



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็งที่มีการ
ควบคุมกำลังโดยการควบคุมความหนาแน่นของพัลส์

**A High frequency Induction Heater by using Pulse density
Modulation for surface hardening application**

คณะผู้วิจัย

นายวิเชียร หทัยรัตน์ศิริ

นายสายชล ชุตเจื้อจิ้น

นายสรรพพล คุ่มทรัพย์

มีนาคม 2555

รหัสโครงการ 2554A16662006

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการเครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็ง
ที่มีการควบคุมกำลังโดยการควบคุมความหนาแน่นของพัลส์

นายวิเชียร หทัยรัตน์ศิริ

นายสายชล ชุตเจื้อจิ้น

นายสรรพพล คุ่มทรัพย์

สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

สนับสนุนโดย สำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษา

และพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ

สำนักคณะกรรมการอุดมศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักบริหารโครงการวิจัยในอุดมศึกษาและ
พัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักคณะกรรมการการอุดมศึกษา ขอขอบคุณมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองตลอดจน
ห้องปฏิบัติการ

นักวิจัย



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานชุบแข็งโลหะโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์ที่ใช้ไอจีบีทีขนานกับไดโอดเป็นตัวสวิตช์ การควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้มีความถี่สูงกว่าเรโซแนนซ์เล็กน้อยคงที่ตลอดการทำงาน และการควบคุมกำลังโดยการปรับค่าความหนาแน่นของพัลส์ที่ความถี่ต่ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของชิ้นงาน ขนาดของกระแสที่ไหลจะถูกจำกัดเพื่อป้องกันกระแสสูงเกิน เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถให้ความร้อนแก่ท่อนเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. สูง 74 มม. จากอุณหภูมิห้องถึง 900 °C ได้ภายในเวลา 15 นาที โดยทำงานในช่วงความถี่ประมาณ 22–29 kHz กำลังไฟฟ้าด้านเข้า 1.75 kW–2.52 kW มีตัวประกอบกำลังขาเข้าอยู่ระหว่าง 0.90–0.97

คำสำคัญ : เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ / งานชุบแข็งโลหะ / อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แหล่งจ่ายแรงดัน

Abstract

This thesis presents a design and development of an induction hardening process using a half-bridge Voltage-Fed Inverter. The inverter was implemented using IGBT in anti-parallel with diodes as switching devices. There are two controllers in this system. The first controller controls the operating frequency of the inverter at a frequency slightly over the resonant frequency throughout the heating cycle. Another controller controls the pulse density modulation in order to adjust the output power at a level suitable for any change in the parameter of workpieces. The load current is controlled by an over current protection circuit to protect the switches. The prototypes were tested with steel workpieces 75 mm in diameter and 74 mm in length. The temperature of the sample was increased from room temperature to 900 °C within 15 minutes. The system has been operated at a switching frequency varies between 22 kHz–29 kHz with 4 kW input power and 0.94 leading power factor on the input side.

Keywords : Induction Heater / Hardening / Voltage-fed Resonant Inverter

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	4
2.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของขดเหนี่ยวนำ	6
2.3 ผลทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน	8
2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์	10
2.5 การทำงานของอินเวอร์เตอร์	13
2.6 เฟสลิคคูลูป	15
2.7 หม้อแปลงไฟฟ้า	21
2.8 การถ่ายโอนอิมพีแดนซ์	23
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิว	
3.1 โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว	26
3.2 การออกแบบชุดโหลดเรโซแนนซ์	27
3.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง	29

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบอินเวอร์เตอร์	29
3.5 การออกแบบให้มุมเฟสคงที่	32
3.6 การออกแบบการควบคุมกำลัง	34
3.7 การออกแบบวงจรเรียงกระแส	35
3.8 Current Transformer (CT) สำหรับวัดกระแส	36
3.9 จำลองการทำงาน	37
บทที่ 4 ผลการทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิว	
4.1 การทดสอบภาคควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์	41
4.2 การทดสอบภาคควบคุมกำลัง	42
4.3 การทดสอบการควบคุมกระแสไฟฟ้า	44
4.4 การทดสอบกำลังไฟฟ้าและหาค่าประสิทธิภาพ	46
4.5 ทดสอบความร้อนของชิ้นงาน	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ	
5.1 สรุปผลการทดสอบโครงงาน	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บทที่ 6 สรุปและเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยขั้นต่อไป	54
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ภาพส่วนต่างๆ ของต้นแบบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน เพื่องานชุบแข็งผิวและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	60
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์	68

ภาคผนวก ค ตารางเทียบรายละเอียดการชุบแข็งของเหล็ก	73
ภาคผนวก ง ระบบทั้งหมดของเครื่องเหี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว	82
ภาคผนวก จ กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	84
ภาคผนวก ฉ รายงานการเงิน	86
ประวัติผู้เขียน	88



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความจริงของการคูณ	18
2.2 แสดงค่าความจริงของเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกท	18
4.1 ผลการทดสอบวัดค่าต่างๆในการควบคุมกระแสไฟฟ้า	46
4.2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกจากอินเวอร์เตอร์	50



สารบัญภาพ

ภาพที่

หน้า

2.1	วงจรอย่างง่ายของหม้อแปลงทั่วไป	4
2.1	วงจรอย่างง่ายของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน	4
2.2	โครงสร้างอย่างง่ายของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	5
2.3	กราฟแสดงถึงช่วงความถี่และกำลังของการใช้งานเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	7
2.4	ความจุความร้อนของโลหะชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 20°C	8
2.5	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิ	9
2.6	วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์	10
2.7	วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจร	10
2.8	รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันที่โหลด	11
2.9	โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์	12
2.10	สภาวะการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์	13
2.11	แรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์	14
2.12	แรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์	15
2.13	แสดงการทำงานเบื้องต้นของเฟสลิ้อคูลูป	15
2.14	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเฟสลิ้อคูลูป	16
2.15	สัญลักษณ์เอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกทที่ใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบเฟส	17
2.16	รูปสัญญาณที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฟสเท่ากับศูนย์และมากกว่าศูนย์	19
2.17	กราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรตรวจจับเฟสแบบเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกท	20
2.18	วงจรโลว์พาสฟิลเตอร์อันดับ 1	21
2.19	หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลง	21
2.20	วงจรของหม้อแปลง	23
2.21	วงจรของหม้อแปลงที่ย้ายค่าจากขดลวดทุติยภูมิมายังขดลวดปฐมภูมิ	24
3.1	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว	26
3.2	โครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิวโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	27
3.3	ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบและสร้าง	28

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่

หน้า

3.4	บล็อกไดอะแกรมในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์	30
3.5	วงจรภายในไอซีเบอร์ TLP250	31
3.6	รูปแสดงวงจรขับเคลื่อนที่ใช้งานจริง	31
3.7	บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อก	33
3.8	รูปการเปรียบเทียบความต่างเฟส	33
3.9	รูปการตรวจจับเฟสกระแส	34
3.10	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกำลัง	34
3.11	รูปการตรวจจับขนาดกระแสโหลด	35
3.12	รูปการลิมิตเฟส	35
3.13	Current Transformer	37
3.14	วงจรจำลองการทำงาน	37
3.15	รูปคลื่นแรงดัน (v_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และกระแส (i_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์	38
3.16	รูปคลื่นแรงดัน (v_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำและกระแส (i_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำ	38
3.17	รูปคลื่นแรงดันสวิตช์ (S_1) และสวิตช์ (S_2) ของอินเวอร์เตอร์	38
3.18	วงจรควบคุมจำลองการทำงาน	39
3.19	สัญญาณขับเคลื่อนแบบควบคุมความหนาแน่นของพัลส์	39
4.1	โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว	40
4.2	สัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัวในอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์	41
4.3	สัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัวและแสดงช่วง Dead Time	41
4.4	รูปคลื่นกระแสและแรงดันเอาต์พุตที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW	42
4.5	รูปคลื่นกระแสและแรงดันหลังหม้อแปลงความถี่สูงที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW	42
4.6	รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW	43
4.7	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 200 °C	43
4.8	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 400 °C	43
4.9	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 600 °C	44
4.10	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 800 °C	44

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่

หน้า

4.11	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหนด ที่อุณหภูมิ 900 °C	45
4.12	กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้วยเครื่องวัดเพาเวอร์ควอลิตี้ อนาไลต์เซอร์ของฟลักซ์รุ่น 434 ครั้งที่ 1	45
4.13	รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าขาออก P_{out} ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ครั้งที่ 1	46
4.14	กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้วยเครื่องวัดเพาเวอร์ควอลิตี้ อนาไลต์เซอร์ของฟลักซ์รุ่น 434 ครั้งที่ 2	47
4.15	รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าขาออก P_{out} ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ครั้งที่ 2	47
4.16	กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้วยเครื่องวัดเพาเวอร์ควอลิตี้ อนาไลต์เซอร์ของฟลักซ์รุ่น 434 ครั้งที่ 3	48
4.17	รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าขาออก P_{out} ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ครั้งที่ 3	48
4.18	กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้วยเครื่องวัดเพาเวอร์ควอลิตี้ อนาไลต์เซอร์ของฟลักซ์รุ่น 434 ครั้งที่ 3	49
4.19	รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าขาออก P_{out} ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ครั้งที่ 3	49
4.20	วัดความร้อนด้วยเครื่อง Fluke Ti25 Thermal Imager	50
4.21	วัดความร้อนก่อนทำการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด	51
4.22	วัดความร้อนหลังการเหนี่ยวนำความร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด	51
6.1	แสดงการต่อโมดูลอินเวอร์เตอร์แบบทบระดับสำหรับเพิ่มกำลังความถี่	54
ภาพภาคผนวกที่		
ก.1	ภาพถ่ายโดยรวมของเครื่องต้นแบบ	61
ก.2	ภาพถ่ายชุดกำลังของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิว	62
ก.3	ภาพถ่ายชุดควบคุมของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิว	62
ก.4	ชุดเหนี่ยวนำความร้อน	63
ก.5	ชิ้นงาน	63
ก.6	เครื่องวัดค่า LCR ยี่ห้อ Hioki รุ่น 3532-50 LCR HiTester	64
ก.7	CT สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าด้านออกจากอินเวอร์เตอร์	64
ก.8	ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น DSO3062A	65
ก.9	โพรบวัดกระแส ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 80i-110s	65

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่

หน้า

3.4	บล็อกไดอะแกรมในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์	30
3.5	วงจรภายในไอซีเบอร์ TLP250	31
3.6	รูปแสดงวงจรขับเคลื่อนที่ใช้งานจริง	31
3.7	บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อกคัล	33
3.8	รูปการเปรียบเทียบความต่างเฟส	33
3.9	รูปการตรวจจับเฟสกระแส	34
3.10	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกำลัง	34
3.11	รูปการตรวจจับขนาดกระแสไหล	35
3.12	รูปการลิมิตเฟส	35
3.13	Current Transformer	37
3.14	วงจรจำลองการทำงาน	37
3.15	รูปคลื่นแรงดัน (v_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และกระแส (i_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์	38
3.16	รูปคลื่นแรงดัน (v_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำและกระแส (i_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำ	38
3.17	รูปคลื่นแรงดันสวิตช์ (S_1) และสวิตช์ (S_2) ของอินเวอร์เตอร์	38
3.18	วงจรควบคุมจำลองการทำงาน	39
3.19	สัญญาณขับเคลื่อนแบบควบคุมความหนาแน่นของพัลส์	39
4.1	โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว	40
4.2	สัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัวในอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์	41
4.3	สัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัวและแสดงช่วง Dead Time	41
4.4	รูปคลื่นกระแสและแรงดันเอาต์พุตที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW	42
4.5	รูปคลื่นกระแสและแรงดันหลังหม้อแปลงความถี่สูงที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW	42
4.6	รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW	43
4.7	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 200 °C	43
4.8	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 400 °C	43
4.9	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 600 °C	44
4.10	รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 800 °C	44

รายการสัญลักษณ์

A_g	=	พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ
A_w	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน
C_p	=	ค่าตัวเก็บประจุในวงจรเรโซแนนซ์ขนาน
d_c	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ
E_c	=	แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดเหนี่ยวนำ
H_{Rm}	=	ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวชิ้นงาน
H_{Om}	=	ค่าสูงสุดของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ $y = 0$ เมื่อคลี่ชิ้นงานให้เป็นแผ่นเรียบ
I_1	=	องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์พื้นฐานของกระแส
I_{dc}	=	กระแสไฟตรงจากวงจรเรียงกระแส
I_n	=	องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่ n ของกระแส
k_r	=	Coil Correction Factor
L_p	=	ค่าอินดักแตนซ์ในวงจรเรโซแนนซ์ขนาน
l_w	=	ความยาวของชิ้นงาน
P_c	=	กำลังที่ขดลวดเหนี่ยวนำ
P_{dc}	=	กำลังไฟฟ้าจากส่วนจ่ายไฟตรง
P_w	=	กำลังที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงาน
R_c	=	ความต้านทานจากขดลวดเหนี่ยวนำ
R_p	=	ความต้านทานในวงจรเรโซแนนซ์ขนาน
R_s	=	ความต้านทานรวม
R_w	=	ความต้านทานจากชิ้นงาน
U_1	=	องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์พื้นฐานของแรงดัน
U_{dc}	=	แรงดันไฟตรงจากวงจรเรียงกระแส
X_c	=	รีแอคแตนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำ
X_g	=	รีแอคแตนซ์ของช่องว่างอากาศ
X_s	=	รีแอคแตนซ์รวม
X_w	=	รีแอคแตนซ์ของชิ้นงาน
α	=	สัมประสิทธิ์การหน่วง
δ	=	ความลึกผิว (Skin Depth)
ρ_c	=	ความต้านทานจำเพาะของขดลวดเหนี่ยวนำ
ρ_w	=	ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน
μ	=	ความซึมซาบต่อฟลักซ์แม่เหล็กของวัสดุ

ϕ_0	=	ฟลักซ์แม่เหล็กรวม (ค่า Rms.)
ϕ_c	=	ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องขดลวดเหนี่ยวนำ (ค่า Rms.)
ϕ_g	=	ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องผ่านช่องว่างอากาศ (ค่า Rms.)
ϕ_w	=	ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องชิ้นงาน (ค่า Rms.)
ω_0	=	ความเร็วเชิงมุมที่ความถี่ธรรมชาติ
ζ	=	แฟกเตอร์การหน่วง
ϕ_1	=	ความแตกต่างเฟสระหว่างฮาร์มอนิกส์พื้นฐานของกระแสกับแรงดัน



ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	Ampere
H	=	henry
Hz	=	hertz
k Ω	=	kiloohm
kg.m ²	=	kilogram square meter
kW	=	kilowatt
mH	=	millihenry
MHz	=	megahertz
μ s	=	microsecond
V	=	Volt



บทที่ 1

บทนำ

S. Chudjuarjeen และคณะ (2009) ได้ทำการสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยใช้ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่มีโหลดต่อแบบอนุกรมและขนาน มีการสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ การควบคุมกำลังแบบ PWM ที่สมมาตรกัน ระบบมีการควบคุมให้ทำงานที่ความถี่สูงกว่าเรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติตลอดเวลาในย่าน 52.63 ถึง 53.8 kHz มีขนาดกำลัง 1.25 kW นกตล และคณะ (2540) ได้ทำการสร้างอินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่อัตโนมัติสำหรับงานชุบขึ้นรูปโลหะ โดยใช้วงจรกึ่งบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมขนาด 6 เควีเอ มีตัวประกอบกำลังด้านเข้าอยู่ระหว่าง 0.63-0.67 มีการควบคุมด้านเข้าโดยจำกัดกระแสโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ Khan และคณะ (1998) ได้ทำการสร้างเตาหลอม โดยใช้ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบขนาน มีการควบคุมแบบวงเปิด จากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเครื่องที่สร้างขึ้นมีมีตัวประกอบกำลังด้านเข้าค่อนข้างต่ำประสิทธิภาพการทำงานจึงลดต่ำลงไปด้วย ซึ่งเกิดจากไม่มีการควบคุมให้เครื่องทำงานที่จุดเรโซแนนซ์และการปรับกระแส เพื่อปรับกำลังด้านเข้าทำให้ไม่สามารถควบคุมกำลังด้านออกได้เพราะกระแสที่ด้านออกจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้นำหลักการเหนี่ยวนำ (Induction Heating) มาใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในงานชุบแข็งผิวซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงผิวชิ้นงานให้มีความแข็ง ทนต่อการสึกหรอ การเสียดสี และความร้อน รวมไปถึงป้องกันการกัดกร่อน วิธีการชุบแข็งผิวได้นำมาใช้ในการผลิตในอุตสาหกรรมหลายชนิด อาทิ อะไหล่รถยนต์ แม่พิมพ์ เป็นต้น ซึ่งในอดีตการชุบแข็งผิวทำโดยใช้เปลวไฟ จะก่อให้เกิดเขม่าของควันไฟ และไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอได้ จึงได้มีการพัฒนาโดยนำหลักการเหนี่ยวนำเข้ามาใช้ในกระบวนการชุบแข็งผิวซึ่งวิธีดังกล่าวนี้กลายเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากการให้ความร้อนที่ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิง จึงไม่มีเขม่าควันไฟจากการเผาไหม้ และสามารถถ่วงระยะเวลาในการผลิตได้

การชุบแข็งด้วยวิธีนี้จะอาศัยหลักการของกระแสไฟฟ้าสลับ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวด และแม่เหล็กนี้จะกลับขั้วตามจำนวนความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ เมื่อนำเหล็กไปใส่ไว้ในขดลวด สนามแม่เหล็กจะตัดผ่านเนื้อเหล็กในลักษณะกลับขั้วไปมา จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเนื้อเหล็ก เรียกว่า กระแสไหลวน ซึ่งการเกิดกระแสไหลวนในเนื้อเหล็กนั้นจะไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดขวางของแท่งเหล็ก แต่จะเกิดมากบริเวณผิวของเหล็ก ยิ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าสูง กระแสไหลวนจะเข้มข้นมาก

ตามบริเวณผิว เรียกว่าปรากฏการณ์พื้นผิว (Skin Effect) ก่อให้เกิดความร้อนสำหรับใช้ในงาน ชุบแข็งโดยให้เหล็กมีอุณหภูมิวิกฤต ประมาณ $780 - 950^{\circ}\text{C}$ แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เกินอัตราการเย็นของวิกฤตของเหล็ก ด้วยน้ำหรือน้ำมันเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของเหล็ก

การเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้ในงานชุบแข็งพื้นผิวนั้นจะใช้สารกึ่งตัวนำมาเป็นสวิตช์จะ ทำงานอยู่ในรูปของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งแหล่งจ่ายแรงดันโวลต์เป็นเรโซแนนซ์อนุกรม และแหล่งจ่ายกระแสโวลต์เป็นเรโซแนนซ์ขนาน สำหรับงานที่ขนาดกำลังไฟฟ้าไม่สูง มาก เพื่อไม่ให้ขนาดของเครื่องไม่ใหญ่โตมากนักจึงควรเลือกอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และนำมาประยุกต์ใช้งานในการเหนี่ยวนำความร้อนทางไฟฟ้า

ขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อได้รับกระแสไฟสลับความถี่สูงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับ คล้องผ่านภาชนะทำให้เกิด แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างกระแสไหลวนที่ขึ้นงาน ทำให้เกิด ความร้อนขึ้นที่ขึ้นงานได้ โดยกระแสไฟสลับความถี่สูงสร้างโดยการแปลงจากไฟฟ้า กระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง และใช้ใช้อินเวอร์เตอร์แปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็น ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีการควบคุมกำลังเป็นแบบปรับความถี่ ทำให้ อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถทำงานที่ความถี่สูงเกิน 40 kHz ได้ เนื่องจากเกิดความร้อนที่สวิตช์มาก วิธีการกำลังแบบการปรับความหนาแน่นของพัลส์ (Pulse Density Modulation) เป็นวิธีการ ควบคุมสวิตช์ให้ทำงานที่ความถี่ใกล้เคียงเรโซแนนซ์ตลอดเวลา และมีการปรับกำลังโดยการปรับดิ้วตี ไชเกิลของสัญญาณที่นำมาอดดูเลต (Dpower) แทนจึงสามารถปรับสวิตช์การทำงานของ สวิตช์ให้สูงขึ้นอีกได้ ซึ่งไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะแปรผันตรงตามความหนาแน่นของ พลังงาน จึงทำให้การให้ความร้อนที่ขึ้นงานเร็วขึ้นและเป็นการลดขนาดอุปกรณ์ให้เล็กลงและมี ราคาต้นทุนที่ถูกลง

ในงานวิจัยนี้จึงจะนำเสนอเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว โดยใช้อินเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยการปรับความหนาแน่นของพัลส์ และควบคุมความถี่ให้ใกล้เคียงเรโซแนนซ์ตลอดการทำงาน มีการควบคุมกระแสไม่ให้เกินที่ กำหนดและการควบคุมให้การทำงานในช่วงที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ทำงานที่สภาวะ แรงดันเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switching: ZVS) เพื่อลดค่าสูญเสียที่เกิดจากการทำงานของ สวิตช์

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ลดการนำเข้าและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาครัฐ และเอกชน
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและลดต้นทุนเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความถี่สูงสำหรับ งาน ชุบแข็ง โดยใช้ควบคุมกำลังแบบการปรับความหนาแน่นของพัลส์ (Pulse Density Modulation)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

สามารถออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังแบบการปรับความหนาแน่นของพัลส์(Pulse Density Modulation) ในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานชุบแข็งได้

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.4.1 แบบการวิจัย ออกแบบเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานชุบแข็งที่มีความเหมาะสม และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมได้

1.4.2 ขั้นตอนและวิธีการในการเก็บข้อมูล ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่จุดต่างๆ พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขให้เหมาะสม

1.4.3 ขั้นตอนและวิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูล วิเคราะห์การทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานชุบแข็งเปรียบเทียบกับแบบจำลองระบบในคอมพิวเตอร์

สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 คาดว่าเมื่องานวิจัยสำเร็จแล้วจะสามารถใช้เป็นเครื่องต้นแบบในการวิจัยพัฒนา หรือ การนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมของประเทศในอนาคตต่อไป

1.5.2 สามารถนำผลงานที่สำเร็จไปตีพิมพ์เป็นวารสารงานวิจัยในระดับประเทศและต่างประเทศ

1.5.3 สามารถลดการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศได้

1.5.4 สามารถลดพลังงานไฟฟ้าได้

1.5.5 สามารถลดต้นทุนการผลิตเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานชุบแข็งได้

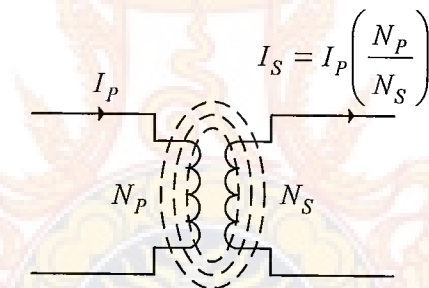
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

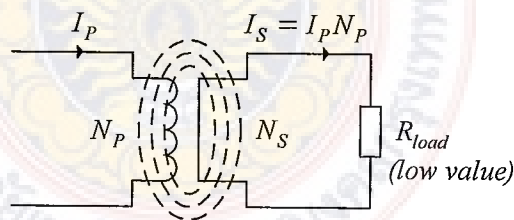
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเบื้องต้น ขดเหนี่ยวนำซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญสำหรับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอินเวอร์เตอร์โรตารีแนซ แหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์ และหลักการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเบื้องต้น

หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เห็นได้ชัดเจนโดยเปรียบเทียบกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.1(ก) ซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ(Primary and Secondary Winding)โดยขดเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงและชิ้นงานก็เปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิจำนวน 1 รอบที่ลัดวงจรไว้ โดย I_p เป็นกระแสที่จ่ายให้กับขดเหนี่ยวนำ และ I_s เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.1(ข)



(ก) วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง



(ข) วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

ภาพที่ 2.1 หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ดังนั้นกำลังที่ขึ้นงาน

(2.1)

$$P_w = I_s^2 R_w$$

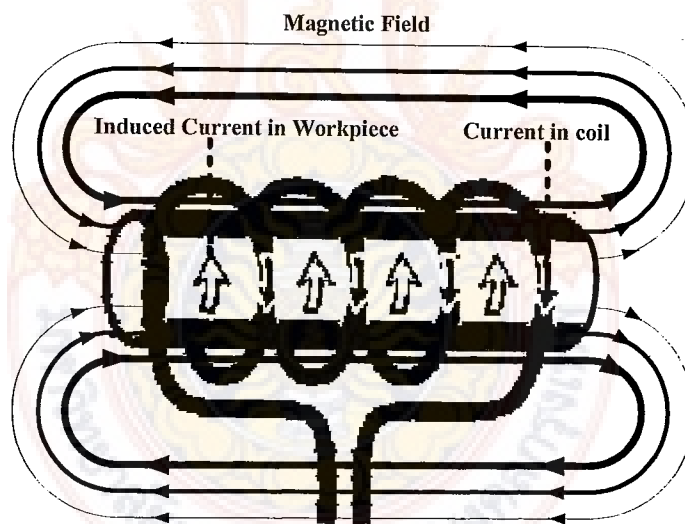
แทนค่า $I_s = I_p N_p$ จะได้ $P_w = I_p^2 N_p^2 R_w$

โดย

P_w คือ กำลังที่ขึ้นงาน (W)

R_w คือ ความต้านทานสมมูลของขึ้นงาน (Ω)

ลักษณะโครงสร้างอย่างง่ายของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้แสดงไว้ดังภาพที่ 2.2 เมื่อขดเหนี่ยวนำได้รับกระแสไฟสลับจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กสลับคล่องผ่านขึ้นงานทำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดกระแสไหลวนในขึ้นงานทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขึ้นงานได้ และเนื่องจากกระแสที่ป้อนให้กับขดเหนี่ยวนำมักจะมีปริมาณที่สูงมาก จึงต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดเหนี่ยวนำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ขดเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างอย่างง่ายของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ในหลักการดังกล่าวกระแสไหลวนจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของขึ้นงานเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางพื้นผิว(Skin Effect)และความหนาแน่นของกระแสลดลงมาเป็นประมาณ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวของขึ้นงานที่ค่าความร้อนลึกผิว(Skin Depth) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$\text{Skin depth, } \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}}$$

(2.2)

โดย

δ คือ ความลึกผิว (m)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ($\Omega \text{ m}$)

μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (H/m)

f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ (Hz)

จากสมการ 2.2 แสดงให้เห็นว่าค่าความลึกผิวขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของกระแสไฟสลับที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) และความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ของชิ้นงาน

2.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของขดเหนี่ยวนำ

ในทางปฏิบัติลักษณะงานที่แตกต่างกันก็มีความต้องการค่าความลึกผิวและกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น การชุบแข็งที่ผิวชิ้นงานจะต้องการค่าความลึกผิวที่ต่ำจึงต้องใช้ความถี่ที่สูงทำให้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูง ส่วนในงานประเภทการให้ความร้อนสำหรับการหลอมโลหะ จะต้องการค่าความลึกผิวที่ค่อนข้างสูง ความถี่การทำงานจึงต่ำกว่า เป็นต้น

ภาพที่ 2.3 แสดงช่วงความถี่การทำงาน และระดับกำลังออกของเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแต่ละแบบ โดยขึ้นกับแหล่งกำเนิดไฟสลับที่จ่ายให้กับเครื่อง และยังขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร รวมทั้งแสดงความถี่กับการประยุกต์ใช้งานในแต่ละช่วงด้วยระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในปัจจุบันจำแนกได้ดังนี้

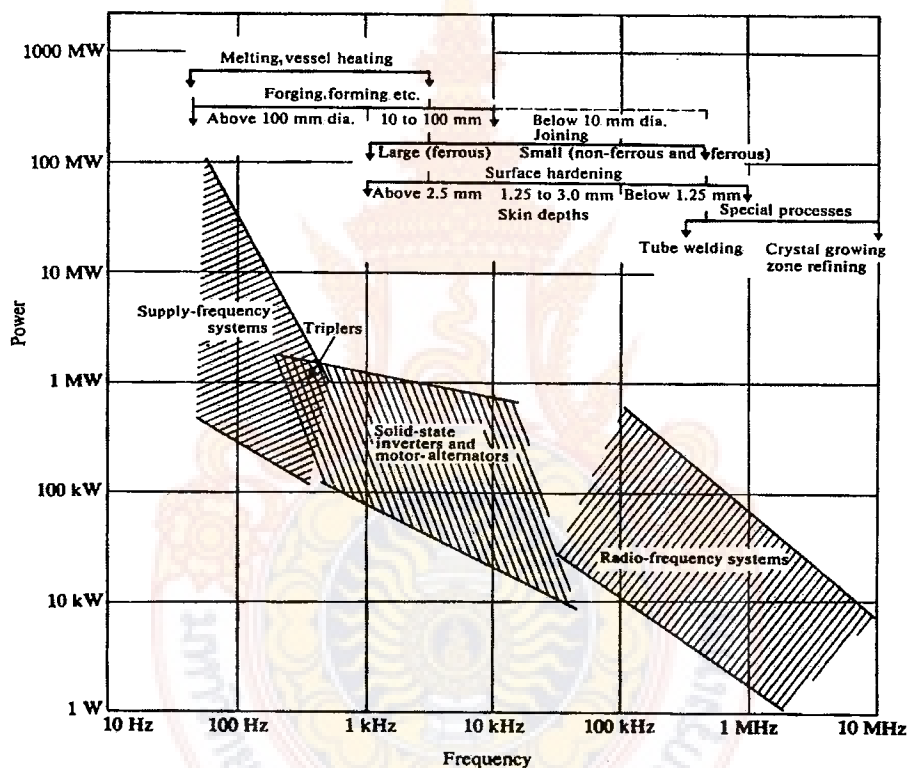
1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยตรง เป็นระบบที่ใช้ความถี่จากสายส่งโดยตรง (50 to 60 Hz) แรงดันไฟฟ้ามีความถี่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ค่าความลึกผิวในการให้ความร้อนมีค่ามากโดยค่าความลึกผิวจะมีค่าสูงตั้งแต่ 10 ถึง 100 mm เครื่องให้ความร้อนแบบนี้นิยมใช้ในงานหลอมโลหะ มีระดับกำลังที่สูงเป็นหลาย MW

2. แหล่งจ่ายกำลังจากชุดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นระบบที่มีการผลิตความถี่จากระบบไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสร้างแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงขึ้นได้ โดยสามารถทำความถี่ได้ในช่วง 500 Hz ถึง 10 kHz ทำให้ได้ความลึกผิวตั้งแต่ 1 ถึง 10 mm เครื่องให้ความร้อนชนิดนี้สามารถให้กำลังได้หลายร้อยกิโลวัตต์ ใช้ในงานหลอมโลหะมีระดับกำลังประมาณ 500 kW ต่อเครื่อง

3. แหล่งจ่ายกำลังจากระบบวงจรแปลงผันที่ใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยมีการจัดวงจรได้หลากหลายลักษณะ ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้เอสซีอาร์, ทรานซิสเตอร์กำลัง, มอสเฟตกำลังและไอจีบีที เป็นอุปกรณ์สวิตช์ โดยมีย่านความถี่ตั้งแต่ 500 Hz ถึง 50 kHz การใช้งานมีหลาย

ลักษณะ เช่น ที่ความถี่ต่ำมักจะเป็นงานหลอมโลหะ, ความถี่ปานกลางสำหรับงานชุบขึ้นรูปโลหะ, ความถี่สูงสำหรับงานชุบแข็งผิว เป็นต้น

4. แหล่งจ่ายกำลังย่านความถี่วิทยุ (50 kHz ถึง 10 MHz) สำหรับคลื่นความถี่ไม่เกิน 100 kHz ยังสามารถใช้พวกอุปกรณ์มอสเฟตกำลังได้ แต่ที่ความถี่สูงมากจนนั้น นิยมใช้หลอดสุญญากาศเพราะสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ยังมีสมรรถนะในการใช้งานที่ความถี่สูงได้ไม่ดีพอ โดยค่าความลึกผิวมีค่า 0.1 mm ถึง 2 mm เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้ จะให้กำลังค่อนข้างต่ำเนื่องจากทำงานในย่านความถี่สูง นิยมใช้ในงานเชื่อมประสานและการชุบผิวแข็ง



ภาพที่ 2.3 ช่วงความถี่และกำลังของการใช้งานเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

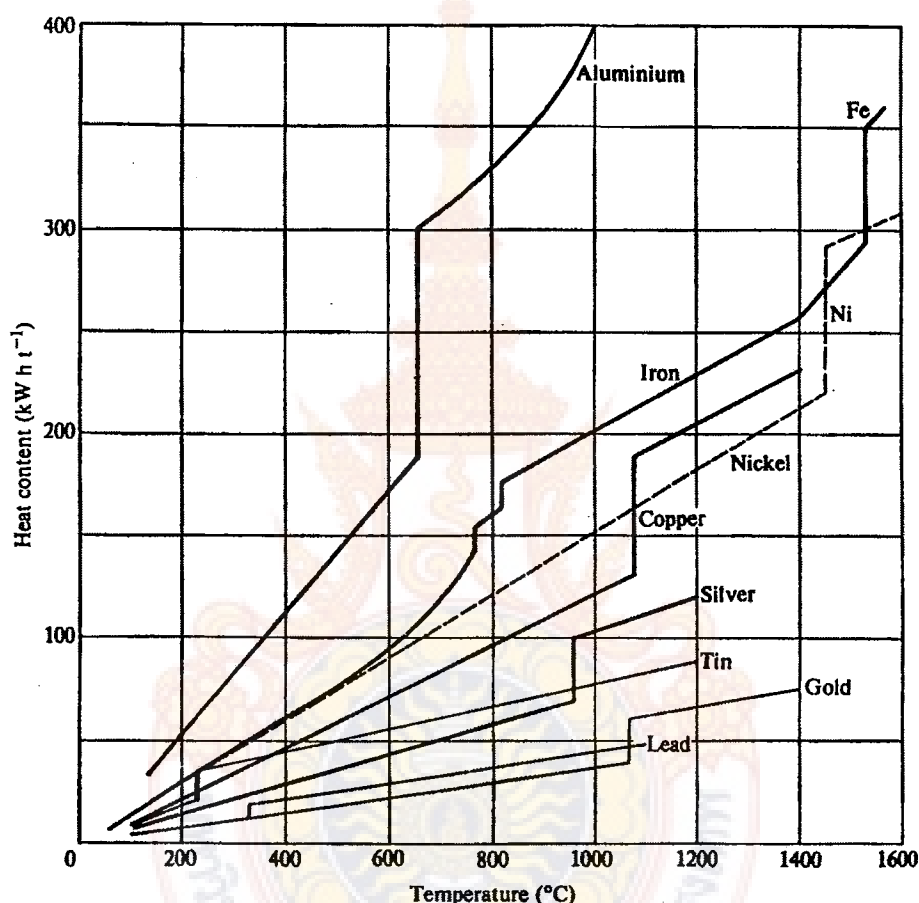
2.3 ผลทางอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน

อุณหภูมิของชิ้นงานมีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำดังนี้

2.3.1 ค่าความจุความร้อนของชิ้นงาน

ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจำเป็นต้องมีพลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิตามที่ต้องการโดยพลังงานจำนวนนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, c) ซึ่งมีหน่วยเป็น watt-second per kilogram per Kelvin และความร้อนแฝง

(Latent Heat) แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่าความจุความร้อน (Heat Content) ซึ่งมีหน่วยเป็น kilowatt-hour per tonne สำหรับการคำนวณ เมื่อพิจารณาจากค่าความจุความร้อนจะเห็นได้ว่า พลังงานที่ต้องการในการให้ความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของ ชิ้นงานและชนิดของวัสดุและระยะเวลาที่ต้องการ ค่าความจุความร้อนของวัสดุต่างๆ ได้แสดงไว้ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ความจุความร้อนของโลหะชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 20 °C

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะตามอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิของโลหะมีค่าสูงขึ้น ค่าความต้านทานจำเพาะจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิโดยโลหะส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นเชิงเส้นในช่วงหนึ่งดังนี้

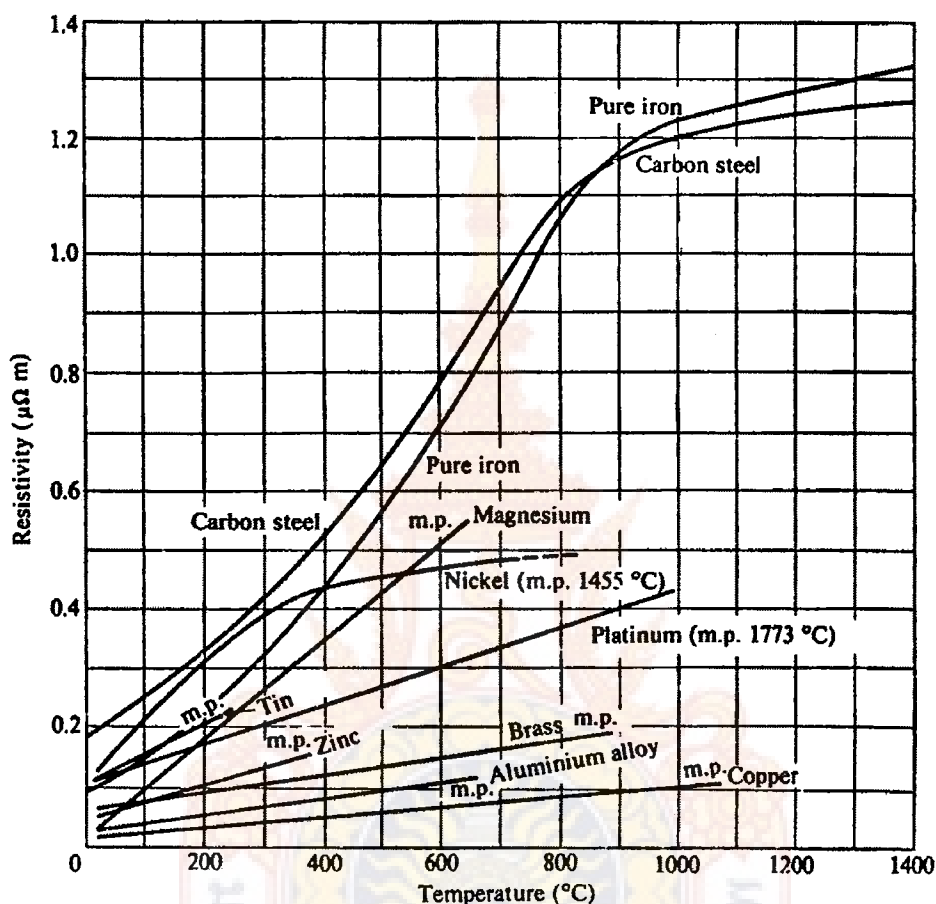
$$\rho_{\theta} = \rho_1 [1 + \alpha(\theta_1 - \theta)]$$

(2.3)

โดย

ρ_{θ} เป็นค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ , ไตๆ (Ωm)

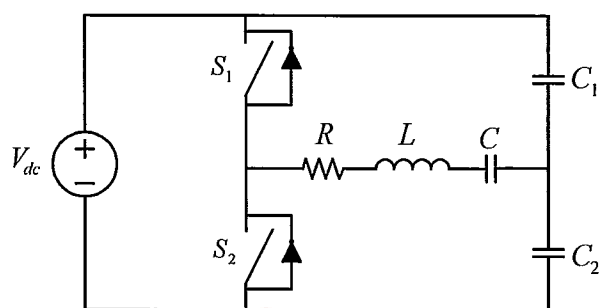
ρ_l เป็นค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ θ_l (Ωm)
 การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจำเพาะของโลหะต่างๆ เป็นดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะกับอุณหภูมิ

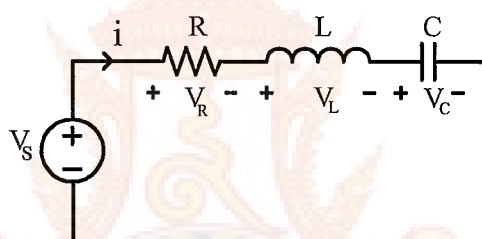
2.4 อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายแรงดันแบบครึ่งบริดจ์

อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมก็คือคอนเวอร์เตอร์ที่แปลงกำลังจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับภาพที่ 2.6 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเพราะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุวางอนุกรมกันกับโหลดความต้านทาน การสวิตช์จะทำให้เกิดแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยที่ตัวเหนี่ยวนำ(L)และตัวเก็บประจุ(C) จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความถี่สวิตช์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะหักล้างกันจึงมองเห็นเป็นโหลดมีค่าเฉพาะความต้านทานเท่านั้น และเพื่อให้เกิดแรงดันพัลส์สลับที่โหลดการทำงานของสวิตช์จะต้องทำงานในลักษณะสลับกันทำงาน



ภาพที่ 2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์

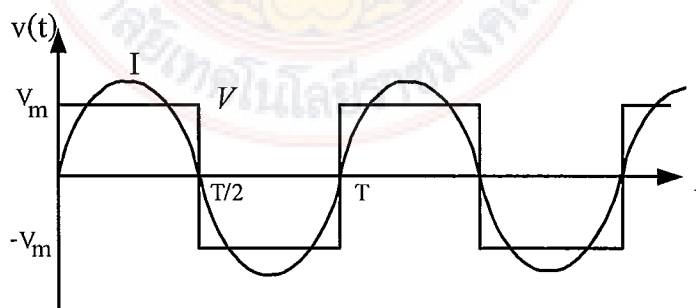
สำหรับกระแสที่โหลดมีลักษณะเกือบจะเป็น Sine wave ในกรณีที่โหลดมีค่า Damping Factor ที่ต่ำและความถี่ในการทำงานใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์วงจร

2.4.1 การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดเรโซแนนซ์

สัญญาณกระแสของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ เมื่ออินเวอร์เตอร์ที่ทำงานใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์โหลดที่มีค่า Damping Factor ต่ำโดยสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นพัลส์สลับดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันที่โหลด

จากรูปที่ 2.8 รูปคลื่นของแรงดันมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคี่องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ต่างๆ ของแรงดันพัลส์สี่เหลี่ยมเป็นดังนี้

$$v(t) = V_1 \sin \omega t + V_3 \sin 3\omega t + \dots + V_n \sin n\omega t + \dots \quad (2.4)$$

โดยที่

$$V_1 = \frac{4V_m}{\pi} \quad \text{และ} \quad V_n = \frac{4V_m}{n\pi} \quad n = \text{เลขจำนวนเต็มคี่} \quad (2.5)$$

ดังนั้น

$$V_{1,rms} = \frac{4V_m}{\pi\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

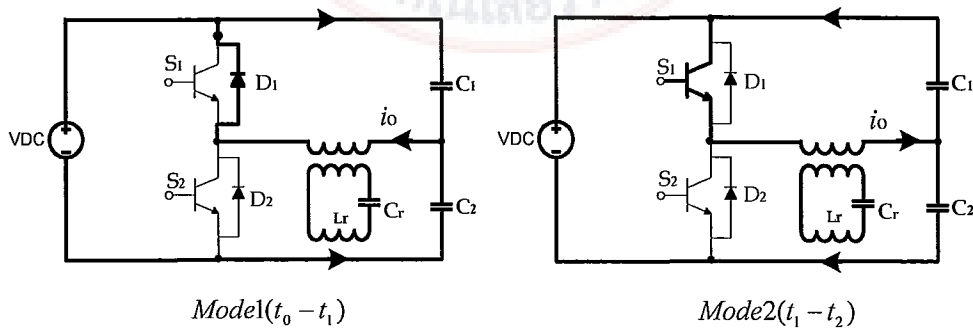
ส่วนกระแสที่โหลดมีลักษณะเป็นชานนึ่งนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก

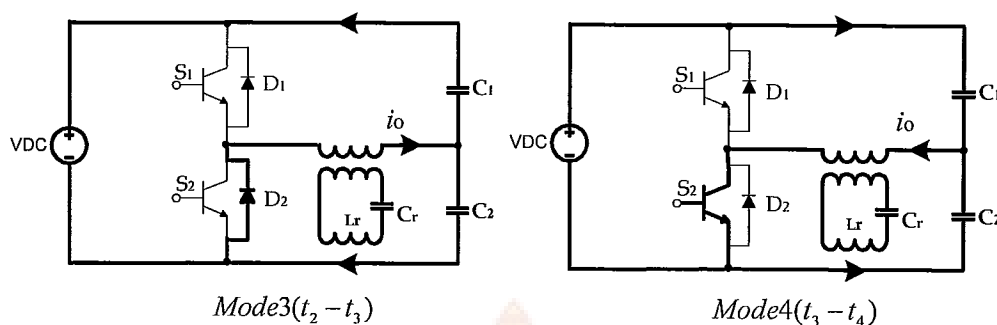
$$P_{load} = I_{1,rms} \times V_{1,rms} \quad (2.7)$$

เมื่อแทนค่า $I_{1,rms}$ และ $V_{1,rms}$ จะได้

$$P_{load} = \frac{2I_m V_m}{\pi} \quad (2.8)$$

2.4.2 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์





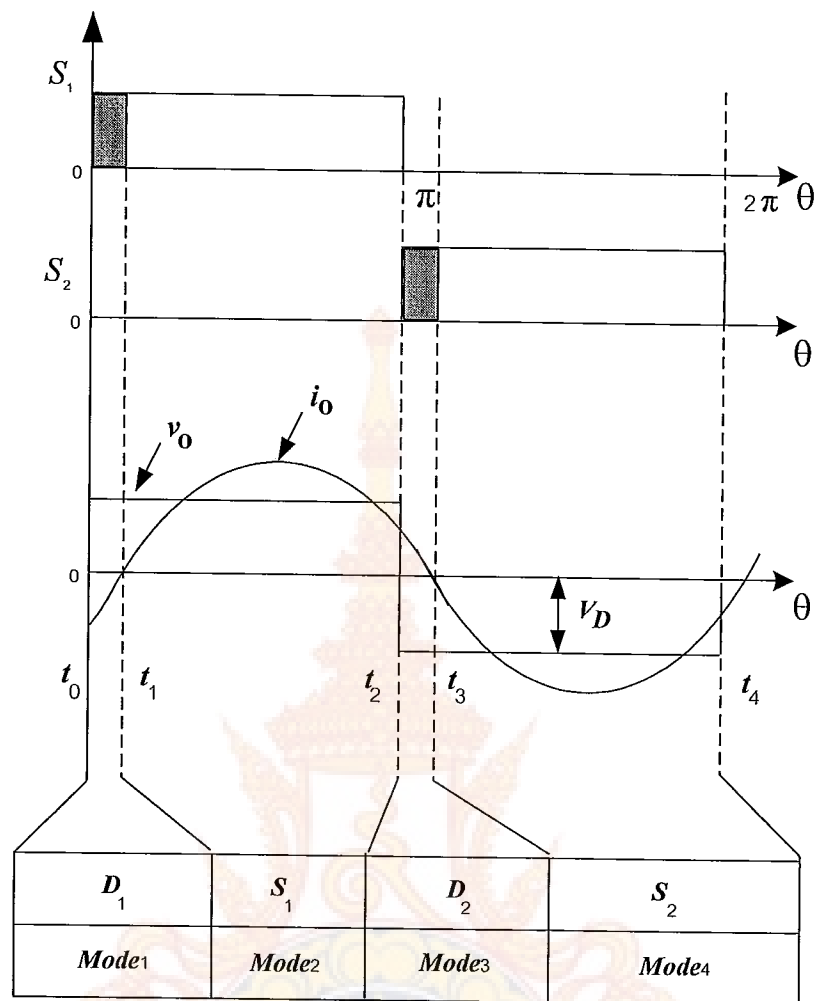
ภาพที่ 2.9 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

โหมดที่ 1 (t_0 - t_1) เมื่อสวิตช์ S_2 หยุดทำงานที่ $t = t_0$ ไดโอด D_1 เริ่มนำกระแสโดยกระแสด้านขาออกเป็นกระแสไฟลบ i_o กระแสด้านขาออก i_o ลดลงจากค่าลบไปสู่ค่าศูนย์ ต่อจากนี้จะเป็นสภาวะ ZVS ของ สวิตช์ S_1 ที่ได้รับมา

โหมดที่ 2 (t_1 - t_2) ที่ $t = t_1$ ทันทีที่ไดโอด D_1 หยุดทำงานสวิตช์ S_1 จะเริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะ ZVS และทำให้กระแสด้านขาออกเพิ่มขึ้นจากศูนย์ที่เวลา t_1 จนกระทั่งสวิตช์ S_1 จะหยุดขณะนำกระแสที่เวลา t_2

โหมดที่ 3 (t_2 - t_3) ที่ $t = t_2$ สวิตช์ S_1 หยุดทำงาน และพยายามรักษากระแสด้านขาออก i_o ไปในทิศทางเดียวกับการเหนี่ยวนำกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_2 กระแส i_o ลดลงเรื่อยๆ จนเป็นค่าศูนย์ที่เวลา t_3 จากสภาวะ ZVS ของ สวิตช์ S_2 ที่ได้รับมา

โหมดที่ 4 (t_3 - t_4) ที่ $t = t_3$ เมื่อไดโอด D_2 หยุดทำงาน สวิตช์ S_2 เริ่มนำกระแสภายใต้สภาวะ ZVS กระแสด้านขาออก i_o กลายเป็นค่าศูนย์ซึ่งไหลเข้าหาค่าลบ แรงดันด้านขาออกเป็นลบด้วยดังนั้น โหมดทั้ง 4 จะดำเนินการวนซ้ำต่อไปจากโหมดที่ 1 - 4



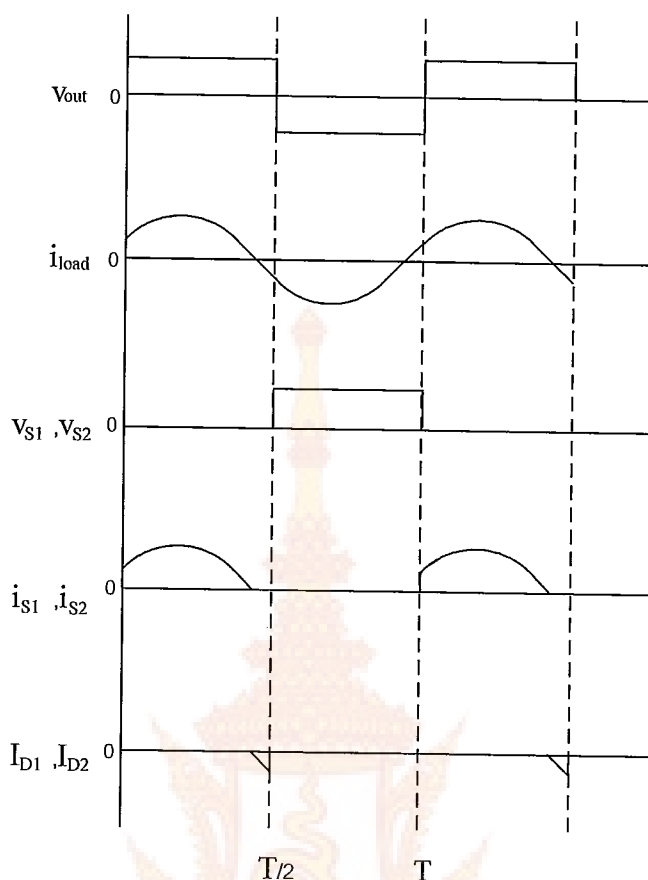
ภาพที่ 2.10 สภาวะการทำงานของชุดอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์

2.5 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

การทำงานของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันที่สำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในโครงการนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์และการทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

2.5.1 การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์

การทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้โหลดมีสภาพเป็นคาปาซิทีฟโหลด โดยมีรูปคลื่นของแรงดันกับกระแสที่โหลดและสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์เป็นดังภาพที่ 2.11

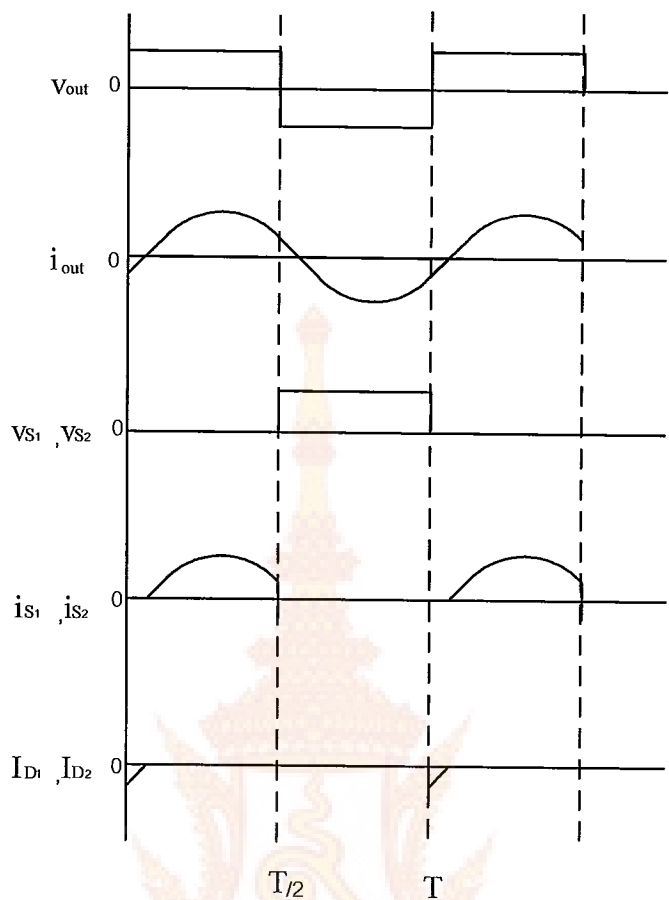


ภาพที่ 2.11 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์

2.5.2 การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

การทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำให้โหลดมีสภาพเป็นอินดักทีฟโหลด โดยมีรูปคลื่นของแรงดันกับกระแสที่โหลดและสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์เป็นดังภาพที่ 2.12

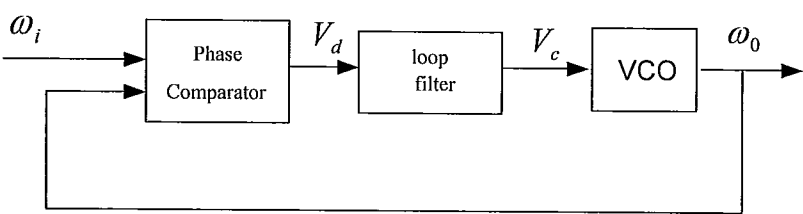
จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 แบบ ในกรณีการทำงานของอินเวอร์เตอร์ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีการสูญเสียในช่วงการต่อวงจรของไอจีบีทีเนื่องจากเริ่มต่อวงจรในขณะที่มีกระแสและทำให้เกิดกระแสดูดสูงที่สวิตช์ และในกรณีการทำงานของอินเวอร์เตอร์สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะไม่มี การสูญเสียในขณะที่ไอจีบีทีต่อวงจรเนื่องจากเริ่มต่อวงจรที่กระแสเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาจากการทำงานที่ความถี่ทั้งสองแบบจึงเลือกให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เล็กน้อยเพื่อให้กำลังผ่านไปที่โหลดมีค่าสูงและไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์เนื่องจากกระแสดูดสูง



ภาพที่ 2.12 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่โหลดและที่อุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

2.6 เฟสล็อกคัล

หลักการของเฟสล็อกคัลถูกนำมาใช้ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเพื่อควบคุมมุมเฟสให้คงที่ หรือเป็นตัวกำหนดค่าความถี่ในการทำงาน โดยการนำมาใช้ก็จะขึ้นกับลักษณะของวงจรว่าเป็นแบบใด รวมไปถึงสิ่งที่ต้องการควบคุม โครงสร้างของเฟสล็อกคัลเป็นระบบป้อนกลับ โดยมีตัว VCO(Voltage Controlled Oscillator)ทำหน้าที่ปรับความถี่ให้เปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณอ้างอิง ส่วนประกอบที่สำคัญของเฟสล็อกคัลแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ เฟสคอมพาราเตอร์ ตัวกรองความถี่ และ VCO ดังแสดงในภาพที่ 2.13

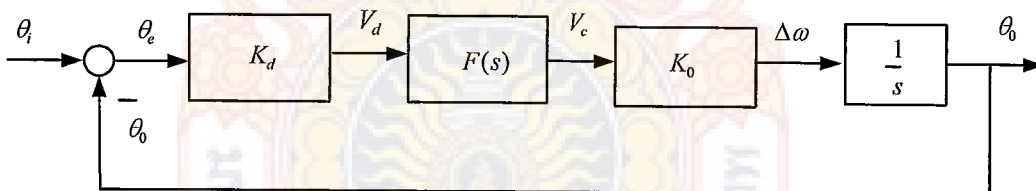


ภาพที่ 2.13 แสดงการทำงานเบื้องต้นของเฟสล็อกคัล

โดยที่ ω_i คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณอ้างอิง

- V_d คือ สัญญาณเอาต์พุตของเฟสคอมพาราเตอร์
 V_c คือ สัญญาณเอาต์พุตฟลิปเฟลเตอร์
 ω_o คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณเอาต์พุต

มีการทำงานโดยสังเขปดังนี้เมื่อมีสัญญาณความถี่อ้างอิงจากภายนอกเป็นสัญญาณซ้ำคาบ (Periodic) บ้อนให้กับเฟสคอมพาราเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสระหว่างความถี่อ้างอิงกับความถี่ป้อนกลับจาก VCO สัญญาณที่ได้จากเฟสดีเทคเตอร์ จะเป็นสัญญาณแรงดันที่เป็นสัดส่วนระหว่างความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองแรงดันที่ได้นี้จะถูกนำไปผ่านวงจรรูปฟิลเตอร์ โดยจะกำจัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกไป ให้ได้แรงดันไฟตรงเข้าไปยังอินพุตของ VCO เพื่อทำการปรับความถี่ให้เหมาะสม ในขณะที่วงจรอยู่ในสภาวะลอคความถี่เอาต์พุตของ VCO จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุตซึ่งจะมีค่าความต่างเฟสคงที่ในกรณีนี้ที่เฟสไม่ตรงกันแรงดันที่ออกจากเฟสคอมพาราเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นด้วย เพื่อไปควบคุมการทำงานของ VCO โดยจะปรับความถี่สูงขึ้นจนทำให้ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสองลดลงจนกว่าจะเข้าสู่สภาวะลอค สัญญาณเอาต์พุตของ VCO จึงจะมีขนาดคงที่ตลอดเวลาและค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงตามเฟสของสัญญาณอินพุตเสมอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเฟสล็อคคัลูปที่กำหนดให้เอาต์พุตเป็นเฟสเอาต์พุตได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเฟสล็อคคัลูป

- โดยที่
- θ_i คือ เฟสของสัญญาณอินพุต
 - θ_o คือ เฟสของสัญญาณเอาต์พุต
 - θ_e คือ ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต
 - K_d คือ ค่าอัตราขยายของเฟสคอมพาราเตอร์ มีหน่วยเป็น V/rad
 - $F(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของโลว์พาสฟิลเตอร์
 - K_o คือ ค่าอัตราขยายของ VCO มีหน่วยเป็น rad

สัญญาณเอาต์พุตของโลว์พาสฟิลเตอร์จะควบคุมความถี่เอาต์พุตของ VCO ซึ่งจะทำให้ความถี่ของ VCO มีการเปลี่ยนแปลง ($\Delta\omega$) ไปจากความถี่กลาง

$$\Delta\omega(s) = K_0 \cdot V_c(s) \quad (2.9)$$

โดยที่

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.10)$$

สามารถเขียนเป็นสมการใหม่คือ

$$\frac{d\theta_o}{dt} = K_0 \cdot V_c(s) \quad (2.11)$$

ทำให้ได้

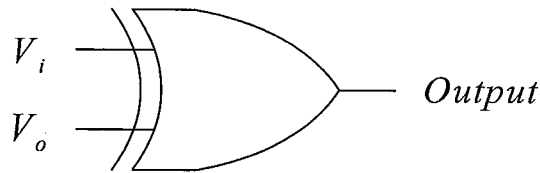
$$\theta_o(s) = \frac{K_0 \cdot V_c(s)}{s} \quad (2.12)$$

ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของ VCO จะเป็นสัดส่วนกับการอินทิเกรตสัญญาณอินพุตของ VCO จากบล็อกไดอะแกรมและสมการข้างต้นสามารถหาทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของระบบปิดได้ดังนี้

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_d \cdot K_0 \cdot F(s)}{s + K_d \cdot K_0 \cdot F(s)} \quad (2.13)$$

2.6.1 เฟสคอมพาราเตอร์

เฟสคอมพาราเตอร์ในวงจรเฟสล็อกคูลูป ทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสระหว่างสัญญาณความถี่อ้างอิงกับสัญญาณความถี่เอาต์พุต สำหรับตัวที่นิยมใช้เป็นวงจรตรวจจับแบบเอ็กซ์คลูซีฟ-ออร์เกท ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 สัญลักษณ์เอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกตที่ใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบเฟส

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความจริงของการคูณ

V_i	V_o	Output
(-)	(-)	(+)
(-)	(+)	(-)
(+)	(-)	(-)
(+)	(+)	(+)

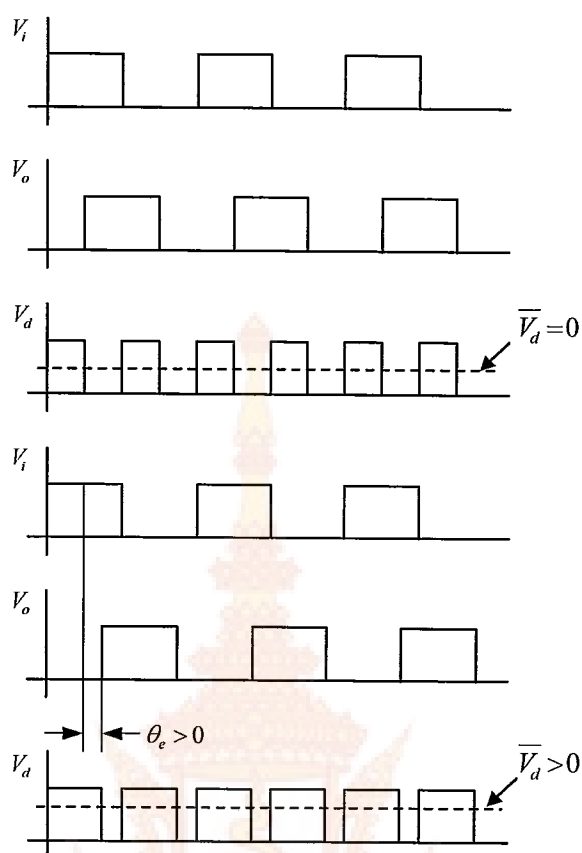
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความจริงของเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกต

V_i	V_o	Output
V_L	V_L	V_L
V_L	V_H	V_H
V_H	V_L	V_H
V_H	V_H	V_L

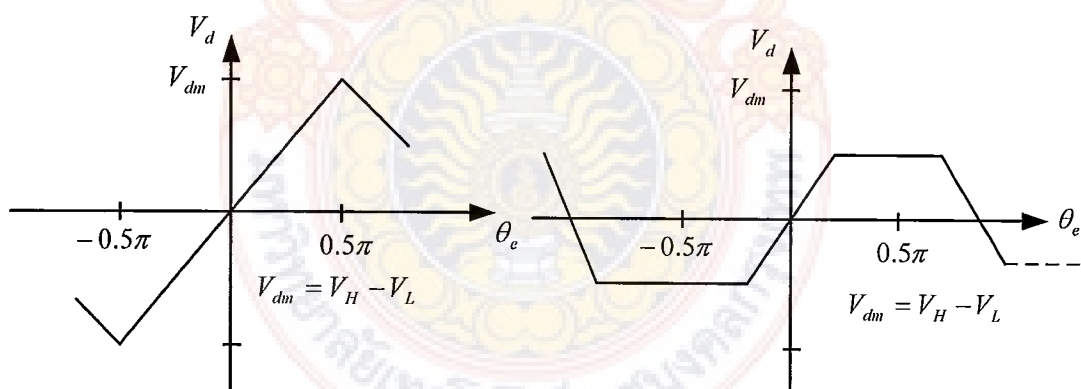
วงจรเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกตเป็นวงจรตรวจจับเฟสแบบดิจิทัลที่มีการทำงานเหมือนกับตัวคูณสัญญาณด้วยการโอเวอร์ไดรฟ์แรงดันที่เอาต์พุตในขณะที่ปรากฏระดับของสัญญาณอินพุตเข้ามาและยังให้คุณสมบัติของวงจรเป็นรูปสามเหลี่ยมโดยเอาต์พุตที่ได้จากการคูณจะเป็นค่าอิมพัลส์ของแรงดันบวก ซึ่งสอดคล้องกับค่าของลอจิกสูงหรือเป็นค่าอิมพัลส์ของแรงดันลบที่สอดคล้องกับค่าลอจิกต่ำสำหรับเงื่อนไขการคูณสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 โดยเอาต์พุตถ้าเปรียบเทียบกับ ตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นตารางค่าความจริงของวงจรเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกต ที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.16 โดยแทนระดับแรงดันลอจิกสูง V_H ด้วยเครื่องหมาย (+) และระดับแรงดันลอจิกต่ำ V_L ด้วยเครื่องหมาย (-) จะเห็นว่าเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกตสามารถนำมาใช้

เป็นวงจรเปรียบเทียบเฟสที่ทำงานเหมือนตัวคูณสัญญาณ (ลอจิก) ได้ $\theta_e = 0$ เมื่อ V_i และ V_o ที่เข้ามามีความต่างเฟสอยู่ 90 องศา เรียกว่าจุดสงบนิ่ง

ในภาพที่ 2.16 ได้แสดงให้เห็นถึงเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแบบเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกท ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฟส (θ_e) ต่าง ๆ กัน ซึ่งจะแบ่งเป็นสองส่วนคือในกรณีที่สัญญาณอินพุต V_i และ V_o ที่เข้ามามีความต่างเฟสอยู่ 90 องศาโดยจะกำหนดให้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฟส (θ_e) เท่ากับศูนย์ ซึ่งเรียกว่า จุดสงบนิ่ง(Quiescent-Point)ของวงจรเปรียบเทียบแบบเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกท โดยจะทำให้ V_d ที่ได้จะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีค่าความถี่เป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุตและให้ค่าดีวีทีไอเคลเท่ากับ 50 % เนื่องจากความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะถูกกรองทิ้งไปด้วยวงจรรูปฟิลเตอร์ดังนั้นจึงพิจารณาเพียงค่าเฉลี่ยของสัญญาณเอาต์พุตที่แสดงเป็นเส้นประตามรูป ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้นี้เป็นค่าที่คำนวณได้จากค่ากลาง(mean)ของระดับลอจิกสูง (V_H)และระดับลอจิกต่ำ(V_L)กล่าวคือถ้าวงจรตรวจจับเฟสแบบเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกท ได้รับการจ่ายไฟเลี้ยง 5 V ค่าเอาต์พุตเฉลี่ยที่ได้จะมีค่าประมาณ 2.5 V ถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์นับจากนี้ไป และในอีกกรณีซึ่งถูกแสดงไว้ในส่วนล่างคือ เมื่อสัญญาณ V_o ล้าหลังสัญญาณอินพุต อ้างอิง V_i ค่าความคลาดเคลื่อนเฟส(θ_e)จะมีค่าเป็นบวกค่าดีวีทีไอเคลของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จึงมีค่ามากกว่า 50 % และจึงทำให้ค่าเฉลี่ยเอาต์พุตเป็นบวกมากขึ้นด้วย ในภาพที่ 2.17(ก) แสดงกราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรเปรียบเทียบเฟสแบบเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกทที่ได้จากการพล็อตค่าเฉลี่ยสัญญาณเอาต์พุต เทียบกับค่าของความคลาดเคลื่อนเฟส (θ_e) ซึ่งจะให้ผลเป็นรูปสามเหลี่ยม และอยู่ภายในช่วงที่เป็นเชิงเส้นของ $-0.5\pi < \theta_e < 0.5\pi$ และถ้าในกรณีที่สัญญาณอินพุต V_i และ V_o มีขนาดไม่สมมาตร(มีระดับสัญญาณไม่เท่ากัน) ทำให้ค่าดีวีทีไอเคลไม่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดันเฉลี่ย(V_{dm})ที่ได้จะมีค่าลดลง ดังแสดงภาพที่ 2.17(ข)



ภาพที่ 2.16 รูปสัญญาณที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฟสเท่ากับศูนย์และมากกว่าศูนย์



(ก) สัญญาณอินพุต V_i กับ V_o มีขนาดสมมาตร (ข) สัญญาณอินพุต V_i กับ V_o มีขนาดไม่สมมาตร

ภาพที่ 2.17 กราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรตรวจจับเฟสแบบเอ็กซ์คูลซีฟ-ออร์เกท

2.6.2 ลูปฟีดแบ็ก

วงจรโวลเทจ ทำหน้าที่กรองเอาเฉพาะสัญญาณความถี่ต่ำมาควบคุมความถี่ของวงจร VCO ลูปฟีดแบ็กจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงก่อนเข้าสู่สภาวะลอคที่เรียกว่า คุณสมบัติชั่วคราว (Transient) ถ้าเลือกอัตราขยายของลูป (Loop Gain) และค่าคงตัวของลูป

(Loop Time Constant) ไม่เหมาะสมความถี่ของเฟสล็อกคูลูปจะไม่ทำการล็อกและจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยทั่วไปค่าคงตัวเวลาของลูปฟิลเตอร์จะต้องไม่มากเกินไป เพื่อว่าทุกครั้งที่เปลี่ยนความถี่เฟสล็อกคูลูปจะล็อกได้เร็วโดยไม่มีการแกว่ง หน้าที่ของโลว์พาสฟิลเตอร์ในเฟสล็อกคูลูป มีหน้าที่หลัก 2 ประการคือ

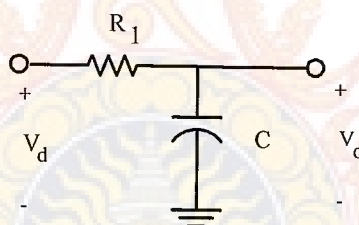
1. ลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นความถี่สูงที่ออกจากเฟสคอมพาราเตอร์โดยใช้คุณสมบัติการกำจัดสัญญาณรบกวนและเป็นตัวทำให้เกิดแรงดันเฉลี่ย (Average dc Voltage) เพื่อนำไปควบคุมวงจร VCO

2. ควบคุมการทำงานของลูปซึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงดันคลาดเคลื่อนของความถี่ระหว่างลูป

2.6.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ

เป็นแบบวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 แบบ R-C ดังแสดงในภาพที่ 2.18 โดยที่แรงดัน V_d เป็นแรงดันที่มาจากเฟสคอมพาราเตอร์และ V_o เป็นแรงดันเอาต์พุตที่จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าตั้งเฟสที่ต้องการ โดยที่ค่าความถี่คัทออฟของวงจรโลว์พาสฟิลเตอร์ (Cut off frequency, ω_{LPF}) สามารถหาได้จาก

$$\omega_{LPF} = \frac{1}{R_1 C} \quad rad/s \quad (2.14)$$



ภาพที่ 2.18 วงจรโลว์พาสฟิลเตอร์อันดับ 1

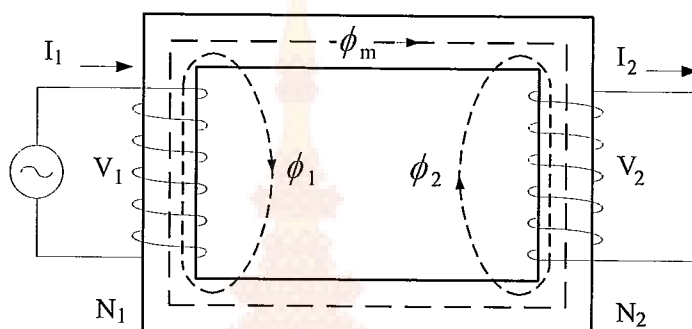
2.6.4 VCO (Voltage Control Oscillator)

โดยทั่วไปแล้วช่วงการใช้งานของความถี่เอาต์พุตจะต้องมีลักษณะที่เป็นเชิงเส้น และในขณะที่ไม่มีความถี่สัญญาณเข้ามาที่อินพุตของ VCO ตัวของมันเองจะสามารถสร้างความถี่ขึ้นมาค่าหนึ่งหรือกำหนดให้มีค่าต่ำสุดได้ VCO ที่ใช้กับเฟสล็อกคูลูปมีทั้งชนิดที่ให้ความถี่เอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นไซน์คุณสมบัติพึงประสงค์ของ VCO ที่ใช้ในเฟสล็อกคูลูปมีดังนี้

1. คุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเป็นความถี่เป็นเชิงเส้น
2. มีช่วงการใช้งานที่กว้างหรือมีค่าอัตราการขยายระหว่างแรงดันกับความถี่ที่สูง
3. มีเสถียรภาพทางความถี่ที่ดี
4. ถ้าความถี่เอาต์พุตเป็นรูปคลื่นไซน์ควรจะเป็นสัญญาณที่คงที่สม่ำเสมอ

2.7 หม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงในอุดมคติดังภาพที่ 2.19 จะเกิดกระแสทางดำนปฐมภูมิ (I_1) ซึ่งทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ฝั่งปฐมภูมิ (V_1) และแรงดันแม่เหล็ก (MMF) ขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิแรงดันแม่เหล็กจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กรวม (ϕ_m) เคลื่อนตัวตัดขดลวดทุติยภูมิทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดแรงดันที่ฝั่งทุติยภูมิ V_2 และกระแสด้านทุติยภูมิ I_2 ขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแรงดันจ่ายให้หม้อแปลงในอุดมคติและค่าสูงสุดของ ϕ_m สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.15



ภาพที่ 2.19 หลักการเบื้องต้นของหม้อแปลง

$$\text{ระบบ SI} \quad V_1 = 4.44fN_1\phi_m \quad (2.15)$$

เมื่อ V_1 คือ แรงดันที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิ (V)

f คือ ความถี่ของแรงดัน (Hz)

N_1 คือ จำนวนของขดลวดปฐมภูมิ (turns)

ϕ_m คือ ฟลักซ์แม่เหล็กรวม Mutual Flux (Wb ระบบ SI)

หม้อแปลงในอุดมคติไม่มีความสูญเสียใดๆ ดังนั้นแรงดันที่จ่ายในขดลวดปฐมภูมิจึงมีค่าเท่ากับแรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (V_1) หรือ

$$V_1 = 4.44fN_1\phi_m \quad (2.16)$$

ส่วนแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิ (V_2) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_2 = 4.44fN_2\phi_m \quad (2.17)$$

เมื่อ

N_1 คือ จำนวนขดลวดปฐมภูมิ

N_2 คือ จำนวนขดลวดทุติยภูมิ

จากสมการ 2.16 และ 2.17 จะได้สมการ Mutual flux

$$\phi_m = \frac{V_1}{4.44 f N_1} \quad (2.18)$$

และ

$$\phi_m = \frac{V_2}{4.44 f N_2} \quad (2.19)$$

นำสมการ 2.18 หาสสมการ 2.19 ทำให้ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.20)$$

จากสมการ 2.20 อัตราส่วนระหว่าง $\frac{N_1}{N_2}$ หรืออัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ ต่อจำนวนรอบทุติยภูมิหรืออัตราส่วนจำนวนรอบ(turns ratio)

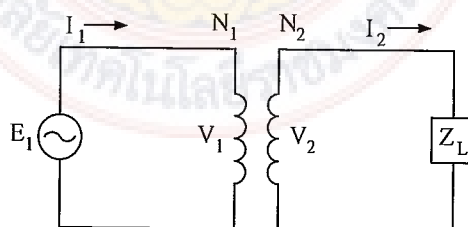
$$\text{turns ratio} = a = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.21)$$

และอัตราส่วนแรงดันและกระแสของหม้อแปลง

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.22)$$

2.8 การถ่ายโอนอิมพีแดนซ์(Impedance Transfer)

การวิเคราะห์หม้อแปลงจะง่ายยิ่งขึ้น ถ้าเราแยกจากวงจรปฐมภูมิและทุติยภูมิออกจากกัน ดังรูป และย้ายค่าอิมพีแดนซ์มาพิจารณาข้างใดข้างหนึ่ง



ภาพที่ 2.20 วงจรของหม้อแปลง

จากภาพที่ 2.20 จะได้แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ

$$V_2 = Z_L I_2 \quad (2.23)$$

จากสมการ 2.20

$$V_1 = V_2 \times \frac{N_1}{N_2} \quad (2.24)$$

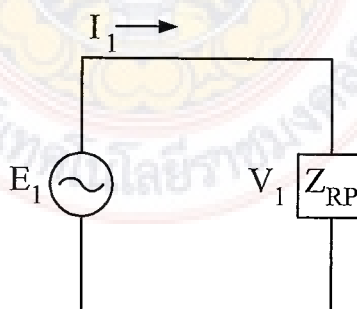
แทนค่าสมการ 2.23 ลงในสมการ 2.24

$$V_1 = Z_L I_2 \times \frac{N_1}{N_2} \quad (2.25)$$

แทนสมการ 2.22 ลงในสมการ $(I_2 = aI_1)$ และแทน $\frac{N_1}{N_2}$ ด้วย a จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_L (aI_1) \times a \\ V_1 &= a^2 Z_L I_1 \\ \frac{V_1}{I_1} &= a^2 Z_L \end{aligned} \quad (2.26)$$

จากสมการ 2.26 จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ($a^2 Z_L$) อยู่ในรูปของแรงดันและกระแสของขดลวดปฐมภูมิ ($\frac{V_1}{I_1}$) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต่ออยู่กับขดลวดทุติยภูมิสามารถนำมาพิจารณาทางด้านขดลวดปฐมภูมิในเทอมของ $a^2 Z_L$ นั้นเอง



ภาพที่ 2.21 วงจรของหม้อแปลงที่ย้ายค่าจากขดลวดทุติยภูมิมายังขดลวดปฐมภูมิ

ถ้าเขียนวงจรเทียบเคียงขึ้นใหม่สอดคล้องกับสมการ 2.26 จะได้รูป 2.21 แล้วนำกฎของโอห์มมารวมพิจารณาจะได้สมการได้ดังนี้

$$Z_{RP} = \frac{V_1}{I_1}$$

(2.27)

จากสมการ 2.26 และ 2.27 จะได้สมการอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{RP} = a^2 Z_L$$

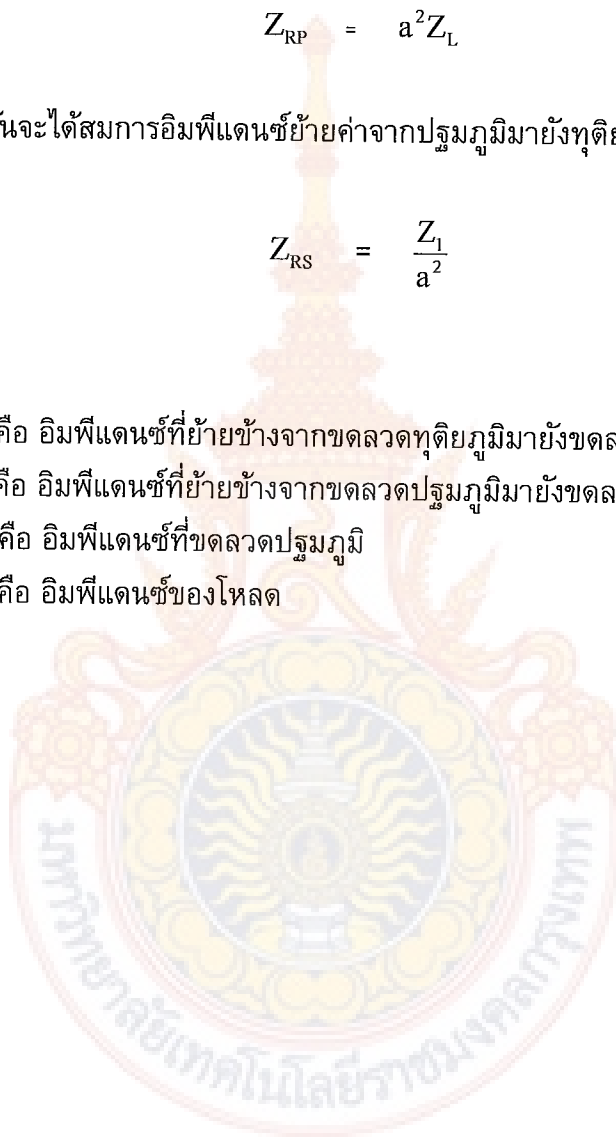
(2.28)

ในทำนองเดียวกันจะได้สมการอิมพีแดนซ์ย้ายค่าจากปฐมภูมิมายังทุติยภูมิดังนี้

$$Z_{RS} = \frac{Z_1}{a^2}$$

(2.29)

- เมื่อ Z_{RP} คือ อิมพีแดนซ์ที่ย้ายข้างจากขดลวดทุติยภูมิมายังขดลวดปฐมภูมิ
 Z_{RS} คือ อิมพีแดนซ์ที่ย้ายข้างจากขดลวดปฐมภูมิมายังขดลวดทุติยภูมิ
 Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ที่ขดลวดปฐมภูมิ
 Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด



บทที่ 3

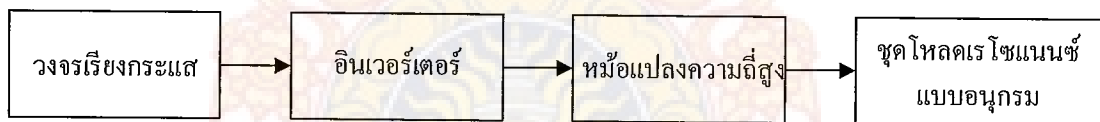
การออกแบบและสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว

3.1 โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว

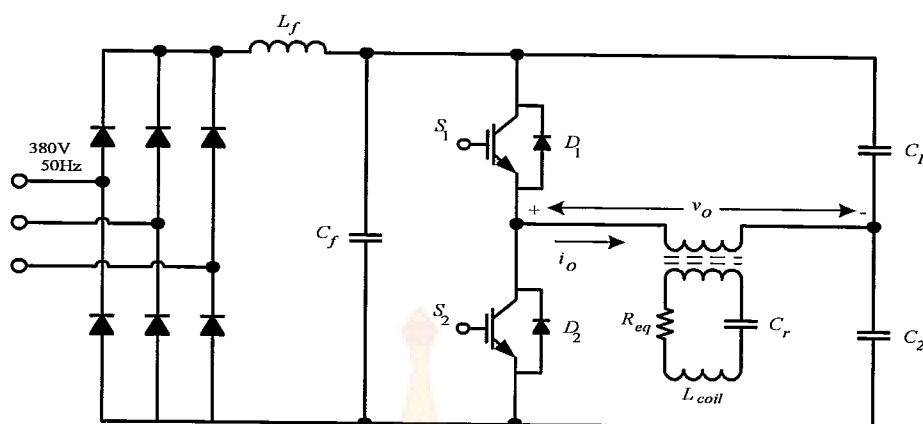
ในการออกแบบและสร้างเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนต่างๆ ดังนี้

1. วงจรเรียงกระแส
2. อินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน
3. หม้อแปลงความถี่สูง
4. ชุดโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ระบบทั้งหมดของต้นแบบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิวใช้แรงดันด้านเข้า 3 Phase 380 V 50 Hz กำลังไฟฟ้าด้านเข้าประมาณ 4 kW จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจ่ายให้หม้อแปลงความถี่สูงเพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของโหลดให้เหมาะสมกับกำลังของอินเวอร์เตอร์ และจ่ายเข้าสู่ชุดโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ดังบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.1 และโครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิวดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว



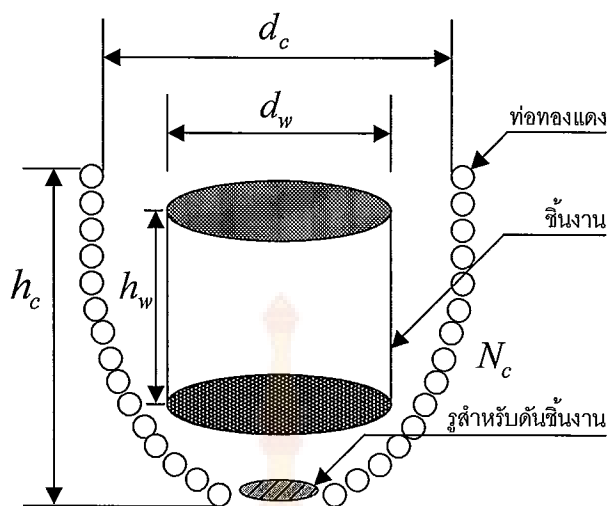
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์แบบอนุกรม

3.2 การออกแบบชุดโพลีโพรไนด์

3.2.1 การออกแบบชุดเหนี่ยวนำความร้อน (L_{coil})

โดยทั่วไปแล้วชุดหลอดเหนี่ยวนำจะทำงานจากท่อทองแดงกลวง ทั้งนี้เพราะทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดีทำให้มีกำลังสูญเสียในชุดหลอดเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งจะมีผลทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงอย่างไรก็ดีเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสในชุดหลอดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ความร้อนที่เกิดจากกระแสที่ไหลในชุดหลอดเหนี่ยวนำจะมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องใช้ท่อทองแดงกลวง เพื่อให้สามารถระบายความร้อนโดยใช้ของเหลว เช่น น้ำ ผ่านเข้าไปในท่อได้ เป็นต้น

สำหรับชิ้นงานที่ใช้เป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm. สูง 74 mm. โดยมีระยะห่างระหว่างผิวนอกของชิ้นงานกับผิวภายในของชุดหลอดเหนี่ยวนำให้เหมาะสมและให้สะดวกในการวางชิ้นงาน ส่วนชุดเหนี่ยวนำเป็นท่อทองแดงกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/4" สามารถพันได้ทั้งหมด 15 รอบ จากนั้นนำไปเชื่อมต่อกับแผ่นทองแดงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า และใช้น้ำระบายความร้อนภายในชุดหลอดทองแดง เนื่องจากกระแสที่ชุดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ชุดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบและสร้าง

โดยที่	N_c	คือ	จำนวนรอบของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ
	h_w	คือ	ความสูงของชิ้นงาน
	h_c	คือ	ความสูงของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ
	d_c	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ
	d_w	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของชิ้นงาน

3.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุ (C)

จากขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไปในหัวข้อที่ผ่านมาไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณ ในโครงการนี้ได้ใช้เครื่องวัดรุ่น HIOKI 3532-50 LCR HITESTER โดยเลือกใช้ความถี่ที่เครื่องวัดมีอยู่ 20kHz ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้มีค่าโดยประมาณ $L_{coil} \approx 10.2\mu\text{H}$ ค่าที่ได้นี้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากเครื่องวัด ดังนั้นจึงไปเลือกขนาดของค่าตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์ 20kHz ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad f &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\
 \text{ดังนั้น} \quad C_r &= \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \\
 C_r &= \frac{1}{4\pi^2 (20 \times 10^3)^2 (10.2 \times 10^{-6})} \\
 C_r &\approx 6.2\mu\text{F}
 \end{aligned}$$

จะได้ค่าตัวเก็บประจุประมาณ $6.2 \mu F$ เพราะฉะนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด $3 \mu F$ จำนวน 2 ตัว ค่าที่ได้นี้จะต่างกับค่าที่คำนวณได้ เนื่องจากค่าของตัวเก็บประจุที่มีขายอยู่ และลักษณะการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า $6 \mu F$

3.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

เนื่องจากโพลต์ใช้ค่าอิมพีแดนซ์สูงเพราะต้องการกระแสที่สูงกว่าไอจีบีทีที่จะสามารถรับได้ จึงต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงมาเป็นตัวช่วยลดกระแสฝั่งปฐมภูมิลง

อัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ N_s จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ N_p

$$\text{Turns Ratio} = \frac{N_p}{N_s} = 6$$

จากที่เลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ CM150DY-24NF ที่มีพิกัดกระแส 150 A แต่กระแสของโพลต์มีค่าประมาณ 278 A จากการจำลองการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของหม้อแปลงจะได้

$$\text{Turns Ratio} = \frac{i_s}{i_p}$$

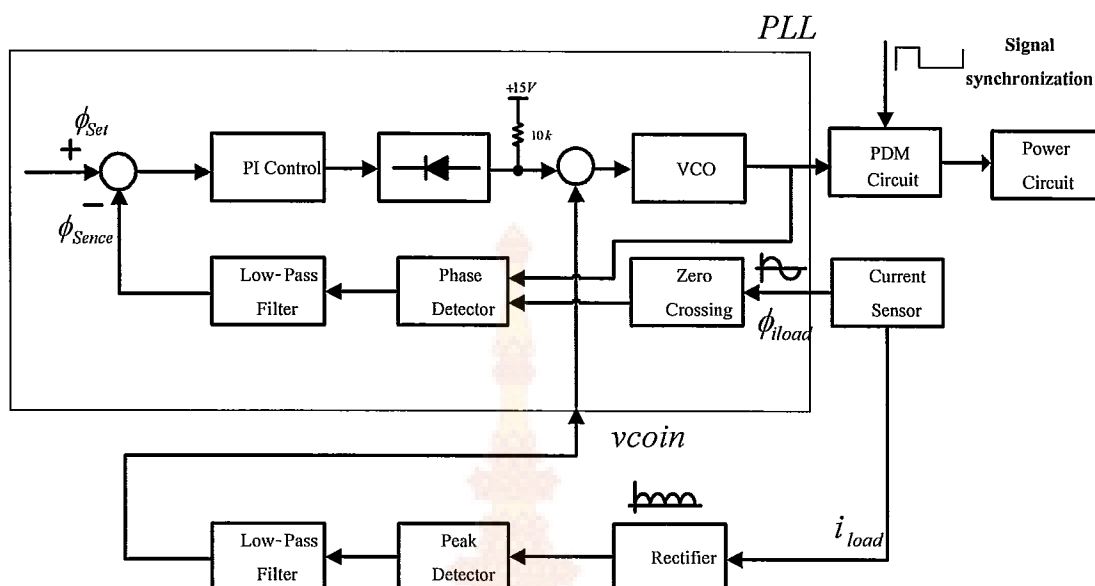
$$i_p = \frac{278}{6} = 46 A$$

ซึ่งค่ากระแสฝั่งปฐมภูมิจะค่าประมาณ 46 A ไม่เกินพิกัดของไอจีบีที

3.4 การออกแบบอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากในโครงงานนี้ใช้ความถี่ในการสวิตช์สูงประมาณ 20 kHz จึงเลือกใช้ไอจีบีทีในการสวิตช์ ในโครงงานนี้ต้องการใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 4 kW จะมีกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์แต่ละตัวจะมีค่ายอดประมาณ 46 A ขนาดของแรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่ายอดประมาณ 360 V จึงเลือกใช้ไอจีบีทีเบอร์ CM150DY-24NF ซึ่งมีพิกัดกระแส 150 A ที่อุณหภูมิทำงาน $25^\circ C$ พิกัดแรงดัน 1200 V

3.4.1 วงจรควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

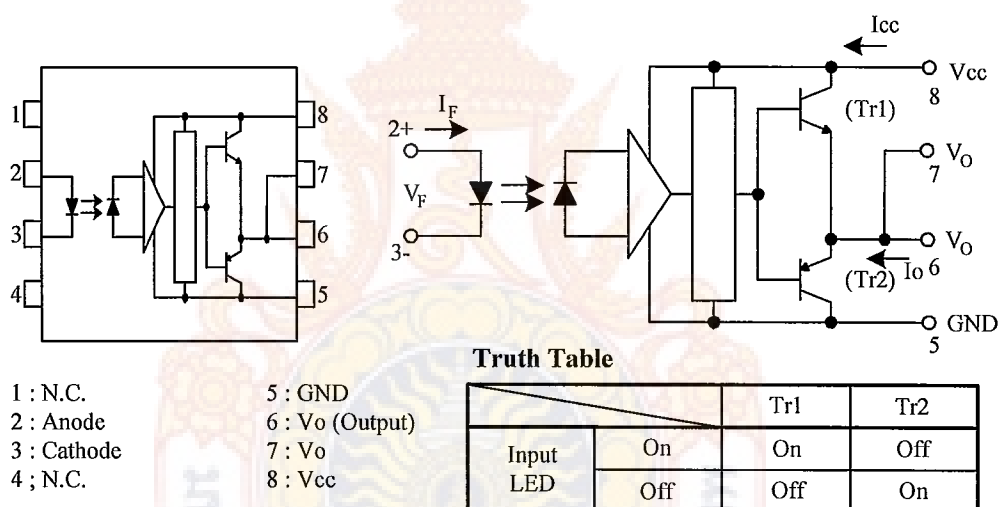
จากภาพที่ 3.4 จะมีการทำงานโดยการเช็คกระแสกลับจาก Current Sensor แล้วจ่ายไปยังชุดตรวจจับสัญญาณเฟสและชุดตรวจจับกระแสโดยที่ทั้งสองชุดจะทำงานเมื่อเฟสที่ตรวจจับไม่เกินค่าที่เซตไว้และกระแสที่ตรวจจับมาไม่เกินค่าที่ตั้งไว้เช่นกัน การทำงานจะทำงานให้แรงดันก่อนเข้า VCO เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ไปเข้าวงจรขับเคลื่อนของสวิตช์ S_1 กับ S_2 และสัญญาณที่ได้นี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเฟสของความถี่อ้างอิงที่ภาคตรวจจับเฟส(Phase Detector)แล้วให้กำเนิดแรงดันคลาดเคลื่อนออกไปยังภาคกรองความถี่ต่ำผ่านหรือภาคกรองความถี่สูง(Low - Pass Filter)ทำหน้าที่กำจัดส่วนประกอบทางไฟสลบที่ปะปนมากับแรงดันคลาดเคลื่อนและปล่อยให้ส่วนประกอบทางไฟตรงของแรงดันคลาดเคลื่อนผ่านไปยัง VCO เมื่อตัวตรวจจับเฟสเกินเนื่องจากเฟสที่เข้ามาเป็นลบจะทำให้แรงดันก่อนเข้า VCO มีค่าลดลงทำให้ความถี่ต่ำลงเพื่อให้ค่าเฟสที่ตรวจจับมามีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้และเมื่อตัวตรวจจับกระแสเกินเนื่องจากกระแสที่เข้ามาเป็นบวกจะทำให้แรงดันก่อนเข้า VCO มีค่าสูงขึ้นทำให้ความถี่สูงขึ้นเพื่อให้ค่ากระแสที่ตรวจจับมามีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจาก VCO จะถูกส่งเข้าไปยัง PDM circuit เพื่อทำการซิงค์กับสัญญาณก่อนถูกส่งไปยัง Power circuit

3.4.2 วงจรขับนำเกต

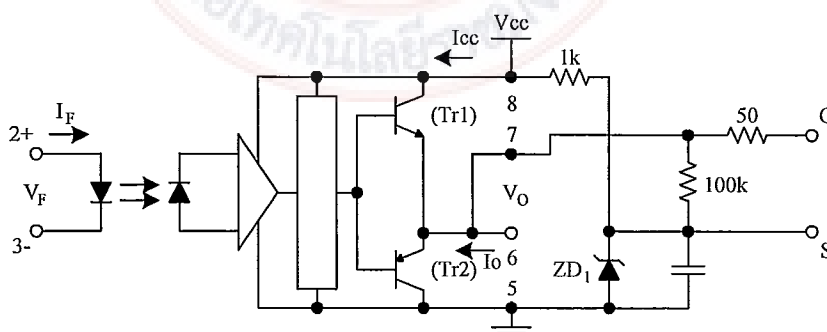
ไอจีบีทีที่ต้องการแรงดันมาขับเคลื่อนเพื่อให้มันสามารถทำงานในสภาวะนำกระแส และหยุดนำกระแสได้ ซึ่งวงจรขับนำเกตที่แสดงดังภาพที่ 3.5 เป็นวงจรขับเกตโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ซึ่งใช้ตัวเชื่อมโยงสัญญาณทางแสงเพื่อแยกโดดสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างวงจรกำลัง(Main Power Circuit)และวงจรควบคุม(Control Circuit)สัญญาณขับนำจากวงจรควบคุมจะเป็นตัวขับ LED ที่อยู่ภายในตัวแยกโดดสัญญาณทางแสงซึ่งทำหน้าที่เพื่อไปอัสทรานซิสเตอร์ Tr_1 (NPN) และทรานซิสเตอร์ Tr_2 (PNP)

ทรานซิสเตอร์ Tr_1 เป็นชนิด NPN ซึ่งต้องการสัญญาณไบอัสเป็นสัญญาณไฟบวก (+) และทรานซิสเตอร์ Tr_2 เป็นชนิด PNP ซึ่งต้องการสัญญาณไบอัสเป็นสัญญาณไฟลบ (-)

เมื่อทรานซิสเตอร์ Tr_1 และ ทรานซิสเตอร์ Tr_2 ได้รับสัญญาณไบอัสเป็นสัญญาณไฟบวก (+) ทำให้ทรานซิสเตอร์ Tr_1 นำกระแส และในขณะเดียวกันทรานซิสเตอร์ Tr_2 หยุดนำกระแส



ภาพที่ 3.5 วงจรภายในไอซีเบอร์ TLP250



ภาพที่ 3.6 แสดงวงจรขับเกตที่ใช้งานจริง

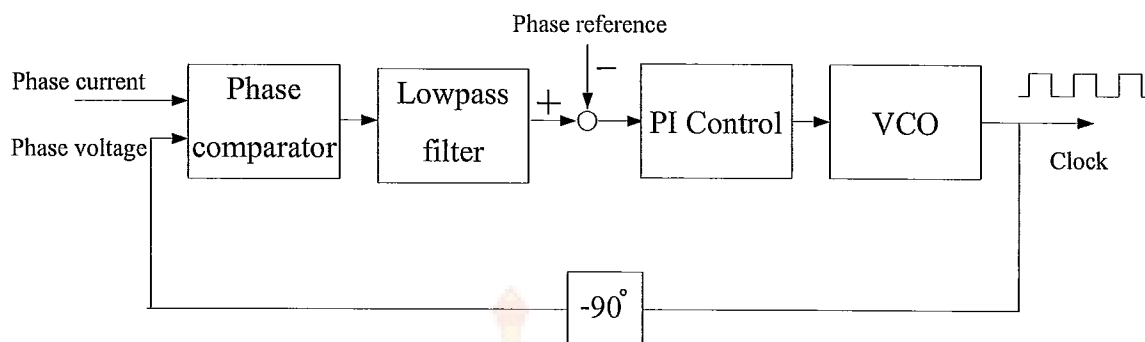
วงจรขับเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 3.6 แสดงวงจรขับเคลื่อนที่ใช้งานจริง ใช้ตัวแยกโหนดทางแสงเพื่อแยกโหนดระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง สัญญาณขับนำจากวงจรควบคุมจะเป็นตัวขับ LED ที่อยู่ในตัวแยกโหนดทางแสงเพื่อไปออสซิลเลตให้กับทรานซิสเตอร์ Tr_1 ภายในให้น้ำกระแส และในขณะเดียวกันทรานซิสเตอร์ Tr_2 หยุดน้ำกระแส ทำให้มีกระแสไหลผ่านความต้านทาน $50\ \Omega$ ไปจ่ายแรงดันขาเกต ในขณะนั้นซีเนอร์ไดโอดที่ต่ออยู่กับขาซอร์สเพื่อสร้างแรงดัน $-5V$ ทำให้แรงดันที่จุด G เมื่อเทียบกับจุด S เป็นแรงดันไฟบวก $15\ V$ ($V_{GS} = +15\ V$)

ในทางกลับกันเมื่อไม่มีสัญญาณขับนำเกิดผ่านตัวแยกโหนดทางแสง ทรานซิสเตอร์ Tr_1 ไม่น้ำกระแส ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ Tr_2 จะน้ำกระแสแทนทำให้ที่จุด G มีแรงดันไฟฟ้าลบเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับจุด S ซึ่งค่าแรงดันไฟลบที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันซีเนอร์ไดโอด ZD_1 โดยทั่วไปมักจะให้มีแรงดันไฟลบ (-) อยู่ประมาณ $5\ V$ เพื่อให้ตัวสวิตช์คัตออฟได้เร็วขึ้นและป้องกันการนำกระแสของตัวสวิตช์เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามา

3.5 การออกแบบให้มุ่มเฟสคงที่

การที่จะต้องมี การควบคุมมุ่มเฟสของแรงดันกับกระแสของโหลดเรโซแนนซ์อนุกรมให้มีค่าเป็นแบบเฟสแรงดันนำหน้าเฟสกระแสตลอดการทำงานเนื่องจากในระหว่างการให้ความร้อน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นงานอยู่ตลอด เพราะค่าพารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำแปรตามค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงานโดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานซึ่งอยู่ในตระกูลเหล็กมีอุณหภูมิสูง ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability) ของชิ้นงานมีค่าเป็น 1 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่เกิดขึ้นทำให้จุดทำงานของอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนไปจากที่ตั้งไว้ในตอนแรกและอาจไปอยู่ที่จุดทำงานที่ทำให้แรงดันล้าหลังกระแส อาจทำให้เกิดกระแสสูงที่สวิตช์ (Spike Current) ทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

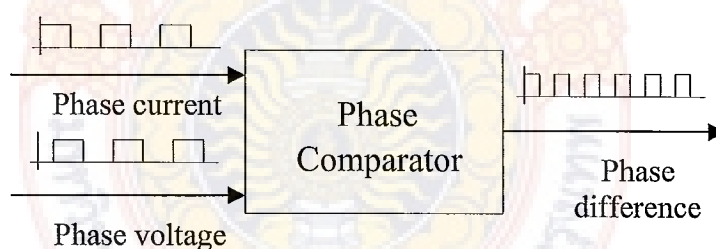
การควบคุมมุ่มเฟสคงที่สามารถปรับให้มุ่มของแรงดันมีเฟสนำหน้าหรือตามหลังกระแสก็ได้ โดยการปรับแรงดันอ้างอิงที่ตั้งค่าสัฟเฟส (Phase reference) โดยในที่นี้จะทำการควบคุมให้เฟสของแรงดันนำหน้ากระแสคงที่ตลอดการทำงาน บล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 3.7 ประกอบด้วย วงจรวัดเฟสกระแสที่โหลด, วงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase comparator, PD), ตัวควบคุมแบบอนุโลก PI (Constant Phase Controller) และวงจรเปลี่ยนจากแรงดันเป็นความถี่ (Voltage Controlled Oscillator, VCO) โดยใช้ Phase Detect 1 (EX-OR Gate) และ VCO ที่อยู่ภายใน IC 4046 ซึ่งเป็นเฟสล็อกคัลบัสไอซี



ภาพที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อกคูลูป

3.5.1 วงจรเปรียบเทียบความแตกต่างเฟส

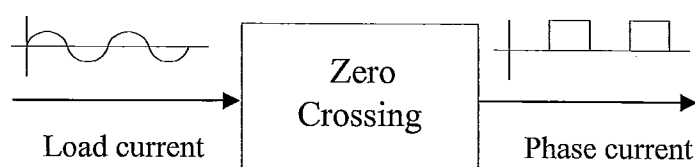
สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนั้นสัญญาณขับนำสวิตช์กับแรงดันที่โหลดมีเฟสที่ตรงกัน ดังนั้นเราใช้สัญญาณขับนำสวิตช์แทนแรงดันพัลส์และผ่านวงจรเลื่อนเฟสแรงดันโดย D Flip-Flop ในการเลื่อนสัญญาณ หลังจากนั้นสัญญาณกระแสกับแรงดันจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อตรวจจับความแตกต่างเฟส โดยใช้ EX-OR Gate ในวงจรเฟสล็อกคูลูปเป็นตัวเปรียบเทียบความแตกต่างเฟส โดยเอาต์พุตที่ได้จะเป็น Duty cycle ความต่างเฟสที่มีความถี่ 2 เท่าของความถี่อินพุตแรงดันขาออกถูกกรองด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำแบบ RC เพื่อให้ได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ต้องการแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับค่าเฟสที่ตั้งไว้ สัญญาณที่ได้ถูกป้อนให้กับตัวควบคุมกำเนิดความถี่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ให้ได้เฟสตามตั้งไว้



ภาพที่ 3.8 การเปรียบเทียบความต่างเฟส

3.5.2 วงจรตรวจจับกระแสเฟส

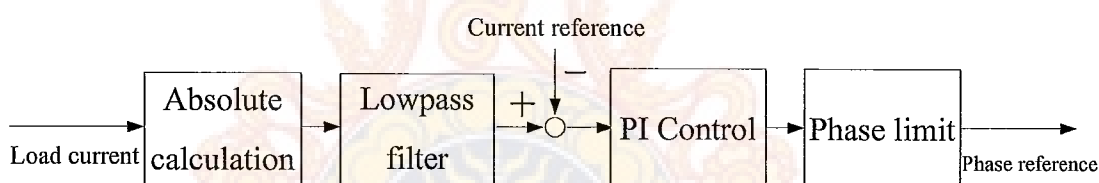
การวัดกระแสที่โหลดนั้นจะต้องใช้ตัววัดที่ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและให้เฟสของสัญญาณที่วัดได้กับเฟสกระแสจริงมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด เนื่องจากกระแสดังกล่าวมีความถี่ที่(สูงประมาณ 20kHz) โดยหลักการวัดเป็นดังนี้ วัดกระแสที่โหลดโดยให้หม้อแปลงกระแสซึ่งสัญญาณที่ได้จะเป็นแรงดันไฟสลักรูปคลื่นไซน์ สัญญาณที่ได้นำไปผ่านวงจรตรวจจับแรงดันศูนย์ (Zero Crossing) โดยสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นสี่เหลี่ยมที่มีเฟสและความถี่ตรงกันกระแสที่โหลดพอดี



ภาพที่ 3.9 การตรวจจับเฟสกระแส

3.6 การออกแบบการควบคุมกำลัง

การปรับกำลังโดยวิธีการควบคุมกระแสที่โหลด ซึ่งใช้หลักการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะอยู่ที่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ และกำลังไฟฟ้าจะลดลงเมื่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์มีความถี่สูงขึ้นเนื่องจากผลของค่าอินดักตีฟรีแอกแตนซ์ของโหลดอนุกรมเรโซแนนซ์สูงขึ้นจึงทำให้กระแสที่ไหลลดลง หลักการทำงานของวงจรคือ วงจร Absolute Calculation จะรับสัญญาณไซน์จากหม้อแปลงกระแสแปลงเป็นสัญญาณชื่อบวกทั้งหมด และถูกกรองด้วยวงจรความถี่ต่ำเพื่อเฉลี่ยให้ได้ค่าแรงดันไฟตรงแล้วนำไปเปรียบเทียบกับกระแสที่ตั้งไว้ ค่าความผิดพลาดที่ได้จะถูกป้อนเข้า PI Control และ Phase Limit โดยที่ Phase Limit จะตั้งไว้ที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะควบคุมความถี่ในการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมเฟสต่อไป

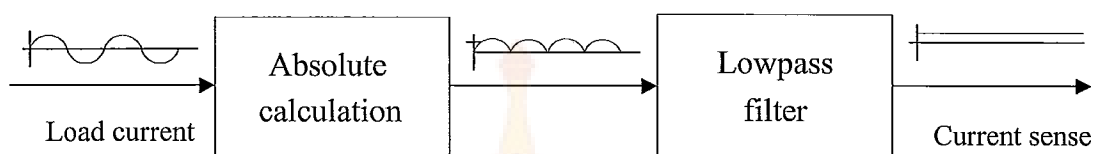


ภาพที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกำลัง

นอกจากวงจรนี้จะช่วยในการควบคุมกำลังไฟฟ้าแล้วยังสามารถป้องกันกระแสเกินได้เนื่องจากกระแสโหลดจะไม่เกินกระแสที่ตั้งไว้(Current Reference)และยังช่วยให้การเริ่มการทำงานของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำไม่เกิดกระแสสูงเนื่องการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะเริ่มที่ความถี่สูงก่อนแล้วจึงลดลงจนทำงานที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ จึงทำให้กระแสขณะเริ่มการทำงานของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำมีค่าต่ำ จึงไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหายเนื่องจากผลของกระแสในขณะเริ่มเดินเครื่อง

3.6.1 วงจรตรวจจับขนาดกระแสไหลลด

โดยวงจรจะรับสัญญาณกระแสไหลลดจากหม้อแปลงกระแสซึ่งเป็นแรงดันกระแสสลับและจะแปลงให้แรงดันเป็นสัญญาณแรงดันครึ่งบวกแบบเต็มคลื่น แล้วจึงผ่านวงจรกรองแรงดันให้เรียบและเอาต์พุตที่ได้เป็นแรงดันกระแสตรง และจะมีอัตราขยายเพื่อให้ได้เอาต์พุตที่เหมาะสม



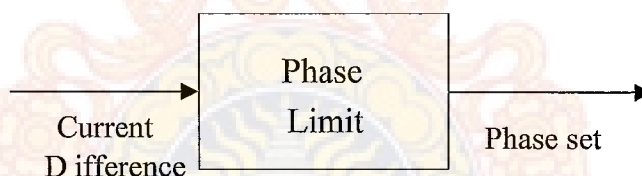
ภาพที่ 3.11 การตรวจจับขนาดกระแสไหลลด

3.6.2 เฟสลิ้มิต

จะรับแรงดันจากการเปรียบเทียบระหว่างขนาดกระแสอ้างอิงกับขนาดของกระแสไหลลด โดยค่าผิดพลาดที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-10 V โดยจะผ่านวงจรลิ้มิตเพื่อควบคุมไม่ให้แรงดันเอาต์พุตเกินค่าแรงดัน (V_{set}) ที่ตั้งไว้และแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะนำไปควบคุมเฟสอ้างอิงต่อไป

$$V_{Out} = V_{in} \text{ ถ้า } V_{in} < V_{set}$$

$$V_{out} = V_{set} \text{ ถ้า } V_{in} > V_{set}$$



ภาพที่ 3.12 การลิ้มิตเฟส

3.7 การออกแบบวงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในโครงการนี้ใช้แรงดัน 3 Phase 380 V 50 kW แปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 550 V วงจรเรียงกระแสประกอบด้วยบริดจ์ไดโอดและผ่านวงจรกรองแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุ (C_f) $1.5 \mu F$ โดยมีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ (L_f) $34 \mu H$ ในขณะที่วงจรเริ่มทำงานแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าประมาณศูนย์โวลต์ ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งกระแสในจำนวนนี้จะไหลผ่านบริดจ์ไดโอดอาจทำให้ไดโอดเสียหายได้ ดังนั้นจึงใส่ตัวเหนี่ยวนำเพื่อจำกัดกระแสไว้ในช่วงเริ่มการทำงาน กระแสที่ไหลผ่านบริดจ์ไดโอดประมาณ 6 A เลือกใช้บริดจ์ไดโอดที่ทนแรงดันได้ 800 V พิกัดกระแส 30 A

3.8 Current Transformer (CT) สำหรับวัดกระแส

การทำ CT ขึ้นมาเพื่อทำการวัดกระแสไฟฟ้านั้นทำได้โดยการใส่แกนเฟอร์ไรท์พันด้วยลวดตัวนำและปลายสายตัวนำทั้งสองจะต่อเข้ากับตัวต้านทาน(R) CTที่ทำขึ้นมานั้นจุดประสงค์เพื่อต้องการวัดรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าเท่านั้น

ที่เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์มาทำ CT เพราะว่าเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของแม่เหล็กทำให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากและมีความต้านทานสูง จึงช่วยลดการสูญเสียบนแกนหรือลดความร้อนจากการเกิดกระแสไหลวนที่ความถี่สูง ตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 3.13

ต้องการออกแบบ CT ขนาด 1:100 กระแสสูงสุด 30 A

จาก
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

เมื่อ $N_1 = 1$ รอบ, $N_2 = 100$ รอบ, $I_1 = 30$ A

คำนวณหากระแสไฟออกของขดลวด 100 รอบ

$$I_2 = \frac{1}{100} \times 30 = 0.3 \text{ A}$$

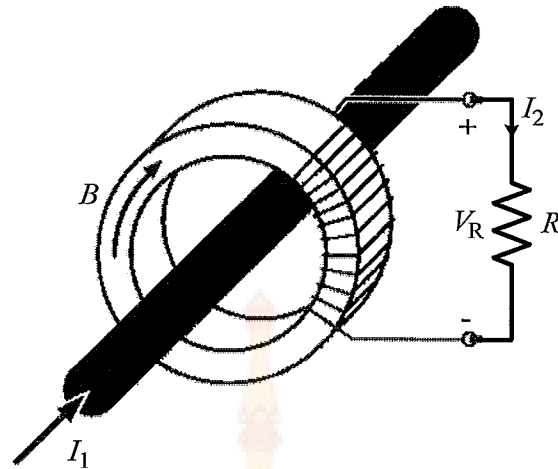
ใช้ $R = 1 \Omega$ ต่อระหว่างขดลวด 100 รอบ จะได้แรงดันตกคร่อม R (V_R) เท่ากับ

$$V_R = I_2 \times R$$

$$V_R = 0.3 \times 1 = 0.3 \text{ V}$$

สามารถอ่านค่ากระแสไฟฟ้าจาก CT ได้โดย

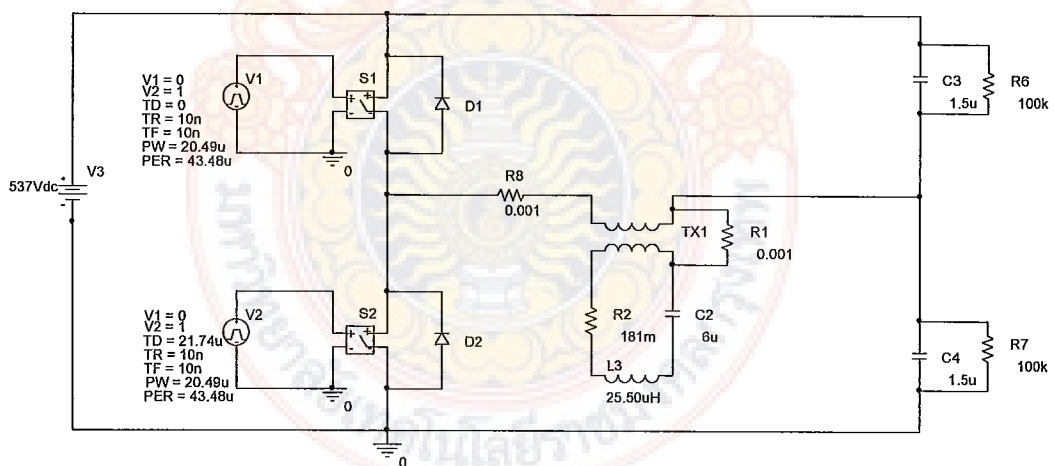
$$I_1 = \frac{V_R}{R} \times 100 \text{ รอบ} \quad \text{A}$$



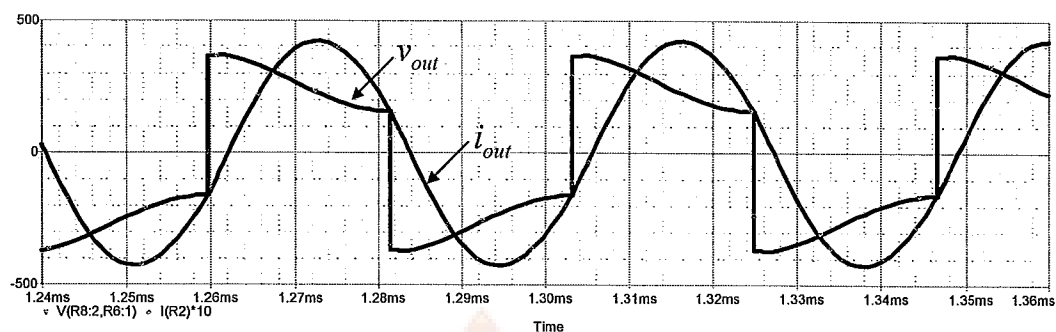
ภาพที่ 3.13 Current Transformer

3.9 จำลองการทำงาน

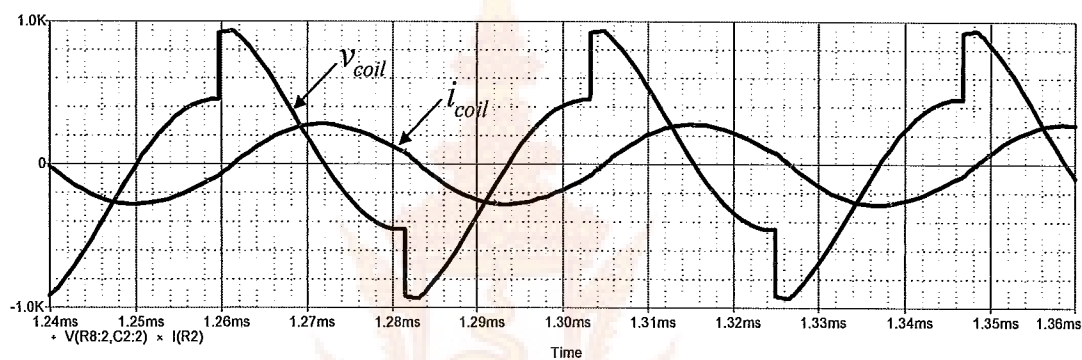
ทำการจำลองการทำงานของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุปแข็งผิวที่มีชุดโหลดต่อแบบอนุกรมดังภาพที่ 3.14 ผลการจำลองการทำงานภาพที่ 3.15 แสดงรูปคลื่นแรงดัน (v_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และรูปคลื่นกระแส (i_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และภาพที่ 3.16 แสดงรูปแรงดัน (v_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำและกระแส (i_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำ



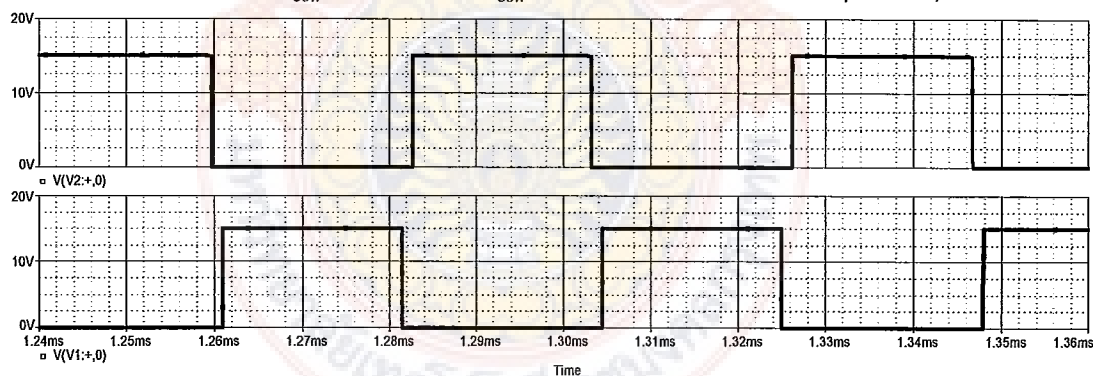
ภาพที่ 3.14 วงจรจำลองการทำงาน



ภาพที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดัน (v_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์และกระแส (i_{out}) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (i_{out} : 10 A/div, v_{out} : 100 V/div and Time: 10 μ s / div.)



ภาพที่ 3.16 รูปคลื่นแรงดัน (v_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำและกระแส (i_{coil}) ที่ขดเหนี่ยวนำ (i_{coil} : 200 A/div, v_{coil} : 200 V/div and Time: 10 μ s / div.)

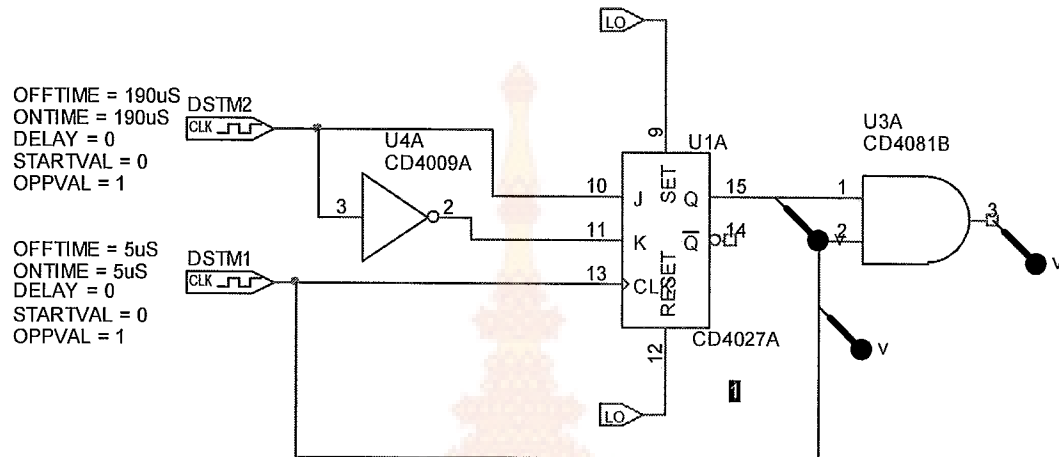


ภาพที่ 3.17 รูปคลื่นแรงดันสวิตช์ (S_1) และสวิตช์ (S_2) ของอินเวอร์เตอร์ (S_1 : 10 V/div, S_2 : 10 V/div and Time: 10 μ s / div.)

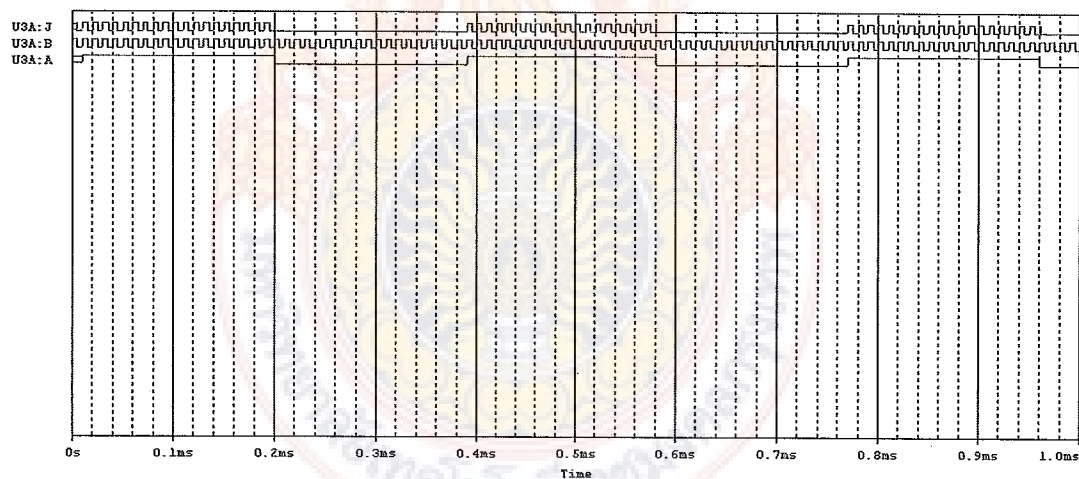
จากการจำลองการทำงานตามวงจรในภาพที่ 3.14 และรูปคลื่นดังภาพที่ 3.15-3.17 นั้นแสดงให้เห็นได้ว่าวงจรนี้สามารถทำงานได้และสามารถปรับกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ได้จริง

3.9.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรซิงค์

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการนำการควบคุมแบบปรับความหนาแน่นของพัลส์มาเพื่อปรับกำลังของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นเพื่อให้การออกแบบวงจรควบคุมเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องทดลองซิมูเลตก่อนโดยใช้โปรแกรม orcad pspice รุ่น evaluate



ภาพที่ 3.1.8 วงจรควบคุมจำลองการทำงาน

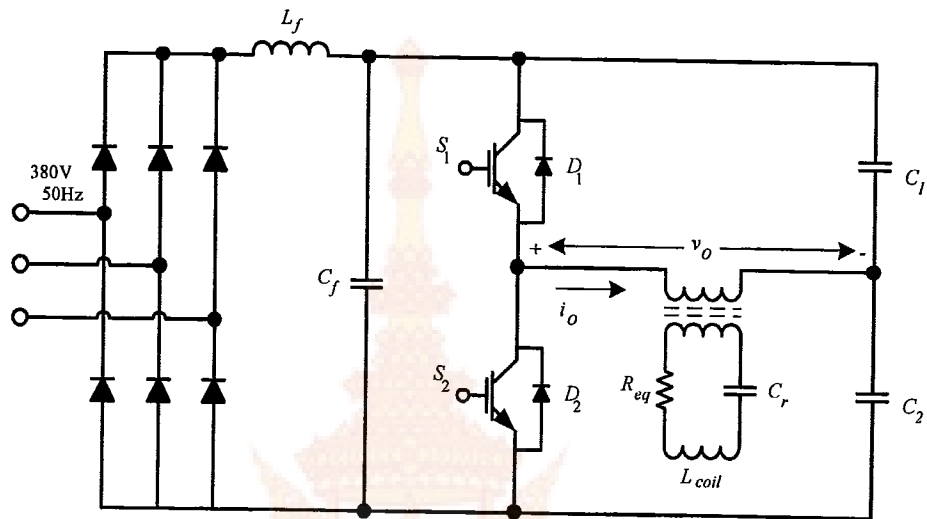


ภาพที่ 3.1.9 สัญญาณขับเคลื่อนแบบควบคุมความหนาแน่นของพัลส์

บทที่ 4

การทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว

ทำการทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิวที่มีโครงสร้างดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว

ความถี่สวิตช์อยู่ในการทดสอบอยู่ในย่าน 21 – 24 kHz ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ มีดังนี้ แรงดันที่จ่ายเข้าวงจรเรียงกระแส $V_{in} = 380V$, $L_f = 34\mu H$, $C_f = 1.5\mu F$, $C_r = 6\mu F$, $L_{coil} = 10.2\mu H$ และ $R_{eq} = 0.181\Omega$ ทดสอบโดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 75 mm. สูง 74 mm. ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (v_o) กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (i_o) กำลังไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (P_{out}) แรงดันที่ขดเหนี่ยวนำ (v_{coil}) และกระแสที่ขดเหนี่ยวนำ (i_{coil}) แรงดันที่หลังหม้อแปลงไฟฟ้า (v_{tran}) และกระแสที่หลังหม้อแปลงไฟฟ้า (i_{tran})

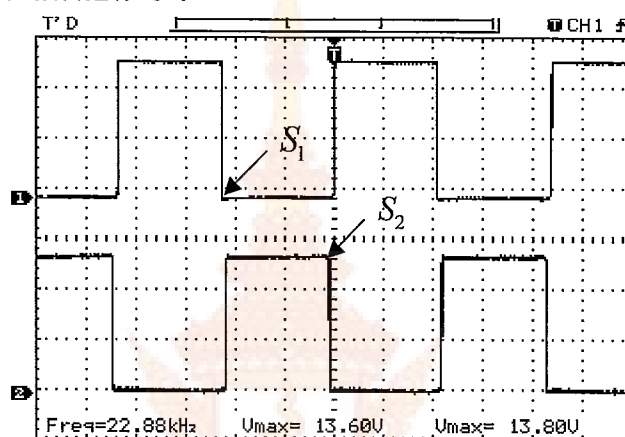
เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บผลการทดสอบมีดังนี้

1. ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น DSO3062A
2. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด ยี่ห้อ Sentry รุ่น ST677 Infrared Thermometer
3. โพรบวัดกระแส ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 80i-110s
4. เครื่องวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ FLUKE รุ่น Power Quality Analyzer 434
5. เครื่องวัดความร้อนยี่ห้อ FLUKE รุ่น Ti25 Thermal Imager

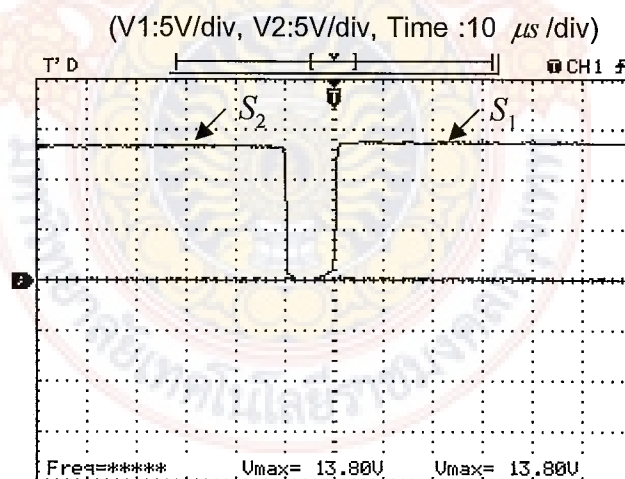
4.1 การทดสอบภาคควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

4.1.1 สัญญาณขับเกตของไอจีบีทีในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

การทดสอบสัญญาณขับเกตของไอจีบีทีทั้งสองตัวนั้นจะต้องมีช่องว่างของ Dead time อยู่เล็กน้อยเพื่อป้องกันการลัดวงจรของอินเวอร์เตอร์ โดยในที่นี้มีค่าอยู่ประมาณ $1\ \mu\text{s}$ ซึ่งเหมาะกับค่า Turn-on delay time และ Turn-off delay time ของไอจีบีที ลักษณะสัญญาณขับไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ได้จากการวัด แสดงในภาพที่ 4.1 โดยในช่วงสัญญาณ ON มีขนาด 10 V ส่วนในสัญญาณช่วง OFF มีค่าเป็น -5 V

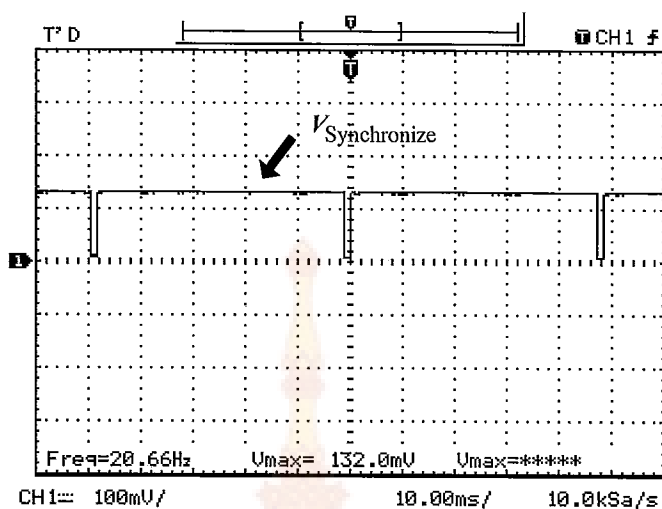


ภาพที่ 4.2 สัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัวในอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันครึ่งบริดจ์

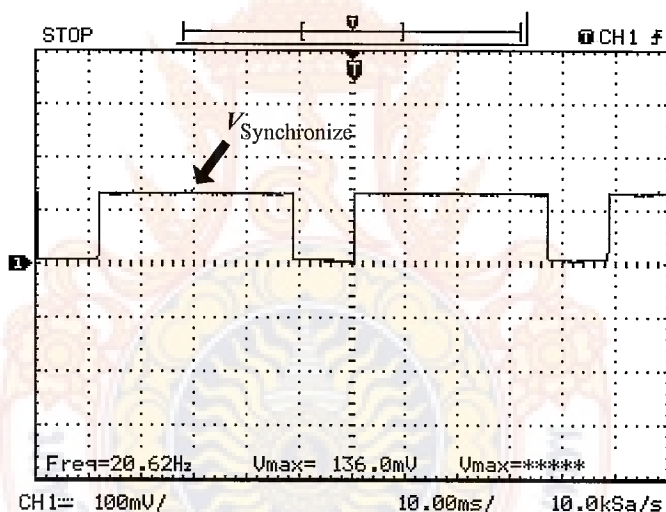


ภาพที่ 4.3 สัญญาณขับไอจีบีที 2 ตัวและแสดงช่วง Dead Time

(V1:5V/div, V2:5V/div, Time :1 μs /div)



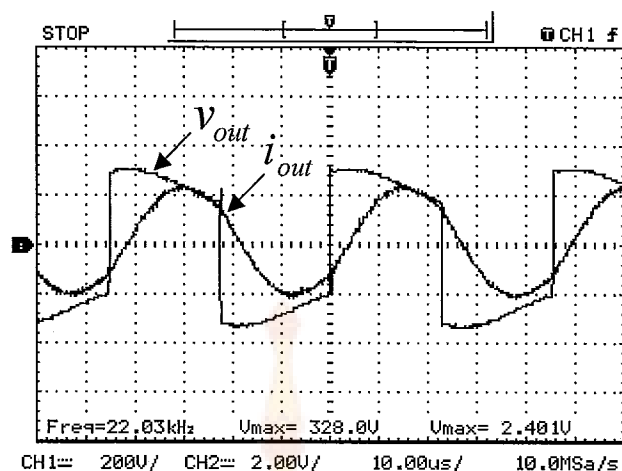
ภาพที่ 4.4 แสดงสัญญาณซิงค์ที่ตีวดีไซเคิล 96% (แรงดัน $V_{Synchronize}$: 12V ที่ 10 ms)



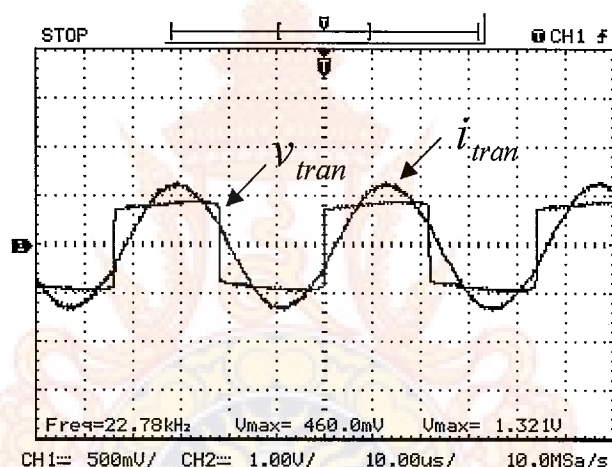
ภาพที่ 4.5 แสดงสัญญาณซิงค์ที่ตีวดีไซเคิล 80% (แรงดัน $V_{Synchronize}$: 12V ที่ 10 ms)

4.2 การทดสอบภาคควบคุมกำลัง

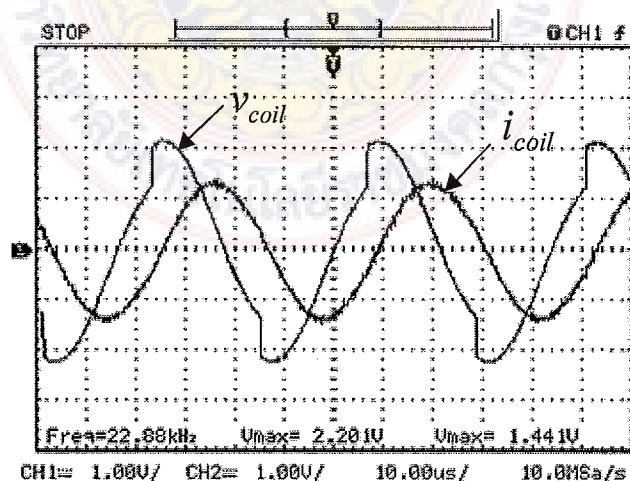
จุดประสงค์เพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรควบคุมกำลัง ว่าสามารถปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าโดยการควบคุมกระแสที่โหลดได้ ซึ่งการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตลอดเวลา และที่ความถี่การทำงานใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์โหลดจะได้รับกระแสสูงสุด และค่ากระแสที่โหลดจะลดลงเรื่อยๆเมื่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์มากๆ ซึ่งอยู่ในสภาวะเฟสของแรงดันนำหน้ากระแส การทดลองปรับกำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW ผลการวัดรูปคลื่นเฟสแรงดันและกระแสดังภาพที่ 4.4 และวัดรูปคลื่นเฟสแรงดันและกระแสหลังหม้อแปลงความถี่สูงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเอาต์พุตที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW
(V:200V/div, I:20A/div, Time:10 μ s /div)



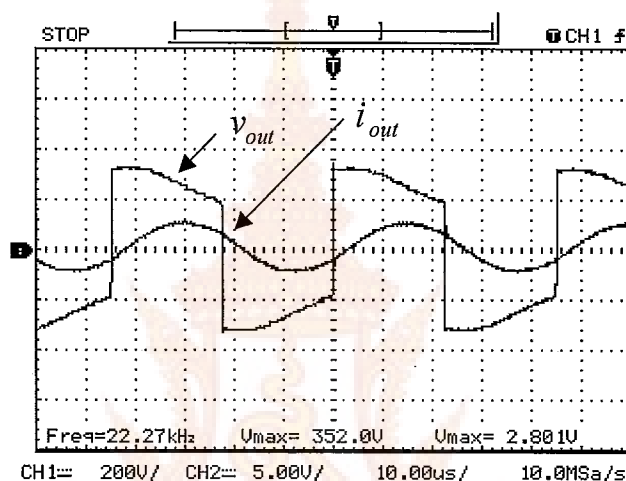
ภาพที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสและแรงดันหลังหม้อแปลงความถี่สูงที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW
(V:50V/div, I:100A/div, Time:10 μ s /div)



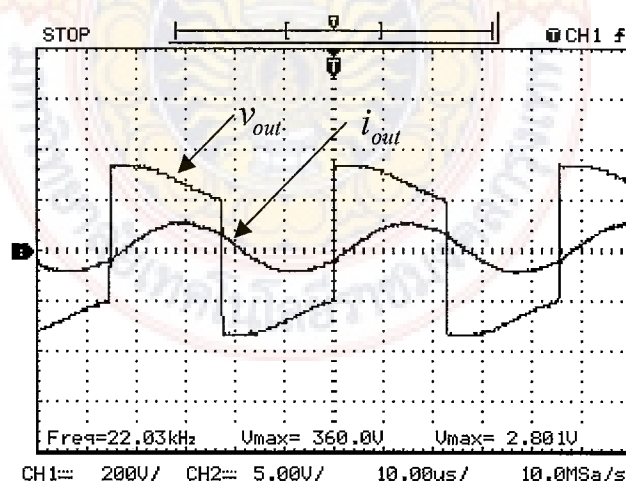
ภาพที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ขดลวดเหนี่ยวนำที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 4 kW
(V:100V/div, I:100A/div, Time:10 μ s /div)

4.3 การทดสอบการควบคุมกระแสไฟฟ้า

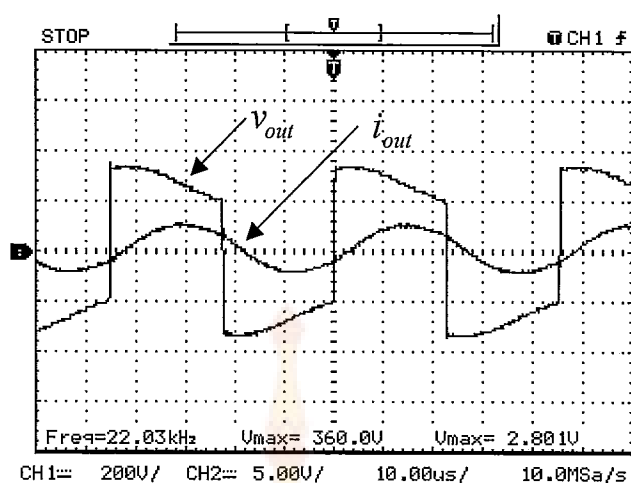
จุดประสงค์เพื่อทดสอบการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้มีกระแสด้านขาออกให้ไม่เกินจากค่าที่ตั้งไว้โดยการเลื่อนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสออกไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นงาน เช่น ความต้านทานจำเพาะและความชื้นซาบแม่เหล็กสัมผัส ทำให้ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง การทดสอบวัตถุอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มตั้งแต่ 200 – 900 °C โดยควบคุมให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์มีมุมเฟสของแรงดันนำหน้ากระแสที่ เพื่อทำการทดสอบวงจรติดตามเฟสเมื่อค่าพารามิเตอร์ของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ



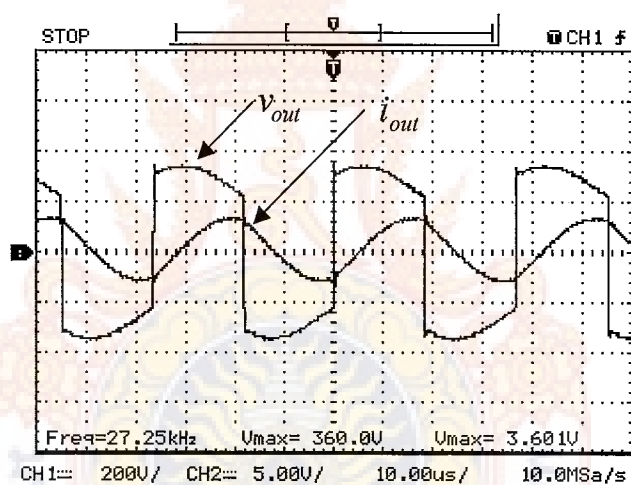
ภาพที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 200 °C
(V:200V/div, I:50A/div, Time:10 μ s /div)



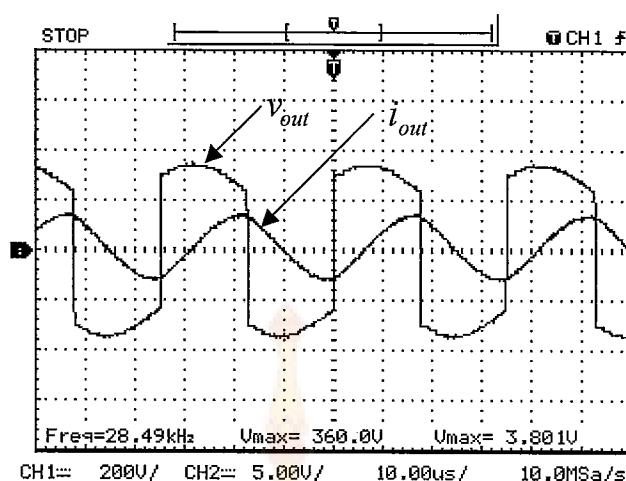
ภาพที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 400 °C
(V:200V/div, I:50A/div, Time:10 μ s /div)



ภาพที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 600 °C
(V:200V/div, I:50A/div, Time:10 μs /div)



ภาพที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 800 °C
(V:200V/div, I:50A/div, Time:10 μs /div)



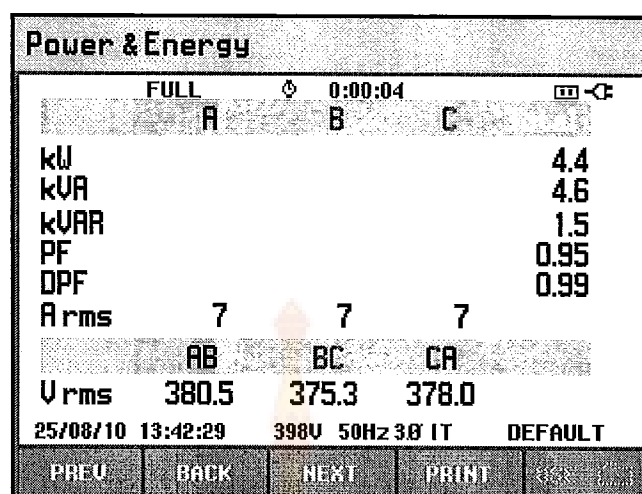
ภาพที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสกับแรงดันที่โหลด ที่อุณหภูมิ 900 °C
(V:200V/div, I:50A/div, Time:10 μ s /div)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวัดค่าต่างๆในการควบคุมกระแสไฟฟ้า

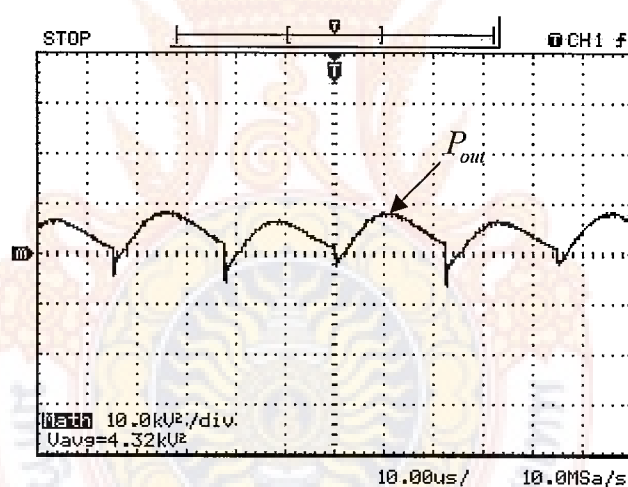
อุณหภูมิชิ้นงาน (°C)	200	400	600	800	900
ความถี่การทำงาน (kHz)	22.27	22.03	22.03	27.25	28.49
มุมเฟส (องศา)	23.50	23.50	23.50	58	61.8
เวลา (นาที่)	1.10	2.20	3.30	5.40	7.00
กระแสไฟฟ้าขาออก (A)	28	28	28	36	38

4.4 การทดสอบกำลังไฟฟ้าและหาค่าประสิทธิภาพ

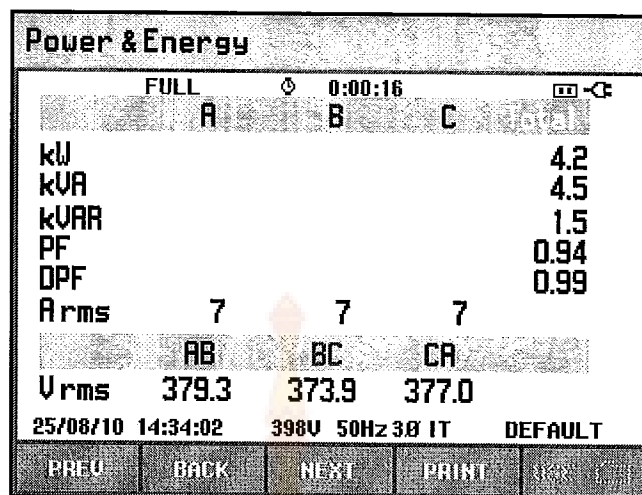
ทดสอบกำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิว โดยวัดกำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออก โดยจะทำการเก็บค่าสามครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย



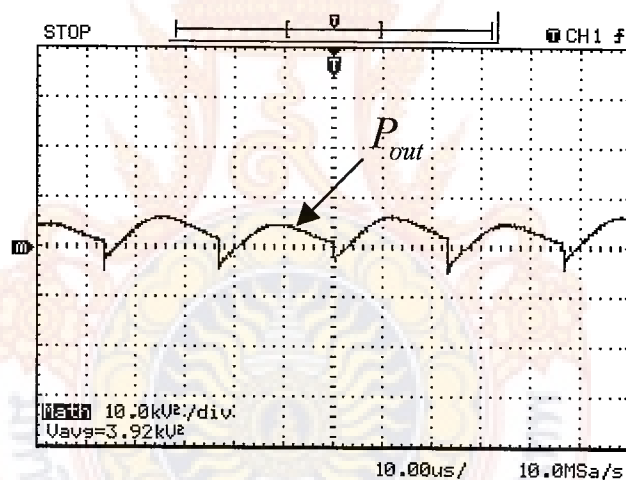
ภาพที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้วยเครื่องวัดเพาเวอร์ควอลิตี้ อนาไลต์เซอร์ของฟลักซ์รุ่น 434 ครั้งที่ 1



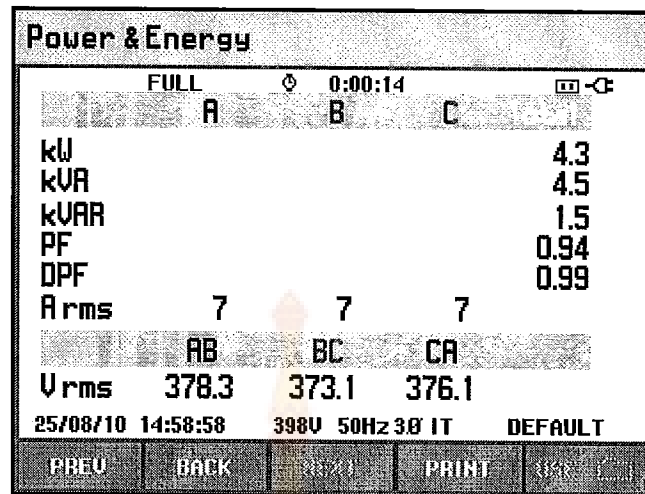
ภาพที่ 4.15 รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าขาออก P_{out} ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ครั้งที่ 1 (V:10 kW/div, Time:10 μ s/div)



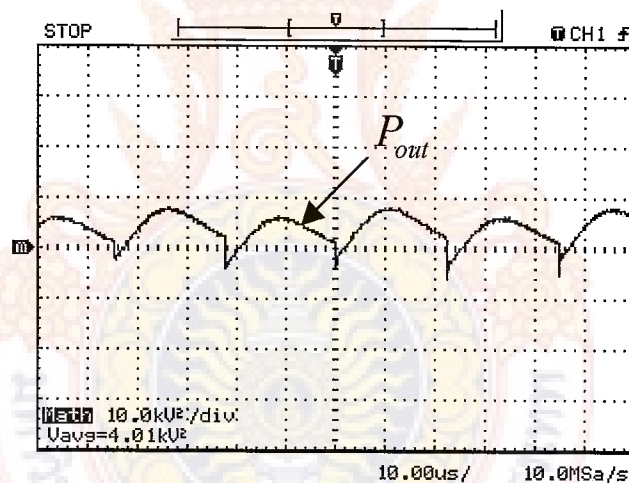
ภาพที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้วยเครื่องวัดเฟาเวอร์ควลิตี อนุาไลท์เซอร์ของฟลูครุ่น 434 ครั้งที่ 2



ภาพที่ 4.17 รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าขาออก P_{out} ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ครั้งที่ 2
(V:10 kW/div, Time:10 μ s /div)



ภาพที่ 4.18 กำลังไฟฟ้าขาเข้าด้วยเครื่องวัดเพาเวอร์ควอลิตี้ อนาไลต์เซอร์ของฟลูครุ่น 434 ครั้งที่ 3



ภาพที่ 4.19 รูปคลื่นกำลังไฟฟ้าขาออก P_{out} ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ครั้งที่ 3
(V:10 kW/div, Time:10 μ s /div)

จากการทดลองวัดกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออกจะสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพ

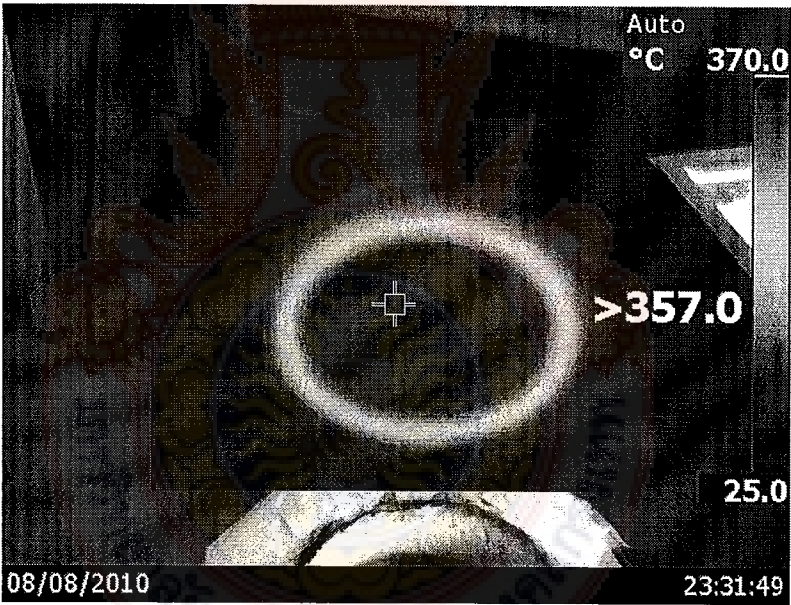
ภาพของเครื่องได้จากสมการ
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและขาออกจากอินเวอร์เตอร์

จำนวนครั้ง	กำลังไฟฟ้าขาเข้า(kW)	กำลังไฟฟ้าขาออก (kW)	ค่าประสิทธิภาพ(%)
1	4.4	4.32	98
2	4.2	3.92	93
3	4.3	4.01	93

4.5 ทดสอบความร้อนของชิ้นงาน

ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความร้อน (Fluke Ti25 Thermal Imager) ซึ่งวัดความร้อนได้ไม่เกิน 350 °C ในรูปวัดความร้อนได้เกิน 357 °C แต่สามารถแสดงให้เห็นความร้อนเป็นชั้นระดับความร้อนของชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.20 วัดความร้อนด้วยเครื่อง Fluke Ti25 Thermal Imager

ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด Sentry ST677 Infrared Thermometer ซึ่งสามารถความร้อนได้ถึง 1650°C จึงสามารถใช้ความร้อนของชิ้นงานได้ แสดงในภาพที่ 4.19 - 4.20



ภาพที่ 4.21 วัดความร้อนก่อนทำการเหนียวนำความร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด



ภาพที่ 4.22 วัดความร้อนหลังการเหนียวนำความร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบโครงงาน

ต้นแบบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิวได้ออกแบบและสร้างขึ้นใช้กับแรงดันไฟฟ้า 3 Phase 380 V 50 Hz พิกัดกำลัง 4 kW โดยมีไอจีบีทีกำลังสวิทช์ที่ความถี่ 22 – 60 kHz ทดสอบโดยการให้ความร้อนเหล็กเพื่องานชุบแข็งผิว

5.1.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

จากการทดสอบการเหนี่ยวนำความร้อนที่ชิ้นงาน แหล่งจ่ายแรงดันสามารถปรับเปลี่ยนความถี่เพื่อให้กระแสที่ไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ สำหรับเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิวจะไม่สามารถปรับความถี่ได้ด้วยตนเอง แต่จะมีวงจรเฟสล็อกคู่ในการปรับความถี่ให้สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตลอดช่วงการทำงาน

5.1.2 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากการทดสอบการเหนี่ยวนำความร้อนที่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 900°C อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตลอดช่วงเวลาทำงานโดยที่ความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของโหลดมีค่าอยู่ในช่วง 22 – 28 kHz และอินเวอร์เตอร์ต้องทำงานที่สภาวะมีโหลดเท่านั้น

5.1.3 โหลดเรโซแนนซ์

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิว ใช้โหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมทำงานใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดซึ่งประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำขนาด $10.2\ \mu\text{H}$ ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์มีค่า $6\ \mu\text{F}$ เมื่อทำงานที่สภาวะเรโซแนนซ์ค่า $X_L = X_C$ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกระแสไหลได้สูง $V_L = V_C$

สรุปการทำงานของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิว สามารถให้ความร้อนชิ้นงานได้เป็นอย่างดี เมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิห้องที่ทำการทดสอบในการทดสอบอินเวอร์เตอร์มีการสวิทช์ที่ความถี่สูงกว่าเรโซแนนซ์แบบออตโนมิตีและมุมเฟสของกระแสล้าหลังแรงดัน 23.50° เมื่อสภาวะของชิ้นงานยังไม่เปลี่ยนแปลงและ 61.8° เมื่อชิ้นงานเปลี่ยนแปลงสภาวะโดยใช้วงจรเฟสล็อกคู่มาควบคุมมุมเฟสการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ไม่สามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้ และมีการทำงานของสวิทช์นำกระแสที่แรงดันเป็นศูนย์ทำให้การสูญเสียที่สวิทช์น้อย และมีการควบคุมกระแสเกิน

การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบการปรับความหนาแน่นของพัลส์ในเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำด้วยวงจร ครึ่งบริดจ์ มีประโยชน์ดังนี้

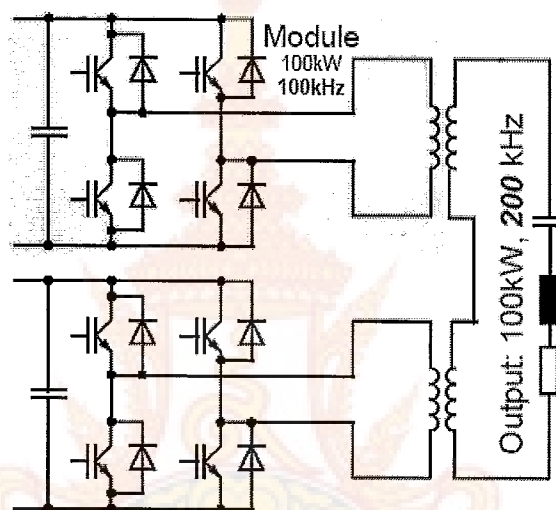
1. การควบคุมโดยวิธีนี้สามารถปรับกำลังได้จริงและอุณหภูมิเปลี่ยนตามกำลังไฟฟ้าทำให้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวสามารถควบคุมอุณหภูมิได้
 2. ทำให้เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวมีประสิทธิภาพสูงสุดเพราะทำงานที่จุดไกล์เรโซแนนซ์ตลอดเวลา
 3. ทำให้วงจรมีขนาดเล็กลงเพราะมีการสูญเสียที่สวิตช์น้อย ทำให้เกิดความร้อนน้อย
- ดังนั้นวิธีการควบคุมแบบการปรับความหนาแน่นของพัลส์ที่ได้จากการงานวิจัยนี้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานให้ความร้อนแบบเหนียวอื่นๆ เช่น ทุบขึ้นรูปโลหะ งานเชื่อม หรืองานหลอม เป็นต้น



บทที่ 6

สรุปและเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยขั้นต่อไป

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ เช่นงานทُبขึ้นรูปโลหะ งานเชื่อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และยังทำให้ตัวเครื่องมีขนาดเล็กลงอีกด้วย สำหรับในงานวิจัยในอนาคตจะนำเอาหลักการนี้ไปเพิ่มกำลังและเพิ่มความเร็ว โดยนำเอาวิธีการควบคุมที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบทบระดับ สำหรับงานให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ที่มีลักษณะดังรูป



ภาพที่ 6.1 แสดงการต่อโมดูลอินเวอร์เตอร์แบบทบระดับสำหรับเพิ่มกำลังและความถี่

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้

- อุปกรณ์ระบายความร้อน (Heat-Sink) ที่ติดกับไอจีบีทีต้องมีการระบายความร้อนที่ดี เพราะถ้าไอจีบีทีมีอุณหภูมิสูงประสิทธิภาพการทนกระแสจะลดลง
- น้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนของขดเหนี่ยวนำควรมีระบบหล่อเย็นที่ดี ถ้าน้ำเกิดความร้อนจะทำให้ขดเหนี่ยวนำมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าลดลง
- สามารถทำการลดขนาดของเครื่องให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้ลักษณะดิจิตอลแทนอนาล็อกเพื่อความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- ถ้าต้องการชุปแข็งให้ได้ชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานต้องนำเหล็กที่มีคาร์บอน 0.2% ขึ้นไป โดยกระบวนการชุบแข็งต้องเป็นไปตามขั้นตอนที่ถูกต้อง

บรรณานุกรม

- 1 วีระเชษฐ์ ชันเงิน / วุฒิพล ชาราชเรศ 2547. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง **Power Electronics** ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2 ชัยณรงค์ หมาดทอง และวิจิต กุญแจทอง. 2547. การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ. ปรินญา นิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- 3 นกตล นุ่นงาม 2539. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำชนิดปรับความถี่อัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- 4 สุนทร โสณพันธ์ 2552. การขานโมดูลอินเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มกำลังเอาต์พุต ปรินญา นิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- 5 สายชล ชุตเจื้อจัน 2547. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบเต็มบริดจ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- 6 สิทธิโชค สินรัตน์ 2545. การวิเคราะห์เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความถี่สูงชนิดควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยความถี่ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 7 M. Kamli, S. Yamamoto, and M. Abe, 1996, "A 50-150 kHz Half- Bridge Inverter for induction heating Application", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 43, No. 1, pp. 163-172.

8 S. Chudjuarjeen, C. Koompai and V. Monyakul, 2004, "Full-bridge current-fed inverter with automatic frequency control for forging application", **IEEE Tencon Conference**, 21-24 November, Vol. 4, pp.128-131.

9 P. Viriya, S. Sittichok, K. Matsuse, 2002, "Analysis of High-Frequency Induction Cooker with Variable Frequency Power Control", **IEEE Power Conversion Conference**, 5-10 April, Osaka, pp. 1507 - 1502.

10 Nam-Ju Park, Dong-Yun Lee, and Dong-Seok Hyun, 2007, "A Power-Control Scheme with Constant Switching Frequency in Class-D Inverter for Induction-Heating Jar Application", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 54, no. 3, pp. 1252-1260.

11 Ahmed, N, 2010, "High Frequency Soft Switching AC Conversion Circuit with Dual Mode PWM/PDM Control Strategy for High Power IH Applications", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, no..

12 L. Grajales and F. C. Lee, 1995, "Control system design and small-signal analysis of a phase-shift controlled series-resonant inverter for induction heating", **the 26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, vol. 1, pp. 450-456.

13 Dudrik, J. Trip and N.-D., 2010, "Soft-Switching PS-PWM DC-DC Converter for Full-Load Range Applications", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 57, no. 8, pp.2807 – 2814.

14 X. Ruan, W. Chen, L. Cheng, C. K. Tse, H. Yan and T. Zhang, 2009, "Control Strategy for Input-Series–Output-Parallel Converter", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 4, pp. 1174-1185.

15 P. Imbertson and N. Mohan, 1997, "New directions in dc-dc power conversion based on idealized concepts leading ultimately to the asymmetrical duty-cycle

power converter", **IEEE Transactions on Circuit and Systems**, vol. 44, pp. 722–727.

16 D. J. Tschirhart and P. K. Jain, 2008, "A CLL resonant asymmetrical pulse width modulated converter with improved efficiency", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 55, no. 1, pp. 114–122.

17 T. Mishima, M. Nakaoka, 2009, "A Novel High-Frequency Transformer-Linked Soft-Switching Half-Bridge DC–DC Converter with Constant-Frequency Asymmetrical PWM Scheme", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 8, pp. 2961-2969.

18 M. S. Agamy, P. K. Jain, 2009, "A Three-Level Resonant Single-Stage Power Factor Correction Converter: Analysis, Design, and Implementation", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 6, pp. 2095-2107.

19 J. M. Burdío, L. A. Barragán, F. Monterde, D. Navarro, and J. Acero, 2004, "Asymmetrical voltage-cancellation control for full-bridge series resonant inverters," **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 19, no. 2, pp. 461–469.

20 J. I. Artigas, I. Urriza, J. Acero, L. A. Barragán, D. Navarro, and J. M. Burdío, 2009, "Power measurement by output-current integration in series resonant inverters", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 2, pp. 559-567.

21 S. Chudjuarjeen, and C. Koompai, 2008, "Asymmetrical control with Phase Lock Loop for Induction Cooking Appliances", **the 5th International Conference on Electrical/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Tecnology Conference**, Krabi, Thailand, May 14-17, pp. 1013-1016

- 22 P. Viriya, N. Yongyuth, and K. Matsuse, 2008, "Analysis of two continuous control regions of conventional phase shift and transition phase shift for induction heating inverter under ZVS and non-ZVS," **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 23, no. 6, pp. 2794–2804.

- 23 L. Sung-Sae and M. Gun-Woo, 2008, "Full ZVS-range transient current buildup half-bridge converter with different ZVS operations to load variation," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 55, no. 6, pp. 2557–2559.

- 24 O. Lucía, J. M. Burdio, I. Millán, J. Acero, and D. Puyal, 2009, "Load-Adaptive Algorithm of Half-Bridge Series Resonant Inverter for domestic Induction Heating," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 8, pp. 3106–3116.

- 25 J. L. Russi, M. L. S. Martins, and H. L. Hey, 2008, "Coupled-filter-inductor soft-switching techniques: Principles and topologies," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 55, no. 9, pp. 3361–3373.

- 26 Z. Zhang, W. Eberle, Y.-F. Liu and P. C. Sen, 2009, "A Nonisolated ZVS Asymmetrical Buck Voltage Regulator Module With Direct Energy Trans," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 8, pp. 3096-3105.

- 27 C. S. Moo, K. H. Lee, H. L. Cheng and W. M. Chen, "A Single-Stage High-Power-Factor Electronic Ballast With ZVS Buck–Boost Conversion, 2009", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 56, no. 4, pp. 1136-1146.

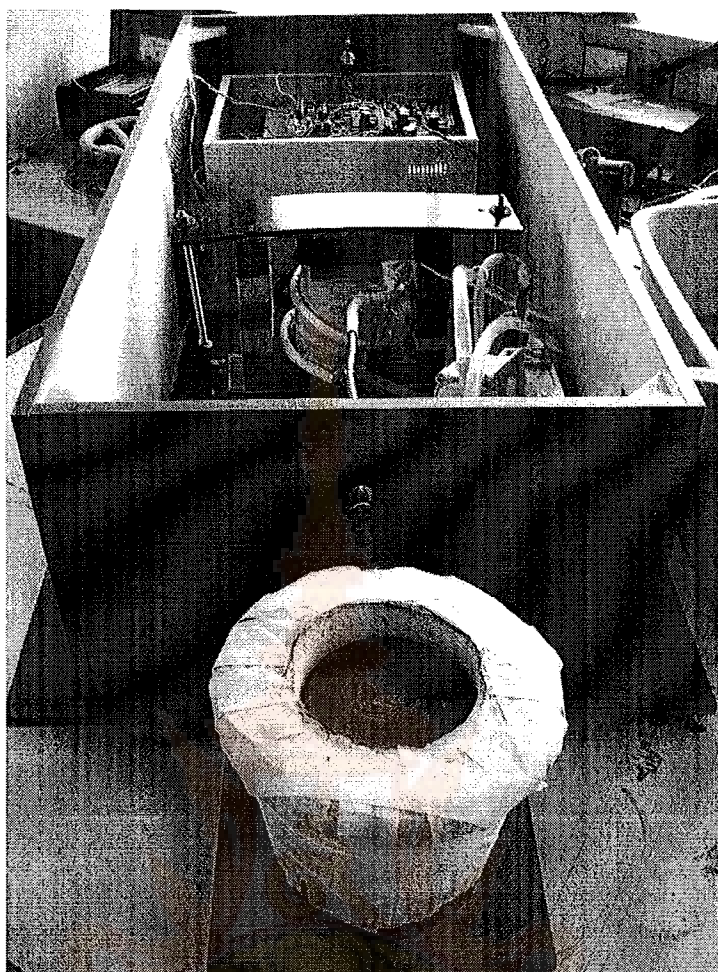
- 28 S.-H. Park, G.-R. Cha, Y.-C. Jung and C.-Y. Won, 2010, "Design and Application for PV Generation System Using a Soft-Switching Boost Converter With SARC," **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 57, no. 2, pp. 515-522.

- 29 Kagimoto, H., Miyagi, D., Takahashi, N., Uchida, N., Kawanaka, K., 2010, "Effect of Temperature Dependence of Magnetic Properties on Heating Characteristics of Induction Heater", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 46, No. 8, pp. 3018-3021.

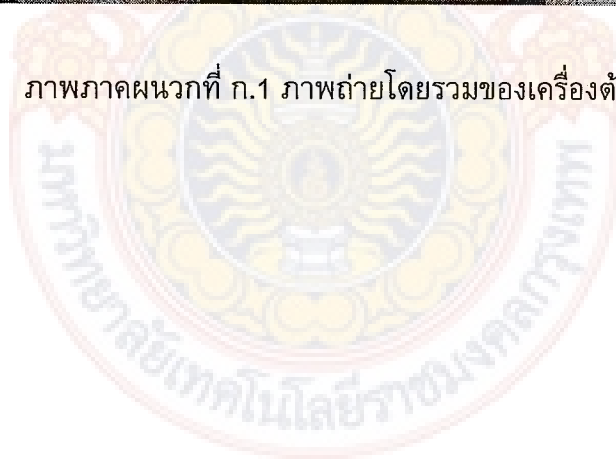


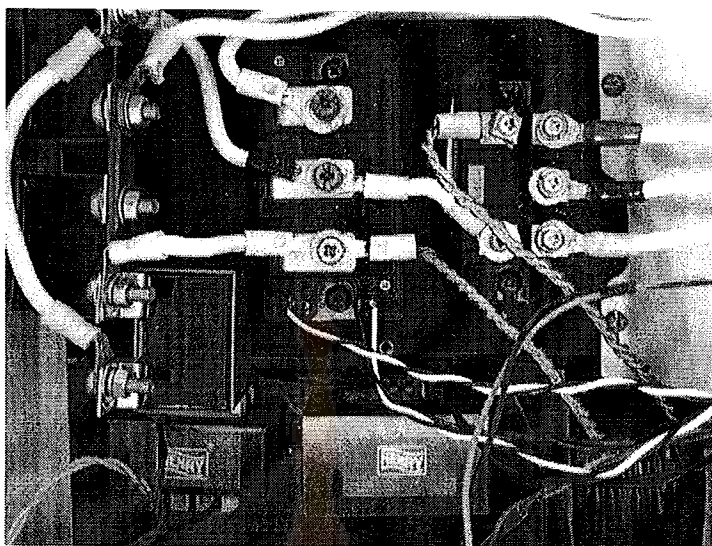
ภาคผนวก ก
ภาพส่วนต่าง ๆ ของต้นแบบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชุบแข็งผิวและ
เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ



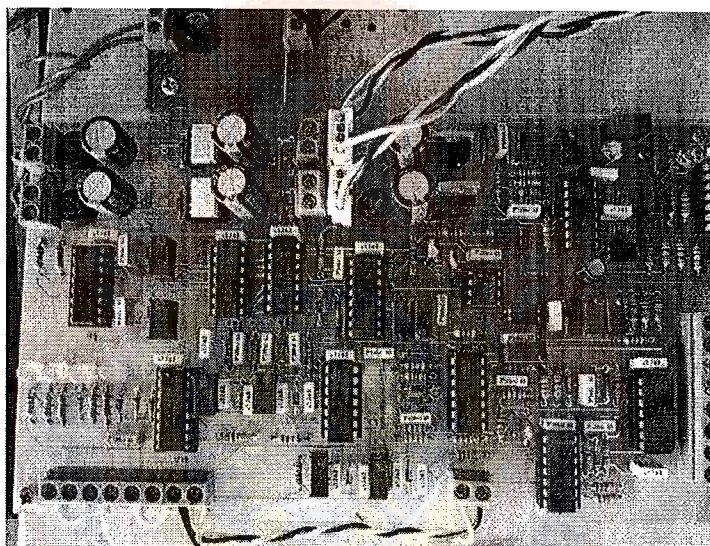


ภาพภาคผนวกที่ ก.1 ภาพถ่ายโดยรวมของเครื่องต้นแบบ

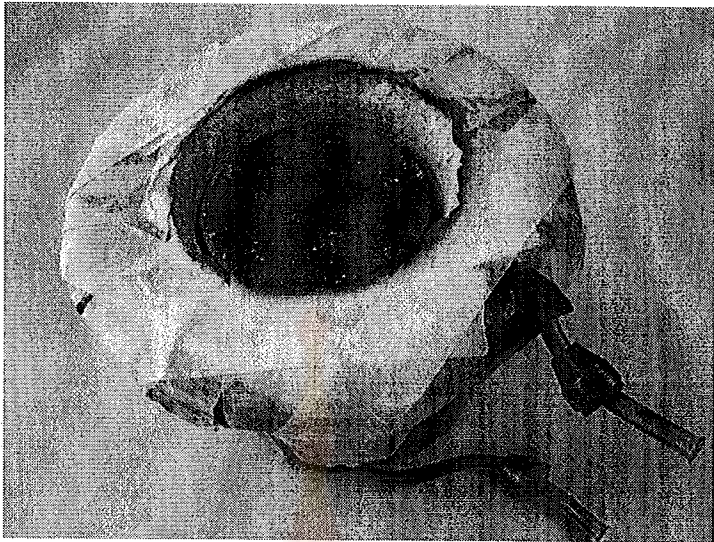




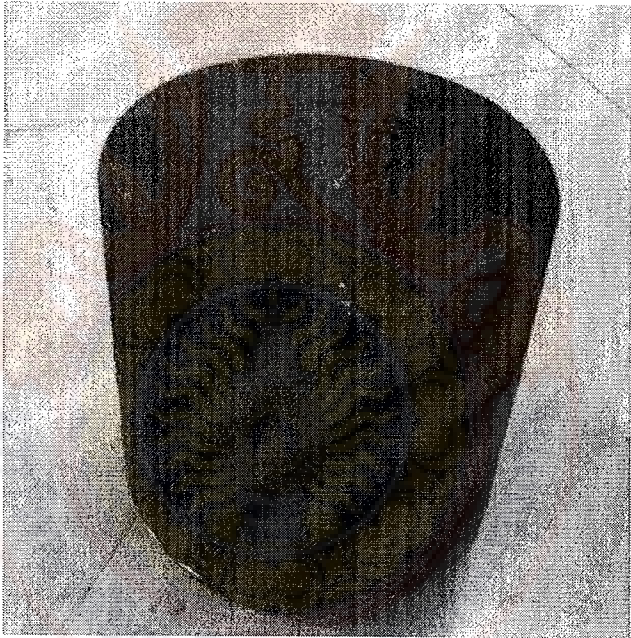
ภาพภาคผนวกที่ ก.2 ภาพถ่ายชุดกำลังของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชုပ်แข็งผิว



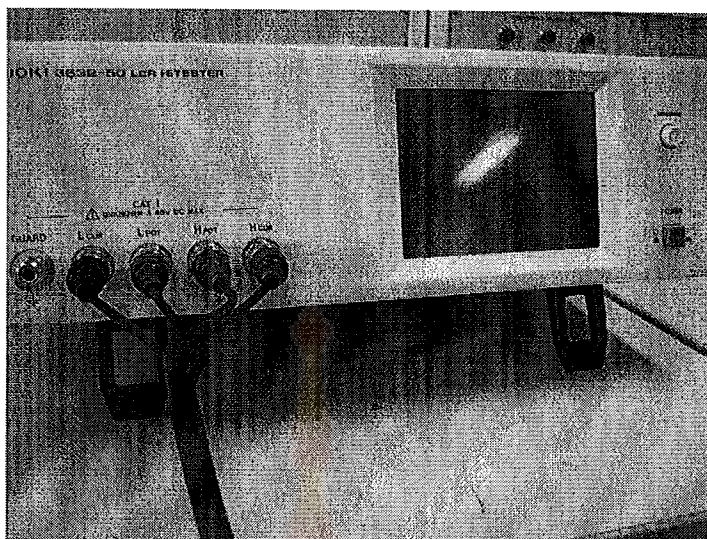
ภาพภาคผนวกที่ ก.3 ภาพถ่ายชุดควบคุมของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่องานชုပ်แข็งผิว



ภาพภาคผนวกที่ ก.4 ชุดเหี่ยวน้ำความร้อน



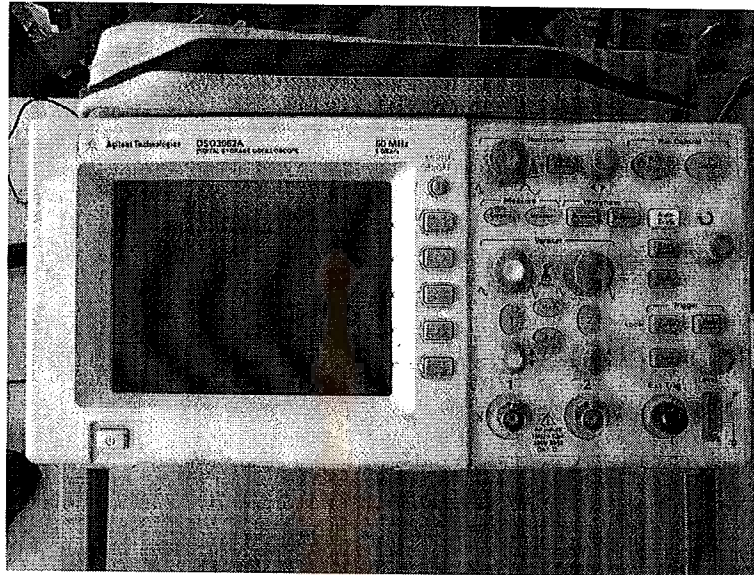
ภาพภาคผนวกที่ ก.5 ชิ้นงาน



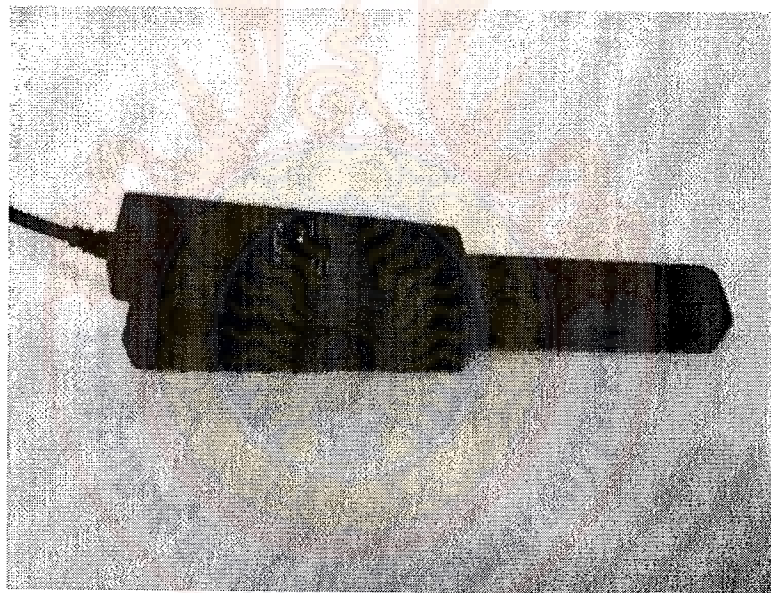
ภาพภาคผนวกที่ ก.6 เครื่องวัดค่า LCR ยี่ห้อ Hioki รุ่น 3532-50 LCR HiTester



ภาพภาคผนวกที่ ก.7 CT สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าต้านออกจากอินเวอร์เตอร์



ภาพภาคผนวกที่ ก.8 ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น DSO3062A



ภาพภาคผนวกที่ ก.9 โพรบวัดกระแส ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 80i-110s



ภาพภาคผนวกที่ ก.10 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด ยี่ห้อ Sentry รุ่น ST677 Infrared Thermometer



ภาพภาคผนวกที่ ก.11 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ FLUKE รุ่น Power Quality Analyzer 434



ภาพภาคผนวกที่ ก.12 เครื่องวัดความร้อนยี่ห้อ FLUKE รุ่น Ti25 Thermal Imager



ภาคผนวก ข
ข้อมูลอุปกรณ์



MITSUBISHI IGBT MODULES

CM150DY-24NF

HIGH POWER SWITCHING USE

CM150DY-24NF



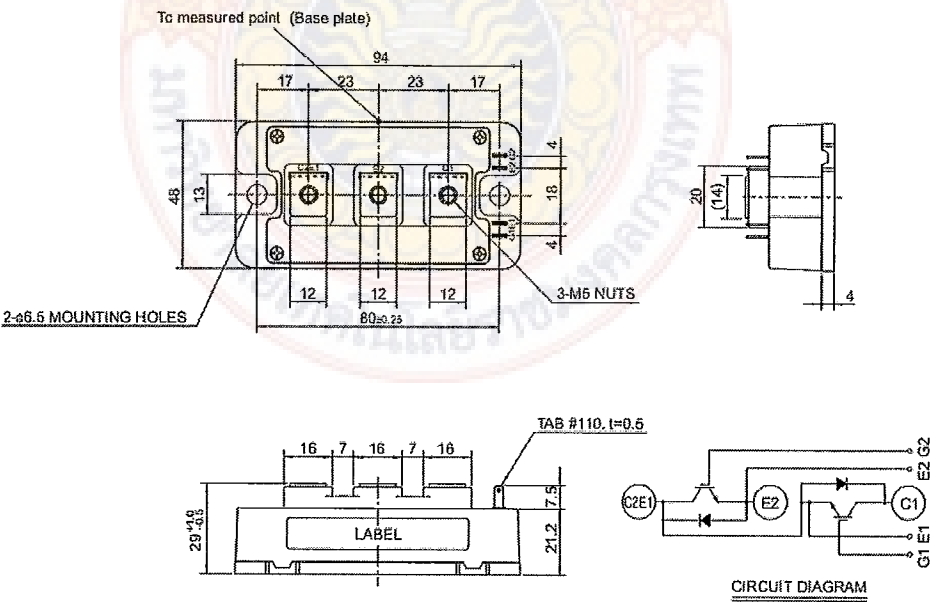
- Ic 150A
- VCES 1200V
- Insulated Type
- 2-elements in a pack

APPLICATION

General purpose inverters & Servo controls, etc

OUTLINE DRAWING & CIRCUIT DIAGRAM

Dimensions in mm



MITSUBISHI IGBT MODULES

CM150DY-24NF

HIGH POWER SWITCHING USE

MAXIMUM RATINGS (T_J = 25°C)

Symbol	Parameter	Conditions	Ratings	Unit
V _{CE} S	Collector-emitter voltage	G-E Short	1200	V
V _{GE} S	Gate-emitter voltage	C-E Short	±20	V
I _C	Collector current	DC, T _C ' = 110°C ^{*3}	150	A
I _{CM}	Collector current	Pulse (Note 2)	300	A
I _E (Note 1)	Emitter current		150	A
I _{EM} (Note 1)	Emitter current	Pulse (Note 2)	300	A
P _C (Note 3)	Maximum collector dissipation	T _C = 25°C	780	W
T _J	Junction temperature		-40 ~ +150	°C
T _{stg}	Storage temperature		-40 ~ +125	°C
V _{iso}	Isolation voltage	Main Terminal to base plate, AC 1 min.	2500	V
—	Torque strength	Main Terminal M5	2.5 ~ 3.5	N · m
—	Torque strength	Mounting holes M6	3.5 ~ 4.5	N · m
—	Weight	Typical value	310	g

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_J = 25°C)

Symbol	Parameter	Test conditions	Limits			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
I _{CE} S	Collector cutoff current	V _{CE} = V _{CE} S, V _{GE} = 0V	—	—	1	mA
V _{GE(th)}	Gate-emitter threshold voltage	I _C = 15mA, V _{CE} = 10V	6	7	8	V
I _{GES}	Gate leakage current	V _{GE} = V _{GE} S, V _{CE} = 0V	—	—	0.5	μA
V _{CE(sat)}	Collector-emitter saturation voltage	T _J = 25°C T _J = 125°C	—	1.8 2.0	2.5	V
C _{ies}	Input capacitance	V _{CE} = 10V V _{GE} = 0V	—	—	35	nF
C _{oes}	Output capacitance	V _{CE} = 10V V _{GE} = 0V	—	—	3	nF
C _{res}	Reverse transfer capacitance	V _{CE} = 10V V _{GE} = 0V	—	—	0.68	nF
Q _g	Total gate charge	V _{CC} = 600V, I _C = 150A, V _{GE} = 15V	—	1000	—	nC
t _{d(on)}	Turn-on delay time	V _{CC} = 600V, I _C = 150A	—	—	120	ns
t _r	Turn-on rise time	V _{CC} = 600V, I _C = 150A	—	—	80	ns
t _{d(off)}	Turn-off delay time	V _{GE1} = V _{GE2} = 15V	—	—	450	ns
t _f	Turn-off fall time	R _G = 2.1Ω, Inductive load switching operation	—	—	350	ns
t _{rr} (Note 1)	Reverse recovery time	I _E = 150A	—	—	150	ns
Q _{rr} (Note 1)	Reverse recovery charge	I _E = 150A	—	7.5	—	μC
V _{EC(th)} (Note 1)	Emitter-collector voltage	I _E = 150A, V _{GE} = 0V	—	—	3.2	V
R _{th(j-c)Q}	Thermal resistance ^{*1}	IGBT part (1/2 module)	—	—	0.16	°C/W
R _{th(j-c)R}	Thermal resistance ^{*1}	FWDI part (1/2 module)	—	—	0.25	°C/W
R _{th(c-f)}	Contact thermal resistance	Case to fin, Thermal compound Applied ^{*2} (1/2 module)	—	0.07	—	°C/W
R _{th(j-c)Q}	Thermal resistance	T _C measured point is just under the chips	—	—	0.093 ^{*3}	°C/W
R _G	External gate resistance		2.1	—	21	Ω

*1: T_C measured point is shown in page OUTLINE DRAWING.

*2: Typical value is measured by using Shin-etsu Silicone "G-746".

*3: T_C measured point is just under the chips.

If you use this value, R_{th(j-c)Q} should be measured just under the chips.

Note 1. I_E, V_{EC}, t_{rr} & Q_{rr} represent characteristics of the anti-parallel, emitter to collector free-wheel diode (FWDI).

2. Pulse width and repetition rate should be such that the device junction temp. (T_J) does not exceed T_{Jmax} rating.

3. Junction temperature (T_J) should not increase beyond 150°C.

Jul.2004

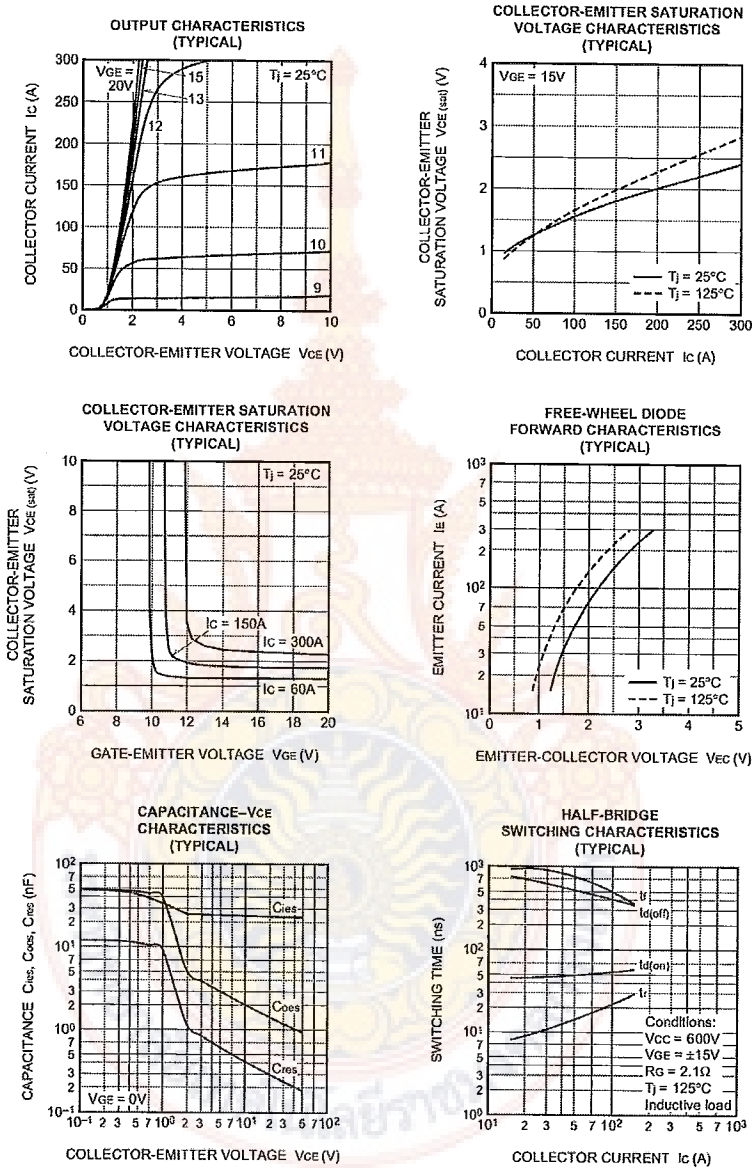


MITSUBISHI IGBT MODULES

CM150DY-24NF

HIGH POWER SWITCHING USE

PERFORMANCE CURVES



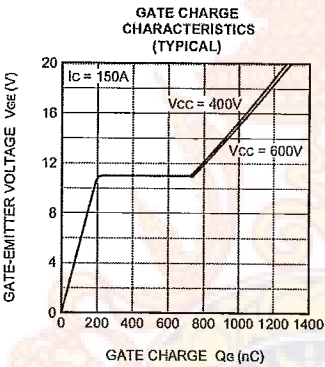
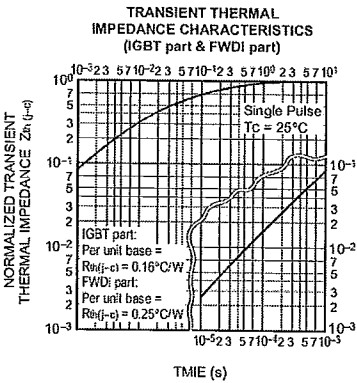
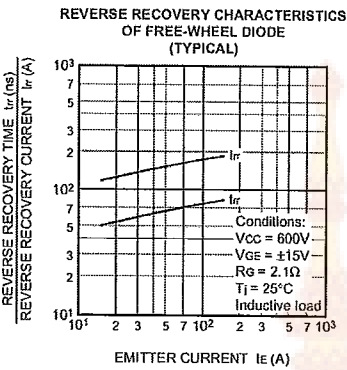
Jul.2004



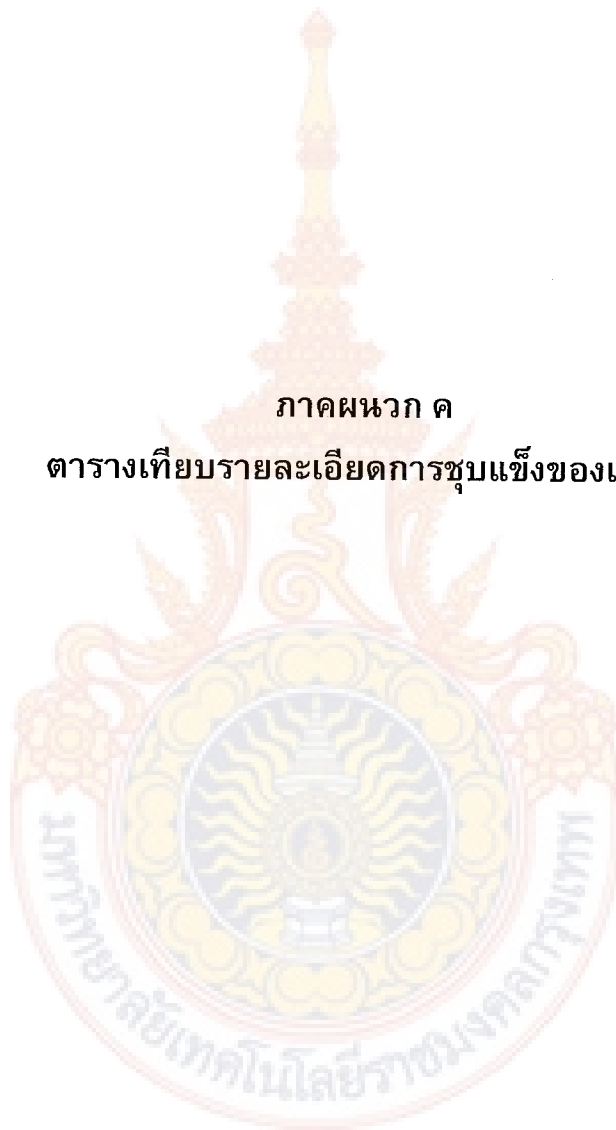
MITSUBISHI IGBT MODULES

CM150DY-24NF

HIGH POWER SWITCHING USE



ภาคผนวก ค
ตารางเทียบรายละเอียดการชูปแข็งของเหล็ก



BÖHLER	ชนิดเหล็กแข็ง	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Co	Ni	Other
S600	เหล็กไฮสปีด High Speed Steel	0.90	0.22	0.35	4.10	6.40	5.00	1.90			
S705		0.92	0.22	0.25	4.10	6.40	5.00	1.90	4.80		
S390 Isomatix PM		1.60			4.8	10.5	2.0	5.0	8.0		
S390 Isomatix PM		1.30			4.2	6.3	5.0	3.0	8.4		
S690 Isomatix PM		1.33	0.22	0.30	4.30	5.90	4.90	4.10			
S790 Isomatix PM		1.30			4.2	6.3	5.0	3.0			
S790 Isomatix PM											
Hot Work	เหล็กใช้งานร้อน Hot Work Tool Steel	0.29	0.25	0.30	2.70	8.50		0.35			
		0.39	1.10	0.40	5.20	0.05	1.40	0.95		0.27	
		0.39	0.40	0.40	5.00	0.24	2.80	0.65			
		0.36	0.20	0.25	5.00		1.30	0.45			
Cold Work	เหล็กใช้งานเย็น Cold Work Tool Steel	2.00	0.25	0.30	11.50						
		1.60	0.35	0.30	11.50	0.50	0.60	0.30			
		2.10	0.25	0.30	11.50	0.70					
		1.55	0.25	0.35	11.80		0.80	0.95			
		2.30	0.40	0.40	12.50		1.10	4.00			
		0.63	1.10	1.10	0.60						
		1.10	0.90	0.40	8.30		2.10	0.50			AL 1.10 Nb 0.13
		0.95	0.25	1.10	0.55	0.55		0.10			
		1.18	0.25	0.30	0.70			0.10			
N695	เหล็กแข็งสแตนเลส Stainless Chromium Steel	1.05	0.40	0.40	17.00		0.50				
M202	เหล็กแข็งแม่พิมพ์พลาสติก Plastic Mould Steel	0.40	0.30	1.50	2.00		0.20				≤S 0.08
M238		0.38	0.30	1.50	2.00		0.20			1.10	S.003
M300		0.38	0.40	0.65	16.00		1.00			0.80	
M314		0.34	0.70	1.10	16.00		0.60				S 0.12
M333		0.28	0.3	0.3	13.5						+N
M340		0.54	0.45	0.40	17.30		1.10	0.10			+N
M390 Isomatix PM		1.90	0.70	0.30	20.00	0.60	1.00	4.00			
M461		0.13	0.30	2.00	0.35					3.50	CU 1.20 AL 1.20
V185 V220	เหล็กแข็งอะไหล่ Heat Treating Steel	0.34	0.30	0.60	1.50		0.20			1.50	
		0.41	0.30	0.70	1.10		0.20				
R100	เหล็กแข็งลูกปืน Bearing Steel	1.00	0.30	0.30	1.50						

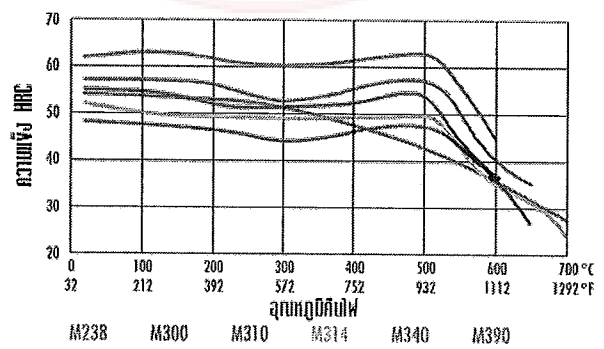
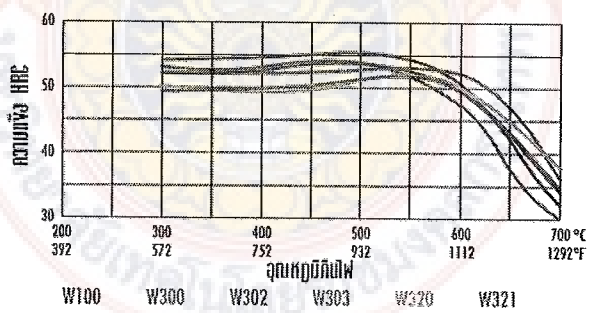
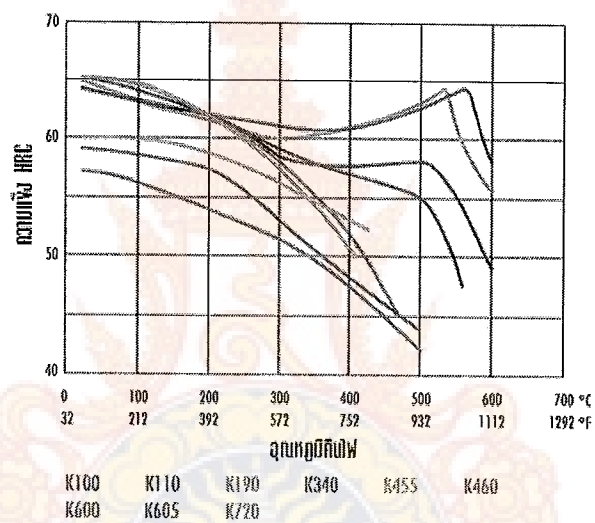
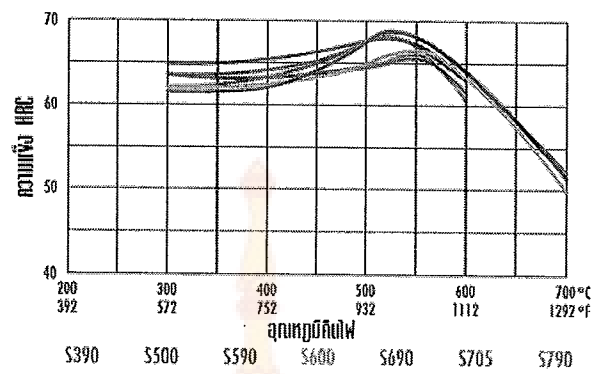


DIN	AISI	JIS	BS	อุณหภูมิ ขึ้นรูปร้อน °C	อุณหภูมิ อบให้เย็น °C
1.3343 S6-5-2	M2	SKH51	BM2	1100-900	770-840
1.3243 S6-5-2-5	M41	SKH55		1100-900	770-840
				1150-900	770-840
				1100-900	770-840
	~M4	~SKH54	~BM4	1100-900	770-840
~1.3344 ~S6-5-3	M3 class2			1100-900	770-840
1.2581 x30WCrV93	H21	SKD5	BH21	1100-900	770-840
1.2344 x40CrMoV51	H13	SKD61	BH13	1100-900	750-800
1.2367 x40CrMoV53				1100-900	750-800
~1.2343 ~x38CrMoV51	~H11	~SKD6	~BH11		800-850
1.2080 x210Cr12	D3	SKD1	BD3	1050-850	800-850
1.2601 x165CrMoV12		SKD11	BD2	1050-850	800-850
1.2436 x210CrW12	D6			1050-850	800-850
1.2379 x155CrVMo121	D2	SKD11	BD2	1050-850	800-850
1.2380 x220CrVMo134				1100-900	800-850
1.2101 62SiMnCr4				1050-850	710-750
				1050-850	800-850
1.2510 100MnCrW4	O1	SKS21	BO1	1050-850	710-750
1.2210 115CrV3				1050-850	710-750
1.4125 x105CrMo17	440C	SUS440C		1100-900	780-840
1.2312 40CrMnMoS86	P20			1050-850	720-740
1.2738 40CrMnNiMo864				1050-850	720-740
1.2316 x36CrMo17	~420	~SUS420J2		1050-850	800-850
1.2085 x33CrS16				1050-850	
					730-780
					800-850
				1100-900	880-900
				1100-900	875-925
1.6582 34CrNiMo6	4340	SNCM1	816 M40	1050-850	650-700
1.7225 42CrMo4	4140	SCM4	708 H42	1050-850	680-720
1.3505 100Cr6	E52100	SUJ2	S135	1100-850	750-800

ความแข็งเมื่ออบ ให้อ่อน HB	อุณหภูมิลดแรง เครียด °C	อุณหภูมิชุบแข็ง °C	ชุบด้วย
240-300	600-650	1190-1230	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
240-300	600-650	1190-1230	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
300	600-650	1150-1230	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
300	600-650	1150-1200	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
240-300	600-650	1150-1200	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
280	600-650	1100-1180	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
235-245	600-650	1070-1150	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
230-240	600-650	1020-1080	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
225-245	600-650	1030-1080	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (500-550°C)
205	600-650	980-990	น้ำมัน, เกลือ (500-550°C), ลมเป่า
245-255	630-670	940-970	น้ำมัน, ลมเป่า, (ลม < Ø 25 มม.), เกลือ (220-250, 500-550°C)
245-255	650-700	980-1010 ถ้าชุบ 1050-1080 ต้องคืนไฟ 520-570	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (220-250, 500-550°C)
245-255	650-700	950-980	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (220-250, 500-550°C)
245-255	650-700	1020-1040 ถ้าชุบ 1050-1080 ต้องคืนไฟ 520-570	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (220-250, 500-550°C)
255-265	650-700	1050-1150	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ (220-250, 500-550°C)
225-235	640-680	830-860	น้ำมัน
245-255	640-680	1040-1080	น้ำมัน, เกลือ, ลมเป่า
220-230	640-680	780-820	น้ำมัน, เกลือ (220-250 °C) ขนาดเล็กกว่า 20 มม. Ø
215-225	640-680	780-810 810-840	น้ำ น้ำมัน ขนาดเล็กกว่า 12 มม. Ø
260-270		1000-1050	น้ำมัน
225-235	600-650	840-860 860-880	น้ำมัน ลมเป่า
225-235	600-650	840-860 860-880	น้ำมัน ลมเป่า
230-240		1000-1050	น้ำมัน, ลมเป่า
220-230		1000-1050	น้ำมัน
220	650	1000-1030	น้ำมัน, ไนโตรเจน
260-270	600-650	1000-1020	น้ำมัน
275-285	650-700	1070-1150	น้ำมัน, ลมเป่า, เกลือ
30 HRC		560-580	ลมเป่า
230-240	600-650	830-860	น้ำมัน
210-220	600-650	830-860 820-850	น้ำมัน น้ำ
200-220	600-650	830-870 800-830	น้ำมัน น้ำ

ความแข็งหลังชุบ HRC	ความแข็งโดยเฉลี่ย เมื่อคืนไฟที่อุณหภูมิ °C			
64-66	500 °C 65	540 °C 66	560 °C 65	600 °C 63
64-66	65	66	65	64
65-69	68	67	66	63
65-67	67	67	66	63
64-66	65	66	65	63
64-66	64	66	65	61
48-52 น้ำมัน 44-48 สม	50	51	50	46
52-56 น้ำมัน 50-54 สม	400 °C 54	500 °C 55	600 °C 50	650 °C 40
52-56 น้ำมัน 50-54 สม	500 °C 54	540 °C 53	560 °C 52	600 °C 50
50-54	480 °C 52	520 °C 53	560 °C 50	600 °C 44
63-65	100 °C 64	200 °C 62	300 °C 59	400 °C 57
63-65	64	62	60	58
64-66	65	63	61	60
63-65	63	61	59	58
62-67	63	61	60	65
59-62	61	60	57	51
61-63	63	61	59	60
63-65	64	62	58	52
64-66	64	62	57	51
58-60	100 °C 60	150 °C 58	300 °C 55	
46-49	ชุบแข็ง และคืนไฟแล้ว ความแข็ง 29-33 HRC (อุณหภูมิคืนไฟ 600-650 °C)			
52-54				
46-49 น้ำมัน 42-48 สม	ชุบแข็ง และคืนไฟแล้ว ความแข็ง 29-33 HRC			
46-52	ชุบแข็ง และคืนไฟแล้ว ความแข็ง 29-33 HRC			
52-58	100 °C 56	250 °C 51	500 °C 52	620 °C 48
53-58	100 °C 57	200 °C 55	300 °C 52	400 °C 55
60-62	61	60	58	57
40-44	ชุบแข็ง และคืนไฟแล้ว ความแข็ง 38-42 HRC			
46-49	ชุบแข็ง และคืนไฟแล้ว ความแข็ง 28-32 HRC (อุณหภูมิคืนไฟ 540-680 °C)			
53-56				
63-65	100 °C 64	200 °C 61	300 °C 58	400 °C 53

ตารางตีพิมพ์



การใช้งาน	BÖHLER
ทำเครื่องมือกลึงเกลียว ดอกสว่าน รีมเมอร์ มีดรูตเฟือง มีดไสไม้ ใบเลื่อยตัดเหล็ก แม่พิมพ์กรรไกร และงานป้อนเป็น	M390
ทำเครื่องมือกลึงเกลียว ดอกสว่าน หัวปาด มีดรูตเฟือง มีดไสไม้ งานป้อนเป็น	M390
ทำเครื่องมือสำหรับกลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ที่มีส่วนผสมนิเกิลและไทเทเนียมอัลลอยด์ เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ที่ต้องทนแรงยึดเกาะแตกสูง เช่น แม่พิมพ์ปั๊มตัดแผ่นที่ต้องการความแม่นยำ และความละเอียดสูง	M390
ทำเครื่องมือสำหรับกลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ที่มีส่วนผสมนิเกิลและไทเทเนียมอัลลอยด์ เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ที่ต้องทนแรงยึดเกาะแตกสูง เช่น แม่พิมพ์ปั๊มตัดแผ่นที่ต้องการความแม่นยำ และความละเอียดสูง	M390
ทำมีดกลึง ดอกสว่าน มีอายุการใช้งานยาวมาก โดยเฉพาะใช้กับโลหะ เช่น ไทเทเนียม อลูมิเนียมผสม แม่พิมพ์กรรไกร งานป้อนเป็น พ่นแรงกดสูงมาก เหมาะสำหรับแปรรูปวัสดุที่มีความเหนียว และแรงดึงสูง	M390
ทำเครื่องมือสำหรับกลึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก สำหรับไทเทเนียมอัลลอยด์ และอลูมิเนียมอัลลอยด์ เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ที่ต้องทนแรงยึดเกาะแตกสูง เช่น แม่พิมพ์ปั๊มตัดแผ่นที่ต้องการความละเอียดที่กว้างด้วยวัสดุที่ทนทานมาก	M390
ทำแม่พิมพ์รีด และ ดัด ทองแดง ทองเหลือง แม่พิมพ์ปั๊มร้อน นีโอต, สกรู, อะไหล่อุปกรณ์ทนความร้อนสูง และใบมีดสำหรับงานร้อน	M390
ทำแม่พิมพ์รีด และฉีดอลูมิเนียม ซิงค์, แม่พิมพ์ปั๊มร้อน นีโอต, สกรู, อะไหล่อุปกรณ์ทนไฟ มีดตัดเหล็กหนาๆ แม่พิมพ์แบบสีกาโลที่ ที่ต้องการจำนวนการผลิตสูง	M390
ทำแม่พิมพ์ปั๊มร้อน, อะไหล่อุปกรณ์ทนไฟ, แม่พิมพ์ฉีดอลูมิเนียม	M390
ทำแม่พิมพ์งานร้อนที่ต้องการความแข็ง และความแข็งแรงสูง ด้วยกระบวนการหล่อแบบสูญญากาศ ทำให้ความร้อนดี ทนทานสำหรับงานหลายสัปดาห์หรือแม่พิมพ์งานร้อนทั่วไป ที่ต้องการอายุใช้งานนาน	M390
ทำแม่พิมพ์กรรไกร งานป้อนขึ้นรูป ทนเสียดสีสูง เหมาะสำหรับ ตัดเหล็กแผ่นบาง, เหล็กแผ่นสเตนเลสบาง และตัดซิลิกอน	M390
ทำแม่พิมพ์กรรไกร งานป้อนขึ้นรูป มีความแข็งแรงเหนียว ทนเสียดสีสูง เหมาะสำหรับตัดเหล็กแผ่น, เหล็กแผ่นสเตนเลส	M390
แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป มีดรูตเฟือง แม่พิมพ์อัด ใบอุตสาหกรรมเซรามิค ยา	M390
ลูกรีดเกลียว ลูกรีดแป้น มีดตัดเหล็ก แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป	M390
ทำแม่พิมพ์กรรไกร งานป้อนขึ้นรูป แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป มีความเหนียว และทนเสียดสีสูงมาก อายุการใช้งานยาวมาก	M390
ทำเครื่องมือจับชิ้นงาน, ใบมีดตัดเหล็ก, แม่พิมพ์ปั๊มเจาะ	M390
ทำแม่พิมพ์กรรไกร งานป้อนขึ้นรูป, แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป แม่พิมพ์เจาะ และใบมีดตัดเหล็กหนา ที่ต้องการการเสียดสีสูง และมีความเหนียวสูงด้วย	M390
ทำแม่พิมพ์กรรไกร ลูกรีดทั่วไป ดอกตัด ใบมีดตัดกระดาษ	M390
ทำแม่พิมพ์ตีหัวปัด สกรู งานป้อนขึ้นรูป มีดไสไม้ แม่พิมพ์ป้อนลาย	M390
มีดผ่าตัด และอุปกรณ์ที่ต้องการทนสนิม มีความคมและทนเสียดสี	M390
ทำแม่พิมพ์พลาสติก แบบสีกาโลที่ ทำงานง่าย ชัดเจนดี	M202
ทำแม่พิมพ์พลาสติก แบบสีกาโลที่ เมลามีน มีส่วนผสมกำมะถันต่ำมาก 0.003 % ทำให้ไม่มีตามด แข็งสม่ำเสมอ ชัดเจนเหมือนกระจก	M238
ทำแม่พิมพ์ชนิดที่ต้องการทนการกัดกร่อน ทนสนิม เช่น แม่พิมพ์พลาสติก พีวีซี และแม่พิมพ์อุตสาหกรรมท่อพีวีซี	M300
ทำแผ่นรองแม่พิมพ์ แผ่นยึดโมลด์อินสูล์ในงานพลาสติก ด้วยวัสดุที่แน่น ทนสนิม สามารถกลึงได้ง่าย	M314
ทำแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการขัดเงาดีเยี่ยม ทนต่อการกัดกร่อน มีความแข็งแรง ความร้อนดี เหมาะสำหรับแม่พิมพ์ฉีดลงสั และฉีด จอคอมพิวเตอร์ เครื่องแก้วคริสตัล	M333
ทำแม่พิมพ์พลาสติก ที่ต้องการทนการกัดกร่อนดีเยี่ยม, ทนต่อการเสียดสีสูง	M340
ทำแม่พิมพ์พลาสติกชนิด ที่ต้องการทนการกัดกร่อน ทนสนิม และทนเสียดสีสูง ขัดได้เงา จำนวนการผลิตสูง	M390
ทำแม่พิมพ์พลาสติก ที่ต้องการความแข็งแรง และการขัดเงาที่ดีเลิศ	M461
ทำชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักร เพลา ข้อเหวี่ยง สลัก เป็นเหล็กทนแรงดึงสูง	M390
ทำด้ามลูกปืน ชิ้นส่วนด้ามลูกปืน, ปลอก, แหวน, ดอกสว่าน, ลูกรีด, เกจ และสากยา	R100

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติเหล็กแข็งชนิดต่างๆ

BÖHLER	สภาพทนร้อน	สภาพทนเสียดสี	สภาพความเหนียว	สภาพการเจียร	สภาพแรงกดอัด
S600					
S705					
S390 Isomatrix PM					
S590 Isomatrix PM					
S690 Isomatrix PM					
S790 Isomatrix PM					

BÖHLER	สภาพทนไฟ	สภาพความเหนียว	สภาพทนเสียดสี	สภาพการกลึง
W100				
W302				
W303				
W400 VMR				

BÖHLER	สภาพทนเสียดสี	สภาพความเหนียว	สภาพการกลึง	สภาพการคงรูป
K100				
K105				
K107				
K110				
K190 Isomatrix PM				
K245				
K340				
K460				
K510				

BÖHLER	สภาพการขัดเงา	ทนการกัดกร่อน	สภาพทนเสียดสี	สภาพการกลึง	สภาพการคงรูป
M202					
M238					
M300					
M314					
M333					
M390 Isomatrix PM					
M461					



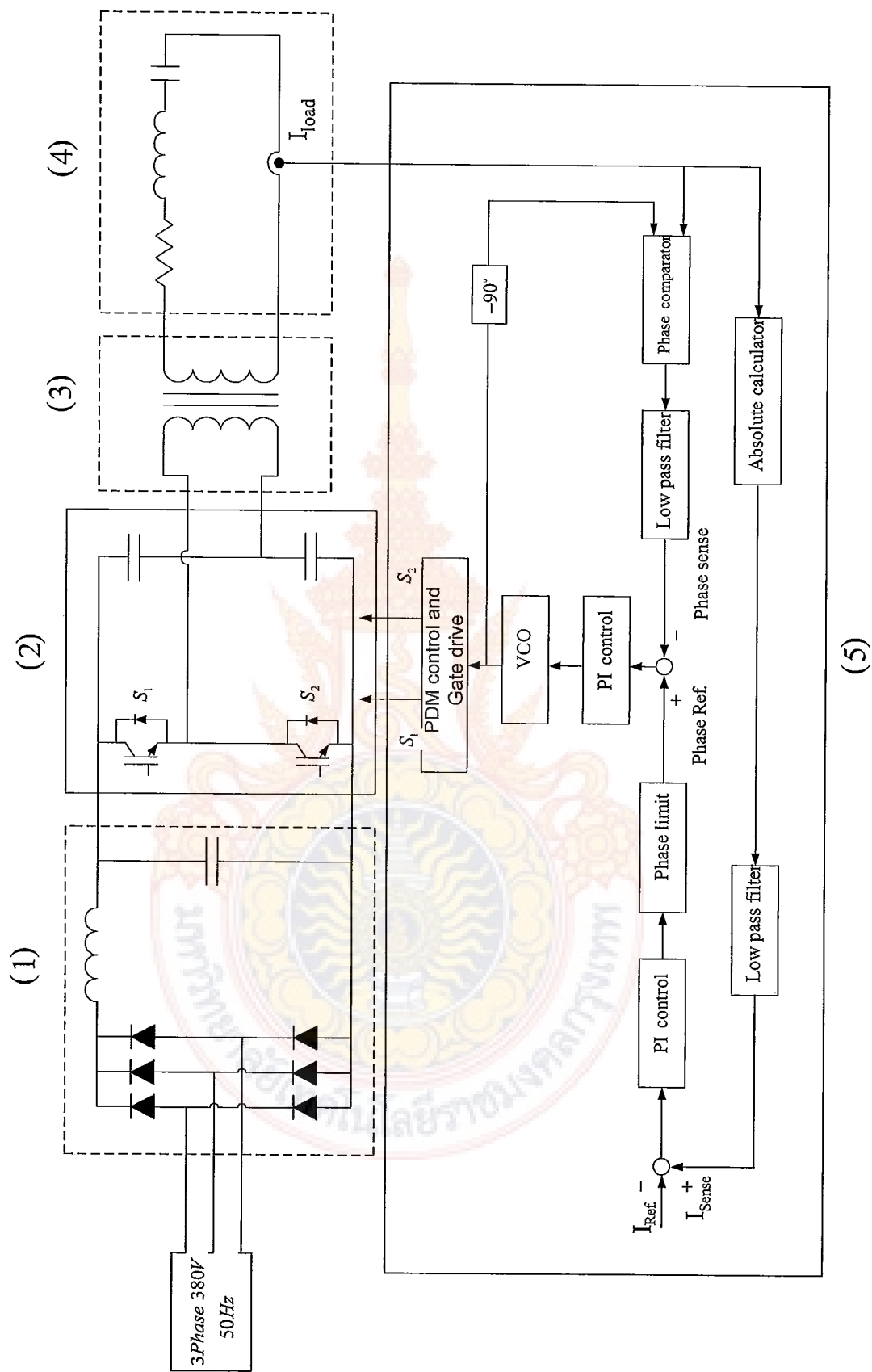
บริษัท สหมิตรเครื่องกล จำกัด (มหาชน)

42,48 ถ.พระราม 3 ซ.53 ยานนาวา กรุงเทพฯ 10120

โทร. 0-2295-1000-8, 0-2295-1901-9 แฟกซ์: 0-2295-1009, 0-2683-0943

ภาคผนวก ง
ระบบทั้งหมดของเครื่องเหี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว





ภาคผนวก จ
กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์





หนังสือรับรองการใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัยหรืองานสร้างสรรค์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่า (หน่วยงานที่ใช้ประโยชน์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ได้นำผลงานวิจัยหรืองานสร้างสรรค์จากโครงการเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบ
แข็งที่มีการควบคุมกำลังโดยการควบคุมความหนาแน่นของพัลส์
ไปใช้ประโยชน์ในด้าน

- ☐ เจริญนโยบาย ☒ เจริญสาธารณะ ☐ เจริญผลลัพท์ ☐ ทางอ้อม
☐ อื่น ๆ

ซึ่งผลงานวิจัยดังกล่าว ได้ก่อให้เกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ของโครงการคือ
ได้รับความรู้ และประสบการณ์โดยตรงจากผลการทดลองจริงของ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความ
ร้อนสำหรับงาน ชุบแข็งที่มีการควบคุมกำลังโดยการควบคุมความหนาแน่นของพัลส์ ของสาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาในการทำวิจัย
โครงการ

* แบบเอกสารหลักฐานที่แสดงการใช้ประโยชน์จากโครงการฯ ท้ายหนังสือรับรองการใช้ประโยชน์ *

ผู้ดำเนินโครงการ

ผู้ใช้ประโยชน์จากโครงการ

ลงชื่อ

(นายวิเชียร หทัยรัตน์ศิริ)

ตำแหน่ง อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

ลงชื่อ

(นายจิรพงษ์ จิตตะโคตร)

ตำแหน่ง อาจารย์ระดับ 7

* โปรดประทับตราของหน่วยงานด้วย*

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการ 2554A16662006

โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ชื่อมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ชื่อโครงการ เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็งที่มีการควบคุมกำลังโดยการควบคุมความหนาแน่นของฟิล์ม

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน : นายวิเชียร หทัยรัตน์ศิริ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 16 ก.ย. 2554 ถึงวันที่ 31 มี.ค. 2555

ระยะเวลาดำเนินการปี6..... เดือน ตั้งแต่วันที่ 16 ก.ย. 2554 ถึงวันที่ 31 มี.ค. 2555

รายจ่าย

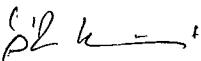
หมวด	รายจ่ายสะสม จากรายงาน ครั้งก่อน	ค่าใช้จ่าย งวดปัจจุบัน	รวมรายจ่าย สะสมถึง ปัจจุบัน	งบประมาณ รวมทั้งโครงการ	คงเหลือ (หรือเกิน)
1. ค่าตอบแทน	47,640.00	40,000.00	87,640.00	87,640.00	0.00
2. ค่าจ้าง	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3. ค่าวัสดุ*	118,208.75	82,725.00	200,933.75	203,242.00	2,308.25
4. ค่าใช้สอย	65,000.00	39,000.00	104,000.00	93,500.00	-10,500.00
5. อื่นๆ (ค่าสาธารณูปโภค)	15,618.00	0.00	15,618.00	15,618.00	0.00
รวม	246,466.75	161,725.00	408,191.75	400,000	-8,191.75

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

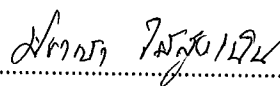
จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 240,000.00 บาท เมื่อ 27 สิงหาคม 2554

งวดที่ 2 160,000.00 บาท เมื่อ ยังไม่ได้รับเงิน



ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน



ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ และ นามสกุล นาย วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ
Mr. Vichian Hatairatsiri
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3-1009-05333-893-18
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ 2 ระดับ 7
สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
4. สถานที่ติดต่อ
ที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2
ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ
รหัสไปรษณีย์ 10120 โทรศัพท์ 0 2286 9629
ที่อยู่ปัจจุบัน 1/174 ม. 5 หนองแขม ประเวศ กรุงเทพฯ
E-mail address: vichen_174@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ระดับ การศึกษา	อักษรย่อ ปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่ สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2552	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2543	ไทย

6. สาขาวิชาการศึกษาที่มีความชำนาญพิเศษ Induction Heating

ประวัติผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ และ นามสกุล

นาย สายชล ชูดเจื้อจิ้น

Mr. Saichol Chudjuarjeen

2. หมายเลขบัตรประชาชน

3-2501-00418-89-1

3. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์พนักงานมหาวิทยาลัย

สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

4. สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงานปัจจุบัน

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร

กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10120

โทรศัพท์ 0 2286 9629

ที่อยู่ปัจจุบัน

1/26 พญาวิลส์ 17 พุทธบูชา 36

บางมด จอมทอง กรุงเทพฯ

E-mail address c_somchai2@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2547	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	2543	ไทย

6 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Induction Heating

ประวัติผู้ร่วมวิจัย(2)

1. ชื่อ และ นามสกุล

นาย สรรพพล คุ่มทรัพย์

Mr. Santaphon Koomsap

2. หมายเลขบัตรประชาชน

3-1017-01699-82-0

3. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ระดับ 5

สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

4. สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงานปัจจุบัน

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร
กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10120
โทรศัพท์ 0 2286 9629

ที่อยู่ปัจจุบัน

2-115 ซอยนิมิตใหม่ 6/1 หมู่บ้านพนาสนธ์4
แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510.
E-mail santaphon.k@rmutk.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	2544	ไทย

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

ระบบไฟฟ้ากำลัง พลังงานทดแทน