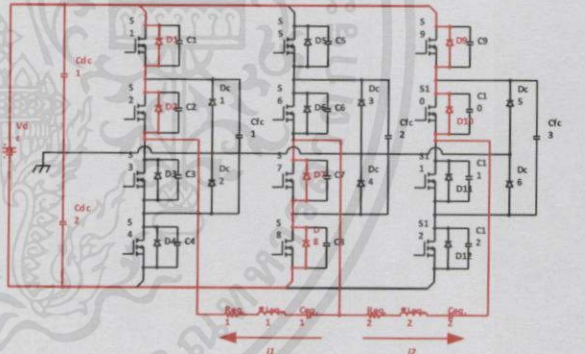
ในโหมดการทำงานที่ 10-18 จะมีลำดับการทำงานที่คล้ายคลึงกับในโหมดการทำงานที่ 1-9 แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เครื่องหมายของแรงดัน และกระแสจะกลับกันกับโหมดการทำงานที่ 1-9 อยู่



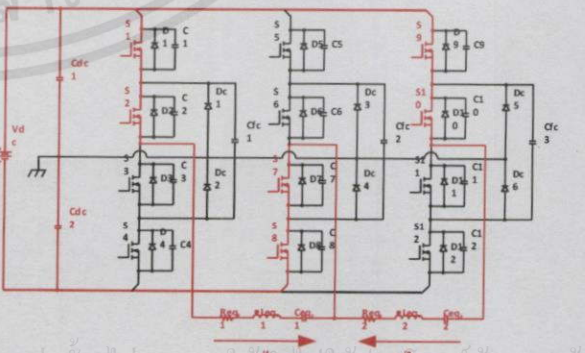
(a)



(b)



(c)



(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4 โหมดการทำงาน (a) โหมด 1, (b) โหมด 2, (c) โหมด 3, (d) โหมด 4

4. ผลการจำลอง และจากการทดสอบจริง

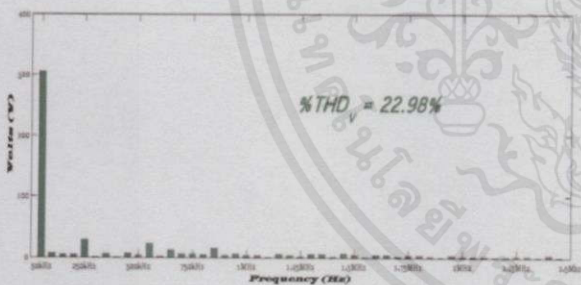
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยแรงดันขาเข้า 311 Vdc และได้ออกแบบชุดโพลให้เป็นชุดเบ้าหลอมโลหะแบบเหนียวว่ามีค่าพารามิเตอร์สมมูลทางไฟฟ้าดังนี้ $Leq1 = 270.1 \mu H$, $Leq2 = 287.6 \mu H$, $Req1 = Req2 = 12 \Omega$ $Ceq1 = 0.04 \mu F$, $Ceq2 = 0.04 \mu F$ โดยได้ผลการทดสอบการทำงานจริงเทียบกับผลจากการจำลองดังนี้



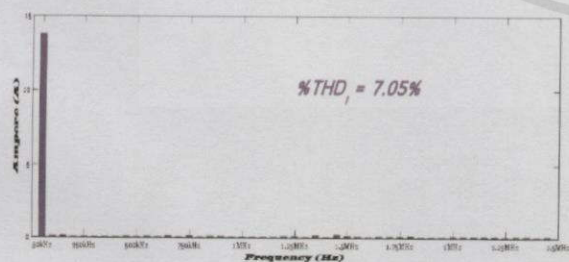
รูปที่ 5 ZVSเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการทดสอบจริง



รูปที่ 6 แรงดันและกระแสขาออกเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับการทดสอบจริง



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 7 ฮาร์มอนิกสเปกตรัมของแรงดัน (ก.) และกระแส (ข.) จากชุดโพลาร์กมิโคจาทังสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน จะเห็นได้ว่าด้วยความเป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) นั้นจะทำให้มีค่าความผิดเพี้ยนรวมฮาร์มอนิกของแรงดันจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป และด้วยความเป็นอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์ทำให้กระแสขาออกมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ ซึ่งเป็นผลให้มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป

5. สรุป

วงจรอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถทำงานภายใต้สภาวะเงื่อนไขแรงดันศูนย์ได้เป็นอย่างดี กล่าวคือสวิตช์ทุกตัวนั้นมีการนำกระแสด้วยสภาวะ ZVS และมีผลการทดสอบที่มีความใกล้เคียงกับผลจากการจำลองเป็นอย่างมาก รวมถึงค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของแรงดัน (THD_v) จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์ทั่วไป และด้วยความเป็นอินเวอร์เตอร์แบบเรโซแนนซ์นั้นส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมทางฮาร์มอนิกของกระแส (THD_i) มีค่าน้อยลง ในส่วนของกำลังไฟฟ้าของเอาต์พุตนั้นจะขึ้นอยู่กับมุมต่างเฟสของกระแสกับแรงดันที่ทำการการสวิตช์ และยิ่งความถี่ในการทำงานของสวิตช์เข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรมาก อุณหภูมิของเบ้าหลอมก็ยิ่งสูงขึ้นเร็วเป็นผลมาจากกระแสที่สูงขึ้นนั่นเอง

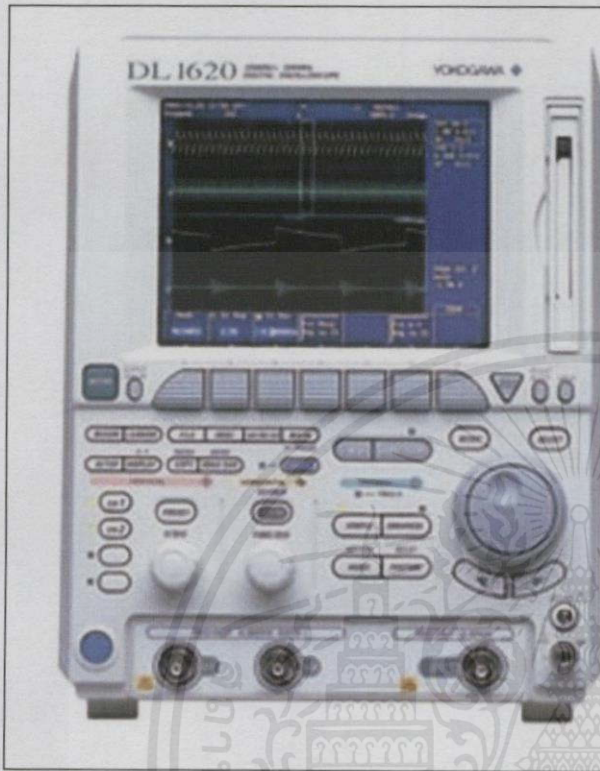
เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ ชันเงิน และวุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์. 2547. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินติ้ง.
- [2] วทีญญ มิสริสุข และอนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. 2556. “วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส 3 ระดับแบบใหม่ที่มีการสวิตช์ด้วยแรงดันศูนย์และกระแสศูนย์โดยการใช้การเลื่อนเฟสที่ดับเบิลยูเอ็ม.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36. หน้า 367-370.
- [3] Daniel W. Hart. 2010. Power Electronics. New York, NY: McGraw-Hill.

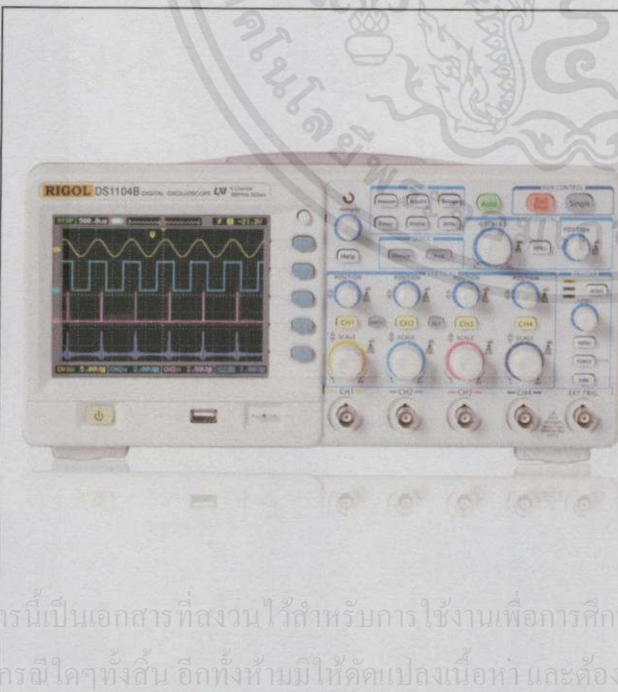


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลอุปกรณ์การวัด

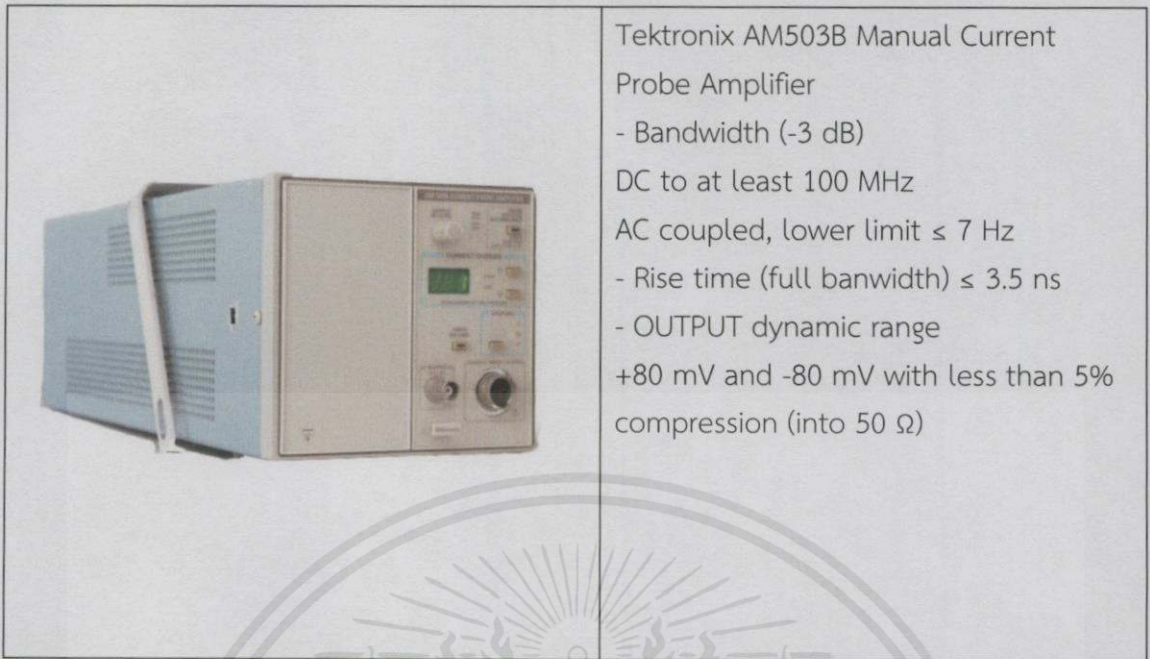


Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)
รุ่น DL1620 (2 Channel)
รายละเอียด 200 MHz Analog
- Bandwidth 200 MS/s on two channel
- 8 bit vertical resolution
- DC to 30 Mhz, 850V (DC+AC peak) 2% DC accuracy,
- Internal low pass filter



Digital Oscilloscope (Rigol)
รุ่น DS1104B
- Bandwidth 100 MHz
- 4 channels + external trigger
- 16kpts (half channel) , 8 kpts (each channel)
- 5.7" TFT QVGA(320x240) with 64K color LED backlight display
- Trigger mode : Edge, Video, Pulse Width, Alternate, pattern trigger across 4 analog channels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pintek DP-25 Differential Probe

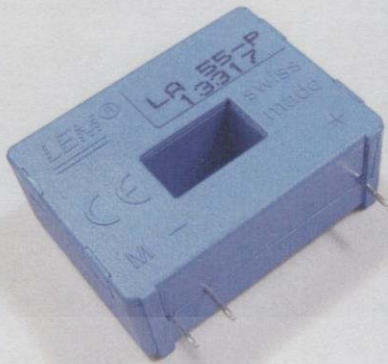
- Model number p DP-25
- Bandwidth 25MHz
- Attenuation 200x , 50x , 20x
- Connector Type BNC
- Maximum Common Mode Input Voltage $\pm 700V$ dc



Digital Multi Meter (SANWA) รุ่น CD772

- Bandwidth 40 - 400Hz (sine wave)
- 3 digit 4000-count Backlit LCD display
- Absolute maximum ac current measurement 15A
- Absolute maximum ac voltage measurement 1000V
- Absolute maximum dc current measurement 15A
- Absolute maximum dc voltage measurement 1000V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



LEM LA55-P

- Primary nominal r.m.s current 50A
- Primary current measuring range 0.. ±70A
- Secondary nominal r.m.s. current 50 mA
- Conversion ratio 1:1000
- Supply Voltage (±5%) ±12-15 V



Raytek Raynger MX4+NI Infrared Thermometer

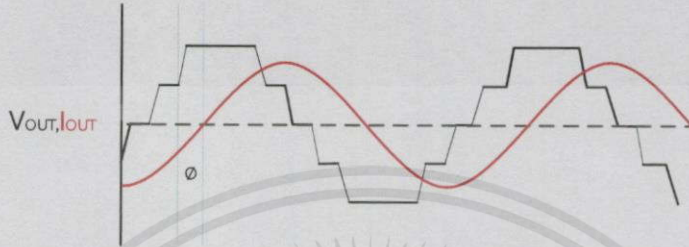
- Temperature Range -30°C to 900°C (-25°F to 1600°F)
- Response Time 250 mS (95% of reading)
- Ambient Operating Temp. 0°C to 50°C (32°F to 122°F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"



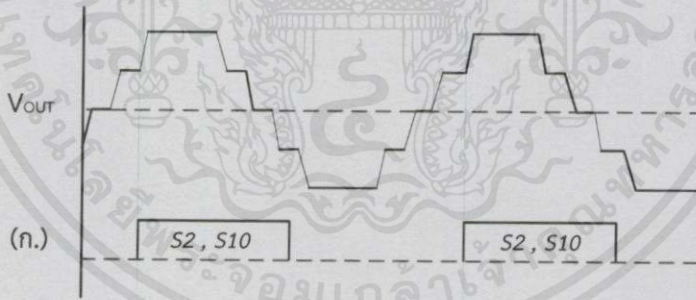
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมวงจรถวลอินเวอร์เตอร์สองเฟสสองเอาต์พุตห้าระดับแบบเรโซแนนซ์สวิตช์ด้วยแรงกันศูนย์สำหรับการลอมโหละแบบเหนี่ยวนำนั้นจะใช้การควบคุมแบบล๊อคคัมเฟส (Phase Lock-loop) ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมโดยทำให้มุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน และกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์นั้นคงที่ตลอดการทำงาน

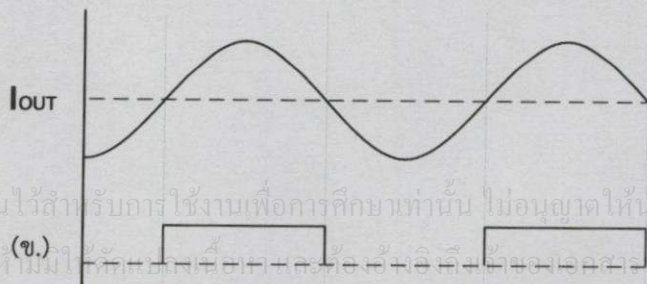


รูปที่ ค.1 มุมต่างเฟส (ϕ) ระหว่างแรงดัน และกระแสขาออกอินเวอร์เตอร์

โดยการวัดมุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน และกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมนั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันขาออกซึ่งจะอยู่ในรูปของสัญญาณควบคุมสวิตช์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ และสัญญาณกระแสซึ่งจะถูกวัดโดยตัว Current transducer แบบ Hall effect และนำมาผ่านวงจร Zero Crossing Detector โดยจะได้สัญญาณพัลส์ดังในรูปที่ ค.3



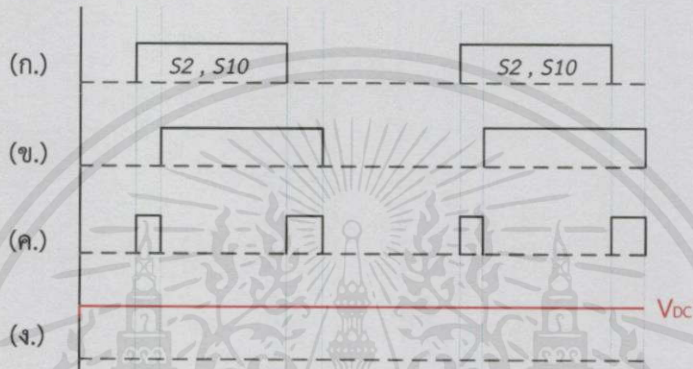
รูปที่ ค.2 รูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ และ (ก.) สัญญาณควบคุมสวิตช์จากไมโครคอนโทรลเลอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้เพื่อการค้าหรือเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.3 รูปคลื่นกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์ และ (ข.) รูปคลื่นสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector

จากนั้นสัญญาณทั้งสองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันผ่าน Exclusive – OR Gate (XOR Gate) ซึ่งอยู่ในไอซีเบอร์ 7486 โดยสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบจะเป็นดังรูปที่ ค.4 (ค.) และจะถูกนำมาผ่านวงจร RC filter เพื่อให้กรองสัญญาณให้อยู่ในรูปของแรงดันกระแสตรง และถูกนำไปใช้โตนการผ่าน A/D Converter เพื่อใช้เป็นตัวแปรต้นกระบวนการควบคุมในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป



รูปที่ ค.4 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก.) สัญญาณควบคุมสวิตซ์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ และ (ข.) รูปคลื่นสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (ค.) สัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบ (ง.) สัญญาณที่ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์

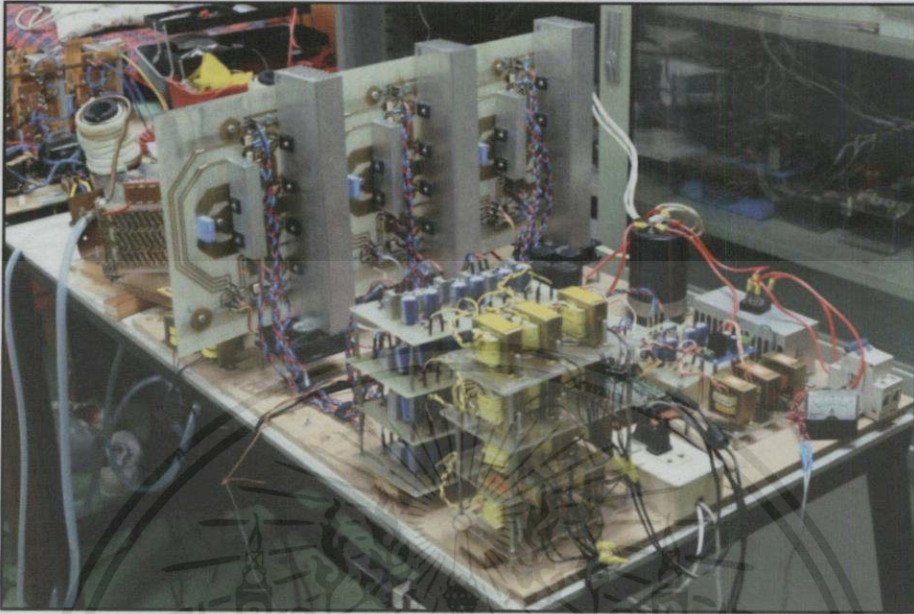
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.
ภาพโครงการโดยรวมของงานวิจัย และภาพต้นแบบงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

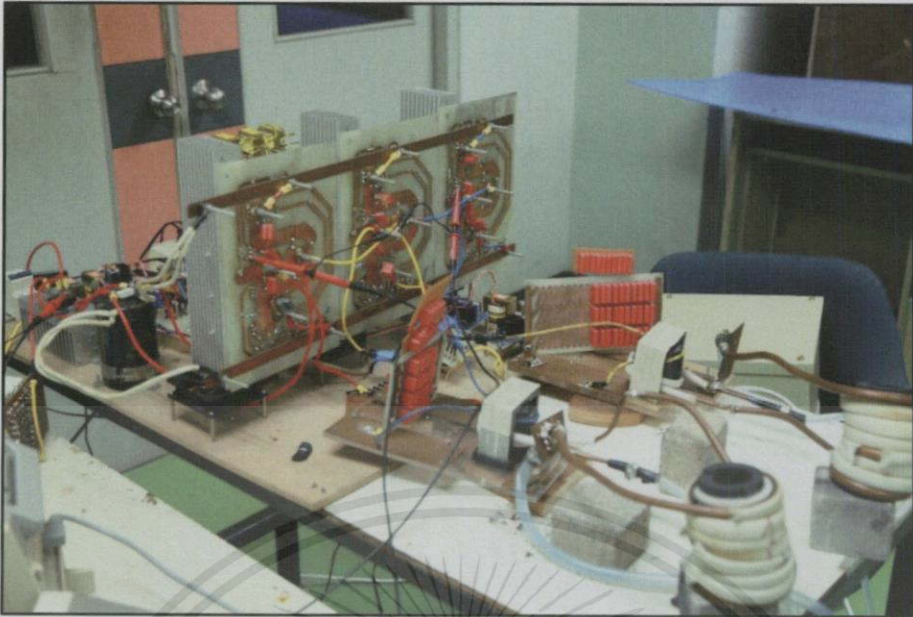
ภาพโครงงานโดยรวมของงานวิจัย



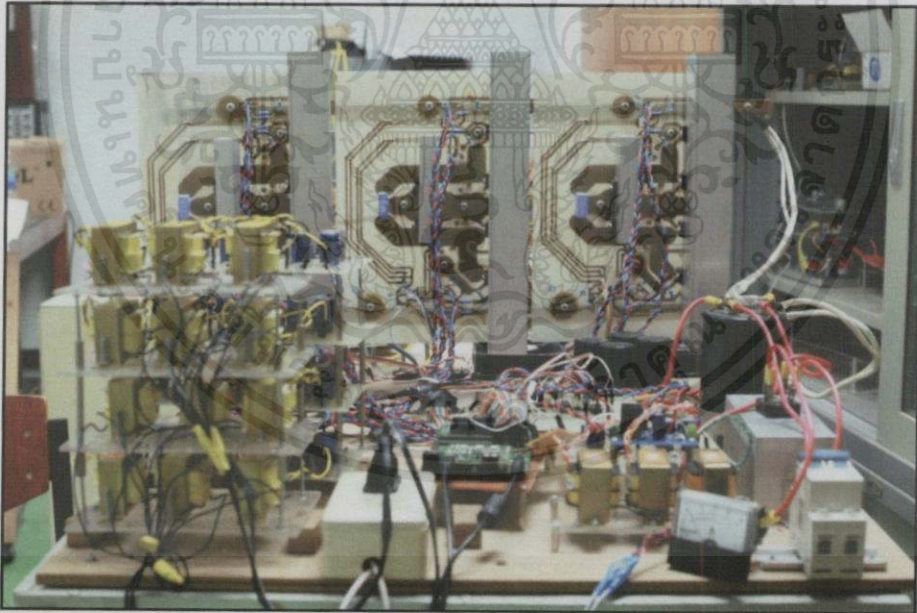
ภาพโครงงานโดยรวม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภาพโครงงานโดยรวมนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพโครงงานโดยรวม



ภาพโครงงานโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงความถี่สูงในชุดโพลที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น ได้ทำการทดสอบวัดค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทั้งในกรณีเปิดและปิดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$L_{11} = L_{lkP} + L_m \quad (จ.1)$$

$$L_{22} = L_{lks} + \frac{L_m}{n^2} \quad (จ.2)$$

$$L_{11,S} = L_{lkP} + \frac{L_m n^2 L_{lks}}{L_m + n^2 L_{lks}} \quad (จ.3)$$

$$L_{22,S} = L_{lks} + \frac{L_m L_{lkP}}{L_m + L_{lkP}} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (จ.4)$$

$$n = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} \quad (จ.5)$$

$$L_{lk} = L_{lkP} + L_{lks} \cdot n^2 \quad (จ.6)$$

$$L_m = \sqrt{(l_{11} - l_{11,S}) \times (l_{22} \times n^2)} \quad (จ.7)$$

เมื่อ L_{11} คือค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิเมื่อทำการเปิดวงจรด้านทุติยภูมิ (H)

L_{22} คือค่าความเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิเมื่อทำการเปิดวงจรด้านปฐมภูมิ (H)

$L_{11,S}$ คือค่าความเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิเมื่อทำการปิดวงจรด้านทุติยภูมิ (H)

$L_{22,S}$ คือค่าความเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิเมื่อทำการปิดวงจรด้านปฐมภูมิ (H)

L_{lkP} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (H)

L_{lks} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 L_m คือค่าความเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กในแกน (H)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งหม้อแปลงแต่ละตัวและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_{lk} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลรวมของหม้อแปลง (H)

n คืออัตราส่วนรอบ

ตารางที่ จ.1 ค่าความเหนี่ยวนำต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง

ค่าความเหนี่ยวนำต่างๆ	หม้อแปลงตัวที่ 1	หม้อแปลงตัวที่ 2
L_{11}	3.42 mH	3.556 mH
L_{22}	28.478 μ H	26.64 μ H
$L_{11,S}$	127.028 μ H	143.707 μ H
$L_{22,S}$	2.506 μ H	2.502 μ H

จากนั้นนำค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ทำการวัดในตารางที่ จ.1 นำมาคำนวณค่าจากสมการที่ จ.1 - จ.7 จะทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำดังตารางที่ จ.2

วิธีการคำนวณหม้อแปลงตัวที่ 1

หา n จากสมการ (จ.5) โดยแทนค่า L_{11} และ L_{22} ในสมการ

$$n = \sqrt{\frac{3.42 \text{ mH}}{28.478 \text{ } \mu\text{H}}} = 11 \text{ รอบ} \quad (1)$$

หาค่า L_m จากสมการ (จ.7) แทนค่า จะได้

$$L_m = \sqrt{(3.42 \text{ mH} - 127.028 \text{ } \mu\text{H}) \times (28.478 \text{ } \mu\text{H} \times 11^2)} \quad (2)$$

$$L_m = 3.36 \text{ mH}$$

หา L_{IKP} จาก สมการ (จ.1) โดยแทนค่า L_{11} และ L_m ในสมการ จะได้

$$L_{IKP} = 3.4241 \text{ mH} - 3.36 \text{ mH} \quad (3)$$

$$L_{IKP} = 64.1 \text{ } \mu\text{H}$$

หา L_{IKS} จาก สมการ (จ.2) โดยแทนค่า L_{22} และ L_m ในสมการ จะได้

$$L_{IKS} = 28.478 \text{ } \mu\text{H} - \frac{3.36 \text{ mH}}{11^2} \quad (4)$$

$$L_{IKS} = 0.533 \text{ } \mu\text{H}$$

หา L_{IK} จากสมการ (จ.6) โดยแทนค่า L_{IKS} และ L_{IKP} ในสมการ จะได้

$$L_{IK} = 64.1 \text{ } \mu\text{H} + (0.533 \text{ } \mu\text{H} \cdot 11^2)$$

$$L_{IK} = 128.23 \text{ } \mu\text{H}$$

วิธีการคำนวณหม้อแปลงตัวที่ 2

หา n จากสมการ (จ.5) โดยแทนค่า L_{11} และ L_{22} ในสมการ

$$n = \sqrt{\frac{3.556 \text{ mH}}{26.64 \mu\text{H}}} = 11 \text{ รอบ} \quad (1)$$

หาค่า L_m จากสมการ (จ.7) แทนค่า จะได้

$$L_m = \sqrt{(3.5559 \text{ mH} - 143.707 \mu\text{H}) \times (26.6404 \mu\text{H} \times 11^2)} \quad (2)$$

$$L_m = 3.4833 \text{ mH}$$

หา L_{lkP} จาก สมการ (จ.1) โดยแทนค่า L_{11} และ L_m ในสมการ จะได้

$$L_{lkP} = 3.5559 \text{ mH} - 3.4833 \text{ mH}$$

$$L_{lkP} = 72.595 \mu\text{H}$$

(3)

หา L_{lkS} จาก สมการ (จ.2) โดยแทนค่า L_{22} และ L_m ในสมการ จะได้

$$L_{lkS} = 26.6404 \mu\text{H} - \frac{3.4833 \text{ mH}}{11^2}$$

$$L_{lkS} = 0.54386 \mu\text{H}$$

(4)

หา L_{lk} จากสมการ (จ.6) โดยแทนค่า L_{lkS} และ L_{lkP} ในสมการ จะได้

$$L_{lk} = 72.595 \mu\text{H} + (0.5438 \mu\text{H} \cdot 11^2)$$

$$L_{lk} = 128.23 \mu\text{H}$$

ตารางที่ จ.2 ค่าความเหนี่ยวนำต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงที่ได้จากการคำนวณ

ค่าความเหนี่ยวนำต่างๆ	หม้อแปลงตัวที่ 1	หม้อแปลงตัวที่ 2
L_{lkP}	64.114 μH	72.595 μH
L_{lkS}	0.533 μH	0.544 μH
L_m	3.36 mH	3.483 mH
L_{lk}	128.229 μH	145.189 μH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 128.229 μH 145.189 μH การศึกษา นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้ทำวิจัย



ชื่อ-นามสกุล นายวิษระ ละครวงษ์
 วัน เดือน ปีเกิด 28 กรกฎาคม พ.ศ.2535
 ที่อยู่ 73/166 หมู่บ้านนฤมิตร 2 ถ.สุวินทวงศ์ ต.วัง
 ตะเคียน อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000

ประวัติการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย
 (วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์) จากโรงเรียน
 เบญจมาราชรังสฤษฎ์ ฉะเชิงเทรา



ชื่อ-นามสกุล นายวันเฉลิม เศรษฐกุลวดี
 วัน เดือน ปีเกิด 25 มีนาคม พ.ศ.2536
 ที่อยู่ 61/4 ม.4 ต.คานหาม อ.อุทัย
 จ.พระนครศรีอยุธยา 13210

ประวัติการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย
 (วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์)จากโรงเรียนสาธิต
 มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล นายศักดิ์ แก้วสุทัศน์
 วัน เดือน ปีเกิด 27 พฤศจิกายน พ.ศ.2535
 ที่อยู่ 4/193 หมู่บ้านกอล์ฟวิว ถ.หัวหินหนองพลับ ต.หัวหิน อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110
 ประวัติการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์)
 จากโรงเรียนพรหมานุสรณ์จังหวัดเพชรบุรี



ชื่อ-นามสกุล นายสิริคุณ ตริเทพประติมา
 วัน เดือน ปีเกิด 16 มีนาคม พ.ศ.2536
 ที่อยู่ 119/2 หมู่บ้านเดอะเลกาซีปิ่นเกล้า ถ.บางแวก แขวงบางไผ่ เขตบางแค กรุงเทพฯ 10160
 ประวัติการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์)
 จากโรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏ บ้านสมเด็จเจ้าพระยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้