

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**อินเวอร์เตอร์สามกิ่งชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อน
เหนี่ยวนำสองเอาต์พุต**

**A THREE-LEG HIGH FREQUENCY SERIES-RESONANT INVERTER FOR
TWO-OUTPUT INDUCTION HEATERS**



จพ.
พ527ค

เลขหมู่..... 2554
เลขทะเบียน..... 117951
วัน,เดือน,ปี..... 22 ค.ศ. 2554

b. 1234909A

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน พ.ศ.2554 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ KMITL-2011-EN-M-020-034 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A THREE-LEG HIGH FREQUENCY SERIES-RESONANT INVERTER FOR
TWO-OUTPUT INDUCTION HEATERS**



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

2011

KMITL-2011-EN-M-020-034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011 .

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อินเวอร์เตอร์สามกึ่งซิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับ
เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต
นักศึกษา นายพัฒนพงษ์ กงสาคร
รหัสนักศึกษา 51060201
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ. 2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม) ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบอินเวอร์เตอร์สามกึ่งซิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดขนาดของเครื่องและจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการสร้างโดยยังสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้เท่ากัน ซึ่งจะทำให้การลดจำนวนสวิตช์ที่ใช้ควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องให้ความร้อนแบบสองเอาต์พุตจากหลักการเดิมวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ใช้สวิตช์จำนวน 4 กิ่ง 8 ตัว ทำการออกแบบใหม่โดยลดจำนวนสวิตช์ให้เหลือ 3 กิ่ง 6 ตัว มีกิ่งร่วม 1 กิ่งและกิ่งควบคุมกำลังไฟฟ้าแยกอีก 2 กิ่ง ควบคุมกำลังไฟฟ้าแยกอิสระต่อกัน การควบคุมกำลังไฟฟ้าใช้หลักการควบคุมแรงดันแบบไม่สมมาตรสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0.5 กิโลวัตต์ ถึง 2 กิโลวัตต์ของแต่ละเอาต์พุต ทำงานที่ความถี่ 56.21 กิโลเฮิรตซ์คงที่โดยใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ถูกต้องและสอดคล้องกับทฤษฎี

Thesis Title	A Three-Leg High Frequency Series-Resonant Inverter for Two-Output Induction Heaters
Student	Mr. Pattanapong Kongsakorn
Student ID.	51060201
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2011
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Anuwat Jangwanitlert
Thesis Co-Advisor	Dr.Yutthana Khamsuwan

ABSTRACT

This thesis presents design and analysis of a three-leg high frequency series-resonant inverter for two-output induction heaters. The main purpose of this thesis is to reduce the size of converter and number of switches. By the way, this prototype can control output power equal to the previous and control power independently. The previous theory for control power of 2-output high frequency induction heater using full-bridge inverter 4-branches 8-switch control output power independently. The prototype presents the development by reducing the number of switch only 6-switches 3-branches. There is a full-bridge inverter using 1 branch for common control and 2 branches for control each output that can control power same size as using 4-branches 8-switches. This prototype operates at 56.21 kHz of switching frequency and able to control power from 0.5 kW to 2 kW for each output. The full-bridge is using IGBT as switches that control power by the asymmetrical voltage cancellation methodology. The experimental result is correct and according to the theory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ และการให้คำปรึกษาจาก ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ และ ดร. ยุทธนา ขำสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องทำวิจัย ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พัฒนพงษ์ คงสาคร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความน่าสนใจของปัญหาและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เทียบกับหลักการที่มีอยู่.....	2
1.5 พิกัดและลักษณะการประยุกต์ใช้งานเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ.....	3
1.5.1 พิกัดเครื่องต้นแบบ.....	4
1.5.2 ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน.....	4
1.6 ขอบเขตและข้อกำหนดในงานวิจัย.....	4
1.7 รายละเอียดที่จะทำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	4
1.8 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.9 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน.....	6
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานการเกิดความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	6
2.2 การวิเคราะห์วงจรสมมูลขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบ.....	9
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	14
2.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	16
2.4.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Phase-Shift Controlled.....	17
2.4.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Pulse Density Modulation.....	18
2.4.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Asymmetrical Voltage Cancellation.....	19
2.4.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Pulse Frequency Modulation.....	20
2.5 สรุป.....	21

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของโรงเรียนการไฟฟ้านครหลวงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ออกแบบและสร้าง	22
3.1 บทนำ.....	22
3.2 ส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	23
3.2.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า.....	23
3.2.2 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่ง.....	24
3.2.3 วงจรควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์.....	25
3.2.4 หม้อแปลงกำลังความถี่สูง.....	26
3.2.5 ตัวเก็บประจุลึอกกิ่ง.....	28
3.2.6 โหลดอนุกรมเรโซแนนซ์.....	29
3.2.6.1 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	29
3.2.6.2 การออกแบบตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์.....	34
3.3 หลักการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....	34
3.4 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุต.....	42
3.4.1 การวิเคราะห์สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	42
3.4.2 การวิเคราะห์สมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต.....	43
3.4.3 การวิเคราะห์สมการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต.....	45
3.4.4 การวิเคราะห์สมการกระแสไฟฟ้าอินพุต.....	47
3.4.5 การวิเคราะห์สมการกำลังไฟฟ้าอินพุต.....	48
3.5 สรุป.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	50
4.1 บทนำ.....	50
4.2 การทดสอบเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำ.....	50
4.2.1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดชุดที่ 1 โดยหยุดการทำงานของโหลด ชุดที่ 2.....	52
4.2.2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดชุดที่ 2 โดยหยุดการทำงานของโหลด ชุดที่ 1.....	58
4.2.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้ง 2 ชุดพร้อมกัน.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 วิจัยผลการทดลอง.....	66
4.4 สรุป.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	68
5.2 ข้อจำกัดเครื่องเหนียวนำต้นแบบ.....	68
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	69
5.4 ปัญหาและอุปสรรค	69
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	72
ภาคผนวก ข. คุณลักษณะทางไฟฟ้าเครื่องเหนียวนำต้นแบบ.....	83
ภาคผนวก ค. เครื่องมือที่ใช้ทำงานวิจัย.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ลักษณะการทำงานของสวิตช์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ.....35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	หลักการเดิม.....3
1.2	แนวความคิดที่ใช้ทำวิทยานิพนธ์.....3
2.1	การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่าย.....6
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับระยะความลึกจากผิวของชิ้นงาน.....7
2.3	วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป.....8
2.4	จรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน.....8
2.5 (a)	เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อยผ่านชิ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำ.....9
2.5 (b)	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบ.....9
2.6 (a)	วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก.....12
2.6 (b)	วงจรสมมูลทางไฟฟ้า.....12
2.7	วงจรเฟสเซอร์ของอินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม.....14
2.8	ค่าบรรทัดฐานของแรงดันเอาต์พุตต่อความถี่การสวิตช์ที่ค่า Q ต่างๆ.....15
2.9	ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ความถี่ต่างๆ.....16
2.10	คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของการควบคุมแบบ Phase-Shifted Controlled.....17
2.11	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ.....17
2.12	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่จำนวน ไชเกิดต่างๆ.....18
2.13	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวน ไชเกิดต่างๆ.....18
2.14	คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของการควบคุมแบบ Asymmetrical Voltage Cancellation19
2.15	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ.....19
2.16	คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของการควบคุมแบบ Pulse Frequency Modulation.....20
2.17	ค่าบรรทัดฐานของกำลังคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อความถี่.....20
3.1	วงจรเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ.....22
3.2	สัญญาณควบคุมวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....25
3.3	วงจรชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์.....26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	วงจรมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ.....30
3.5	วงจรอินเวอร์เตอร์.....31
3.6	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตวงจรอินเวอร์เตอร์.....32
3.7	เวกเตอร์ไคอะแกรม.....32
3.8 (a)	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดชุกที่ 1.....33
3.8 (b)	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดชุกที่ 1.....33
3.9 (a)	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ.....34
3.9 (b)	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....34
3.10	วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_0-t_136
3.11	วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_1-t_237
3.12	วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_2-t_338
3.13	วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_3-t_439
3.14	วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_4-t_540
3.15	วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_5-t_641
3.16	คลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต.....42
3.17	วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ซาร์โมนิกลำดับต่างๆ.....43
3.18	คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าวงจรอินเวอร์เตอร์.....47
4.1	วงจรเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง.....51
4.2	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....52
4.3	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา.....52
4.4	คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d1} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา (Scale: 200V/div, 10A/div).....53
4.5	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มูมเล็อนเฟส 60 องศา.....	54
4.7	คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d1} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มูมเล็อนเฟส 60 องศา (Scale: 200V/div, 10A/div).....	54
4.8	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มูมเล็อนเฟส 120 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....	55
4.9	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มูมเล็อนเฟส 120 องศา.....	55
4.10	คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d1} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มูมเล็อนเฟส 120 องศา (Scale: 200V/div, 10A/div).....	56
4.11	กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ย I_{d1} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{AB} ที่มูมเล็อนเฟสต่างๆ.....	56
4.12	กำลังไฟฟ้าอินพุต P_d และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_{AB} ที่มูมเล็อนเฟสต่างๆ.....	57
4.13	ประสิทธิภาพวงจรอินเวอร์เตอร์ของโหลดชุดที่ 1 ที่มูมเล็อนเฟสต่างๆ.....	57
4.14	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มูมเล็อนเฟส 0 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....	58
4.15	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มูมเล็อนเฟส 0 องศา.....	58
4.16	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d2} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มูมเล็อนเฟส 0 องศา (Scale: 200V/div, 10A/div).....	59
4.17	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มูมเล็อนเฟส 60 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....	59
4.18	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มูมเล็อนเฟส 60 องศา.....	60
4.19	คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d2} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มูมเล็อนเฟส 60 องศา (Scale: 200V/div, 10A/div).....	60
4.20	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มูมเล็อนเฟส 120 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา.....61
4.22	คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d2} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา (Scale: 200V/div, 10A/div).....62
4.23	กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ย I_{d2} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ.....62
4.24	กำลังไฟฟ้าอินพุต P_d และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ.....63
4.25	ประสิทธิภาพวงจรอินเวอร์เตอร์ของ โหลดชุดที่ 2 ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ.....63
4.26	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับ โหลดทั้งสองชุดที่มุมเลื่อนเฟสของ โหลดชุดที่ 1 เท่ากับ 30 องศา ชุดที่ 2 เท่ากับ 0 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....64
4.27	คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับ โหลดทั้งสองชุดที่มุมเลื่อนเฟสของ โหลดชุดที่ 1 เท่ากับ 90 องศา ชุดที่ 2 เท่ากับ 60 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div).....65
4.28	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o และกำลังไฟฟ้าอินพุต P_d วงจรอินเวอร์เตอร์ของ โหลดชุด ทั้ง 2 ชุด.....65
4.29	ประสิทธิภาพวงจรอินเวอร์เตอร์ของ โหลดทั้ง 2 ชุดที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ.....66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงได้รับความนิยมใช้ในอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน มีการพัฒนาประสิทธิภาพให้ได้กำลังงานที่สูงขึ้นและขนาดเล็กกลงตลอดจนต้องลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเพื่อให้ได้ผลตอบแทนที่สูงสุด

จากการศึกษาค้นคว้าเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบหลายหัว [1, 2] จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแยกโหลดแต่ละชุดอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นการออกแบบระบบที่ง่ายและสะดวกในการควบคุมกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าจำนวนโหลดเพิ่ม ต้องใช้สวิตช์เพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากอุปกรณ์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ต้องออกแบบระบบเพื่อชดเชยการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ตลอดจนถึงงบประมาณเพื่อใช้จ่ายสำหรับสวิตช์ที่เพิ่มขึ้นมา

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนออินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต ทำงานโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ควบคุมการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดจำนวน 2 ชุดซึ่งพัฒนาโดยการลดสวิตช์จากเดิมใช้จำนวน 4 กิ่ง 8 ตัว ลดลงเหลือจำนวน 3 กิ่ง 6 ตัวโดยใช้กิ่งร่วม 1 กิ่ง สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้เท่ากันแต่จำนวนสวิตช์น้อยกว่า ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบติดตั้ง ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าในทางเศรษฐศาสตร์เพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำที่ทำการวิจัยและพัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนต้นแบบนี้ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ให้มาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 310 โวลต์เพื่อป้อนเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่งใช้สวิตช์จำนวน 6 ตัว สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลด 2 ชุด โดยอิสระ ความถี่การสวิตช์คงที่ 56.21 กิโลเฮิร์ตซ์

2. ขดลวดเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำที่พันรอบชิ้นงานลักษณะทรงกระบอก โดยมีช่องว่างเล็กน้อยระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงานเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ขดลวดเหนี่ยวนำมีหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กให้คล้อยผ่านชิ้นงานเพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวนจนทำให้ความร้อนขึ้นที่บริเวณผิว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเป็นรูปไซน์ซึ่งใช้หลักการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 56.21 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยขดลวดเหนี่ยวนำจะต่ออนุกรมอยู่กับคาปาซิเตอร์เรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีหม้อแปลงกำลังความถี่สูงทำหน้าที่ลดแรงดันให้มีความเหมาะสมที่จะจ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ และเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมีคาปาซิเตอร์บล็อกกิ้งเพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่หม้อแปลงซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนที่หม้อแปลงและเกิดความเสียหายได้

3. วงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์ มีหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมการนำกระแสไฟฟ้าของสวิตช์โดยใช้วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบไม่สมมาตรและควบคุมการนำกระแสของสวิตช์ให้อยู่ในสถานะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ตลอดช่วงการทำงาน โดยมีการแยกโคจรทางไฟฟ้าของสวิตช์แต่ละตัว

1.2 ความน่าสนใจของปัญหาและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบที่ทำการศึกษาและพัฒนาขึ้นนี้มีข้อเด่นคือ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเครื่องให้ความร้อน โดยการลดจำนวนสวิตช์ลง สามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เท่ากัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์การศึกษาดังนี้

1. เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามกึ่งขนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต
2. เพื่อศึกษาและออกแบบระบบการควบคุมกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามกึ่งขนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต
3. เพื่อพัฒนาเครื่องให้ความร้อนอินเวอร์เตอร์สามกึ่งขนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต โดยใช้สวิตช์จากเดิม 4 กิ่ง 8 ตัว ลดลงเหลือ 3 กิ่ง 6 ตัว

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

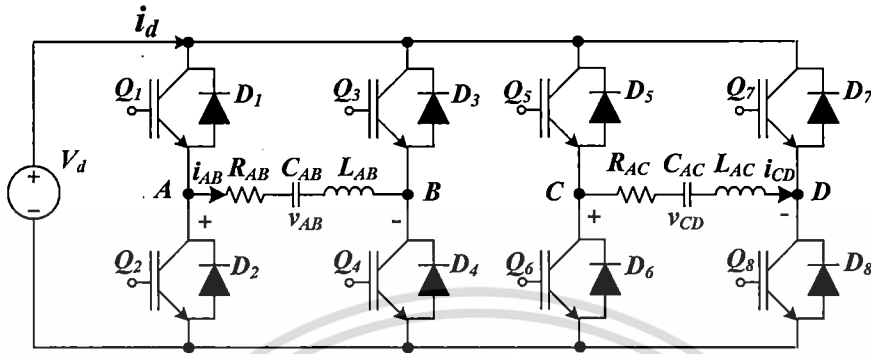
เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบที่ทำการศึกษาและพัฒนาประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่ง สวิตช์ 6 ตัว ควบคุมการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด 2 ชุดได้อย่างอิสระด้วยวิธีการควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าซิกบวก ปรับดิวิตตี้ไซเคิลของสวิตช์ของกิ่งร่วมที่ 50 เปอร์เซ็นต์คงที่และปรับลดดิวิตตี้ไซเคิลของกิ่งที่ต่อกับโหลด ที่ความถี่การสวิตช์คงที่โดยให้มีความมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อยเพื่อให้สวิตช์ทำงานในสถานะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์

1.4 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่

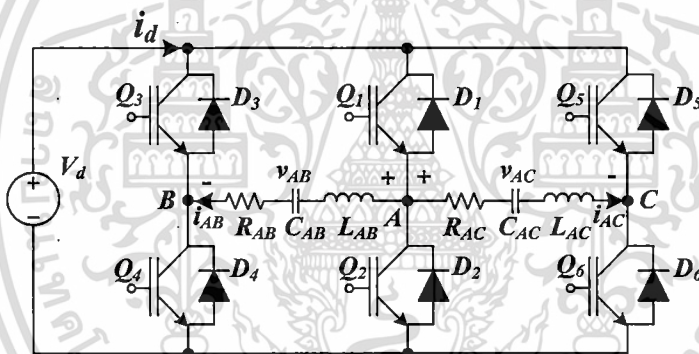
จากหลักการเดิมของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำแบบหลายเอาต์พุต จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ควบคุมการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแยกอิสระแต่ละชุดกันดังรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าใช้สวิตช์ทั้งหมด 4 กิ่ง 8 ตัว สำหรับงานวิจัยนี้ได้แนะนำเสนอแนวทางในการลดจำนวนสวิตช์ลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลือ 3 ถึง 6 ตัวโดยใช้กิ่งร่วม 1 กิ่งและควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดแต่ละชุดดังรูปที่ 1.2 โดยใช้วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบไม่สมมาตร ซึ่งจะเห็นว่าหลักการของงานวิจัยที่นำเสนอนี้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับหลักการแบบเดิมแต่ใช้จำนวนสวิตช์น้อยกว่า



รูปที่ 1.1 หลักการเดิม



รูปที่ 1.2 แนวความคิดที่ใช้ทำวิทยานิพนธ์

1.5 พิกัดและลักษณะการประยุกต์ใช้งานเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ

1.5.1 พิกัดเครื่องต้นแบบ

แรงดันไฟฟ้าอินพุต	220	โวลต์
ความถี่อินพุต	50	เฮิรตซ์
กำลังไฟฟ้าอินพุต	4.315	กิโลวัตต์
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต โหลดชุดที่ 1	0.55 ถึง 1.965	กิโลวัตต์
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต โหลดชุดที่ 2	0.563 ถึง 1.997	กิโลวัตต์
ความถี่การสวิตช์	56.21	กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.2 ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงต้นแบบได้ออกแบบไว้เพื่อการชุบแข็งที่ผิวของเหล็กทรงกระบอกต้นแบบ 2 เอ้าต์พุตซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน	25	มิลลิเมตร
ความยาวที่ให้ความร้อน	60	มิลลิเมตร
เวลาที่ทำความร้อนถึงจุดคูรี		
โพลดชุดที่ 1	45	วินาที
โพลดชุดที่ 2	43	วินาที

1.6 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

สร้างเครื่องต้นแบบโดยมีกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 4 กิโลวัตต์ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0.5 กิโลวัตต์ ถึง 2 กิโลวัตต์ ของแต่ละหัว โดยใช้วิธีการควบคุมแรงดันแบบไม่สมมาตร ความถี่การสวิตช์ 56.21 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถให้ความร้อนกับเหล็กแบบชุบแข็งที่ผิว ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 มิลลิเมตร

1.7 รายละเอียดที่จะทำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความน่าสนใจของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการศึกษา แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่ พิกัดและลักษณะการประยุกต์ใช้งานเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

บทที่ 3 การสร้างและออกแบบ กล่าวถึงส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำ การออกแบบสร้างเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ การวิเคราะห์สมการต่างๆของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำได้แก่ สมการกระแสอินพุต สมการกำลังไฟฟ้าอินพุต สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต สมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ของวงจรอินเวอร์เตอร์

บทที่ 4 ผลการทดลองและผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองเครื่องต้นแบบ และผลการทดลองเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ โดยเปรียบเทียบ

ผลการทดลองกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ ข้อจำกัด ปัญหาและอุปสรรคเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยและพัฒนาต่อไป

1.8 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูง
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการให้ความร้อนเหนี่ยวนำ
3. ออกแบบชุดโพลดขดลวดเหนี่ยวนำ หม้อแปลงกำลังความถี่สูง และชุดอินเวอร์เตอร์
4. ทำการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. สร้างและประกอบ
6. ปรับปรุงและแก้ไข
7. ทดสอบประสิทธิภาพและเก็บผลการทดลอง
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.9 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. เรียนรู้หลักการทำงานและพัฒนาประสิทธิภาพเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำ
2. สามารถนำเครื่องต้นแบบไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้ได้รับผลตอบแทนสูงสุด
3. เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดทิศทางการพัฒนางานวิจัยด้านพลังงานให้กับหน่วยงานภาครัฐ – ภาคเอกชน และบุคคลทั่วไปที่สนใจการลดใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

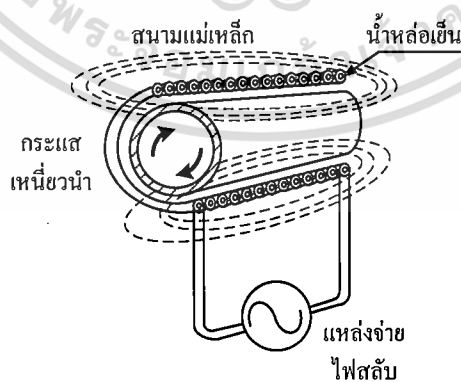
บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้า [3]

ในปัจจุบันนี้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภทอันได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก การขึ้นรูปอลูมิเนียม ตลอดจนเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนอันได้แก่ เตารีดแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ได้ใช้แหล่งความร้อนจากภายนอก แต่ความร้อนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในชิ้นงานเอง อีกทั้งชิ้นงานก็ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งได้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ การให้ความร้อนจึงทำได้โดยสะดวก ทำให้เกิดความร้อนสูงเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการ ทั้งยังสามารถควบคุมเวลาที่จะให้ความร้อนตลอดจนพื้นที่และความลึกผิวของชิ้นงานที่ได้รับความร้อน การกำหนดพื้นที่ที่กำหนดได้จากรูปร่างลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน และความลึกผิวเลือกใช้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่เหมาะสม

การให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปยังขดลวดเหนี่ยวนำแบบกลวงที่มีการระบายความร้อนภายใน ซึ่งขดลวดเหนี่ยวนำจะพันรอบชิ้นงาน โดยมีช่องว่างเล็กน้อยเพื่อการเคลื่อนย้ายเข้าออกของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ใช้จะเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก เส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะคล้องกับชิ้นงานทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเกิดกระแสไหลวน(Eddy current) ที่ชิ้นงานจนทำให้เกิดความร้อน บริเวณที่ขดลวดเหนี่ยวนำพาดผ่านดังรูปที่ 2.1 แสดงหลักการให้ความร้อนเหนี่ยวนำอย่างง่าย



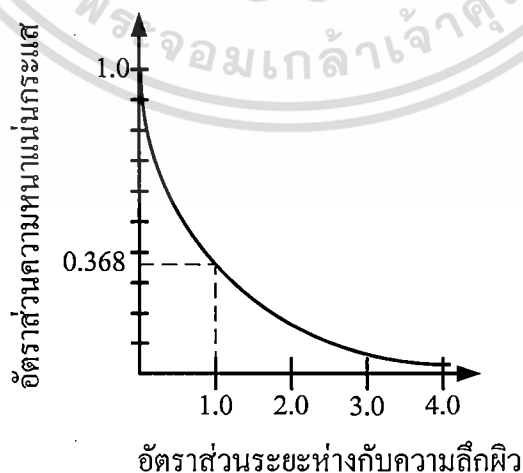
รูปที่ 2.1 การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำอย่างง่าย

เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ที่ผิว (Skin effect) ความลึกกระแสไฟฟ้าสลับบนชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเป็นฟังก์ชันเอกโพเนนเชียลเมื่ออัตราส่วนระหว่างความลึกผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะทางจากผิวเท่ากับความลึกของผิว ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ 0.368 เท่าของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าส่วนมากจะไหลอยู่ในระดับความลึกผิวนี้และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกระแสไฟฟ้าที่ชิ้นงานกับความถี่ที่ป้อนให้ดังสมการที่ (2.1)

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (2.1)$$

โดยที่

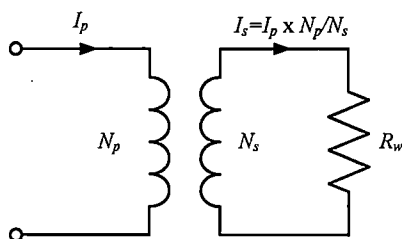
- δ คือ ความลึกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในชิ้นงาน (เมตร)
- μ คือ สภาพความซึมซาบสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ $\mu_0 \mu_r$ (เฮนรี/เมตร)
- μ_0 คือ สภาพความซึมซาบสนามแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (เฮนรี/เมตร)
- μ_r คือ สภาพความซึมซาบสนามแม่เหล็กของสาร
- ρ คือ สภาพความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน (โอห์ม-เมตร)
- f คือ ความถี่ (เฮิร์ตซ์)



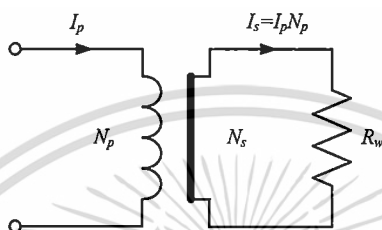
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับระยะความลึกจากผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

รูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของหม้อไฟฟ้าแปลงทั่วไป ส่วนรูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นว่าถ้า I_p เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำและ I_s เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในชิ้นงาน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้กระแสไฟฟ้าทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$I_s = I_p N_p \quad (2.2)$$

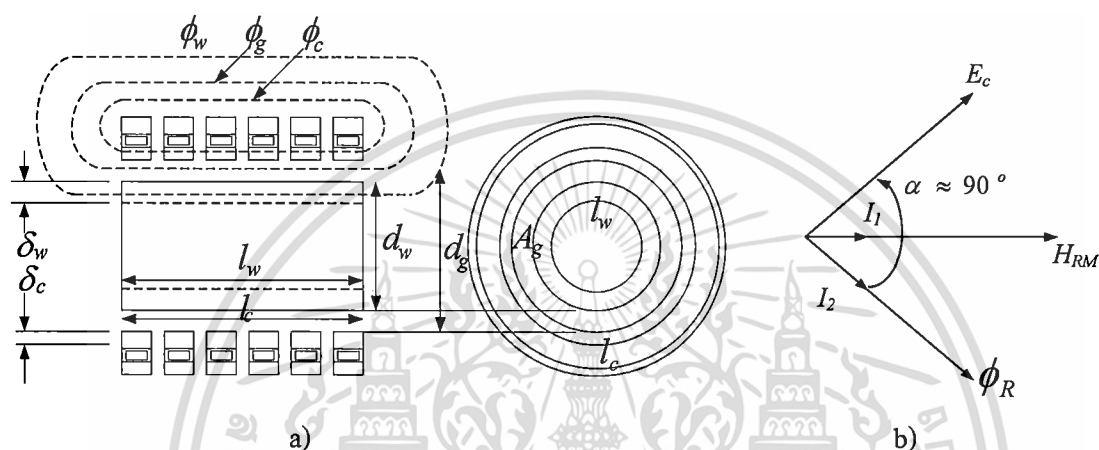
โดยที่ N_p คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในรูปความร้อนที่ชิ้นงาน (P_w) จะมีค่าเท่ากับ

$$P_w = I_p^2 N_p^2 R_w \quad (2.3)$$

โดยที่ R_w คือ ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน (โอห์ม)

2.2 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบ

เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้งานไม่ใช่ทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ทฤษฎีทรงกระบอกที่มีความยาวเป็นอนันต์มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำได้ จึงได้มีการศึกษาทฤษฎีในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นทรงกระบอกที่มีความยาวจำกัดเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่จะใช้งาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 a) เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานกับขดลวดเหนี่ยวนำ
b) เฟสเซอร์โตะแอมของระบบ

รูปที่ 2.5 แสดงถึงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านระบบประกอบด้วย 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ϕ_w คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงาน
2. ϕ_g คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านช่องอากาศ
3. ϕ_c คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านผิวของขดลวดเหนี่ยวนำ

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงานและเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านชิ้นงานสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$P_w = \mu \rho f H_{Rm}^2 (l_w A_w) p \quad (2.4)$$

$$\phi_{wm} = \mu H_{Rm} A_w (q - jp) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ p และ q เป็นสัมประสิทธิ์ของ Bessel function

P_w คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขึ้นงาน (วัตต์)

ϕ_{wm} คือ ค่ายอดของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผิวของขึ้นงาน (เวเบอร์)

H_{Rm} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กค่ายอดที่ผิวของขึ้นงาน (แอมแปร์/เมตร)

l_w คือ ความยาวของขึ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำ (เมตร)

A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของขึ้นงาน (ตารางเมตร)

R คือ รัศมีของขึ้นงาน (เมตร)

$$\text{ถ้า } \frac{d}{\delta} \geq 8 \text{ แล้ว } p = \frac{2}{1.23 + \frac{d}{\delta}} \text{ และ } q = \frac{2}{d/\delta}$$

ϕ_g คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านช่องอากาศโดยปกติแล้วจะมีค่าค่อนข้างใหญ่ในขณะที่ไม่มีขึ้นงานในขดลวดเหนี่ยวนำ แต่จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีขึ้นงานในขดลวดเหนี่ยวนำ เพราะพื้นที่หน้าตัดที่เส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านจะมีค่าลดลง ช่องอากาศนี้มีไว้เพื่อเป็นระยะห่างเชิงกล เพื่อให้ขึ้นงานป้อนเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำได้สะดวก และยังช่วยเป็นฉนวนความร้อนระหว่างขึ้นงานกับตัวขดลวดเหนี่ยวนำ เส้นแรงแม่เหล็กส่วนนี้จะมีผลให้ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำต่ำลง

$$\phi_{gm} = \mu_0 H_{Rm} A_g \quad (2.6)$$

โดยที่ A_g คือ พื้นที่เส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านอากาศ (ตารางเมตร)

ϕ_c คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านตัวขดลวดเอง ตัวขดลวดเหนี่ยวนำก็มีปรากฏการณ์ผิวเช่นเดียวกับขึ้นงาน ตามปกติขดลวดเหนี่ยวนำจะใช้ทองแดงที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะล่าช้าลงความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ 45 องศา ดังนั้น

$$\phi_{cm} = k_r \mu_0 \delta_c \pi d_c H_{om} \frac{(1-j)}{2} \quad (2.7)$$

โดยที่ δ_c คือ ความลึกผิวของกระแสไฟฟ้าที่เกิดในขดลวด (เมตร)

k_r คือ Correction Factor ปกติจะมีค่าระหว่าง 1-1.5 โดยทั่วไปจะใช้ 1.15

d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ (เมตร)

H_{om} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กค่ายอด (แอมแปร์/เมตร)

เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด คือ ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสามจะได้

$$\phi_{om} = \phi_{wm} + \phi_{gm} + \phi_{cm}$$

ถ้าคิดเป็นค่า อาร์เอ็มเอส จะได้

$$\phi_o = \phi_w + \phi_g + \phi_c$$

จัดรูปใหม่

$$\phi_{om} = \mu_0 H_{om} \left[\left(A_g + \mu_r q A_w + k_r \frac{\pi d_c \delta_c}{2} \right) - j \left(\mu_r p A_w + k_r \frac{k d_c \delta_c}{2} \right) \right] \quad (2.8)$$

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ m.m.f. จะได้ $H_{om} = \frac{\sqrt{2} I_c N_c}{l_c}$ (2.9)

และให้ E_c เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดจะได้

$$E_c = j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_c \phi_{om} \quad (2.10)$$

แทนค่าสมการที่ (2.8) และ (2.9) ลงในสมการที่ (2.10) จะได้

$$E_c = \frac{2\pi f \mu_0 N_c^2}{l_c} I_c \left[\left(\mu_r p A_w + \frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) + j \left(A_g + \mu_r q A_w + \frac{k_r \pi d_c}{2} \right) \right] \quad (2.11)$$

จากสมมุติฐานที่ว่า เส้นแรงแม่เหล็กที่ลัดผ่านมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอและเป็นผลที่มาจากความเข้มสนามแม่เหล็กเดียวกัน ทำให้สามารถแทนสมการที่ (2.11) ได้ด้วยวงจรสมมูลทางแม่เหล็กซึ่งเป็นแบบขนาน ดังรูปที่ 2.6(a) และถ้าพิจารณาวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จะอยู่ในรูปความต้านทานกับความเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม ดังรูปที่ 2.6 (b) โดยส่วนที่เป็นความต้านทานจะแทนด้วยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในชิ้นงานและตัวขดลวดเหนี่ยวนำ และส่วนที่เป็นความเหนี่ยวนำจะเป็นส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่ลัดผ่านชิ้นงาน ตัวขดลวดเหนี่ยวนำ และช่องว่างอากาศ ซึ่งจะมีเฟสเดียวกันกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก และสามารถเขียนในรูปของอิมพีแดนซ์รวมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = (R_w + R_c) + j(X_g + X_w + X_c) \quad (2.12)$$

โดยที่

$$R_w = K(\mu_r p A_w) \quad (2.13)$$

$$R_c = K \left(\frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) \quad (2.14)$$

$$X_g = K(A_g) \quad (2.15)$$

$$X_w = K(\mu_r q A_w) \quad (2.16)$$

$$X_c = K \left(\frac{k_r \pi d_c}{2} \right) \quad (2.17)$$

โดยที่ $K = 2\pi f \mu_0 \frac{N_c^2}{l_c}$

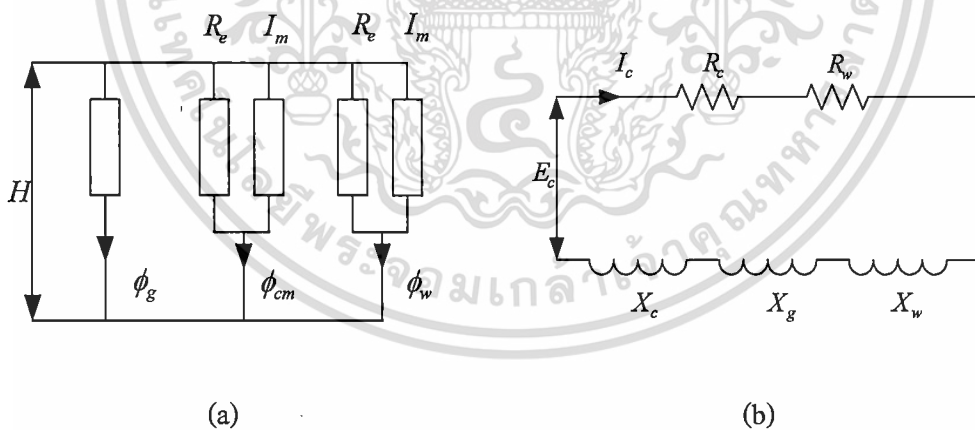
R_w คือ ความต้านทานของขดลวด (โอห์ม)

R_c คือ ความต้านทานของขดลวด (โอห์ม)

X_g คือ รีแอกแตนซ์จากช่องอากาศ (โอห์ม)

X_w คือ รีแอกแตนซ์จากขดลวด (โอห์ม)

X_c คือ รีแอกแตนซ์จากขดลวด (โอห์ม)



รูปที่ 2.6 (a) วงจรสมมูลทางแม่เหล็ก

(b) วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.13) ถึง (2.17) เมื่อแทนค่า K และประมาณค่า $p = \frac{2\delta}{d}$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_w = \frac{4\pi N_c^2}{l_c} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \rho_w f}{\pi}} \frac{A_w}{d_w} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_c = \frac{\pi^2 N_c^2}{l_c} \sqrt{\frac{\mu_0 \rho_c f}{\pi}} k_r d_c \quad (2.19)$$

$$L_g = N_c^2 \frac{\mu_0 A_g}{l_c} \quad (2.20)$$

$$L_w = \frac{2N_c^2}{l_c} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \rho_w}{\pi f}} \frac{A_w}{d_w} \quad (2.21)$$

$$L_c = \frac{2N_c^2}{l_c} \sqrt{\frac{\mu_0 \rho_w}{\pi f}} \frac{k_r \pi d_c}{2} \quad (2.22)$$

$$\eta = \frac{R_w}{R_c + R_w} \quad (2.23)$$

$$\cos \theta = \frac{R_w + R_c}{Z} \quad (2.24)$$

$$P_e = \frac{P_w}{\eta} \quad (2.25)$$

$$S_e = \frac{P}{\cos \theta} = I_c^2 Z \quad (2.26)$$

$$\frac{E_c}{N_c} = \frac{(\text{Coil } VA)}{(\text{Total ampere turns})} \quad (2.27)$$

$$\text{Coil ampere turns} = I_c N_c = H_c l_c \quad (2.28)$$

โดยที่

L_g คือ ความเหนี่ยวนำจากช่องอากาศ (เฮนรี)

L_w คือ ความเหนี่ยวนำของชิ้นงาน (เฮนรี)

L_c คือ ความเหนี่ยวนำจากขดลวดเหนี่ยวนำ (เฮนรี)

η คือ ประสิทธิภาพของขดลวดเหนี่ยวนำ

$\cos \theta$ คือ ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ

P_e คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ขดลวดเหนี่ยวนำ (วัตต์)

S_e คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ขดลวดเหนี่ยวนำ (โวลต์-แอมแปร์)

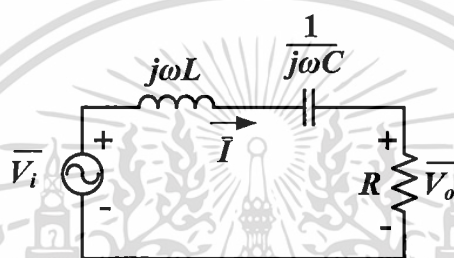
จากสมการของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำและชิ้นงาน จะเห็นได้ว่า วงจรสมมูลจะขึ้นอยู่กับลักษณะขนาดของทั้งชิ้นงานและขดลวด รวมทั้งจำนวนของขดลวดด้วย และถ้าพิจารณาให้ชิ้นงานและขดลวดเหนี่ยวนำง่าที่ความต้านทานของชิ้นงานและขดลวดจะแปรตามรากที่สองของความถี่ รากที่สองของความต้านทานจำเพาะ และรากที่สองของความซึมซาบแม่เหล็ก สำหรับกรณีความเหนี่ยวนำของชิ้นงานและขดลวด จะแปรตามรากที่สองของความต้านทานจำเพาะ รากที่สองของความซึมซาบแม่เหล็ก แต่จะแปรผกผันกับรากที่สองของความถี่ ส่วนกรณีความเหนี่ยวนำเนื่องจากช่องว่างอากาศพบว่าจะขึ้นกับลักษณะของขดลวดเหนี่ยวนำและพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ แต่ไม่ขึ้นกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

วงจรเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบอนุกรมที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับต่ออนุกรมอยู่กับตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานดังรูปที่ 2.7 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะจ่ายคลื่นสี่เหลี่ยมให้กับโหลดเรโซแนนซ์โดยที่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับความถี่การสวิตช์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหักล้างกัน จึงมองเห็นเป็นโหลดที่มีแต่เฉพาะค่าความต้านทานและจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรองความถี่ให้เฉพาะความถี่หลักมูลผ่าน ขนาดสัญญาณฮาร์มอนิกลำดับต่างๆจะลดลงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานและกระแสไฟฟ้าเป็นรูปไซน์



รูปที่ 2.7 วงจรเฟสเซอร์ของอินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

พิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์วงจรรูปที่ 2.7 จะได้อัตราขยายแรงดันของวงจрдังสมการที่ (2.29)

$$\bar{V}_o = \frac{R}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \cdot \bar{V}_i$$

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

หรือ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad (2.29)$$

ความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

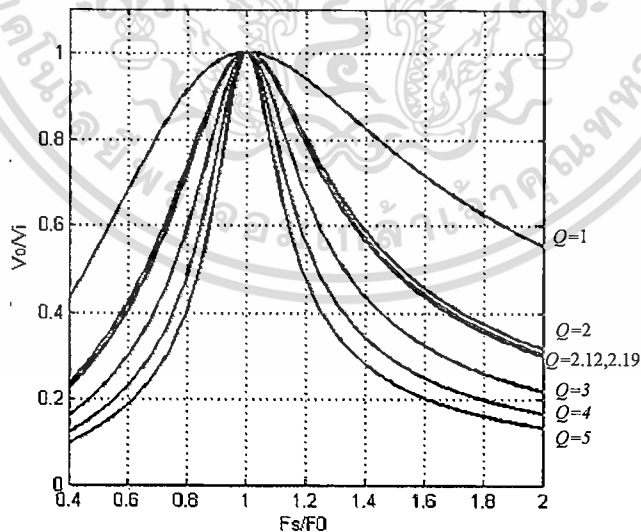
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.30)$$

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรอนุกรมเรโซแนนซ์แสดงในรูปตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q) ดังสมการ (2.31) และอัตราขยายแรงดันดังสมการที่ (2.32)

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (2.31)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (2.32)$$

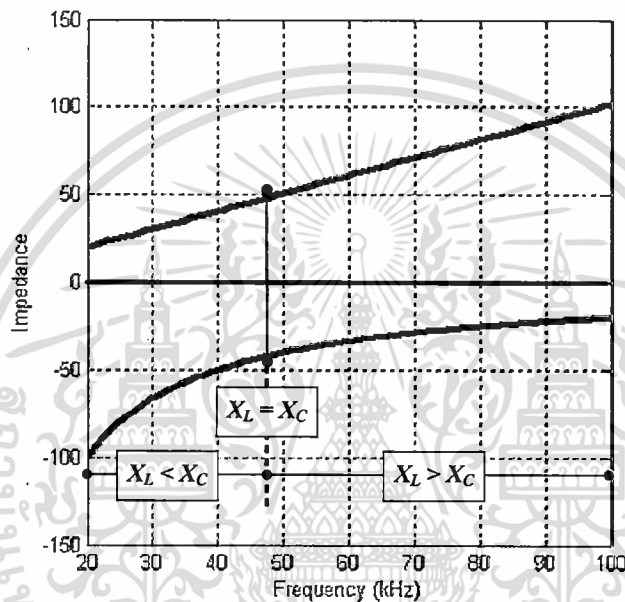
จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.32 นำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของผลตอบสนองเชิงความถี่บรรทัดฐาน (Normalized frequency: f_s/f_0) ที่ค่า Q ต่างๆ ดังรูปที่ 2.8 สำหรับในงานวิจัยนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทดลองในบทที่ 4 จะได้ค่า Q เท่ากับ 2.12 และ 2.19 สำหรับโหลดแต่ละชุด



รูปที่ 2.8 ค่าบรรทัดฐานของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อความถี่การสวิตช์ที่ค่า Q ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 49.1 และ 49.2 กิโลเฮิร์ตซ์ของโหลดชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ในทางปฏิบัติจะควบคุมให้ความถี่การสวิตช์มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อยซึ่งจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมากกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุทำให้กระแสไฟฟ้าล้าหลังแรงดันไฟฟ้าจนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลขณะแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ (Zero-Voltage-Switching: ZVS)



รูปที่ 2.9 ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ความถี่ต่างๆ

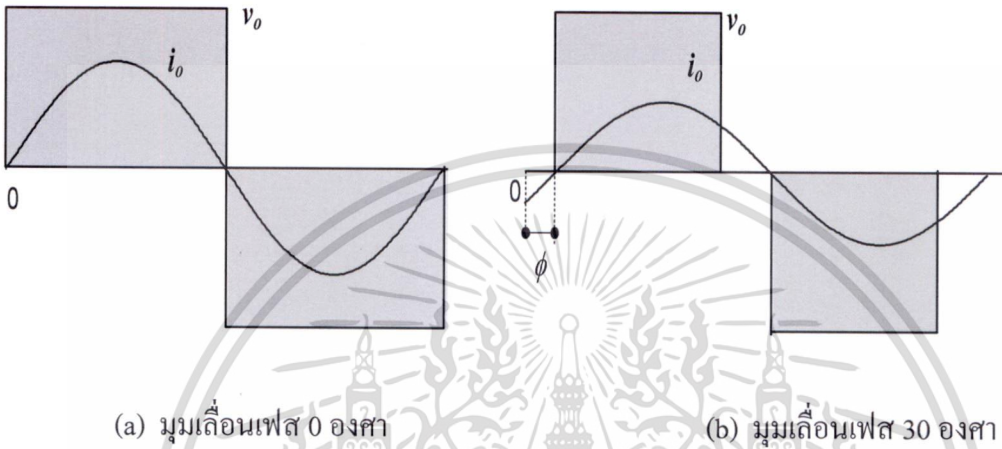
2.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมสามารถแบ่งได้ 4 แบบ ได้แก่

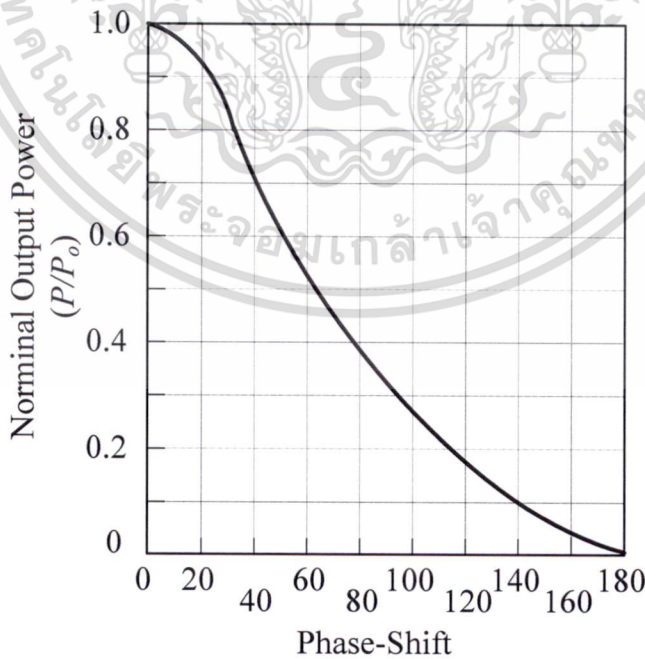
- 1) แบบ Phase-Shifted
- 2) แบบ Pulse Density Modulation
- 3) แบบ Asymmetrical Voltage Cancellation
- 4) แบบ Pulse Frequency Modulation

2.4.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Phase-Shift Controlled

การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Phase-Shift Controlled จะควบคุมความกว้างของแรงดันไฟฟ้าโดยการปรับเลื่อนมุมเลื่อนเฟส (ϕ) ของทั้งซีกบวกและซีกลบดังรูปที่ 2.10 ปริมาณแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองซีกจะมีปริมาณเท่ากัน แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าสัมพันธ์กับมุมเฟสที่ทำการปรับดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของการควบคุมแบบ Phase-Shifted Controlled

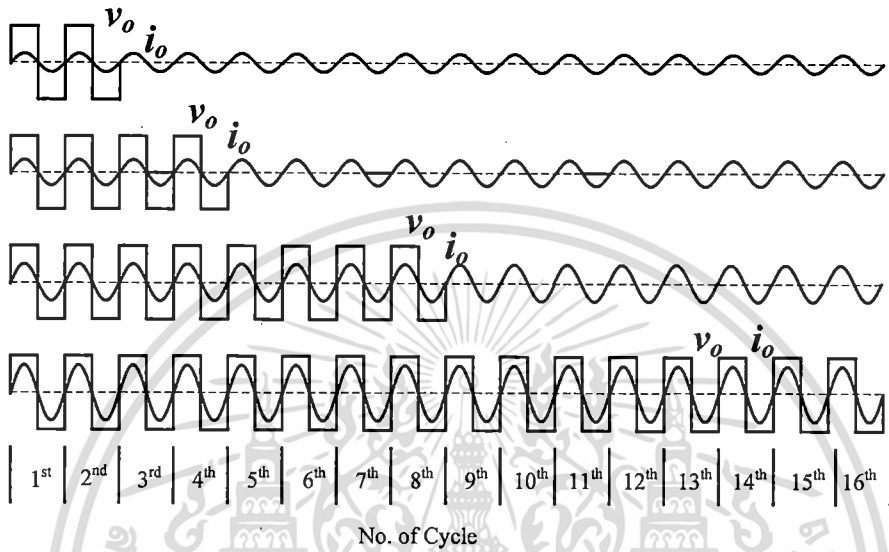


รูปที่ 2.11 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ

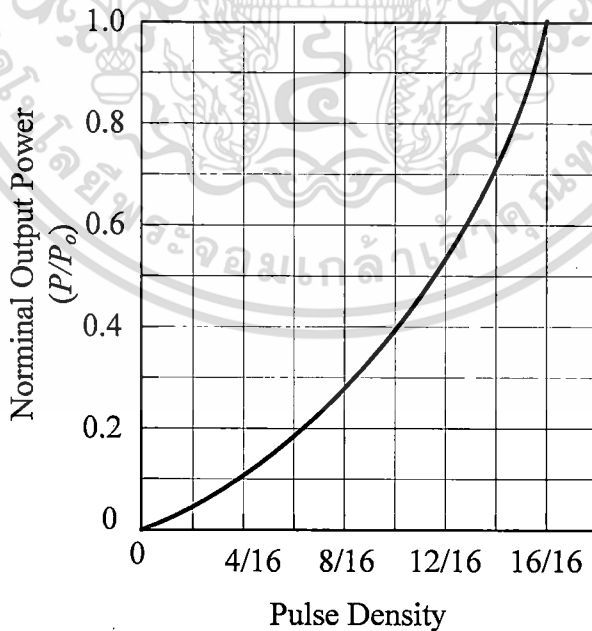
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Pulse Density Modulation

การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Pulse Density Modulation จะควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการปรับลดจำนวนไซเคิลของแรงดันไฟฟ้าอินพุต กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จะสัมพันธ์กับจำนวนไซเคิลของแรงดันไฟฟ้าอินพุตดังรูปที่ 2.12 และ 2.13



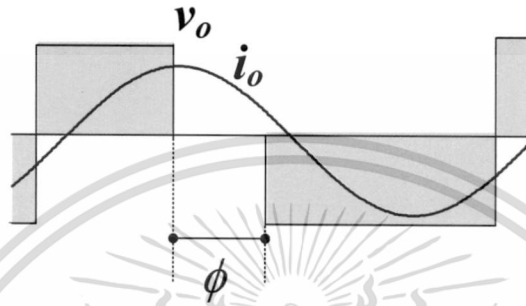
รูปที่ 2.12 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรมอเตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ



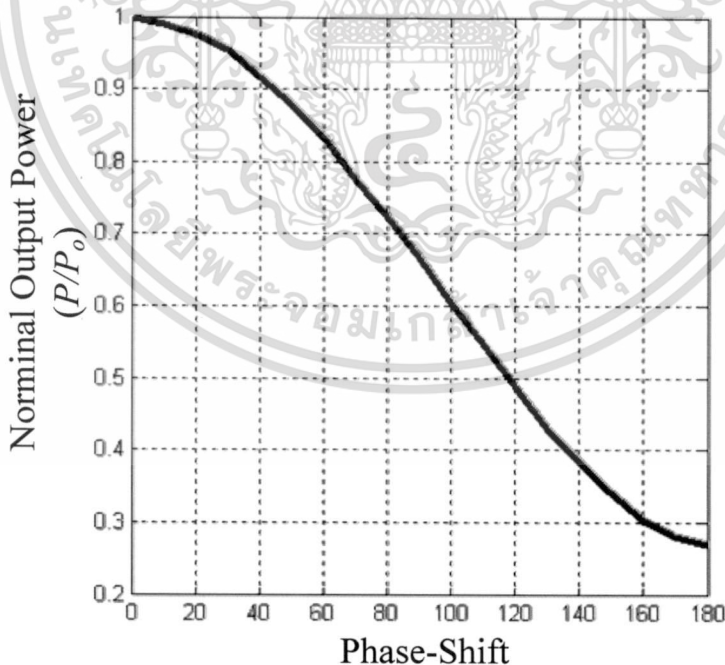
รูปที่ 2.13 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ

2.4.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Asymmetrical Voltage Cancellation

การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Asymmetrical Voltage Cancellation เป็นการควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการปรับมุมเลื่อนเฟส ซึ่งจะปรับความกว้างของแรงดันไฟฟ้าเฉพาะซีกบวก ลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดังรูปที่ 2.14 กำลังไฟฟ้าที่ได้จะสัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟสที่ทำการปรับดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของการควบคุมแบบ Asymmetrical Voltage Cancellation

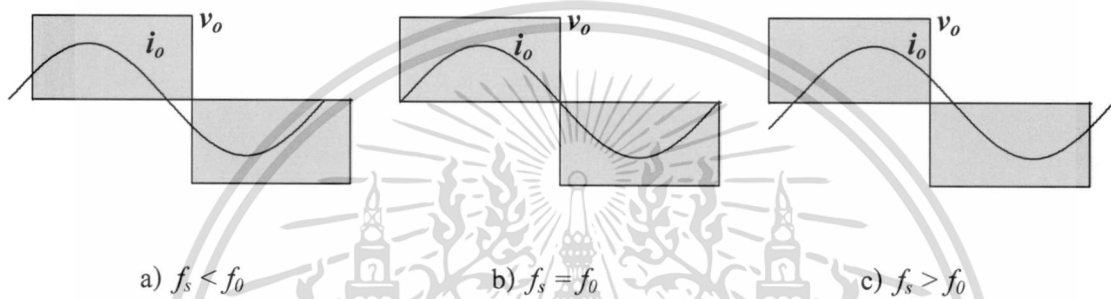


รูปที่ 2.15 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ

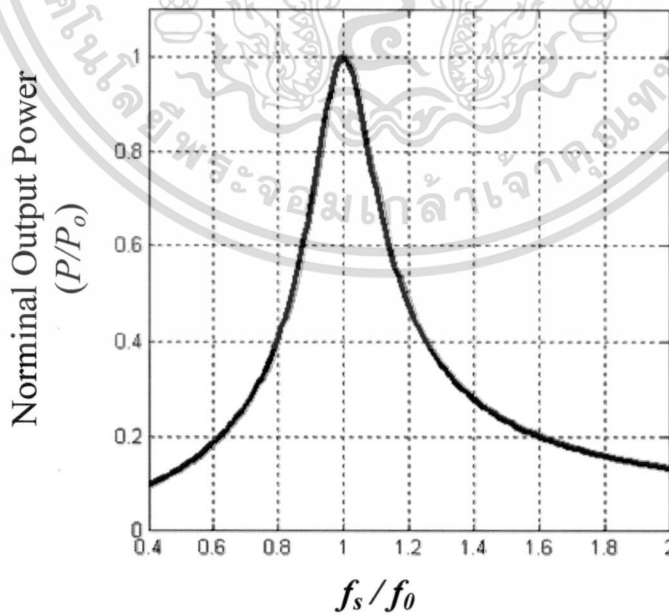
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ แบบ Pulse Frequency Modulation

การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบ Pulse Frequency Modulation เป็นการปรับความถี่การสวิตช์ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าการปรับความถี่ 3 ลักษณะคือ การปรับความถี่การสวิตช์ให้น้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์ การปรับความถี่การสวิตช์ให้เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ และการปรับความถี่การสวิตช์ให้มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้ของจากการปรับความถี่การสวิตช์น้อยหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการปรับความถี่ที่เรโซแนนซ์ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ของการควบคุมแบบ Pulse Frequency Modulation



รูปที่ 2.17 ค่าบรรทัดฐานของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่อความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและการวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าสลับเข้าไปยังขดลวดที่พันอยู่รอบชิ้นงาน จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนรอบชิ้นงาน ทำให้เกิดกำลังงานในรูปความร้อนที่ชิ้นงาน ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ และชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของทั้งชิ้นงานและขดลวด รวมทั้งจำนวนรอบของขดลวด

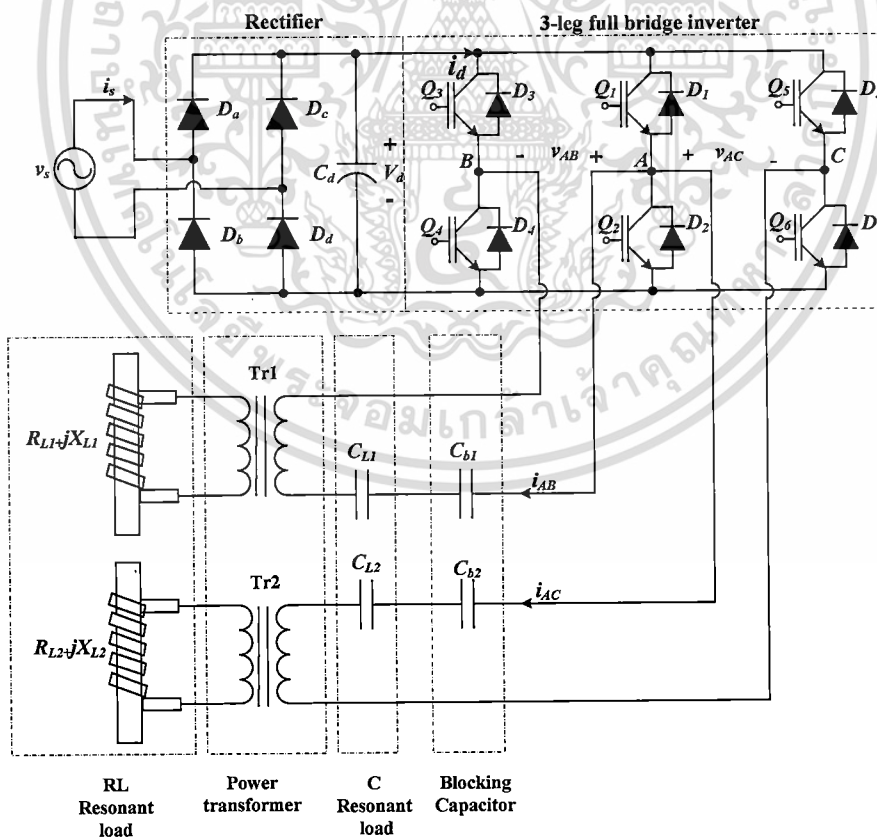


บทที่ 3

การออกแบบและสร้าง

3.1 บทนำ

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบที่ทำการวิจัยและพัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์จำนวน 3 กิ่ง ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธี Asymmetrical Voltage Cancellation สวิตซ์นำกระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZVS) ที่ความถี่สวิตซ์คงที่ โดยปรับดิวิตซ์ไซ้เกิดของกิ่งร่วมให้คงที่และควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าของกิ่งที่ต่อกับโหลดโดยปรับลดดิวิตซ์ไซ้เกิดตามความต้องการในการควบคุมกำลังไฟฟ้า ส่งกำลังไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุบล็อกกิ่ง (Blocking Capacitor) เพื่อทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการสมมาตรระหว่างซีกบวกและลบ ส่งผ่านหม้อแปลงกำลังความถี่สูงเพื่อเพิ่มลดขนาดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำ สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบอนุกรม ดังรูปที่ 3.1 โดยทำงานที่ความถี่ 56.21 กิโลเฮิรตซ์คงที่ พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตประมาณ 2 กิโลวัตต์ของโหลดแต่ละชุด



รูปที่ 3.1 วงจรเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ส่วนประกอบของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

3.2.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้า

วงจรเรียงกระแสมีหน้าที่ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ โดยในงานวิจัยนี้เป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ไม่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งประกอบด้วยไดโอด D_a, D_b, D_c, D_d ที่ใช้ในการเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น ตัวเก็บประจุ C_d มีหน้าที่ในการกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบและตัวต้านทานสำหรับการคายประจุ R_d รายละเอียดในการออกแบบมีดังนี้

1. ไดโอดเรียงกระแส

ในการออกแบบไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้าจะเลือกไว้ 5 เท่าของกระแสไฟฟ้าอินพุตที่ 15 แอมแปร์ดังนั้นเลือกใช้ไดโอดฟิสิกส์ 50 แอมแปร์ ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 1,000 โวลต์

2. ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน

มีหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าให้กระเพื่อมได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยมีแรงดันไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ความต้านทานสมมูลของชุดโพลีเอสเตอร์โซเลนซ์เท่ากับ 25 โอห์ม ประจุไฟฟ้าที่คายจากตัวเก็บประจุภายในช่วงเวลา $t = \frac{T_{rated}}{6} = \frac{1}{50 \cdot 6} = 3.33$ มิลลิวินาที ตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาด

$$C_d = \frac{I_s \cdot t}{V_{ripple,p-p}} \quad (3.1)$$

โดยที่

C_d คือ ขนาดของตัวเก็บประจุ (ฟารัด)

I_s คือ กระแสไฟฟ้าอินพุต (แอมแปร์)

t คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการคายประจุ (นาฬิกา)

$V_{ripple,p-p}$ คือ ค่ายอดแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม (โวลต์)

จะได้ขนาดของตัวเก็บประจุ

$$C_d = \frac{(15)(3.33 \times 10^{-3})}{\sqrt{2}(220)(0.05)} = 2,893.146 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ดังนั้นตัวเก็บประจุจะมีขนาด 560 ไมโครฟารัด 450 โวลต์แบบอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic) จำนวน 6 ตัวต่อขนานกันเพื่อลดค่าความต้านทานสมมูลอนุกรมของตัวเก็บประจุ (Equivalent series resistance : ESR)

3. ตัวต้านทานที่ใช้สำหรับให้ตัวเก็บประจุคายประจุ

ทำการออกแบบตัวต้านทานเพื่อการคายประจุของตัวเก็บประจุให้แรงดันไฟฟ้าเหลือ 50 โวลต์ ภายใน 1 นาทีหาได้จาก

$$v = 1.1V_s e^{-t/R_d C_d} \quad (3.2)$$

โดยที่

v คือ แรงดันไฟฟ้าค่าสุดท้ายในการคายประจุ (โวลต์)

V_s คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต (โวลต์)

t คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการคายประจุ (นาที)

R_d คือ ค่าความต้านทานเพื่อการคายประจุ (โอห์ม)

C_d คือ ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการกรองแรงดัน (ฟารัด)

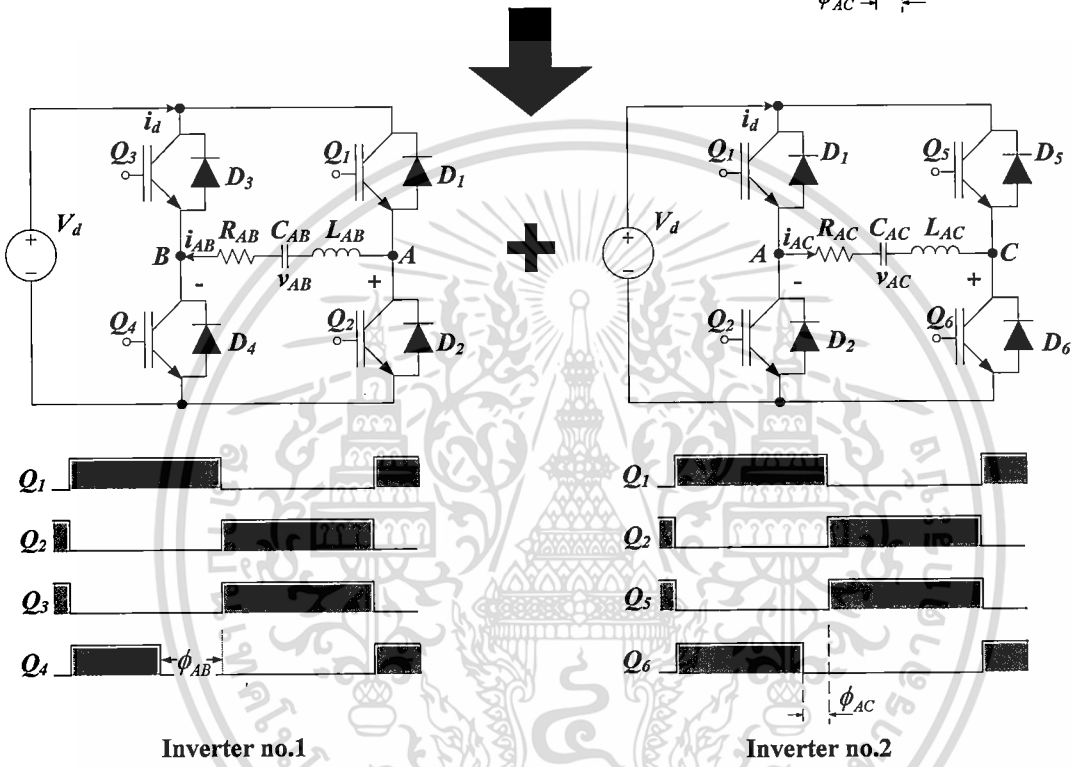
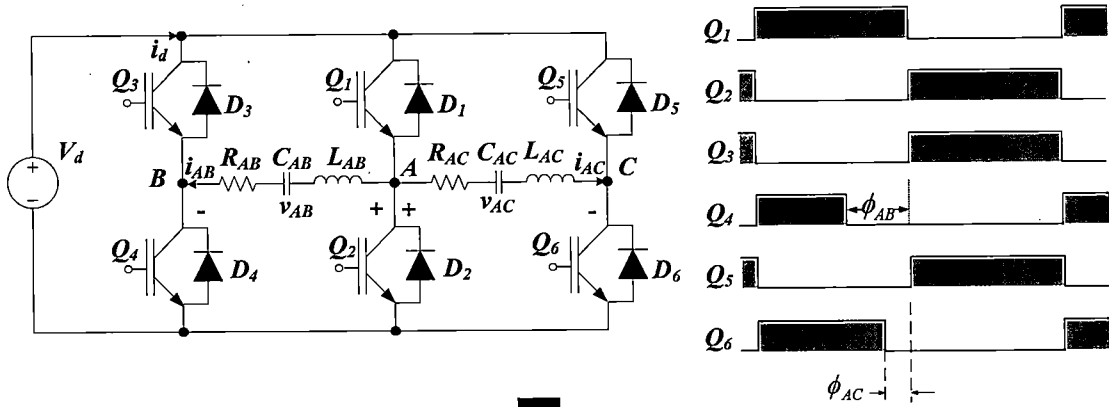
จะได้ค่าความต้านทาน

$$R_d = \frac{-t}{C_d \ln\left(\frac{v}{1.1V_s}\right)} = \frac{-60}{(6 \times 560 \times 10^{-6}) \ln\left(\frac{50}{1.1 \times \sqrt{2} \times 220}\right)} = 9,300 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นตัวต้านทานมีขนาด 10 กิโลโอห์ม 40 วัตต์

3.2.2 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่ง

มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจากชุดเรียงกระแสไฟฟ้าให้เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ายอดที่ +310 โวลต์ และ -310 โวลต์ ความถี่ในการสวิตช์ 56.21 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งประกอบด้วยไอจีบีทีที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ SGL160N60UFD เพื่อให้รองรับกระแสไฟฟ้าสำหรับการจ่ายโหลด 2 ชุด



รูปที่ 3.2 สัญญาณควบคุมวงจรวจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

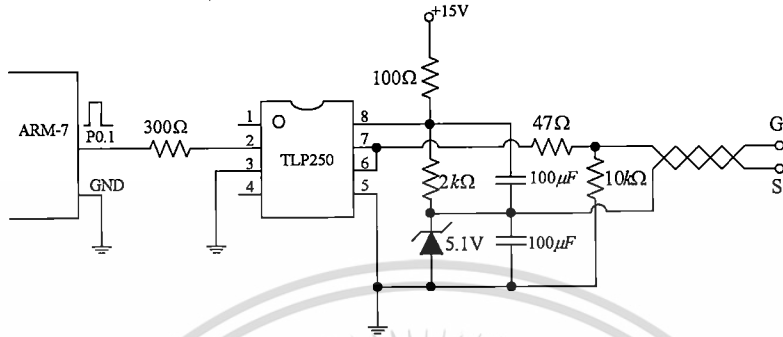
3.2.3 วงจรควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์

วงจรถวลคุมการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์จะทำการสร้างพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมการนำกระแสไฟฟ้าของไอจีบีทีสัญญาณควบคุมจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 โดยที่สวิทช์ในกิ่งร่วมได้แก่สวิทช์ Q_1 และ Q_2 จะถูกควบคุมให้มีค่าดิวตี้ไซเคิล 50 เปอร์เซ็นต์ซึ่งที่ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยควบคุมมุมเลื่อนเฟส (ϕ_{AB}, ϕ_{AC}) โดยการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลในซีกบวกของสวิทช์ Q_4 และ Q_6 สำหรับโหนดชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณควบคุมต้องมีความถี่มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อยเพื่อให้ไอจีบีทีทำงานภายใต้สภาวะสวิทช์แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZVS) และเพื่อลดไทม์เพื่อไม่ให้ไอจีบีทีที่อยู่กิ่งเดียวกันทำงานพร้อมกัน โดยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ LPC2214 จะสร้างสัญญาณขับเกตจำนวน 6 ชุด ที่มีการเพื่อลดไทม์โดยไม่ต้องมีการต่อวงจรเพิ่มเติม มีการแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์และประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคจรทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมและวงจรกำลัง ซึ่งประกอบด้วยไอซีเบอร์ TLP250 จำนวน 6 ชุด ที่มีการแยกกราวด์ที่อิสระต่อกัน สร้างสัญญาณที่ให้ไอจีบีทีทำงานที่ +15 โวลต์และมีการต่อซีเนอร์ ไดโอดเพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าเป็นลบเพื่อให้ไอจีบีทีหยุดนำกระแสไฟฟ้าที่ -5 โวลต์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์

3.2.4 หม้อแปลงกำลังความถี่สูง [4]

มีหน้าที่ลดแรงดันไฟฟ้าจากชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อให้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชุด โหลดอนุกรมเรโซแนนซ์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ เพราะถ้าหากชุดโหลดรับแรงดันจากชุดอินเวอร์เตอร์ โดยตรงจะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ และยังมีหน้าที่ในการแยกโคจรทางไฟฟ้าระหว่างวงจร อินเวอร์เตอร์และโหลดเรโซแนนซ์ รายละเอียดในการออกแบบมีดังนี้

พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	$P_{O2} = 3,000$ วัตต์
กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (rms)	$I_o = 150$ แอมแปร์
กระแสไฟฟ้าอินพุต (rms)	$I_{in} = 15$ แอมแปร์
ความถี่การสวิตช์	$f_s = 56.21$ กิโลเฮิร์ตซ์
แรงดันไฟฟ้าอินพุต	$V_{in} = 310$ โวลต์

1. การเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรท์

จากวิธีผลคูณพื้นที่จะได้

$$A_p = A_c \cdot A_w = \frac{P_{O2} \left(\sqrt{2} + \frac{1}{\eta} \right)}{4JK_w B_m f_s} \quad (3.1)$$

โดยที่

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้พันขดลวด (ตารางเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_w คือ พื้นที่หน้าตัดช่องว่างที่ใช้พันขดลวด (ตารางเมตร)

J คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 4 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

K_w คือ Window utilization factor มีค่าเท่ากับ 0.2

B_w คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด มีค่าเท่ากับ 0.2 เวเบอร์ต่อตารางเมตร

η คือ ประสิทธิภาพของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง มีค่าเท่ากับ 0.8

แทนค่าต่างๆในสมการ (3.1) จะได้

$$A_p = \frac{3,000 \left(\sqrt{2} + \frac{1}{0.8} \right)}{4 \times 4 \times 10^6 \times 0.2 \times 0.2 \times 56.21 \times 10^3} = 222,175 \text{ (ตารางมิลลิเมตร)}^2$$

ทำการเลือกแกนให้มีค่า A_p ให้มากกว่าค่าที่คำนวณ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกแกนขนาด EE80/76 ซึ่งมีค่า $A_c = 377$ ตารางมิลลิเมตร $A_w = 1,480$ ตารางมิลลิเมตร ในทางปฏิบัติจะทำการเพื่อแกนเป็น 2 เท่าเพื่อขนาดกำลังไฟฟ้าและลดการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรท์ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แกนขนาด EE80/76 จำนวน 2 แกนขนานกัน

2. การคำนวณจำนวนรอบ

จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$$N_1 = \frac{V_{s,max}}{4A_c B_m f_s} \quad (3.2)$$

โดยที่

$V_{s,max}$ คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้านปฐมภูมิ (โวลต์)

N_1 คือ จำนวนรอบการพันขดลวดด้านปฐมภูมิ (รอบ)

แทนค่าจะได้

$$N_1 = \frac{310}{4 \times 377 \times 2 \times 10^{-6} \times 0.2 \times 56.21 \times 10^3} = 9.14 \text{ รอบ}$$

ในทางปฏิบัติจะทำการเพื่อแกนเป็น 2 เท่าเพื่อป้องกันแกนเฟอร์ไรท์อิ่มตัว ดังนั้นจำนวนรอบในการพันขดลวดด้านปฐมภูมิคือ 20 รอบ

จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ $N_2 = N_1/a$

โดยที่ a คือ อัตราส่วนจำนวนรอบ มีค่าเท่ากับ 10

ดังนั้นจำนวนรอบด้านทุติยภูมิเท่ากับ $N_2 = 20/10 = 2$ รอบ

3. การคำนวณขนาดตัวนำ

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านปฐมภูมิ $a_1 = I_1/J = 15/4 = 3.75$ ตารางมิลลิเมตร ทำการเลือกตัวนำเป็นลวดทองแดงอาบน้ำยาเบอร์ AWG 30 จำนวน 33 เส้นตีเกลียวและหุ้มฉนวนด้วยปลอกฉนวนใยแก้วเพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขดลวด

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดด้านทุติยภูมิ $a_2 = I_2/J = 150/4 = 37.5$ ตารางมิลลิเมตร ทำการเลือกตัวนำเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรหนา 1.5 มิลลิเมตร หุ้มฉนวนด้วยปลอกฉนวนใยแก้วและระบายความร้อนที่แกนกลางด้วยน้ำ

3.2.5 ตัวเก็บประจุลือกกิง

มีหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่ให้เข้าสู่หม้อแปลงกำลังความถี่สูง ทำให้พื้นที่ใต้กราฟของแรงดันไฟฟ้าในซีกบวกมีค่าเท่ากับซีกลบ ป้องกันไม่ให้หม้อแปลงกำลังความถี่สูงเกิดความร้อนและเสียหายได้ โดยตัวเก็บประจุที่ใช้ต้องมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าโหลดเรโซแนนซ์มากๆ เพื่อไม่ให้ค่าความจุไฟฟ้านี้ส่งผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์เพราะตัวเก็บประจุลือกกิงและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์จะต่ออนุกรมกันอยู่ โดยมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

สมการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ

$$C_b = I \frac{dt}{dV_c} \quad (3.3)$$

โดยที่

C_b คือ ค่าตัวเก็บประจุลือกกิง (ฟารัด)

I คือ กระแสที่ไหลเข้าทางด้านปฐมภูมิ (แอมแปร์)

dt คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ (นาทิจ)

dV_c คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (โวลต์)

สำหรับเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าหาได้จากสมการ (3.4) และ (3.5)

$$dt = \frac{T}{2} \delta_{\max} \quad (3.4)$$

และ

$$T = \frac{1}{f_s} \quad (3.5)$$

โดยที่

T คือ คาบเวลาในการสวิตช์ (นาทิจ)

δ_{\max} คือ ดิวตี้ไซเคิลสูงสุด

f_s คือ ความถี่การสวิตช์ (เฮิรตซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.4) และ (3.5) จะได้คาบเวลาในการอัดประจุไฟฟ้า

$$dt = \frac{1}{2 \times 56.21 \times 10^3} \times 0.8 = 7.11 \text{ ไมโครวินาที}$$

ในการออกแบบตัวเก็บประจุลือกกิง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (dV_c) ควรมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์เพื่อประสิทธิภาพในส่วนของไลน์เร็กกูเลชันของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 โวลต์ ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุลือกกิงสามารถหาได้ดังนี้

$$C_b = 15 \times \frac{7.11 \times 10^{-6}}{30} = 3.56 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุลือกกิงมีขนาด 1 ไมโครฟารัด 630 โวลต์ แบบโพลีโพรพีลีน จำนวน 4 ตัวต่อขนานกัน

3.2.6 โหลดอนุกรมโรซเนนซ์

มีหน้าที่เหมือนหม้อแปลงไฟฟ้าที่สร้างกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปที่ชิ้นงาน โดยจะไหลวนเฉพาะบริเวณผิวและเกิดความร้อนที่ชิ้นงาน ชุดโหลดประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน โดยตัวต้านทานจะอยู่ในรูปความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำและค่า ESR ของตัวเก็บประจุ

3.2.6.1 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

1. การคำนวณพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ

ขดลวดที่ใช้ในงานวิจัยเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรหนา 1.5 มิลลิเมตรระบายความร้อนด้วยน้ำที่แกนกลางซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

$$\text{ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์} \quad f_s = 56.21 \quad \text{กิโลเฮิรตซ์}$$

$$\text{จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ} \quad N_c = 7 \quad \text{รอบ}$$

$$\text{ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ} \quad l_c = 60 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{Coil Correction Factor} \quad k_r = 1.15$$

$$\text{ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของอากาศ} \quad \mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$\text{ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของชิ้นงาน} \quad \mu_w = 50$$

$$\text{ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำ} \quad \mu_c = 1$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน} \quad d_w = 25.4 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ} \quad d_c = 45 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานจำเพาะของขี้ผึ้ง $\rho_w = 25 \times 10^{-8}$ โอห์ม-เมตร
 ค่าความต้านทานจำเพาะของทองแดง $\rho_c = 2 \times 10^{-8}$ โอห์ม-เมตร

ขั้นตอนการคำนวณ

ความถี่เชิงมุม $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 56.21 \times 10^3 = 352.998 \times 10^3$ เรเดียน/วินาที

ความลึกผิวของขี้ผึ้ง $\delta_w = \sqrt{\frac{2\rho_w}{\mu_0\mu_w\omega}} = 0.15$ มิลลิเมตร

ความลึกผิวที่ขดลวดเหนี่ยวนำ $\delta_c = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu_0\mu_c\omega}} = 0.30$ มิลลิเมตร

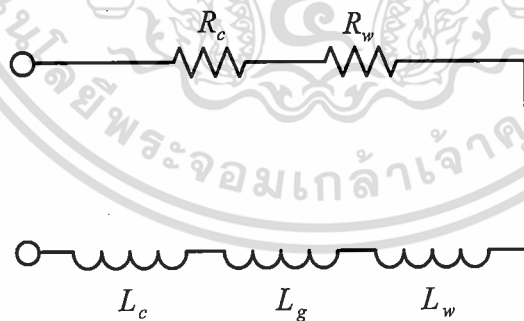
จากค่าความลึกที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะได้อัตราส่วน

$$\frac{d_w}{\delta_w} = 169.13$$

เมื่อค่า $\frac{d_w}{\delta_w} > 8$ สามารถหาค่า p และ q ได้ดังนี้

$$p = \frac{2}{\left(1.23 + \frac{d_w}{\delta_w}\right)} = 0.01174$$

$$q = \frac{2}{\frac{d_w}{\delta_w}} = 0.01183$$



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ

เมื่อ $K = \frac{\omega\mu_0 N_c^2}{l_c}$

$$R_w = K(\mu_r p A_w) = 0.1076 \text{ โอห์ม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_c = K \left(\frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) = 0.00886 \text{ โอห์ม}$$

$$L_g = N_c^2 \frac{\mu_0 A_g}{l_c} = 1.111 \text{ ไมโครเฮนรี}$$

$$L_w = \frac{2N_c^2}{l_c} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \rho_w}{\pi f_s}} \frac{A_w}{d_w} = 0.307 \text{ ไมโครเฮนรี}$$

$$L_c = \frac{2N_c^2}{l_c} \sqrt{\frac{\mu_0 \rho_c}{\pi f}} \frac{k_r \pi d_c}{2} = 0.0546 \text{ ไมโครเฮนรี}$$

$$X_w = K(\mu_r q A_w) = 0.108 \text{ โอห์ม}$$

$$X_c = K \left(\frac{k_r \pi d_c \delta_c}{2} \right) = 0.0088 \text{ โอห์ม}$$

$$X_g = K(A_g) = 0.39 \text{ โอห์ม}$$

จะได้ค่าความต้านทานรวม $R_s = 0.117$ โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำรวม $L_s = 1.47$ ไมโครเฮนรี และค่ารีแอกแตนซ์รวม $X_s = 0.51$ โอห์ม

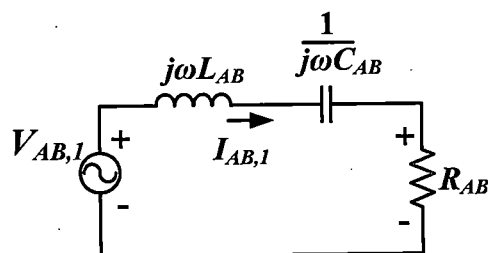
$$\text{ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำ } \theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_s} = 1.34 \text{ เรเดียน}$$

$$\text{ดังนั้น } PF = \cos \theta = 0.222$$

$$\text{ประสิทธิภาพขดลวดเหนี่ยวนำ } \eta = \frac{R_w}{R_s} \times 100 = 92.41 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

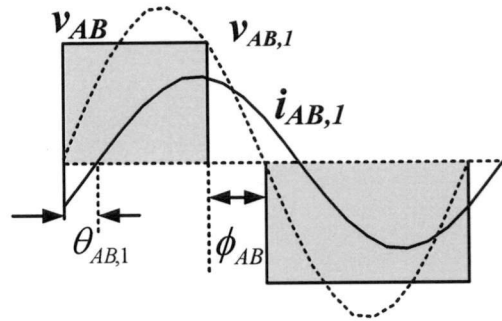
2. การเปรียบเทียบการคำนวณและการทดลอง [5]

ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรอนุกรมตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 3.5 จะได้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้างดรูปที่ 3.6 และนำมาเขียนเวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.7 โดยจะพิจารณาเฉพาะโหนดชุดที่ 1

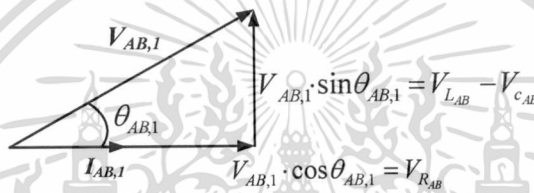


รูปที่ 3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาพุดต์และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.7 เวกเตอร์ไคอะแกรม

จะได้

$$R_{AB} = \frac{V_{AB,1} \cdot \cos \theta_{AB}}{I_{AB,1}} \tag{3.6}$$

และ

$$V_{LAB} = V_{AB,1} \cdot \sin \theta_{AB,1} + V_{CAB}$$

$$I_{AB,1} \cdot \omega_s L_{AB} = V_{AB,1} \cdot \sin \theta_{AB,1} + I_{AB,1} \cdot \frac{1}{\omega_s C_{AB}}$$

ดังนั้น

$$L_{AB} = \frac{1}{2\pi f_s} \left[\frac{V_{AB,1} \cdot \sin \theta_{AB,1}}{I_{AB,1}} + \frac{1}{2\pi f_s C_{AB}} \right] \tag{3.7}$$

โดยที่

R_{AB} คือ ค่าความต้านทานสมมูลรวมวงจรอินเวอร์เตอร์ (โอห์ม)

L_{AB} คือ ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลรวมวงจรอินเวอร์เตอร์ (เฮนรี)

C_{AB} คือ ค่าตัวเก็บประจุสมมูลรวมวงจรอินเวอร์เตอร์ (ฟารัด)

$V_{AB,1}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูล (โวลต์)

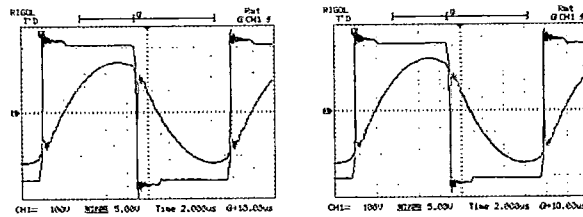
$I_{AB,1}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูล (แอมแปร์)

$\theta_{AB,1}$ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง $V_{AB,1}$ และ $I_{AB,1}$ (เรเดียน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\theta_{AB,1}$ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง $V_{AB,1}$ และ $I_{AB,1}$ (เรเดียน)

f_s คือ ความถี่การสวิตช์ของวงจรรินเวอร์เตอร์ (เฮิร์ตซ์)



(a)

(b)

รูปที่ 3.8 (a) คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ โหลดชุดที่ 1

(b) คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ โหลดชุดที่ 2

ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนรอบของหม้อแปลงซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ อัตราส่วนเท่ากับ 10 และค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์เท่ากับ 0.065 ไมโครฟารัด ดังนั้น จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.8 จะได้ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำดังนี้

โหลดชุดที่ 1 ค่าความต้านทานสมมูล 23.556 โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำสมมูล 162.05 ไมโครเฮนรี

โหลดชุดที่ 2 ค่าความต้านทานสมมูล 22.748 โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำสมมูล 161.47 ไมโครเฮนรี

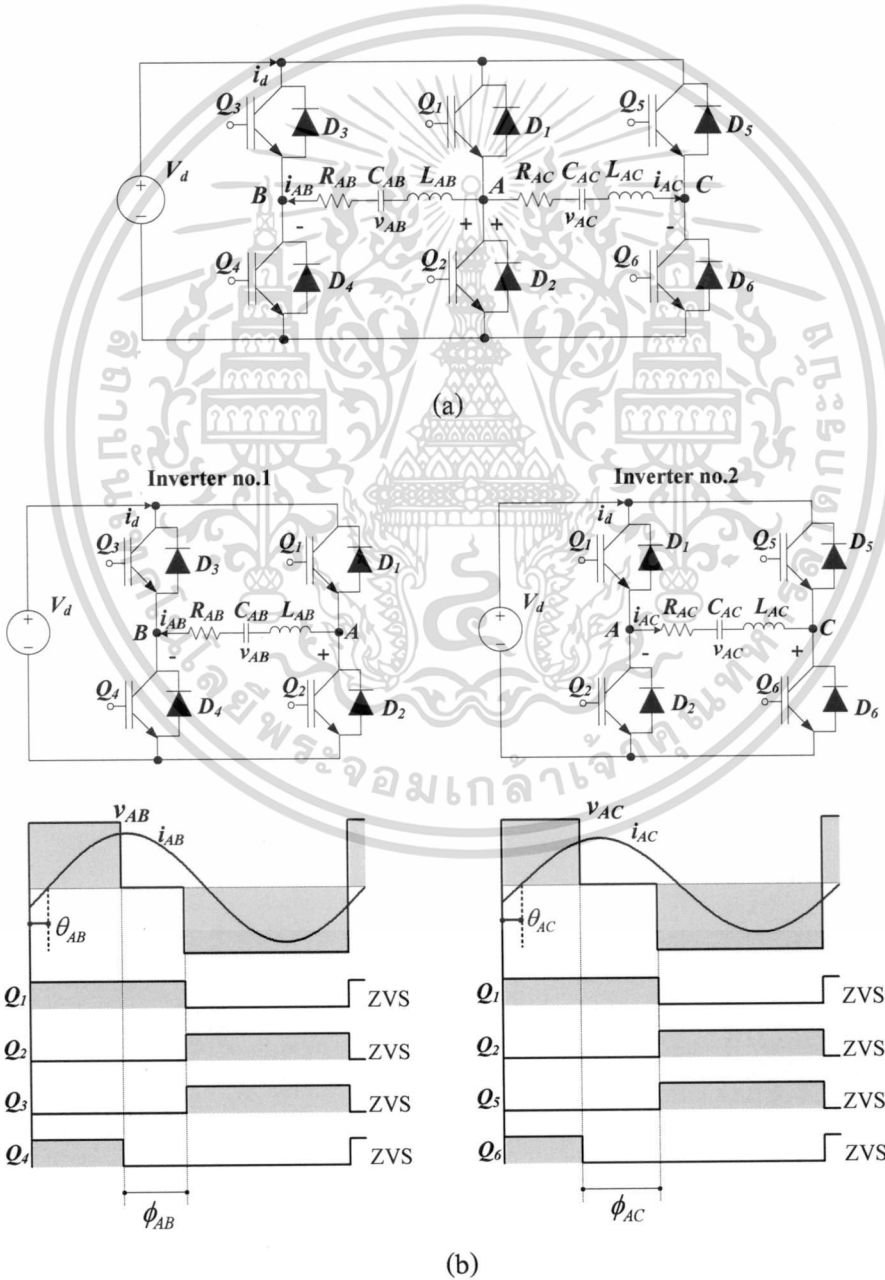
ค่าความต้านทานจากการทดลองจะเป็นค่าความต้านทานสมมูลวงจรรินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ, ชีงงาน ความต้านทานสมมูลอนุกรมของตัวเก็บประจุ (ESR) และค่าความต้านทานขดลวดของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าความต้านทานที่มาจากขดลวดเหนี่ยวนำและชีงงานเท่านั้น สำหรับค่าความเหนี่ยวนำสมมูลวงจรรินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลองประกอบด้วย ความเหนี่ยวนำจากขดลวด ความเหนี่ยวนำจากชีงงาน ความเหนี่ยวนำจากแกนอากาศ และความเหนี่ยวนำจากหม้อแปลงกำลังความถี่สูง ในการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ ต้องใช้กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าสูง ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำได้โดย การทำให้ค่าแอมแปร์-เทิร์น (Ampere-turn) ของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ถ้าขดลวดเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบน้อย กระแสไฟฟ้าในขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องมีค่าสูง ถ้าต้องการให้กระแสไฟฟ้าน้อยลง ขดลวดเหนี่ยวนำจะมีจำนวนรอบมากขึ้น ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่เป็นโหลดของอินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงกำลังความถี่สูง ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำ ให้มีความเหมาะสมกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6.2 การออกแบบตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์

ตัวเก็บประจุสำหรับโพลาร์เรโซแนนซ์เป็นแบบที่ใช้กับความถี่สูงโดยจะต่ออนุกรมระหว่างตัวเก็บประจุลือกิ่งและขดปฐมภูมิหม้อแปลงกำลังความถี่สูงตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นแบบโพลีโพรพีลีนขนาด 0.065 ไมโครฟารัด ที่สามารถทนแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 1,200 โวลต์

3.3 หลักการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ [6,7]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 (a) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ

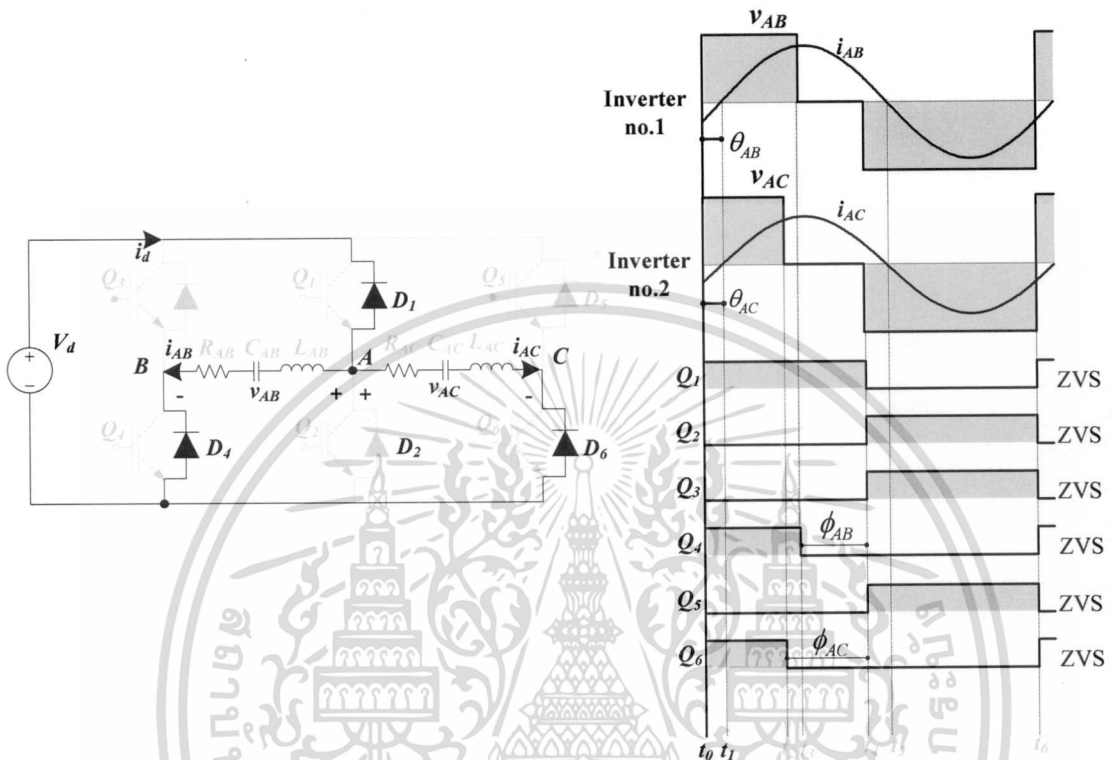
(b) กลิ่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

พิจารณา รูปที่ 3.9 (a) วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ และรูปที่ 3.9 (b) เป็นการแยกวงจรอินเวอร์เตอร์ออกเป็นสองส่วนเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โหลดชุดที่ 1 ประกอบด้วย ความต้านทานสมมูลรวม (R_{AB}) ความเหนี่ยวนำสมมูลรวม (L_{AB}) และตัวเก็บประจุสมมูลรวม (C_{AB}) ส่วนโหลดชุดที่ 2 ประกอบด้วย ความต้านทานสมมูลรวม (R_{AC}) ความเหนี่ยวนำสมมูลรวม (L_{AC}) และตัวเก็บประจุสมมูลรวม (C_{AC}) วงจรควบคุมการนำกระแสไฟฟ้าของสวิตช์สั่งงานให้สวิตช์ทั้งหกทำงานที่ความถี่การสวิตช์คงที่และให้มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ โหลดจึงมีสถานะเป็นความเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดโหลดล่าหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นมุมเท่ากับ θ_{AB} (โหลดชุดที่ 1) และ θ_{AC} (โหลดชุดที่ 2) จะเห็นว่า การขนถ่ายประจุไฟฟ้าของสวิตช์อันเนื่องมาจากประจุไฟฟ้าที่ค้างระหว่างขาคอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์ ทำการคายประจุเสร็จเรียบร้อยก่อนที่สวิตช์จะเริ่มนำกระแส จึงทำให้สวิตช์ทั้งหกนำกระแสไฟฟ้าในสถานะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZVS) ตลอดย่านการทำงาน แต่ไม่อยู่ในโหมดการทำงานแบบกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZCS) ซึ่งรายละเอียดการทำงานของสวิตช์สรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลักษณะการทำงานของสวิตช์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ

Mode	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	เงื่อนไข
ZVS mode	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	$\theta_{AB} > 0, \theta_{AC} > 0$
ZCS mode	Non ZCS	Non ZCS	Non ZCS	Non ZCS	Non ZCS	Non ZCS	

1. การวิเคราะห์การทำงานช่วงเวลา $t_0 - t_1$

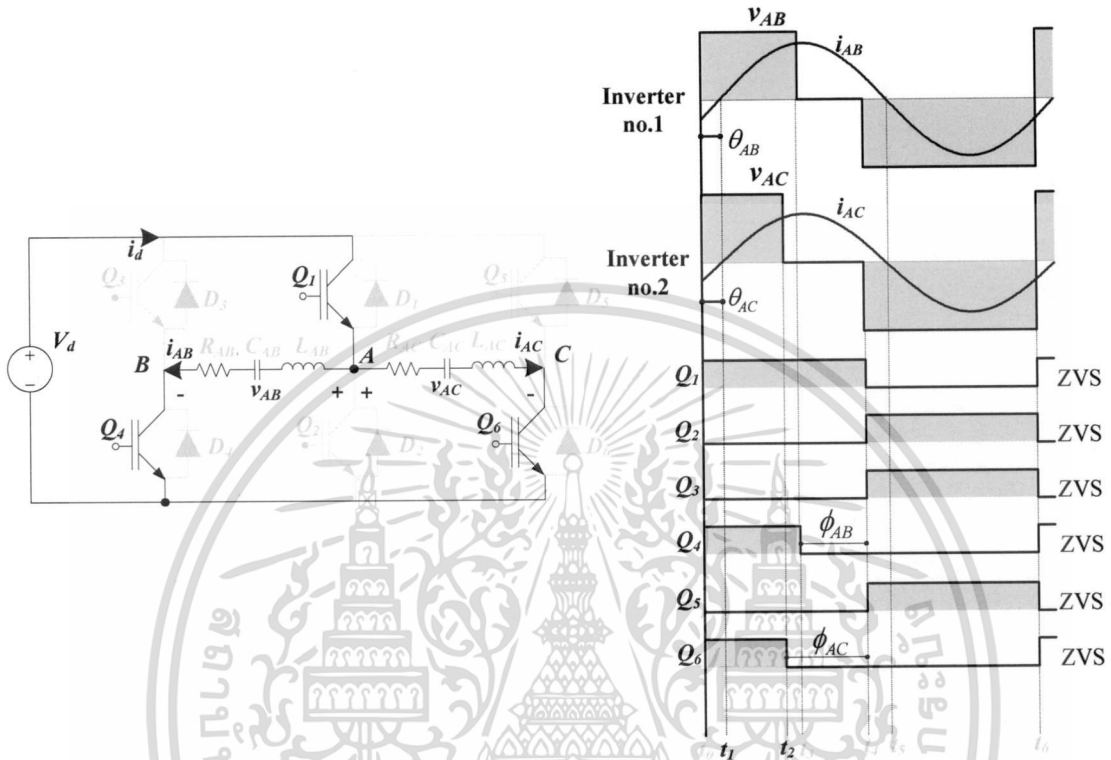


รูปที่ 3.10 วงจรการทำงานในช่วงเวลา $t_0 - t_1$

โหนดชุดที่ 1 ทำงานใน Re-generative mode โดยโหนดคืนพลังงานที่สะสมสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยผ่านไดโอด D_1 กับ D_4 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} จะเท่ากับ $+V_d$ ส่วนกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} จะมีทิศทางเป็นลบ

โหนดชุดที่ 2 ทำงานใน Re-generative mode เช่นกัน กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} ไหลผ่านไดโอด D_1 กับ D_6 มีทิศทางเป็นลบ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} จะเท่ากับ $+V_d$ ดังรูปที่ 3.10

2. การวิเคราะห์การทำงานช่วงเวลา t_1 - t_2

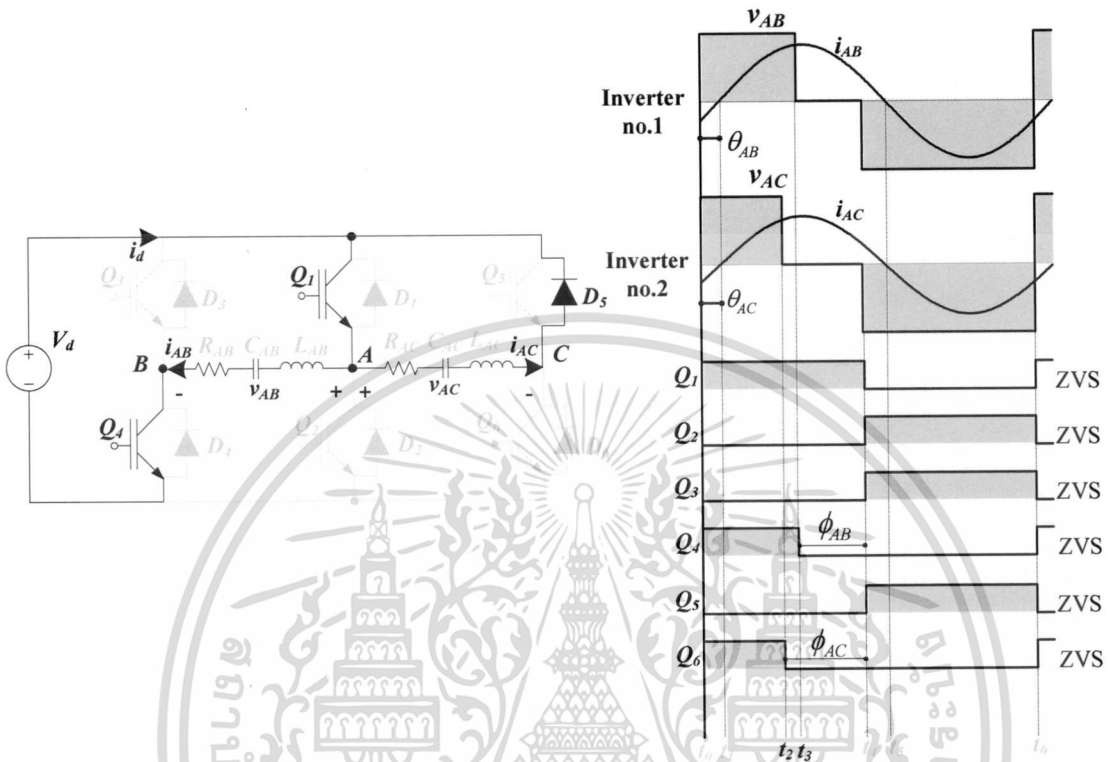


รูปที่ 3.11 วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_1 - t_2

โหนดชุดที่ 1 ทำงานใน Powering mode ซึ่งได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยผ่านไอจีบีที Q_1 กับ Q_4 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} เท่ากับ $+V_d$ และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} จะมีทิศทางเป็นบวก

โหนดชุดที่ 2 ทำงานใน Powering mode เช่นกัน ได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยผ่านไอจีบีที Q_1 กับ Q_6 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} เท่ากับ $+V_d$ และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} มีทิศทางเป็นบวกดังรูปที่ 3.11

3. การวิเคราะห์การทำงานช่วงเวลา $t_2 - t_3$

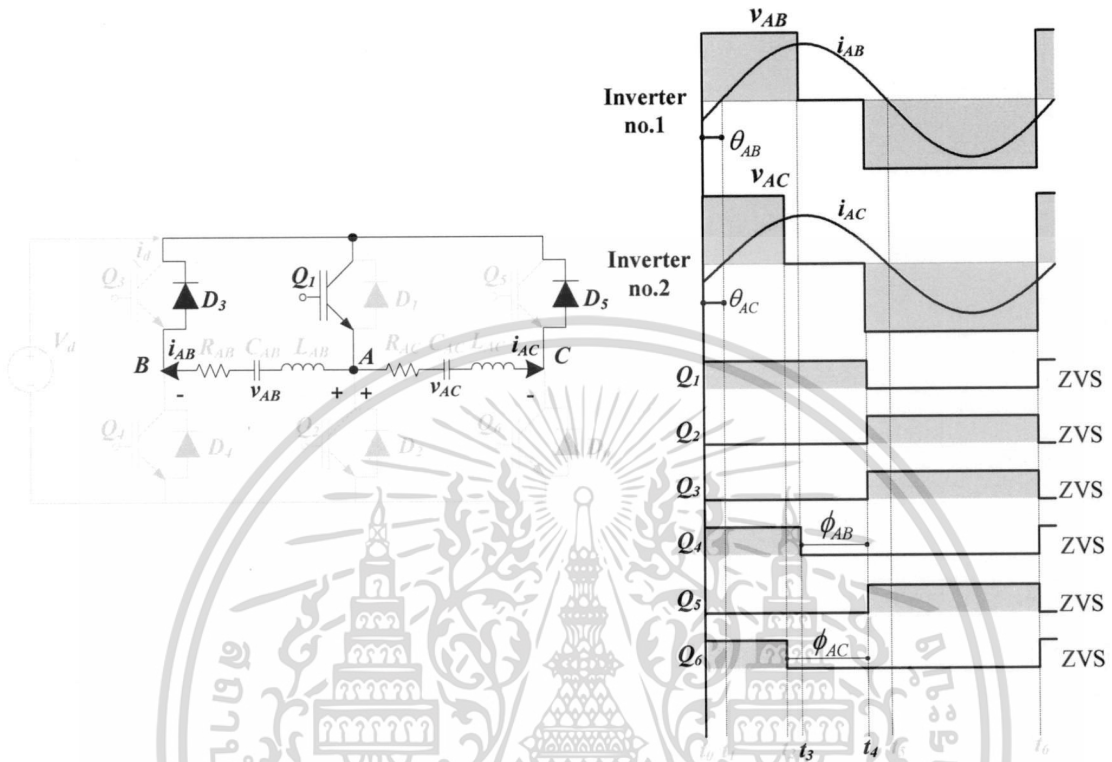


รูปที่ 3.12 วงจรการทำงานในช่วงเวลา $t_2 - t_3$

โหนดชุดที่ 1 ยังคงทำงานใน Powering mode วงจรควบคุมการนำกระแสสั่งงานให้ไอจีบีที Q_1 และ Q_4 นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} เท่ากับ $+V_d$ และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} จะมีทิศทางเป็นบวก

โหนดชุดที่ 2 ทำงานใน Freewheeling mode วงจรควบคุมการนำกระแสสั่งงานให้ไอจีบีที Q_6 หุดย่นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} เท่ากับศูนย์ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} ไหลผ่าน ไอจีบีที Q_2 กับไดโอด D_5 และมีทิศทางเป็นบวกดังรูปที่ 3.12

4. การวิเคราะห์การทำงานช่วงเวลา t_3 - t_4

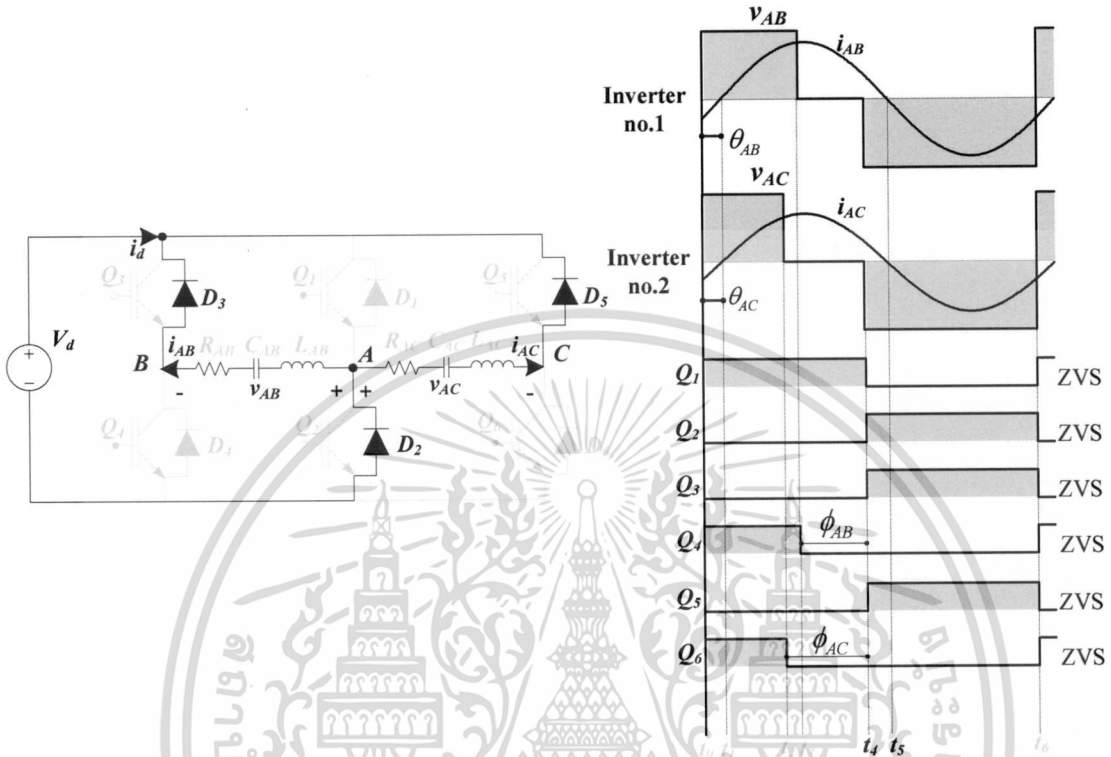


รูปที่ 3.13 วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_3 - t_4

โหนดชุดที่ 1 ทำงานใน Freewheeling mode วงจรควบคุมการนำกระแสไฟฟ้ายังคงสั่งงานให้ไอจีบีที Q_1 นำกระแสไฟฟ้าเพียงตัวเดียว ทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} เท่ากับศูนย์ และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} ไหลผ่านไดโอด D_3 กับไอจีบีที Q_1 มีทิศทางเป็นบวก

โหนดชุดที่ 2 ทำงานใน Freewheeling mode เช่นกัน แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} เท่ากับศูนย์ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} ไหลผ่านไดโอด D_5 กับไอจีบีที Q_1 และมีทิศทางเป็นบวก ดังรูปที่ 3.13

5. การวิเคราะห์การทำงานช่วงเวลา t_4-t_5



รูปที่ 3.14 วงจรการทำงานในช่วงเวลา t_4-t_5

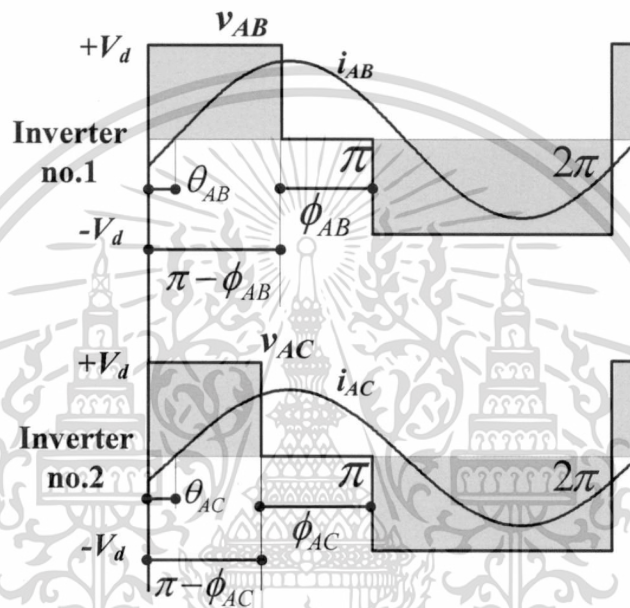
โหนดชุดที่ 1 ทำงานในโหมด Re-generative mode โหลดคืนพลังงานสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงโดยผ่านไดโอด D_2 กับ D_3 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} จะเท่ากับ $-V_d$ และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} มีทิศทางเป็นบวก

โหนดชุดที่ 2 ทำงานในโหมด Re-generative mode เช่นกัน โดยคืนพลังงานสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน D_2 กับ D_5 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} จะเท่ากับ $-V_d$ และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} มีทิศทางเป็นบวกดังรูปที่ 3.14

3.4 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุต [8]

3.4.1 การวิเคราะห์สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีการควบคุมแรงดันแบบ Asymmetrical Voltage Cancellation แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเลื่อนเฟส ลักษณะคลื่นดังรูปที่ 3.16 สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถใช้หลักการวิเคราะห์อนุกรมฟูเรียร์เพื่อแยกองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.16 คลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตช่วงขณะของ โหลดชุดที่ 1

$$v_{AB} = \frac{V_d}{2\pi}(-\phi_{AB}) + \frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\sin n(\pi - \phi_{AB}) \cdot \cos n\omega_s t + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AB})) \cdot \sin n\omega_s t \right] \quad (3.8)$$

และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตช่วงขณะของ โหลดชุดที่ 2

$$v_{AC} = \frac{V_d}{2\pi}(-\phi_{AC}) + \frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\sin n(\pi - \phi_{AC}) \cdot \cos n\omega_s t + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AC})) \cdot \sin n\omega_s t \right] \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

v_{AB} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะของโพลชุดที่ 1 (โวลต์)

v_{AC} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะของโพลชุดที่ 2 (โวลต์)

ϕ_{AB} คือ มุมเลื่อนเฟสของโพลชุดที่ 1 (เรเดียน)

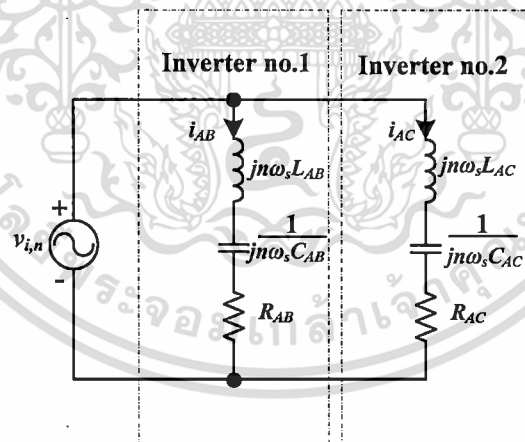
ϕ_{AC} คือ มุมเลื่อนเฟสของโพลชุดที่ 2 (เรเดียน)

V_d คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (โวลต์)

n คือ ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

3.4.2 การวิเคราะห์สมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

การหาสมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสามารถใช้วงจรเฟสเซอร์ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ต่างๆตามรูปที่ 3.17 แล้วใช้ทฤษฎีการทับซ้อน (Super position) ในการวิเคราะห์ จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_d จะไม่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเพราะผลของตัวเก็บประจุบล็อกกิง (Blocking Capacitor) ป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไหลเข้าสู่หม้อแปลงกำลังความถี่สูง



รูปที่ 3.17 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

สำหรับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะของโพลชุดที่ 1 จะได้

$$i_{AB} = \frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot Z_{AB,n}} \left[\sin n(\pi - \phi_{AB}) \cdot \cos(n\omega_s t - \theta_{AB,n}) + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AB})) \cdot \sin(n\omega_s t - \theta_{AB,n}) \right] \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

$$Z_{AB,n} = \sqrt{R_{AB}^2 + \left(jn\omega_s L_{AB} - j \frac{1}{n\omega_s C_{AB}} \right)^2} \quad (3.11)$$

มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

$$\theta_{AB,n} = \arctan \left(\frac{jn\omega_s L_{AB} - j \frac{1}{n\omega_s C_{AB}}}{R_{AB}} \right) \quad (3.12)$$

โดยที่

- i_{AB} คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะของโหนดชุดที่ 1 (แอมแปร์)
- Z_{AB} คือ อิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหนดชุดที่ 1 (โอห์ม)
- R_{AB} คือ ค่าความต้านทานของโหนดชุดที่ 1 (โอห์ม)
- C_{AB} คือ ค่าตัวเก็บประจุที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหนดชุดที่ 1 (ฟารัด)
- L_{AB} คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหนดชุดที่ 1 (เฮนรี)
- $\theta_{AB,n}$ คือ มุมเลื่อนต่างเฟสระหว่าง V_{AB} และ i_{AB} ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหนดชุดที่ 1 (เรเดียน)

ในการทำงานเดียวกันการวิเคราะห์ใน โหนดชุดที่ 2 จะได้

$$i_{AC} = \frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot Z_{AC,n}} \left[\frac{\sin n(\pi - \phi_{AC}) \cdot \cos(n\omega_s t - \theta_{AC,n})}{(2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AC})) \cdot \sin(n\omega_s t - \theta_{AC,n})} \right] \quad (3.13)$$

$$Z_{AC,n} = \sqrt{R_{AC}^2 + \left(jn\omega_s L_{AC} - j \frac{1}{n\omega_s C_{AC}} \right)^2} \quad (3.14)$$

$$\theta_{AC,n} = \arctan \left(\frac{jn\omega_s L_{AC} - j \frac{1}{n\omega_s C_{AC}}}{R_{AC}} \right) \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

i_{AC} คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะของโหลดชุดที่ 2 (แอมแปร์)

Z_{AC} คือ อิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหลดชุดที่ 2 (โอห์ม)

R_{AC} คือ ค่าความต้านทานของโหลดชุดที่ 2 (โอห์ม)

C_{AC} คือ ค่าตัวเก็บประจุที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหลดชุดที่ 2 (ฟารัด)

L_{AC} คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหลดชุดที่ 2 (เฮนรี)

$\theta_{AC,n}$ คือ มุมเลื่อนต่างเฟสระหว่าง V_{AC} และ i_{AC} ที่ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ของโหลดชุดที่ 2

(เรเดียน)

3.4.3 การวิเคราะห์สมการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดแต่ละชุดสามารถคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะกับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะดังสมการที่ (3.16)

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะของโหลดชุดที่ 1, p_{AB}

$$p_{AB} = v_{AB} \cdot i_{AB} \quad (3.16)$$

แทนค่าสมการที่ (3.8) และ (3.10) ลงในสมการที่ (3.16) จะได้

$$p_{AB} = \left[\left(\frac{V_d}{2\pi} (-\phi_{AB}) + \frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\sin n(\pi - \phi_{AB}) \cdot \cos n\omega_s t + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AB})) \cdot \sin n\omega_s t \right] \right) \times \left(\frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot Z_{AB,n}} \left[\sin n(\pi - \phi_{AB}) \cdot \cos(n\omega_s t - \theta_{AB,n}) + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AB})) \cdot \sin(n\omega_s t - \theta_{AB,n}) \right] \right) \right] \quad (3.17)$$

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเฉลี่ยของโหลดชุดที่ 1, P_{AB}

$$P_{AB} = \frac{1}{T} \int p_{AB} \cdot dt \quad (3.18)$$

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะของ โหลดชุดที่ 2, p_{AC}

$$P_{AC} = \left[\left(\frac{V_d}{2\pi} (-\phi_{AC}) + \frac{Vd}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\sin n(\pi - \phi_{AC}) \cdot \cos n\omega_s t + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AC})) \cdot \sin n\omega_s t \right] \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot Z_{AC,n}} \left[\sin n(\pi - \phi_{AC}) \cdot \cos(n\omega_s t - \theta_{AC,n}) + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AC})) \cdot \sin(n\omega_s t - \theta_{AC,n}) \right] \right) \right] \quad (3.19)$$

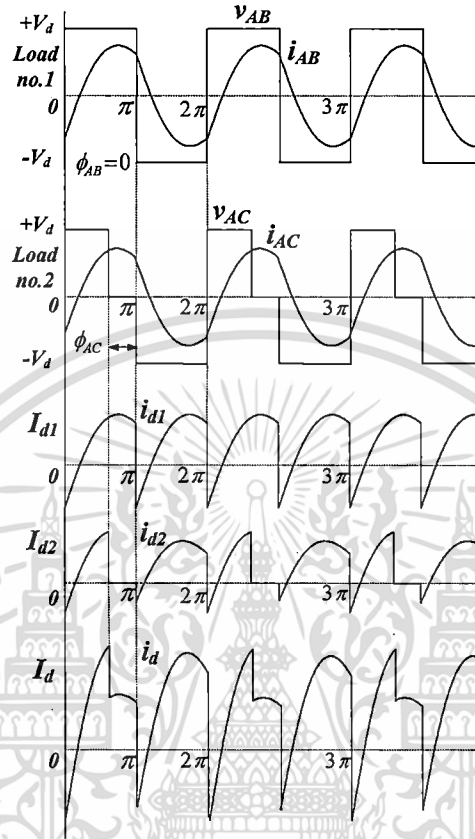
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเฉลี่ยของ โหลดชุดที่ 2, P_{AC}

$$P_{AC} = \frac{1}{T} \int p_{AC} \cdot dt \quad (3.20)$$

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์, P_o

$$P_o = P_{AB} + P_{AC} \quad (3.21)$$

3.4.4 การวิเคราะห์สมการกระแสไฟฟ้าอินพุต



รูปที่ 3.18 คลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกอินเวอร์เตอร์

พิจารณาจากรูปที่ 3.18 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าอินพุตชั่วขณะจะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตชั่วขณะที่มีขนาดเท่ากับ 1 โดยรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังนี้

กระแสไฟฟ้าอินพุตชั่วขณะของโหลดชุดที่ 1, i_{d1}

$$i_{d1} = \left[\left(\frac{1}{2\pi} (-\phi_{AB}) + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\sin n(\pi - \phi_{AB}) \cdot \cos n\omega_s t + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AB})) \cdot \sin n\omega_s t \right] \right) \times \left(\frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot Z_{AB,n}} \left[\sin n(\pi - \phi_{AB}) \cdot \cos(n\omega_s t - \theta_{AB,n}) + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AB})) \cdot \sin(n\omega_s t - \theta_{AB,n}) \right] \right) \right] \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยของโหลดชุดที่ 1, I_{d1}

$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi-\phi_1} i_{AB} d\omega_s t + \int_{\pi-\phi_1}^{\pi} 0 d\omega_s t + \int_{\pi}^{2\pi} i_{AB} d\omega_s t \right] \quad (3.23)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสไฟฟ้าอินพุตช่วงขณะของโหลดชุดที่ 2, i_{d2}

$$i_{d2} = \left[\left(\frac{1}{2\pi} (-\phi_{AC}) + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\sin n(\pi - \phi_{AC}) \cdot \cos n\omega_s t + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AC})) \cdot \sin n\omega_s t \right] \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{V_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot Z_{AC,n}} \left[\sin n(\pi - \phi_{AC}) \cdot \cos(n\omega_s t - \theta_{AC,n}) + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi_{AC})) \cdot \sin(n\omega_s t - \theta_{AC,n}) \right] \right) \right] \quad (3.24)$$

กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยของโหลดชุดที่ 2, I_{d2}

$$I_{d2} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi-\phi_1} i_{AC} d\omega_s t + \int_{\pi-\phi_1}^{\pi} 0 d\omega_s t + \int_{\pi}^{2\pi} i_{AC} d\omega_s t \right] \quad (3.25)$$

กระแสไฟฟ้าอินพุตช่วงขณะของวงจรอินเวอร์เตอร์, i_d

$$i_d = i_{d1} + i_{d2} \quad (3.26)$$

กระแสอินพุตเฉลี่ยของวงจรอินเวอร์เตอร์, I_d

$$I_d = I_{d1} + I_{d2} \quad (3.27)$$

3.4.5 การวิเคราะห์สมการกำลังไฟฟ้าอินพุต

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยสามารถหาได้จากผลคูณค่ากระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับชุดอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (3.28) สำหรับการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.29)

$$P_d = V_d \times I_d \quad (3.28)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_d} \quad (3.29)$$

3.5 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ ซึ่งส่วนประกอบหลักได้แก่ วงจรเรียงกระแส วงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่ง ใช้สวิตช์จำนวน 6 ตัว วงจรควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงกำลังความถี่สูง ตัวเก็บประจุถึอกกิ่งและโหลดอนุกรมเรโซแนนซ์ การวิเคราะห์หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสามกิ่งสำหรับเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบ การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์



บทที่ 4

ผลการทดลองและผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะทำการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งขั้วชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุต ซึ่งหัวข้อที่ทำการทดลองประกอบด้วย

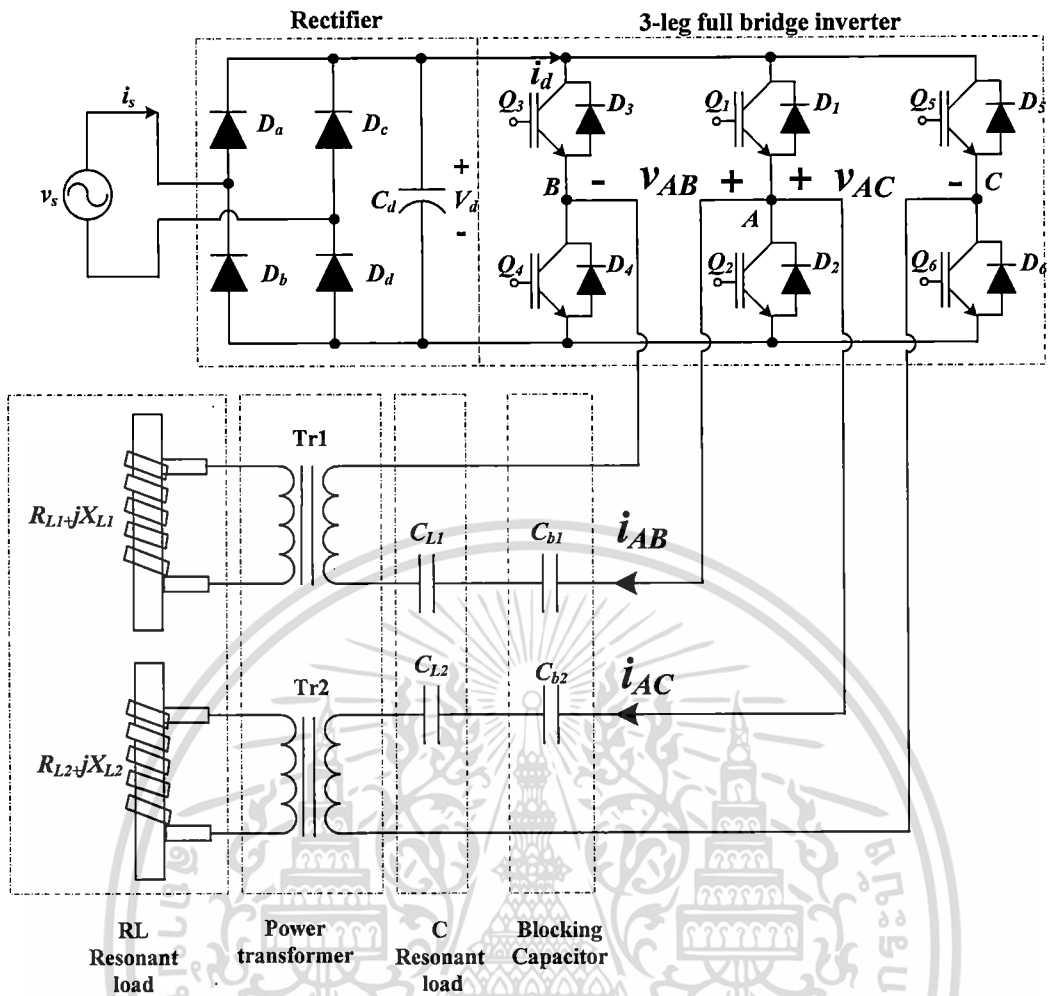
1. การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดชุดที่ 1 โดยหยุดการทำงานของโหลดชุดที่ 2
2. การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดชุดที่ 2 โดยหยุดการทำงานของโหลดชุดที่ 1
3. การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้ง 2 ชุดพร้อมกัน

4.2 การทดสอบเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำ

ทำการทดสอบเครื่องให้ความร้อน โดยใช้วงจรที่ทดสอบดังรูปที่ 4.1 ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ทดสอบ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 310 โวลต์ ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการปรับมุมเลื่อนเฟส ทำการปรับลดความถี่ไซเคิลของสวิตช์ Q_4 และ Q_6 ความถี่การสวิตช์ 56.21 กิโลเฮิร์ตซ์คงที่ วัดอุณหภูมิที่ขึ้นงานให้ได้ 400 องศาเซลเซียส แล้วทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ในสภาวะคงตัว (Steady state) ได้แก่

1. กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตโหลดชุดที่ 1 i_{AB}
2. แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโหลดชุดที่ 1 v_{AB}
3. กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตโหลดชุดที่ 2 i_{AC}
4. แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโหลดชุดที่ 2 v_{AC}
5. กระแสไฟฟ้าอินพุต i_u

ทำการบันทึกข้อมูลการวัดทั้งหมดแล้วนำมาคำนวณหาลำกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของ โหลดแต่ละชุด (P_{AB} , P_{AC}) กำลังไฟฟ้าอินพุต (P_u) และประสิทธิภาพทำได้โดยการวัดกระแสไฟฟ้าชั่วขณะคูณกับแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย สำหรับคลื่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า นำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice เพื่อยืนยันความถูกต้อง

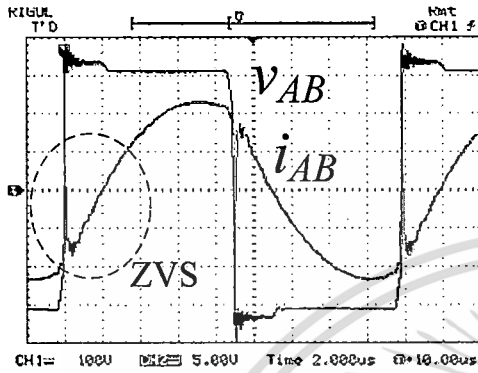


รูปที่ 4.1 วงจรเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง

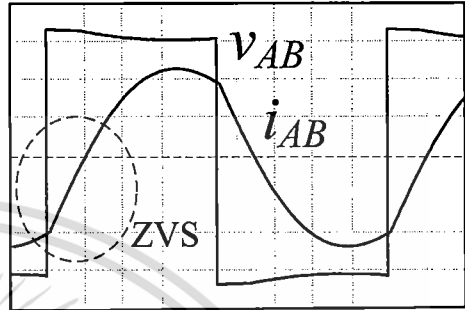
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดชุดที่ 1 โดยหยุดการทำงานของโหลดชุดที่ 2

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเพียงชุดเดียวและอีกชุดให้หยุดการทำงาน ทำการปรับมุมเลื่อนเฟสตั้งแต่ 0 ถึง 170 องศาและบันทึกผลการทดลอง



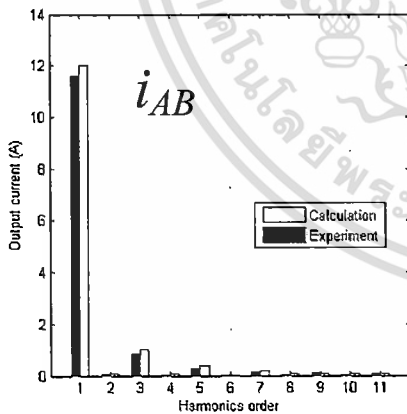
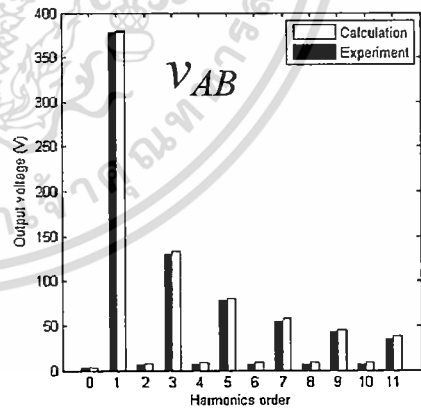
(a) การทดลอง



(b) การจำลอง

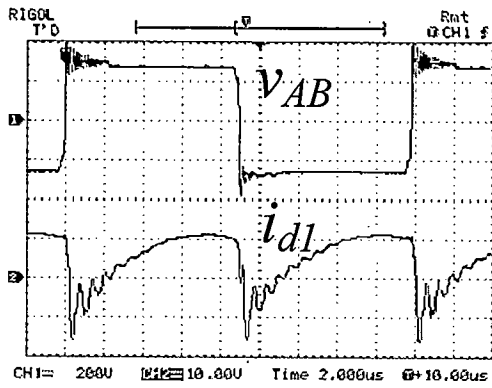
รูปที่ 4.2 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา

(Scale: 100V/div, 5A/div)

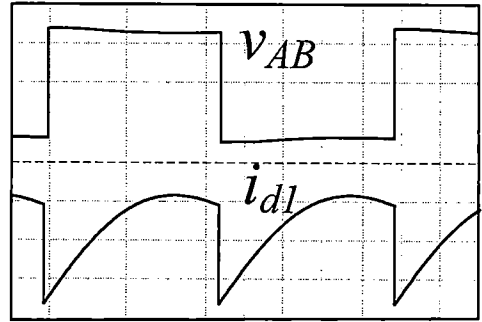
(a) สเปกตรัมของ i_{AB} (b) สเปกตรัมของ v_{AB}

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



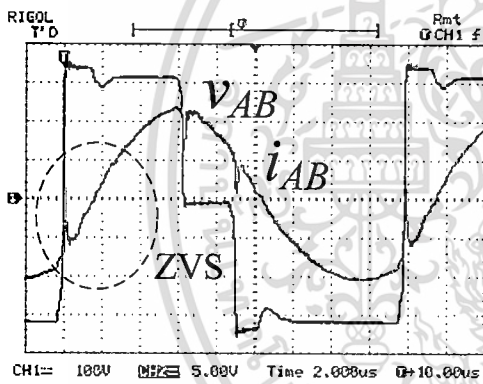
(a) การทดลอง



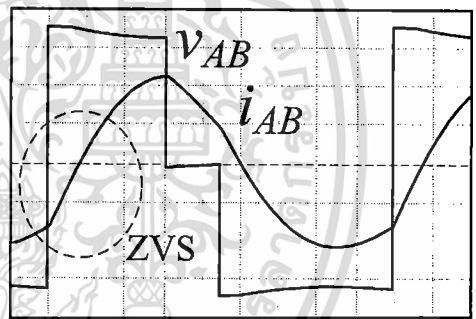
(b) การจำลอง

รูปที่ 4.4 คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d1} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา

(Scale: 200V/div, 10A/div)



(a) การทดลอง

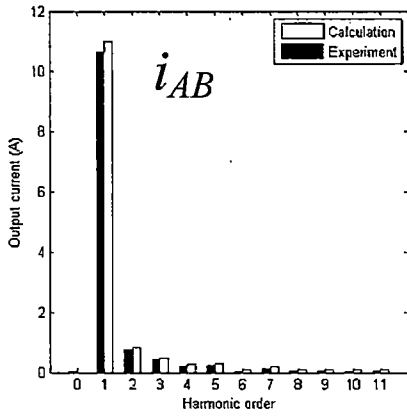


(b) การจำลอง

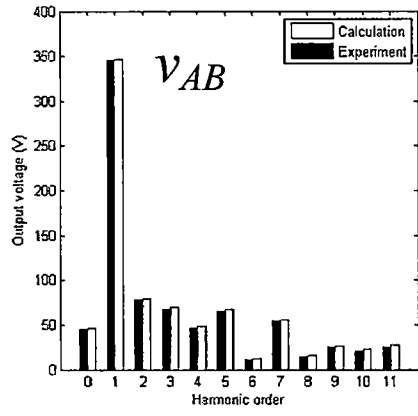
รูปที่ 4.5 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา

(Scale: 100V/div, 5A/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

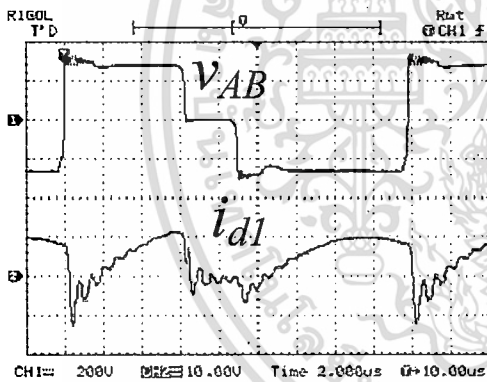


(a) สเปกตรัมของ i_{AB}

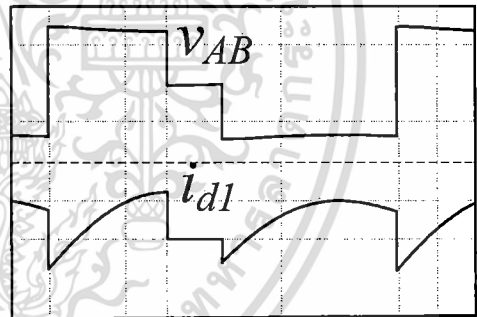


(b) สเปกตรัมของ v_{AB}

รูปที่ 4.6 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา



(a) การทดลอง

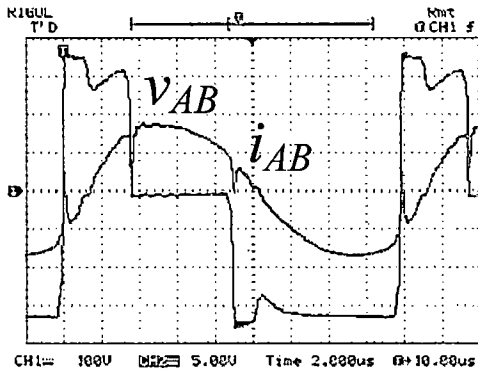


(b) การจำลอง

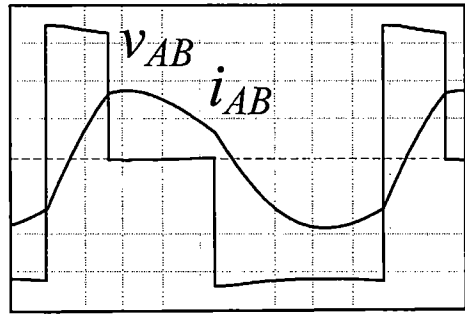
รูปที่ 4.7 คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d1} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา

(Scale: 200V/div, 10A/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

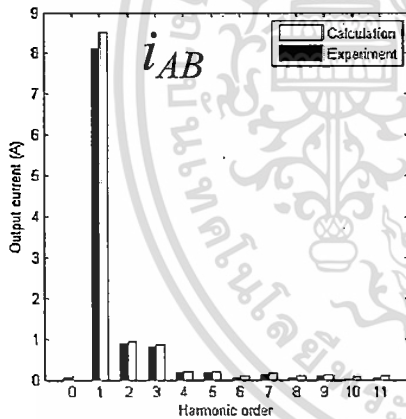


(a) การทดลอง

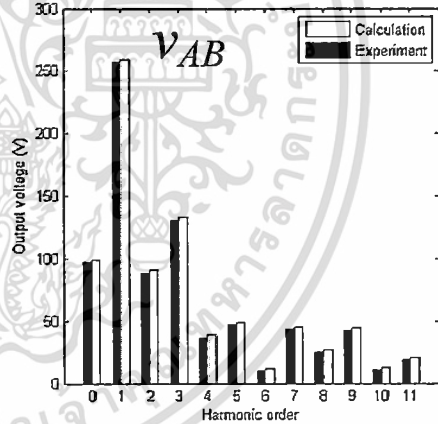


(b) การจำลอง

รูปที่ 4.8 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มีมัลติฮาร์มอนิก 120 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div)



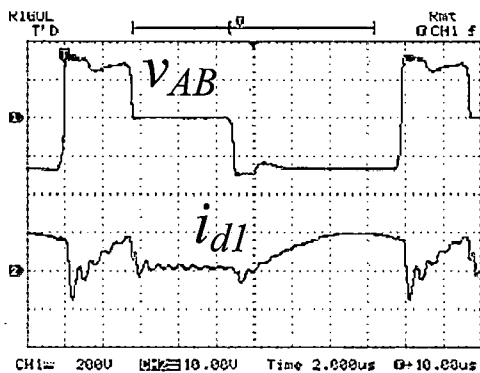
(a) สเปกตรัมของ i_{AB}



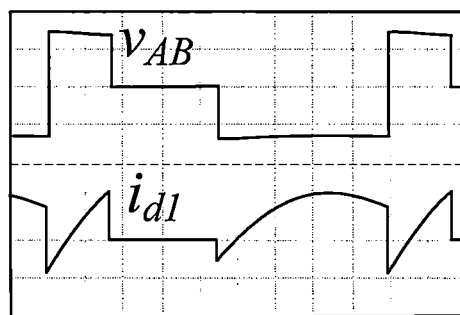
(b) สเปกตรัมของ v_{AB}

รูปที่ 4.9 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มีมัลติฮาร์มอนิก 120 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



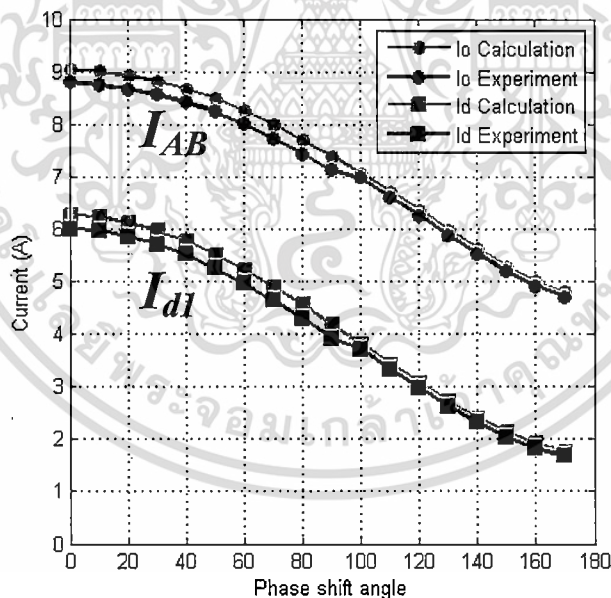
(a) การทดลอง



(b) การจำลอง

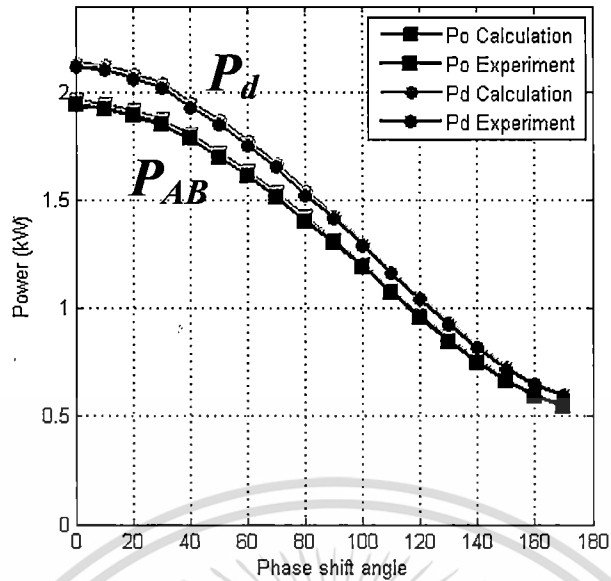
รูปที่ 4.10 คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d1} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา

(Scale: 200V/div, 10A/div)

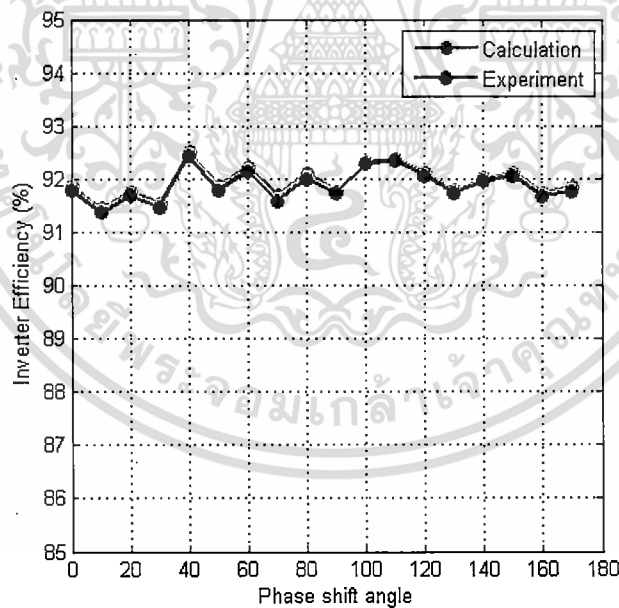


รูปที่ 4.11 กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ย I_{d1} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าอินพุต P_d และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_{AB} ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพวงจรอินเวอร์เตอร์ของโหลดชุดที่ 1 ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ

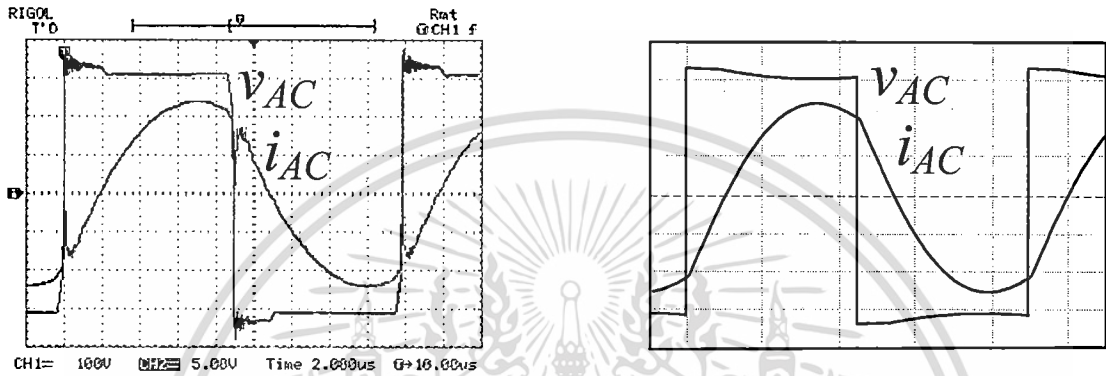
ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} จะมีความสัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟสต่างๆ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะอยู่ในช่วง 4.79 ถึง 9.05 แอมแปร์ กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.75 ถึง 6.26 แอมแปร์ ปริมาณกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_{AB} จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นสู่สาธารณะโดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟส โดยสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0.55 ถึง 1.965 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยที่ 91.96 เปอร์เซ็นต์

4.2.2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดชุดที่ 2 โดยหยุดการทำงานของโหลดชุดที่ 1

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเพียงชุดเดียวและอีกชุดให้หยุดการทำงาน ทำการปรับมุมเลื่อนเฟสตั้งแต่ 0 ถึง 170 องศาและบันทึกผลการทดลอง

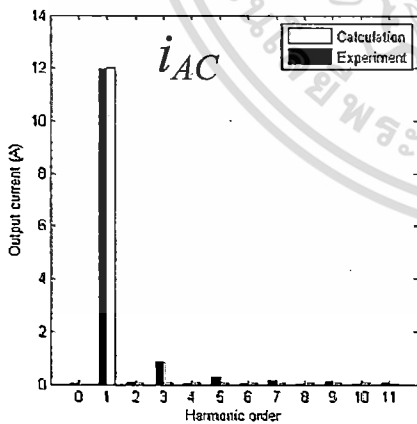


(a) การทดลอง

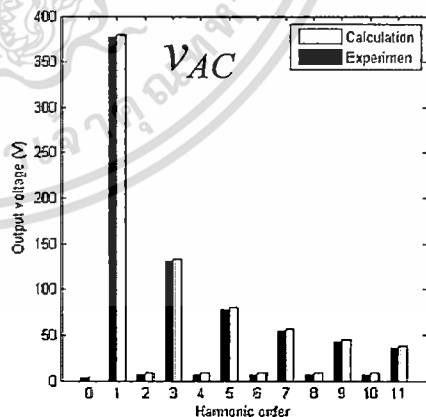
(b) การจำลอง

รูปที่ 4.14 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา

(Scale: 100V/div, 5A/div)



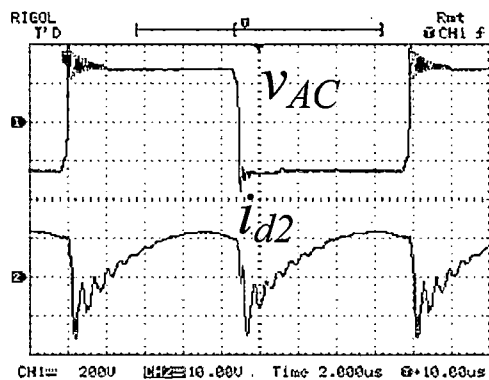
(a) สเปกตรัมของ i_{AC}



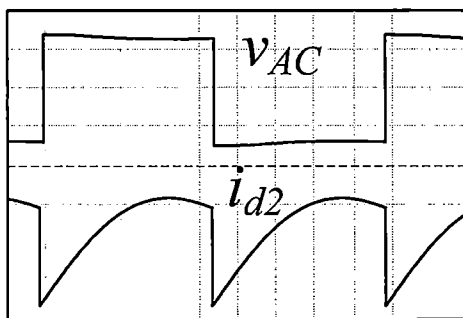
(b) สเปกตรัมของ v_{AC}

รูปที่ 4.15 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



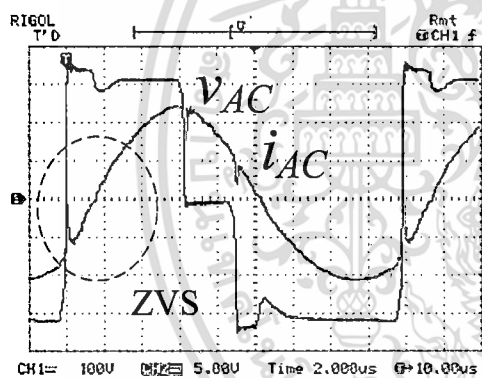
(a) การทดลอง



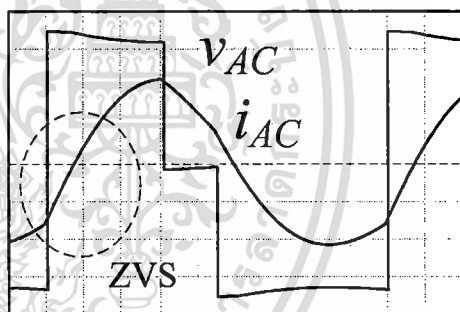
(b) การจำลอง

รูปที่ 4.16 คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d2} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 0 องศา

(Scale: 200V/div, 10A/div)



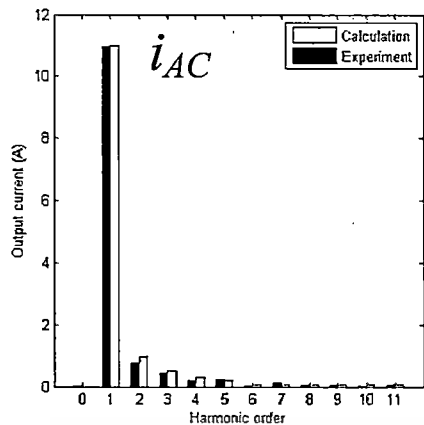
(a) การทดลอง



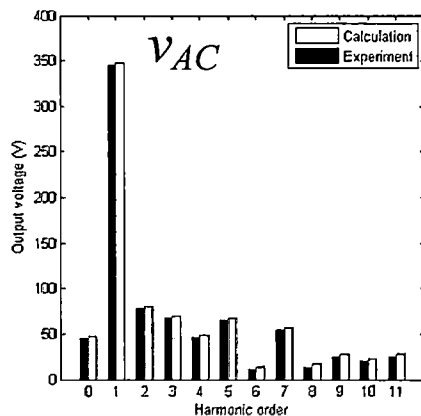
(b) การจำลอง

รูปที่ 4.17 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา

(Scale: 100V/div, 5A/div)

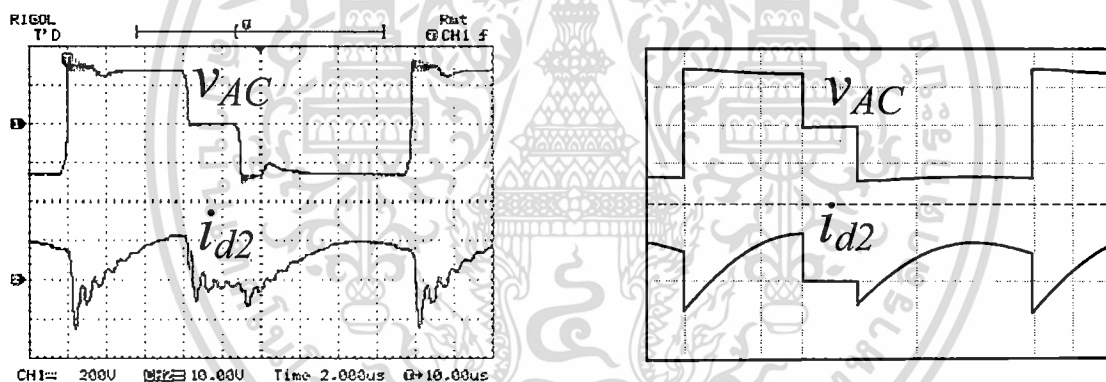


(a) สเปกตรัมของ i_{AC}



(b) สเปกตรัมของ v_{AC}

รูปที่ 4.18 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา

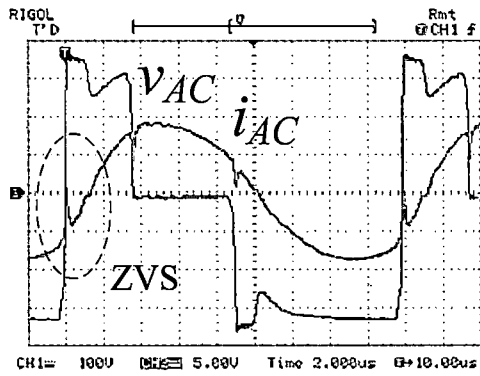


(a) การทดลอง

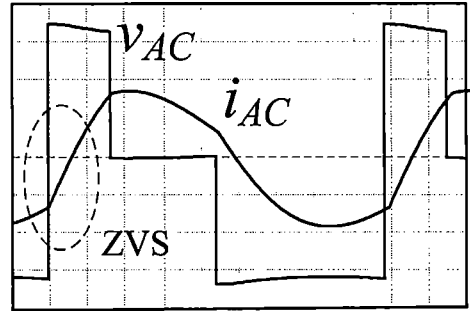
(b) การจำลอง

รูปที่ 4.19 คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d2} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 60 องศา
(Scale: 200V/div, 10A/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

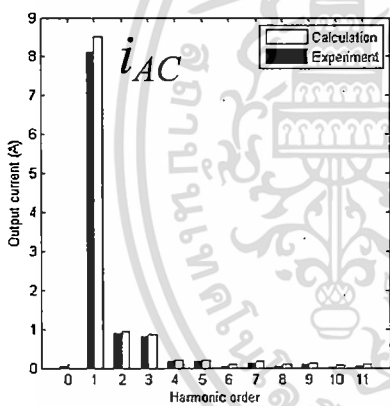
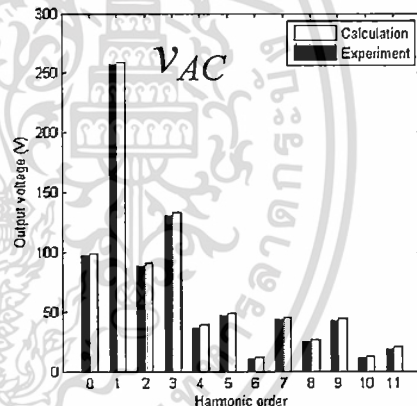


(a) การทดลอง

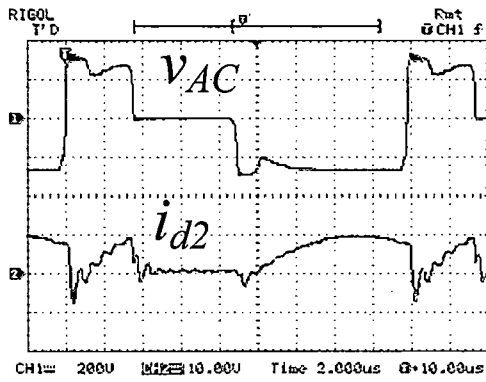


(b) การจำลอง

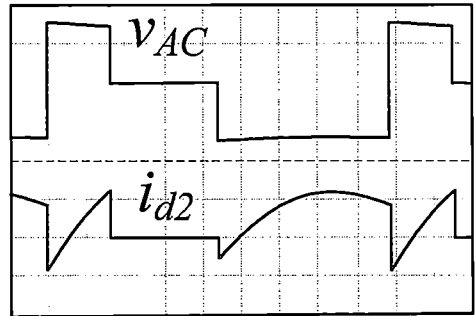
รูปที่ 4.20 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื้อนเฟส 120 องศา
(Scale: 100V/div, 5A/div)

(a) สเปกตรัมของ i_{AC} (b) สเปกตรัมของ v_{AC}

รูปที่ 4.21 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื้อนเฟส 120 องศา



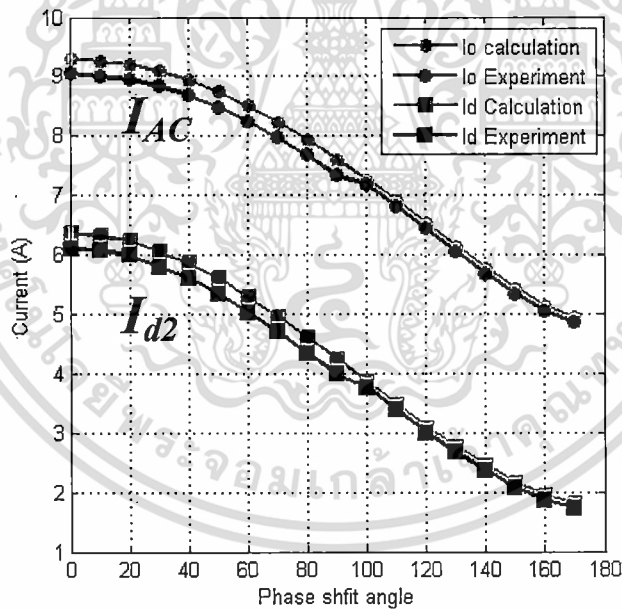
(a) การทดลอง



(b) การจำลอง

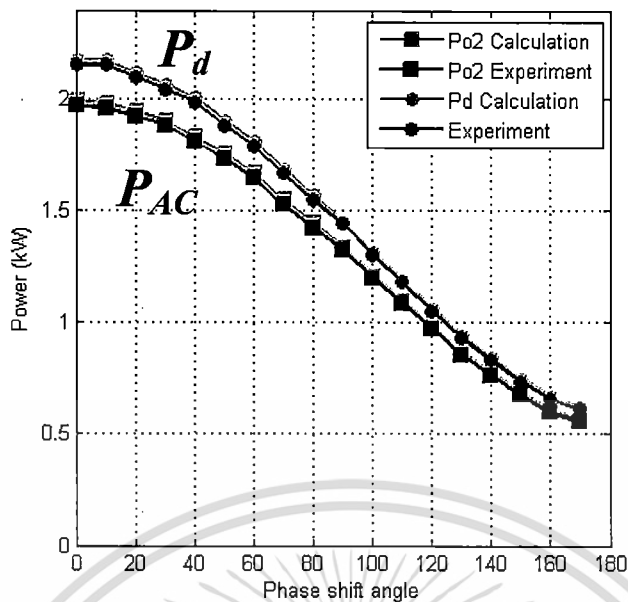
รูปที่ 4.22 คลื่นกระแสไฟฟ้าอินพุต i_{d2} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟส 120 องศา

(Scale: 200V/div, 10A/div)

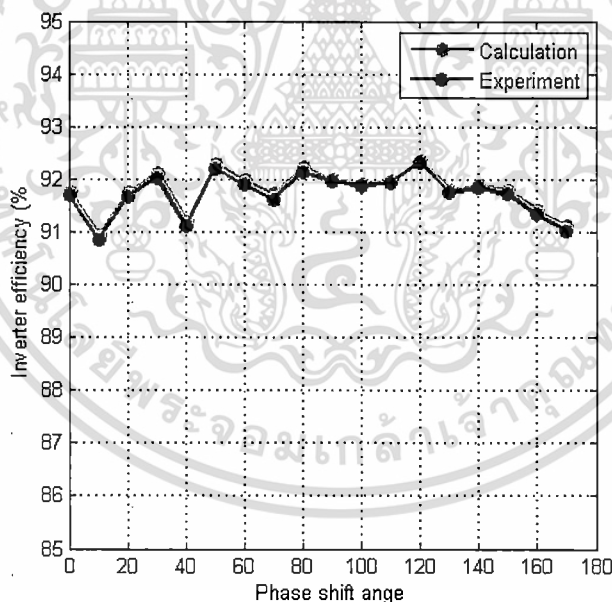


รูปที่ 4.23 กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ย I_{d2} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กำลังไฟฟ้าอินพุต P_d และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_{AC} ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพวงจรอินเวอร์เตอร์ของโหนดชุดที่ 2 ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ

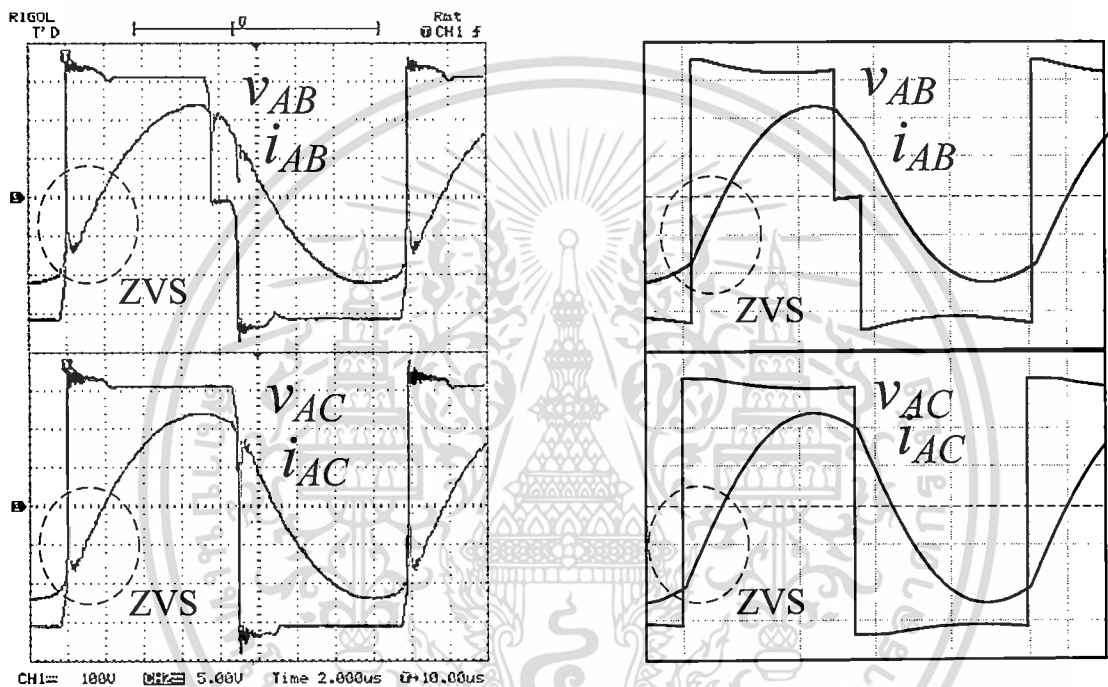
ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AC} และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AC} จะมีความสัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟสต่างๆ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะอยู่ในช่วง 4.94 ถึง 9.30 แอมแปร์ กระแสไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.80 ถึง 6.37 แอมแปร์ ปริมาณกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_{AC} จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟสโดยสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0.565 ถึง 1.997 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยที่ 91.79 เปอร์เซ็นต์

4.2.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของโหลดทั้ง 2 ชุดพร้อมกัน

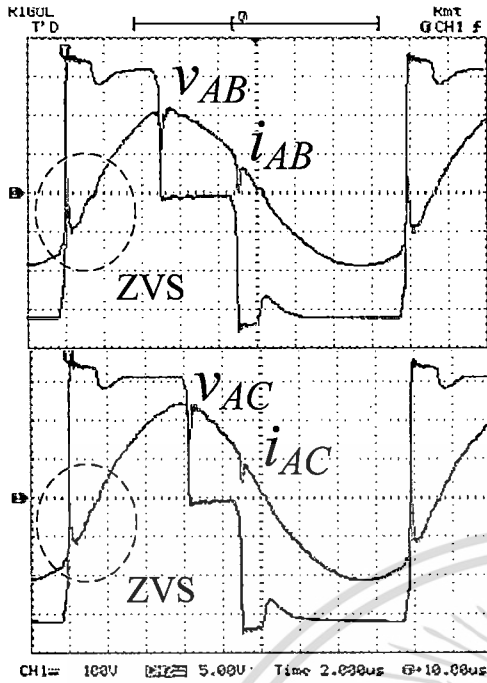
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำทั้งสองชุดพร้อมกัน โดยทำการปรับเลื่อนเฟสของทั้งสองชุดเป็นอิสระต่อกัน ทำการปรับมุมเลื่อนเฟสตั้งแต่ 0 ถึง 170 องศาและบันทึกผลการทดลอง



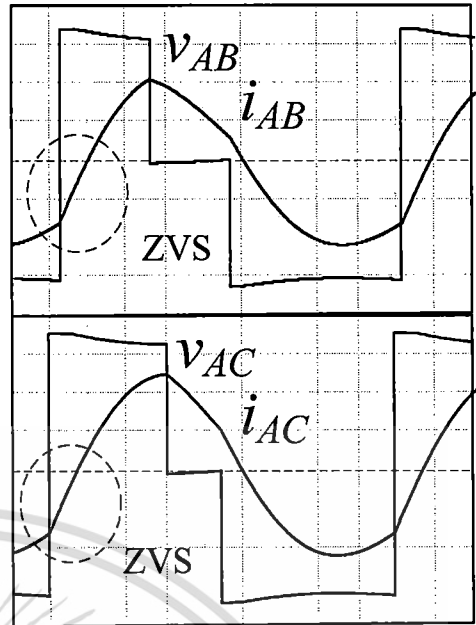
(a) การทดลอง

(b) การจำลอง

รูปที่ 4.26 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับ โหลดทั้งสองชุด ที่มุมเลื่อนเฟสของโหลดชุดที่ 1 เท่ากับ 30 องศา ชุดที่ 2 เท่ากับ 0 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div)

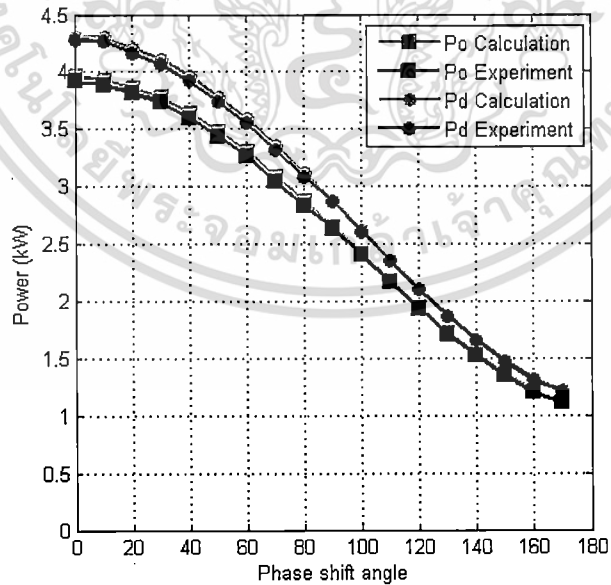


(a) การทดลอง



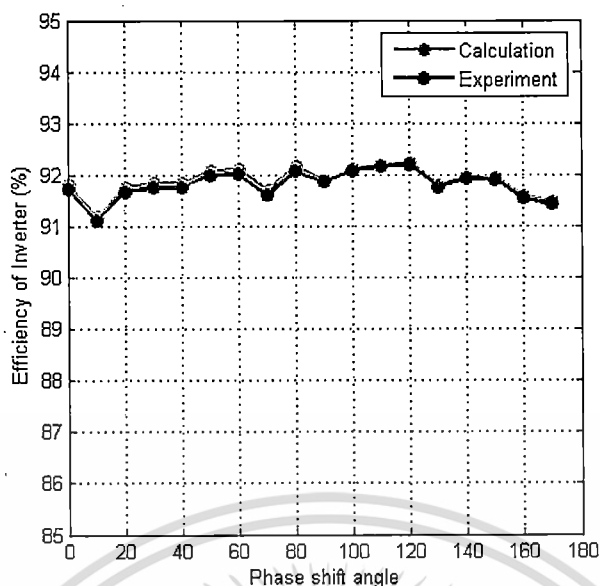
(b) การจำลอง

รูปที่ 4.27 คลื่นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับโหลดทั้งสองชุด ที่มุมเลื่อนเฟสของโหลดชุดที่ 1 เท่ากับ 90 องศา ชุดที่ 2 เท่ากับ 60 องศา (Scale: 100V/div, 5A/div)



รูปที่ 4.28 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o และกำลังไฟฟ้าอินพุต P_d วงจรอินเวอร์เตอร์ของโหลดชุดทั้ง 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพพวงจรมอเตอร์ของโพลต์ทั้ง 2 ชุดที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าความสัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟสต่างๆ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะสัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟสโดยสามารถปรับได้ตั้งแต่ 1.1 ถึง 3.92 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยที่ 91.81เปอร์เซ็นต์

4.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

พิจารณาลิ้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต i_{AB} , i_{AC} และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต v_{AB} , v_{AC} ในสถานะคงตัวเมื่อวงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์ควบคุมให้ความถี่การสวิตช์มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตล่าหลังแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ประจุไฟฟ้าที่ค้างอยู่ระหว่างขาคอลเลกเตอร์และอีมีเตอร์เกิดการขนถ่ายไปอย่างสมบูรณ์ก่อนที่สวิตช์จะนำกระแสไฟฟ้าทำให้สวิตช์ทำงานในสถานะแรงดันไฟฟ้าคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ (ZVS) เนื่องจากการเกิด ZVS นี้จะเกิดขึ้นกับสวิตช์ทุกตัวตลอดทุกย่านการทำงานแต่สวิตช์จะไม่เกิดการทำงานในโหมดของกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ZCS

พิจารณาสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต องค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลจึงทำให้กระแสไฟฟ้าเป็นรูปไซน์อันเนื่องมาจากผลของโพลต์เรโซแนนซ์ ค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุจะหักล้างกันทำให้เหลือเฉพาะค่าความต้านทาน โดยจะกรองให้เฉพาะองค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลผ่านเท่านั้น

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการทดลองเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ การหาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการบันทึกค่า ได้แก่ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต, กระแสไฟฟ้าอินพุต, แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต, กำลังไฟฟ้าอินพุต, กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต, สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า, สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้า และประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผลการทดลองสามารถยืนยันความถูกต้องได้ด้วยผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทำวิจัยและศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์แบบสามกึ่งซันติคอนดักชันเรโซแนนซ์ สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองเอาต์พุตสรุปได้ดังนี้

1. เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ สามารถลดจำนวนสวิตช์ที่ใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าจากเดิม 8 ตัว 4 กึ่ง ให้เหลือ 6 ตัว 3 กึ่ง โดยสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้จำนวนเอาต์พุตเท่ากัน
2. เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าของแต่ละชุดได้อย่างอิสระต่อกัน โดยใช้วิธีการควบคุมแรงดันแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Voltage Cancellation) ซึ่งควบคุมโดยให้ดิวตี้ไซเคิลของกึ่งรวมที่ 50 เปอร์เซ็นต์ และควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าของโหลดแต่ละชุดโดยการปรับลดดิวตี้ไซเคิล ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามการปรับลดดิวตี้ไซเคิล
3. เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ ทำงานที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0.5 กิโลวัตต์ถึง 2 กิโลวัตต์ ของแต่ละชุดทำงานที่ความถี่ 56.21 กิโลเฮิร์ตซ์คงที่ ซึ่งวงจรควบคุมกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมให้สวิตช์ทำงานในสถานะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZVS) ตลอดช่วงการทำงาน โดยประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เฉลี่ย เท่ากับ 91.81 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาในการทำความร้อนถึงจุดคูรีเท่ากับ 43 และ 45 วินาที สำหรับโหลดชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
4. ลักษณะคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต และกระแสอินพุตที่ได้จากการทดลองสามารถยืนยันความถูกต้องได้ด้วยผลจากการจำลอง โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.2 ข้อจำกัดของเครื่องเหนี่ยวนำต้นแบบ

1. พิกัดการทนกระแสไฟฟ้าของสวิตช์ในกึ่งรวมจะต้องมีค่ามากกว่าสองเท่าของพิกัดการทนกระแสไฟฟ้าของสวิตช์ในกึ่งที่เหลือ
2. ในการให้ความร้อน ชิ้นงานทั้งสองจะต้องวางอยู่ในขดลวดเหนี่ยวนำตลอดเวลา ไม่สามารถให้ความร้อนเฉพาะชุดใดชุดหนึ่ง เพราะจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่านสวิตช์ในชุดที่ไม่ได้ใส่ชิ้นงานจนทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. แนวความคิดในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กันในระบบอุตสาหกรรมที่มีการผลิตเป็นจำนวนมากๆ ได้โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบติดตั้งชุดอินเวอร์เตอร์ได้
2. ระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เป็นระบบเปิด เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงถึงจุดคูรี ทำให้ค่าความเหนียวนำของโพลีเอทิลีนเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงต้องมีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อให้สวิทช์ทำงานในช่วงแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ตลอดย่านการทำงาน

5.4 ปัญหาและอุปสรรค

1. ในการออกแบบวงจรภาคกำลังและควบคุมต้องมีการป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายในและภายนอกระบบ ที่มารบกวนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะทำให้สัญญาณขับเคลื่อนไอจีบีทีผิดเพี้ยนจนทำให้ไอจีบีทีเสียหายได้



บรรณานุกรม

- [1] F. Monterde, P. Hernandez, J. M. Burdio, J. R. Garcia and A. Martinez. 2000. "A New ZVS Two-Output Series-Resonant Inverter For Induction Cookers Obtained By A Synthesis Method." 1375-1380. In **IEEE Trans. Power Electronics.** : IEEE Press.
- [2] J. M. Burdio, L. A. Barragan, F. Monterde, D. Navrrow, and J. Acero. 2004. "Asymmetrical Voltage-Cancellation Control for Full-Bridge Series Resonant Inverters." 461-469. in **IEEE Trans. Power Electronics.** vol. 19. no. 2. : IEEE Press.
- [3] J. Davies and P. Simson. 1979. **Induction Heating Handbook.** London. : McGraw-Hill.
- [4] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิปิพล ชาราธิรเศรษฐ์. 2547. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ.พรินติ้ง.
- [5] โธมัส ธรรมาธิษฐาน. "การประยุกต์ใช้วงจรซีรีส์เรโซแนนซ์ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ ซีโร-โวลท์เตจสวิตช์ซึ่งควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการเลื่อนเฟสเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่สูง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [6] พัฒนพงษ์ คงสาคร และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ. 2551. "เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวขนิດอนุกรมเรโซแนนท์." 477-480. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31.** กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- [7] P. Kongsakorn and A. Jangwanitlert. 2010. "A Two-output High frequency Series-Resonant Induction heater." 842-845. in **ECTI-CON 2010.** Chiangmai : Faculty of Engineering Chiangmai University.
- [8] เกียรติศักดิ์ ผาสุขมูล. "การวิเคราะห์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันแบบไม่สมมาตรเพื่อใช้ในงานให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] พัฒนพงษ์ คงสาคร และ อนุวัฒน์ จางวนิหเลิศ. 2551. “เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวชนิดอนุกรมเรโซแนนท์.” 477-480. ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31**. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- [2] P. Kongsakorn and A. Jangwanitlert. 2010. “A Two-output High frequency Series-Resonant Induction heater.” 842-845. in **ECTI-CON 2010**. Chiangmai : Faculty of Engineering Chiangmai University.





การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 31th Electrical Engineering Conference (EECON-31)



- PE-01 Fuel Cell Power Conditioning
- PE-02 การลดการกระเพื่อมของแรงบิดในการควบคุมมอเตอร์เปิดโดยนำตัวปรับระบบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ความถี่แบบแปรปรวนที่รวมการควบคุมของมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์
- PE-03 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
- PE-04 การพัฒนาของระบบกำลังไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
- PE-05 วงจรปรับปรุงคอนเวอร์เตอร์แบบสามระดับสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีประสิทธิภาพสูง
- PE-06 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสองเฟส สำหรับงานที่ความเร็วรอบด้วยแรงดันอินพุตความถี่สูง
- PE-07 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์แบบสองเฟส
- PE-08 เครื่องที่ให้ความร้อนที่ใช้น้ำความถี่สูงแบบสองเฟสคืออนุกรมเรโซแนนซ์
- PE-09 เครื่องที่ให้ความร้อนสำหรับงานหุ่นยนต์โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์กำลังสองเฟส ชนิด H-bridge ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของมอเตอร์แบบพอลิเฟส
- PE-10 การออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เหนี่ยวนำความถี่สูง 200 วัตต์โดยใช้วงจรของหม้อแปลงแบบ LLC ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่หล่อลื่นที่สุด
- PE-11 การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวขั้วชนิดอนุกรมเรโซแนนท์

A Two-Output High Frequency Series-Resonant Induction Heater

พัฒนพงษ์ คงสาร อนุวัฒน์ งามวิมลเลิศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: p_kongsakorn@hotmail.com, kjanuwat@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวขั้วชนิดอนุกรมเรโซแนนท์ที่ใช้สวิทช์ในการควบคุมการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์จำนวน 3 กิ่งมีกิ่งร่วม 1 กิ่งและกิ่งควบคุมกำลังไฟฟ้าแยกอีก 2 กิ่ง ทำงานที่ความถี่ 60 kHz โดยใช้ MOSFET เป็นสวิทช์ให้กำลังไฟฟ้าออกอยู่ที่ 2.12 kW และ 2.41 kW ในแต่ละหัว ควบคุมการทำงานแบบพีดีบีแอลเอ็มเอสมมาตร นอกจากนั้นได้ทำการจำลองผลการทดสอบด้วยโปรแกรม PSpice

คำสำคัญ: เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวขั้วชนิดอนุกรมเรโซแนนท์, พีดีบีแอลเอ็มเอสมมาตร, สวิทช์แรงดันศูนย์

Abstract

This paper presents analysis of a two-output high frequency series induction heater that controls power by using 3 branches of full bridge series resonant inverter; one branch for common control and others control for each independently two output. A two-output high frequency series induction heater operating at 60 kHz switching frequency is given rated output power 2.12 kW and 2.41 kW for each output using MOSFET as switches that control power by the asymmetrical voltage cancellation methodology. The results are tested by PSpice program.

Keywords: a two-output high frequency series-resonant induction heater, asymmetrical voltage-cancellation, zero-voltage-switching

1. บทนำ

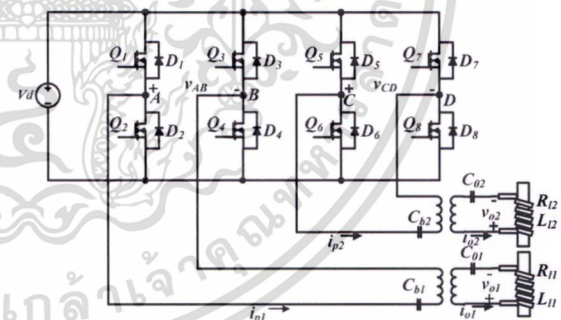
ในปัจจุบันนี้เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงได้รับความนิยมใช้ในอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน มีการพัฒนาประสิทธิภาพให้ได้กำลังงานที่สูงขึ้นและขนาดเล็กตลอดจนต้องลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเพื่อให้ได้ผลตอบแทนที่สูงสุด

จากการศึกษาค้นคว้าเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบหลายหัว[1-2] จะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ชนิดอนุกรมเรโซแนนท์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแยกโหลดแต่ละชุดอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นการออกแบบระบบที่ง่ายและสะดวกในการควบคุมกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าจำนวนโหลดเพิ่ม ต้องใช้สวิทช์เพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียจากอุปกรณ์ก็จะเพิ่ม

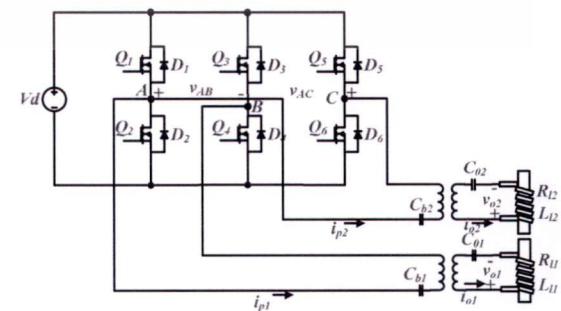
มากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ต้องออกแบบระบบเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าตลอดจนงบประมาณเพื่อใช้จ่ายสำหรับสวิทช์ที่เพิ่มขึ้นมา

ในบทความนี้ได้นำเสนอเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวทำงานโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ควบคุมการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดจำนวน 2 ชุดซึ่งพัฒนาโดยกรลดสวิทช์จากเดิมใช้จำนวน 4 กิ่ง 8 ตัวดังรูปที่ 1 ลดลงเหลือจำนวน 3 กิ่ง 6 ตัวโดยใช้กิ่งร่วม 1 กิ่งดังรูปที่ 2 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้เท่ากันแต่จำนวนสวิทช์น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยกว่าแบบ 4 กิ่ง ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์เพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด

รายละเอียดประกอบด้วย หลักการทำงานของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวชนิดอนุกรมเรโซแนนท์กรวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบสองหัวโดยการควบคุมแบบพีดีบีแอลเอ็มเอสมมาตร และการจำลองวงจรการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice



รูปที่ 1 วงจรควบคุมกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องให้ความร้อนแบบ 4 กิ่ง



รูปที่ 2 วงจรควบคุมกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องให้ความร้อนแบบ 3 กิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลักการทำงาน

เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์จำนวน 3 กิ่งควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีพีดีบีลยูเอ็อมสมมาตร[3] ภายใต้สภาวะสวิตช์แรงดันศูนย์ (ZVS) [4] ที่ความถี่สวิตช์คงที่โดยปรับดิวิตซ์ของกิ่งร่วมให้คงที่และปรับปริมาณกำลังไฟฟ้าของกิ่งที่ต่อกับโหลดโดยปรับลดดิวิตซ์ให้เล็ดตามความต้องการในการควบคุมกำลังไฟฟ้า ส่งกำลังไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุบล็อกกิ้ง (Blocking Capacitor) เพื่อให้พัลส์กระแสแม่เหล็กเกิดการสมมาตร และส่งผ่านหม้อแปลงสวิตช์ซึ่งเพื่อเพิ่มขนาดกระแสให้เหมาะสมสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแบบอนุกรมเรโซแนนซ์ได้ รูปที่ 3 เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองหัว ย้ายข้างค่าอิมพีแดนซ์จากด้านทุติยภูมิมาไว้ทางปฐมภูมิเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์

การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสองหัวแบบ 3 กิ่ง พิจารณาการทำงานเฉพาะโหลดชุดที่ 1 ดังรูปที่ 3 แบ่งโหมดการทำงานได้ 5 โหมดใน 1 ไซเคิลดังรูปที่ 4 สามารถวิเคราะห์โหมดการทำงานได้ดังนี้

โหมด 1 วงควบคุมการนำกระแสสั่งงานให้มอสเฟตทั้ง 4 ตัวหยุดนำกระแส ทำให้โหลดคืนพลังงานสู่แหล่งจ่ายไฟตรงโดยผ่านไดโอด D_1 และ D_4 ดังรูปที่ 5 (ก)

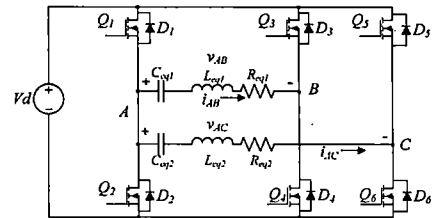
โหมด 2 วงควบคุมการนำกระแสสั่งงานให้มอสเฟต Q_1 และ Q_4 นำกระแสทำให้โหลดได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟตรงดังรูปที่ 5 (ข)

โหมด 3 วงควบคุมการนำกระแสยังคงสั่งงานให้มอสเฟต Q_1 นำกระแสและให้มอสเฟต Q_2 หยุดนำกระแส ทำให้กระแสไหลกลับผ่านไดโอด D_3 และมอสเฟต Q_1 ดังรูปที่ 5 (ค)

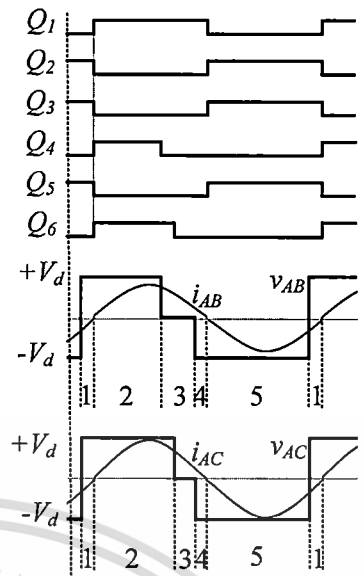
โหมด 4 วงควบคุมการนำกระแสสั่งให้มอสเฟตทั้ง 4 ตัวหยุดนำกระแสทำให้โหลดคืนพลังงานสู่แหล่งจ่ายไฟตรงโดยผ่านไดโอด D_2 และ D_3 ดังรูปที่ 5 (ง)

โหมด 5 วงควบคุมการนำกระแสของมอสเฟตสั่งให้มอสเฟต Q_2 และ Q_3 นำกระแส ทำให้โหลดได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟตรง ดังรูปที่ 5 (จ)

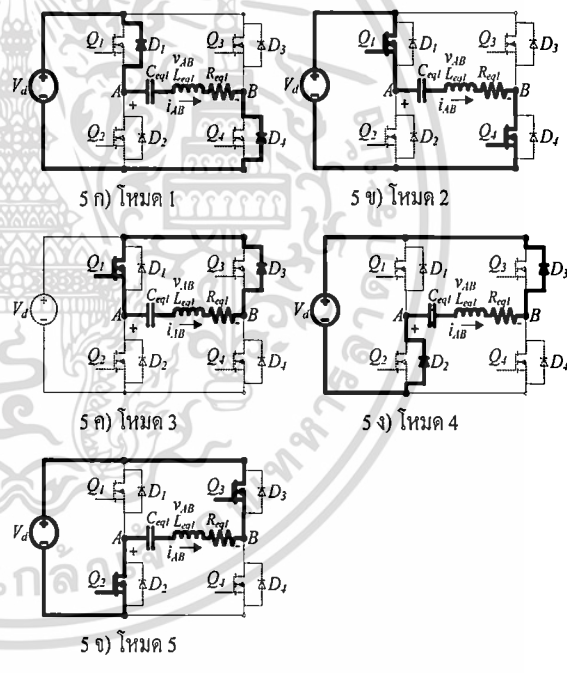
ในการการทำงานของโหลดชุดที่ 2 จากรูปที่ 3 จะมีโหมดการทำงานเหมือนกับโหลดชุดที่ 1 เพียงอาศัยสวิตช์ Q_1 และ Q_2 เป็นกิ่งร่วมทำงานร่วมกับสวิตช์ Q_3 และ Q_6



รูปที่ 3 วงจรสมมูลสำหรับเครื่องให้ความร้อนแบบ 3 กิ่ง



รูปที่ 4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีดีบีลยูเอ็อมสมมาตร



รูปที่ 5 โหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์

3. การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าขาออก

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ชนิดอนุกรมเรโซแนนซ์สำหรับเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัว ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบพีดีบีลยูเอ็อมสมมาตร [3] ที่ความถี่การสวิตช์คงที่ สามารถวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าขาออกโดยใช้วิธีสังเคราะห์ตัวแปร [5] จากวงจรรูปที่ 3 เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} L_{eq} & 0 \\ 0 & C_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{eq}}{dt} \\ \frac{dv_{ceq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{eq} & -I \\ -I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{eq} \\ v_{ceq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_j \\ 0 \end{bmatrix} V_d \quad (1)$$

โดยที่

$$i_{eq} = \begin{bmatrix} i_{AB} \\ i_{AC} \end{bmatrix}, v_{ceq} = \begin{bmatrix} v_{ceq1} \\ v_{ceq2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L_{eq} = \begin{bmatrix} L_{eq1} & 0 \\ 0 & L_{eq2} \end{bmatrix}, C_{eq} = \begin{bmatrix} C_{eq1} & 0 \\ 0 & C_{eq2} \end{bmatrix}, R_{eq} = \begin{bmatrix} R_{eq1} & 0 \\ 0 & R_{eq2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

f_j คือ ตัวแปรที่แสดงความสัมพันธ์ของทิศทางในการนำกระแสระหว่างสวิตช์กับแหล่งจ่ายไฟตรงโดยค่าของ f_j จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการต่อแบบ Forward, มีค่าเป็น -1 เมื่อมีการต่อแบบ Reverse และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรง ซึ่งสามารถเขียนดังสมการที่ 4

$$f_j = \begin{bmatrix} f_{j1} \\ f_{j2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (5) และ (6)

$$L_{eq} \frac{di_{eq}}{dt} = -R_{eq} i_{eq} - v_{ceq} + f_j V_d \quad (5)$$

$$C_{eq} \frac{dv_{ceq}}{dt} = -i_{eq} \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ f_j และแรงดันขาออก v_{out} ได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

$$f_j = (L_{eq} \frac{di_{eq}}{dt} + R_{eq} i_{eq} + v_{ceq}) V_d \quad (7)$$

$$v_{out} = \begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{AC} \end{bmatrix} = f_j V_d \quad (8)$$

กำลังไฟฟ้าขาเข้า กำลังไฟฟ้าขาออกและประสิทธิภาพสามารถเขียนเป็นสมการที่ (9), (10) และ (11)

$$P_{in} = V_d I_{dc} \quad (9)$$

$$P_{out} = I_{AB}^2 R_{eq1} + I_{AC}^2 R_{eq2} \quad (10)$$

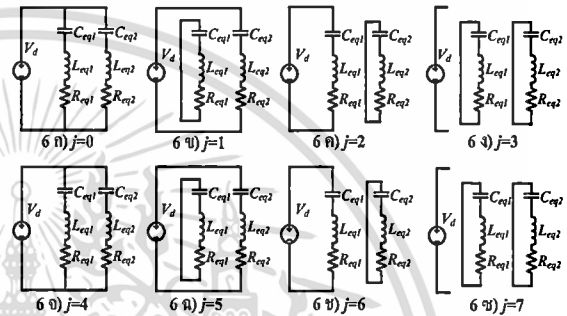
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (11)$$

จากสมการที่ (7) และ (8) สามารถแสดงเป็นลักษณะการนำกระแสของสวิตช์ได้ทั้งหมด 8 รูปแบบดังตารางที่ 1 ซึ่งเขียนเป็นวงจรแสดงความสัมพันธ์ของการนำกระแสของสวิตช์ดังรูปที่ 6 และทำการเพิ่มรีเลย์ 2 ตัวเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าให้ได้ตามความต้องการดังรูปที่ 7

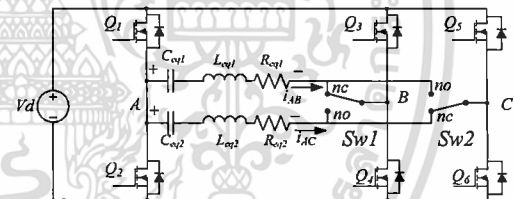
จากตารางที่ 2 ตำแหน่งของรีเลย์ทั้งสองเมื่ออยู่ในตำแหน่ง nc หรือ no เหมือนกัน กำลังไฟฟ้าขาออกของโหลดทั้งสองจะได้สูงสุดไม่เกิน 100% แต่เมื่อตำแหน่งของรีเลย์ต่างกันเช่น Sw1:no, Sw2:nc กำลังไฟฟ้าขาออก P1 จะได้สูงสุดที่ 100%ของพิกัดโหลด

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง f_j และการนำกระแสของสวิตช์

j	f_{1j}, f_{2j}	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
0	1,1	on	off	off	on	off	on
1	0,1	on	off	on	off	off	on
2	1,0	on	off	off	on	on	off
3	0,0	on	off	on	off	on	off
4	-1,1	off	on	on	off	on	off
5	0,-1	off	on	off	on	on	off
6	-1,0	off	on	on	off	off	on
7	0,0	off	on	off	on	off	on



รูปที่ 6 วงจรความสัมพันธ์ระหว่าง f_j และการนำกระแสของสวิตช์



รูปที่ 7 การเพิ่มรีเลย์เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าสำหรับ โหลด 2 ชุด
ตารางที่ 2 กำลังไฟฟ้าขาออกตามตำแหน่งปิด-เปิดของรีเลย์

Sw1	no	nc	no	nc
Sw2	no	no	nc	nc
P1	<100%	100%	0%	<100%
P2	<100%	0%	100%	<100%

หมายเหตุ no หมายถึง สถานะหน้าสัมผัสของรีเลย์แบบปกติปิด

nc หมายถึง สถานะหน้าสัมผัสของรีเลย์แบบปกติเปิด

P1 หมายถึง กำลังไฟฟ้าขาออกของโหลดชุดที่ 1

P2 หมายถึง กำลังไฟฟ้าขาออกของโหลดชุดที่ 2

4.ผลการทดลอง

ในการทดสอบคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัว พารามิเตอร์ของโหลดชุดที่ 1 และ 2 ได้จากการวัดจริงโดยเครื่องมือวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ HP รุ่น 4194A สามารถวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสและแรงดันขาออกดังรูปที่ 2 ด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองการทำงานของวงจรซึ่งมีคุณสมบัติของวงจรเป็นดังนี้

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $V_d = 311 \text{ V}$

ความถี่การสวิตช์ $f_s = 60 \text{ kHz}$

ค่าความต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำพร้อมชิ้นงาน

โหลดชุดที่ 1 $R_{l1} = 177 \text{ m}\Omega$, โหลดชุดที่ 2 $R_{l2} = 182 \text{ m}\Omega$

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ ช่องว่างอากาศและชิ้นงาน

โหลดชุดที่ 1 $L_{l1} = 1.283 \text{ }\mu\text{H}$, โหลดชุดที่ 2 $L_{l2} = 1.290 \text{ }\mu\text{H}$

ค่าตัวเก็บประจุโหลดรีโซแนนท์ $C_{o1} = 7.905 \text{ }\mu\text{F}$, $C_{o2} = 7.85 \text{ }\mu\text{F}$

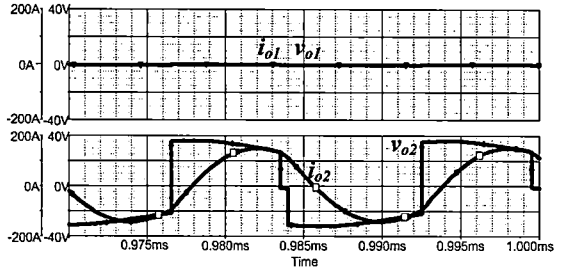
ค่าตัวเก็บประจุสื่อกิ่ง $C_{b1}, C_{b2} = 1.0 \text{ }\mu\text{F}$

อัตราส่วนรอบขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ $n = 10:1$

จากรูปที่ 8 ทำการปรับ Sw1 และ Sw2 เป็น nc ทั้งคู่ โหลดชุดที่ 1 ปรับปรับดิเลย์เซลล์ 25% ได้กำลังไฟฟ้าขาออก 1.24 kW และโหลดชุดที่ 2 ปรับปรับดิเลย์เซลล์ 37.5% ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าขาออก 1.82 kW ที่ประสิทธิภาพ 90.53%

จากรูปที่ 9 ทำการปรับ Sw1 เป็น nc และ Sw2 เป็น no โหลดชุดที่ 1 ดิเลย์เซลล์ 46.87% ได้กำลังไฟฟ้าขาออก 2.12 kW และชุดที่ 2 ได้ 0 kW ที่ประสิทธิภาพ 90.31%

จากรูปที่ 10 ทำการปรับ Sw1 เป็น no และ Sw2 เป็น nc โหลดชุดที่ 2 ดิเลย์เซลล์ 46.87% ได้กำลังไฟฟ้าขาออก 2.41 kW และชุดที่ 1 ได้ 0 kW ประสิทธิภาพ 85.65%



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออก บน: โหลดชุดที่ 1 ล่าง: โหลดชุดที่ 2 กรณีปรับสวิตช์ Sw1 เป็น no และ Sw2 เป็น nc

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวซึ่งพัฒนาโดยลดจำนวนสวิตช์ลงให้เหลือจำนวน 3 กิ่งพร้อมทั้งการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าขาออกซึ่งผลการวิเคราะห์ที่เครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำความถี่สูงแบบสองหัวชนิดอนุกรมรีโซแนนท์สามารถให้ กำลังไฟฟ้าที่พิกัด 2.12 kW สำหรับ โหลดชุดที่ 1 และ 2.41 kW สำหรับโหลดชุดที่ 2 ที่ความถี่สวิตช์ 60 kHz โดยปรับดิเลย์เซลล์ที่ 46.87 % สามารถปรับกำลังไฟฟ้าขาออกทั้ง 2 หัวได้เป็นอิสระกัน และสามารถนำข้อมูลการทดสอบไปใช้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบได้

เอกสารอ้างอิง

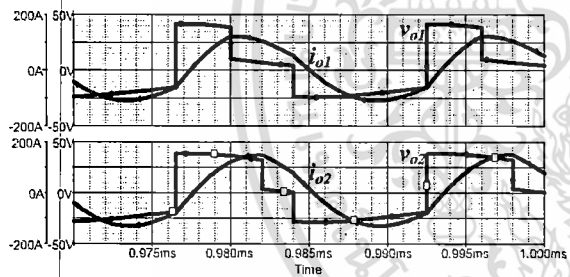
[1] J. M. Burdio, Fernando Monterde, Jose R.Garcia, Luis A. Barragan, and Abelardo Martinez, "A Two-Output Series-Resonant Inverter for Induction-Heating Cooking Appliances," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 20, no. 4, pp 815-822, July 2005.

[2] Fernando Monterde, Pablo Hernandez, Jose M. Burdio, Jose R. Garcia and Abelardo Martinez, "A New ZVS Two-Output Series-Resonant Inverter for Induction Cookers Obtained by a Synthesis Method," IEEE Trans. Power Electronics, pp 1375-1380, 2000.

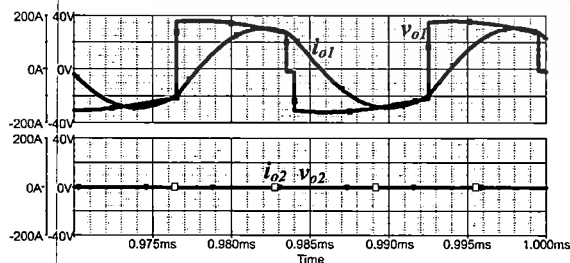
[3] J. M. Burdio, L. A. Barragan, F. Monterde, D. Navrow, and J. Acero, "Asymmetrical voltage-cancellation control for full-bridge series resonant inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 2, pp. 461-469, March 2004.

[4] J. M. HO, F. C. Juang, "A Practical PWM Inverter Control Circuitry for Induction Heating and Studying of the Performances under Load Variation," IEEE Trans. Power Electronics, pp 1375-1380, 2000.

[5] Jose M. Burdio, Abelardo Martinez, and Jose R. Garcia, "A Synthesis Method for Generating Switched Electronic Converters," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 13, no. 6, pp. 1056-1068, November 1998.



รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออก บน: โหลดชุดที่ 1 ล่าง: โหลดชุดที่ 2 กรณีปรับ Sw1 และ Sw2 เป็น nc ทั้งคู่



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาออก บน: โหลดชุดที่ 1 ล่าง: โหลดชุดที่ 2 กรณีปรับ Sw1 เป็น nc และ Sw2 เป็น no

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ECTI-CON 2010

The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications and Information Technology

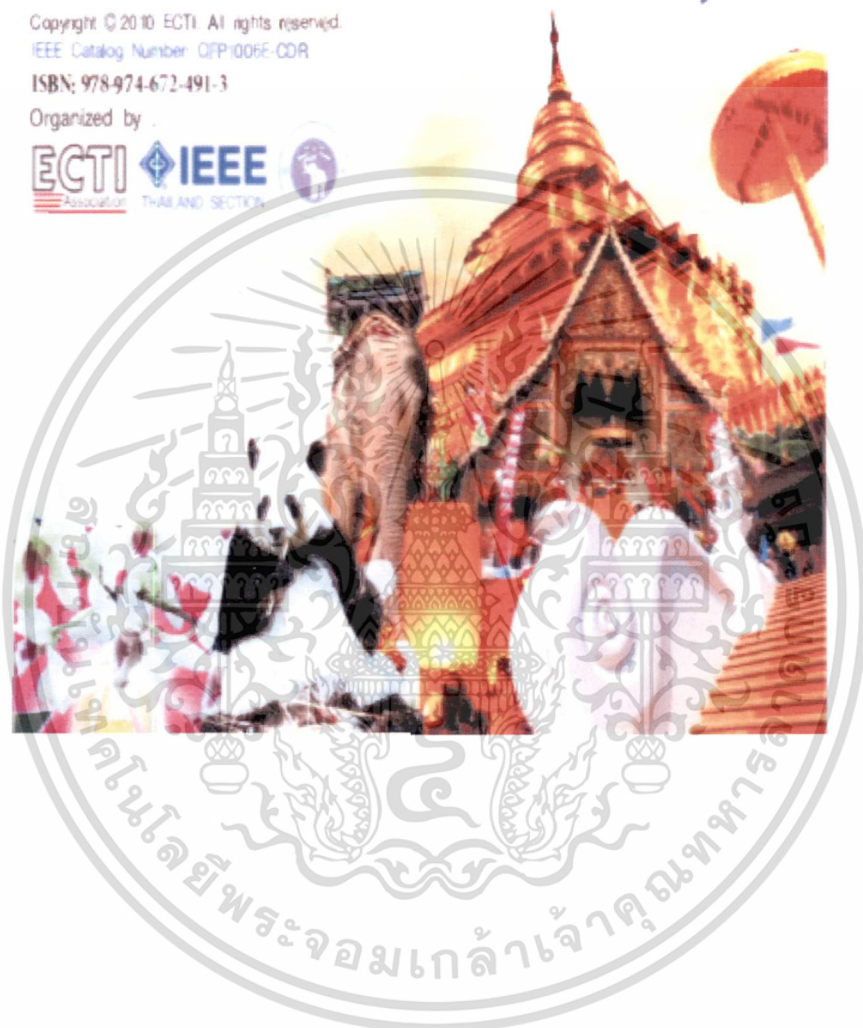
Empress Convention Centre
Chiang Mai, Thailand
19-21 May 2010

Copyright © 2010 ECTI. All rights reserved.

IEEE Catalog Number: QFP1006E-CDR

ISBN: 978-974-672-491-3

Organized by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Two-Output High Frequency Series-Resonant Induction Heater

Pattanapong Kongsakorn and Anuwat Jangwanitlert
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Email: p_kongsakorn@hotmail.com, kjanuwat@kmitl.ac.th

Abstract-This paper presents the development of a two-output high frequency series-resonant induction heater whose concept is to reduce a size and a number of components. This prototype can control two-unit output power by using 3-legs of full-bridge series-resonant inverter; one leg for common control and others for each independently control. The prototype can provide the rated power of 2.154 kW and 2.245 kW for each output, operating frequency of 50.45 kHz with 91.46% of inverter efficiency. That means the power can be adjusted from 0.89 to 2.154 kW and 0.986 to 2.245 kW by the asymmetrical voltage cancellation methodology.

Index Terms-asymmetrical voltage cancellation, zero-voltage-switching.

I. INTRODUCTION

In recent years, the electromagnetic induction heater is widely used in steel industries. Many manufacturing must improve their productivity to get more benefit and more market sharing by improving the efficiency of product or cost reduction method. Therefore, this paper presents another way to save the component count and construction cost that causes the increasing value in term of economics.

The typical multiple-output induction heater [1-5] includes one converter for one output. For example, Fig.1 shows a two-output heater with 4-legs to control output power independently for each output. If the number of loads is increased, then it will make more the construction cost and take more power consumption. In addition, this paper presents the development for a two-output heater that is designed to reduce the number of switches from 4-leg to 3-leg converter; one leg for common controlling and others for each independent controlling as shown in Fig.2.

II. BASIC TOPOLOGICAL DISCUSSION

The prototype is made of a rectifier, a filter unit, and 3-leg full-bridge inverter. The inverter employs two-unit power switching transformers and two-unit working coils. The ac main voltage is 220-V, 50-Hz supplying for a rectifier. The rectifier and filter unit is derived from a diode bridge and a huge filter capacitor that makes a smooth dc-link voltage. Then, 3-leg full-bridge inverter, operating under Zero Voltage Switching (ZVS) conditions, supplies high frequency quasi-square wave voltage to power transformer which provides the optimized voltage to prevent short circuit from a low impedance of working coil.

The blocking capacitors, c_{b1} , c_{b2} , are used to protect power transformer from unbalanced volt-second of the full-bridge inverter. The working coil is operated like a transformer step down voltage and induces a huge current with a high frequency, supplying to a series RLC resonant load. Finally, a huge current flows around the work piece and heat is occurred at its skin.

The operation mode of power transfer from dc-source to a series RLC resonant load has 5 modes per cycle that is controlled by the asymmetrical voltage cancellation methodology with a fixed switching frequency as shown in Fig. 3.

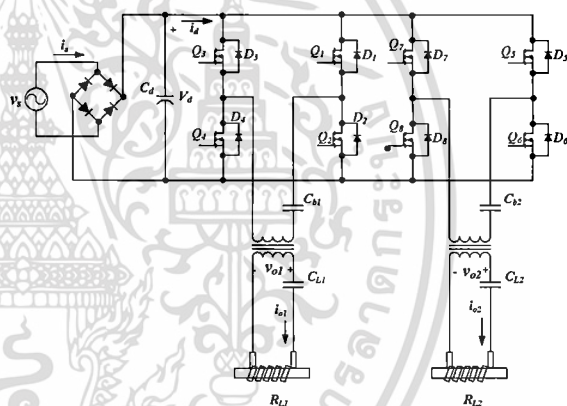


Fig. 1. Two-output induction heater with 4 legs.

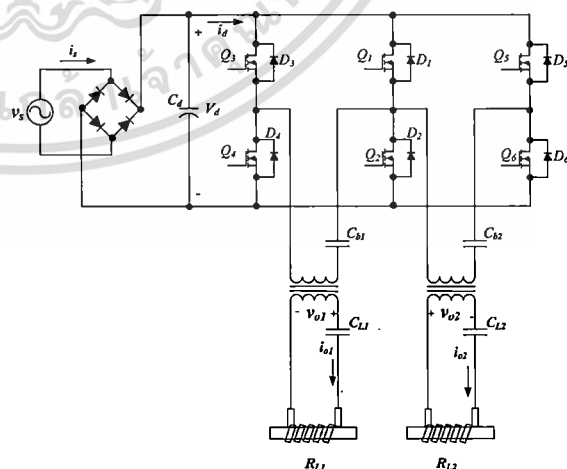


Fig. 2. Two-output induction heater with 3 legs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

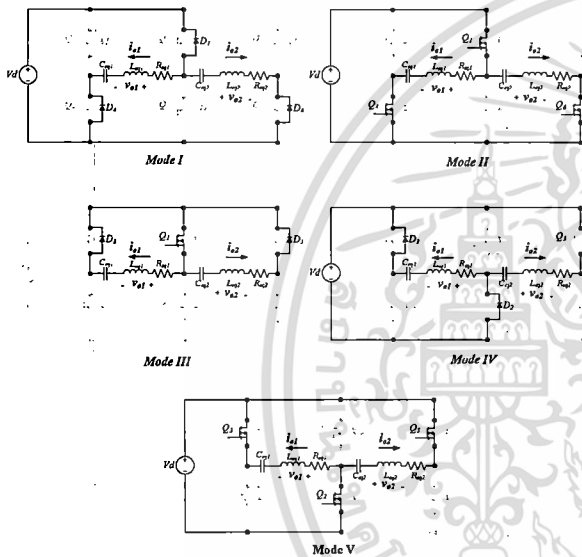
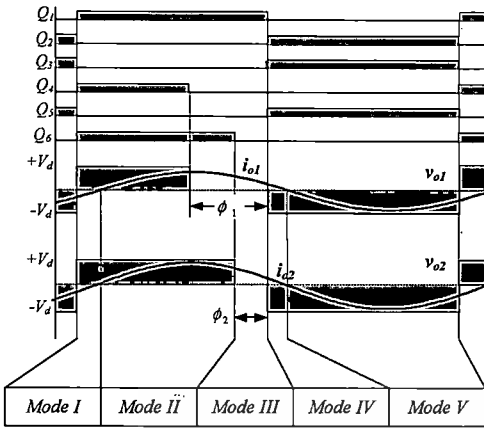


Fig. 3. Operation mode of power transfer.

Mode I: Re-regenerative mode

This mode stored energy from a resonant load is returned to dc-source. The direction of a resonant current flows from node-A to node-B through the freewheeling diodes D_1, D_4 for load#1 and D_1, D_6 for load#2. The output voltage is equal to $+V_d$.

Mode II: Powering mode

This mode provides a resonant load to get the energy from dc-source. The direction of a resonant current flows from node-B to node-A through switch Q_1, Q_4 for load#1 and Q_1, Q_6 for load#2. The output voltage is equal to $+V_d$.

Mode III: Freewheeling mode

This mode shows the energy does not transfer for any sides. The direction of resonant current flows from node-B to node-A through the freewheeling diode D_3 , switch Q_1 for load#1 and D_5, Q_1 for load#2. The output voltage is equal to zero.

Mode IV: Re-regenerative mode

This mode stored energy from a resonant load is returned to dc-source. The direction of a resonant current flows from node-B to node-A through the freewheeling diodes D_2, D_3 for load#1 and D_2, D_5 for load#2. The output voltage is equal to $-V_d$.

Mode V: Powering mode

This mode shows the resonant load gets energy from dc-source. The direction of resonant current is flowing from node-A to node-B through switch Q_2, Q_3 for load#1 and Q_2, Q_5 for load#2. The output voltage is equal to $-V_d$.

III. ANALYSIS OF OUTPUT POWER, VOLTAGE AND CURRENT

A. Analysis of output voltage [6]

The quasi-square output voltage for each output controlled by adjusting phase-shift angle, ϕ , on positive side that can be expressed by a Fourier series :

$$v_o = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (V_{an} \cos n\omega_s t + V_{bn} \sin n\omega_s t) \quad (1)$$

Therefore

$$v_o = \frac{V_d}{2\pi} (-\phi) + \frac{V_d}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} [\sin n(\pi - \phi) \cdot \cos n\omega_s t + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi)) \cdot \sin n\omega_s t] \quad (2)$$

The rms output voltage can be expressed by

$$V_{o,rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_{n,rms}^2} = \sqrt{V_{dc}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (3)$$

where

$$V_n = \sqrt{V_{an}^2 + V_{bn}^2} \quad (4)$$

B. Analysis of output current

The resonant load current is drawn from dc-link through a full-bridge inverter whose waveform is like a sinusoidal waveform causing from an RLC series resonant load.

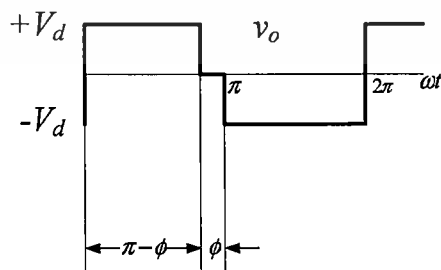


Fig. 4. Quasi-square output voltage waveform.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

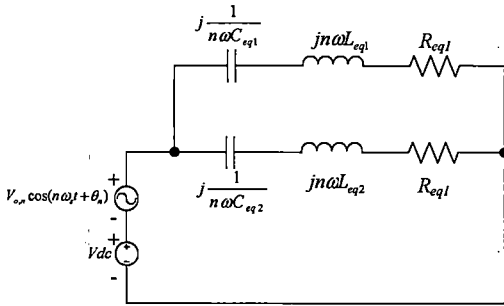


Fig. 5. Schematic diagram.

Fig.5 shows that the schematic diagram includes a various harmonic voltage source that supplies to a two-output series-resonant load. The equation of resonant load current can be analyzed by superposition theorem and Fourier series.

The resonant load current is given by:

$$i_o = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (I_{an} \cos n\omega_s t + I_{bn} \sin n\omega_s t) \quad (5)$$

Therefore

$$i_o = \frac{V_d}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \cdot Z_n} [\sin n(\pi - \phi) \cdot \cos(n\omega_s t - \theta_n) + (2 - \cos n\pi - \cos n(\pi - \phi)) \cdot \sin(n\omega_s t - \theta_n)] \quad (6)$$

where

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (jn\omega_s L - j\frac{1}{n\omega_s C})^2} \quad (7)$$

and

$$\theta_n = \arctan \left(\frac{jn\omega_s L - j\frac{1}{n\omega_s C}}{R} \right) \quad (8)$$

The rms output current can be expressed by

$$I_{o,rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{I_{dc}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (9)$$

where

$$I_n = \sqrt{I_{an}^2 + I_{bn}^2} \quad (10)$$

C. Analysis of output power

The output power can be calculated by the summation of all harmonic-frequency rms voltages which are multiplied by all harmonic-frequency rms currents. The total output power is equal to the summation of the output power of load#1 and load#2 that is shown in (11) and (12).

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_{n,rms} I_{n,rms} \cos \theta_n \quad (11)$$

$$P_{total} = P_1 + P_2 \quad (12)$$

IV. EXPERIMENTAL RESULT

This prototype is implemented by using 3-pieces of MOSFET IRFP-460 assemble in parallel as switches for 3-leg full-bridge inverter that is received from a smooth dc-link and a simple 1-phase bridge-diode and large capacitor. To protect unbalance volt-second, the blocking capacitor of $5.25 \mu F$ per load is employed. The power transformer with 11.5:1 of turn ratio is used for matching impedance from load to output inverter. The primary winding uses litz-wire and secondary winding uses copper tube with cooled water to reduce power losses. Also, the length of working coil is 100 mm (9 turns). The working coil is cooled by water that is located around a steel bar. The diameter of steel bar is 25 mm. which is connected in series with $7.25 \mu F$ of resonant capacitor. It gives 2.154 kW and 2.245 kW for rated power per load with fixed 50.45 kHz of switching frequency at 91.46 % of inverter efficiency.

The experimental results are shown in Fig. 6. These results show the output voltage, v_{o1}, v_{o2} and output current, i_{o1}, i_{o2} for both loads at the same time. The output voltage waveform v_{o1}, v_{o2} are quasi-square waves when the phase-shift angle, ϕ is made and square waveforms when the phase-shift angle, ϕ is equal to zero. The phase-shift angle of output current is lagging the output voltage caused by adjusting switching frequency of full-bridge inverter over the resonant-frequency of both loads. Then, ZVS operation is occurred that results in the shapes to be sinusoidal waveforms for both i_{o1} and i_{o2} by the effect of a low-pass filter of RLC series-resonant type. The output power consumption can be independently adjusted by the phase-shift angle, ϕ as shown in Fig.7. Also, total input power consumption of inverter is depicted in this figure. Fig.6(a) shows the output waveforms of v_{o1}, v_{o2} , i_{o1} , and i_{o2} when phase-shift angle is adjusted to be; $\phi_1=0^\circ$ and $\phi_2=60^\circ$, then provide the output power of 2.154 kW and 1.55 kW, respectively. Similarly, Fig. 6(b) when the phase-shift angle is $\phi_1=0^\circ$ and $\phi_2=90^\circ$, the output power is 2.154 kW and 1.36 kW, respectively. The average efficiency of this 3-leg inverter is 91.46% that shows in Fig.8.

The time for testing the work piece is 27 second increasing to $760^\circ C$ of temperature, which is the curie point temperature under the test of zero phase-shift angle, $\phi_1=0^\circ$ for load#1. At the same condition, 25 second to $760^\circ C$ of temperature under the phase-shift angle $\phi_2=0^\circ$ for load#2 is provided. However, it will take more time when any phase-shift angles, ϕ_1 and ϕ_2 are increased as shown in Fig.9. Therefore, the experimental results and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

their relationships are significant according to the theory and simulation results [7].

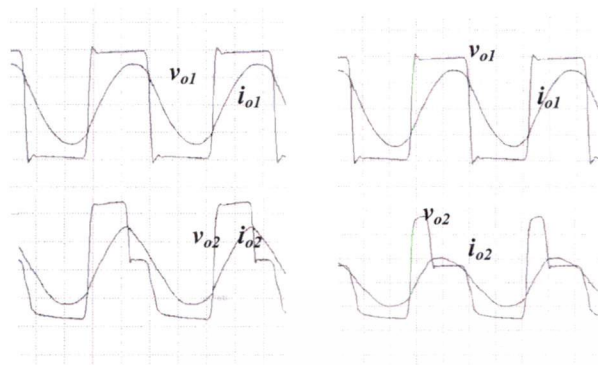
V. CONCLUSIONS

The concept of this paper shows the development of a two-output high frequency series-resonant induction heater that can be reduced the number of components with only 3-legs. The inverter can control the output power for each load independently with adjusting phase-shift angle ϕ .

In addition, this paper presents another way to reduce the number of switches and construction cost. It is used to hardening process for steel bar that is useful for such output number of loads with the same characteristic of steel. It can be applied to mass production for steel industries and consumer appliances, and then it can be increased value in term of economics.

REFERENCES

- [1] J. M. Burdio, F. Monterde, J. R. Garcia, L. A. Barragan, and A. Martinez, "A two-output series-resonant inverter for induction-heating cooking appliances," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 815-822, July 2005.
- [2] F. Monterde, P. Hernandez, J. M. Burdio, J. R. Garcia and A. Martinez, "A new zvs two-output series-resonant inverter for induction cookers obtained by a synthesis method," *IEEE Trans. Power Electronics*, pp. 1375-1380, 2000.
- [3] J. M. Burdio, L. A. Barragan, F. Monterde, D. Navrrow, and J. Acero, "Asymmetrical voltage-cancellation control for full-bridge series resonant inverters," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 461-469, March 2004.
- [4] J. M. HO, F. C. Juang, "A Practical PWM Inverter Control Circuitry for Induction Heating and Studying of the Performances under Load Variation," *IEEE Trans. Power Electronics*, pp 1375-1380, 2000.
- [5] Jose M. Burdio, Abelardo Martinez, and Jose R. Garcia, "A Synthesis Method for Generating Switched Electronic Converters," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 13, no. 6, pp. 1056-1068, November 1998.
- [6] K. Phasukmoon and P. Viriya, "Analysis of a full-bridge resonant inverter with asymmetrical voltage control for high-frequency induction heating," *30th EECAN*, pp. 516-519, 2007.
- [7] P. Kongsakorn and A. Jangwanitlert, "A two-output high frequency series-resonant induction heater," *31st EECAN*, pp. 477-480, October 2008.



(a) $\phi_1 = 0^\circ, \phi_2 = 60^\circ$ (b) $\phi_1 = 0^\circ, \phi_2 = 90^\circ$

Fig. 6. Output waveform; Scale 20V/div, 100A/div, Time 5 μ s/div.

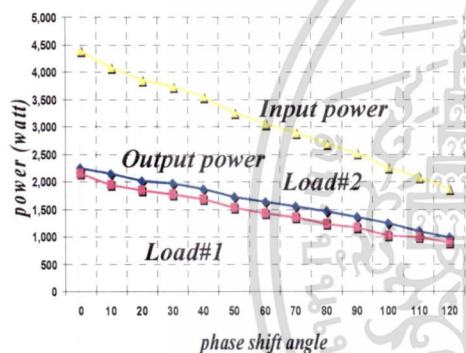


Fig. 7. Input and Output power vs. phase-shift angle.

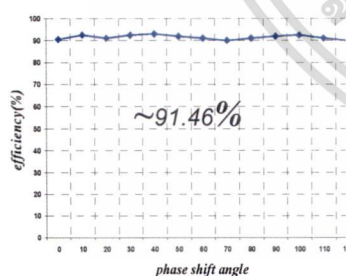


Fig. 8. Efficiency vs. phase-shift angle.

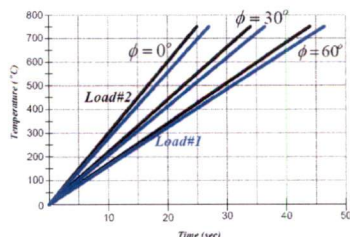


Fig. 9. Temperature vs. Time.



Pattanapong Kongsakorn received the B.Eng degree in electrical engineering from KMITL. He is recently a master student at KMITL. His research interests are induction heater and switch mode power supply.

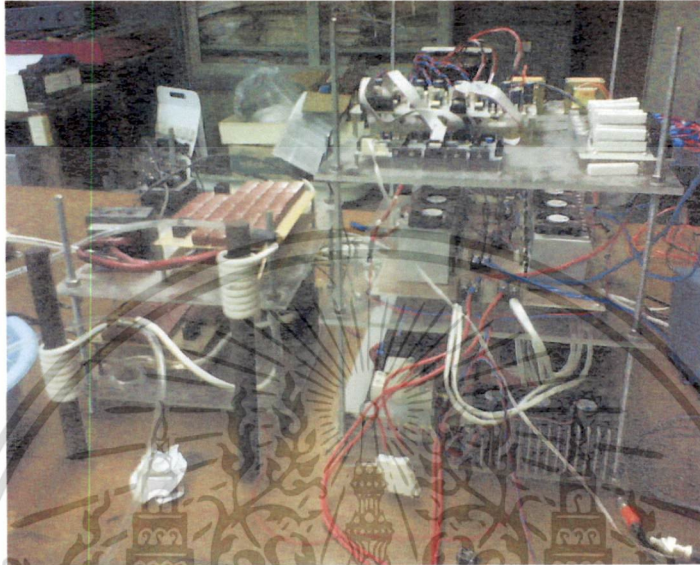


Anuwat Jangwanitlert received the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Arkansas, USA. He is recently an assistant professor at KMITL. His research interests are converter applications and soft switching applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คุณลักษณะทางไฟฟ้าเครื่องเหนี่ยวนำต้นแบบ



รูปที่ ข.1 เครื่องเหนี่ยวนำต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

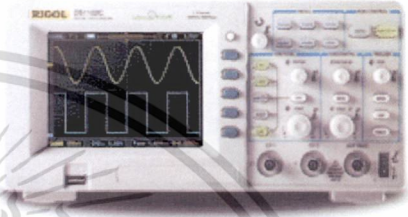



ตารางที่ ข.1 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำต้นแบบ

รายการ	รายละเอียด
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโหลดชุดที่ 1	0.55 ถึง 1.965 กิโลวัตต์
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโหลดชุดที่ 2	0.563 ถึง 1.997 กิโลวัตต์
กำลังไฟฟ้าอินพุตวงจรรีเวอร์เตอร์	4.315 กิโลวัตต์
ประสิทธิภาพวงจรรีเวอร์เตอร์	91.81 เปอร์เซ็นต์
ตัวเหนี่ยวนำโหลดเรโซแนนซ์ โหลดชุดที่ 1	162.05 ไมโครเฮนรี
ตัวเหนี่ยวนำโหลดเรโซแนนซ์ โหลดชุดที่ 2	161.47 ไมโครเฮนรี
ตัวเก็บประจุโหลดเรโซแนนซ์ โหลดชุดที่ 1 และ 2	0.065 ไมโครฟารัด
ความต้านทานเรโซแนนซ์ โหลดชุดที่ 1	23.556 โอห์ม
ความต้านทานเรโซแนนซ์ โหลดชุดที่ 2	22.748 โอห์ม
ตัวเก็บประจุลือกกิง โหลดชุดที่ 1 และ 2	5 ไมโครฟารัด
ความถี่การสวิตช์	56.21 กิโลเฮิรตซ์
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	310 โวลต์
อุปกรณ์สวิตช์ ไอจีบีที	SGL160N60UFD
ขดลวดเหนี่ยวนำชุดที่ 1 และ 2	ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร พันจำนวน 7 รอบ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดเหนี่ยวนำ	40 มิลลิเมตร
ลักษณะของชิ้นงาน	เหล็กหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร
ขดลวดตัวนำด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง	30 A.W.G. 33 เส้น พันจำนวน 20 รอบ
ขดลวดตัวนำด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลัง ความถี่สูง	ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร พัน 2 รอบ
ระยะเวลาการให้ความร้อนจนถึงจุดคูรี โหลด ชุดที่ 1	45 วินาที
ระยะเวลาการให้ความร้อนจนถึงจุดคูรี โหลด ชุดที่ 2	43 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ตารางที่ ค. 1 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
1	Digital Oscilloscope: RIGOL DS 1022C	
2	Differential Probe: Yokogawa 700925	
3	Digital Multimeter: Fluke 189	
4	Digital Infrared Thermometer: Fluke 568	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายพัฒนพงษ์ คงสาคร



ภูมิลำเนา

จังหวัดนครราชสีมา

ประวัติการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประยุกต์ใช้งานวงจรคอนเวอร์เตอร์
และสวิตช์โหมคพาวเวอร์ซัพพลาย

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2543-2549

วิศวกร บริษัท มินิแมไทย

พ.ศ.2550-ปัจจุบัน

วิศวกร ศูนย์ไซโคตรอนและเพตสแกนแห่งชาติ
โรงพยาบาลจุฬารัตน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้