

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความถี่ของการสวิตช์ที่สถานะเรโซแนนซ์แบบ อัตโนมัติโดยใช้เฟสล็อกกลูป สำหรับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ
นักศึกษา	นายไพโรจน์ ทองประศรี
รหัสนักศึกษา	47060258
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตนัสัจจา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการควบคุมความถี่ในการสวิตช์ที่สถานะเรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติโดยใช้เฟสล็อกกลูป (Phase Lock Loop : PLL) สำหรับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ หลักการของการควบคุมมีการใช้วงจรตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ (Phase Frequency Detector : PFD) ในการหาค่าความคลาดเคลื่อนของเฟส (Phase Error) ของแรงดันและกระแสของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน โดยผลความคลาดเคลื่อนของเฟสนี้นำไปใช้สร้างสัญญาณสำหรับการขับมอสเฟตของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้วงจรกำเนิดความถี่ (Voltage Controlled Oscillator) ผลที่ได้คือวงจรอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานที่สถานะเรโซแนนซ์ได้และระบบจะเกิดการส่งถ่ายกำลังงานสูงสุด เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้าจากการให้ความร้อน วงจรควบคุมที่นำเสนอนี้ยังคงสามารถที่จะควบคุมกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลดให้อยู่ในสถานะเรโซแนนซ์ได้

Thesis Title	Automatic resonant frequency control using Phase Lock Loop for an Induction Furnace
Student	Mr.Pairote Thongprasri
Student ID.	47060258
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Supat Kittiratsatcha

ABSTRACT

This thesis proposes the automatic switching frequency control in resonant condition by using Phase Lock Loop (PLL) for an Induction furnace. The control principle uses a Phase Frequency Detector (PFD) to detect the Phase Error between voltage and current of the parallel resonant circuit. This error is fed to the voltage Controlled Oscillator to generate the gating signal for MOSFET of the inverter. Consequently, the inverter operates in resonant condition and there is maximum power transfer to the load. Furthermore, when the electric and magnetic properties of the load have changed due to the rising temperature, this proposed method is still controlling the inverter to operate in resonant condition.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ และการให้คำปรึกษาจาก ผศ.ดร.สุวัฒน์ กิตติรัตน์ตัจจา ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.สมภพ ผลไม้ และ รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสามท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บริษัท SIG Combibloc Ltd.(Head Office) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาจนจบหลักสูตร

ขอขอบคุณ คุณศุภโชค แจ่มกระจ่าง กรรมการผู้จัดการ หจก.ธินัชรินทร์ ที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการสนับสนุนทุนในการทำวิจัยจนประสบผลสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องทำวิจัย ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ไพโรจน์ ทองประศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะรับ.....	4
บทที่ 2 การหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ.....	5
2.1 พื้นฐานการเกิดความร้อนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	5
2.2 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอม.....	7
2.2.1 การให้พลังงานไฟฟ้าทางอ้อม.....	7
2.2.2 การให้พลังงานไฟฟ้าทางตรง.....	7
2.3 การวิเคราะห์ขดลวดสมมูลของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก.....	13
2.3.1 เส้นแรงแม่เหล็กที่ค้ำยันผ่านเบ้าหลอม.....	13
2.3.2 เส้นแรงแม่เหล็กที่ค้ำยันผ่านอากาศ.....	14
2.3.3 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ค้ำยันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก.....	14
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรเรโซแนนซ์.....	17
2.4.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	17
2.4.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	20
2.5 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส.....	24
2.5.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของโหลดเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้า.....	25
2.5.3 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	26
2.5.3 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์.....	27
บทที่ 3 เฟสล็อกกลุ๊ป.....	29
3.1 บทนำ.....	29
3.2 ลิเนียร์เฟสล็อกกลุ๊ป.....	29
3.2.1 วงจรกรอกลุ๊ป.....	30
3.2.2 การทำงานของลิเนียร์เฟสล็อกกลุ๊ปในสภาวะล็อก.....	32
3.3 คลาสซิคอลดิจิตอลเฟสล็อกกลุ๊ป.....	35
3.3.1 รูปแบบของคลาสซิคอลดิจิตอลเฟสล็อกกลุ๊ป.....	35
3.3.2 ตัวตรวจจับเฟสแบบดิจิตอล.....	36
3.3.2.1 ตัวตรวจจับเฟสแบบเอกซ์คลูซีฟออร์เกท.....	36
3.3.2.2 ตัวตรวจจับเฟสแบบ JK ฟลิปฟลอป.....	38
3.3.2.3 ตัวตรวจจับเฟสแบบ เฟส-ความถี่.....	40
3.3.3 การทำงานของลิเนียร์เฟสล็อกกลุ๊ปในสภาวะล็อก.....	43
บทที่ 4 อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสที่มีระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ.....	46
4.1 บทนำ.....	46
4.2 ระบบควบคุมของเครื่องหลอมแบบเหนี่ยวนำชนิดแหล่งจ่ายกระแส.....	46
4.2.1 แหล่งจ่ายกระแส.....	47
4.2.2 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์.....	50
4.2.3 สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟตในวงจรอินเวอร์เตอร์.....	50
4.2.4 ระบบเฟสล็อกกลุ๊ป.....	52
บทที่ 5 การทดลองอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสที่ระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ.....	61
5.1 การทดสอบแหล่งจ่ายกระแส.....	61
5.2 การทดสอบสัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟตในวงจรอินเวอร์เตอร์.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การทดสอบระบบเฟสลือกกลุ่ม.....	68
5.4 การทดสอบวงจรวัดแรงดันที่โหลด.....	77
5.5 การทดสอบระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ.....	79
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก. โปรแกรมของ MCS-51ที่ใช้ในการควบคุมกระแสดีซี ลิงค์.....	98
ภาคผนวก ข. โปรแกรมของ MCS-51(AT89LP4052)ที่ใช้ควบคุมระบบ.....	103
ภาคผนวก ค. รูปภาพเครื่องมือที่ใช้สำหรับทดลอง.....	108
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ω_n และ ζ ของกลศาสตร์คอลลิดิจิตอลเฟสล็อกกลุ่ม.....	45
5.1 เปรียบเทียบค่าความถี่เรโซแนนซ์จากการคำนวณและจากการทดลอง.....	74
5.2 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะไม่มีชิ้นงานเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 1.8 A.....	87
5.3 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะไม่มีชิ้นงานเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 5.5 A.....	88
5.4 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะไม่มีชิ้นงานเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 6.8 A.....	89
5.5 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะไม่มีชิ้นงานเมื่อควบคุมกระแสดีซี ลิงค์ ที่ 7.9 A.....	90
5.6 ข้อมูลที่ได้จากการวัดขณะหลอมชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 °C	92

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงบล็อกไดอะแกรม การทำงานของ Phase-Locked Loop.....3
2.1	ลักษณะการไหลวนของกระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดและชิ้นงาน.....6
2.2	วงจรเสมือนของขดลวดให้ความร้อน.....6
2.3	การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอมทางอุดมคติ.....7
2.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับผิวเบ้าหลอม.....10
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวเบ้าหลอม.....12
2.6	พล็อตสนามแม่เหล็กคล่องผ่านเบ้าหลอมและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก.....13
2.7 (a)	วงจรสมมูลทางแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำ.....15
2.7 (b)	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ.....15
2.8 (a)	วงจร RLC อนุกรม.....18
2.8 (b)	ความสัมพันธ์ของ X_L และ X_C ต่อความถี่สำหรับวงจร RLC อนุกรม.....18
2.9	อิมพีแดนซ์รวม และกระแสที่ไหลในวงจร RLC อนุกรม ที่ความถี่ต่างๆ.....19
2.10 (a)	วงจร RLC แบบขนาน.....20
2.10 (b)	ความสัมพันธ์ของ X_L และ X_C ต่อความถี่สำหรับวงจร RLC แบบขนาน.....20
2.11	อิมพีแดนซ์รวม และกระแสที่ไหลในวงจร RLC แบบขนานที่ความถี่ต่างๆ.....21
2.12	วงจรเทงค์.....22
2.13	วงจร RLC แบบขนาน.....23
2.14	อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส.....24
2.15	วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้วงจร.....24
2.16	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันที่โหลดในสภาวะเรโซแนนซ์.....26
2.17	รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (รูปร่างสัญญาณของกระแสจะล้าหลังรูปร่างสัญญาณแรงดัน ($\zeta < 1$)).....27
2.18	รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (รูปร่างสัญญาณของกระแสจะนำหน้ารูปร่างสัญญาณแรงดัน ($\zeta > 1$)).....28
3.1	รูปแบบของลิเนียร์เฟสบล็อกคู่.....30
3.2	วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟเล็กฟิลเตอร์.....30
3.3	ผลตอบสนองของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟเล็กฟิลเตอร์.....30
3.4	วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบแอกทีฟเล็กฟิลเตอร์.....31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	ผลตอบสนองของวงจรถองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบแอกทีฟ แล็กฟิลเตอร์.....	31
3.6	วงจรถองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบแอกทีฟ PI ฟิลเตอร์.....	32
3.7	ผลตอบสนองของวงจรถองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านแบบ PI ฟิลเตอร์.....	32
3.8	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลิเนียร์เฟสบล็อกคู่.....	33
3.9	โครงสร้างของกลาสซิคอลดิจิตอลเฟสบล็อกคู่.....	36
3.10	ตัวตรวจจับเฟสแบบเอ็กซ์คูซิฟออร์เกท.....	37
3.11	แสดงความแตกต่างค่าผิดพลาดเฟส θ_e เท่ากับศูนย์.....	37
3.12	แสดงความแตกต่างค่าผิดพลาดเฟส θ_e มากกว่าศูนย์.....	37
3.13	สัญญาณเอาต์พุต \bar{v}_e ของตัวตรวจจับเฟสแบบเอ็กซ์คูซิฟออร์เกท.....	38
3.14	ตัวตรวจจับเฟสแบบ JK ฟลิปฟลอป.....	38
3.15	แสดงความแตกต่างค่าผิดพลาดเฟส θ_e เท่ากับศูนย์.....	38
3.16	แสดงความแตกต่างค่าผิดพลาดเฟส θ_e มากกว่าศูนย์.....	39
3.17	สัญญาณเอาต์พุต \bar{v}_e ของตัวตรวจจับเฟสแบบ JK ฟลิปฟลอป.....	39
3.18	ตัวตรวจจับเฟสแบบ เฟส-ความถี่.....	40
3.19	การเปลี่ยนสถานะของตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่.....	41
3.20 (a)	เมื่อสัญญาณ v_i และ v_o มีเฟสเท่ากันพอดี.....	41
3.20 (b)	เมื่อสัญญาณ v_i นำหน้า v_o	42
3.20 (c)	เมื่อสัญญาณ v_i ล้าหลัง v_o	42
3.20 (b)	เมื่อสัญญาณ v_i นำหน้า v_o	42
3.21	กราฟสัญญาณเอาต์พุต \bar{v}_e ของตัวตรวจจับเฟสแบบ เฟส-ความถี่.....	42
3.22	ค่าวัฏจักรการทำงานของสัญญาณเอาต์พุต \bar{v}_e ของตัวตรวจจับเฟสแบบ เฟส-ความถี่.....	43
3.23	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดิจิตอลเฟสบล็อกคู่.....	44
4.1	แสดง Block diagram โดยใช้ PLL ควบคุมระบบ.....	46
4.2	แหล่งจ่ายกระแสที่มีระบบควบคุมกระแส DC Link ให้คงที่.....	47
4.3 (a)	วงจรถวลการจลนแบบเชิงเส้นซึ่งใช้แรงดันไฟตรงตัดสัญญาณสามเหลี่ยม.....	48
4.3 (b)	วงจรสำหรับขับสัญญาณ Q1 และ Q2.....	48
4.4	แผนผังการทำงานของกระบวนการควบคุมกระแสแบบลูปิด.....	49
4.5	แสดงวงจรของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายกระแสเต็มบริดจ์.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	วงจรสำหรับขับสวิตซ์อินเวอร์เตอร์.....	51
4.7	วงจรสร้างสัญญาณการเหลื่อม (Overlap).....	51
4.8 (a)	การจำลองการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณการเหลื่อมโดยใช้โปรแกรม Orcad/PSpice.....	52
4.8 (b)	ผลการจำลองการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณการเหลื่อม	52
4.9	รูปแบบที่ใช้จำลองการทำงานบน โปรแกรม PSCAD ของ PFD.....	53
4.10	แสดงผลการจำลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 มีเฟสตรงกับสัญญาณ U2.....	53
4.11	แสดงผลการจำลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 นำหน้าสัญญาณ U2.....	54
4.12	แสดงผลการจำลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 ล้าหลังสัญญาณ U2.....	54
4.13	วงจร Current-fed Parallel Inverter.....	55
4.14	วงจร Zero-crossing Detector.....	55
4.15	วงจรถูกกำหนดความถี่.....	56
4.16	วงจรถูกตรวจสอบเฟสแบบเฟส-ความถี่ และวงจรถูกตรวจสอบความถี่ต่ำผ่าน.....	56
4.17	ผลการจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์กระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลด มีเฟสตรงกัน.....	57
4.18	ผลการจำลองการทำงานเมื่อตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ ตรวจจับค่าความคลาด เคลื่อนของเฟสอยู่ในสภาวะนำหน้า.....	57
4.19	ผลการจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์กระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลด มีเฟสตรงกัน.....	58
4.20	ผลการจำลองการทำงานเมื่อตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่ ตรวจจับค่าความคลาด เคลื่อนของเฟสอยู่ในสภาวะล้าหลัง.....	58
4.21	ผลการจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์กระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขับโหลด มีเฟสตรงกัน.....	58
5.1	แสดงสัญญาณที่ผ่านการแยกโคจรทางแสง เพื่อใช้สำหรับจุดชนวนให้กับ SCR (Q_1 และ Q_2).....	61
5.2	แรงดันของวงจรเรียงกระแส โดยมี $\alpha > 90^\circ$	62
5.3	แรงดันของวงจรเรียงกระแส โดยมี $\alpha \approx 90^\circ$	62
5.4	แรงดันของวงจรเรียงกระแส โดยมี $\alpha \approx 30^\circ$	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.5	แรงดันของวงจรเรียงกระแสโดยมี $\alpha \approx 0^\circ$	63
5.6	รูปร่างของสัญญาณแรงดัน V_{AC} และกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ I_{AC} และแรงดันของวงจรเรียงกระแส V_{DC}	64
5.7	กระแสที่ไหลคกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสที่โหลด 80 โอห์ม.....	65
5.8	กระแสที่ไหลคกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสที่โหลด 20 โอห์ม.....	65
5.9	ผลตอบสนองต่อสเตปคำสั่งกระแส I_{dc}	66
5.10	สัญญาณสำหรับขั้วมอสเฟตทั้ง 2 คู่ มีสัญญาณเหลือมกัน 450 nS.....	67
5.11	สัญญาณสำหรับขั้วมอสเฟตทั้ง 2 คู่ มีสัญญาณเหลือมกัน 450 nS.....	67
5.12	สัญญาณสำหรับขั้วมอสเฟตทั้ง 2 คู่ มีสัญญาณเหลือมกัน 450 nS.....	68
5.13	ระบบการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ.....	68
5.14	แสดงผลการทดลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 มีเฟสตรงกับสัญญาณ U2.....	69
5.15	แสดงผลการทดลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 นำหน้าสัญญาณ U2.....	69
5.16	แสดงผลการทดลองการทำงานในกรณี สัญญาณ U1 ล้าหลังสัญญาณ U2.....	69
5.17	แสดงสัญญาณสำหรับขั้วเกตมอสเฟตนำหน้าสัญญาณกระแสสำหรับขั้วโหลด.....	71
5.18	สัญญาณกระแส (I_o) และแรงดัน (V_o) สำหรับขั้วโหลดอยู่ในสภาวะ มีเฟสตรงกันเมื่อทำการเลื่อนเฟสแรงดัน (V_o) ไปข้างหน้า $2 \mu S$	71
5.19	แผนผังการตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนของเฟส โดยใช้ MCS-51.....	71
5.20	วงจรที่ใช้ในการทดลองระบบควบคุมความถี่แบบอัตโนมัติ.....	72
5.21	สัญญาณกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขั้วโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการ ตรวจจับเฟส เมื่ออยู่ในสภาวะความถี่เรโซแนนซ์ค่า 13.24kHz.....	74
5.22	สัญญาณกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขั้วโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการ ตรวจจับเฟส เมื่ออยู่ในสภาวะความถี่เรโซแนนซ์ค่า 20kHz.....	75
5.23	สัญญาณกระแสและแรงดันที่ใช้สำหรับขั้วโหลด และสัญญาณที่ใช้ในการ ตรวจจับเฟส เมื่ออยู่ในสภาวะความถี่เรโซแนนซ์ค่า 29kHz.....	75
5.24	ผลตอบสนองต่อสเตปความถี่อินพุตของตัวตรวจจับเฟสแบบเฟส-ความถี่.....	76
5.25	ผลตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสตรงกับกระแสที่ใช้ในการขั้วโหลด.....	77
5.26	ผลตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โหลดมีเฟสนำหน้ากับกระแสที่ใช้ใน การขั้วโหลด.....	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.27	ผลตรวจจับแรงดันศูนย์เมื่อแรงดันที่โพลีมีเฟสล่าหลังกับกระแสที่ใช้ในการขับโหลด.....	78
5.28	มิติของขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนและเบ้าหลอม.....	79
5.29	วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	81
5.30	ไดอะแกรมจำลองการทำงานขณะไม่ได้ใส่ชิ้นงาน บนโปรแกรม PSCAD.....	84
5.31	รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดิวตี้ลิมิตที่ 1.8 A.....	85
5.32	รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดิวตี้ลิมิตที่ 5.5 A.....	85
5.33	รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดิวตี้ลิมิตที่ 6.8 A.....	86
5.34	รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดิวตี้ลิมิตที่ 7.9 A.....	86
5.35	รูปร่างของสัญญาณกระแสและแรงดันขาออก(หรือที่ตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ) เมื่ออยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์.....	87
5.36	รูปร่างของสัญญาณกระแสล่าหลังแรงดันเป็นมุม 10 องศา เมื่อเกิดอุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ 30 °C	88
5.37	รูปร่างของสัญญาณกระแสล่าหลังแรงดันเป็นมุม 15 องศา เมื่อเกิดอุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ 35 °C	89
5.38	รูปร่างของสัญญาณกระแสล่าหลังแรงดันเป็นมุม 20 องศา เมื่อเกิดอุณหภูมิที่ขดลวดเหนี่ยวนำ 40 °C	90
5.39	ไดอะแกรมจำลองการทำงานขณะไม่ได้ใส่ชิ้นงาน บนโปรแกรม PSCAD	91
5.40	รูปร่างของกระแสขาออก (I_o) แรงดันขาออก (V_o) และกำลังขาออก (P_o) เมื่อควบคุมกระแสที่ดิวตี้ลิมิตที่ 12 A.....	92
5.41	รูปร่างของสัญญาณกระแสและแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ที่อุณหภูมิ 500 °C และสัญญาณตัวตรวจจับเฟสอยู่ในสภาวะมีเฟสตรงกัน.....	93
5.42	รูปภาพหลังจากชิ้นงานถูกหลอมที่อุณหภูมิ 500 °C	93