

การวิเคราะห์รโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดันออกเป็น
บางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

ANALYSIS OF A HALF-BRIDGE RESONANT INVERTER WITH
PARTIAL VOLTAGE CANCELLATION FOR HIGH-FREQUENCY
INDUCTION COOKING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาความหลังสุครปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตศึกษาชั้น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-020-057

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การวิเคราะห์โรซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดันออกเป็น
บางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง**

**ANALYSIS OF A HALF-BRIDGE RESONANT INVERTER WITH
PARTIAL VOLTAGE CANCELLATION FOR HIGH-FREQUENCY
INDUCTION COOKING**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**82657**
วัน,เดือน,ปี.....**21 ก.ค. 2551**

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-020-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ANALYSIS OF A HALF-BRIDGE RESONANT INVERTER WITH
PARTIAL VOLTAGE CANCELLATION FOR HIGH-FREQUENCY
INDUCTION COOKING**



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

2008

KMITL-2008-EN-M-020-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน
เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

Analysis of a Half-Bridge Resonant Inverter With Partial Voltage
Cancellation for High-Frequency Induction Cooking

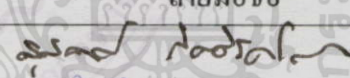


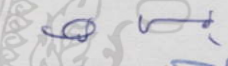

นักศึกษา นายเจนณรงค์ เสนามนตรี

รหัสประจำตัว 49060221

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
ผศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
รศ.ดร.ไพบุลย์	นาคมหาชลาสินธุ์	
รศ.ดร.วิริยะ	พิเชฐจำเริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 28 กุมภาพันธ์ 2551 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 5 ชั้น 5 อาคาร A

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๙.....เดือน.....๑๒๕๕๕.....พ.ศ.๒๕๕๑.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดัน ออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง
นักศึกษา	นาย เจนณรงค์ เสนามนตรี
รหัสประจำตัว	49060221
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอน การวิเคราะห์เรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดย
การตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง รายละเอียดจะประกอบ
ไปด้วยการนำเสนอหลักการของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง การวิเคราะห์โหมดการทำงานของเร
โซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน พร้อมกับการวิเคราะห์หา
สมการแรงดันเอาต์พุต v_o และกระแสเอาต์พุต i_o ของวงจรที่ค่ามุมเฉือน ϕ ระหว่าง $0-120^\circ$ ซึ่ง
สมการแรงดันและกระแสเอาต์พุตสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o และ
กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_i เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ ระหว่าง $0-120^\circ$ จากการ
ทดสอบด้วยเครื่องต้นแบบสามารถหุงต้มน้ำ 0.5ลิตรให้เดือดได้ภายใน 2 นาที 30 วินาที ที่ค่า
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 1040 วัตต์ ในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้แสดงผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง
ควบคู่กันเพื่อเป็นการเปรียบเทียบและให้มั่นใจในหลักการที่นำเสนอว่ามีความถูกต้องจริง

Thesis Title	Analysis of a Half-Bridge Resonant Inverter with Partial Voltage Cancellation for High-Frequency Induction Cooking
Student	Mr. Jennarong Sanamontree
Student ID.	49060221
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Viriya Phichetjamroan

ABSTRACT

This thesis presents analysis of a half-Bridge resonant Inverter with partial voltage cancellation for high-frequency induction cooking. The principle of high-frequency induction cooking will be first analyzed. Then, the equations of output voltage v_o and output current i_o with the variation of ϕ from $0-120^\circ$ of the circuit are obtained. The output power P_o and input power P_d of the inverter can be calculated using the equations at various ϕ from $0-120^\circ$. The prototype of the proposed cooker has been developed and tested with the boiling time of 2 minutes for 0.5 litre of water and at power rating of 1040 watts. Both theoretical and experimental results are given for comparison purpose to verify the principle presented in the analysis.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติ ตลอดจนคำปรึกษาในด้านต่างๆเกี่ยวกับการดำเนินงาน จากท่านอาจารย์ รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ขงยุทธ นารามภูรี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม และ อาจารย์ศักดา พรหมเหมือน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ และเพื่อนๆที่ๆน้องๆ ทุกคนที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ที่ได้ช่วยเหลือทั้งแรงกายแรงใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเจริญ และคุณแม่สำลี เสนามนตรี ซึ่งเป็นที่เคารพยิ่ง อีกทั้งยังเป็นผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีมาตลอด จวบจนสำเร็จการศึกษา

คุณค่าประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบคุณค่าต่างๆเหล่านี้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็ประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษา เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่างๆ และสามารถพัฒนาประเทศชาติได้ต่อไป

เจนณรงค์ เสนามนตรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับแบบเดิม.....	2
1.4 รายละเอียดที่จะทำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	5
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ชนิดอนุกรมเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 หลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อน โดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	7
2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนกับภาชนะหุงต้ม.....	8
2.4 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน.....	13
2.4.1 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	13
2.4.2 อินเวอร์เตอร์.....	14
2.4.3 โทลคเรโซแนนซ์.....	15
2.5 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม.....	20
2.5.1 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่.....	20
2.5.2 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift.....	23
2.5.3 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมจำนวนพัลส์.....	25
2.6 สรุป.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่.....	28
3.3 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่.....	32
3.4 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้ ของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่.....	37
3.4.1 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้ทางค่านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์.....	37
3.4.2 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้ทางค่านอินพุทของอินเวอร์เตอร์.....	39
3.5 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้โดยวิธีการปรับความถี่.....	40
3.6 สรุป.....	44
บทที่ 4 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้ในงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	45
4.1 บทนำ.....	45
4.2 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน.....	45
4.3 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้เอาต์พุท ของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน.....	51
4.3.1 การวิเคราะห์แรงดันทางค่านเอาต์พุท V_o	51
4.3.2 การวิเคราะห์กระแสทางค่านเอาต์พุท i_o	53
4.4 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้อินพุทของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ	55
4.6 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นส่วน.....	56
4.7 สรุป.....	62
บทที่ 5 ผลการทดลองและผลการจำลอง.....	64
5.1 บทนำ.....	64
5.2 การทดลองวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	64
5.2.1 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง.....	65
5.2.2 ขั้นตอนในการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB.....	66
5.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลอง คลื่นแรงดันและกระแส ในกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่.....	66
5.4 การทดลองวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยการตัดแรงดันออกเป็นส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	71
5.4.1 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง.....	71
5.4.2 ขั้นตอนในการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB.....	72
5.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลอง คลื่นแรงดันและกระแส ในกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นส่วน.....	72
5.6 สรุป.....	77
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข โฟลชาร์จขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB.....	88
ภาคผนวก ค ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต.....	90
ภาคผนวก ง รูปเครื่องทดลองต้นแบบและอุปกรณ์.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	100



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่.....	2
1.2 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ค่าความถี่สวิตซ์เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ $f_s = f_r$	3
1.3 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ค่าความถี่สวิตซ์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์ $f_s > f_r$	3
1.4 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้โดยตัดแรงดันออกเป็นส่วน.....	4
1.5 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่มุมเฉือน $\phi = 0^\circ$	4
1.6 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่มุมเฉือน $\phi = 60^\circ$	5
2.1 หลักการให้ความร้อนของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	7
2.2 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม.....	8
2.3 อิมพีแดนซ์สมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้มที่อินช่ายมาทางปฐมภูมิ.....	9
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของภาชนะหุงต้ม.....	11
2.5 บล็อกไดอะแกรมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	13
2.6 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้กระแสตรง.....	13
2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบเต็มบริดจ์และแบบกึ่งบริดจ์.....	14
2.8 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์และแบบกึ่งบริดจ์.....	14
2.9 วงจรเฟสเซอร์ RLC อนุกรม.....	15
2.10 การเปลี่ยนแปลงของคาร์ีแอมพลิจูดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เมื่อค่าความถี่เปลี่ยนแปลง.....	18
2.11 ผลตอบสนองของ $\frac{V_o}{V_i}$ ต่อความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์ f_s/f_r แบบอนุกรม ที่ค่า Q (quality factor) ต่างๆ.....	20
2.12 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กรณี ของการควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับความถี่ f_s	21
2.13 กำลังไฟฟ้เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตซ์ต่างๆ.....	22
2.14 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กรณี ของการควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift.....	23
2.15 กำลังไฟฟ้เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ.....	24
2.16 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ.....	25
2.17 กำลังไฟฟ้เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	วงจรรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....28
3.2	โหมมคการทำงานของวงจรรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ที่ความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์ ($f_s > f_r$).....29
3.3	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ใน โหมมคการทำงานที่ 1.....30
3.4	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ใน โหมมคการทำงานที่ 2.....30
3.5	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ใน โหมมคการทำงานที่ 3.....31
3.6	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ใน โหมมคการทำงานที่ 4.....31
3.7	วงจรมวลRLC เรโซแนนท์แบบอนุกรมที่ความถี่ใดๆ.....32
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า normalized อิมพีแดนซ์ของส่วนประกอบมูลฐานและค่าความถี่สวิตช์.....34
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมอิมพีแดนซ์และค่าความถี่สวิตช์.....36
3.10	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทของวงจรรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์.....37
3.11	ผลการรวมแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่1,3,5,7,9,11เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุท v_o38
3.12	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้ายอินพุทของวงจรรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์.....39
3.13	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 34 kHz41
3.14	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 40 kHz42
3.15	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้ายเอาต์พุทที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 44 kHz43
4.1	วงจรรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตและรูปแบบสัญญาณควบคุมมอสเฟต S_1, S_2, S_3, S_4 ที่มุมเฉือน $\phi = 60^\circ$46
4.3	โหมดการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....47
4.4	วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดการทำงานที่ 1.....48
4.5	วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดการทำงานที่ 2.....48
4.6	วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดการทำงานที่ 3.....49
4.7	วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดการทำงานที่ 4.....49
4.8	วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดการทำงานที่ 5.....50
4.9	วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ในโหมดการทำงานที่ 6.....50
4.10	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์.....51
4.11	ผลการรวมแรงดันฮาร์มอนิกส์,3,5,7,9,11 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มุม $\phi = 0^\circ, 90^\circ$52
4.12	คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์.....54
4.13	คลื่นแรงดัน V_o และกระแสเอาต์พุต I_o ที่ความถี่สวิตช์ในสภาวะแรงดันศูนย์ ZVS.....55
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่สวิตช์ที่แรงดันศูนย์และค่ามุม ϕ56
4.15	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฉือน $\phi = 0^\circ$57
4.16	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฉือน $\phi = 30^\circ$58
4.17	ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฉือน $\phi = 60^\circ$59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฉือน $\phi = 90^\circ$	60
4.19 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฉือน $\phi = 120^\circ$	61
5.1 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	64
5.2 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	66
5.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน V_o และกระแส i_o ทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองและการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่ค่าความถี่ 34kHz, 40kHz และ 44kHz	67
5.4 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านอินพุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	67
5.5 ลักษณะลักษณะคลื่นแรงดัน $\frac{V}{2}$ และกระแส i_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองและการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่ค่าความถี่ 34kHz, 40kHz และ 44kHz	68
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์.....	69
5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์.....	69
5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ η เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์.....	70
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ 0.5 ลิตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	70
5.10 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง.....	71
5.11 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองและการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่มุมเฟส.....	73
5.13 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านอินพุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน.....	73
5.14 ลักษณะคลื่นแรงดัน $\frac{V_d}{2}$ และกระแส i_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองและการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่มุมเฟส $\phi = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$	74
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเฟส ϕ ระหว่าง $0 - 120^\circ$	75
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเฟส ϕ ระหว่าง $0 - 120^\circ$	75
5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเฟส ϕ ระหว่าง $0 - 120^\circ$	76
5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ 0.5 ลิตรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเฟส ϕ	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ที่บริดจ์ความถี่สูงมักนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการแรงดันต่ำ หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ที่บริดจ์ความถี่สูงสามารถทำได้โดยการควบคุมกระแสทางด้านเอาต์พุต และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ที่บริดจ์ความถี่สูงทั้ง 2 แบบคือ

1. การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตด้วยวิธีการควบคุมความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Frequency Control) ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการควบคุมความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ให้มากกว่าความถี่เรโซแนนท์เพื่อทำงานในสถานะ ZVS (Zero Voltage Switching) และที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับความถี่เรโซแนนท์จะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดและเมื่อความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะลดลง ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอในบทที่ 3

2. การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตด้วยวิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน (Partial Voltage Cancellation) ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้เพิ่มหรือลด ซึ่งรายละเอียดของปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตด้วยวิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน ได้นำเสนอในบทที่ 4

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ประยุกต์ใช้วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ที่บริดจ์ความถี่สูงมากับโหลดเตาหุงต้มการเหนี่ยวนำความถี่สูงซึ่งการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้จะมีหลักการคือเมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะหุงต้ม ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ขึ้นที่ก้นภาชนะหุงต้ม ถ้าภาชนะหุงต้มเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro-Magnetic เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ก้นภาชนะหุงต้มและจะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ในภาชนะทำให้น้ำเดือดในที่สุด ให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำนี้ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ภาชนะโดยตรง โดยอาศัยกระแสไหลวนที่ก้นภาชนะหุงต้ม ทำให้หุงต้มเดือดได้ในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะมีหลักการพิจารณาคือ เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะหุงต้ม ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ขึ้นที่ก้น

ภาวะหุงต้ม ถ้าภาวะหุงต้มเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro-Magnetic เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นที่ก้นภาชนะหุงต้ม และจะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ในภาชนะ ทำให้น้ำเดือดในที่สุด ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มีการสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งาน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50Hz ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายให้กับขดลวดหุงต้มเหนี่ยวนำและภาชนะหุงต้มที่ต้องการให้เกิดความร้อน

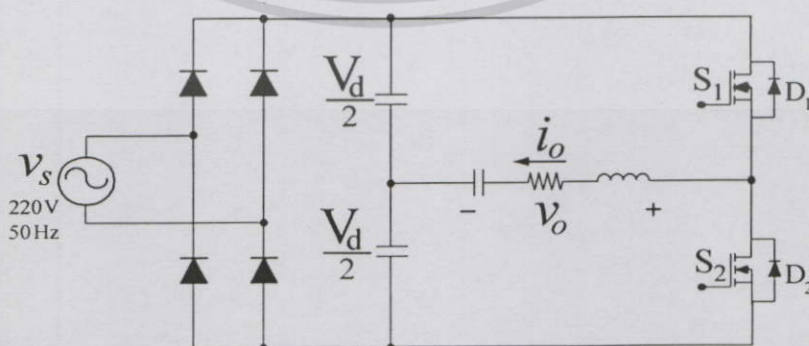
1.2.2 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ความถี่สูง ทั้งแบบควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการควบคุมความถี่สวิตซ์ซิ่งของอินเวอร์เตอร์และแบบควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ และคำนวณหาคลื่นแรงดันและกระแสและกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองเครื่องต้นแบบกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้อง

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยเปรียบเทียบกับแบบเดิม

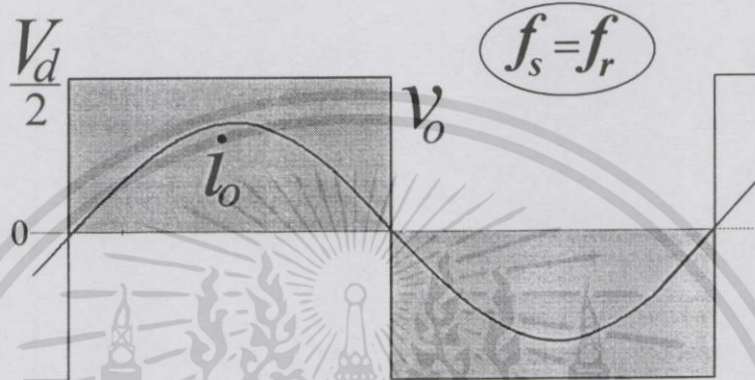
ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ความถี่สูง ทั้งแบบควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการควบคุมความถี่สวิตซ์ซิ่งของอินเวอร์เตอร์และแบบควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน ซึ่งในส่วนของ การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีการควบคุมความถี่สวิตซ์ซิ่งของอินเวอร์เตอร์จะใช้วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ดังรูปที่ 1.1



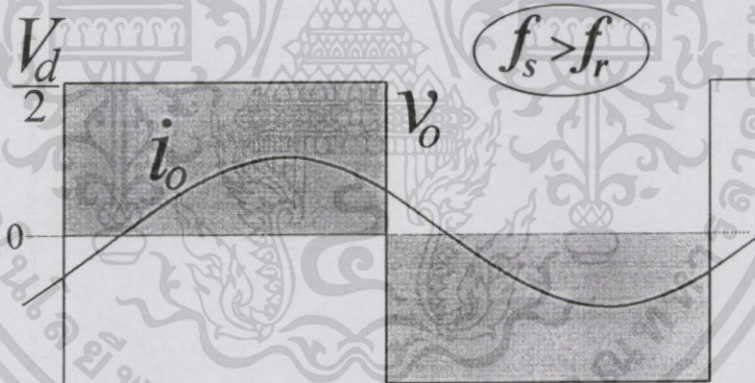
รูปที่ 1.1 วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวงจรกึ่งบริดจ์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 1.1 จะสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตได้โดยการปรับความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ จากรูปที่ 1.2 จะเห็นว่าที่ค่าความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ $f_s = f_r$ จะได้ค่ากระแสเอาต์พุตที่มีปริมาณสูงสุดซึ่งจะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสและค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะลดต่ำลงที่ค่าความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์ $f_s > f_r$ ดังรูปที่ 1.3



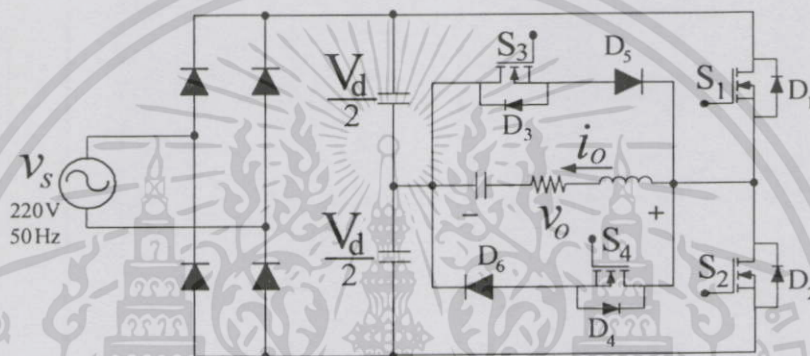
รูปที่ 1.2 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ค่าความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ $f_s = f_r$



รูปที่ 1.3 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ค่าความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์ $f_s > f_r$

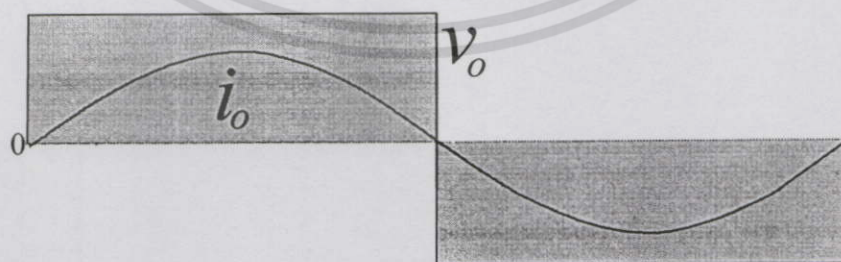
ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตโดยการปรับความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จะเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเอาต์พุตให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยคลื่นแรงดันเอาต์พุตจะไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตโดยการปรับความถี่จะมีข้อเสียคือ ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจะต้องปรับค่าความถี่ในย่านที่กว้าง ซึ่งจะส่งผลทำให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้ามีค่า Harmonic Noise ปนอยู่ เมื่อต้องการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ Harmonic Noise ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าจะทำได้ยากเพราะใช้ค่าความถี่ทางด้านเอาต์พุตในย่านที่กว้าง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนซึ่งมีข้อดีคือ ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจะปรับย่านค่าความถี่ที่ใช้งานไม่กว้างมากนัก ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ Harmonic Noise ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าในกรณีปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ซึ่งวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนได้ประยุกต์ใช้วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ในรูปที่ 1.1 ให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยใช้วิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนโดยการเพิ่มสวิตช์มอสเฟส S_3 และ S_4 และไดโอด D_3 และ D_4 เข้าไปในวงจรกึ่งบริดจ์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 1.1 ซึ่งจะได้วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตโดยใช้วิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนได้ดังรูปที่ 1.4

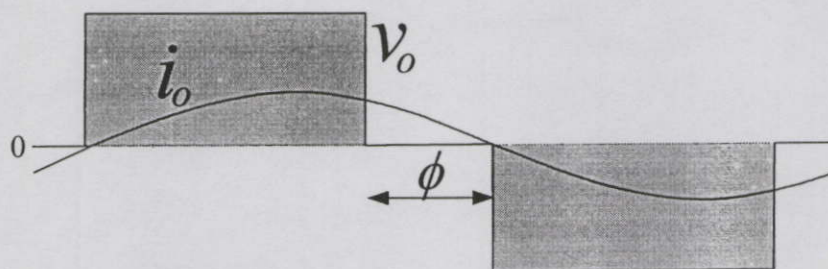


รูปที่ 1.4 วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนจะเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต โดยการเพิ่มหรือลดแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง จากรูปที่ 1.5 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเฉือน $\phi = 0^\circ$ จะได้ปริมาณกระแสและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด และเมื่อปรับมุมเฉือน $\phi = 60^\circ$ ปริมาณกระแสและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะลดต่ำลงดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.5 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่มุมเฉือน $\phi = 0^\circ$



รูปที่ 1.6 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่มุมเฉือน $\phi = 60^\circ$

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนนี้จะต้องให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่สภาวะ ZVS เสมอ โดยกระแสเอาต์พุต i_o จะต้องล่าหลังขอบหน้าของแรงดันเอาต์พุต v_o เสมอซึ่งทำได้โดยการเพิ่มค่าความถี่สวิตชิ่งให้สูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งรายละเอียดการควบคุมกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์แบบปรับความถี่และแบบตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนก็นำอยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.4 รายละเอียดที่จะทำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนสำหรับใช้ในงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งรายละเอียดสามารถแบ่งออกเป็นบทได้ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ชนิดอนุกรมเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

บทที่ 3 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

บทที่ 4 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

บทที่ 5 ผลการทดลองและผลการจำลอง

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สำหรับเครื่องต้นแบบของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงที่ใช้ในการทดสอบของงานวิจัยมีพิกัดต่อไปนี้

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุท	220	โวลท์
ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับอินพุท	50	เฮิรตซ์
กำลังไฟฟ้านำเข้าเอาต์พุท	1040-55	วัตต์
ความถี่สวิตชิงของอินเวอร์เตอร์	33-58	กิโลเฮิรตซ์

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง และเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
- 1.5.2 ศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้กับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง
- 1.5.3 ทำการสร้างชุดทดลองเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง
- 1.5.4 ทดสอบพร้อมทั้งเก็บข้อมูล เพื่อปรับปรุงระบบให้ดีขึ้น
- 1.5.5 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลให้สอดคล้องกับทฤษฎี
- 1.5.6 พิมพ์วิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

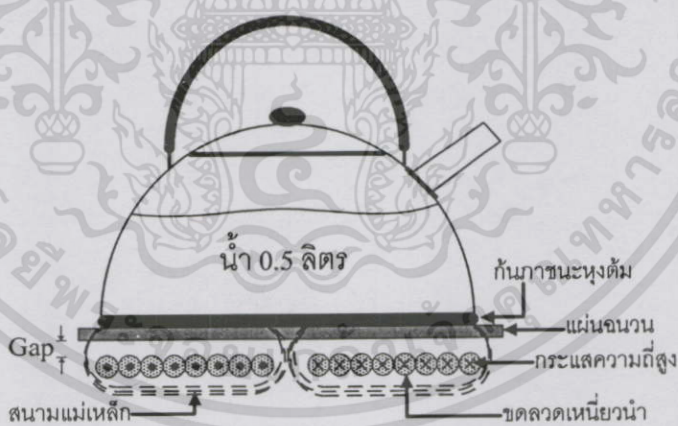
สามารถนำเครื่องต้นแบบของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงนี้ไปพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในครัวเรือน และลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรรีโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ชนิดอนุกรมเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อน โดยอาศัยการเหนี่ยวนำความถี่สูง การพิจารณาวงจรเทียบเท่าของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำในลักษณะของหม้อแปลง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ชุดโพลคาชนะหุงต้มได้ง่ายขึ้น สำหรับโพลคาชนะหุงต้มที่ใช้วัสดุต่างชนิดกันจะมีค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และการพิจารณาหลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ในส่วนโครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำจะประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ การเปรียบเทียบอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์และกึ่งบริดจ์ และโพลครีโซแนนซ์แบบอนุกรม

2.2 หลักการพื้นฐานของการเกิดความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 2.1 หลักการให้ความร้อนของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

หลักการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงจากรูปที่ 2.1 เมื่อป้อนกระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ภาชนะหุงต้ม ขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็ก

เกี่ยวคล้อง (Magnetic Flux) กับภาชนะหุงต้ม ถ้าภาชนะหุงต้มเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro-Magnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับภาชนะจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ที่ก้นภาชนะหุงต้มเป็นเส้นทางปิด ซึ่งจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่ให้ประโยชน์สามารถใช้เป็นความร้อนในการหุงต้มให้น้ำเดือดได้ ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มีกระแสสัมผัสกันทางไฟฟ้าระหว่าง

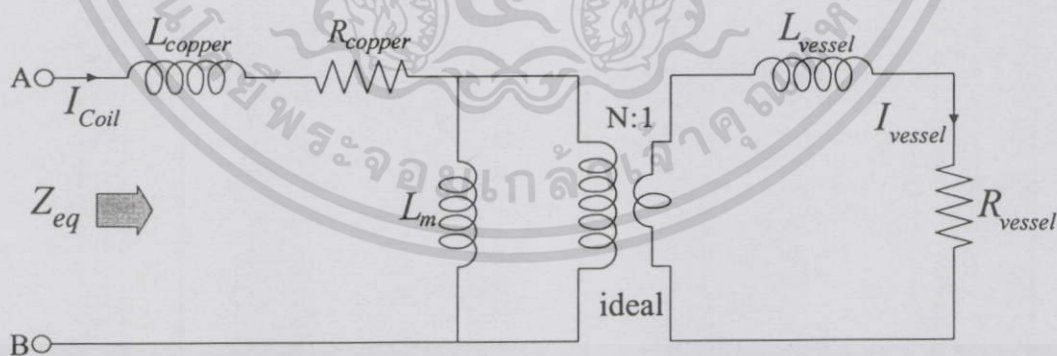
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

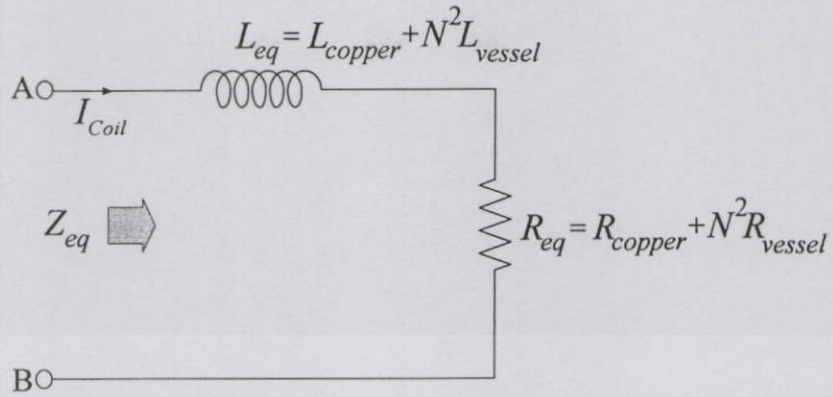
ขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม ทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งาน เตาหุงต้มเหนี่ยวนำนี้จะมีประสิทธิภาพในการหุงต้มสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นที่ตัวกันภาชนะโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านชั้นอากาศระหว่างตัวเตาหุงต้มและกันภาชนะ

2.3 การวิเคราะห์วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนกับภาชนะหุงต้ม

จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของขดลวดเหนี่ยวนำและโพลกภาชนะหุงต้มจะมีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านซึ่งกันและกันซึ่งมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง โดยสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงดังรูปที่ 2.2 โดยภาชนะหุงต้มทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนขดลวดเพียง 1 รอบโดยมีค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance: L_{vessel}) ของภาชนะหุงต้ม และความต้านทานของภาชนะ (R_{vessel}) ส่วนขดลวดทางด้านปฐมภูมิสามารถแทนด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ โดยมีค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance: L_{copper}) ของขดลวดเหนี่ยวนำ ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ (R_{copper}) โดยที่วงจรสมมูลที่ได้นี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขว่ากระแสแมกนีไทซ์ I_m ซึ่งไหลผ่านค่าความเหนี่ยวนำซึ่งสร้างแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance: L_m) มีค่าน้อยมากจนไม่นำมาพิจารณาในวงจร และเมื่อรวมกับ R_{vessel} และ L_{vessel} ทางด้านทุติยภูมิที่ย้ายมารวมกับด้านปฐมภูมิแล้วจะได้อิมพีแดนซ์รวม Z_{eq} ประกอบด้วย $R_{eq} = R_{copper} + N^2 R_{vessel}$ และ $L_{eq} = L_{copper} + N^2 L_{vessel}$ ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นขดลวดเหนี่ยวนำและโพลกภาชนะหุงต้มนี้สามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วยความเหนี่ยวนำสมมูล L_{eq} และความต้านทานเทียบสมมูล R_{eq}



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุงต้ม



รูปที่ 2.3 อิมพีแดนซ์สมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับภาชนะหุ้มคัมที่โอนย้ายมาทางปฐมภูมิ

ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดภาชนะหุ้มคัมที่โอนย้ายมาทางปฐมภูมิสามารถเขียนแทนด้วยวงจรอนุกรมสมมูล ซึ่งประกอบด้วยความเหนี่ยวนำสมมูล L_{eq} และความต้านทานสมมูล R_{eq} สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการ

$$R_{eq} = R_{copper} + N^2 R_{vessel} \tag{2.1}$$

$$L_{eq} = L_{copper} + N^2 L_{vessel} \tag{2.2}$$

- โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ
- R_{copper} คือ ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิหรือขดลวดเหนี่ยวนำ
- R_{vessel} คือ ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิหรือโหลดภาชนะหุ้มคัม
- L_{copper} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ทางด้านปฐมภูมิ
- L_{vessel} คือ ความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ทางด้านทุติยภูมิ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$P_{copper} = I_{Coil}^2 R_{copper} \tag{2.3}$$

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ประโยชน์ในการหุ้มคัมที่โหลดภาชนะหุ้มคัมมีค่าเท่ากับ

$$P_{vessel} = I_{Coil}^2 N^2 R_{vessel} \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก

$$I_{vessel} = NI_{Coil} \quad (2.5)$$

โดยที่ I_{vessel} คือ กระแสที่ไหลในหลอดเลือดหุ้ม

I_{Coil} คือ กระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำ

จากสมการ(2.4) จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ประโยชน์ในการหุ้มที่หลอดเลือดหุ้มก็คือความร้อนที่เกิดขึ้นที่ภาชนะหุ้ม ซึ่งความร้อนที่ภาชนะหุ้มจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ไหลในหลอดเลือดหุ้ม I_{vessel} และค่าความต้านทานของภาชนะหุ้ม R_{vessel}

ความร้อนส่วนมากจะเกิดขึ้นโดยกระแสไหลวนในหลอดเลือดหุ้มที่บริเวณชั้นผิวนอกของภาชนะหุ้มที่มีความลึกผิวเท่ากับ δ_{vessel} (Skin depth) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของภาชนะหุ้มดังสมการ[5]

$$\delta_{vessel} = \sqrt{\frac{I}{\mu_o}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{vessel}}{\mu_r f \pi}} \quad (2.6)$$

โดยที่ ρ_{vessel} คือ สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของภาชนะ ($\Omega \cdot m$)

f คือ ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน (Hz)

μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์

μ_o คือ $4\pi \times 10^{-7}$

จากสมการ2.6ค่าความลึกผิว δ_{vessel} (Skin depth) ของภาชนะหุ้มก็จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อน f และค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของภาชนะ ρ_{vessel} และค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ μ_r

ซึ่งค่าความร้อนของเตาหุ้มเหนี่ยวนำความถี่สูงจะได้มาจากกระแสไหลวนที่กั้นภาชนะซึ่งค่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนที่กั้นภาชนะหุ้มนี้จะสามารถหาได้ดังสมการ

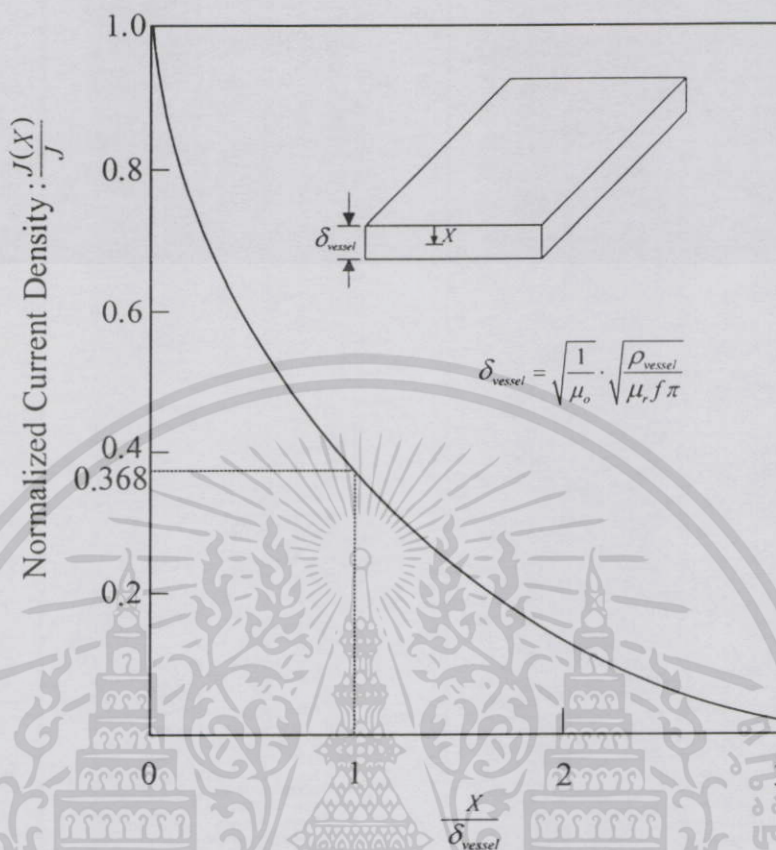
$$J(X) = Je^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.7)$$

ค่า Normalized ของความหนาแน่นของกระแสที่กั้นภาชนะหุ้มจะสามารถหาได้ดังสมการ

$$\frac{J(X)}{J} = e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.8 สามารถนำมาแสดงในลักษณะเส้นกราฟได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับระยะทางจากผิวของภาชนะหุ้มคัม

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ากระแสมีความหนาแน่นสูงสุดที่ผิวด้านนอกของกันภาชนะและจะลดลงเมื่อระยะความลึกจากผิว X มากขึ้น

ดังนั้นความต้านทานที่ผิวของโหลคภาชนะหุ้มคัมในย่านความถี่สูง มีค่าดังสมการ[5]:

$$\begin{aligned}
 R_{vessel} &= \frac{\rho_{vessel}}{\delta_{vessel}} \\
 &= \frac{\rho_{vessel}}{\sqrt{\frac{1}{\mu_o} \cdot \frac{\rho_{vessel}}{\mu_r f \pi}}} \\
 &= \sqrt{\mu_o} \sqrt{\rho_{vessel} \mu_r f \pi}
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

แทนค่าสมการ (2.9) ใน (2.4) จะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลคาชนะหุงต้ม P_{vessel} ดังนี้

$$P_{vessel} = I_{Coil}^2 N^2 R_{vessel} = (I_{Coil} N)^2 \cdot \sqrt{\mu_o} \cdot \sqrt{\rho_{vessel} \mu_r f \pi} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.9) จะเห็นได้ว่าความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_{vessel} จะแปรผันตามค่ารากกำลังสองของสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า (ρ_{vessel}) ของภาชนะหุงต้ม ของค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ_r) และของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ (f) ที่ป้อนจากอินเวอร์เตอร์ จากสมการ (2.10) จะได้ว่า การเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_{vessel}) ของภาชนะหุงต้มสามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่ (f) ในตัวชิ้นงานที่ให้ความร้อน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในภาชนะหุงต้มที่ความถี่ 30 kHz

material	iron	stainless	aluminum	copper
Resistivity ($\Omega \cdot m$): ρ_{vessel}	9.8×10^{-8}	60×10^{-8}	2.8×10^{-8}	1.7×10^{-8}
Relative permeability: μ_r	100	100	1	1
Skin depth (mm): δ_{vessel}	0.909	0.225	0.486	0.378
Surface resistivity (Ω): R_{vessel}	11×10^{-4}	27×10^{-4}	0.575×10^{-4}	0.448×10^{-4}

จากตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของภาชนะหุงต้มที่วัสดุต่างๆกัน ที่ความถี่ 30 kHz จะเห็นได้ว่า วัสดุที่ทำด้วยสาร non-ferro-magnetic เช่น อลูมิเนียมและทองแดง มีค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าของภาชนะ ρ_{vessel} (Resistivity) และความซึมซาบแม่เหล็ก μ_r (Relative permeability) ต่ำมากเมื่อเทียบกับสแตนเลสและเหล็กซึ่งทำด้วยสาร ferro-magnetic ดังนั้นการเพิ่มกำลังเอาต์พุตสำหรับโพลคาชนะทำด้วยสาร non-ferro-magnetic สามารถกำหนดได้ตามสมการที่ (2.10) คือเพิ่มกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำและเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าความลึกผิวของการไหลวนของกระแส δ_{vessel} (Skin depth) จากข้อมูลซึ่งแสดงในส่วนพื้นที่เรขาคณิตในตารางที่ 2.1 ซึ่งมีค่า $\delta_{vessel} = 0.225$ mm นั้นสามารถแสดงการคำนวณหาค่า δ_{vessel} เพื่อให้ได้คำตอบดังกล่าวได้ดังนี้

$$\delta_{vessel} = \sqrt{\frac{1}{\mu_o}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{vessel}}{\mu_r f \pi}}$$

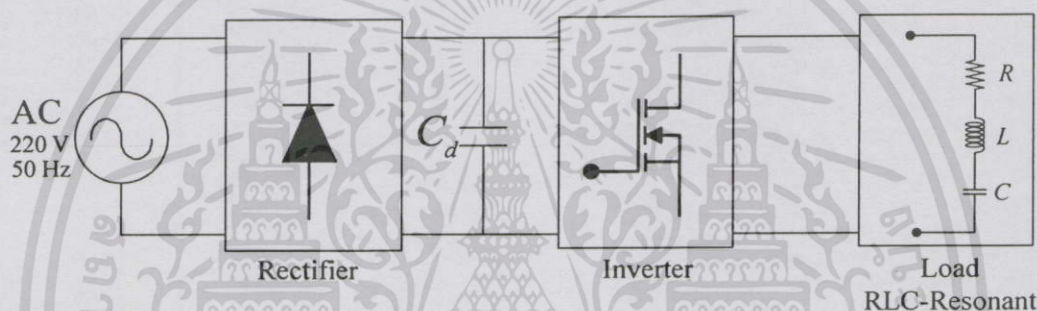
$$\delta_{vessel} = \sqrt{\frac{1}{4\pi \times 10^{-7} (H/m)}} \cdot \sqrt{\frac{60 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)}{100 \cdot 30 \times 10^3 (Hz) \cdot \pi}}$$

$$\delta_{vessel} = 0.225 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการสร้างกระแสความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน

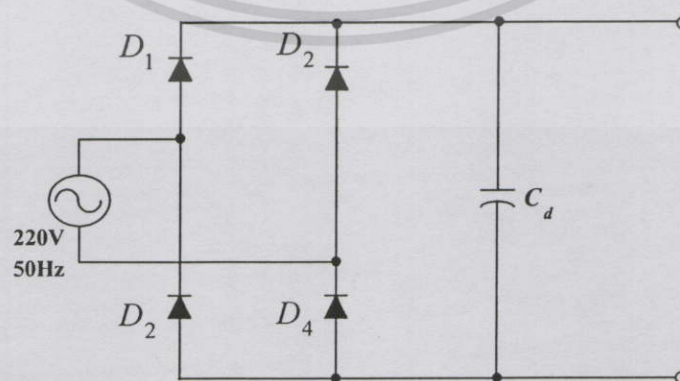
สำหรับโครงสร้างของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น บล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.5 รายละเอียดประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับ 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต จากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรกรองแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เพื่อกรองไฟกระแสตรงให้เรียบขึ้น แล้วจ่ายให้กับ วงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่สูง โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ เพื่อจ่ายให้กับชุดโหลดเรโซแนนท์ ซึ่งมี รายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

2.4.1 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนนี้จะเป็นวงจรที่ภาคกำลังความถี่ต่ำซึ่งจะเป็นส่วนแรกของแหล่งจ่ายกำลัง ไฟฟ้าความถี่สูงที่ใช้ในการเหนี่ยวนำ โดยจะประกอบด้วยวงจรเรกติไฟเออร์และดีซีฟิลเตอร์ โดยจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จากการไฟฟ้าและทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีวงจรดังรูปที่ 2.6

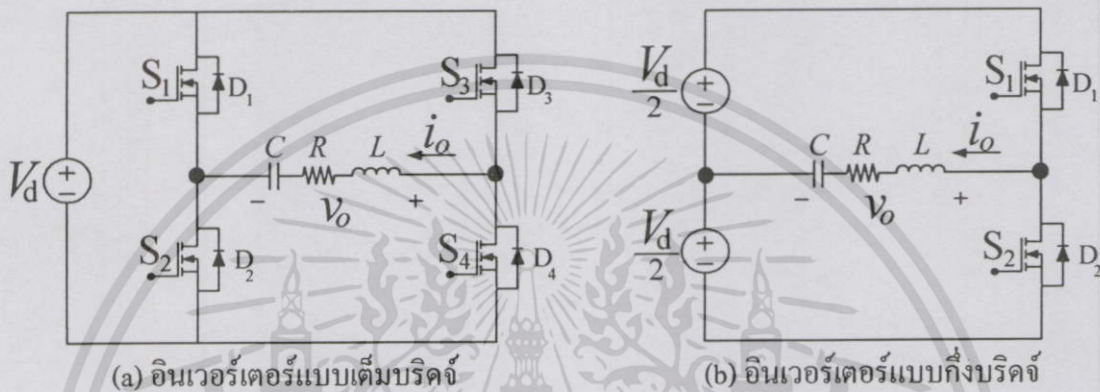


รูปที่ 2.6 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

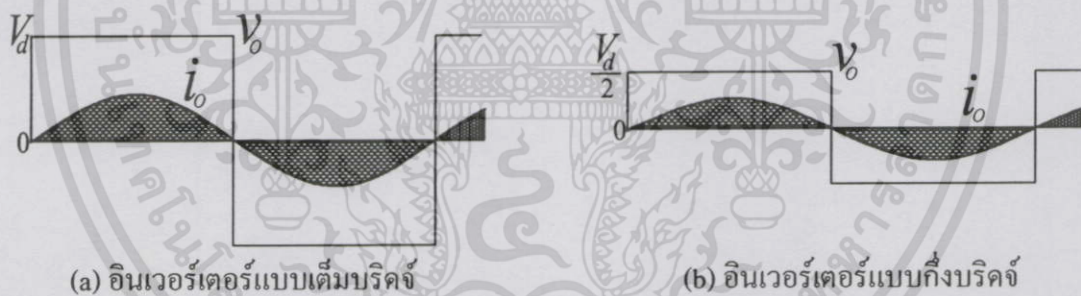
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่สูง ซึ่งโหลดคาบหึ่งคัมเหนี่ยวนำนี้จะเป็นวงจร โทลครโซแนนท์ชนิดอนุกรม โดยมีวงจรอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรโทลครโซแนนท์ชนิดอนุกรมนี้ ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มบริดจ์และกึ่งบริดจ์ ซึ่งจะมีข้อแตกต่างกันดังรูปที่ 2.7(a) และ 2.7(b)



รูปที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบเต็มบริดจ์และแบบกึ่งบริดจ์



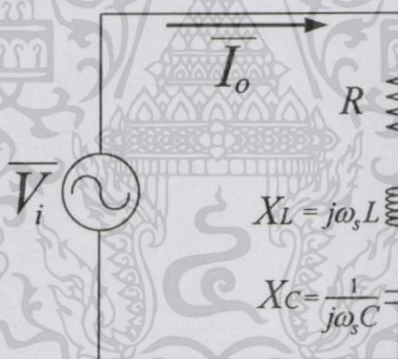
รูปที่ 2.8 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์และแบบกึ่งบริดจ์

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์จะเป็นครึ่งหนึ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์จะมากกว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ซึ่งในงานคาบหึ่งคัมเหนี่ยวนำความถี่สูงได้เลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์เพราะเป็นงานที่ไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง

2.4.3 โหลดเรโซแนนท์

สำหรับโหลดเรโซแนนท์ที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงโดยทั่วไป เช่น เครื่องชุบแข็งผิวโลหะ เครื่องหลอมโลหะ เต้าหุงต้มเหนียวน้ำ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องเชื่อมความถี่สูง เป็นต้น ซึ่งมีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือลดการสูญเสียในขณะสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ เมื่อสวิตช์ตัดวงจรที่กระแสศูนย์ (Zero Current Switch : ZCS) หรือ สวิตช์ต่อวงจรที่แรงดันศูนย์ (Zero Voltage Switch : ZVS) มีผลทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น และข้อเสียเปรียบที่สำคัญของวงจรเรโซแนนท์คือ ที่ตำแหน่งใกล้จุดความถี่เรโซแนนท์สำหรับวงจรเรโซแนนท์ที่มีค่า Q สูง จะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ที่ใช้ในวงจรเรโซแนนท์มีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้นสวิตช์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมขณะ OFF ได้สูง และ LC ในวงจรเรโซแนนท์ที่เลือกใช้ก็เช่นกัน จะต้องมีย่านใหญ่ เพื่อให้สามารถเก็บพลังงานได้มาก

ในกรณีเต้าหุงต้มเหนียวน้ำความถี่นั้น เหมาะสมที่จะใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดอนุกรม เนื่องจากโครงสร้างง่ายขนาดไม่ใหญ่ และวงจรควบคุมไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.9 วงจรเฟสเซอร์ RLC อนุกรม

วงจร RLC เรโซแนนท์แบบอนุกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 โดยจะนำเสนอการพิจารณาผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรในกรณีที่แรงดันอินพุตเป็นคลื่นไซน์ซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการพิจารณาสำหรับกรณีที่อินพุตมีลักษณะคลื่นที่ไม่เป็นไซน์ได้ต่อไป จากวงจร RLC อนุกรมดังรูปที่ 2.9 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุตได้ดังสมการ

$$\bar{V}_o = \bar{V}_i \left(\frac{R}{R + jX_L + \frac{1}{jX_C}} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \bar{V}_i \left(\frac{R}{R + j\omega_s L + \frac{1}{j\omega_s C}} \right)$$

$$= \bar{V}_i \left(\frac{R}{R + j \left(\omega_s L - \frac{1}{\omega_s C} \right)} \right) \quad (2.11)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของแรงดันอินพุตและเอาต์พุตแสดงได้ดังสมการ

$$V_o = V_i \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_s L - \frac{1}{\omega_s C} \right)^2}} \right) \quad (2.12)$$

ดังนั้นจะได้ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของวงจรคือ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega_s L - \frac{1}{\omega_s C} \right)^2}} \quad (2.13)$$

หรือ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_s L}{R} - \frac{1}{\omega_s RC} \right)^2}} \quad (2.14)$$

เรโซแนนซ์เกิดขึ้นเมื่อค่า $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ซึ่งจะหาค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของวงจรเท่ากับ 1 และความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์นี้มีค่าดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

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

ค่า characteristic impedance (Z_o) วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเท่ากับ

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (2.17)$$

เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ X_L และค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ X_C เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง โดยสามารถอ้างอิงกับ Z_o ได้ดังนี้

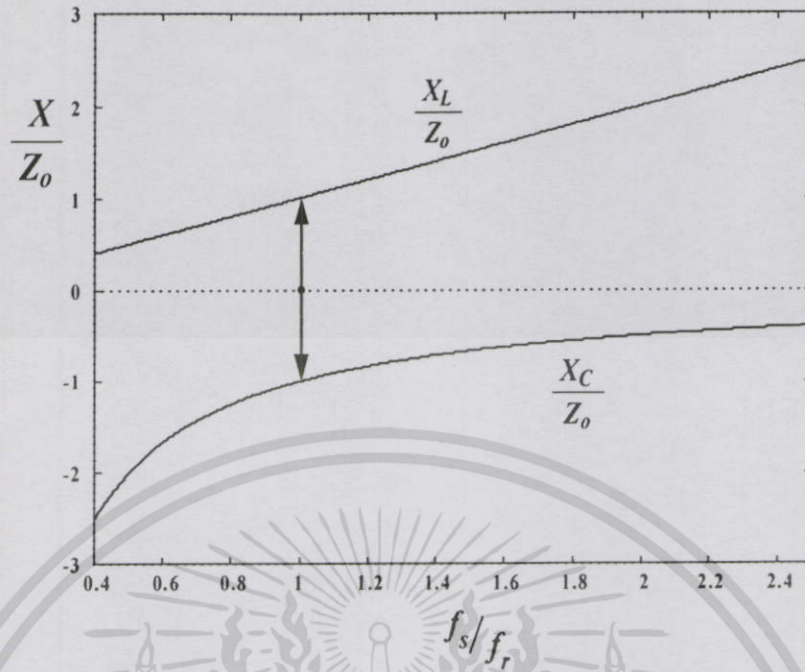
$$\begin{aligned} \frac{X_L}{Z_o} &= \frac{\omega_s L}{\omega_r L} = \frac{\omega_s}{\omega_r} \\ &= \frac{2\pi f_s}{2\pi f_r} = \frac{f_s}{f_r} \end{aligned} \quad (2.18)$$

และ

$$\begin{aligned} \frac{X_C}{Z_o} &= \frac{\left(\frac{1}{\omega_s C}\right)}{\left(\frac{1}{\omega_r C}\right)} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \\ &= \frac{2\pi f_r}{2\pi f_s} = \frac{f_r}{f_s} \end{aligned} \quad (2.19)$$

จากสมการ 2.18 และสมการ 2.19 สามารถแสดงในลักษณะเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของ $\frac{X_L}{Z_o}$ และ $\frac{X_C}{Z_o}$ เทียบกับความถี่ได้ดังรูปที่ 2.10 และจะพบว่า

$$\begin{aligned} \text{ที่ความถี่เรโซแนนซ์ } f_s = f_r, \quad & \frac{X_L}{Z_o} = \frac{X_C}{Z_o} \\ & X_L = X_C \\ & \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \end{aligned} \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเมื่อค่าความถี่เปลี่ยนแปลง

จากนิยามของค่า Quality factor Q ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะได้ว่า

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} \tag{2.21}$$

เนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์ $\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$ ดังนั้นจะได้

$$Q = \frac{1}{\omega_r RC} \tag{2.22}$$

คูณทั้งสองด้านของสมการ (2.21) ด้วย $\frac{\omega_s}{\omega_r}$:

$$\begin{aligned} Q \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} \right) &= \left(\frac{\omega_r L}{R} \right) \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} \right) \\ &= \left(\frac{\omega_s L}{R} \right) \end{aligned} \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

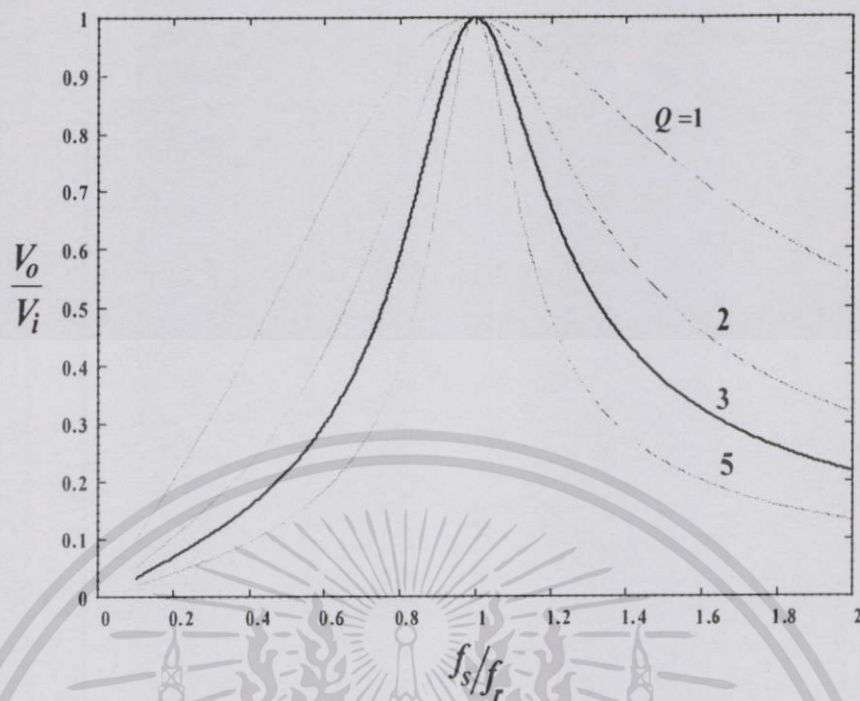
คูณทั้งสองด้านของสมการ (2.22) ด้วย $\frac{\omega_r}{\omega_s}$:

$$\begin{aligned} Q\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right) &= \left(\frac{1}{\omega_r RC}\right)\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right) \\ &= \left(\frac{1}{\omega_s RC}\right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

แทนค่า $\frac{\omega_s L}{R}$ จากสมการ (2.23) และ $\frac{1}{\omega_s RC}$ จากสมการ (2.24) ลงในทรานสเฟอ์ฟังก์ชันสมการ (2.14) จะสามารถเขียนทรานสเฟอ์ฟังก์ชันใหม่ในรูปของค่า Q ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{\omega_s}{\omega_r} - Q \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{2\pi f_s}{2\pi f_r} - \frac{2\pi f_r}{2\pi f_s}\right)^2}} \\ \frac{V_o}{V_i} &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f_s}{f_r} - \frac{f_r}{f_s}\right)^2}} \end{aligned} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.25 สามารถแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ที่ Q ค่าต่างๆ ของวงจร ได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าความถี่ของอินพุทไม่เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ของวงจร จะทำให้แรงดันเอาต์พุทมีค่าลดลงในขณะที่ Q ของวงจรมีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่า Q ของวงจรเรโซแนนท์ที่ถึงบริดจ์ที่ใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ค่า Q จะมีค่าประมาณ 3



รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองของ $\frac{V_o}{V_i}$ ต่อความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์ f_s/f_r แบบอนุกรมที่ค่า Q (quality factor) ต่างๆ

2.5 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม

การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมสามารถควบคุมได้ 3 แบบ คือ

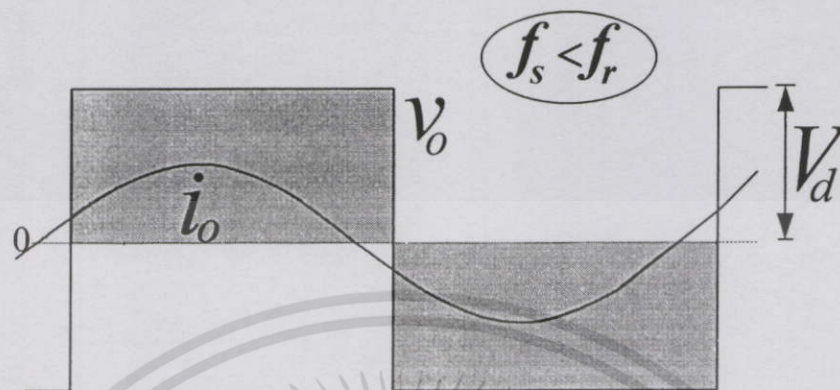
- 1) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่
- 2) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการการปรับมุม Phase-Shift
- 3) การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการการควบคุมจำนวนพัลส์ (PDM)

2.5.1 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่

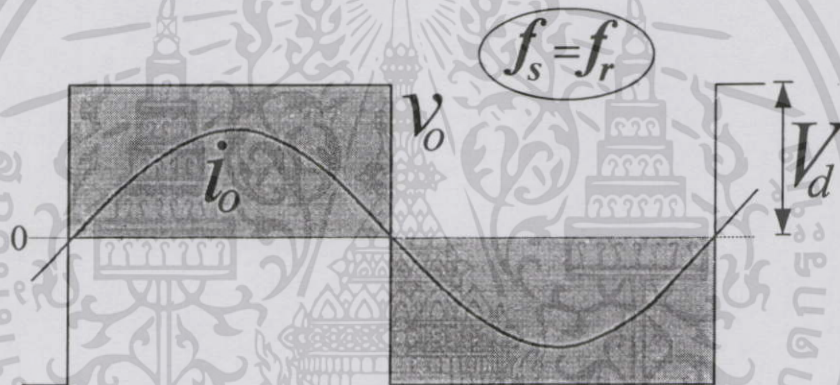
การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่นี้ สามารถทำได้โดยการปรับความถี่สวิตช์ f_s ของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยจะได้ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสที่โหลดคงแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่สวิตช์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ดังรูป 2.12(a) และรูปที่ 2.12(c) ตามลำดับ จะได้ปริมาณกระแสที่ลดลง ส่วนที่ความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.12(b) จะได้กระแสที่มีปริมาณสูงสุดซึ่งจะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังไฟฟ้าจะลดต่ำลงที่ความถี่สวิตช์น้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่นี้มีข้อดีคือ ระบบควบคุมไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือ จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

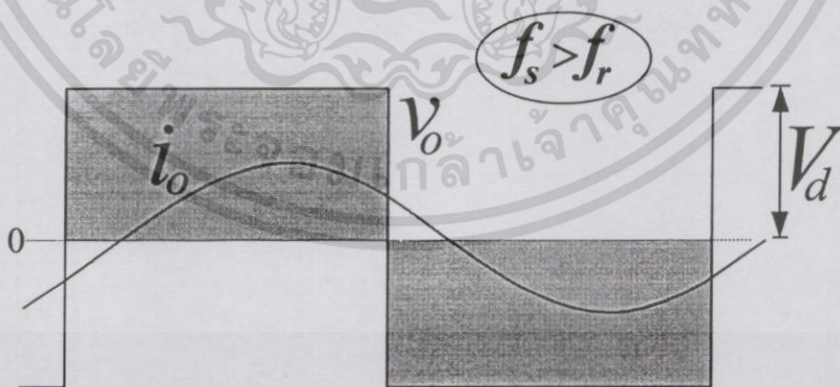
กระแสเพิ่มขึ้นจากลักษณะคลื่นไซน์มากขึ้นเมื่อปรับความถี่สวิตช์สูงขึ้นหรือต่ำลงไปจากความถี่เรโซแนนท์ ทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกเกิดขึ้นตามมาด้วย



(a) ความถี่สวิตช์น้อยกว่าความถี่เรโซแนนท์ $f_s < f_r$



(b) ความถี่สวิตช์เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ $f_s = f_r$



(c) ความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซแนนท์ $f_s > f_r$

รูปที่ 2.12 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์กรณีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่ f_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม จะส่งผลทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสมมูล (X_L) ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (X_C) และค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) เปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่สวิตช์ f_s ของอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลง โดยที่ความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของโหลด ($f_s = f_r$) จะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสมมูล (X_L) เท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (X_C) ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานสมมูล (R) ซึ่งจะได้ลักษณะคลื่นกระแสที่โหลดที่มีขนาดสูงที่สุดพร้อมทั้งมีมุมเฟสที่ตรงกับคลื่นแรงดันดังรูปที่ 2.12(b) ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของโหลด ($f_s = f_r$) มีค่าสูงสุดดังรูปที่ 2.13

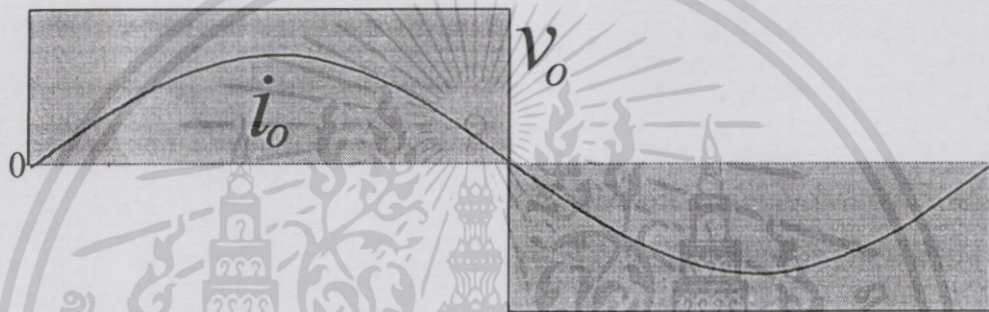


รูปที่ 2.13 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตช์ต่างๆ

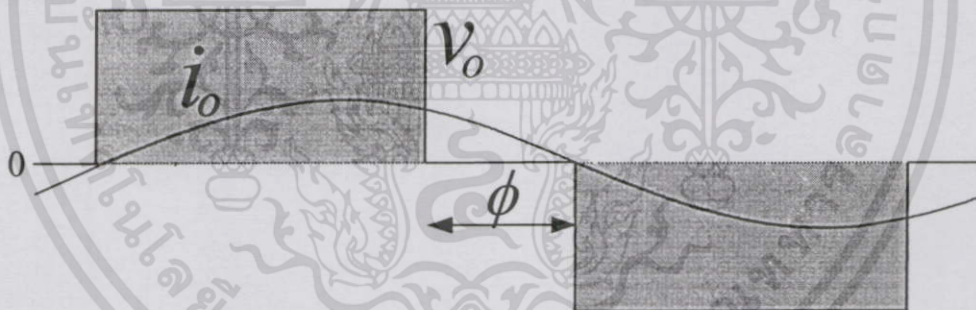
ส่วนกรณีที่ความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์น้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของโหลด ($f_s < f_r$) จะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (X_C) จะมีค่ามากกว่าค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสมมูล (X_L) ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) เท่ากับผลรวมของค่าความต้านทานสมมูล (R) และค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้จากค่า $X_C - X_L$ ซึ่งจะได้ลักษณะคลื่นกระแสที่เพิ่มขึ้นไปจากคลื่นไซน์พร้อมทั้งมีขนาดที่ลดลงและมีมุมเฟสหน้าคลื่นแรงดันดังรูปที่ 2.12(a) ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของโหลด ($f_s = f_r$) ดังรูปที่ 2.13 ส่วนกรณีที่ความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของโหลด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(f_s > f_r)$ จะทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสมมูล (X_L) มีค่ามากกว่าค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (X_C) ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) เท่ากับผลรวมของค่าความต้านทานสมมูล (R) และค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้จากค่า $X_L - X_C$ ซึ่งจะได้ลักษณะคลื่นกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้นจากคลื่นไซน์พร้อมทั้งมีขนาดที่ลดลงและมีมุมเฟสล่าห้คลื่นแรงดันดังรูปที่ 2.12(c) ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของโหลด ($f_s = f_r$) ดังรูปที่ 2.13 สำหรับในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เลือกนำเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าในแบบแรกนี้ด้วยวิธีการปรับความถี่ซึ่งรายละเอียดจะอยู่บทที่ 3

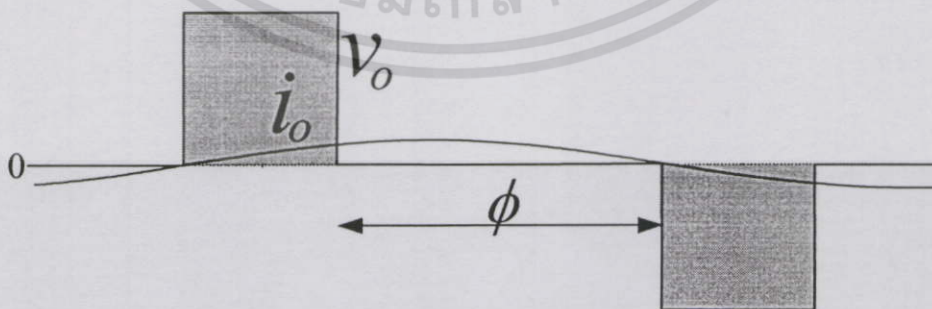
2.5.2 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift



(a) มุม Phase-Shift $\phi = 0^\circ$ องศา



(b) มุม Phase-Shift $\phi = 60^\circ$ องศา

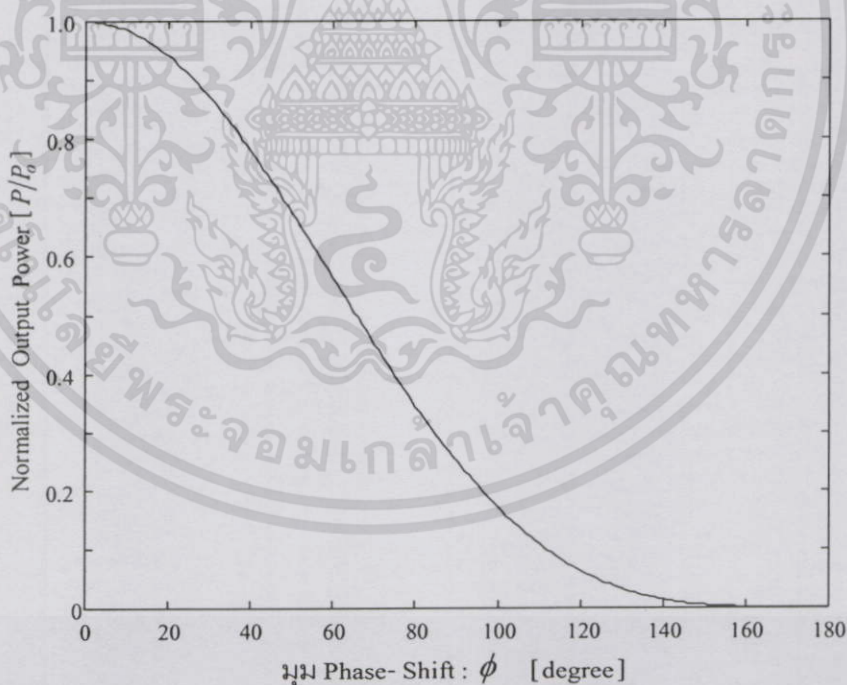


(c) มุม Phase-Shift $\phi = 120^\circ$ องศา

รูปที่ 2.14 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กรณีของการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

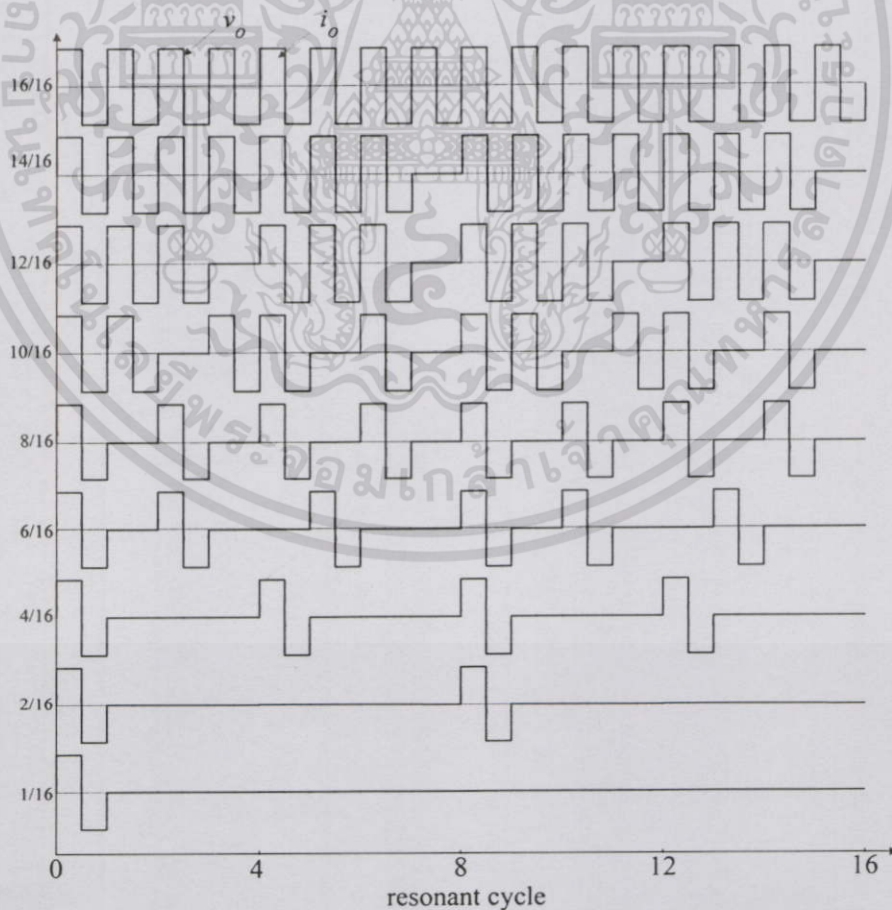
การควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift จะเป็นการปรับควบคุมเนื้อแรงดันเอาต์พุตให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยการควบคุมมุม Phase-Shift (ϕ) ซึ่งในการควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift นี้จะต้องให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่สภาวะ ZVS เสมอโดยกระแสเอาต์พุต i_o จะต้องล้หลังขอบหน้าของแรงดันเอาต์พุต v_o เสมอซึ่งทำได้โดยการเพิ่มค่าความถี่สวิตช์ซึ่งให้สูงขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ เช่น ที่มุม Phase-Shift 0 องศา ดังรูปที่ 2.14(a) จะได้ปริมาณกระแสมากที่สุด และเมื่อปรับมุม Phase-Shift เพิ่มขึ้นเป็น 60 องศา และ 120 องศา ดังรูปที่ 2.14(b) และรูปที่ 2.14(c) ตามลำดับ ปริมาณกระแสจะลดต่ำลงเรื่อยๆ ดังนั้นเมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 2.15 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับมุม Phase-Shift มากขึ้นกำลังไฟฟ้เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะลดลงเรื่อยๆ การควบคุมกำลังไฟฟ้โดยวิธีการปรับมุม Phase-Shift นี้มีข้อเสียคือ เมื่อปรับมุม Phase-Shift มากขึ้น จะมีผลทำให้กระแสจ่ายไหลทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ผิดเพี้ยนไปจากคลื่นไซน์มากขึ้น ซึ่งข้อด้อยนี้สามารถปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นได้โดยการเลือกค่า Q ของวงจรเรโซแนนท์ให้มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.15 กำลังไฟฟ้เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ

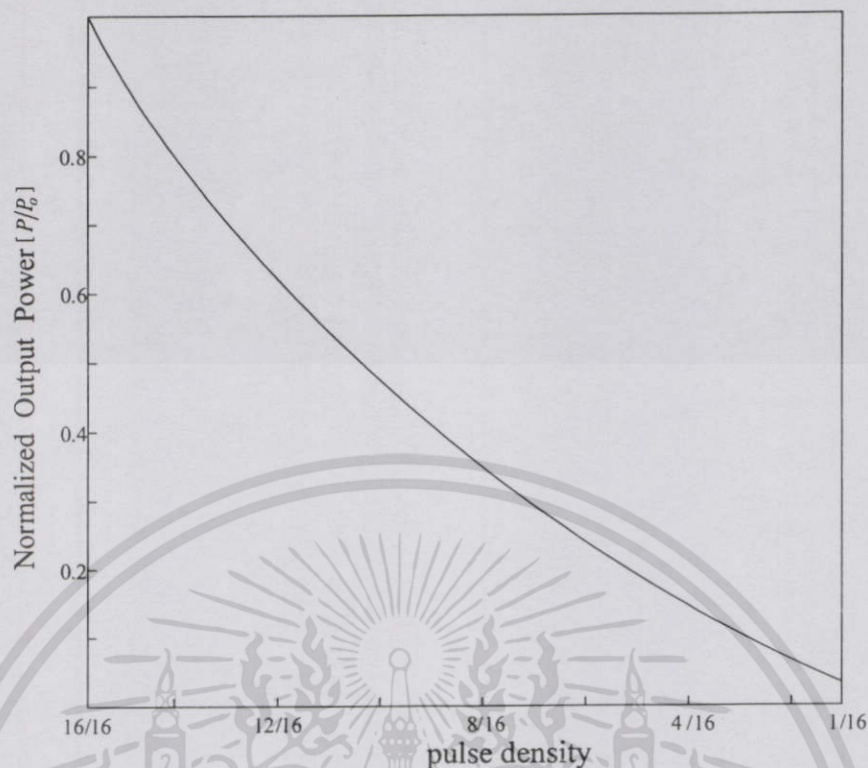
2.5.3 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมจำนวนพัลส์ (PDM)

การควบคุมด้วยวิธีนี้เป็นการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ด้วยหลักการลดจำนวนไซเคิลของคลื่นสแควร์ของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากจำนวนมาก(16/16)ไปหาน้อย(1/16)ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีการปรับเปลี่ยนจาก 16 ไซเคิล ไปจนถึง 1 ไซเคิล กระแสไหลผ่านโหลดจะมีปริมาณมากที่สุดเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล และปริมาณกระแสที่ไหลผ่านโหลดจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนไซเคิลลดลง ดังนั้นเมื่อนำมาเขียนกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะปรับจำนวนไซเคิลเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ไปจะได้ดังรูปที่ 2.17 โดยจะเห็นได้ว่าที่จำนวนไซเคิลสูงสุดเท่ากับ 16 ไซเคิล กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จะมีค่ามากที่สุด และจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อปรับจำนวนไซเคิลลดลง การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จะมีข้อเสียคือ ระดับกำลังไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนค่าไปจะมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง แต่จะเป็นไปทีละ step ซึ่งมีทั้งหมดรวม 16 step ดังแสดงในรูปที่ 2.16 นอกจากนั้นในกรณีที่มีการปรับลดกำลังไฟฟ้าลงไปถึงระดับต่ำๆ จะมีผลทำให้กระแสที่จ่ายโหลดของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นคลื่น ไซส์ที่ไม่คงที่ แต่ peak ของคลื่นกระแสจะลดต่ำลงเรื่อยๆ



รูปที่ 2.16 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ

2.6 สรุป

จากทฤษฎีการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงดังได้กล่าวมาแล้วนี้ สามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

- 1) คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่นำมาใช้ทำภาชนะหุงต้มจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัสดุนั้น ไม่ว่าจะเป็น สภาพความต้านทานทางไฟฟ้า ρ_{vessel} ของภาชนะหุงต้ม ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก μ , ความลึกผิว δ_{vessel} สภาพความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_{vessel} จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ N และความถี่กระแสไฟฟ้าสลับที่ป้อนขดลวดเหนี่ยวนำ f ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานเทียบเท่าและตัวเหนี่ยวนำเทียบเท่าของวงจรเรโซแนนซ์เปลี่ยนไป โดยที่ภาชนะหุงต้มที่ทำด้วยสาร non ferro-magnetic เช่น อลูมิเนียมและทองแดงจะมีค่าสภาพความต้านทานของภาชนะหุงต้ม R_{vessel} ต่ำมากเมื่อเทียบกับภาชนะที่ทำด้วยสาร ferro-magnetic เช่น สแตนเลสและเหล็ก เป็นต้น โดยจะมีความแตกต่างกันระหว่าง stainless กับ aluminum ถึงประมาณ 47 เท่า ข้อมูลจากตารางที่ 2.1 ดังนั้นเมื่อวัสดุที่ทำด้วยสาร non ferro-magnetic มาใช้เป็นภาชนะหุงต้มจะทำให้มีกระแสมากเกินไปเป็นผลให้ชุดอินเวอร์เตอร์เสียหายได้ แต่ถ้าเลือกภาชนะหุงต้มที่ทำด้วยสาร ferro-magnetic ก็จะสามารถทำให้กระแสความถี่สูงจากวงจรอินเวอร์เตอร์มีขนาดลดลงได้

2) ในชุดทดสอบเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงจะมีหลักการทำงานโดยการแปลงกำลังงานไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าความถี่สูงโดยมีโครงสร้างของระบบดังนี้

1. ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50Hz
2. ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
3. ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง
4. ภาคเตาหุงต้มเหนี่ยวนำให้ความร้อนด้วยความถี่

3) เตาหุงต้มเหนี่ยวนำเหมาะที่จะใช้กับวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ชนิดอนุกรมเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการหุงต้มมีไม่มากนักวงจรควบคุมไม่ซับซ้อนและมีขนาดเล็กเหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน

4) สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้าจะมีวิธีให้เลือกหลายวิธีเช่น

1. การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายวงจรไม่ซับซ้อน
2. วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับมุม Phase-Shift จะเป็นการควบคุมเนื้อแรงดันเอาต์พุตให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยการควบคุมมุม Phase-Shift (ϕ)
3. การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมจำนวนพัลส์ Pulse-Density-Modulation จะเป็นควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการลดจำนวนไซเคิลของคลื่นสแควร์ของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากจำนวนมากไปหาน้อย

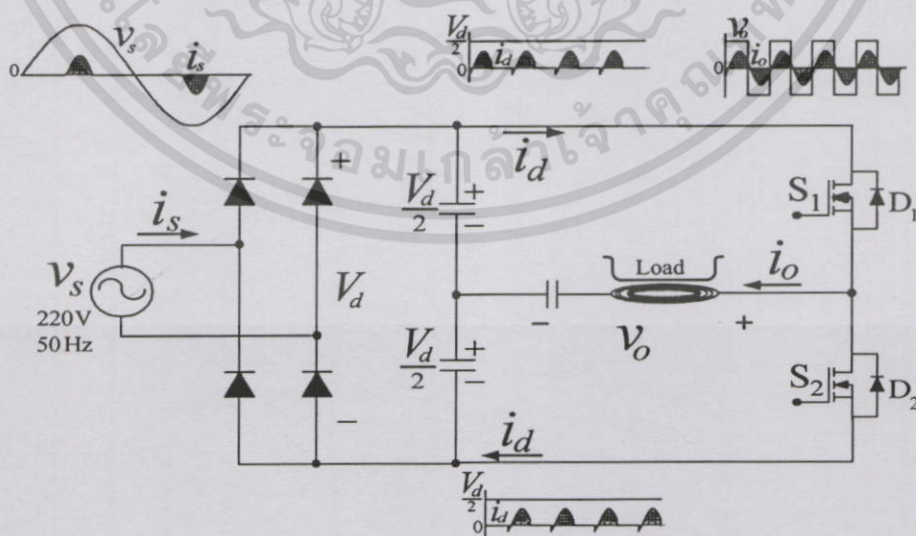
บทที่ 3

การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง รายละเอียดจะประกอบ การวิเคราะห์โหมดการทำงานของเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่สวิตช์ซึ่งที่ค่าต่างๆ พร้อมกับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม เช่น อิมพีแดนซ์(Z) มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแส(θ)เมื่อมีการปรับความถี่สวิตช์ซึ่งที่ค่าความถี่ต่างๆ และการวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุต V_o และกระแสเอาต์พุต i_o ของวงจร ซึ่งสมการแรงดันและกระแสเอาต์พุตสามารถคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o และกำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ซึ่งที่ค่าต่างๆ พร้อมทั้งหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

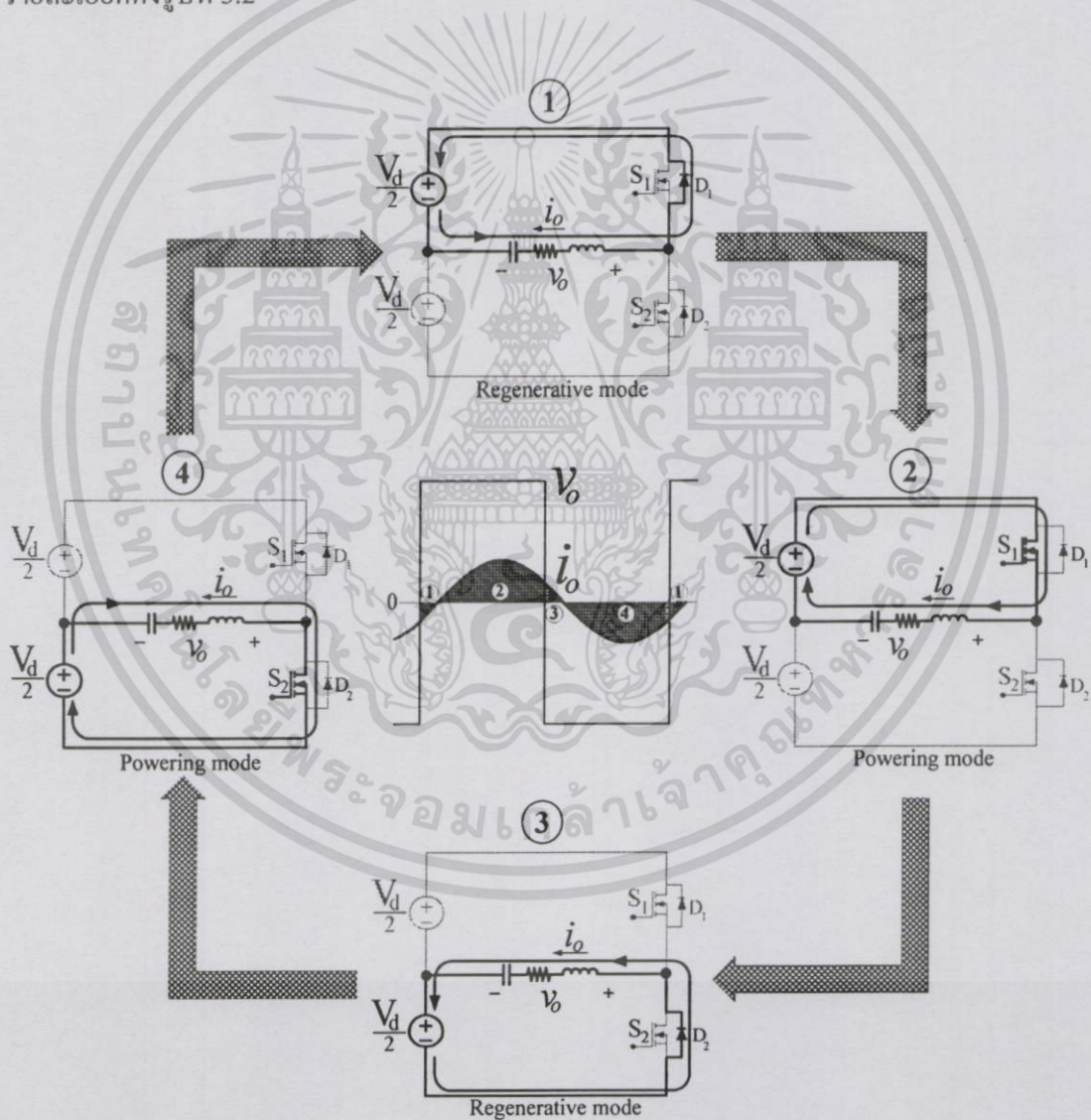
3.2 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่



รูปที่ 3.1 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่
เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

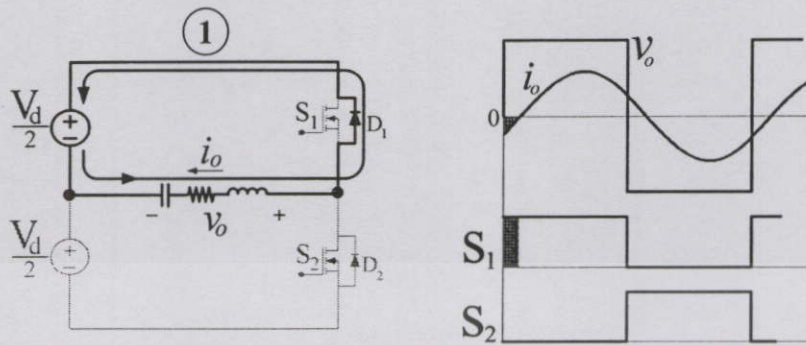
จากรูปที่ 3.1 แรงดันทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 220V 50Hz ป้อนให้กับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้ชุดอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง โดยมีมอสเฟต S_1, S_2 จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะถูกป้อนให้กับชุดโพลครโซเนนที่ซึ่งประกอบด้วยเรโซเนนซ์คาปาซิเตอร์ ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถแทนด้วยความเหนี่ยวนำสมมูล (L) และความต้านทานสมมูล (R) สำหรับโหมดการทำงานของวงจรเรโซเนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่ เมื่อกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซเนนซ์ ($f_s > f_r$) จะสามารถแบ่งโหมดการทำงานได้เป็น 4 โหมดและมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โหมดการทำงานของวงจรเรโซเนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่ที่ความถี่สวิตช์มากกว่าความถี่เรโซเนนซ์ ($f_s > f_r$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

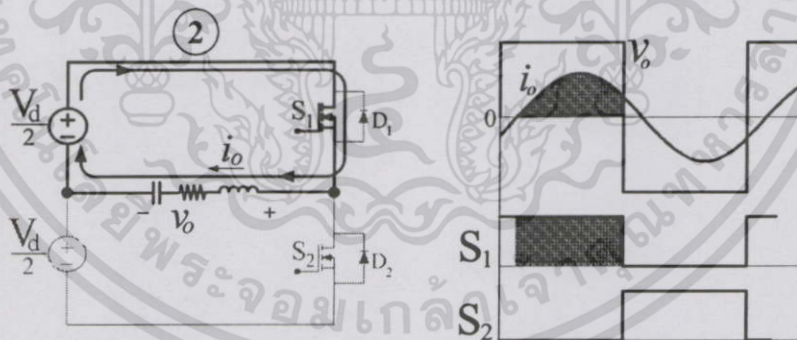
หลักการทํางานของโหมดที่ 1 Regenerative mode



รูปที่ 3.3 คลื่นแรงดันและกระแสทางคํานเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทํางานของสวิตช์ในโหมดการทํางานที่ 1

หลักการทํางานของโหมดที่ 1 ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า Regenerative mode จากรูปที่ 3.3 ขณะที่สวิตช์มอสเฟส S_2 หยุดทํางาน กระแสไฟฟ้าเอาท์พุท (i_o) ยังคงไหลในทิศทางเดิมที่มีค่าเป็นลบ โดยจะไหลผ่านไดโอด D_1 ไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณรอกอยู่ที่ขาเกตของสวิตช์มอสเฟส S_1 อยู่ก็ตาม แต่สวิตช์มอสเฟส S_1 ยังไม่สามารถทํางานได้เนื่องจากไดโอด D_1 ทํางาน ทำให้สวิตช์มอสเฟส S_1 เป็น Reverse bias ในโหมดนี้จะได้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท (v_o) เป็นบวก ซึ่งในโหมดนี้โหลดจะทำการจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

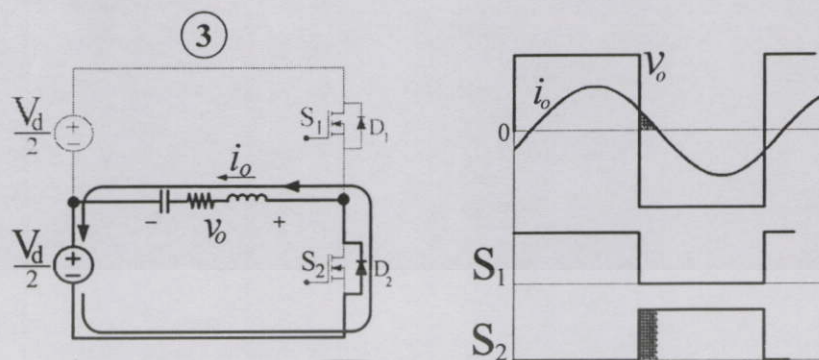
หลักการทํางานของโหมดที่ 2 Powering mode



รูปที่ 3.4 คลื่นแรงดันและกระแสทางคํานเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทํางานของสวิตช์ในโหมดการทํางานที่ 2

หลักการทํางานของโหมดที่ 2 ซึ่งจะเรียกต่อไปว่า Powering mode จากรูปที่ 3.4 ขณะที่สวิตช์มอสเฟส S_1 ทํางาน ในขณะที่สวิตช์มอสเฟส S_2 หยุดทํางาน ทิศทางกระแสไฟฟ้าเอาท์พุท (i_o) จะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านสวิตช์มอสเฟส S_1 ไปยังชุดโหลดเรโซแนนท์ ในโหมดนี้ทิศทางกระแสไฟฟ้าเอาท์พุท (i_o) จะมีค่าเป็นบวกและจะได้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท (v_o) เป็นบวก ซึ่งในโหมดนี้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการจ่ายพลังงานให้กับโหลด

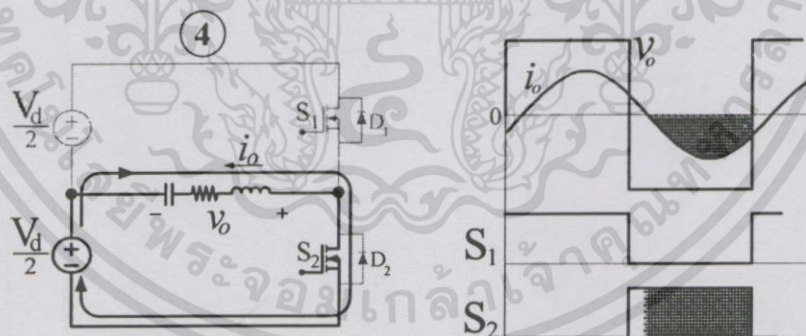
หลักการทํางานของโหมดที่ 3 Regenerative mode



รูปที่ 3.5 คลื่นแรงดันและกระแสทางคํานเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทํางานของสวิตช์ใน โหมดการทํางานที่ 3

หลักการทํางานของโหมดที่ 3 ซึ่งจะเรียกคํอไปว่า Regenerative mode จากรูปที่ 3.5 ขณะที่สวิตช์มอสเฟส S_1 หยุดทํางาน กระแสไฟฟ้ําเอาท์พุท (i_o) ยังคงไหลในทิศทางเดิมที่มีคํ่าเป็นบวก โดยจะไหลผ่านไดโอด D_2 ไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ํากระแสตรง ถึงแม้ว่าจะมีสัญญาณรอกอยู่ทีขาคัดของสวิตช์มอสเฟส S_2 อยู่ก็ตาม แต่สวิตช์มอสเฟส S_2 ยังไม่สามารถทํางานได้เนื่องจากไดโอด D_2 ทํางาน ทําให้สวิตช์มอสเฟส S_2 เป็น Reverse bias ในโหมดนี้จะได้แรงดันไฟฟ้ําเอาท์พุท (v_o) เป็นลบ ซึ่งในโหมดนี้โหลดจะทําการจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ํากระแสตรง

หลักการทํางานของโหมดที่ 4 Powering mode

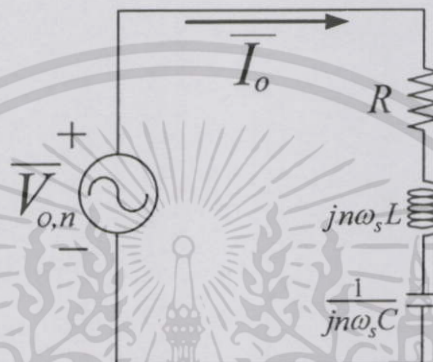


รูปที่ 3.6 คลื่นแรงดันและกระแสทางคํานเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ และคลื่นสัญญาณการทํางานของสวิตช์ใน โหมดการทํางานที่ 4

หลักการทํางานของโหมดที่ 4 ซึ่งจะเรียกคํอไปว่า Powering mode จากรูปที่ 3.6 ขณะที่สวิตช์มอสเฟส S_2 ทํางาน ในขณะที่สวิตช์มอสเฟส S_1 หยุดทํางาน ทิศทางกระแสไฟฟ้ําเอาท์พุท (i_o) จะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ํากระแสตรงผ่านสวิตช์มอสเฟส S_2 ไปยังชุดโหลดเรโซแนนท์ ในโหมดนี้ทิศทางกระแสไฟฟ้ําเอาท์พุท (i_o) จะมีคํ่าเป็นลบและจะได้แรงดันไฟฟ้ําเอาท์พุท (v_o) เป็นลบ ซึ่งในโหมดนี้แหล่งจ่ายไฟฟ้ํากระแสตรงจะทําการจ่ายพลังงานให้กับโหลด

3.3 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่

หัวข้อนี้จะกล่าวถึง การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม เช่น อิมพีแดนซ์(Z) มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสเอาต์พุต(θ) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ความถี่ใดๆ

จากรูปที่ 3.7 วงจรสมมูล RLC เรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะสามารถทำได้โดยควบคุมความถี่สวิตช์มอสเฟสให้มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ใดๆ ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมดังรูปที่ 3.7 สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 Z_n &= R + j(X_{L,n} - X_{C,n}) \\
 &= R + j\left(n\omega_s L - \frac{1}{n\omega_s C}\right) \\
 &= R + j\left(QR \frac{n\omega_s}{\omega_r} - QR \frac{\omega_r}{n\omega_s}\right) \\
 &= R \left[1 + jQ \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก characteristic impedance (Z_o) วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} Z_o &= \sqrt{\frac{L}{C}} \\ &= \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \end{aligned} \quad (3.2)$$

ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรได้ใหม่ดังสมการ

$$\begin{aligned} Z_n &= \left[R + jRQ \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right) \right] \\ &= Z_o \left[\frac{R}{Z_o} + j \frac{\omega_r RL}{RZ_o} \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right) \right] \\ &= Z_o \left[\frac{R}{Z_o} + j \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

โดยที่ขนาดของอิมพีแดนซ์นี้มีค่าเท่ากับ

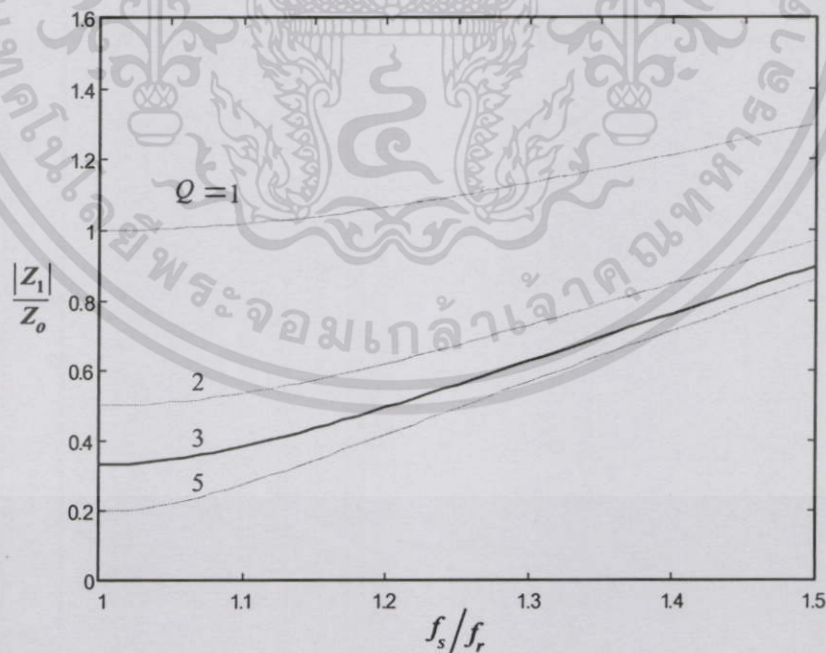
$$\begin{aligned} |Z_n| &= \sqrt{R^2 + \left(QR \frac{n\omega_s}{\omega_r} - QR \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right)^2} \\ &= R \sqrt{1^2 + Q^2 \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right)^2} = \sqrt{R^2 + R^2 Q^2 \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right)^2} \\ &= Z_o \sqrt{\left(\frac{R}{Z_o} \right)^2 + \frac{R^2 Q^2}{Z_o^2} \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right)^2} \\ &= Z_o \sqrt{\left(\frac{R}{Z_o} \right)^2 + \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right)^2} \\ &= Z_o \sqrt{\frac{1}{Q^2} + \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right)^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า normalized ของอิมพีแดนซ์นี้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \frac{|Z_n|}{Z_o} &= \sqrt{\frac{1}{Q} + \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s}\right)^2} \\ \frac{|Z_n|}{Z_o} &= \sqrt{\frac{1}{Q} + \left(\frac{2\pi n f_s}{2\pi f_r} - \frac{2\pi f_r}{2\pi n f_s}\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{Q} + \left(\frac{n f_s}{f_r} - \frac{f_r}{n f_s}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงกว่าความถี่เรโซแนนท์ ($f_s > f_r$) สามารถแสดงเส้นกราฟเป็นค่า normalized อิมพีแดนซ์ของส่วนประกอบมูลฐาน ในขณะที่ความถี่เปลี่ยนแปลงที่ค่า Q ต่าง ๆ จากสมการ (3.5) ได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจากกราฟดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่สวิตช์มากขึ้นส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Q สูงๆ การเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ค่า Q ต่ำๆ ซึ่งค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์กึ่งบริดจ์ที่ใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ค่า Q จะมีค่าประมาณ 3



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า normalized อิมพีแดนซ์ของส่วนประกอบมูลฐาน และค่าความถี่สวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมุมของอิมพีแดนซ์เท่ากับ

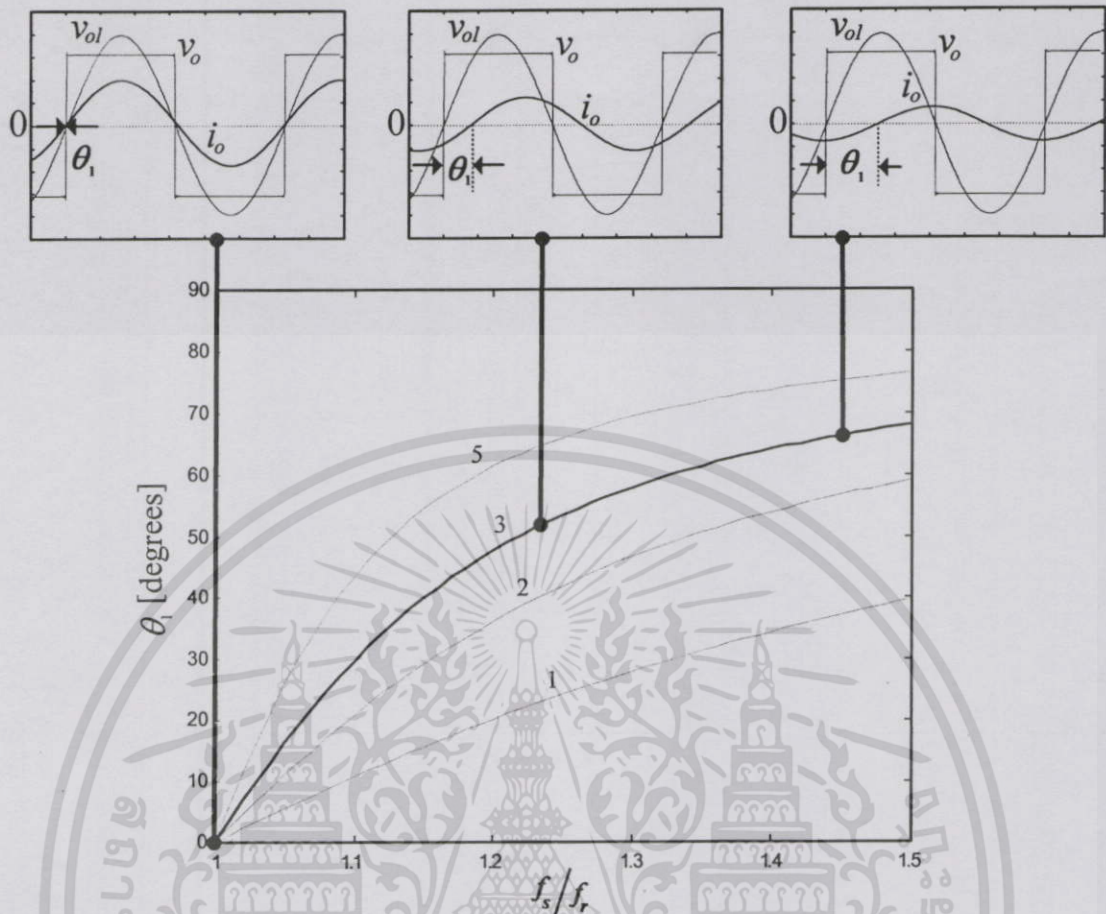
$$\begin{aligned}\theta_n &= \tan^{-1} \left[\frac{QR \frac{n\omega_s}{\omega_r} - QR \frac{\omega_r}{n\omega_s}}{R} \right] \\ &= \tan^{-1} \left[Q \left(\frac{n\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{n\omega_s} \right) \right] \\ &= \tan^{-1} \left[Q \left(\frac{2\pi n f_s}{2\pi f_r} - \frac{2\pi f_r}{2\pi n f_s} \right) \right] \\ &= \tan^{-1} \left[Q \left(\frac{n f_s}{f_r} - \frac{f_r}{n f_s} \right) \right]\end{aligned}\quad (3.6)$$

ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์จะหาได้ดังสมการ

$$R = |Z_1| \cos \theta_1 \quad (3.7)$$

$$X_1 = |Z_1| \sin \theta_1 \quad (3.8)$$

มุมอิมพีแดนซ์ซึ่งเท่ากับมุมต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบมูลฐาน (fundamental) ของแรงดันและกระแสในสมการ (3.6) เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างเฟสของแรงดันและกระแสกับค่าความถี่สวิตช์ จะได้เส้นกราฟดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่สวิตช์มากขึ้นมุมต่างเฟสของแรงดันและกระแสจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะในบริเวณความถี่สวิตช์ใกล้เรโซแนนท์ f_r และที่ค่า Q สูงๆ มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าขึ้น ซึ่งค่า Q ของวงจรเรโซแนนท์กึ่งบริดจ์ที่ใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ค่า Q จะมีค่าประมาณ 3

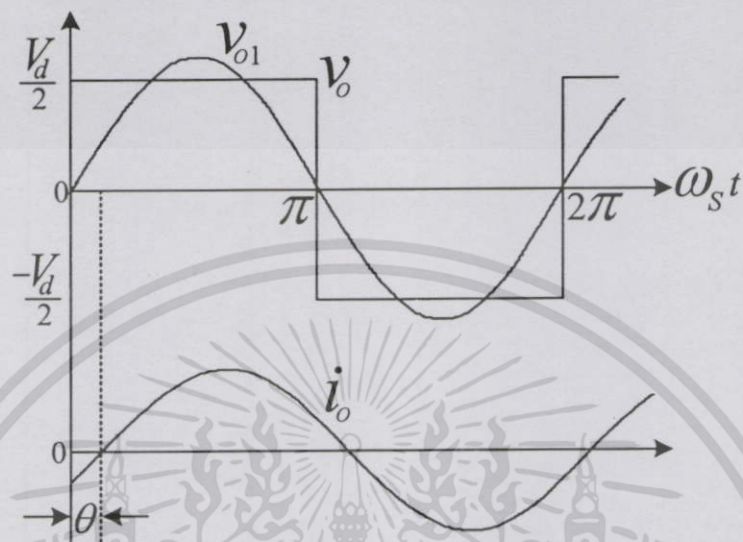


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมอิมพีแดนซ์และค่าความถี่สวิทช์

จากรูป 3.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับความถี่สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้มุมต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบมูลฐาน (fundamental) ของแรงดันและกระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้นและจะทำให้ peak ของคลื่นกระแสลดต่ำลง ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงตามไปด้วย

3.4 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่

3.4.1 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.10 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์

จากรูปที่ 3.10 จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ดังนี้

$$v_o = \begin{cases} \frac{V_d}{2} & 0 < \omega t < \pi \\ -\frac{V_d}{2} & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (3.9)$$

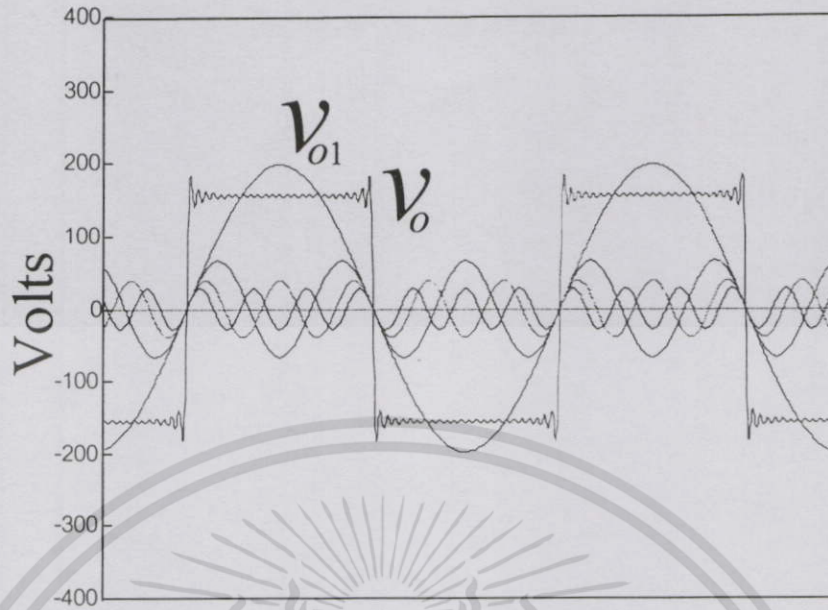
เมื่อนำมาทำการหาอนุกรมฟูเรียร์จะได้

$$v_o = \frac{V_d}{2} \times \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{n} \sin n\omega t$$

$$= \frac{V_d}{2} \times \frac{4}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t \dots \right] \quad (3.10)$$

เพื่อยืนยันว่าอนุกรมฟูเรียร์ในสมการ (3.10) ถูกต้องเมื่อนำองค์ประกอบความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ต่างๆมาบวกรวมจะได้คลื่นแรงดันเอาต์พุต ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ผลการรวมแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1, 3, 5, 7, 9, 11 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุต V_o

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุต V_o จะประกอบไปด้วยแรงดันฮาร์มอนิกส์รูปคลื่นไซน์ลำดับต่างๆรวมกันอยู่ ซึ่งค่าแรงดันมูลฐาน V_{o1} จะมีค่าสูงสุด

เมื่อได้สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมจะสามารถหาสมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตดังนี้

$$i_o = \frac{V_d}{2} \times \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{Z_n n} \sin n(\omega t - \theta_n) \quad (3.11)$$

$$= \frac{V_d}{2} \times \frac{4}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega t - \theta_1)}{Z_1} + \frac{\sin 3(\omega t - \theta_3)}{3Z_3} + \frac{\sin 5(\omega t - \theta_5)}{5Z_5} \dots \right] \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} Z_n &= \sqrt{R^2 + (X_{L,n} - X_{C,n})^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left(2\pi n f L - \frac{1}{2\pi n f C}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

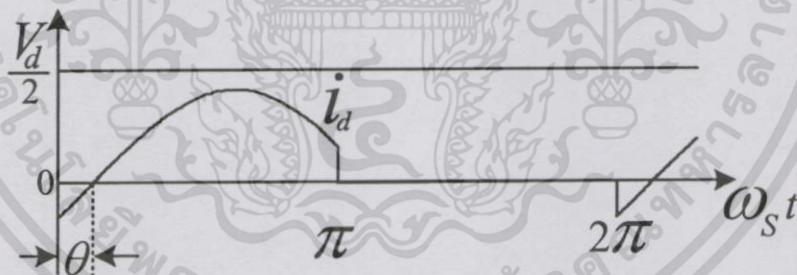
$$\begin{aligned}\theta_n &= \tan^{-1} \left[\frac{X_{L,n} - X_{C,n}}{R} \right] \\ &= \tan^{-1} \left[\frac{2\pi n f L - \frac{1}{2\pi n f C}}{R} \right]\end{aligned}\quad (3.14)$$

เมื่อได้สมการแรงดันและสมการกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์จะสามารถหาสมการกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท P_o ได้ดังนี้

$$P_o = \sum_{n=1}^{\infty} (V_{on} I_{on}) \cos \theta_n \quad (3.15)$$

$$= V_{o1} I_{o1} \cos \theta_1 + V_{o3} I_{o3} \cos \theta_3 + V_{o5} I_{o5} \cos \theta_5 \dots \quad (3.16)$$

3.4.2 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.12 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านอินพุทของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าอินพุทของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ก็จะได้มาจากการหาค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทดังสมการ

$$\begin{aligned}i_d &= \frac{1}{T} \int_0^{\pi} i_o dt \\ &= \frac{V_d}{2\pi^2 n^2 Z_n} [(1 - \cos n\pi)(\cos(-\theta_n) - \cos(n\pi - \theta_n))]\end{aligned}\quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้สมการกระแสไฟฟ้าอินพุทของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์จะสามารถหาสมการกำลังไฟฟ้าอินพุท P_d ได้ดังนี้

$$P_d = 2 \left[\frac{V_d}{2} i_d \right]$$

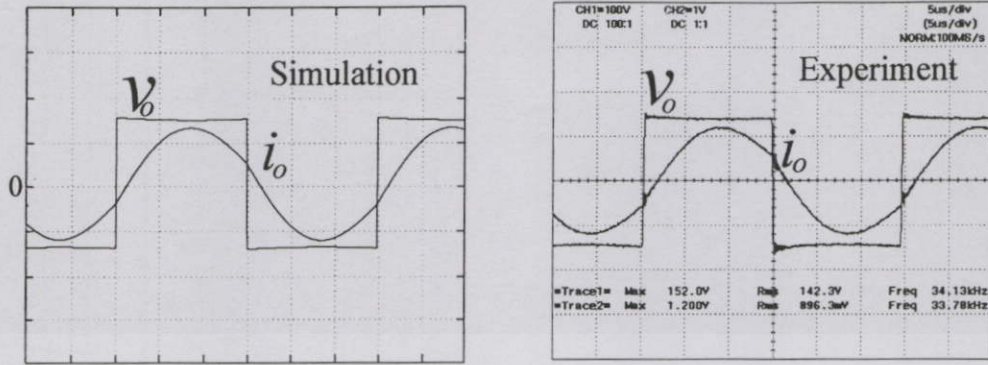
$$= \frac{V_d^2}{2\pi^2 n^2 Z_n} \left[(1 - \cos n\pi) (\cos(-\theta_n) - \cos(n\pi - \theta_n)) \right] \quad (3.18)$$

เมื่อได้สมการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุท P_o และสมการกำลังไฟฟ้าอินพุท P_d ของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์จะสามารถหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

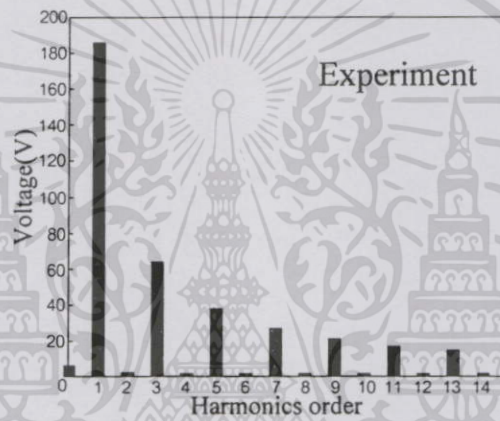
$$\eta = \frac{P_o}{P_d} \quad (3.19)$$

3.5 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยวิธีการปรับความถี่

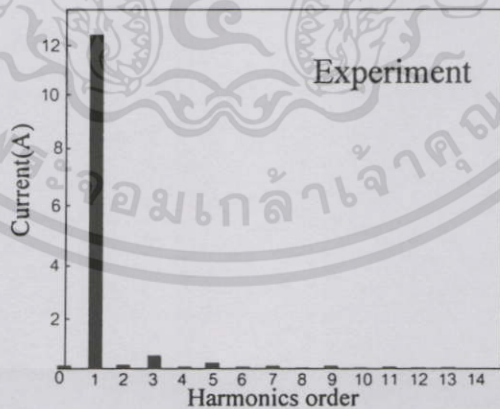
ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเห็นขนำความถี่สูง สามารถทำได้โดยการปรับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ นั่นคือ เมื่อความถี่สวิตช์มีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่ามากขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุทมีค่าลดลง กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทก็จะมีค่าลดลงตามค่าความถี่สวิตช์ที่สูงขึ้น และเพื่อให้เห็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีการปรับความถี่เพื่อปรับลดกำลังไฟฟ้าจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13-3.15 โดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุทอินเวอร์เตอร์ สเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์ในขณะที่มีการปรับความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 34, 40 และ 44 kHz ตามลำดับ



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลอง



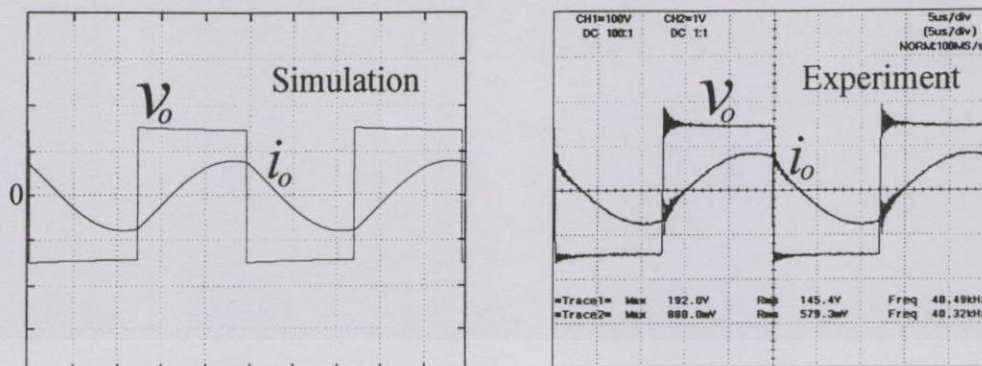
b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง



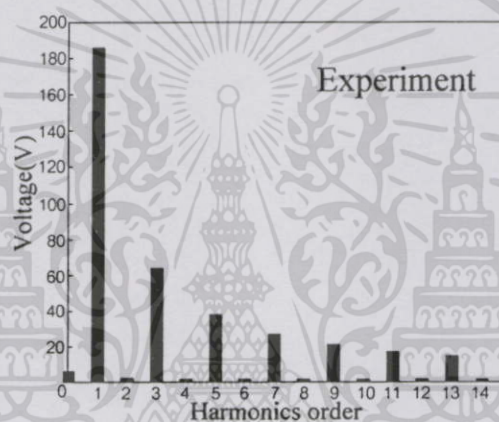
c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 3.13 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง
เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิทช์ 34 kHz

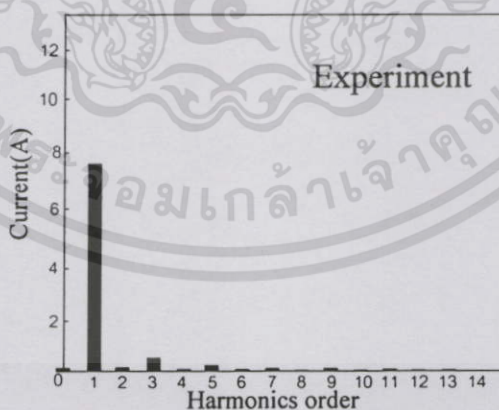
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

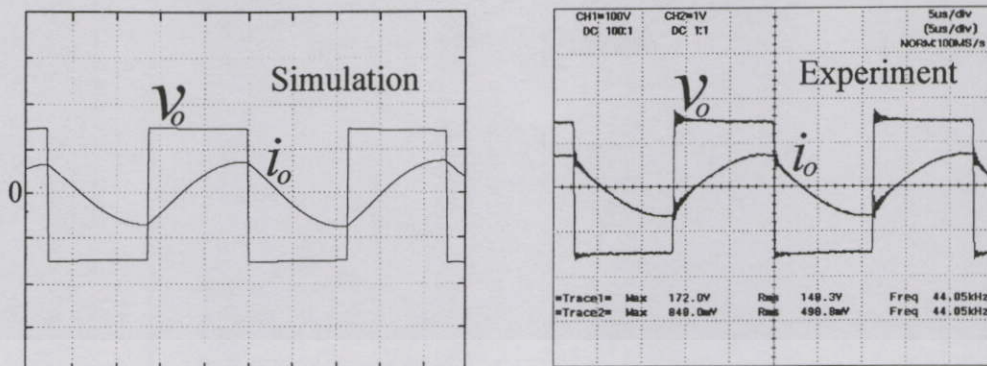


c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

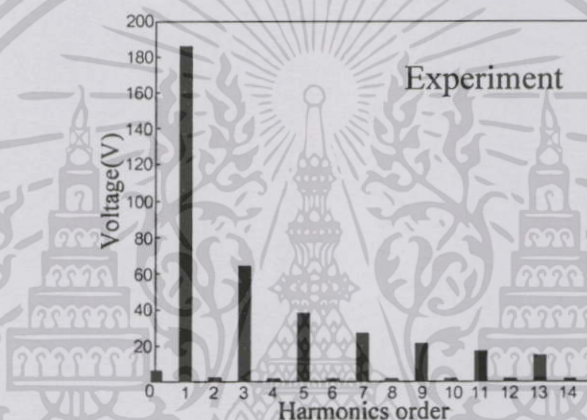
รูปที่ 3.14 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 40 kHz

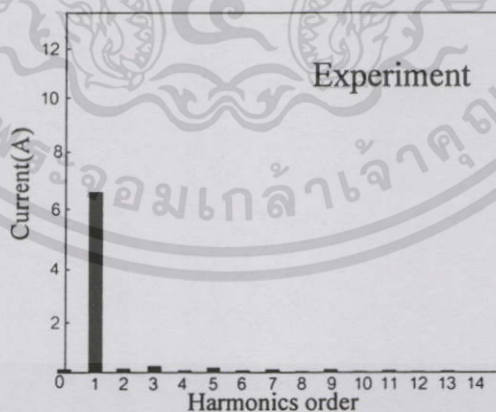
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลอง



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 3.15 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง
เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 44 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13-3.15 แสดงลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลอง และเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณและเขียนสรุปค่าแรงดันเอาต์พุต V_o (RMS.) กระแสเอาต์พุต I_o (RMS.) และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o เมื่อมีการปรับค่าความถี่ต่างๆกัน สามารถแสดงได้ดังในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดันเอาต์พุต V_o (RMS.) กระแสเอาต์พุต I_o (RMS.) และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สวิตช์ 34 kHz 40 kHz และ 44 kHz

ความถี่: f_s (kHz)	แรงดันเอาต์พุต V_o (RMS.) (Volts)	กระแสเอาต์พุต I_o (RMS.) (Amps)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o (Watts)
34	142	8.65	1040
40	143	5.81	538
44	142	4.7	410

จากตาราง 3.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการปรับค่าความถี่สวิตช์ให้มีค่าสูงกว่าค่าความถี่เรโซแนนท์มากขึ้น กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าลดลงตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงตาม นั่นคือเมื่อค่าความถี่สวิตช์มีค่ายิ่งสูงขึ้นเท่าใด กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ก็จะยิ่งมีค่าลดลงตาม

3.6 สรุป

- 1) ได้นำเสนอวิธีการ การทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง
- 2) ได้นำเสนอวิธีการ การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่จะเป็นการควบคุมค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงซึ่งจะส่งผลให้กระแสเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย
- 3) ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาสมการแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตและสมการแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์
- 4) ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาสมการกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์
- 5) จากการทดลองเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ สามารถใช้งานได้จริงโดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดได้ 1040 วัตต์ ที่ความถี่ $f_s = 34\text{kHz}$ โดยใช้เวลาในการหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตร ให้เดือดได้ภายใน 2 นาที 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

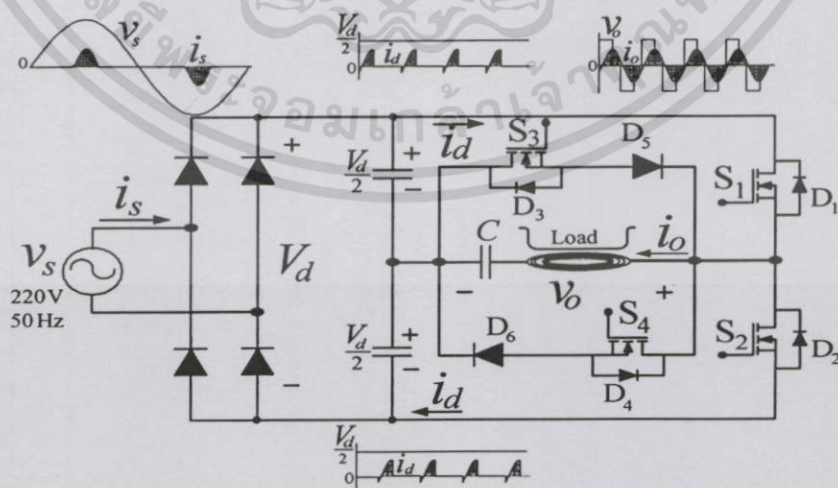
บทที่ 4

การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์ กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง รายละเอียดจะประกอบด้วยการวิเคราะห์โหมดการทำงานของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน พร้อมกับการวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุต V_o และกระแสเอาต์พุต i_o ของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ ที่ค่าต่างๆ ซึ่งสมการแรงดันและกระแสเอาต์พุตสามารถคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o และกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ ที่ค่าต่างๆ ซึ่งในการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนจะต้องพิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานที่สถานะ Zero Voltage Switching ZVS เพื่อลดการสูญเสียขณะเกิดการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

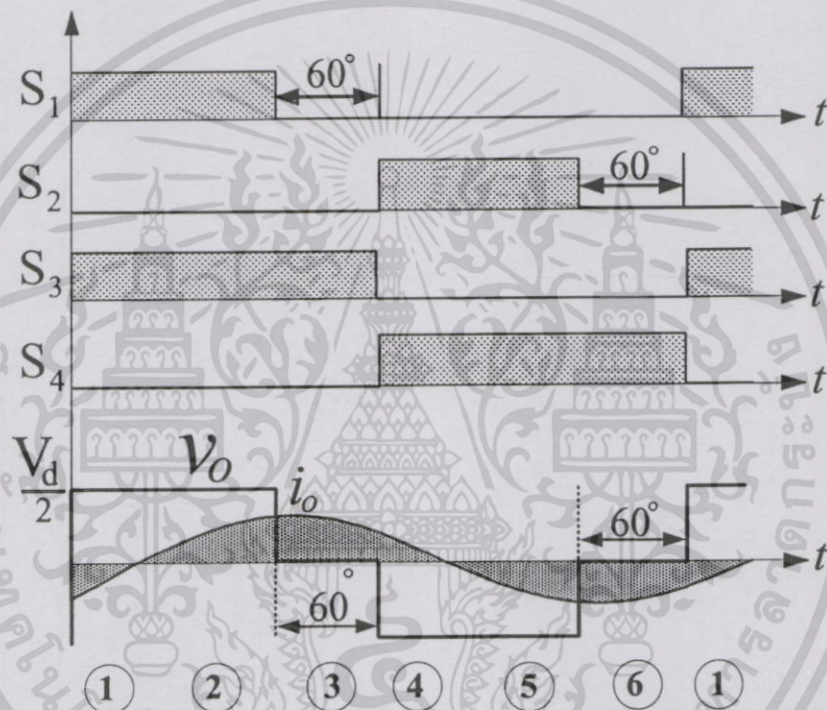
4.2 การวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน



รูปที่ 4.1 วงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

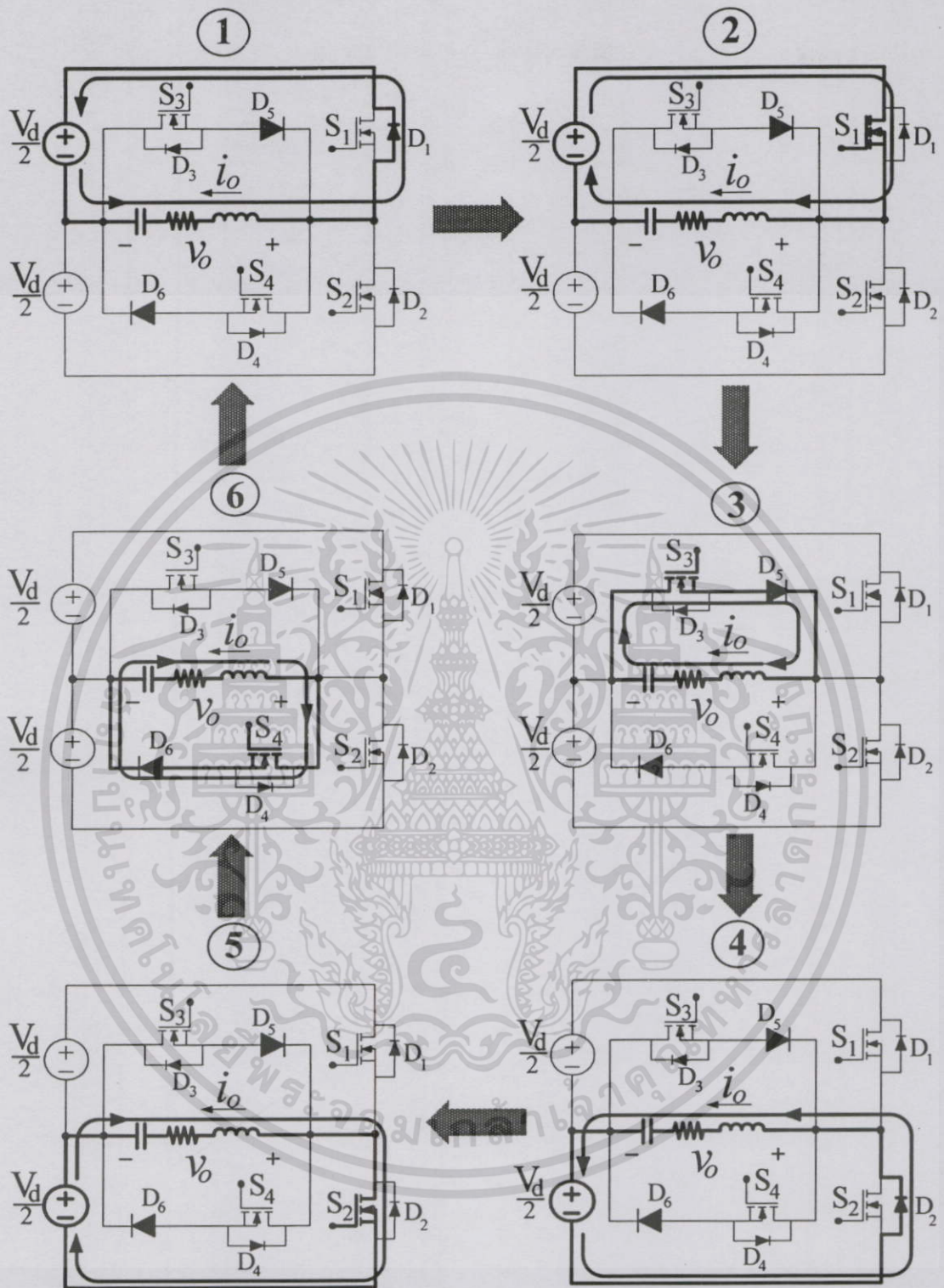
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แรงดันทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 220V 50Hz ป้อนให้กับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้ชุดอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงโดยมีมอสเฟต S_1, S_2, S_3, S_4 จะทำหน้าที่เป็นสวิทช์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะถูกป้อนให้กับชุดโพลครโซแนนท์ซึ่งประกอบด้วยเรโซแนนท์คาปาซิเตอร์ ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำของเตาหุงต้มสามารถแทนด้วยอินดักแตนซ์ (L) และความต้านทาน (R) ซึ่งรูปแบบสัญญาณควบคุมมอสเฟต S_1, S_2, S_3, S_4 ของอินเวอร์เตอร์ที่มุมเลื่อน $\phi = 60^\circ$ จะมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตและรูปแบบสัญญาณควบคุมมอสเฟต S_1, S_2, S_3, S_4 ที่มุมเลื่อน $\phi = 60^\circ$

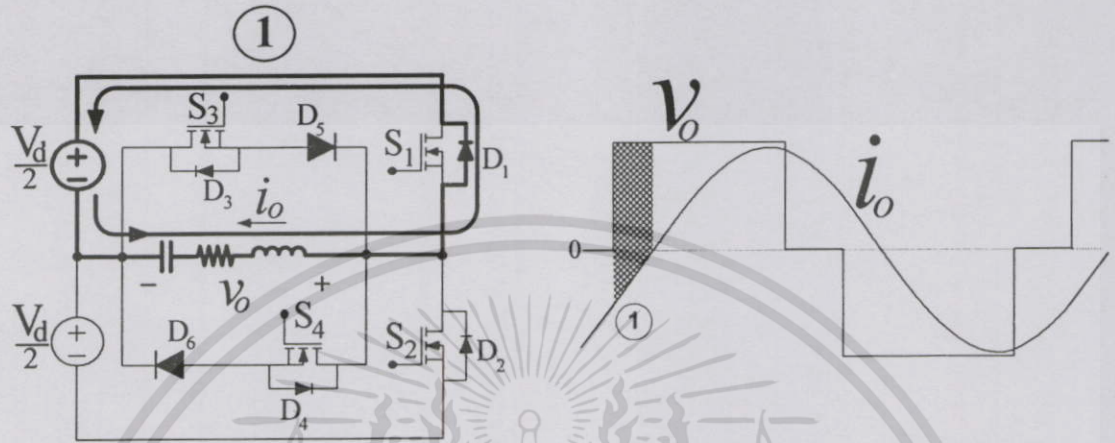
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ V_o จะทำได้โดยการตัดสัญญาณควบคุมมอสเฟต S_1, S_2 เป็นมุมเลื่อน ϕ ซึ่งการตัดสัญญาณควบคุมมอสเฟต S_1, S_2 จะทำให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นหรือลดลง และจะทำให้กำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.3 โหมดการทำงานของวงจรเรโฆเนนที่อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการ
ตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

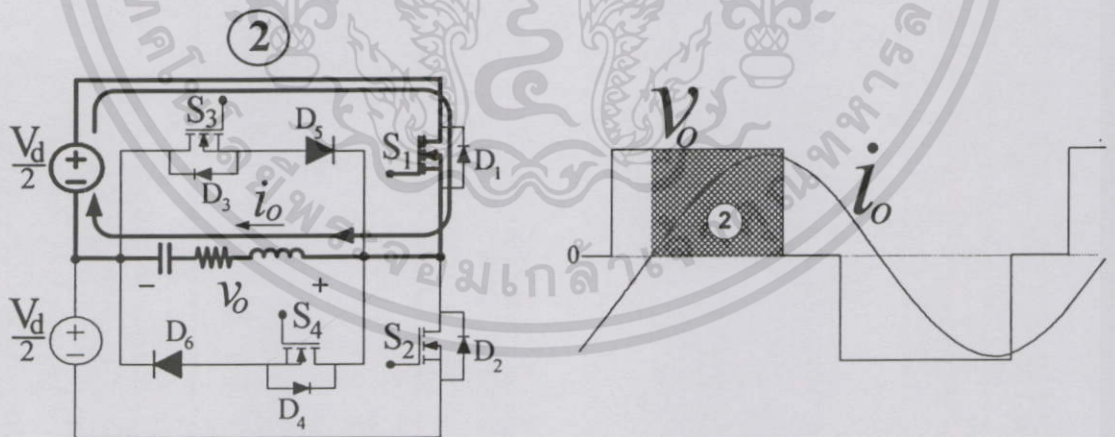
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน ในรูปที่ 4.1 สามารถแบ่งการทำงานที่มุมเดือน $\phi = 60^\circ$ ออกเป็น 6 โหมดคือ ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งรายละเอียดการทำงานจะมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ในโหมดการทำงานที่ 1

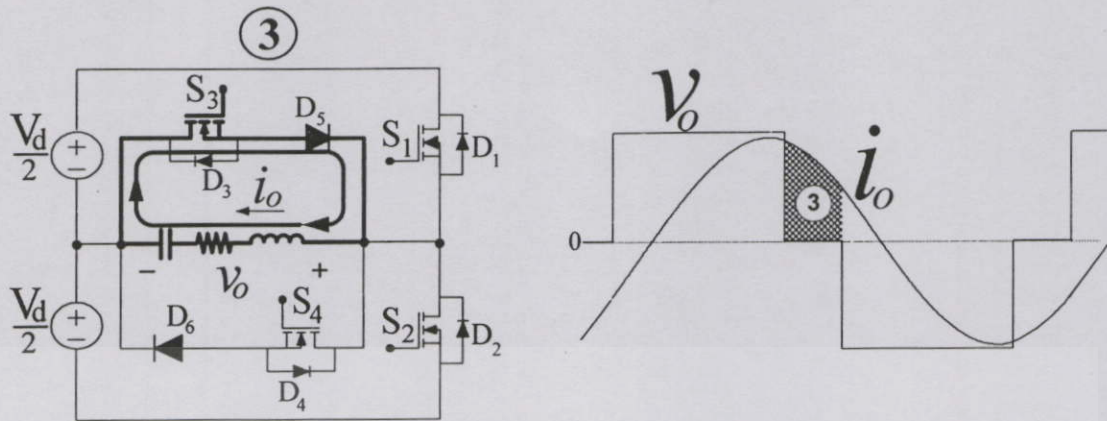
โหมดที่ ① คือ โหมด Regenerating เป็น โหมดที่โหลดจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทางไดโอด D_3 คืนให้กับแหล่งจ่าย ซึ่งแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นบวกแต่กระแสเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ในโหมดการทำงานที่ 2

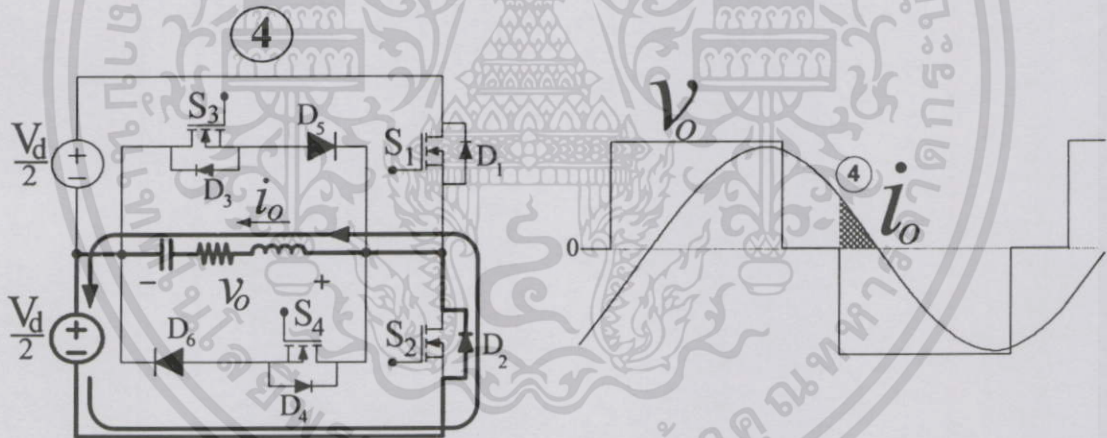
โหมดที่ ② คือ โหมด Powering เป็น โหมดที่มอสเฟต S_1 ทำงาน กระแสเอาต์พุตจะไหลผ่านมอสเฟต S_1 ไปที่โหลด โหลดเรโซแนนท์ ส่วนมอสเฟต S_2 จะไม่นำกระแส ซึ่งค่ากระแสและแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกกำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้โหลด ดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



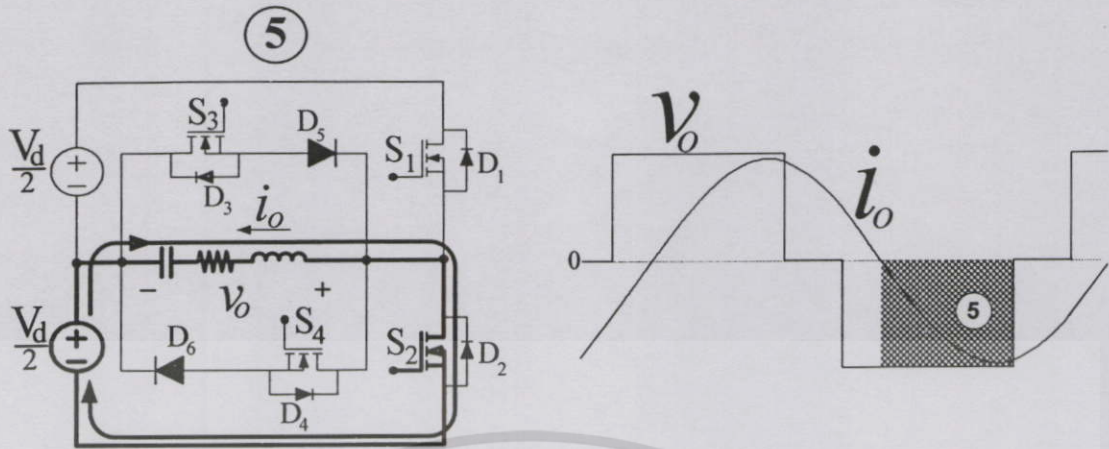
รูปที่ 4.6 วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
ในโหมดการทำงานที่ 3

โหมดที่ ③ คือ โหมด Freewheeling เป็น โหมดที่มอสเฟต S_3 ทำงานเพียงตัวเดียว ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านมอสเฟต S_3 กลับมายังขั้วโหลดกระแสตรง ซึ่งค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์และกระแสเอาต์พุตจะมีค่าเป็นบวก ดังรูปที่ 4.6



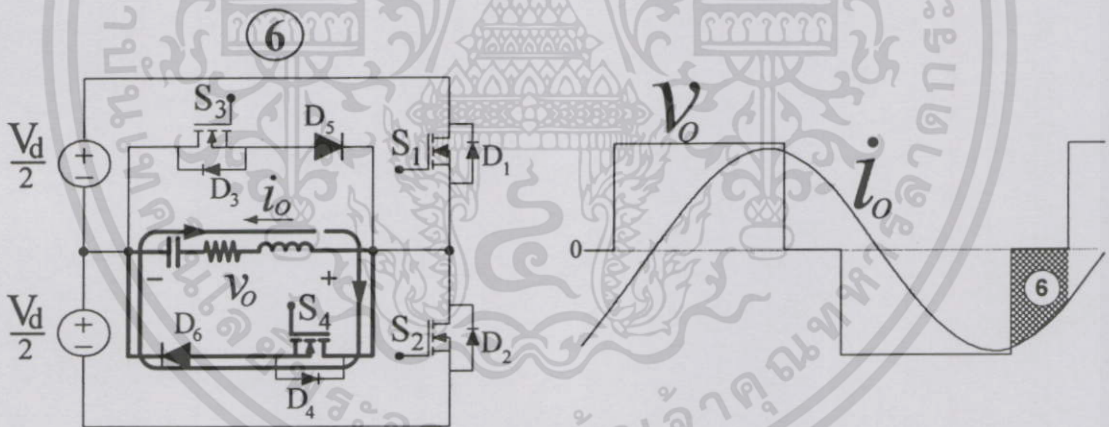
รูปที่ 4.7 วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
ในโหมดการทำงานที่ 4

โหมดที่ ④ คือ โหมด Regenerating เป็น โหมดที่โหลดจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจะไหลสวนทางกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงผ่านทางไดโอด D_1 คืนให้กับแหล่งจ่าย ซึ่งแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบแต่กระแสเอาต์พุตจะมีค่าเป็นบวก ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
ในโหมดการทำงานที่ 5

โหมดที่ ⑤ คือ โหมด Powering เป็นโหมดที่มอสเฟต S_1 ทำงาน กระแสเอาต์พุตจะไหลผ่านมอสเฟต S_1 ไปที่ขั้วโหลดเรโซแนนท์ ส่วนมอสเฟต S_2 จะไม่นำกระแส ซึ่งค่ากระแสและแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกกำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้โหลด ดังรูปที่ 4.8

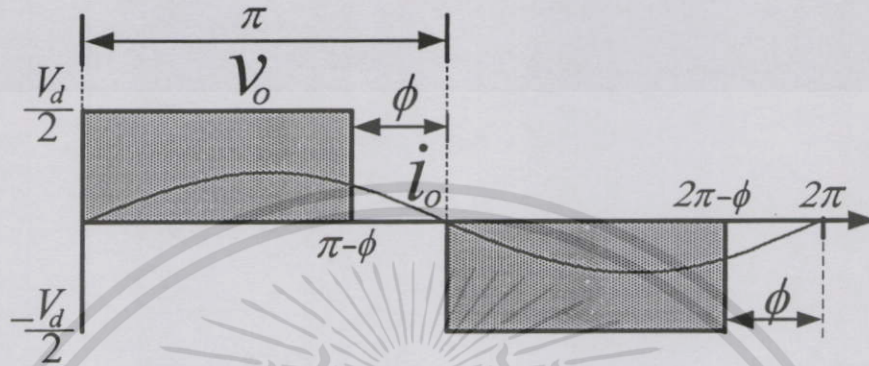


รูปที่ 4.9 วงจรโหมดการทำงานและคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์
ในโหมดการทำงานที่ 6

โหมดที่ ⑥ คือ โหมด Freewheeling เป็นโหมดที่มอสเฟต S_2 ทำงานเพียงตัวเดียว ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านมอสเฟต S_2 กลับมายังขั้วโหลดเรโซแนนท์ ซึ่งค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์และกระแสเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 4.9

4.3 การวิเคราะห์แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ของวงจรเรโซแนนท์ อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน

4.3.1 การวิเคราะห์แรงดันทางด้านเอาต์พุต V_o



รูปที่ 4.10 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.10 คลื่นแรงดันเอาต์พุตเมื่อนำมาทำการหาอนุกรมฟูเรียร์จะได้สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ดังนี้

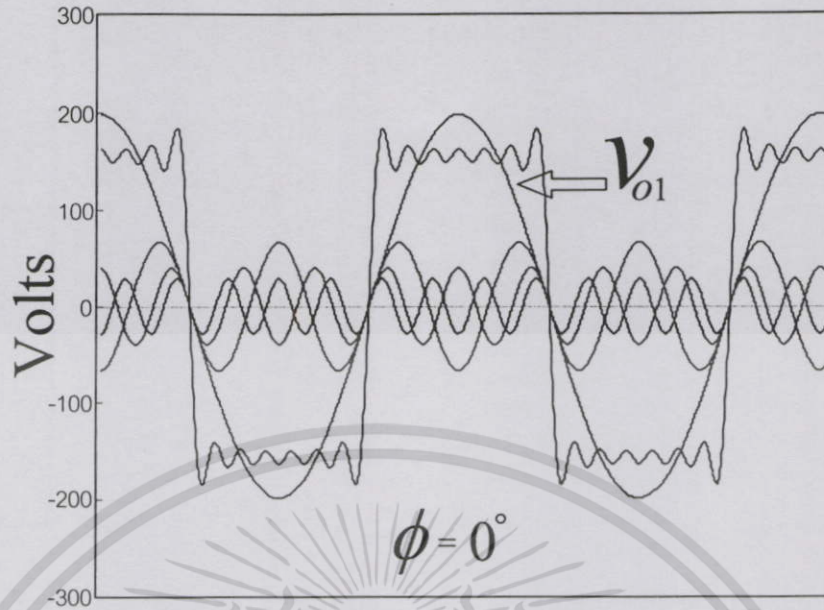
$$V_{o,n} = \frac{V_d}{2n\pi} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left[(\sin n(\pi - \phi) - \sin n(2\pi - \phi)) \cos(n\omega_s t) + (1 - \cos n(\pi - \phi)) + \cos n(2\pi - \phi) - \cos n\pi \right] \sin(n\omega_s t) \right] \quad (4.1)$$

เมื่อแทนค่า $n=1,2,3,\dots$ จะได้ดังสมการ

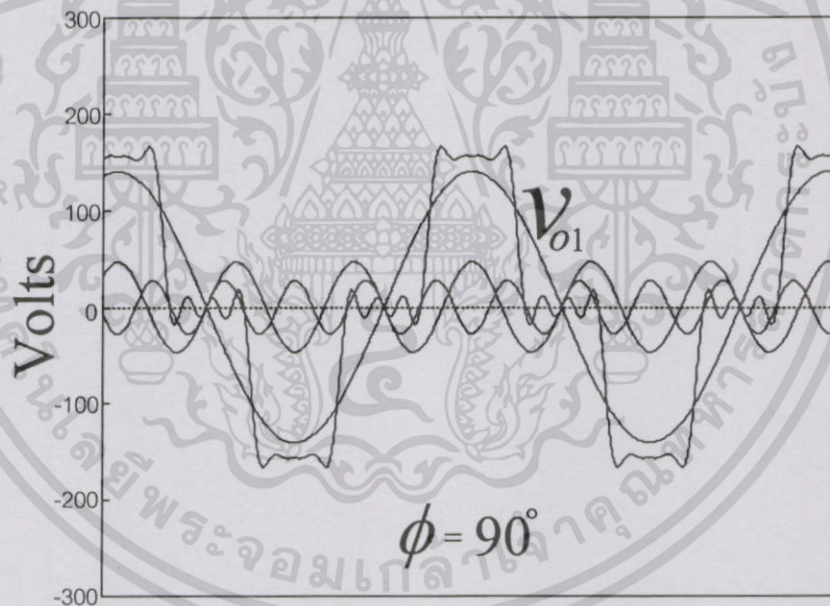
$$\begin{aligned} V_{o,n} = & \frac{V_d}{2\pi} \left[(\sin(\pi - \phi) - \sin(2\pi - \phi)) \cos(\omega_s t) + (1 - \cos(\pi - \phi)) \right. \\ & \left. + \cos(2\pi - \phi) - \cos \pi \right] \sin(\omega_s t) \\ & + \frac{V_d}{2 \times 2\pi} \left[(\sin 2(\pi - \phi) - \sin 2(2\pi - \phi)) \cos(2\omega_s t) + (1 - \cos 2(\pi - \phi)) \right. \\ & \left. + \cos 2(2\pi - \phi) - \cos 2\pi \right] \sin(2\omega_s t) \\ & + \frac{V_d}{2 \times 3\pi} \left[(\sin 3(\pi - \phi) - \sin 3(2\pi - \phi)) \cos(3\omega_s t) + (1 - \cos 3(\pi - \phi)) \right. \\ & \left. + \cos 3(2\pi - \phi) - \cos 3\pi \right] \sin(3\omega_s t) \\ & + \dots \end{aligned} \quad (4.2)$$

เพื่อยืนยันว่าอนุกรมฟูเรียร์ในสมการ 4.2 ถูกต้องเมื่อนำองค์ประกอบความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกส์ต่างๆมาบวกรวมจะได้คลื่นแรงดันเอาต์พุต ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ผลการรวมแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1,3,5,7,9,11 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตมุมเฉือน $\phi = 0^\circ$



(b) ผลการรวมแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1,3,5,7,9,11 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตมุมเฉือน $\phi = 90^\circ$

รูปที่ 4.11 ผลการรวมแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1,3,5,7,9,11 เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มุมเฉือน $\phi = 0^\circ, 90^\circ$

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อเราเพิ่มค่ามุมเฉือน $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ จาก 0° เป็น 90° จะทำให้ค่าแรงดันมูลฐาน V_{o1} มีค่าลดลงตามไปด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ก็จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่ามุมเฉือน ϕ จาก 0° เป็น 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การวิเคราะห์กระแสทางด้านเอาต์พุต i_o

เมื่อได้สมการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนจะสามารถหาสมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตดังนี้

$$\begin{aligned}
 i_o = & \frac{V_d}{2\pi Z_1} \left[(\sin(\pi - \phi) - \sin(2\pi - \phi)) \cos(\omega_s t - \theta_1) + (1 - \cos(\pi - \phi)) \right. \\
 & \left. + \cos(2\pi - \phi) - \cos \pi \right] \sin(\omega_s t - \theta_1) \\
 & + \frac{V_d}{2 \times 2\pi Z_2} \left[(\sin 2(\pi - \phi) - \sin 2(2\pi - \phi)) \cos(2\omega_s t - \theta_2) + (1 - \cos 2(\pi - \phi)) \right. \\
 & \left. + \cos 2(2\pi - \phi) - \cos 2\pi \right] \sin(2\omega_s t - \theta_2) \\
 & + \frac{V_d}{2 \times 3\pi Z_3} \left[(\sin 3(\pi - \phi) - \sin 3(2\pi - \phi)) \cos(3\omega_s t - \theta_3) + (1 - \cos 3(\pi - \phi)) \right. \\
 & \left. + \cos 3(2\pi - \phi) - \cos 3\pi \right] \sin(3\omega_s t - \theta_3) \\
 & + \dots
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (X_{L,n} - X_{C,n})^2} = \sqrt{R^2 + \left(2\pi n f L - \frac{1}{2\pi n f C}\right)^2} \quad (4.4)$$

และ

$$\theta_n = \tan^{-1} \left[\frac{X_{L,n} - X_{C,n}}{R} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{2\pi n f L - \frac{1}{2\pi n f C}}{R} \right] \quad (4.5)$$

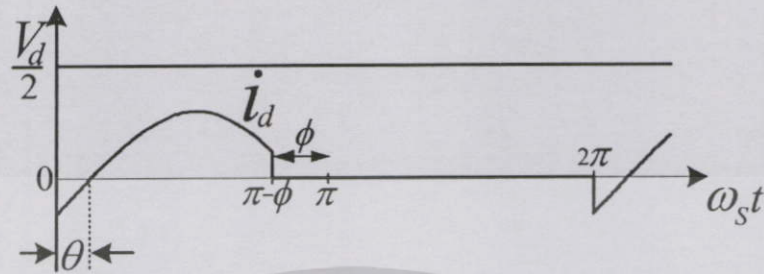
เมื่อได้สมการแรงดันและสมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์จะสามารถหาสมการกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o ได้ดังนี้

$$P_o = \sum_{n=1}^{\infty} (V_{0n} I_{0n}) \cos \theta_n \quad (4.6)$$

$$= V_{01} I_{01} \cos \theta_1 + V_{03} I_{03} \cos \theta_3 + V_{05} I_{05} \cos \theta_5 \dots \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าอินพุทของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควมคุม กำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน



รูปที่ 4.12 คลื่นแรงดันและกระแสทางดำนอินพุทของอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าอินพุทของอินเวอร์เตอร์ก็จะได้มาจากการหาค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทคั้งสมการ

$$i_d = \frac{1}{T} \int_0^{\pi-\phi} i_o dt$$

$$= \frac{V_d}{4\pi^2 n^2 Z_n} \left[\begin{aligned} & \left\{ \sin n(\pi - \phi) - \sin n(2\pi - \phi) \right\} \left\{ \sin(n\pi - n\phi - \theta_n) - \sin(-\theta_n) \right\} + \\ & \left\{ 1 - \cos n(\pi - \phi) + \cos n(2\pi - \phi) - \cos n\pi \right\} \times \\ & \left\{ -\cos(n\pi - n\phi - \theta_n) + \cos(-\theta_n) \right\} \end{aligned} \right] \quad (4.8)$$

เมื่อได้สมการกระแสไฟฟ้าทางดำนอินพุทของวงจรอินเวอร์เตอร์จะสามารถหาสมการกำลังไฟฟ้าอินพุท P_d ได้ดังนี้

$$P_d = 2 \left[\frac{V_d}{2} i_d \right]$$

$$= \frac{V_d^2}{4\pi^2 n^2 Z_n} \left[\begin{aligned} & \left\{ \sin n(\pi - \phi) - \sin n(2\pi - \phi) \right\} \left\{ \sin(n\pi - n\phi - \theta_n) - \sin(-\theta_n) \right\} + \\ & \left\{ 1 - \cos n(\pi - \phi) + \cos n(2\pi - \phi) - \cos n\pi \right\} \times \\ & \left\{ -\cos(n\pi - n\phi - \theta_n) + \cos(-\theta_n) \right\} \end{aligned} \right] \quad (4.9)$$

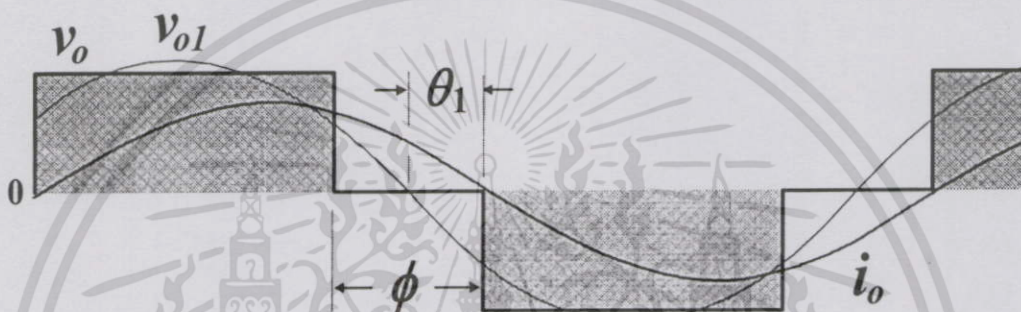
เมื่อได้สมการกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท P_o และสมการกำลังไฟฟ้าอินพุท P_d ของวงจรอินเวอร์เตอร์จะสามารถหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_o}{P_d} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเลื่อน ϕ

การควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตในสมการ 4.1 สามารถทำได้โดยการปรับค่ามุม ϕ แต่สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์จะต้องทำงานภายใต้สภาวะ Zero Voltage Switching ZVS ซึ่งกระแสเอาต์พุต i_o จะต้องล้าหลังขอบหน้าแรงดันเอาต์พุต v_o ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของอินเวอร์เตอร์จากเดิมเล็กน้อย ความถี่ซึ่งทำให้เกิด ZVS นี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมเลื่อน ϕ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุต v_o, i_o ที่ความถี่สวิทช์ในสภาวะแรงดันศูนย์ ZVS

จากรูปที่ 4.13 จะได้มุมต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบมูลฐานของแรงดัน v_o และเอาต์พุต i_o ซึ่งเท่ากับมุมอิมพีแดนซ์ดังสมการ

$$\theta_1 = \frac{\phi}{2} = \arctan \left(\frac{\omega_s L - \frac{1}{\omega_s C}}{R} \right)$$

$$\frac{\phi}{2} = \arctan \left(\frac{2\pi f_s L - \frac{1}{2\pi f_s C}}{R} \right) \quad (4.10)$$

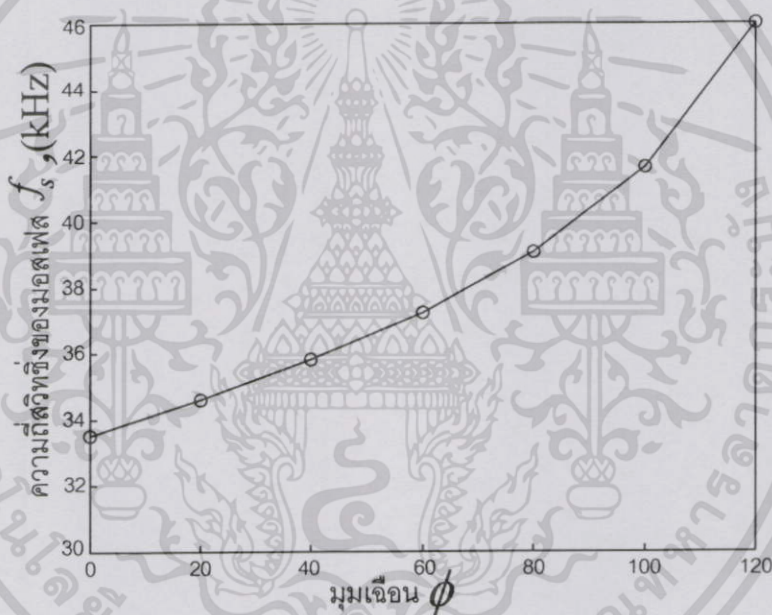
จากสมการที่ 4.10 จะสามารถนำมาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่สวิทช์ของมอสเฟต f_s กับค่ามุมเลื่อน ϕ ซึ่งจะทำให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ Zero Voltage Switching ZVS ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{RC \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) + \sqrt{4LC + R^2C^2 \tan^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}}{2LC} \right) \quad (4.11)$$

$$\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) = 0 \quad \text{เมื่อ } \phi = 0$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$$

สมการ 4.11 แสดงความสัมพันธ์โดยตรงของความถี่สวิตช์ในสภาวะแรงดันศูนย์ ZVS และมุมเฟส ϕ และสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยเส้นกราฟได้ดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่ามุมเฟส ϕ จะต้องเพิ่มค่าความถี่ตามเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่สภาวะ ZVS

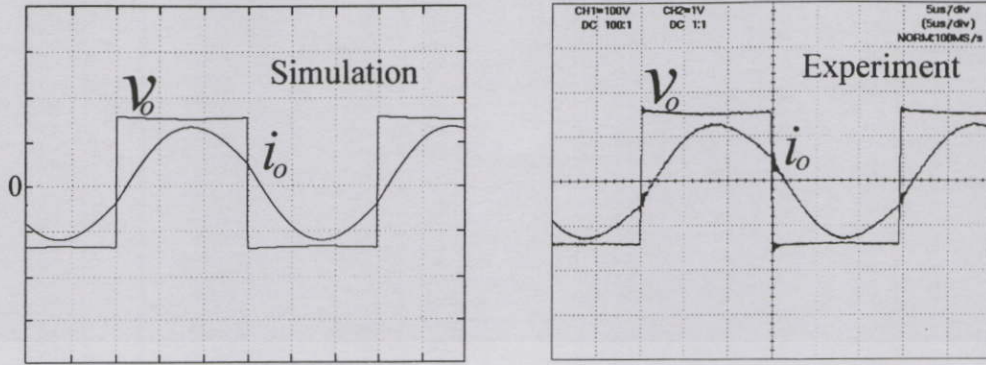


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ f_s และค่ามุมเฟส ϕ ภายใต้สภาวะ ZVS

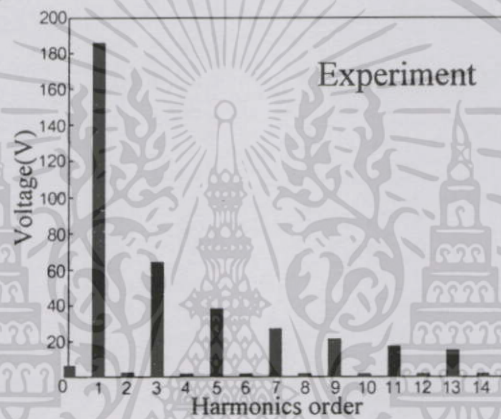
4.6 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน

ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟส ϕ ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟส ϕ และเพื่อให้เห็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟส ϕ เพื่อปรับลดกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตก็สามารถแสดงรายละเอียดที่มุมเฟส $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ และ 120° ได้ดังรูปที่ 4.15-4.19

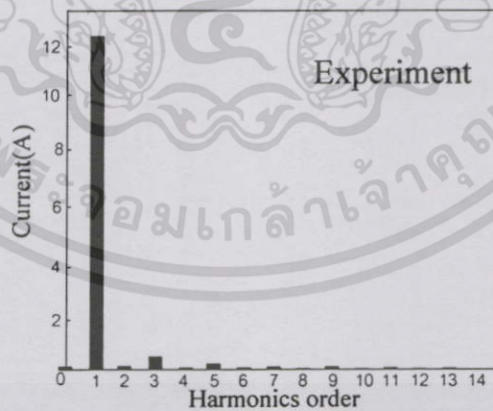
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลองที่มุมเฟส $\phi = 0^\circ$



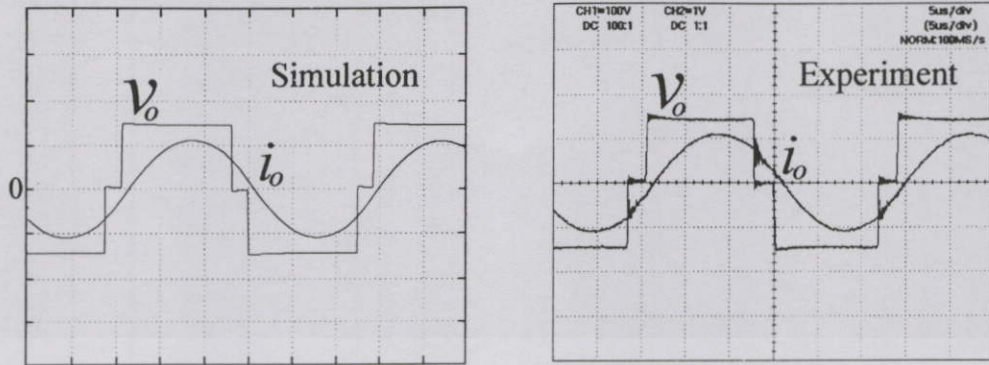
b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง



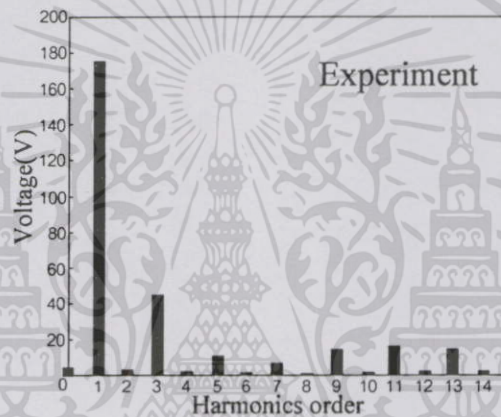
c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.15 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง
เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฟส $\phi = 0^\circ$

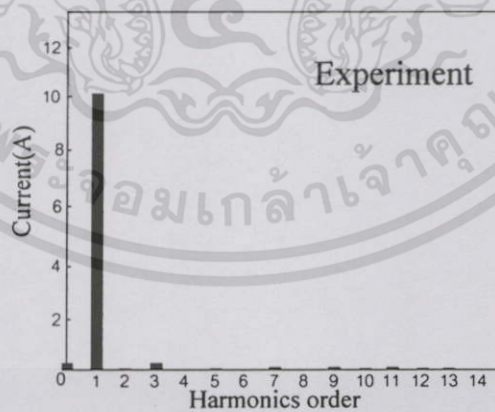
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลองที่มุมเฉือน $\phi = 30^\circ$



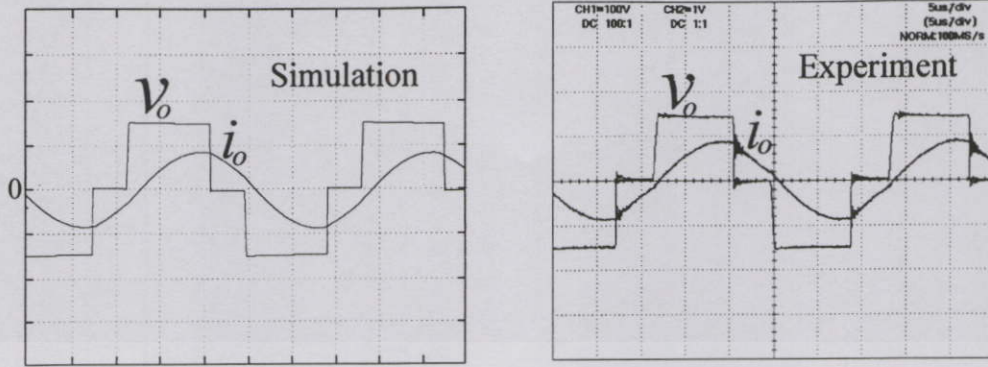
- b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง



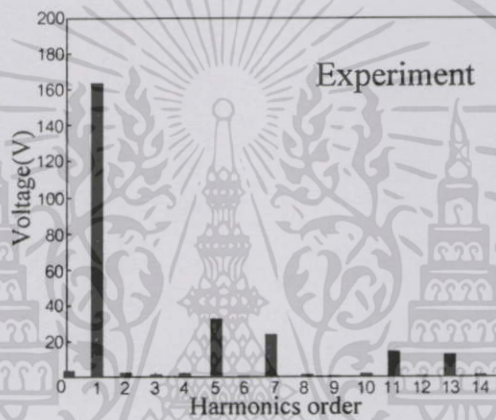
- c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.16 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง
เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฉือน $\phi = 30^\circ$

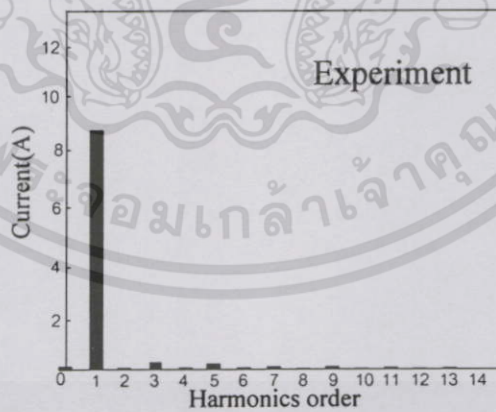
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลองที่มุมเฉือน $\phi = 60^\circ$



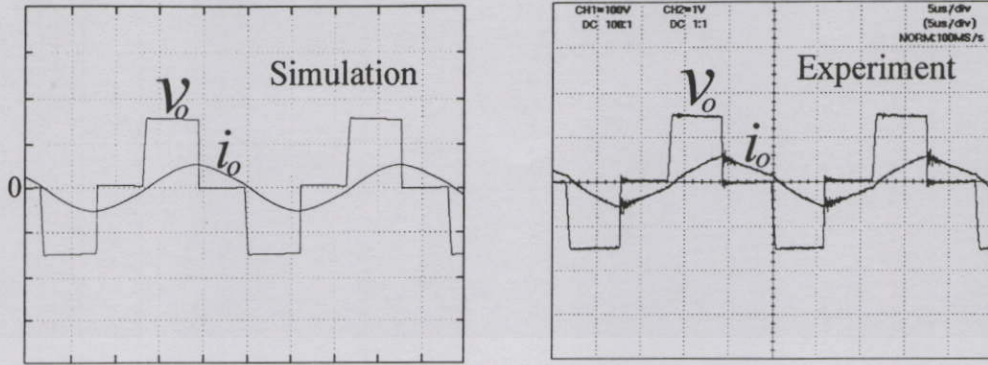
b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง



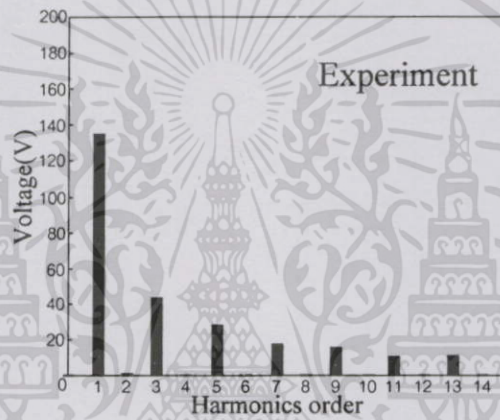
c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.17 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฉือน $\phi = 60^\circ$

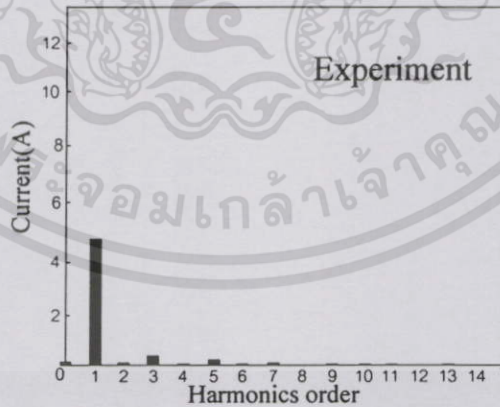
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลองมุมเลื่อน $\phi = 90^\circ$



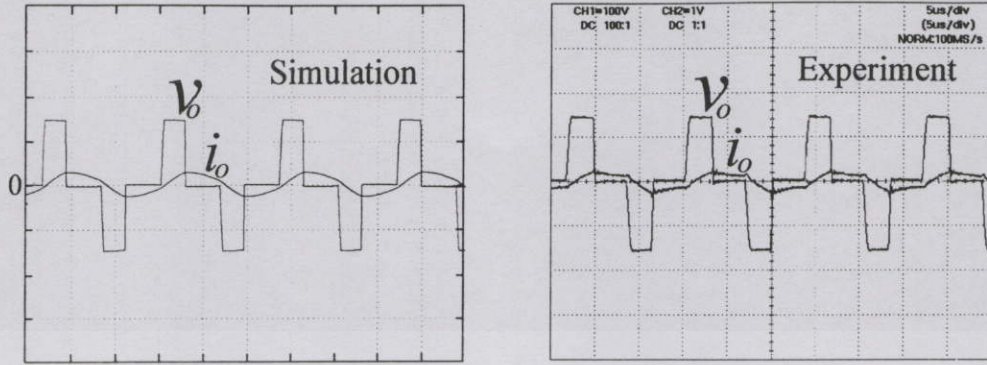
b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง



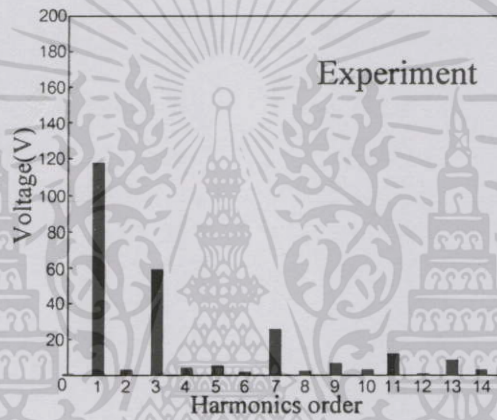
c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.18 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางค่านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเลื่อน $\phi = 90^\circ$

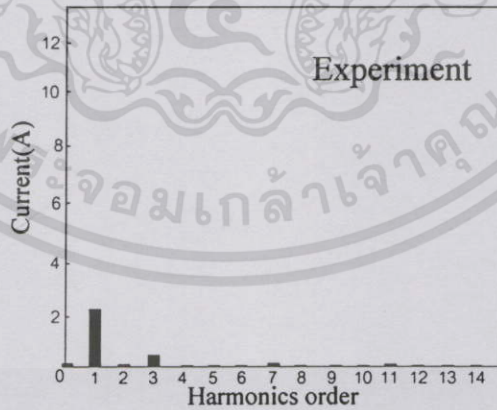
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่ได้จากจำลองและการทดลองมุมเฟส $\phi = 120^\circ$



b) ลักษณะสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง



c) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.19 ลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางค่านเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่มุมเฟส $\phi = 120^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15-4.19 แสดงลักษณะคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการทดลอง และเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณและเขียนสรุปค่าแรงดันเอาต์พุต V_o (RMS.) กระแสเอาต์พุต I_o (RMS.) และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ สามารถแสดงได้ดังในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันเอาต์พุต V_o (RMS.) กระแสเอาต์พุต I_o (RMS.) และค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุม $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ และ 120°

มุม ϕ	ความถี่: f_s (kHz)	แรงดันเอาต์พุต V_o (RMS.) (Volts)	กระแสเอาต์พุต I_o (RMS.) (Amps)	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o (Watts)
0°	34	142	8.65	1040
30°	35.09	128	7.6	838
60°	37.31	119	6.02	552
90°	43.10	103	3.4	209
120°	58	94	1.60	55

จากตาราง 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ ให้มีค่าสูงมากขึ้น แรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าลดลงตามการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ ซึ่งจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงตาม นั่นคือเมื่อค่ามุมเฉือน ϕ มีค่ามากขึ้นเท่าใดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ก็จะยิ่งมีค่าลดลงตาม ในส่วนของค่าความถี่สวิตช์ของมอสเฟส f_s จากตาราง 4.1 จะเห็นได้ว่าที่ค่ามุมเฉือน ϕ มีค่าเพิ่มขึ้นค่าความถี่สวิตช์ของมอสเฟส f_s จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ Zero Voltage Switching ZVS โดยที่กระแสเอาต์พุต I_o จะต้องล้าหลังขอบหน้าแรงดันเอาต์พุต v_o ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่สวิตช์ของมอสเฟส f_s กับค่ามุมเฉือน ϕ ที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์ทำงานภายใต้สภาวะ Zero Voltage Switching ZVS ได้จากสมการที่ 4.11

4.7 สรุป

1) ได้นำเสนอโหมคการทำงานของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนจะเป็นการควบคุมเนื้อแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาสมการแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตและสมการแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ
- 3) ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาสมการกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ
- 4) จากการทดลองเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน สามารถใช้งานได้จริงโดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดได้ 1040 วัตต์ ที่มุมเฉือน $\phi = 0^\circ$ ความถี่ $f_s = 34 \text{ kHz}$ โดยใช้เวลาในการหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตร ให้เดือดได้ภายใน 2 นาที 30 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

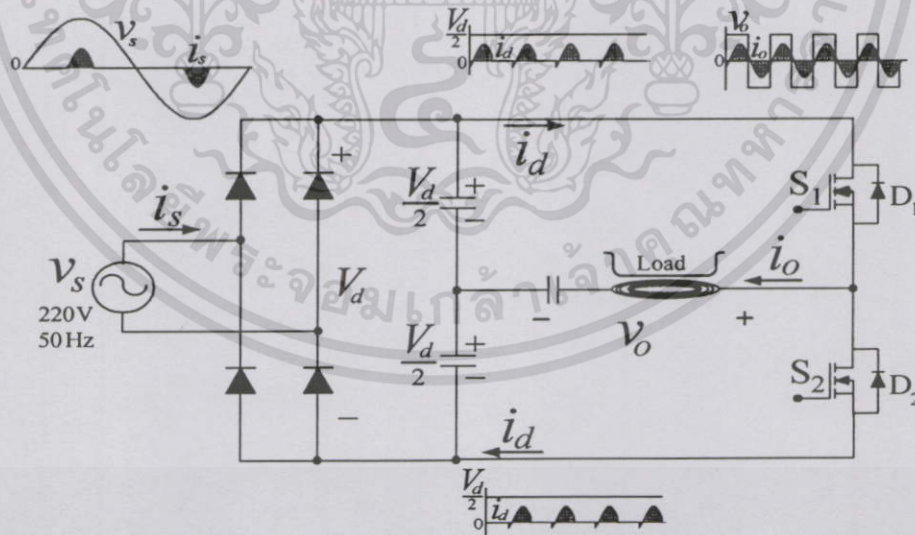
บทที่ 5

ผลการทดลองและผลการจำลอง

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ในกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการปรับความถี่ และกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยวิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน เพื่อนำข้อมูลไปใช้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องในขั้นตอนสุดท้าย โดยคลื่นที่ได้จากผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบของแรงดันและกระแสทางด้านเอาท์พุทและอินพุทของอินเวอร์เตอร์ จะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการในบทที่ 3 และบทที่ 4 โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำไปเปรียบเทียบหาค่ากำลังไฟฟ้เอาท์พุทอินเวอร์เตอร์ P_o ค่ากำลังไฟฟ้อินพุทอินเวอร์เตอร์ P_i และค่าประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ η โดยที่ขั้นตอนในการทดลองและการจำลองผลจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

5.2 การทดลองวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 5.1 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

ในการทดลองจะใช้วงจรทดลองในรูปที่ 5.1 ซึ่งมีพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆดังตารางที่ 5.1

โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวทศ.สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 อุปกรณ์และค่าพิกัดต่างๆ ของวงจรเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงในกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยวิธีการปรับความถี่และควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยวิธีการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน ที่ใช้ในการทดลองจริง

รายชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด
ไดโอดเรียงกระแสแบบบริดจ์	KBPC3504
ตัวเก็บประจุ C_d	1500 μF
อุปกรณ์สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	IRFP460
ตัวเก็บประจุเรโซแนนท์	0.1367 μF
ขนาดเส้นลวดของขดลวดเหนี่ยวนำ	กว้าง 5 มิลลิเมตร
จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ	69 รอบ
เส้นผ่าศูนย์กลางภาชนะหุงต้ม	15 เซนติเมตร
วัสดุของภาชนะหุงต้ม	สแตนเลส (stainless)
ระยะห่างระหว่างภาชนะหุงต้มกับขดลวดเหนี่ยวนำ	3-10 มิลลิเมตร

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าและเก็บผลการทดลอง

- | | |
|--|-----------|
| 1. Digital Oscilloscope YOKOGAWA , DL 1520 | 1 เครื่อง |
| 2. OPTEX Thermo-hunter PT-3LD | 1 เครื่อง |
| 3. Variable Voltage Transformer (0 Vac-450 Vac) MAX.15 A | 1 เครื่อง |
| 4. Multimeter HP-Hewlett Packard 973A | 1 เครื่อง |

5.2.1 ขั้นตอนในการเก็บผลการทดลอง

ขั้นตอนการเก็บผลการทดลองคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง ด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการเก็บผลดังต่อไปนี้

1. ปรับแรงดันที่ Variable Voltage Transformer ที่ค่าแรงดันเท่ากับ 220 V(rms) เพื่อจ่ายเข้ากับอินพุตของวงจรเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง
2. ทำการวัดแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตและอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เริ่มต้นอยู่ที่ 34 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัดคลื่นแรงดันและกระแสเอาท์พุทที่จุดต่างๆ ของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง พร้อมทั้งบันทึกรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม Bitmap และค่าข้อมูลของรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม ASCII

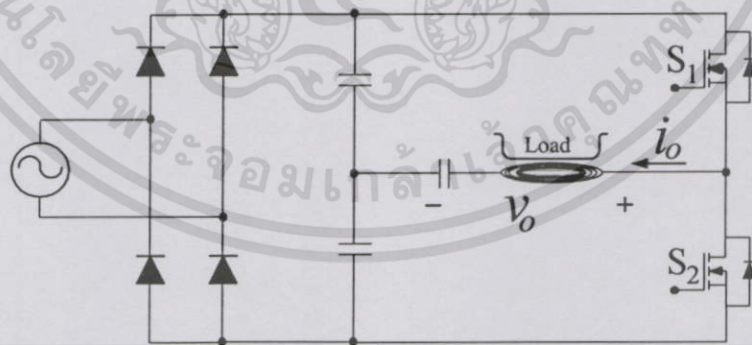
4. ทำการปรับค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ค่า 35 kHz จนถึง 44 kHz ซึ่งในการทดลองได้วัดอุณหภูมิน้ำที่ 100 องศาเซลเซียส($^{\circ}C$)

5.2.2 ขั้นตอนในการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

1. กำหนดค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการทดลอง คือ 34 kHz
2. นำค่าข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปแบบแฟ้ม ASCII มาทำการกระจายอนุกรมฟูเรียร์เพื่อให้ได้ค่าสเปกตรัมของแรงดันและกระแส
3. นำค่าสเปกตรัมของแรงดันและกระแสมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ
4. เปลี่ยนค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการทดลอง คือ 35 kHz

5.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลอง คลื่นแรงดันและกระแส ในกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่

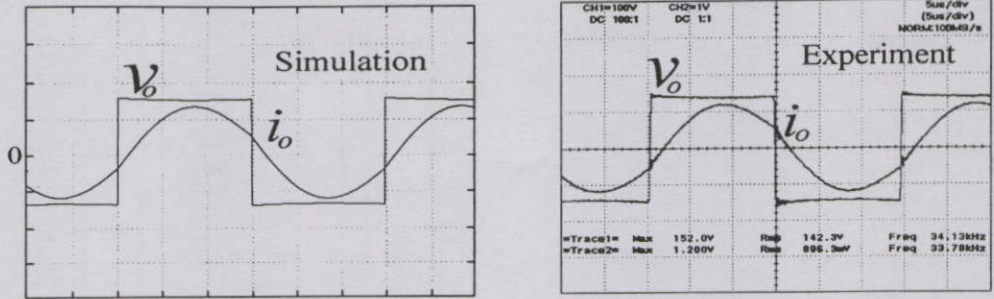
ณ จุดต่างๆ ในวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง จากหัวข้อ 5.2.1 และ 5.2.2 ค่าทั้งหมดที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากเครื่องต้นแบบสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ เพื่อยืนยันความถูกต้อง



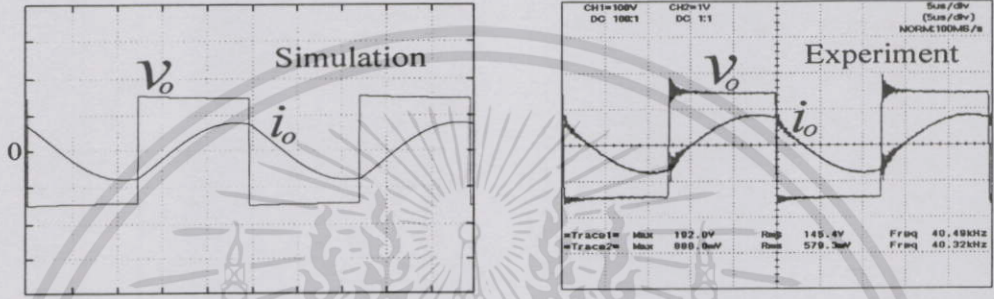
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านเอาท์พุทของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้ด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

จากรูปที่ 5.2 แสดงตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านเอาท์พุทของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ทั้งแรงดันเอาท์พุท V_o และกระแสเอาท์พุท i_o ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.3

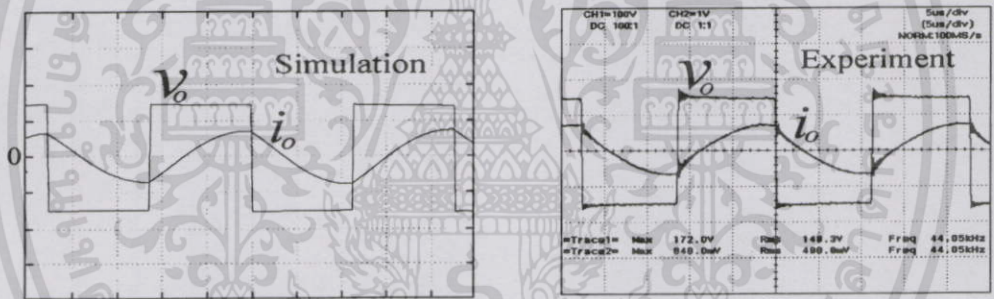
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ความถี่ 34 kHz

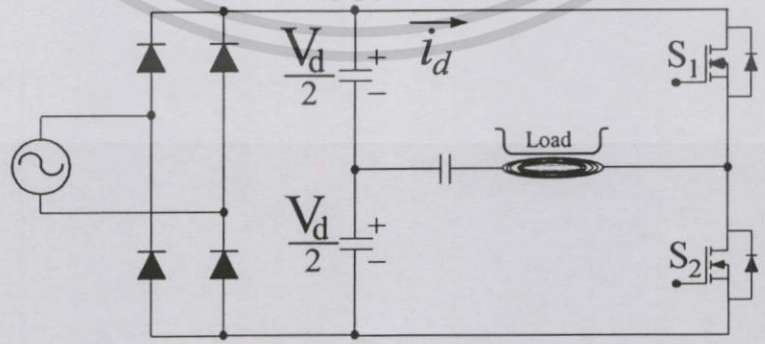


b) ความถี่ 40 kHz



c) ความถี่ 44 kHz

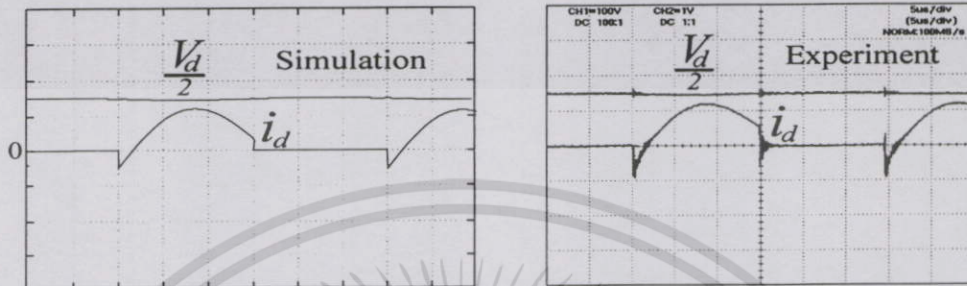
รูปที่ 5.3 ลักษณะคลื่นแรงดัน V_o และกระแส i_o ทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองและการทดลอง จากเครื่องต้นแบบที่ค่าความถี่ 34 kHz, 40 kHz และ 44 kHz



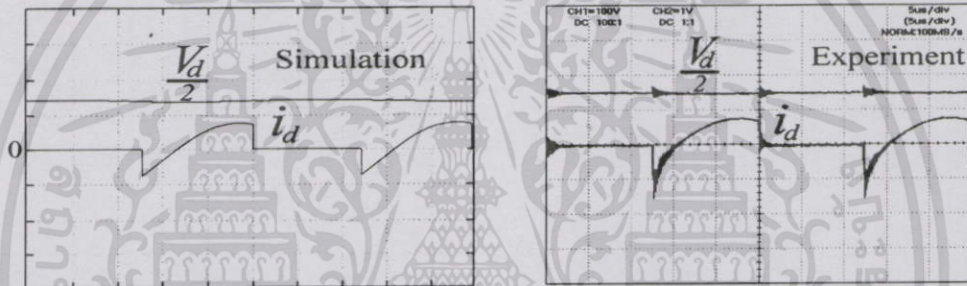
รูปที่ 5.4 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านอินพุตของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟด้วยการปรับความถี่เพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.4 แสดงตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านอินพุทของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ทั้งแรงดันอินพุท $\frac{V_d}{2}$ และกระแสอินพุท i_d ซึ่งผลการทดลองและการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.5



a) ที่ความถี่ 34 kHz



b) ที่ความถี่ 40 kHz



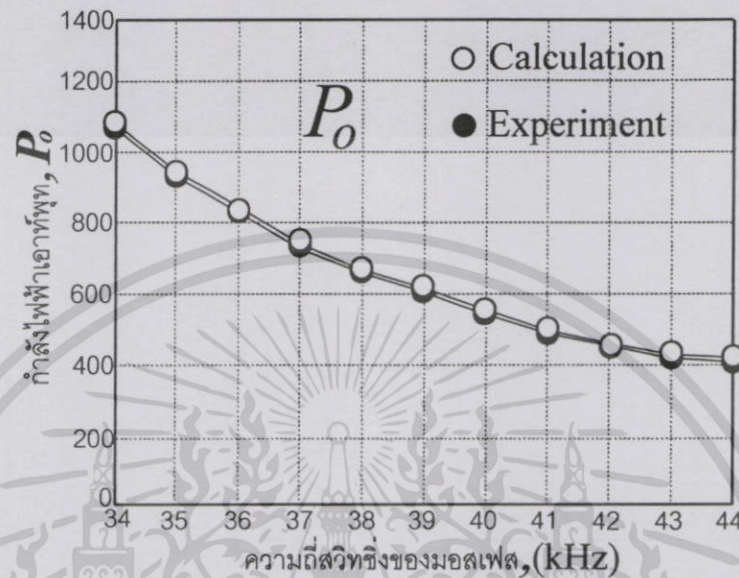
c) ที่ความถี่ 44 kHz

รูปที่ 5.5 ลักษณะคลื่นแรงดัน $\frac{V_d}{2}$ และกระแส i_d ทางด้านอินพุทอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองและการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่ค่าความถี่ 34 kHz, 40 kHz และ 44 kHz

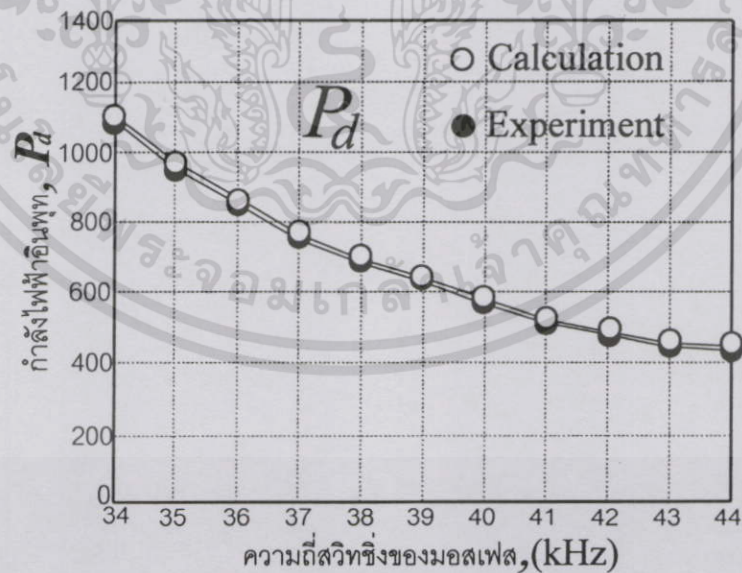
ผลข้อมูลแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบเครื่องต้นแบบสามารถนำไปหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุท P_o เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการที่ 3.16 และผลข้อมูลแรงดันและกระแสทางด้านอินพุทที่ได้จากการทดสอบเครื่องต้นแบบสามารถนำไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_d เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการที่ 3.18 ซึ่งสามารถนำมาแสดงลักษณะเส้นกราฟได้ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7



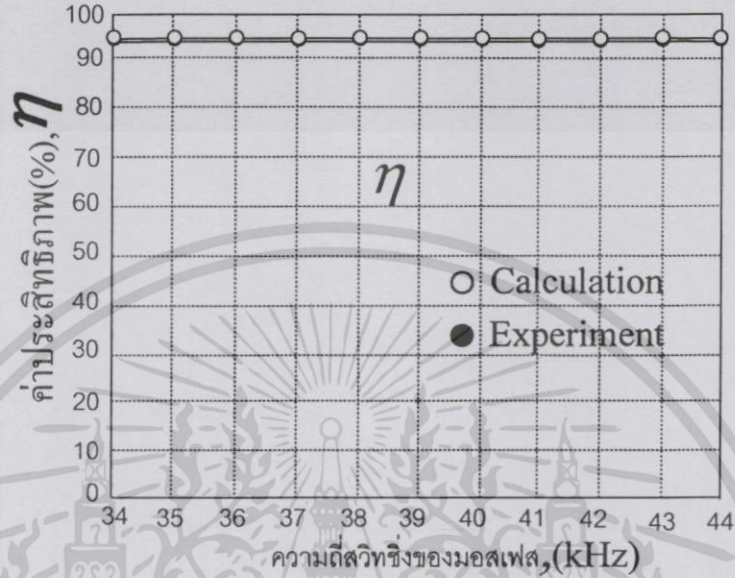
รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิทซ์ของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิทซ์ของอินเวอร์เตอร์

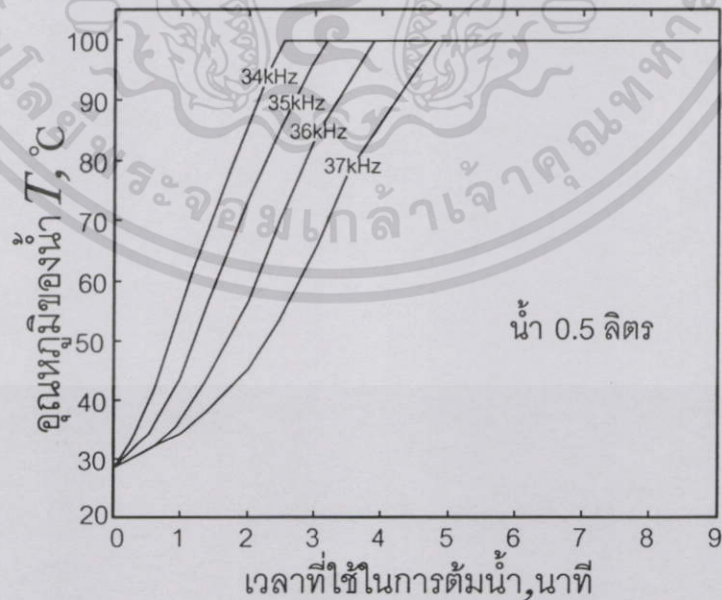
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o และค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_i ก็จะสามารถนำมาหาค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ η ได้ดังสมการที่ 3.19 ซึ่งสามารถนำไปวาดเปรียบเทียบในลักษณะเส้นกราฟได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ η เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

จากการทดสอบเครื่องต้นแบบ ได้แสดงเส้นกราฟของเวลาที่ใช้ในการต้ม 0.5 ลิตรที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 5.9

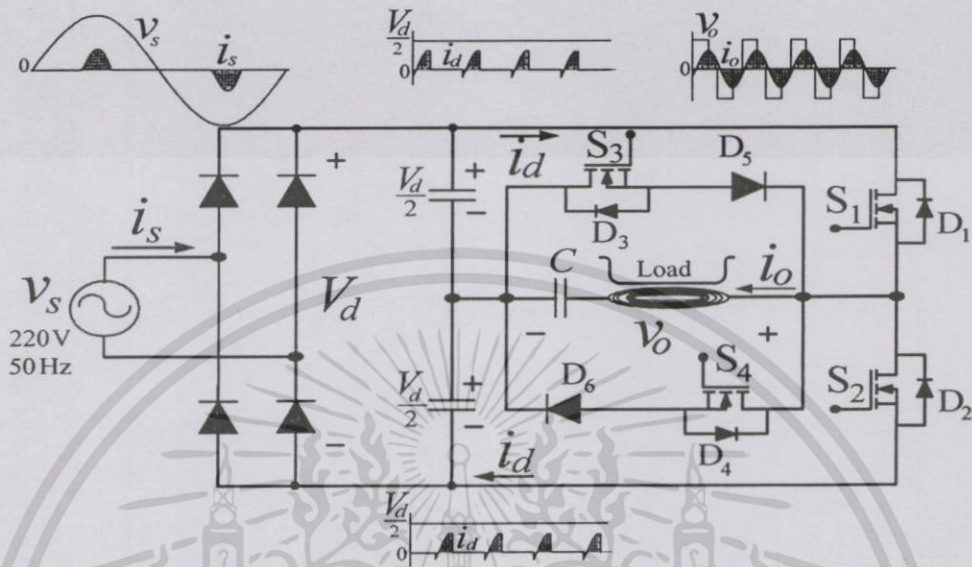


รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ 0.5 ลิตร

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดลองวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง



รูปที่ 5.10 วงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

5.4.1 ขั้นตอนในการทำการทดลอง

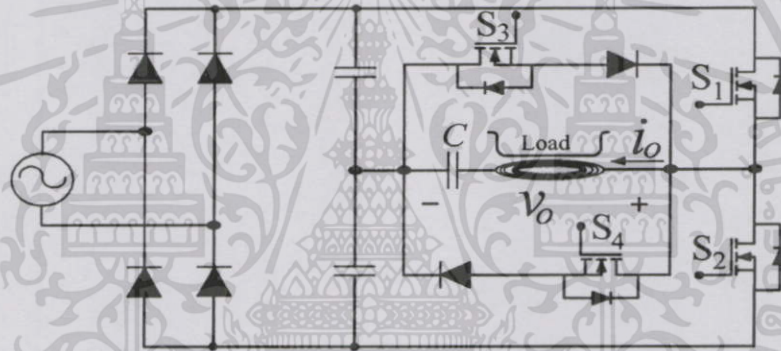
ขั้นตอนการเก็บผลการทดลองคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง ด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการเก็บผลดังต่อไปนี้

1. ปรับแรงดันที่ Variable Voltage Transformer ที่ค่าแรงดันเท่ากับ 220 V(rms) เพื่อจ่ายเข้ากับอินพุตของวงจรเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง
2. ทำการวัดแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตและอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งค่ามุม $\phi = 0^\circ$
3. วัดคลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่จุดต่างๆ ของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง พร้อมทั้งบันทึกรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม Bitmap และค่าข้อมูลของรูปคลื่นในรูปแบบแฟ้ม ASCII
4. ทำการปรับค่า $\phi = 0^\circ$ จนถึงค่ามุมเงื่อนไข $\phi = 120^\circ$ ซึ่งในการทดลองได้วัดอุณหภูมิน้ำที่ 100 องศาเซลเซียส($^\circ\text{C}$)

5.4.2 ขั้นตอนในการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

- 1.) กำหนดมุมเฟส $\phi = 0^\circ$ ของแรงดันเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์
- 2.) นำค่าข้อมูลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปแบบเพิ่ม ASCII มาทำการกระจายอนุกรมฟูเรียร์เพื่อให้ได้ค่าสเปกตรัมของแรงดันและกระแส
- 3.) นำค่าสเปกตรัมของแรงดันและกระแสมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำ
- 4.) เปลี่ยนค่ามุมเฟส ϕ ของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการทดลองจนถึงมุมเฟส $\phi = 120^\circ$

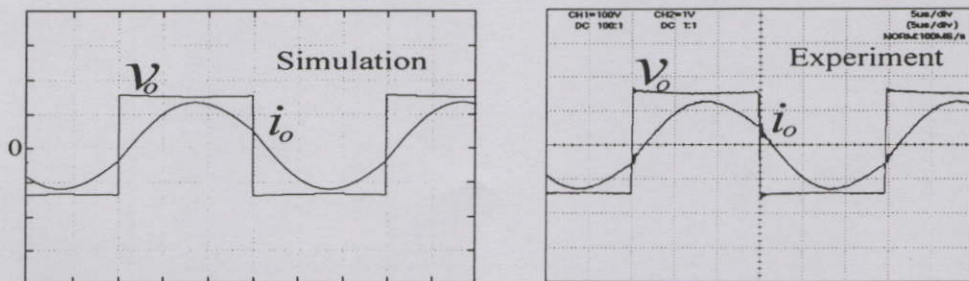
5.5 การเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลอง คลื่นแรงดันและกระแส ในกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน



รูปที่ 5.11 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน

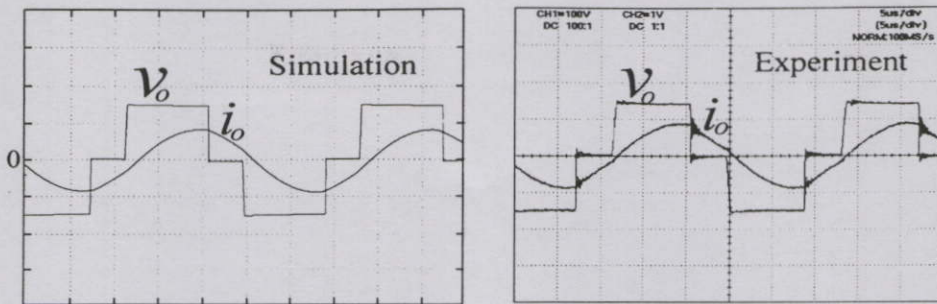
จากรูปที่ 5.11 แสดงตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนทั้งตำแหน่งแรงดันเอาต์พุต V_o และตำแหน่งกระแสเอาต์พุต i_o ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองแสดงดังรูปที่

5.12

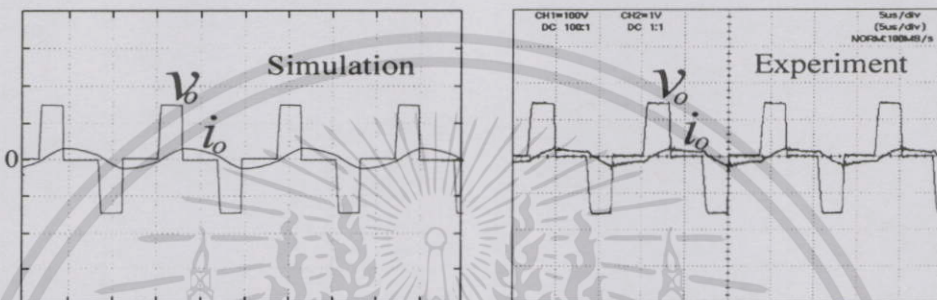


a) มุมเฟส $\phi = 0^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

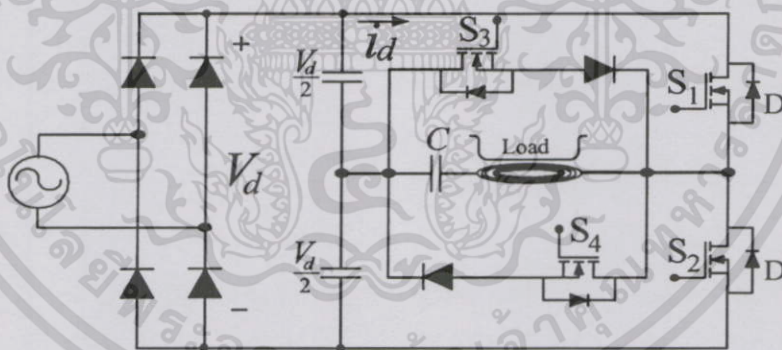


b) มุมเฟื่อน $\phi = 60^\circ$



c) มุมเฟื่อน $\phi = 120^\circ$

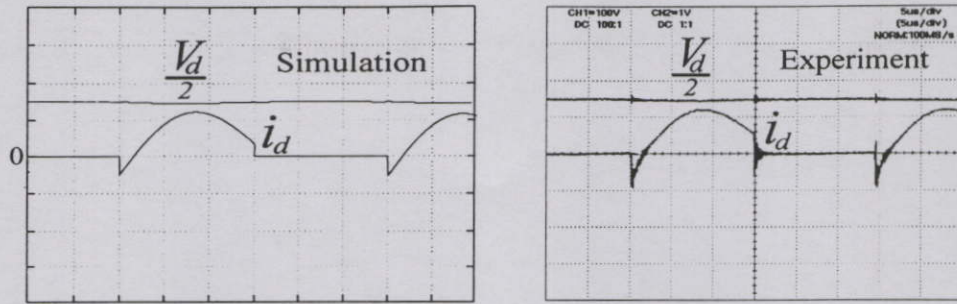
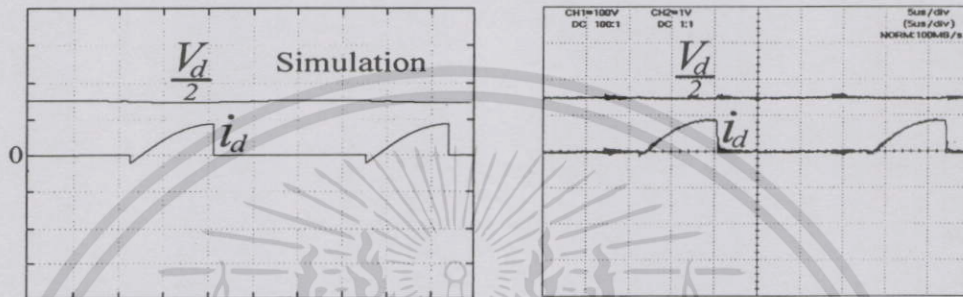
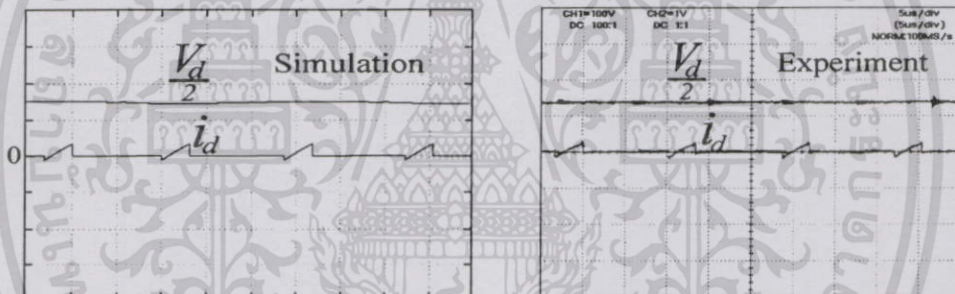
รูปที่ 5.12 ลักษณะคลื่นแรงดัน V_o และกระแส i_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่มุม $\phi = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$



รูปที่ 5.13 ตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านอินพุตของวงจรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน

จากรูปที่ 5.13 แสดงตำแหน่งเก็บผลการทดลองทางด้านอินพุตของวงจรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนทั้งตำแหน่งแรงดันอินพุต $\frac{V_d}{2}$ และตำแหน่งกระแสอินพุต i_d ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองแสดงดังรูปที่

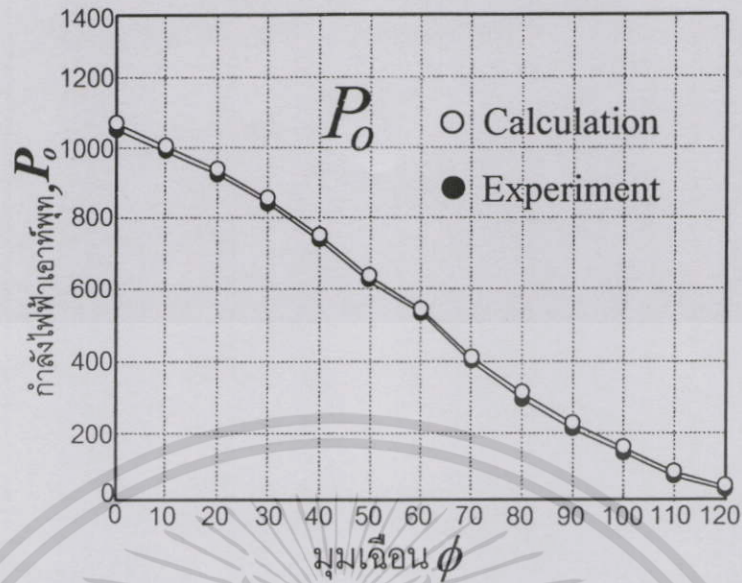
5.14

a) มุมเลื่อน $\phi = 0^\circ$ b) มุมเลื่อน $\phi = 60^\circ$ c) มุมเลื่อน $\phi = 120^\circ$

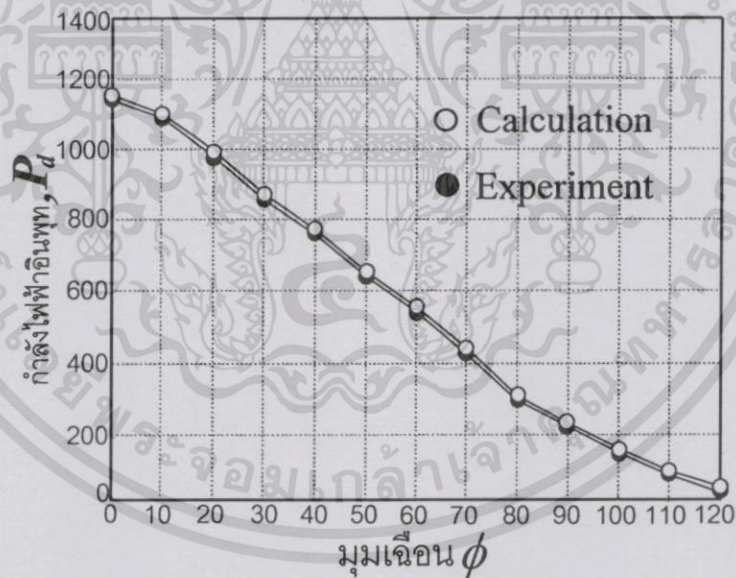
รูปที่ 5.14 ลักษณะคลื่นแรงดัน $\frac{V_d}{2}$ และกระแส i_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลอง และการทดลองจากเครื่องต้นแบบที่มุมเลื่อน $\phi = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$

ผลข้อมูลแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบเครื่องต้นแบบสามารถนำไปหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการที่ 4.7 และผลข้อมูลแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตที่ได้จากการทดสอบเครื่องต้นแบบสามารถนำไปหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_d เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการที่ 4.9 ซึ่งสามารถนำไปวัดเปรียบเทียบในลักษณะเส้นกราฟได้ดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



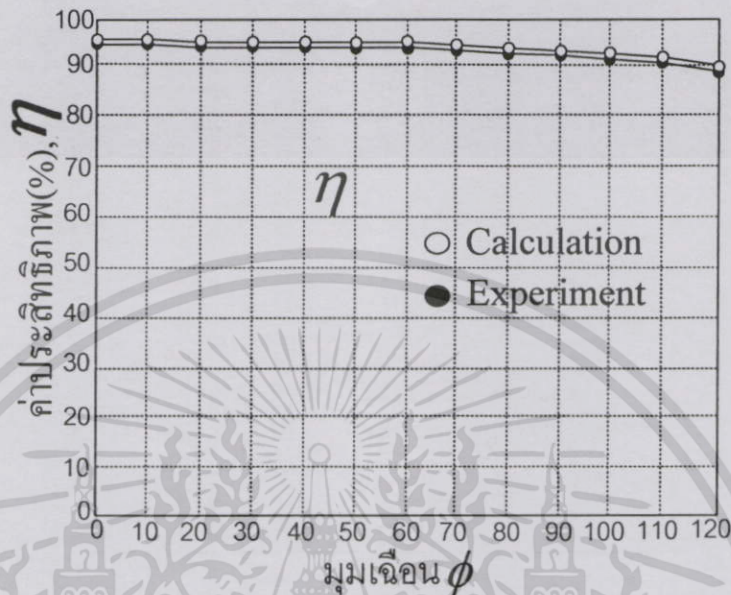
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเงือน ϕ ระหว่าง $0-120^\circ$



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเงือน ϕ ระหว่าง $0-120^\circ$

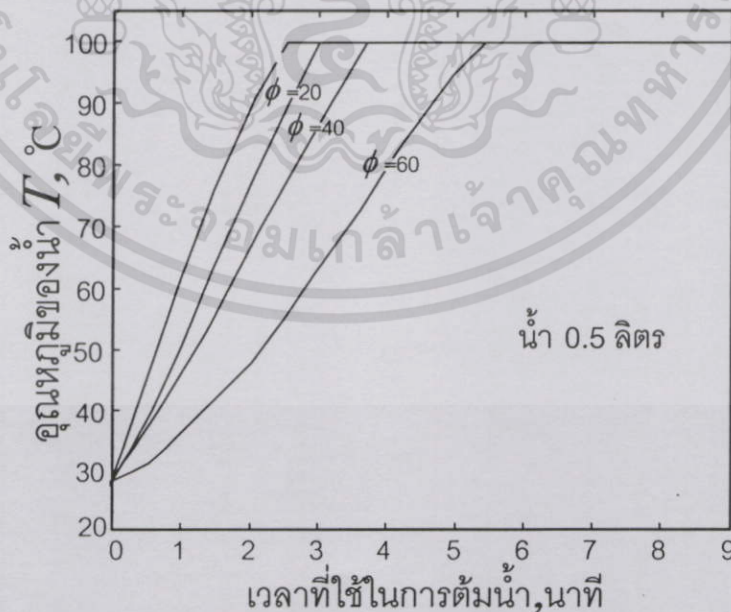
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.17 ได้แสดงเส้นกราฟประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จากข้อมูลเครื่องต้นแบบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ 77 จากสมการที่ 4.10



รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเฟส ϕ ระหว่าง $0-120^\circ$

ในรูปที่ 5.18 ได้แสดงเส้นกราฟของเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ 0.5 ลิตรที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุม ϕ



รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ 0.5 ลิตรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเฟส ϕ

5.6 สรุป

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Matlab กับผลที่ได้จากข้อมูล เครื่องต้นแบบของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ และวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน นั้น

1. ในกรณีการทดลองเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่สามารถใช้งานได้จริง โดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดได้ 1040 วัตต์ โดยใช้เวลาในการหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตร ให้เดือดได้ภายใน 2 นาที 30 วินาที โดยค่าประสิทธิภาพของ อินเวอร์เตอร์มีค่าระหว่าง 95% ซึ่งในการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า ด้วยการปรับเพิ่มความถี่กำลังไฟฟ้าสามารถปรับลดได้ในช่วง 1040-410 วัตต์

2. ส่วนในการทดลองเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่ง บริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน สามารถใช้งานได้จริง โดยกำลังไฟฟ้า เอาต์พุตสูงสุดได้ 1040 วัตต์ โดยใช้เวลาในการหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตร ให้เดือดได้ภายใน 2 นาที 30 วินาที โดยค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าระหว่าง 88-95% ซึ่งในการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน กำลังไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 1040-55 วัตต์ ซึ่งค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองและการทดลองจาก เครื่องต้นแบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากหลักการและผลการทดลองของเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้ อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่และควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการ ตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนเพื่อใช้สำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงสามารถสรุปในประเด็น สำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถเข้าใจถึงหลักการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูงเพื่อใช้สำหรับ เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงได้ ซึ่งขดลวดเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง(Magnetic Flux) กับภาชนะหุงต้ม ถ้าภาชนะหุงต้มเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นสาร Ferro-Magnetic สนามแม่เหล็กที่เกี่ยวคล้องกับภาชนะจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ที่ก้นภาชนะหุง ต้มเป็นเส้นทางปิด ซึ่งจะทำให้เกิดกำลัง ไฟฟ้าที่ให้ประโยชน์สามารถใช้เป็นความร้อนในการหุง ต้มให้น้ำเดือดได้ในเวลาอันรวดเร็ว

2. ได้นำเสนอหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ ซึ่งในการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่จะเป็นการ ควบคุมความถี่สวิทซ์ f_s เมื่อค่าความถี่สวิทซ์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ $f_s = f_r$ จะทำให้ได้ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดและเมื่อปรับค่าความถี่สวิทซ์ให้มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ $f_s > f_r$ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตก็จะลดลง

3. ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตและ ทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์และวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรเช่น ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และค่ามุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแส(θ)ในกรณีที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการ ปรับความถี่ พร้อมทั้งทำการทดลองและการคำนวณเพื่อนำผลที่ได้ทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อ เป็นการยืนยันความถูกต้องทางทฤษฎี ซึ่งปรากฏว่าได้ค่าใกล้เคียงกัน

4. จากการทดลองเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่สามารถใช้งานได้จริงโดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดได้ 1040 วัตต์ ที่ความถี่สวิทซ์ $f_s = 34\text{kHz}$ โดยใช้เวลาในการหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตรให้เดือดได้ภายใน 2 นาที 30 วินาที โดยค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าประมาณ 95%

5. ได้นำเสนอหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์กึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน ซึ่งในการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วนจะเป็นการควบคุมเนื้อแรงดันเอาต์พุทให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉือน ϕ ซึ่งที่ค่ามุมเฉือน $\phi = 0^\circ$ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุทจะมีค่าสูงสุดและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทจะลดลงเมื่อเพิ่มค่ามุมเฉือน ϕ ให้มากขึ้น

6. ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุทและทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ในกรณีที่มีควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน พร้อมกับทำการคำนวณและการทดลองเพื่อนำผลที่ได้ทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องทางทฤษฎี ซึ่งปรากฏว่าได้ค่าใกล้เคียงกัน

7. จากการทดลองควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการตัดแรงดันออกเป็นบางส่วน สามารถใช้งานได้จริงโดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุทสูงสุดได้ 1040 วัตต์ ที่มุมเฉือน $\phi = 0^\circ$ ความถี่ $f_s = 34\text{kHz}$ เช่นเดียวกับกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่โดยใช้เวลาในการหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตรให้เดือดได้ภายใน 2 นาที 30 วินาทีและค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าระหว่าง 88-95%

เนื่องจากงานวิจัยนี้วิเคราะห์แต่ทางด้านภาคเอาต์พุทและอินพุทของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงผลทางด้านภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ซึ่งจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้ามีค่าที่ต่ำมาก รวมทั้งกระแสไฟฟ้าด้านอินพุทของวงจรเรียงกระแสจะมีค่าฮาร์โมนิกส์ที่สูงทำและค่าpeak ของคลื่นกระแสจะมีค่าสูงมาก ซึ่งจะส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่างๆภายในอินเวอร์เตอร์ต้องทนค่าพิกัดกระแสสูง และจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ดังนั้นปัญหานี้จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณาว่าจะทำอย่างไรในการแก้ไขปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ตลอดจนฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Jae-Eul Yeon, Kyu-Min Cho, Won-Seok Oh, Hee-Jun Kim “A Novel Half-Bridge Resonant Inverter Having Load-Freewheeling Modes”, 2004 35th Annual IEEE power Electronics Specialists Conference ,หน้า 1304-1307
- [2] J. Davies and P. Simpson. **Induction Heating Handbook**. Mcgraw-Hill:London, 1979.
- [3] M.K.Kazimierczuk,D.Czarkowski. **Resonant Power Converters.**,JohnWile&Sons,Inc.1995
- [4] T.Tanaka, “ A New Induction Cooking Range for Heating and Kind of Metal Vessels”, IEEE Tran.Consumer Electronic, Vol.35, No.3, 1989. หน้า 635-641.
- [5] Y.S. Kwon, S.B.Yoo and D.S. Hyun, “Half Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Application with Load Adaptive PFW control Strategy”, IEEE-PESC Conf.Rec., 1999. หน้า. 575-581.
- [6] Henry W.Koertzen,Jacobus D.van Wyk ,Jan A.Ferreira “ Design of the Half-Bridge, Resonant Converter for Induction Cooking”, IEEE,1995 หน้า 729-735
- [7] P.Viriya, N.Yongyuth, K.Matsuse “Analysis of Transition Mode from Phase Shift to Zero-Phase Shift Under ZVS and NON-ZVS Operation for Induction Heating Inverter”, Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07 หน้า 1512-1519
- [8] L.Grajales, J. A. Sabate, K R. Wang, W. A. Tabisz,and F. C. Lee, " Design of a 10 kW, Phase-Shift Controlled Series - Resonant Inverter for Induction Heating " Proc. of Industry Applications Society,Toronto, Canada 1993, หน้า. 843-849.
- [9] สิทธิโชค สินรัตน์, วิริยะ พิเชฐจำเริญ “เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 2544, หน้า 488-493



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

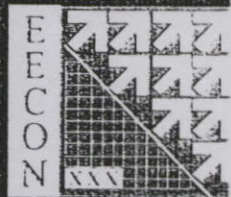
ภาคผนวก ก.

ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เจนณรงค์ เสนามนตรี วิริยะ พิเชษฐจำเริญ “การวิเคราะห์เรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อใช้ในงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The EECON-30 Conference Joins the Eightieth Birthday Anniversary

Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่น่าสนใจในการประชุม เล่ม 1

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ไฟโตนิคส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

Volume I

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
 ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเพลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี
 25 - 26 ตุลาคม 2550



FACULTY OF ENGINEERING
KMUTT
 EECON - 30



การวิเคราะห์รีโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อใช้ในงาน
เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง

Analysis of Half-Bridge Resonant Inverter with Output Voltage Control for
High-Frequency Induction Cooking

เจนณรงค์ เสนามนตรี วิริยะ ทีเชษฐาวิญญู

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ถนนวงแหวนรอบนอก ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร (02)7373000 ต่อ 3516 โทรสาร (02)3269902 E-mail : kpviriya@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอน การวิเคราะห์รีโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อใช้ในงานเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูง รายละเอียดจะประกอบไปด้วย การนำวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ความถี่สูงมาประยุกต์ให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมแรงดันเอาต์พุต พร้อมกับการวิเคราะห์หาสมการแรงดันเอาต์พุต V_o และกระแสเอาต์พุต i_o ของวงจรที่ค่าความถี่สวิตช์ต่างๆ พร้อมทั้งนำสมการแรงดันและกระแสเอาต์พุตไปคำนวณหา กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o และกำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่สวิตช์ระหว่าง 0-100% จากการทดสอบด้วยเครื่องต้นแบบสามารถหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตรให้เดือดได้ภายใน 2.5 นาที ที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 1150 วัตต์

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์, กึ่งบริดจ์, เตาหุงต้มเหนี่ยวนำ, ความถี่สูง

Abstract

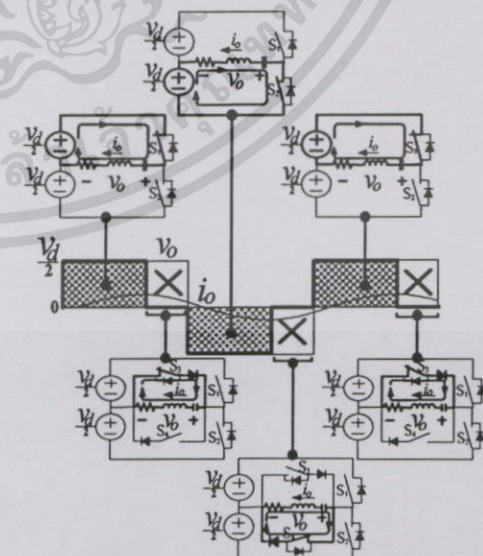
This paper presents an analysis of half-Bridge resonant inverter with output voltage control for high-frequency induction cooking. The circuit operation will be first analyzed. Then, the equations of output voltage V_o and output current i_o with the variation of duty-cycle of the circuit are obtained. The output power P_o and input power P_d of the inverter can be calculated using the equations at various duty cycle from 0-100%. The prototype of the proposed cooker has been developed and tested with the boiling time of 2.5 minutes for 0.5 litre of water and at power rating of 1150 watts

Keywords: Inverter, Half-Bridge, Induction Cooking, High-Frequency

1. บทนำ

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้โดยการควบคุมแรงดันเอาต์พุต โดยวิธีการตัดเนื้อแรงดันบางส่วนออกเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตลดลง ซึ่งหลักการตัดเนื้อแรงดันบางส่วนออกนั้นได้แนวคิดมาจากหลักการเลื่อน

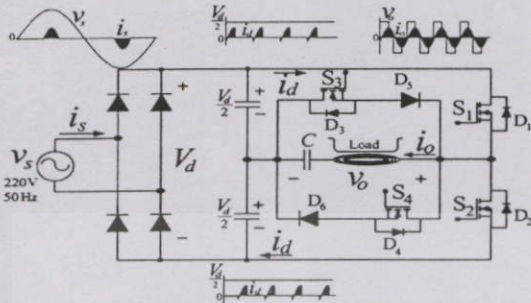
เฟสของสัญญาณ ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ซึ่งควบคุมแรงดันเอาต์พุตโดยการเลื่อนเฟสสัญญาณที่ป้อนให้กับมอสเฟตแต่ละตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ โดยที่หลักการดังกล่าวนี้จะไม่สามารถใช้ได้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการปรับแรงดันเอาต์พุตที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์จะแตกต่างจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์อย่างสิ้นเชิงดังจะเห็นจากหลักการที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการปรับลดแรงดันเอาต์พุตโดยการตัดเนื้อแรงดันเอาต์พุตบางส่วนออกดังจะเห็นได้จากบริเวณเครื่องหมายกากบาท X ซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีการตัดเนื้อแรงดันบางส่วนออก โดยในการตัดเนื้อแรงดันเอาต์พุตชีกบวกลบออกจะใช้สวิตช์ S_1 ทำหน้าที่ลัดวงจรเอาต์พุตในส่วนที่เป็นบวกส่วนในการตัดเนื้อแรงดันเอาต์พุตชีกบวกลบออกจะใช้สวิตช์ S_2 ทำหน้าที่ลัดวงจรเอาต์พุตในส่วนที่เป็นลบ โดยวิธีการลัดวงจรเอาต์พุตบางส่วนของชีกบวกลบและชีกบวกลบทำให้มีแรงดันเอาต์พุตส่วนเหลือลดลง ดังนั้น โดยการเพิ่มหรือลดแรงดันเอาต์พุตในบริเวณส่วนที่ตัดออกให้มีค่ามากหรือน้อยก็จะสามารถปรับเพิ่มหรือลดแรงดันเอาต์พุตได้เหมือนกรณีการเลื่อนเฟสของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์



รูปที่ 1 การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลักการทำงาน

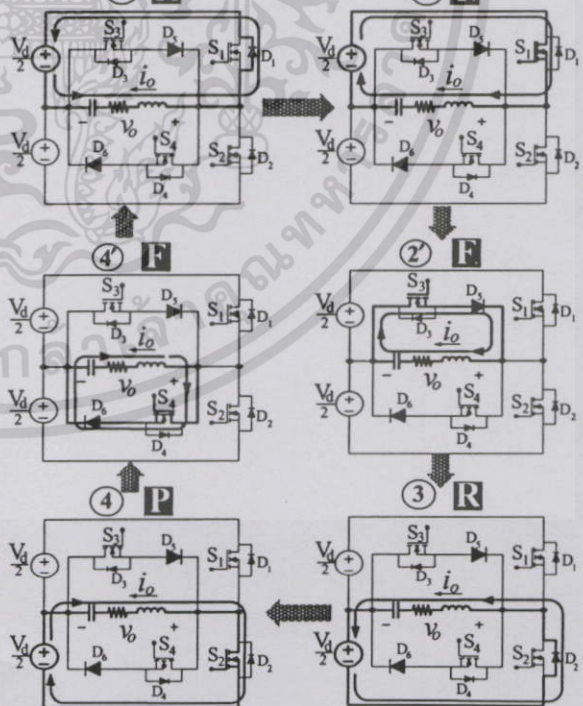
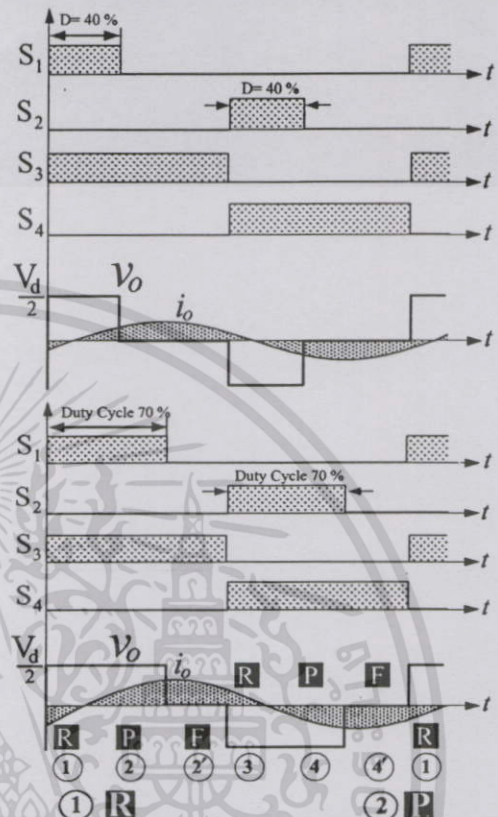


รูปที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อใช้ในงานควบคุมความเร็วรอบความถี่สูง

จากรูปที่ 2 แรงดันทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 220 V 50 Hz ป้อนให้กับวงจรฟลูบริดจ์ดิฟเฟอเรนเชียล เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายให้ชุดอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงโดยมีมอสเฟต S_1, S_2, S_3, S_4 จะทำหน้าที่เป็นสวิทช์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะถูกป้อนให้กับชุดโพลครโซแนนท์ซึ่งประกอบด้วยเรโซแนนท์คาปาซิเตอร์ ส่วนขดลวดเหนี่ยวนำของเตาหม้อต้มสามารถแทนด้วยอินดักแตนซ์ (L) และความต้านทาน (R) ซึ่งโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะมีรายละเอียดดังนี้ โหมดการทำงานที่ Duty Cycle 40, 70 %

จากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมแรงดันเอาต์พุตในรูปที่ 2 สามารถแบ่งการทำงานที่ Duty Cycle 40, 70% ออกเป็น 6 โหมดคือ ①, ②, ③, ④, ④, ① ดังรูปที่ 3 ซึ่งโหมดที่ ① คือ โหมด Regenerating (R) เป็นโหมดที่โหลดจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทางไดโอด D_3, D_4 คืนให้กับแหล่งจ่าย ซึ่งแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นบวกแต่กระแสเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบ โหมดที่ ② คือ โหมด Powering (P) เป็นโหมดที่มอสเฟต S_3 ทำงาน กระแสเอาต์พุตจะไหลผ่านมอสเฟต S_3 ไปที่ชุดโพลครโซแนนท์ ส่วนมอสเฟต S_2 จะไม่นำกระแส ซึ่งค่ากระแสและแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวก กำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้โหลด โหมดที่ ③ คือ โหมด Regenerating (R) เป็นโหมดที่โหลดจ่ายพลังงานคืนให้กับแหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าจะไหลสวนทางกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงผ่านทางไดโอด D_3, D_4 คืนให้กับแหล่งจ่าย ซึ่งแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบแต่กระแสเอาต์พุตจะมีค่าเป็นบวก โหมดที่ ④ คือ โหมด Powering (P) เป็นโหมดที่มอสเฟต S_4 ทำงาน กระแสเอาต์พุตจะไหลผ่านมอสเฟต S_4 ไปที่ชุดโพลครโซแนนท์ ส่วนมอสเฟต S_1 จะไม่นำกระแส ซึ่งค่ากระแสและแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกกำลังไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้โหลด โหมดที่ ④ คือ โหมด Freewheeling (F) เป็นโหมดที่มอสเฟต S_3 ทำงานเพียงตัวเดียว ซึ่ง

กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านมอสเฟต S_3 กลับมายังชุดโพลครโซแนนท์ ซึ่งค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์และกระแสเอาต์พุตจะมีค่าเป็นลบ

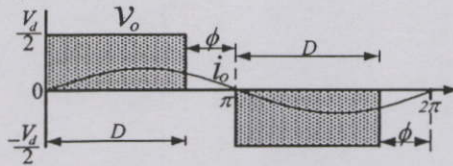


รูปที่ 3 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตและรูปแบบสัญญาณควบคุมมอสเฟต S_1, S_2, S_3, S_4 ที่ Duty Cycle 40, 70 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์หาสมการคลื่นแรงดันกระแสและกำลังไฟฟ้า

เอาต์พุต



รูปที่4 คลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

จากลักษณะคลื่นแรงดันเอาต์พุต V_o ดังรูปที่4 สามารถแสดงในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการ(1) ซึ่งนำมาพิจารณาหากระแสเอาต์พุต i_o จะได้ดังสมการ(2) เมื่อได้แรงดันและกระแสเอาต์พุตจะสามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต P_o ได้ดังสมการ(3) กำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ(4)

$$V_o = \frac{V_d}{\pi} [(\cos 2\pi \sin \phi + \sin \phi) \cos \omega t + (1 + \cos \phi + \cos 2\pi \cos \phi - \cos \pi) \sin \omega t] + \frac{V_d}{2\pi} [(\cos 4\pi \sin 2\phi - \sin 2\phi) \cos 2\omega t + (1 - \cos 2\phi + \cos 4\pi \cos 2\phi - \cos 2\pi) \sin 2\omega t] + \frac{V_d}{3\pi} [(\cos 6\pi \sin 3\phi + \sin 3\phi) \cos 3\omega t + (1 + \cos 3\phi + \cos 6\pi \cos 3\phi - \cos 3\pi) \sin 3\omega t] + \dots \quad (1)$$

โดยที่มุม $\phi = \left(\pi - \frac{\pi D}{100}\right)$, Duty Cycle (D) = 0-100 %

$$i_o = \frac{V_d}{\pi Z_1} [(\cos 2\pi \sin \phi + \sin \phi) \cos(\omega t - \theta_1) + (1 + \cos \phi + \cos 2\pi \cos \phi - \cos \pi) \sin(\omega t - \theta_1)] + \frac{V_d}{2\pi Z_2} [(\cos 4\pi \sin 2\phi - \sin 2\phi) \cos(2\omega t - \theta_2) + (1 - \cos 2\phi + \cos 4\pi \cos 2\phi - \cos 2\pi) \sin(2\omega t - \theta_2)] + \frac{V_d}{3\pi Z_3} [(\cos 6\pi \sin 3\phi + \sin 3\phi) \cos(3\omega t - \theta_3) + (1 + \cos 3\phi + \cos 6\pi \cos 3\phi - \cos 3\pi) \sin(3\omega t - \theta_3)] + \dots \quad (2)$$

โดยที่ $Z_n = \sqrt{R^2 + (X_{L,n} - X_{C,n})^2}$, $\theta_n = \tan^{-1} \left[\frac{X_{L,n} - X_{C,n}}{R} \right]$

$$P_o = V_{o1} I_{o1} \cos \theta_1 + V_{o2} I_{o2} \cos \theta_2 + V_{o3} I_{o3} \cos \theta_3 + \dots \quad (3)$$

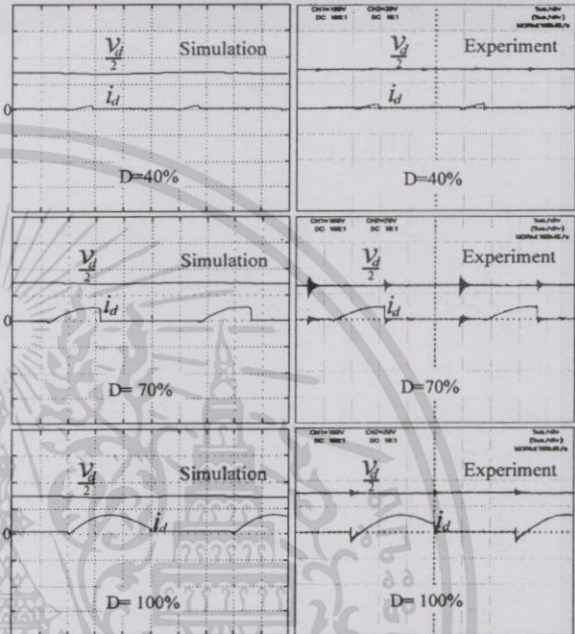
$$P_d = V_d I_d = \frac{V_d^2}{2\pi Z_1} [\sin(\pi - \phi) + \sin(2\pi - \phi) - \sin(\pi - \phi + \theta_1) - \sin \theta_1 + \sin(\phi - 2\pi + \theta_1) - \cos \pi \sin \theta_1] + \{1 - \cos(\pi - \phi) + \cos(2\pi - \phi) - \cos \pi\} \times \{\cos(\pi - \phi + \theta_1) - \cos \theta_1 + \cos(\phi - 2\pi + \theta_1) - \cos \pi \cos \theta_1\} + \frac{V_d^2}{2 \times 2\pi Z_2} [\sin 2(\pi - \phi) + \sin 2(2\pi - \phi) - \sin(2\pi - 2\phi + \theta_2) - \sin \theta_2 + \sin(2\phi - 4\pi + \theta_2) - \cos 2\pi \sin \theta_2] + \{1 - \cos 2(\pi - \phi) + \cos 2(2\pi - \phi) - \cos 2\pi\} \times \{\cos(2\pi - 2\phi + \theta_2) - \cos \theta_2 + \cos(2\phi - 4\pi + \theta_2) - \cos 2\pi \cos \theta_2\} + \frac{V_d^2}{2 \times 3\pi Z_3} [\sin 3(\pi - \phi) + \sin 3(2\pi - \phi) - \sin(3\pi - 3\phi + \theta_3) - \sin \theta_3 + \sin(6\pi - 3\phi + \theta_3) - \cos 3\pi \sin \theta_3] + \{1 - \cos 3(\pi - \phi) + \cos 3(2\pi - \phi) - \cos 3\pi\} \times \{\cos(2\pi - 2\phi + \theta_3) - \cos \theta_3 + \cos(3\phi - 6\pi + \theta_3) - \cos 3\pi \cos \theta_3\} + \dots$$

จากสมการที่ (3) และ (4) จะได้ค่าประสิทธิภาพ η ดังสมการที่ (5)

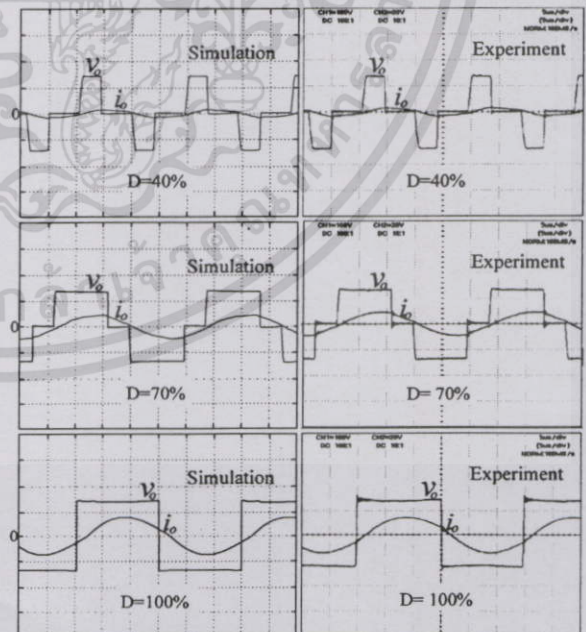
$$\eta = \frac{P_o}{P_d}$$

4. ลักษณะคลื่นจากการจำลองและการทดลอง

ลักษณะคลื่นแรงดันอินพุตอินเวอร์เตอร์ $\frac{V_d}{2}$ และกระแสอินพุตอินเวอร์เตอร์ i_d และคลื่นแรงดันเอาต์พุต V_o และกระแสเอาต์พุต i_o ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม P-Spice เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากเครื่องต้นแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่5 และรูปที่6



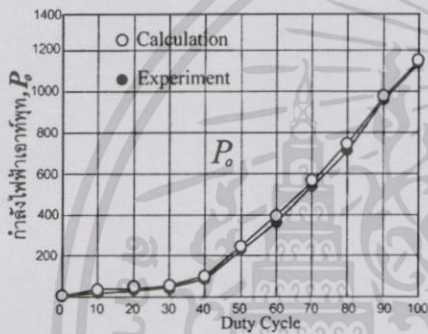
รูปที่5 คลื่นแรงดันและกระแสอินพุตอินเวอร์เตอร์จากการจำลองด้วยโปรแกรม P-Spice และการทดลองที่ควิตซ์ไซเคิล 40, 70, 100 %



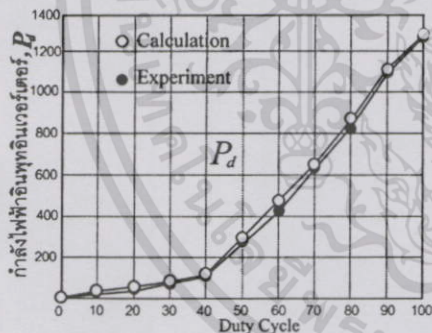
รูปที่6 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตจากการจำลองด้วยโปรแกรม P-Spice และการทดลองที่ควิตซ์ไซเคิล 40, 70, 100 %

5.ผลการทดลอง

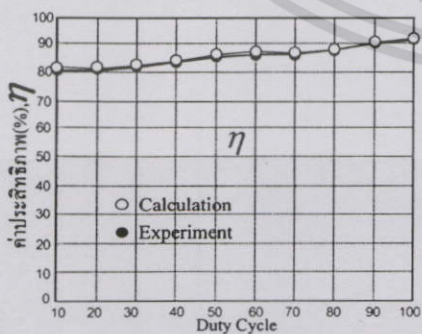
ในบทความวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเครื่องต้นแบบเพื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี โดยในรูปที่ 7 ได้แสดงเส้นกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากข้อมูลเครื่องต้นแบบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o จากสมการที่(3) ส่วนในรูปที่ 8 ก็เช่นกันได้แสดงเส้นกราฟกำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์จากข้อมูลเครื่องต้นแบบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d จากสมการที่(4) เมื่อได้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ P_o และกำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์ P_d ก็สามารถนำมาหาค่าประสิทธิภาพ η ของอินเวอร์เตอร์จากสมการที่(5) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังรูปที่ 9 ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้จะอยู่ระหว่าง 80-92%



รูปที่ 7 ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 8 ค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 9 ค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

6.สรุป

จากหลักการและผลการทดลองของเคาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูงโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมแรงดันเอาต์พุตสามารถสรุปในประเด็นสำคัญได้ดังต่อไปนี้

- 1.บทความวิจัยได้นำเสนอหลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ใช้ในงานเคาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูง พร้อมทั้งได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาแรงดันกระแสและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไซเคิลระหว่าง 0-100 % ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าข้อมูลที่ได้จากเครื่องต้นแบบเพื่อยืนยันความถูกต้อง
- 2.จากการทดลองเครื่องต้นแบบสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไซเคิลระหว่าง 0-100 % ได้เช่นเดียวกับกรณีเลื่อนเฟสของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์
3. จากการทดลองเคาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูงโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมแรงดันเอาต์พุตสามารถใช้งานได้จริงโดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดได้ 1150 วัตต์ที่ความถี่สวิช 33.4 kHz โดยใช้เวลาในการหุงต้มน้ำ 0.5 ลิตร ให้เดือดได้ภายใน 2.5 นาที โดยค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าระหว่าง 80-92%

เอกสารอ้างอิง

[1] Jae-Eul Yeon, Kyu-Min Cho, Won-Seok Oh, Hee-Jun Kim "A Novel Half-Bridge Resonant Inverter Having Load-Freewheeling Modes", 2004 35th Annual IEEE power Electronics Specialists Conference ,หน้า 1304-1307

[2] สติโชค สินรัตน์, วิริยะ พิเชฐจันธิชัย "เคาหุงต้มเหนียวนำความถี่สูงชนิดปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 2544, หน้า 488-493

ประวัติผู้เขียนบทความ



เจนณรงค์ เสนามนตรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน



วิริยะ พิเชฐจันธิชัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญาโทจากมหาวิทยาลัยโตเกียว และปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเมจิ ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ทำงานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



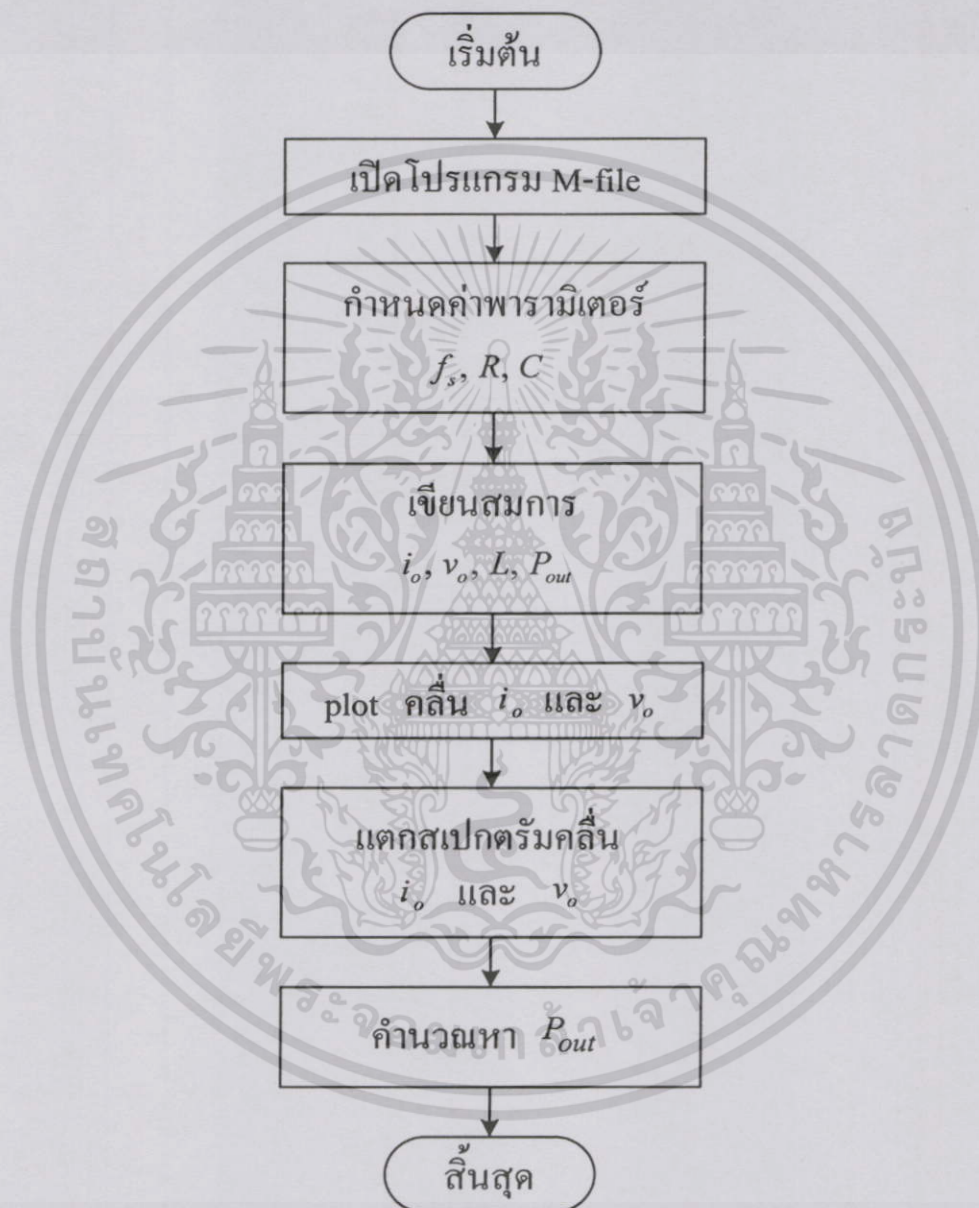
ภาคผนวก ข.

โพลซาร์จขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

พลซาร์จแสดงขั้นตอนการคำนวณคุณสมบัติทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์
ด้วยโปรแกรม MATLAB





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตระหว่างสมการ (1) และ (2)

$$P_o = \sum_{n=1}^{\infty} (V_{on} I_{on}) \cos \theta_n \quad (1)$$

$$P_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o i_o dt \quad (2)$$

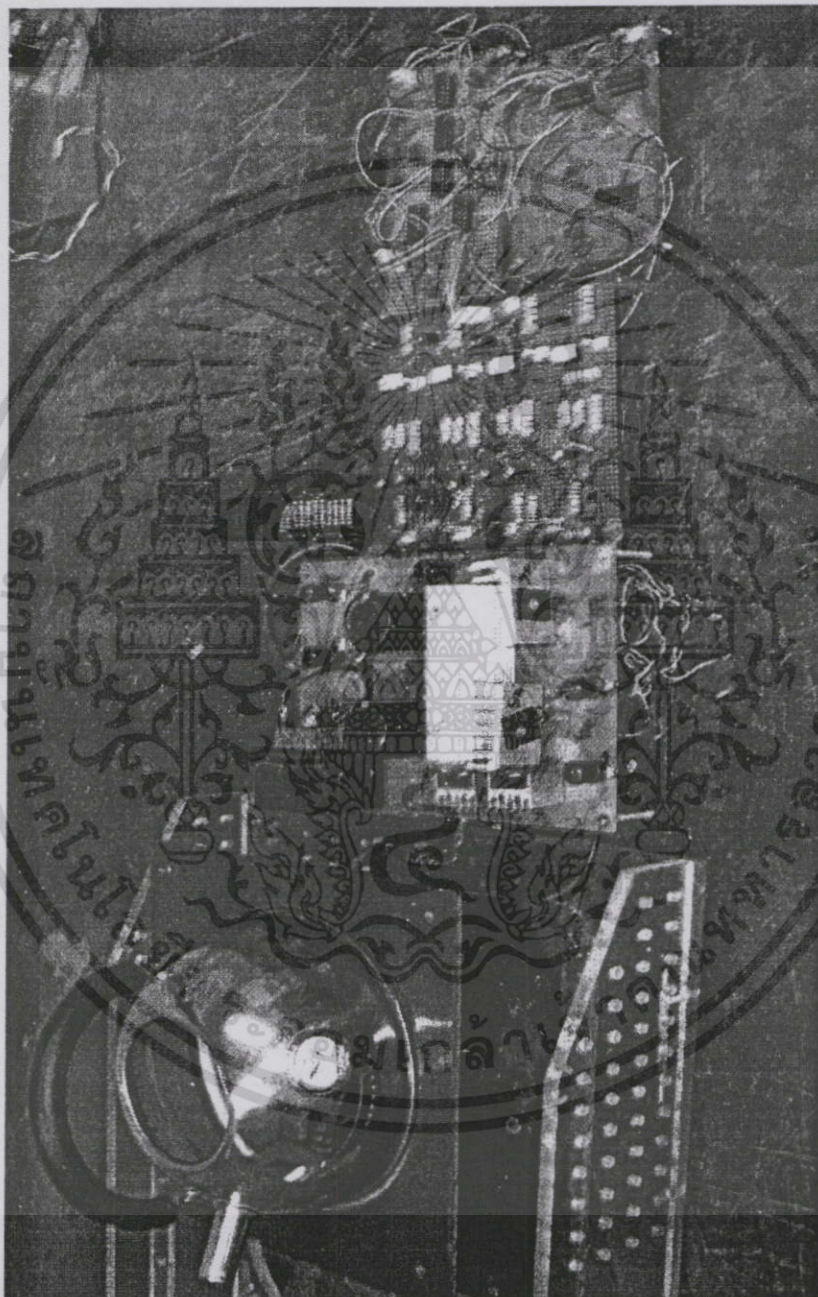
มุมเฟส (ϕ)	คำนวณโดยใช้ (1) โดยที่ $n=1$ ถึง 15	คำนวณโดยใช้ (2)
0°	1040	1040
10°	1001	1002
20°	936	936
30°	837	838
40°	743	744
50°	618	619
60°	552	552
70°	399	397
80°	287	287
90°	208	209
100°	142	142
110°	72	72
120°	55	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปเครื่องทดลองต้นแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

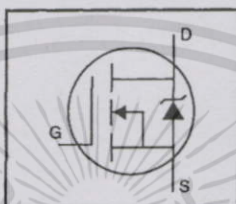
International
IR Rectifier

PD-9.512B

IRFP460

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = 500V$$

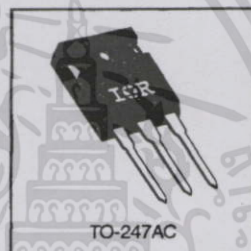
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



DATA
SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{ V}$	20	A
I_D @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{ V}$	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	80	
P_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	3.5	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1 N·m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

1025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	$V/^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=12A$ ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=12A$ ③
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
		—	—	250	μA	$V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS}=-20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	$I_D=20A$
Q_{GS}	Gate-to-Source Charge	—	—	29	nC	$V_{DS}=400V$
Q_{GD}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110	nC	$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	$V_{DD}=250V$
t_r	Rise Time	—	59	—	ns	$I_D=20A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	110	—	ns	$R_G=4.3\Omega$
t_f	Fall Time	—	58	—	ns	$R_D=13\Omega$ See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—	nH	
C_{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	$V_{DS}=0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	870	—	pF	$V_{DS}=25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—	pF	$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=20A, V_{GS}=0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_F=20A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	$di/dt=100A/\mu\text{s}$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② $V_{DD}=50V$, starting $T_J=25^\circ\text{C}$, $L=4.3\text{mH}$, $R_G=25\Omega$, $I_{AS}=20A$ (See Figure 12)
- ③ $I_{SD}\leq 20A$, $di/dt\leq 160A/\mu\text{s}$, $V_{DD}\leq V_{(BR)DSS}$, $T_J\leq 150^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width $\leq 300\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460

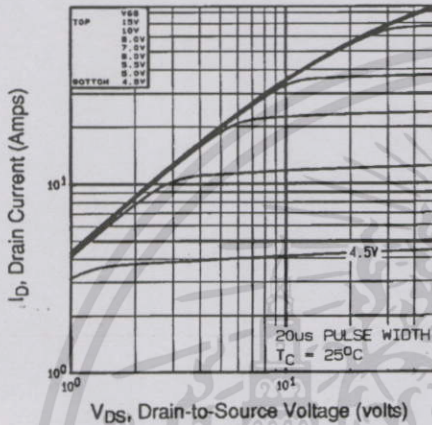


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

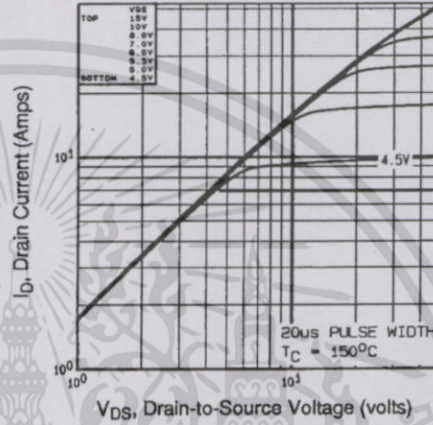


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=150^\circ\text{C}$

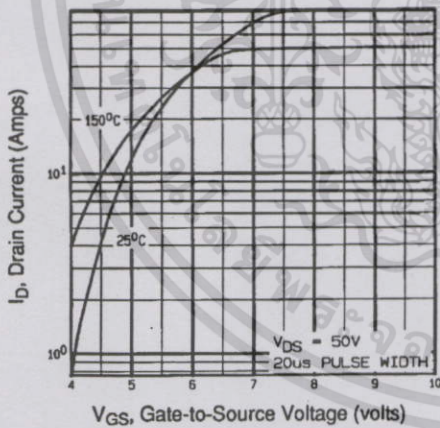


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

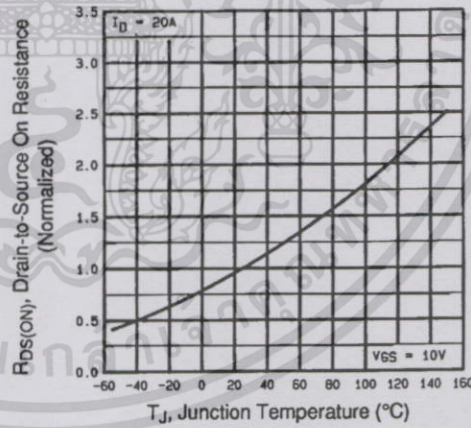


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

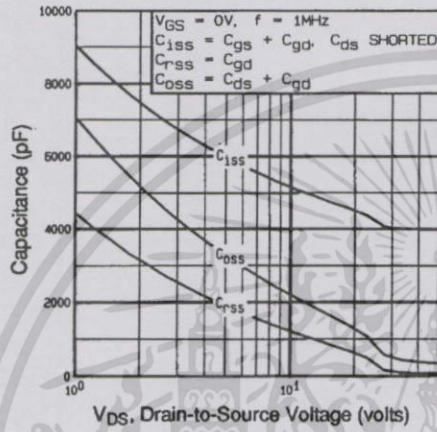


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

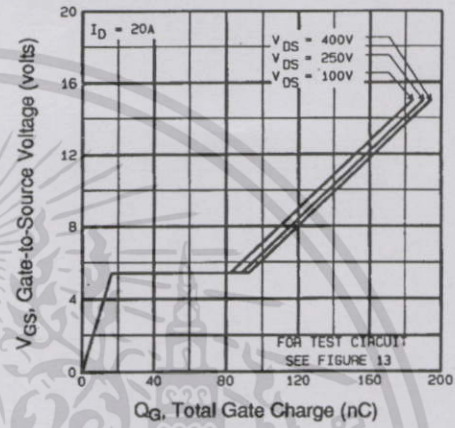


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

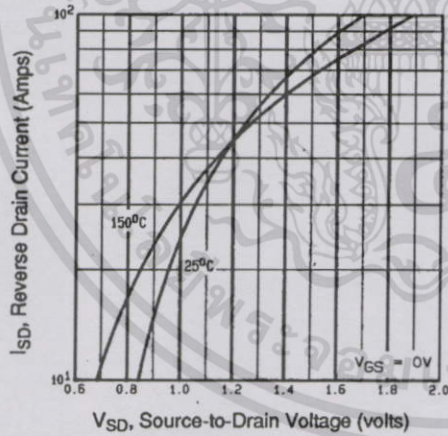


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

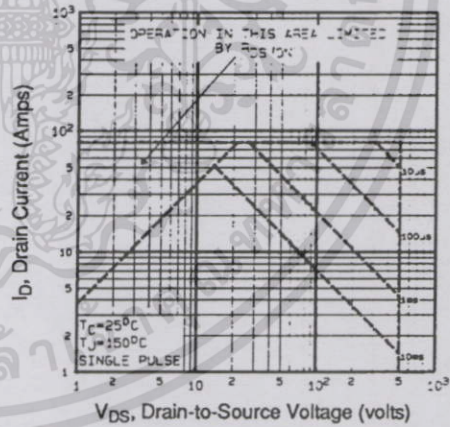


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP460

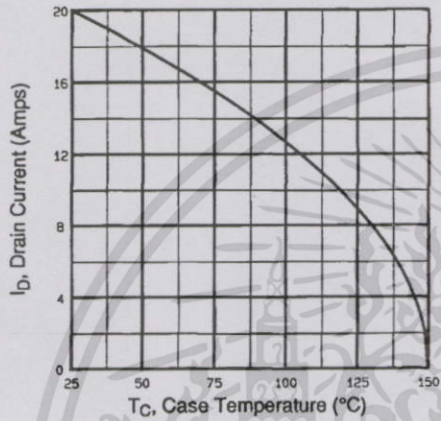


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

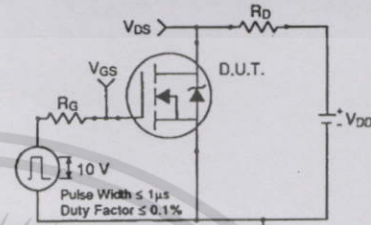


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

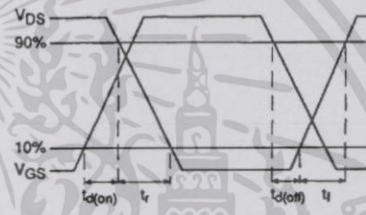


Fig 10b. Switching Time Waveforms

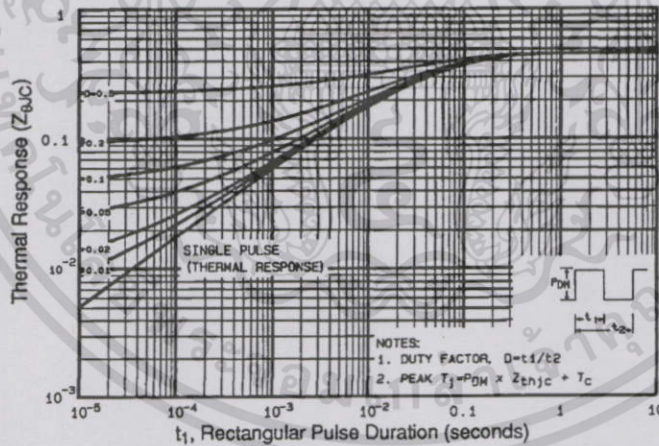


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

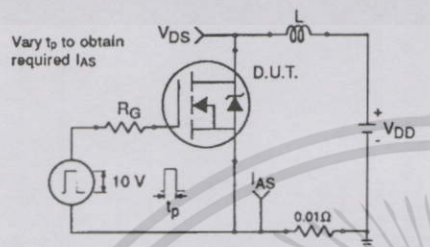


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

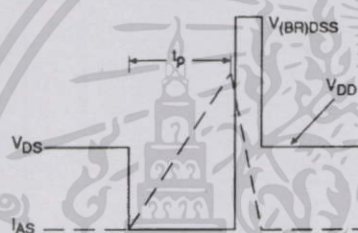


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

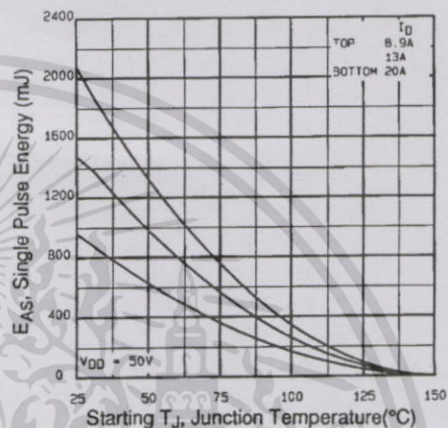


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

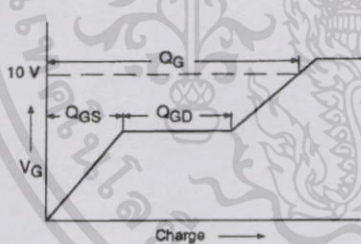


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

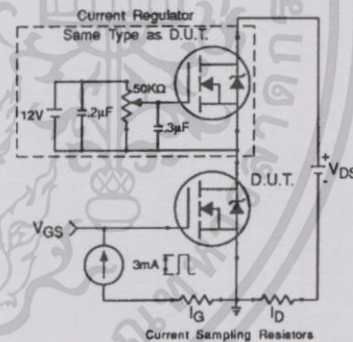


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นาย เจนณรงค์ เสนามนตรี

วัน เดือน ปีเกิด 24 สิงหาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอekinบุรี จังหวัดปราจีนบุรี

ประวัติการศึกษา พ.ศ 2545 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคปราจีนบุรี

พ.ศ 2548 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัย

พ.ศ.2550

1) บทความเรื่อง "High-Frequency Half-Bridge Inverter with Phase-Shift Power Control" ฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ความถี่สูง ควบคุมกำลังไฟด้วยการเลื่อนเฟส การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45 หน้า 405-411

2) บทความเรื่อง "Analysis of Half-Bridge Resonant Inverter with Output Voltage Control for High-Frequency Induction Cooking" การวิเคราะห์เรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อใช้ในงานเตาหุงต้ม เหนี่ยวนำความถี่สูง การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON) ครั้งที่ 30, 2550 หน้า 385-388 เล่ม 1

ปัจจุบัน

เป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท บัณฑิตวิทยาลัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง