

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์อุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง ที่มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ด้านเข้าโฟลต์เป็น 1
นักศึกษา	นาย ธรรมจักร กงวิรัตน์
รหัสประจำตัว	48060205
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอหลักการคำนวณองค์ประกอบพินดาเมนทอลของกระแสโพลาร์โซแนนท์อนุกรมของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงภายใต้เงื่อนไขการป้อนแรงดันอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะคลื่น 50-Hz ที่เร็กติไฟแล้ว องค์ประกอบของกระแสโพลาร์ที่คำนวณได้นี้สามารถนำไปสู่การคำนวณหาคลื่นกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz ที่ให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่แหล่งจ่ายเป็น 1 โดยการนำกระแสคี่ซึ่งประกอบขึ้นจากองค์ประกอบความถี่สูงซึ่งได้จากกระแสพินดาเมนทอลของโพลาร์ผ่านวงจรฟิลเตอร์ เพื่อให้กระแสที่ดึงจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz เป็นกระแสไซน์บริสุทธิ์ ที่อินเฟสกับแรงดันการไฟฟ้า 50-Hz คลื่นกระแสทั้ง 3 ที่คำนวณได้ในวงจร ยังสามารถนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า P_o ด้านเอซีเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ค่ากำลังไฟฟ้า P_d ด้านดีซีอินพุตอินเวอร์เตอร์ ตลอดจนค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ด้านแหล่งจ่ายอินพุตการไฟฟ้า ผลการคำนวณทางทฤษฎีทั้งหมดยังได้นำมายืนยันความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งได้จากเครื่องทดสอบต้นแบบขนาด 1,800 W ซึ่งปรากฏว่าได้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก

Thesis Title	Analysis of High-Frequency Induction Heating with Unity AC Line Input Power Factor
Student	Mr. Thammachat Kongwirat
Student ID.	48060205
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Viriya Phichetjamroen

ABSTRACT

This thesis presents a principle for calculation of fundamental component of series resonant load current of induction heating energized with a high-frequency inverter under the inverter input voltage of rectified 50-Hz waveform. This calculated load component current can lead to the calculation of 50-Hz utility supply current waveform which effectively results in a unity ac input power factor by filtering the DC current of high-frequency component waveform which is determined from this load fundamental current to obtain a pure sinusoidal inphase current drawn from 50-Hz utility supply. These three calculated currents can also lead to the calculation of AC output power P_o and DC input power P_d of the inverter and also the input power P_{in} of the 50-Hz utility supply. All these theoretical results are also verified by experimental ones, using the prototype test-set of 1,800 W and the two results are in very good agreement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ ตลอดจนคำปรึกษาในด้านต่างๆเกี่ยวกับการดำเนินงาน จากท่านอาจารย์ รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ยงยุทธ นารายณ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม , คุณ โรมัส ธรรมาธิฐาน และ อาจารย์ศักดิ์พรหมเหมือน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำ ทั้งทางด้านการเขียนโปรแกรม รวมไปถึงการปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์ต่างๆ และขอขอบคุณเพื่อนๆที่ทุกคนที่ได้เสียสละทั้งร่างกาย แรงใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อปราโมทย์ และคุณแม่วัฒนา กงวิรัตน์ ซึ่งเป็นที่เคารพยิ่ง อีกทั้งยังเป็นผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจ ตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัย จวบจนสำเร็จการศึกษา

สำหรับคุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบคุณค่าต่างๆเหล่านี้แด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษา เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่างๆ และสามารถพัฒนาประเทศชาติได้ต่อไป

ธรรมนัตร กงวิรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของวงจรฟูลบริดจ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ใช้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 หลักการพื้นฐานการเกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	7
2.3 หลักการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับชิ้นงาน	10
2.3.1 ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า50-Hz และวงจรฟิเตอร์	11
2.3.2 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.3.3 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง	12
2.3.4 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและชิ้นงาน	14
2.3.4.1 หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ความถี่สูง.....	14
2.3.4.2 ตัวเก็บประจุความถี่สูง กระแสสูง.....	14
2.3.4.3 ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน.....	15

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4 โหลดเรโซแนนท์	15
2.5 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม.....	22
2.5.1 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการปรับมุม Phase-Shift : ϕ	22
2.5.2 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Pulse Density Modulation	24
2.5.3 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Asymmetrical Voltage Controlled	26
2.5.4 การปรับควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Pulse Frequency Modulation	27
2.6 โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	30
2.6.1 หลักการทำงานของโหมด 1 Regenerative mode	32
2.6.2 หลักการทำงานของโหมด 2 Powering mode	33
2.6.3 หลักการทำงานของโหมด 3 Regenerative mode	34
2.6.4 หลักการทำงานของโหมด 4 Powering mode	35
2.7 สรุป	36
 บทที่ 3 การวิเคราะห์หลักการทำงานของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงจาก ด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์มายังด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์	38
3.1 บทนำ	38
3.2 การทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการ เหนี่ยวนำความถี่สูง	42
3.3 การวิเคราะห์สมการคลื่นแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันคี่ซึ่ เร็กติไฟาย	43
3.4 การวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาสมการแรงดันและกระแสฟลักซ์ในคาเมนทอลทางด้านเอาต์พุต ของอินเวอร์เตอร์	45
3.5 การคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	49
3.6 สรุป	53
 บทที่ 4 การวิเคราะห์หลักการทำงานของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง จากด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มายังด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz	54

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1 บทนำ	54
4.2 การวิเคราะห์วงจรจากด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มายังด้านอินพุต ของอินเวอร์เตอร์	55
4.2.1 การพิจารณาค่ากระแสทางด้านดีซีในแต่ละช่วงย่อยเพื่อนำไปคำนวณร่วมกับ แรงดันดีซีเรกติฟายในแต่ละสแต็ปย่อยทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์	55
4.2.2 การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	58
4.3 การวิเคราะห์สมการคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า	62
4.4 สรุป	66
บทที่ 5 ผลการทดลองและผลการซิมูเลต	67
5.1 บทนำ	67
5.2 ขั้นตอนการดำเนินการ	67
5.2.1 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง	69
5.2.2 ขั้นตอนการซิมูเลตด้วยโปรแกรม MATLAB	71
5.3 การเปรียบเทียบผลการซิมูเลต และผลการทดลอง คลื่นแรงดันและกระแส	71
5.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ของระบบรวม	76
5.5 สรุป	78
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม	81
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก. ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	84
ภาคผนวก ข. โฟลชาร์จขั้นตอนการซิมูเลตด้วยโปรแกรม MATLAB	90
ภาคผนวก ค. อุปกรณ์	92
ประวัติผู้เขียน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและชนิดขนาน	16
2.2 การเปรียบเทียบลักษณะของอุปกรณ์และรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมและชนิดขนาน	17
5.1 อุปกรณ์และค่าพิกัดต่างๆ ของวงจรอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ที่มีการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดเป็น 1 ที่ใช้ในการทดลองจริง	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 บล็อกแสดงแนวคิดของระบบโดยรวมของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating)	3
2.1 ลักษณะชิ้นงานต่างๆ ที่ต้องการทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	6
2.2 ลักษณะการไหลวนของกระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงที่ชิ้นงาน	7
2.3 หม้อแปลง Step-down ความถี่สูง	9
2.4 ลักษณะรูปทรงแกนเฟอร์ไรท์ขนาดต่างๆ ที่นำมาใช้ในหม้อแปลง Step-down ความถี่สูง	9
2.5 โครงสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงที่ทำให้เกิดความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง	10
2.6 ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันคี่ซีกเรกติฟาย 100 Hz	11
2.7 ภาคแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz และวงจร LC ฟิลเตอร์	11
2.8 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์	13
2.10 คลื่นแรงดันและกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์และชนิดฮาล์ฟบริดจ์	13
2.11 ภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง	14
2.12 ภาคหม้อแปลงความถี่สูง ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อน และชิ้นงาน	15
2.13 วงจร RLC อนุกรมและวงจรเฟสเซอร์	17
2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง	19
2.15 ผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ค่า Quality factor ต่างๆ	21
2.16 คลื่นแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ	22
2.17 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มุม Phase-Shift ต่างๆ	23
2.18 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ	24
2.19 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จำนวนไซเคิลต่างๆ	25
2.20 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กรณีที่มีการเลื่อนแรงดันแบบไม่สมมาตรที่มุม ϕ ต่างๆ	26
2.21 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มีการเลื่อนแรงดันแบบไม่สมมาตรที่มุม ϕ ต่างๆ	27

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 คลื่นแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กรณีกวควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการ Pulse Frequency Modulation	28
2.23 กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ค่าความถี่สวิตช์ต่างๆ	29
2.24 การเปลี่ยนแปลงค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสมมูล (X_L) , ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บ ประจุเรโซแนนท์ (X_C) และ ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z) ของโหลดเรโซแนนท์ เมื่อความถี่สวิตช์อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนแปลง	30
2.25 โหมดการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์เรโซแนนท์แบบอนุกรม	31
2.26 Mode 1 Regenerative mode	32
2.27 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ ใน Mode 1 Regenerative mode	32
2.28 Mode 2 Powering mode	33
2.29 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ ใน Mode 2 Powering mode	33
2.30 Mode 3 Regenerative mode	34
2.31 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ ใน Mode 3 Regenerative mode	34
2.32 Mode 4 Powering mode	35
2.33 คลื่นแรงดันและกระแสทางเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และคลื่นสัญญาณการทำงานของสวิตช์ ใน Mode 4 Powering mode	35
3.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน ด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง(Induction Heating) กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุตของ อินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นคลื่นแรงดันคี่ซึตรงเรียบ	39
3.2 ลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า (v_s) และคลื่นกระแสทางด้านแหล่งจ่ายการ ไฟฟ้า(i_s) ในกรณีที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันคี่ซึตรงเรียบที่ได้จากการ ทดลอง ($x : 2ms / div$)	39
3.3 ลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์(v_o) และคลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุต อินเวอร์เตอร์ (i_o) ในกรณีที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันคี่ซึตรงเรียบที่ได้จากการ ทดลอง ($x : 2ms / div$)	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (v_o) และคลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (i_o) ในกรณีที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยมที่ได้อ	
จากการทดลอง ($x : 50\mu s / div$)	40
3.5 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) กรณีที่แรงดันทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยมรีกติฟาย 100 Hz	40
3.6 ลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า (v_s) และคลื่นกระแสทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า (i_s) ในกรณีที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยมรีกติฟาย 100 Hz ที่ได้อจากการทดลอง ($x : 2ms / div$)	41
3.7 ลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (v_o) และคลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (i_o) ในกรณีที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยมรีกติฟาย 100 Hz ที่ได้อจากการทดลอง ($x : 2ms / div$)	41
3.8 ลักษณะคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (v_o) และคลื่นกระแสทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (i_o) ในกรณีที่อินพุตของอินเวอร์เตอร์เป็นคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยมรีกติฟาย 100 Hz ที่ได้อจากการทดลอง ($x : 50\mu s / div$)	41
3.9 องค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ที่มีการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดเป็น 1	43
3.10 ค่าเฉลี่ยแรงดันเรกติฟายในแต่ละช่วงย่อย	44
3.11 การพิจารณาแรงดันเอชิสแควร์ $v_{ok,n}$ ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์จากค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงย่อยของแรงดันสี่เหลี่ยมรีกติฟาย V_{dk}	44
3.12 การพิจารณาแรงดันเอชิสแควร์ $v_{ok,n}$ ด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ $k = 1, 2$ และ 3	45
3.13 การพิจารณาแรงดันเอชิสแควร์ $v_{ok,n}$ ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่ k ใดๆ	46
3.14 การป้อนแรงดันเอชิสแควร์ $v_{ok,n}$ ด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ให้กับวงจร RLC เรโซแนนท์แบบอนุกรม	46
3.15 อธิบายการวิเคราะห์แรงดันในวงจรเรโซแนนท์อนุกรมที่มีแหล่งจ่ายเป็นแรงดันขึ้นบันได	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และ กระแส i_o ที่ได้จากการชิมมูลเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ($x : 2ms / div$)	48
3.17 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ที่ได้จากการชิมมูลเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ($x : 1ms / div$)	48
3.18 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ที่ได้จากการชิมมูลเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ($x : 500\mu s / div$)	48
3.19 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ที่ได้จากการชิมมูลเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ($x : 200\mu s / div$)	48
3.20 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ที่ได้จากการชิมมูลเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ($x : 100\mu s / div$)	49
3.21 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ที่ได้จากการชิมมูลเปรียบเทียบกับการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ($x : 2\mu s / div$)	49
3.22 อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_{o1} ทางด้านเอชไอเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ในสแต็ปช่วงย่อยที่ 1	49
3.23 อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_{o2} ทางด้านเอชไอเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ในสแต็ปช่วงย่อยที่ 2	51
3.24 อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอชไอเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ในสแต็ปช่วงย่อยใดๆ	52
4.1 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) เมื่อทำการพิจารณาหาค่ากระแสทางด้านดีซีอินพุตอินเวอร์เตอร์จาก ค่ากระแสทางด้านเอชไอเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์	55
4.2 ลักษณะที่มาของคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ จากคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการชิมมูล ($x : 2ms / div$)	57
4.3 อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_{dk} ทางด้านดีซีอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ในแต่ละสแต็ปย่อยของคลื่นแรงดัน v_d ที่ k ใดๆ	57
4.4 อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_{d1} ทางด้านดีซีอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ที่ $k=1$	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_{d2} ทางด้านดีซีอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ที่ $k=2$	59
4.6 อธิบายการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า P_{dk} ทางด้านดีซีอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ที่ k ใดๆ	60
4.7 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ($x : 2ms / div$)	61
4.8 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ($x : 1ms / div$)	61
4.9 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ($x : 500\mu s / div$)	61
4.10 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ($x : 200\mu s / div$)	62
4.11 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์ ($x : 100\mu s / div$)	62
4.12 อธิบายการหาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกระแสดีซี i_{dk} ทางด้านอินพุทของอินเวอร์เตอร์กับ กระแสที่ดึงจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz i_s	63
4.13 ลักษณะรูปคลื่นแรงดัน v_{sn} และกระแส i_{sn} ที่ได้จากผลการทดลองทางด้านอินพุท อินเวอร์เตอร์ กรณีที่ยังไม่ผ่านวงจรฟิลเตอร์	63
4.14 ลักษณะสเปกตรัมแรงดัน v_{sn} ที่ได้จากผลการทดลองทางด้านอินพุทเร็กติฟาย กรณีที่ยังไม่ผ่านวงจรฟิลเตอร์	63
4.15 ลักษณะสเปกตรัมกระแส i_{sn} ที่ได้จากผลการทดลองทางด้านอินพุทเร็กติฟาย กรณีที่ยังไม่ผ่านวงจรฟิลเตอร์	64
4.16 ลักษณะคลื่นแรงดัน v_{sn} และกระแส i_{sn} ที่ได้จากผลการทดลองที่ผ่านวงจรฟิลเตอร์แล้ว ทำให้ได้คลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz	64
4.17 ลักษณะสเปกตรัมแรงดัน v_s ที่ได้จากผลการทดลองทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz	64
4.18 ลักษณะสเปกตรัมกระแส i_s ที่ได้จากผลการทดลองทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า 50-Hz	65
4.19 ลักษณะรูปคลื่นที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลองทางด้านแหล่งจ่ายการ ไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิใช้งาน 400 °C	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating) ที่มีการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ให้มีค่าสูงสุดเป็น 1 ที่ใช้ในการทดลองจริง67
5.2	แสดงลักษณะ working coil ที่ใช้ทดสอบในวงจรอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating)70
5.3	ตำแหน่งการทดลองเก็บผลทางด้านเอาต์พุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลด เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C71
5.4	ลักษณะคลื่นแรงดัน v_o และกระแส i_o ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C72
5.5	ตำแหน่งการทดลองเก็บผลทางด้านอินพุตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มีโหลด เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C72
5.6	ลักษณะคลื่นแรงดัน v_d และกระแส i_d ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C72
5.7	ตำแหน่งการทดลองเก็บผลทางแหล่งจ่ายการไฟฟ้าของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่มี โหลดเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยการทดสอบภายใต้ เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C73
5.8	ลักษณะคลื่นแรงดัน v_s และกระแส i_s ที่ได้จากการซิมูเลตเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C73
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลง ตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C	74
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C	75
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ PF ด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C	75
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพ η ของวงจรรวมระหว่างเรกติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้าด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข working coil = 4 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C	76
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_o ทางด้านเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 2 , 3 , 4 , 5 , 6 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C	77
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_d ทางด้านอินพุตอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 2 , 3 , 4 , 5 , 6 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C	77
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า P_{in} ทางด้านแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามกระแสแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ด้วยการทดสอบภายใต้เงื่อนไขของ working coil = 2 , 3 , 4 , 5 , 6 turns ที่อุณหภูมิขึ้นงาน 400 °C	78
6.1 ชุดทดลองอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำความถี่สูง (Induction Heating)	80