สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

INDUCTION MELTING



โดย

นายคณิน เกษมณี

นายฉลาด บุญนะ

นายศิริชัย ใจกล้า

นายวรากร สุขสกุลวัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49899
วัน,เดือน,ปี - 2 มิ.ย. 2547

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

INDUCTION MELTING

ผู้จัดทำ

1. นายคณิน	เกษมณี	รหัสประจำตัว 43015108
2. นายฉลาด	บุญนะ	รหัสประจำตัว 43015110
3. นายศิริชัย	ใจกล้า	รหัสประจำตัว 43015137
4. นายวรากร	สุขสกุลวัฒน์	รหัสประจำตัว 43015179

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

นายคณิน เกษมณี 43015108
นายฉลาด บุญนะ 43015110
นายศิริชัย ใจกล้า 43015137
นายวรากร สุขสกุลวัฒน์ 43015179
รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

จากทฤษฎีของฟาราเดย์ถูกนำมาประยุคใช้กับเตาหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับเทียบกับเวลา ($E=d\phi/dt$) ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนียวนำและมีกระแสไหลวนในเบ้าหลอม ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นจนสามารถหลอมชิ้นงานได้ ซึ่งจะทำการหลอมชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียม ที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2.8 กิโลวัตต์และเพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานไปสู่เบ้าหลอมให้มากที่สุดจึงต้องทำงานที่ความถี่รีโซแนนซ์ซึ่งใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มคลื่นที่มีมอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ช่วยในการเปลี่ยนความถี่ไฟฟ้าให้สูงขึ้นใกล้เคียงกับความถี่รีโซแนนซ์โดยเลือกใช้ที่ 75 ถึง 80 กิโลเฮิร์ตซ และใช้หม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ที่ลดการสูญเสียขณะใช้งานที่ความถี่สูงช่วยเพิ่มกระแสให้สูงขึ้นเพื่อไปทำให้เกิดกระแสไหลวนในเบ้าหลอมและทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากเบ้าหลอมไปสู่ชิ้นงานซึ่งสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดได้ด้วยหลักการควบคุมเฟสโดยใช้ TL494 เป็นตัวควบคุม ซึ่งปัญหาที่พบคือ มุมของกระแสจะเข้าใกล้มุมของแรงดันเป็นสาเหตุให้เกิดผลเสียแก่ตัวสวิทซ์ในอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมมุมของกระแสโดยการนำเอาสัญญาณมาป้อนกลับเพื่อตรวจสอบมุมที่ถูกต้องก่อนที่จะส่งออกเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Induction Melting

Kanin Katemanee 43015108

Chalard Boonna 43015110

Sirichai Jaikla 43015139

Warakorn Suksakulvat 43015179

Assc.Prof.Dr.ViriyaPichetjamreon Advisor

2002

Abstract

In accordance with the Faraday's law,the magnetic flux induction is applied for induction furnance. Induction voltage and eddy current in crucrible are produced by the derivertion of electromagnetic flux caused by AC voltage during the period of time ($E = d\phi/dt$). As the result, heat produced by eddy current can melt the workpiece as requirement. In order to melt the aluminum work piece and transfer the energy effectively, the resonance frequency shall be applied in the full wave inverter which its switching device is MOSFET. The MOSFETs will switch from ordinary AC frequency 50 Hz to nearly the resonance frequency. The induced melting process shall be succeeded completely by 2.8 kW electrical power required. We choose to use 75 – 80 kHz. Frequency as the resonance frequency as the resonance frequency in this project and output power can be controlled with phase controlled by TL 494.We also use ferrite core for the matching transformer in order to minimize all losses during operation at high frequency. This can increase the eddy current in crucible and transfer the heat energy from the crucible to the workpiece at the optimum point.Which the problem is find in this project , the angle's current is nearing to angle's voltage. Therefore cause to make damage at the switch device in the inverter. By using signal voltage and current are feedback for control angle's current before to sent the output.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ ช่วยเหลือเสมอมา และถ้าหากไม่ได้รับความช่วยเหลือต่างๆ จากพี่ อาณัต ถึงสาคร และพี่ ศักดา พรมเหมือน

นายคณิน เกษมณี
นายฉลาด บุญนะ
นายศิริชัย ใจกล้า
นายวรากร สุขสกุลวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ	2
2.1 หลักการเบื้องต้นของการให้ความร้อน	4
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน	8
2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอม	8
2.2.2 การประมาณการเหนี่ยวนำความร้อน	14
2.2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้มซาบกับอุณหภูมิ และความเข้มสนามแม่เหล็ก	16
2.3 การคำนวณวงจรสมมูลย์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	16
2.4 หลักการรีโซแนนซ์	22
2.4.1 วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC1	
2.4.1.1 พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L กับ C	24
2.4.1.2 Q แฟคเตอร์ของวงจรอนุกรม RLC	25
2.4.2 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน RLC	25
2.4.2.1 Q แฟคเตอร์ของวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานในทางปฏิบัติ	27
บทที่ 3 โครงสร้างวงจร	29
3.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier) และวงจรกรองแรงดัน (Filter)	29
3.1.1 วงจรเรียงกระแสหรือวงจรเรคติไฟเออร์ (Rectifier)	29
3.1.2 วงจรกรองแรงดัน (Filter)	30
3.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)	30
3.2.1 ลักษณะการทำงานของวงจร	30
3.2.2 มอสเฟตกำลัง	32
3.2.3 การกำหนดค่าเวลาเผื่อ t_D สำหรับฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	33
3.2.4 ตัวเก็บประจุบล็อคกิ้ง C_B เพื่อป้องกันการไม่สมมาตรฟลั๊กแม่เหล็ก	33
3.3 หม้อแปลงความถี่สูง	34
3.3.1 ลักษณะแกนที่ใช้	35
3.3.1.1 การอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ 36
3.4 วงจรควบคุมสัญญาณขับเกทของมอสเฟต 36
3.4.1 วงจรเรคกูเลเตอร์ 37
3.4.2 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ 37
3.4.2.1 ไอซีเบอร์ TL 494 37
3.4.2.2 การกำหนดเวลาคาบการทำงาน 38
3.4.2.3 การปรับเลื่อนเฟส 38
3.4.3 วงจรแยกกราวด์ 39
3.5 การควบคุม 40
3.5.1 บล็อคไดอะแกรมของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ 42
3.5.2 บล็อคไดอะแกรมสัญญาณของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ 45
3.5.3 หลักการทำงานของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ 45
3.5.3.1 การทำงานของวงจรปรับเกณฑ์สัญญาณ 46
3.5.3.2 การทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณ 46
3.5.3.3 การทำงานของการปรับความถี่ของสัญญาณ 47
3.5.4 ผลการทำงานของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ 48
3.5.5 แนวทางการพัฒนา 49
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 50
4.1 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา 50
4.2 ผลของการเปลี่ยนโหลดขนาดต่างๆ 51
4.3 การทดลองการควบคุมมุมกระแสแบบอัตโนมัติและแบบมือปรับ 52
4.4 ภาพของสัญญาณต่างๆ 54
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป 57
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และ วงจร Isolate
นำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์
ภาคผนวก ข. ข้อมูลของอุปกรณ์
- IRFP 460
- TL 494
- AT 89C4051
- TLP 521-4
- LM 6361N
เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้าที่
ตารางที่ 4-1	แสดงค่าเวลาและอุณหภูมิในการหลอมของโหลดขนาด 30 กรัม	49
ตารางที่ 4-2	แสดงค่ากระแสกำลังและเวลาในการหลอมของโหลดแต่ละขนาด	51
ตารางที่ 4-3	การควบคุมแบบมือปรับ	52
ตารางที่ 4-4	การควบคุมแบบป้อนกลับ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งตัวนำทรงกระบอก 2

รูปที่ 2-2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด 3

รูปที่ 2-3 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก 3

รูปที่ 2-4 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่เป็นสารแม่เหล็ก 3

รูปที่ 2-5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก คล้องผ่านเบ้าหลอมและไปตัดผ่านชิ้นงาน 5

รูปที่ 2-6 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงโดยทั่วไป 6

รูปที่ 2-7 วงจรสมมูลย์ของขดลวดให้ความร้อน 6

รูปที่ 2-8 แสดงแผ่นคลี่เบ้าหลอม 7

รูปที่ 2-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส กับระยะทางจากผิวของเบ้าหลอม 7

รูปที่ 2-10 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอมในอุดมคติ 8

รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้าสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวเบ้าหลอม 10

รูปที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวเบ้าหลอม 13

รูปที่ 2-13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดัน 13

รูปที่ 2-14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก กับแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ 14

รูปที่ 2-15 วงจรสมมูลย์ของขดลวดให้ความร้อนกับชิ้นงาน 14

รูปที่ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะใด ๆ กับระยะจากผิว 15

รูปที่ 2-17 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านเบ้าหลอม และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 18

รูปที่ 2-18 วงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก 19

รูปที่ 2-19 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า 19

รูปที่ 2-20 ขดลวดสนามแม่เหล็กที่มีจำนวน N_C รอบ 21

รูปที่ 2-21 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับวงจรอนุกรม RLC รีโซแนนซ์ 22

รูปที่ 2-22 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ กระแส และมุมเฟส กับความถี่ สำหรับรีโซแนนซ์แบบอนุกรม 23

รูปที่ 2-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_R , V_C , และ V_L กับความถี่ 24

รูปที่ 2-24 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร RLC รีโซแนนซ์ 25

รูปที่ 2-25 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นกระแสที่จุดรีโซแนนซ์ของวงจร RLC ขนาน 26

รูปที่ 2-26 แสดงวงจร RLC แบบขนานในทางปฏิบัติ 27

รูปที่ 2-27 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่สำหรับรีโซแนนซ์แบบขนาน 27

รูปที่ 3-1 วงจรบริดจ์เรคติไฟเออร์ (Bridge Rectifier) 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3-2	การใส่ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์	30
รูปที่ 3-3	แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์	31
รูปที่ 3-4	แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด N Chanel	32
รูปที่ 3-5	แสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต	33
รูปที่ 3-6	แสดงลักษณะของการเกิดความลาด (roop) ขึ้นบนแรงดันที่ตกคร่อมไพรมารี่ เมื่อต่อตัวเก็บประจุบล็อคกิ้ง C_b คั่นเข้ามาในวงจร	34
รูปที่ 3-7	แสดงลักษณะเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของหม้อแปลง	35
รูปที่ 3-8	บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนของวงจรควบคุม	37
รูปที่ 3-9	แสดงการต่อวงจรที่ขาไอซีเบอร์ TL 494	38
รูปที่ 3-10	แสดงวงจร isolate	39
รูปที่ 4-1	กราฟแสดงผลการทดลองการหลอมเทียบกับเวลา	50
รูปที่ 4-2	สัญญาณแรงดันและกระแสเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงาน	53
รูปที่ 4-3	สัญญาณแรงดันและกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงาน	53
รูปที่ 4-4	สัญญาณขับมอสเฟตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	54
รูปที่ 4-5	แสดง Dead time ของสัญญาณขับมอสเฟต	54
รูปที่ 4-6	แสดงสัญญาณด้านขาขึ้นของแรงดันและกระแส	55
รูปที่ 4-7	แสดงสัญญาณด้านขาลงของแรงดันและกระแส	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

เครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้น เป็นการใช้หลักการของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงจุดที่สามารถที่จะทำให้ชิ้นงานหลอมได้ โดยจะมีรูปพลังงานที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับเครื่องหลอม 3 รูป คือ เริ่มต้นจากพลังงานในรูปไฟฟ้า พลังงานในรูปสนามแม่เหล็ก และสุดท้ายพลังงานความร้อนที่จะส่งถ่ายไปสู่ชิ้นงานเพื่อนำไปสู่การหลอม ในเบื้องต้นของเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้นจะรับพลังงานไฟฟ้ามาเป็นอันดับแรก คือเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วงจรเรคติไฟเออร์ (Rectifier) และฟิลเตอร์ (filter) เพื่อกรองสัญญาณรบกวนและแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อควบคุมให้มีกระแสไหลคงที่และป้อนให้กับวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full – Bridge Inverter) ทำการสวิทซ์ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกลับออกมา และสามารถควบคุมความถี่ได้ ซึ่งมีลักษณะคลื่นเป็นสแควร์ที่มีความถี่สูง ๆ ใกล้เคียงกับความถี่รีโซแนนซ์ (resonant frequency) เนื่องจากที่ความถี่รีโซแนนซ์จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หลังจากนั้นก็จะนำไปเป็นอินพุทให้กับหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรต์ที่แปลงแรงดันให้ต่ำลงและเพิ่มกระแสที่ไหลไปยังโหลดที่เป็นโหลดรีโซแนนซ์แบบอนุกรม การเพิ่มกระแสให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อไปทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กให้มากที่สุดเพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวนในตัวเบ้าหลอมซึ่งก็คือการแปรเป็นพลังงานในรูปสนามแม่เหล็ก และหลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ในรูปของพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นที่เบ้าหลอม จากนั้นความร้อนจึงถ่ายเทจากเบ้าหลอมไปสู่ชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียมเพื่อให้เกิดการหลอมขึ้น

จากการใช้งานของเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำจะพบปัญหาที่เกิดขึ้นคือ มุมของกระแสจะเข้าใกล้มุมของแรงดันเป็นสาเหตุให้เกิดผลเสียแก่ตัวสวิทซ์ในอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมมุมของกระแสโดยการนำเอาสัญญาณมาป้อนกลับเพื่อตรวจสอบมุมที่ถูกต้องก่อนที่จะส่งออกเอาท์พุต

เนื่องจากเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำนั้น เป็นเครื่องหลอมที่ค่อนข้างประหยัดพลังงาน มีการสูญเสียพลังงานน้อย ใช้เวลาในการหลอมเร็ว ใช้พื้นที่ในการทำงานน้อย เงียบ ปลอดภัยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นส่วนที่ทำให้ส่วนประกอบของชิ้นงานหลังการหลอมเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้เห็นได้ชัดว่าเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำมีความน่าสนใจที่จะนำมาศึกษาและพัฒนา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการหลอมอลูมิเนียมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานส่วนประกอบของวงจร หลักการทำงานของวงจรส่วนต่างๆ ในวงจร โดยมีรายละเอียดในบทต่าง ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

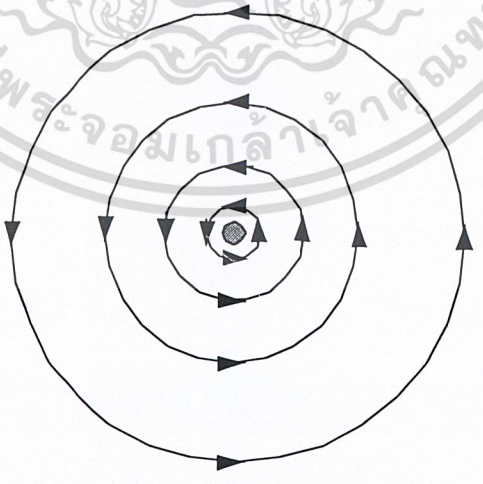
การหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ต้องการจะหลอม โดยอาศัยทฤษฎีของฟาราเดย์ คือ จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดทำให้ เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานและเกิดความร้อนในชิ้นงานต่อไป

โดยจะป้อนกระแสและแรงดันไฟสลับเข้าสู่วงจรเรคติไฟเออร์ (Rectifier) ผ่านฟิลเตอร์ (Filter) เพื่อกรองให้เป็นไฟตรง ผ่านวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full-Bridge Inverter) เพื่อทำการสวิทซ์ให้ได้ไฟสลับที่มีความถี่สูงให้ใกล้เคียงกับความถี่ที่จุดรีโซแนนซ์ ซึ่งที่จุดรีโซแนนซ์เป็นจุดที่จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยหลังจากนั้นก็จะนำไปเป็นอินพุทให้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อแปลงกระแสให้สูงขึ้นและนำไปจ่ายให้แก่ชุดเบ้าหลอม เพื่อนำไปสู่การเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่ชิ้นงานต่อไป

สำหรับทฤษฎีพื้นฐานก็จะอาศัยการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยพิจารณาจากสูตรพื้นฐาน

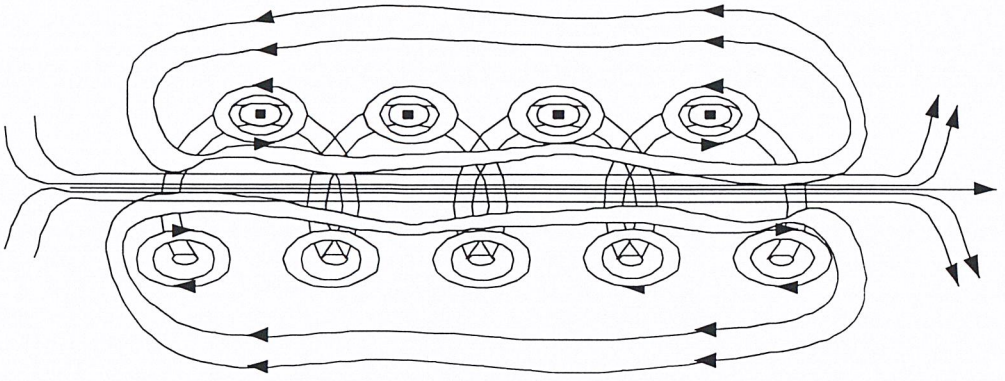
$$VI = I^2R \qquad (2.1)$$

เมื่อจ่ายไฟกระแสตรงเข้าไปในตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งตัวนำซึ่งเป็นไปตามกฎมือขวา ที่บริเวณใกล้ ๆ กับแท่งตัวนำจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงกว่าจุดอื่น และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ความเข้มของสนามแม่เหล็กยังขึ้นอยู่กับกระแสไฟที่จ่ายเข้าไปยังแท่งตัวนำด้วย ดังรูปที่ 2-1 ถ้าจ่ายไฟตรงไปยังขดลวดโซลินอยด์ ผลที่เกิดขึ้นคือ ที่ภายในขดลวดจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าบริเวณภายนอกขดลวด ดังรูปที่ 2-2 รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งตัวนำทรงกระบอกและเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด

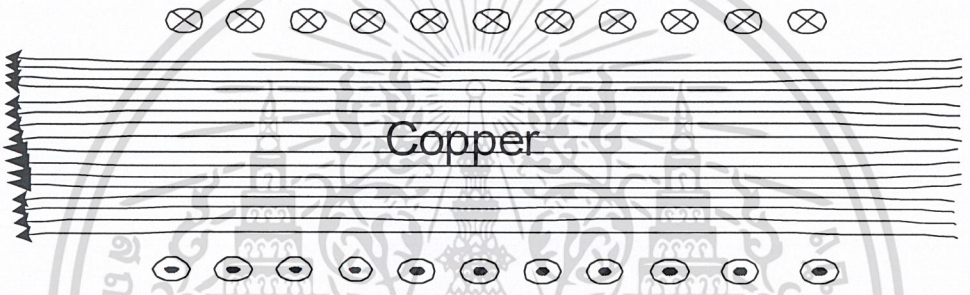


รูปที่ 2-1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในแท่งตัวนำทรงกระบอก

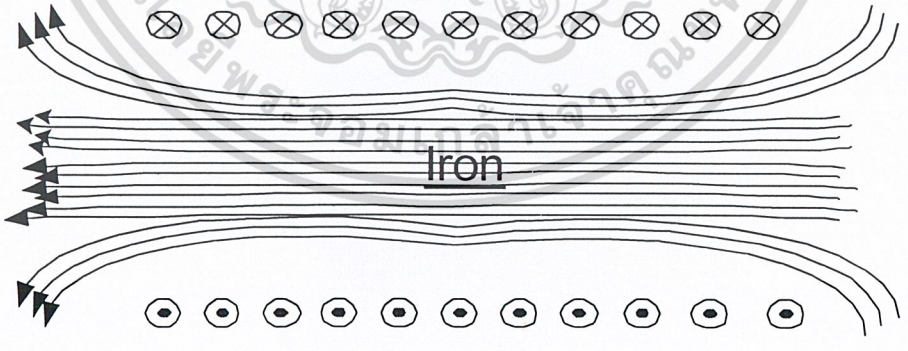
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด



รูปที่ 2-3 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก



รูปที่ 2-4 ผลของสนามแม่เหล็กของแท่งตัวนำที่เป็นสารแม่เหล็ก

พิจารณาเมื่อเอาแท่งตัวนำไปใส่ไว้ในคอยล์ที่เราจ่ายไฟกระแสตรงไป ถ้าแท่งตัวนำไม่เป็นสารแม่เหล็กจะสังเกตเห็นว่าจะไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2-3 เมื่อเราเปลี่ยนแท่งตัวนำเป็นสารแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสังเกตเห็นว่าจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2-4 ก็เนื่องจากค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (permeability) ของสารแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก

เมื่อเรานำแท่งตัวนำไปไว้ในคอยล์ที่จ่ายไฟกระแสตรงเข้าไป จะไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น และก็จะไม่เกิดกระแสไหลวนด้วย ถ้าเราเปลี่ยนจากไฟกระแสตรงมาเป็นไฟกระแสสลับ ก็จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น และจะเกิดผลของกระแสไหลวนด้วย ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยฟาราเดย์

โดยกระแสไหลวนส่วนมากจะไหลอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานแล้วจะค่อยๆไหลลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลเมื่อความลึกผิวของชิ้นงานมากขึ้นพูดอีกนัยหนึ่งก็คือกระแสไหลวนที่เกิดส่วนใหญ่จะไหลอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานนั่นเองปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Skin Effect “ เนื่องจากกระแสไหลวนรอบชิ้นงานเป็นเส้นทางปิดดังนั้นจึงทำให้เกิดการขัดสีของโมเลกุลตามความถี่ของกระแสไฟสลับจนกระทั่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นบนชิ้นงาน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า “Eddy Current Loss” ซึ่งความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับกระแสที่เหนี่ยวนำ และความต้านทานสมมูลย์ของเส้นทางที่กระแสไหลผ่าน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังบริเวณอื่น โดยการแผ่รังสีที่บริเวณผิว การพาความร้อนและการนำความร้อน เพราะฉะนั้นชิ้นงานที่เป็นพวกสารแม่เหล็กจึงสามารถที่จะหลอมได้โดยการอาศัยผลของการถ่ายเทความร้อนจากเบ้าหลอมไปสู่ชิ้นงานและผลของ eddy current loss ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานร่วมกัน

2.1 หลักการเบื้องต้นของการให้ความร้อน

ในการทำให้เกิดพลังงานความร้อน ก็คืออาศัยการแปรรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งก็คือมาจากการอาศัยการสูญเสียของแกนเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซีสของแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis) และการสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวน (eddy current) ดังสมการ

การสูญเสียในแกนเหล็ก $$P_C = P_h + P_e \quad (2.2)$$

การสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอร์รีซีส $$P_h = K_h f B^x_{max} \quad (2.3)$$

การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน $$P_e = K_e f^2 B^2_{max} \quad (2.4)$$

หลักการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การให้พลังงานความร้อนทางอ้อม โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

คือ เมื่อขดลวดสร้างสนามที่เบ้าหลอมได้รับการป้อนไฟสลับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดสร้างสนาม ชิ้นงาน และเบ้าหลอมกราไฟต์ ซึ่งเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ถ้าชิ้นงานที่ต้องการหลอมไม่เป็นสารแม่เหล็ก (Non-Ferromagnetic) การหลอมจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากเบ้าหลอมเพียงอย่างเดียว

2. การให้พลังงานความร้อนทางตรง โดยอาศัยหลักการกระแสไหลวน

คือ ในกรณีที่ชิ้นงานเป็นสารแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะคล้องผ่านขดลวดสร้างสนาม, ชิ้นงาน และเบ้าหลอม เช่นกัน แต่จะเกิดการเหนี่ยวนำให้มีกระแสไหลวน (eddy current) ไหลอยู่ในชิ้นงานด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2-5 แสดงให้เห็นถึงเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กคล้องผ่านเบ้าหลอมและ ไปตัดผ่านชิ้นงาน ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนได้หรือไม่มากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางแม่เหล็กและการนำไฟฟ้าของวัสดุที่จะนำมาใช้หลอม ถ้าหากเราพิจารณาการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยให้ทั้งระบบเป็นหม้อแปลงหนึ่งชุด ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนเบ้าหลอมจะเปรียบเสมือนขดทุติยภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบหนึ่งรอบและชิ้นงานเป็นโหลดที่ต่ออยู่ซึ่งความต้านทานสมมูลย์ของโลหะที่เป็นชิ้นงานจะมีค่าค่านข้างต่ำ แต่เบ้าหลอมจะมีค่าสูงเนื่องจากเป็นวัสดุที่ทำมาจากกราไฟต์ดังนั้นความต้านทานสมมูลย์ในวงจรจึงเป็นผลของเบ้าหลอมเป็นส่วนใหญ่

รูปที่ 2-6 แสดงวงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงโดยทั่วไป ส่วนรูปที่ 2-7 แสดงวงจรสมมูลย์ของขดลวดเหนี่ยวนำ เบ้าหลอมและชิ้นงาน จะเห็นว่าถ้า I_C เป็นกระแสที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วน I_W เป็นกระแสที่ไหลในเบ้าหลอม กระแสทั้งสองจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

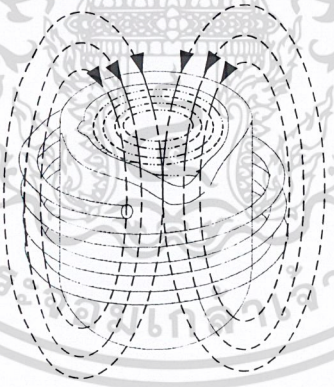
$$I_W = N_C I_C \tag{2.5}$$

โดยที่ N_C คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ

กำลังสูญเสียเป็นความร้อนในเบ้าหลอมมีค่าเท่ากับ

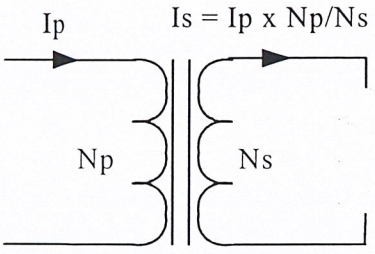
$$P_W = N_C^2 I_C^2 R_W \tag{2.6}$$

โดยที่ R_W คือความต้านทานสมมูลย์ของเบ้าหลอม

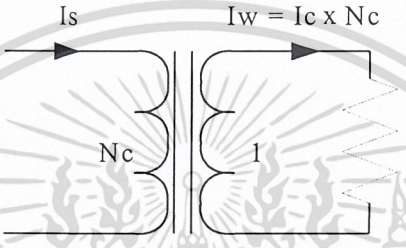


รูปที่ 2-5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กคล้องผ่านเบ้าหลอมและไปตัดผ่านชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-6 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงโดยทั่วไป



รูปที่2-7 วงจรสมมูลย์ของขดลวดให้ความร้อน

จากรูปที่ 2-5 และจากปรากฏการณ์ผิวถ้าพิจารณาว่า กระแสโดยส่วนมากไหลอยู่ในระดับความลึกผิว จะสามารถหาความต้านทานสมมูลย์ของวงจรได้ดังรูปที่ 2-8 เมื่อทำการคลี่เบ้าหลอมออกความต้านทานของเบ้าหลอมจะมีค่า

$$R_w = \frac{2\pi R\rho}{\delta I_w} \qquad (2.7)$$

โดยที่ ρ คือสภาพความต้านทานจำเพาะของเบ้าหลอม

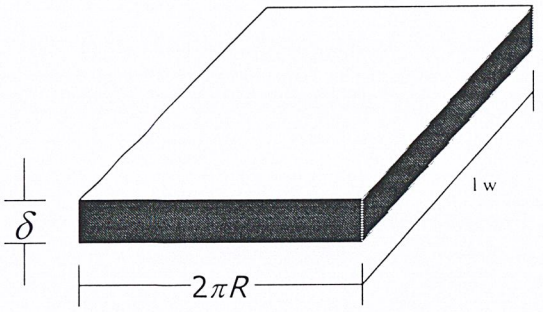
δ คือ ความลึกผิว $= \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$

μ คือ ค่าความซึมซาบของเบ้าหลอม และ f, ω คือ ค่าความถี่

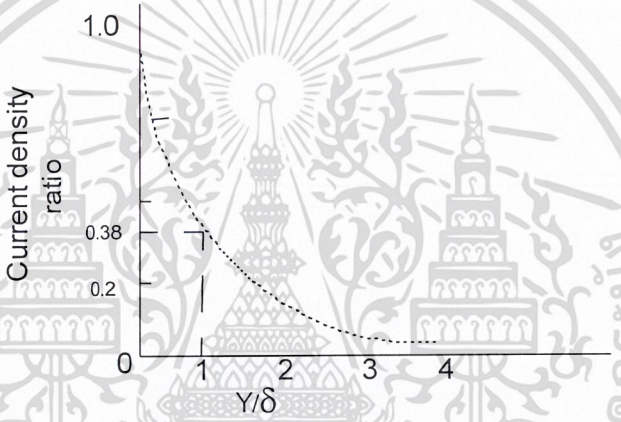
R คือ รัศมีของเบ้าหลอม

l_w คือ ความยาวของเบ้าหลอมซึ่งเท่ากับความสูงของขดลวดเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-8 แสดงแผ่นคลี่เบ้าหลอม



รูปที่ 2-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส กับระยะทางจากผิวของเบ้าหลอม

จากสมการที่ (2.7) ความต้านทานสมมูลย์จะมีความสัมพันธ์กับ สภาพความต้านทาน ความลึกผิว และลักษณะทางเรขาคณิตของเบ้าหลอมด้วย

รูปที่ (2-9) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส กับระยะทางจากผิวของเบ้าหลอม เนื่องจากปรากฏการณ์ผิว จึงทำให้ความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับระยะทางจากผิวเป็นฟังก์ชั่นเอกซ์โพแนนเชียล ที่ระดับความลึกผิว ความหนาแน่นของกระแสจะมีค่าเพียง 0.368 เท่าของความหนาแน่นของกระแสที่ผิวเบ้าหลอม จึงประมาณว่ากระแสโดยส่วนมากจะไหลอยู่ในระความลึกผิวนี้

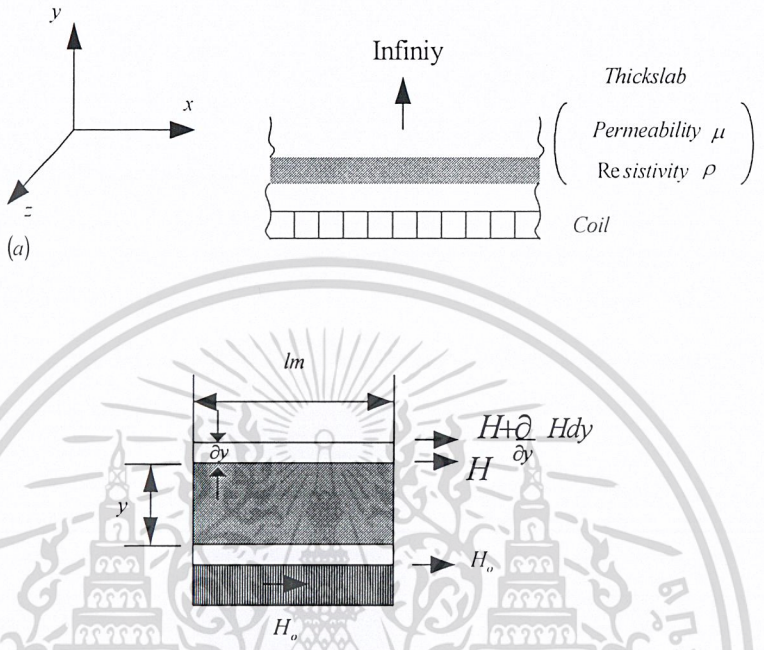
ถ้าพิจารณาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะพบว่า ไม่มีการใช้แหล่งความร้อนจากภายนอกแต่ใช้เบ้าหลอมเป็นแหล่งความร้อนของตนเอง อีกทั้งเบ้าหลอมก็ไม่จำเป็นที่จะสัมผัสกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก การให้ความร้อนในลักษณะนี้จึงสามารถทำได้สะดวก

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำความร้อน

2.2.1 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เข้าใจโดยอาศัยทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้จะอธิบายการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอมที่มีลักษณะอุดมคติที่เรียกว่า Semi – infinite slab ถ้าสามารถทำความเข้าใจกับเบ้าหลอมที่มีลักษณะอุดมคติ จะทำให้เข้าใจการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนกับเบ้าหลอม



รูปที่ 2-10 การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำกับเบ้าหลอมในอุดมคติ

รูปที่ 2-10 แสดงระบบที่ประกอบด้วยขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและเบ้าหลอมยาวและหนามากโดยเบ้าหลอมจะวางอยู่ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เบ้าหลอมที่มีลักษณะเป็นอุดมคติดังกล่าว เทียบได้กับโหลดทรงกระบอกที่มีรัศมีเป็นอนันต์ ในที่นี้สมมติว่าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่ผิวเบ้าหลอมมีค่าความเข้าสนามแม่เหล็กเป็น H_0 เนื่องจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ชิดกับเบ้าหลอมมาก ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขดลวดจะมีค่าเท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเบ้าหลอม โดยความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงกับเวลาในทิศทางตามแกน X และสร้างกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่ผิวเบ้าหลอมตามแกน Z โดยความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นปริมาณเวคเตอร์ในที่นี้จะสมมุติเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่ผิวเบ้าหลอมดังนี้

$$H_{X(Y=0)} = H_{om}\cos\omega t$$

$$H_Y = 0 \qquad H_Z = 0 \qquad (2.8)$$

โดยที่ H_{om} คือค่ายอดของ H_x ที่ผิวชิ้นงาน (y = 0) จากทฤษฎีพื้นฐานทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2\vec{H} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}$$

$$\nabla^2\vec{E} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \qquad (2.9)$$

$$\nabla^2\vec{j} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial\vec{j}}{\partial t}$$

$$\nabla^2\vec{H} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 H}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho}\left[\frac{\partial H_X}{\partial t} + \frac{\partial H_Y}{\partial t} + \frac{\partial H_Z}{\partial t}\right] \qquad (2.10)$$

เนื่องจากเบ้าหลอมมีลักษณะเป็นอุดมคติทำให้ $H_y = H_z = 0$ ดังนั้น $\vec{H}$ จะมีส่วนประกอบในทิศทางแกน X อย่างเดียว แสดงว่า

$$\nabla^2\vec{H} = \frac{\partial^2 H_X}{\partial Y^2} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial H_X}{\partial t} \qquad (2.11)$$

คำตอบของสมการอนุพันธ์ย่อยจะมีผลเฉลยในรูป $H_X = H_X(Y)\cos\omega t$ ซึ่ง $H_x(Y)$ คือการเปลี่ยนแปลงของ Hx กับระยะทางในแนวแกน y ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ (2.11) ใหม่ในรูปสมการเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$\frac{d^2HX}{dy^2} - j\frac{\mu}{\rho}\omega H_X = 0 \qquad (2.12)$$

ให้

$$\alpha^2 = \frac{\mu\omega}{2\rho} = \frac{1}{\delta^2} \qquad (2.13)$$

$$\frac{d^2HX}{dy^2} - 2j\alpha^2 H_X = 0 \qquad (2.14)$$

เขียนสมการใหม่ได้

$$\frac{d^2HX}{dy^2} - k^2 H_X = 0 \qquad (2.15)$$

โดยที่ $k^2 = 2.j\alpha^2$ สมการข้างบนจะมีผลเฉลยดังนี้

$$H_X(Y) = A_1\exp(ky) + A_2\exp(-ky) \qquad (2.16)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตเมื่อ $y = \infty; H_x$ จะมีค่าจำกัดค่าใดค่าหนึ่งแสดงว่า $A_1 = 0$ และ เมื่อ $y = 0$; $H_x(y) = H_{om}\exp(j\omega t)$ ดังนั้น

$$H_X(Y) = H_{om}\exp(-ky)\exp(j\omega t) \qquad (2.17)$$

$$H_X(Y) = H_{om}\exp(-\sqrt{2j}\omega y)\exp(j\omega t) \qquad (2.18)$$

แต่ $\sqrt{2j} = \pm(1+j)$

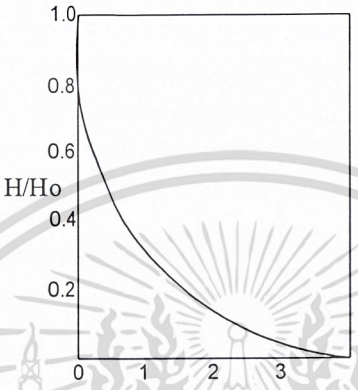
$$H_X(Y) = H_{om}\exp(-\alpha y(1+j))\exp(j\omega t) \qquad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้คำตอบเฉพาะส่วนจริง

$$H_X(Y) = H_{om}\exp(-\alpha y)\cos\exp(\omega t - \alpha y) \quad (2.20)$$

จากผลเฉลยตามสมการที่ (2.20) พบว่าที่ผิวของเบ้าหลอม $y = 0$; $H_x = H_{om}\cos(\omega t)$ ตามเงื่อนไขที่สมมุติไว้ และที่ระยะใด ๆ จากผิวของเบ้าหลอมในทิศทางแกน Y ขนาดของความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสที่ระยะใด ๆ จากผิวของเบ้าหลอมจะเป็นแบบล้าหลังเมื่อเปรียบเทียบกับมุมเฟสที่ผิวเป็นปริมาณ $\alpha y = \frac{y}{\delta}$



รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้าสนามแม่เหล็กกับระยะจากผิวเบ้าหลอม

จากสมการที่ (2.20) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัดส่วนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะใด ๆ กับความเข้าสนามแม่เหล็กที่ผิวเบ้าหลอม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2-11 ถ้ากำหนดให้ความลึกผิวแทนด้วยสัญลักษณ์ ความลึกผิวนี้จะมีค่า $\sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}}$ จะเห็นว่าที่ระดับความลึกผิวค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพียง 0.368 ของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิว ส่วนค่าความหนาแน่นกระแส ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและฟลักซ์สนามแม่เหล็ก สามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

จาก $\vec{B} = \mu\vec{H}$ (2.21)

$$B_X(y) = B_{om}\exp(-\alpha y)\cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.22)$$

และจาก $\vec{J} = \text{curl}(\vec{H})$ (2.23)

แสดงว่า $\vec{J}_z = -\frac{\partial H_x}{\partial y}\vec{k}$; $\vec{J}_x = 0$; $\vec{J}_y = 0$ (2.24)

$$\vec{J}_z = \left\{\alpha\sqrt{2j}\exp(-\alpha y\sqrt{2j} + j\omega t\right\}H_{om}\vec{k} \quad (2.25)$$

$$\vec{J}_z = \left\{\alpha\sqrt{2}\exp(-\alpha y(1+j) + j\omega t + j\frac{\pi}{4})\right\}H_{om}\vec{k} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เฉพาะส่วนได้จริง

$$\vec{J}_Z = \alpha\sqrt{2}H_{om}\left[\exp(-\alpha y)\cos\left(\omega t - \alpha y + \frac{\pi}{4}\right)\right]k^2 \quad (2.27)$$

จะเห็นว่าความหนาแน่นกระแสที่เหนี่ยวนำมีทิศทางตั้งฉากกับความเข้มสนามแม่เหล็กแสมอ และมีมุมเฟสนำหน้าคามเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ $\frac{\pi}{4}$

เมื่อ y = 0

$$J_{ZO} = \alpha\sqrt{2}H_{om}\exp j\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$J_{ZO} = \alpha\sqrt{2}H_{om}\exp j\frac{\pi}{4} \quad (2.28)$$

$$J_Z(y) = j_{om}\exp(j\omega t - \alpha y\sqrt{2j})$$

$$J_Z(y) = j_{om}\exp(-\alpha y)\cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.29)$$

จากผลเฉลยของความหนาแน่นกระแส สามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก จากความสัมพันธ์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_Z = \rho J_Z \quad (2.30)$$

$$E_Z = \rho J_{om}\exp(-\alpha y)\cos(\omega t - \alpha y) \quad (2.31)$$

จากผลเฉลยข้างต้นจะพบว่าปริมาณ $\vec{H}$: $\vec{B}$; $\vec{j}$ และ $\vec{E}$ จะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือ เป็น ไปตามปรากฏการณ์ผิว และจากความหนาแน่นกระแส สามารถหาค่ากระแสผลรวมความยาวได้ดังนี้

$$I = \int_{\infty}^{\infty} J_Z(y)dy(x/l) \quad (2.32)$$

$$I = \int_{\infty}^{\infty} J_{om}\exp(-\alpha y(\cos(\omega t - \alpha y)dy$$

$$I = j_{om}\,\mathrm{Re}\left[\int_{\infty}^{\infty}\exp(j\omega t - (1+j)\alpha y)dy\right]$$

$$I = J_{om}\,\mathrm{Re}\left[\frac{\exp(j\omega t}{(1+j)\alpha}\right]$$

$$I = \frac{J_{om}}{\sqrt{2}\alpha}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$$

จากผลเฉลยของสมการที่ (2.32) จะพบว่ากระแสผลรวมความยาวต่อหนึ่งความยาวจะมีมุมเฟสล้าหลังมุมเฟสของความหนาแน่นกระแสที่ผิวอยู่ $\frac{\pi}{4}$ แต่จาก

$$J_{om} = \alpha\sqrt{2}H_{om}\exp j\frac{\pi}{4} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่า $I = \alpha\sqrt{2}H_{om}\exp j\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)\frac{\exp\left(j\frac{\pi}{4}\right)}{\alpha\sqrt{2}}$

$$I = H_{om}\exp(j\omega t) \quad (2.34)$$

$$I = H_{om}\cos\omega t \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) จะเห็นว่ากระแสต่อหนึ่งความยาวมีค่าเท่ากับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวซึ่งสอดคล้องกับกฎฟาราเดย์ที่ว่า

$$\oint \vec{H}d\vec{l} = I \quad (2.36)$$

$$H(Xl) = I$$

จากที่กล่าวมาเมื่อมีกระแสไหลในเบ้าหลอมย่อมเกิดความร้อนขึ้น กำลังสูญเสียต่อ 1 ตารางเมตรที่ผิวเบ้าหลอมจะมีค่า

$$P_S = \int_0^\infty \rho_Z^2(y)dy(xl)(xl) \quad (2.37)$$

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสแปรตามเวลาเป็นรายคาบในการหาค่ากำลังสูญเสีย ต่อหนึ่งพื้นที่จึงต้องหาค่าเฉลี่ยกำลัง 1 คาบเวลาด้วยสมการที่ (2.37) จึงเป็น

$$P_S = \frac{\rho}{T}J_{om}^2\int_0^T\int_0^\infty \exp(-2\rho y)\cos^2(\omega t - \alpha y)dydt \quad (2.38)$$

$$P_S = \frac{\rho}{2}J_{om}^2\exp(-2\alpha y)dy \quad (2.39)$$

$$P_S = \frac{\rho}{4\alpha}J_{om}^2$$

$$P_S = \frac{\rho\delta}{4}J_{om}^2$$

แต่จาก $|J_{om}| = \frac{\sqrt{2}|H_{om}|}{\delta} = \frac{2H_0}{\delta}$

$$P_S = \frac{\rho}{\delta}H_0^2 \quad (2.40)$$

$$\frac{P_{sy}}{P_s} = \text{I-exp(-2}\alpha y\text{)} \quad (2.41)$$

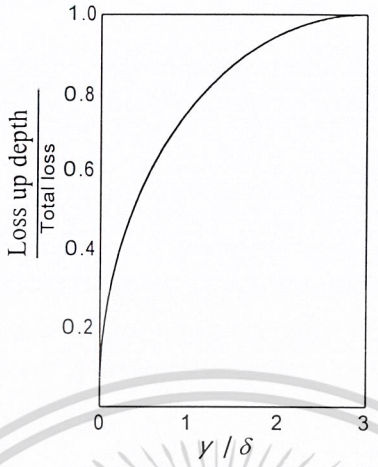
โดยที่ Ho คือค่าอาร์เอ็มเอส ของ Hom ถ้าให้ Psy คือกำลังสูญเสียของเบ้าหลอมจากผิวถึงระดับความลึก y สัดส่วนของ Psy กับ Ps แสดงดังสมการที่ (2.41) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของ Psy และ Ps กับสัดส่วนของระยะทางจากผิวและความลึกผิวแสดง ดังรูปที่ 2-12 จากค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก สามารถหาค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กรวมต่อหนึ่งความยาวและค่าแรงเคลื่อนสนามไฟฟ้าที่เกิดจากฟลักซ์สนามแม่เหล็กดังกล่าว ได้ดังนี้

$$\phi = \int B_x(y)dy$$

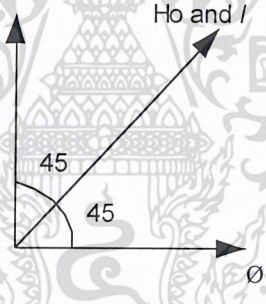
$$\phi = \text{Real}\left[\mu H_{om}\int_0^\infty \exp(j\omega t - (1+j))dy\right] \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = \frac{\mu H_{om}}{\alpha\sqrt{2}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \quad (2.43)$$



รูปที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียต่อพื้นที่ผิวกับระยะจากผิวเบ้าหลอม



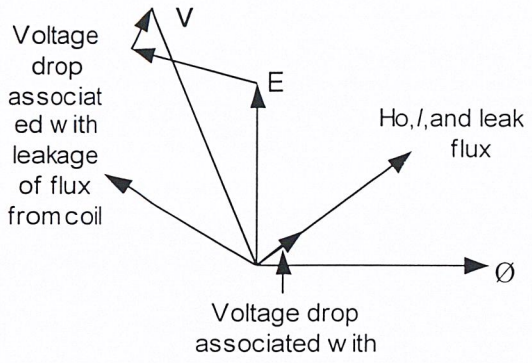
รูปที่ 2-13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์
ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดัน

และจาก $$E = N\frac{d\phi}{dt} \quad (2.44)$$

$$E = -\frac{\mu N}{\alpha\sqrt{2}} H_{om} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$$

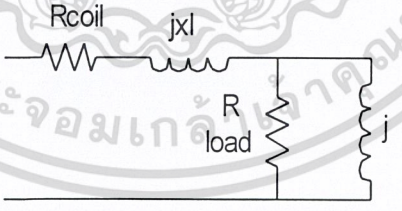
$$E = \frac{\mu N H_{om}\omega}{\alpha\sqrt{2}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันในกรณีที่ตัวขดลวดไม่อุดมคติ

จากสมการที่ (2.43) และ สมการที่ (2.43) จะเห็นว่าฟลักซ์สนามเหล็กผลรวมจะเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก Hom และมุมเฟสจะล้าหลังมุมเฟสของความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ $\frac{\pi}{4}$ และแรงดันที่เกิดขึ้นจะนำหน้ากระแสผลรวมอยู่ $\frac{\pi}{4}$ จากความสัมพันธ์ที่กล่าวสามารถนำไปเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของประมาณต่าง ๆ ได้ดังรูป 2-13 จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมจะพบว่าในกรณีที่เบ้าหลอมเป็นลักษณะอุดมคติ วงจรทางไฟฟ้าจะมีตัวประกอบกำลังเป็นแบบล้าหลังที่มีค่าเป็น 0.707 แสดงว่าส่วนประกอบในส่วนจริง และส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลย์มีค่าเท่ากัน แต่ความเป็นจริงขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะมีความเหนี่ยวนำรั่วไหล ซึ่งทำให้ตัวประกอบกำลังของระบบเลวลง และตัวขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก็มีความต้านทานของตัวเองอยู่แล้ว ทำให้เฟสเซอร์ไดอะแกรมของระบบเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2-14 และสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าของระบบได้ ดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 วงจรสมมูลย์ของขดลวดให้ความร้อนกับชิ้นงาน

2.2.2 การประมาณการเหนี่ยวนำความร้อน

จาก $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}}$ (2.46)

โดยที่ δ คือค่าความลึกผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะ

μ คือค่าความซึมซาบของเบ้าหลอม

f คือค่าความถี่ที่ใช้งาน

สำหรับเบ้าหลอมที่เป็นแท่งโลหะทรงกระบอกรัศมี R ให้

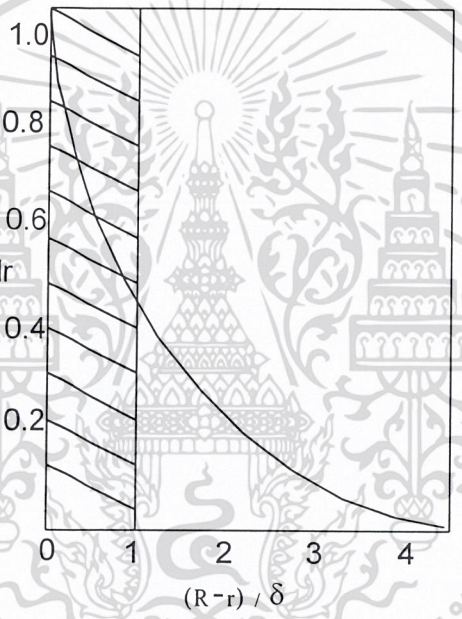
I_R คือค่ากระแสที่ผิวเบ้าหลอม

I_r คือค่ากระแสที่ระยะใด ๆ จากจุดศูนย์กลาง

ในกรณีที่สมมติว่า R ใหญ่กว่า δ มาก ๆ แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่าง I_R กับ I_r จะเป็นดังนี้

$$I_r = I_R \exp\left[\frac{-(r-R)}{\delta}\right] \tag{2.47}$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะใด ๆ กับระยะจากผิว

กระแสที่ไหลในเบ้าหลอมได้จากการอินทิเกรต กระแสที่รัศมีใด ๆ กับความลึกกระแสที่ได้จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟดังรูปที่ 2-16 แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ที่แรเงา กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าถ้าแม้ว่ากระแสที่ไหลในเบ้าหลอมมีความสัมพันธ์กับระยะทางเป็นเอกซ์โพแนนเชียล แต่เหมือนกับว่ามีกระแสคงที่ขนาด I_R ไหลอยู่ที่เบ้าหลอมในระดับความลึก δ ถ้าเบ้าหลอมมีความยาว l_w แล้วมีความต้านทานสมมูลย์ที่กระแสคงที่ขนาด I_R ไหลผ่านจะมีค่า

$$R_W = \frac{2\pi R\rho}{\delta l_W} \tag{2.48}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กมีจำนวนรอบเท่ากับ N_C และมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะมีค่าเป็น I_C ของกระแสไหลผ่านเบ้าหลอม $N_C I_C$ กำลังปรากฏที่เบ้าหลอมจะมีค่า

$$P_w = \frac{2\pi R\rho}{\delta l_w} N_C^2 I_C^2 \quad (2.49)$$

ในกรณีที่ R ไม่ได้มากกว่า δ มาก ๆ แล้ว จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสรุปได้ว่า

$$P_w = \mu\pi f H_{Rm}^2 l A_w p \quad (2.50)$$

ซึ่ง P เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ $\frac{(2R)}{\delta}$ ในการคำนวณกำลังความร้อนที่เกิดขึ้นที่เบ้าหลอมกำลังที่ได้จะขึ้นอยู่กับ ค่าความถี่ที่ใช้งาน ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และคุณสมบัติของเบ้าหลอมซึ่งหมายถึงขนาดและรูปร่าง รวมทั้งค่าความต้านทานจำเพาะ และค่าความซึมซาบของเบ้าหลอมเนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะและค่าความซึมซาบมีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่เบ้าหลอม จึงควรศึกษาว่าค่าเหล่านี้เปลี่ยนแปลงอย่างไร ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณภูมิ หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่โดยทั่วไปความถี่จะไม่มีผลต่อค่าทั้งสองเท่าใดนัก

2.2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความซึบซาบกับอุณหภูมิ และความเข้มสนามแม่เหล็ก

ความซึบซาบโลหะนั้นปกติจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับสารที่เป็นประเภทเฟอร์โรแมกเนติค ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก กับความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นเชิงเส้น แต่จะเป็นไปตามกราฟกระแสทางแม่เหล็ก จะพบว่าความซึบซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติคจะขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก และระดับความอิ่มตัวของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กด้วย ได้มีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบของสารกับความเข้มสนามเหล็ก ได้ผลเป็นที่ยอมรับตามสมการที่ (2.51) นอกจากค่าความซึมซาบของสารเฟอร์โรแมกเนติค ยังมีความสัมพันธ์กับอุณภูมิด้วย กล่าวคือปกติค่าความซึบซาบของสารประเภทนี้จะค่อยข้างมีค่าคงที่กับอุณหภูมิ แต่ถ้าอุณภูมิเพิ่มขึ้นจุดอิ่มตัวค่าความซึบซาบของสารจะลดลงเป็นค่าความซึบซาบของสูญญากาศทันที มีผลให้สารนั้นหมดสภาพความเป็นสารแม่เหล็ก สำหรับเหล็กผสมคาร์บอน 0.05% จะมีอุณภูมิอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ 760 °C

$$\mu = \left(1.43 * 10^6 \frac{B_S}{B_{om}} + 1\right)\mu_0 \quad (2.51)$$

B_s ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัว

H_{om} ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด

μ_0 ค่าความซึบซาบของสูญญากาศ

2.3 การคำนวณวงจรสมมูลย์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากขดลวดให้ความร้อนมีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับหม้อแปลง โดยขดลวดสร้างสนามแม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เหล็กจะเป็นเสมือนขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนเบ้าหลอมจะเปรียบเสมือนขดทุติยภูมิของหม้อแปลง ที่มีจำนวนรอบหนึ่งรอบ และชิ้นงานเป็นโหลดที่ต่ออยู่ซึ่งความต้านทานสมมูลย์ของโลหะที่เป็นชิ้นงานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยที่วงจรสมมูลย์ของขดลวดให้ความร้อน สามารถที่จะพิจารณาว่ามีความต้านทานต่ออนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำในทางปฏิบัติสามารถที่จะวัดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์นี้จะสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ได้ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรสมบูรณ์ของขดลวด เบ้าหลอมและชิ้นงาน

จากรูปที่ 2-17 ให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวของเบ้าหลอม คือ H_{om} และฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านระบบประกอบด้วย

ϕ_w เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านเบ้าหลอม

ϕ_g เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านอากาศ

ϕ_c เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านผิวของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในหัวข้อ 2.2 สามารถสรุปได้ว่า

$$P_w = \mu\pi f H_{Rm}^2 (l_w A_w) p \qquad (2.52)$$

$$\phi_w = \mu H_{Rm} A_w (q - jp) = \mu_0 \mu_r H_{Rm} A_w (q - jp) \qquad (2.53)$$

โดย H_{Rm} ค่ายอดของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวของเบ้าหลอม (Am^{-1})

ϕ_{Rm} ค่ายอดของเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องผ่านเบ้าหลอม (Wb)

I_w ความยาวชิ้นงานที่ถูกเหนี่ยวนำ (m)

A_w พื้นที่หน้าตัดของเบ้าหลอม(m^2)

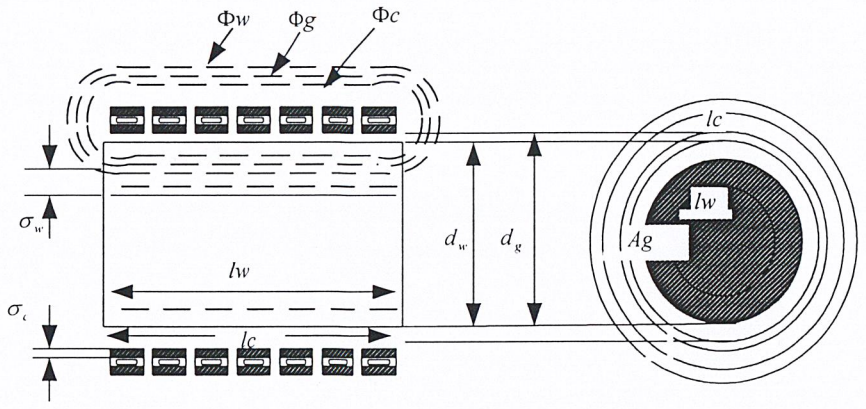
จากหัวข้อ 2.2 ถ้า $\frac{d}{\delta} \rangle 8$ แล้ว

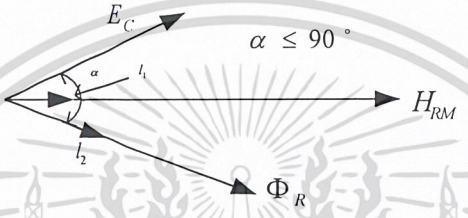
$$p = \frac{2}{\left(1.23 + \frac{d}{\delta}\right)} \qquad (2.54)$$

$$q = \frac{2}{d/\delta} \qquad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

49899





รูปที่ 2-17 ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านเบ้าหลอม และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

ϕ_g คือ ค่าฟลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศ ซึ่งปกติพลักซ์สนามแม่เหล็กในช่องอากาศจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ในขณะที่ไม่มีเบ้าหลอม ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก แต่จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีเบ้าหลอมอยู่ในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เพราะพื้นที่หน้าตัดที่พลักซ์คล้องผ่านลดลงนองจากนี้พลักสนามแม่เหล็กส่วนนี้ ยังผลให้ตัวประกอบกำลังของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเลวลง โดยปกติ

$$\phi_{gm} = \mu_0 H_{Rm} A_g \tag{2.56}$$

โดย A_g คือพื้นที่ที่ฟลักซ์สนามแม่เหล็กคล่องผ่านอากาศ

ϕ_g คือ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ตัวขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก็เกิดปรากฏการณ์ผิวเช่นเดียวกับที่เบ้าหลอม ตามปกติขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะสร้างจากทองแดงที่มีคุณสมบัติที่ไม่เป็นแม่เหล็ก จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสรุปได้ว่า

$$\phi_{cm} = k_r \mu_0 \delta_c \pi d_c H_{om} A_g \frac{(1-j)}{2} \tag{2.57}$$

δ_c คือ ความลึกที่เกิดในขดลวดและ k_r คือ Correction Factor ปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 1.5 โดยทั่วไปจะใช้ค่า 1.15

จาก $\phi_{cm} = \phi_{wm} + \phi_{gm} + \phi_{cm}$ (2.58)

$$\phi_{cm} = \mu_0 H_{om} \left[\left(A_g + \mu_r + qA_w + k_r d_r \delta_c \frac{\pi}{2} \right) - j \left(\mu_r pA_w + k_r d_r \delta_c \frac{\pi}{2} \right) \right] \tag{2.59}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

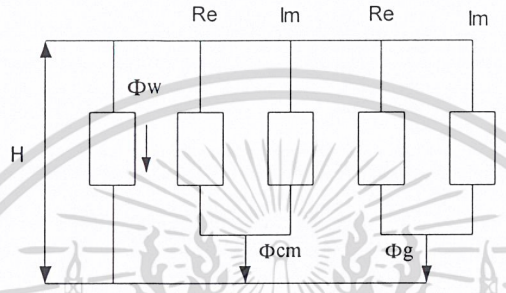
จาก $$H_{on} = \frac{\sqrt{2} I_C N_C}{I_C} \quad (2.60)$$

ให้ E_C เป็นค่า อาร์เอ็มเอส ของแรงดันตกคร่อมขดลวด

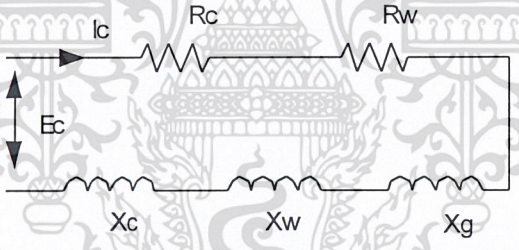
$$E_C = j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_C \phi_{cm} \quad (2.61)$$

ได้ว่า

$$E_C = \frac{2\pi f \mu_0}{I_0} N_C^2 I_C \left[\left(\mu_r p A_w + k_r d_c \delta_c \frac{\pi}{2} \right) + j \left(A_g + \mu_r + q A_w + k_r d_r \delta_c \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.62)$$



รูปที่ 2-18 วงจรสมมูลย์ทางแม่เหล็ก



รูปที่ 2-19 วงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า

จากสมการฟลักซ์สนามแม่เหล็ก สามารถที่จะเขียนเป็นเส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 2-18 ส่วนรูปที่ 2-19 เป็นวงจรสมบูรณ์ทางไฟฟ้า ส่วนที่เป็นความต้านทานมาจากเบ้าหลอมและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนที่เป็นความเหนี่ยวนำมาจากเบ้าหลอม ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก และส่วนที่เป็นอากาศซึ่งอยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ได้

$$Z = (R_w + R_C) + j(X_g + X_w + X_c) \quad (2.63)$$

ความต้านทานของเบ้าหลอม $$R_w = K(\mu_r p A_w) \quad (2.64)$$

ความต้านทานของขดลวด $$R_C = \frac{K}{2}(k_r \pi d_c \delta_w) \quad (2.65)$$

รีแอกแตนซ์จากช่องอากาศ $$X_g = K A_g \quad (2.66)$$

รีแอกแตนซ์จากชิ้นงาน $$X_w = K(\mu_r q A_w) \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีแอกแตนซ์จากขดลวด $X_C = \frac{K}{2}(k_r \pi d_c \delta_C)$ (2.68)

โดยที่ $K = 2\pi f \mu_0 \left(\frac{N_C^2}{I_C}\right)$ (2.69)

ค่าเหล่านี้สามารถที่จะนำมาคำนวณเป็นคุณสมบัติของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่สำคัญได้ดังนี้

คือประสิทธิภาพของขดลวดสนามแม่เหล็ก $\eta = \left[\frac{R_w}{(R_c + R_W)}\right]$ (2.70)

ตัวประกอบกำลังของขดลวดสนามแม่เหล็ก $\cos\theta = \frac{R_w + R_C}{|Z|}$ (2.71)

โดยที่ $Z^2 = (R_W+R_C)^2 + (X_g+X_w+X_c)^2$ (2.72)

กำลังงานที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก $P_c = \frac{P_C}{\eta}$ (2.73)

กำลังที่ปรากฏที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก coil VA $= \frac{P}{\cos\theta}$ (2.74)

coil VA $= I_c^2|Z|$ (2.75)

แรงดันต่อรอบที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก $\frac{E_c}{N_c} = \frac{\text{Coil VA}}{\text{Total Ampere Turn}}$ (2.76)

$= \frac{(VA)_C}{H_o l_c}$

Ampere Turn ของขดลวด

$I_C N_C = H_O l_c$

จากที่กล่าวมาข้างต้นถ้าพิจารณาโดยละเอียดจะได้ว่า

$R_c = \pi\sqrt{\pi} k_r d_c \left[\frac{N_c^2}{I_C}\right]\sqrt{\rho_C \mu_o f}$ (2.77)

โดยประมาณ $R_w = 4\sqrt{\pi} A_w \left[\frac{N_c^2}{d_c I_C}\right]\sqrt{\rho_w \mu_w f}$ (2.78)

$L_C = \frac{\sqrt{\pi}}{2} k_r d_c \left[\frac{N_c^2}{I_C}\right]\sqrt{\frac{\rho_c \mu_O}{f}}$ (2.79)

โดยประมาณ $L_w = \frac{2A_w}{\sqrt{\pi} d_w}\left[\frac{N_c^2}{I_C}\right]\sqrt{\frac{\rho_W \mu_W}{f}}$ (2.80)

$L_g = \mu_o \left[\frac{N_c^2}{I_C}\right] A_w$ (2.81)

จากค่าพารามอเตอร์ที่ได้ พบว่าค่าพารามอเตอร์ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและเบ้าหลอมจะขึ้นกับลักษณะ และขนาดของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก รวมทั้งจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กและถ้าพิจารณาให้ขดลวดและเบ้าหลอมคงที่ สำหรับความต้านทานเนื่องจากเบ้าหลอมและขดลวดสนามแม่เหล็ก จะแปรตามรากที่สองของค่าความต้านทานจำเพาะ ความซึมซาบทางแม่เหล็กและความถี่

ในกรณีของค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากเบ้าหลอมและขวดลวดสนามแม่เหล็ก จะแปรตามรากที่สองของความถี่ในกรณีค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากแกนอากาศ พบว่าจะขึ้นกับลักษณะของขดลวดสนามแม่เหล็ก พื้นที่หน้าตัดที่สนามแม่เหล็กคล้องผ่าน โดยจะไม่มีความสัมพันธ์กับความถี่

ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของขดลวดสนามแม่เหล็ก จะพบว่าเป็นการยากที่จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ เพราะค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวดสนามแม่เหล็ก และคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าและเบ้าหลอมด้วย และจากที่กล่าวมาจากการคำนวณจะคิดว่าเป็นกรณีอุดมคติ คือ ขดลวดมีความยาวมาก ๆ และฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านช่องอากาศจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ค่าที่ได้อาจผิดไปจากความจริง เช่น ในกรณีฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่คล้องผ่านอากาศ จึงจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนสูตรที่ใช้ในการคำนวณให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยจะคำนวณค่าความเหนี่ยวนำที่คล้องผ่านอากาศ รูปที่ 2-20 แสดงขดลวดสนามแม่เหล็กที่มีจำนวนรอบเป็น N_C รอบซึ่งสูตรที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นสูตรที่มีการปรับปรุงให้ถูกต้องยิ่งขึ้น

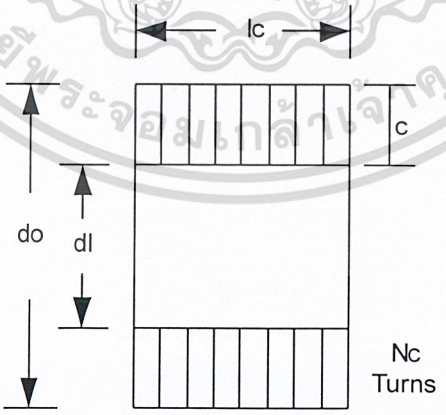
$$L_g = \lambda d N_C^2 (\mu H) \tag{2.82}$$

$$\lambda = \frac{0.1\pi^2}{\left\{0.45 + \gamma + \beta + \frac{2\gamma\beta(\gamma + 1_C)}{3(\gamma + 2)}\right\}} \tag{2.83}$$

$$\gamma = \frac{1_C}{d} \tag{2.84}$$

$$\beta = \frac{c}{d} \tag{2.85}$$

$$d = \frac{(d_0 + d_1)}{2} \tag{2.86}$$



รูปที่ 2-20 ขดลวดสนามแม่เหล็กที่มีจำนวน N_C รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ จะมีค่าความเหนี่ยวนำของช่องอากาศทั้งหมด ในกรณีที่มีเบ้าหลอมอาจต้องคูณด้วยตัวประกอบ เพื่อให้เป็นเพียงพื้นที่ส่วนที่เป็นฟลักซ์สนามแม่เหล็กคล้องผ่านเท่านั้น

2.4 หลักการรีโซแนนซ์

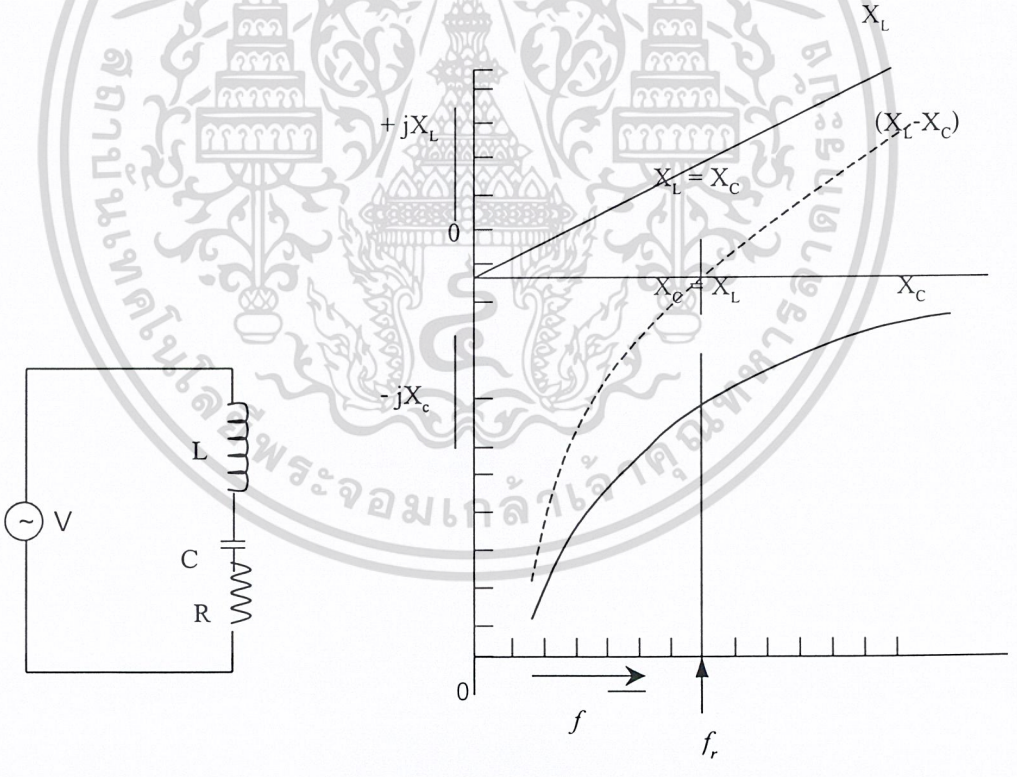
เมื่อเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรอนุกรม RLC จะพบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่ง ค่า X_L จะเท่ากับ X_C เป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC มีค่าต่ำที่สุดนั่นคือ $Z = R$ ปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า "ปรากฏการณ์รีโซแนนซ์" และความถี่ที่เกิดขึ้น ณ จุดรีโซแนนซ์นี้เราจะเรียกว่า "ความถี่รีโซแนนซ์" และเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดรีโซแนนซ์นี้มีค่าต่ำสุดดังนั้นค่ากระแสที่ไหลผ่านในวงจรจึงมีค่ามากที่สุด

ในทำนองเดียวกันถ้าเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจร RLC แบบขนานจนถึงค่าหนึ่งก็จะพบ ว่าสามารถเกิดปรากฏการณ์รีโซแนนซ์ได้เช่นกันนั่นคือค่า X_L จะเท่ากับค่า X_C อย่างไรก็ตามค่าอิมพีแดนซ์ ที่เกิดขึ้น ณ จุดรีโซแนนซ์ที่ต่อแบบขนานนี้จะมีค่ามากที่สุด และจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่าน้อยที่สุดซึ่งจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแบบอนุกรม

2.4.1 วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม RLC

จากรูป 2-21 ก) จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RLC ที่ต่อแบบอนุกรมจะมีค่าดังสมการ

$$Z = R + j(X_L - X_C) \tag{2.87}$$



ก) วงจรอนุกรม RLC *ข) X_L . X_C เมื่อพล็อตตามความถี่*

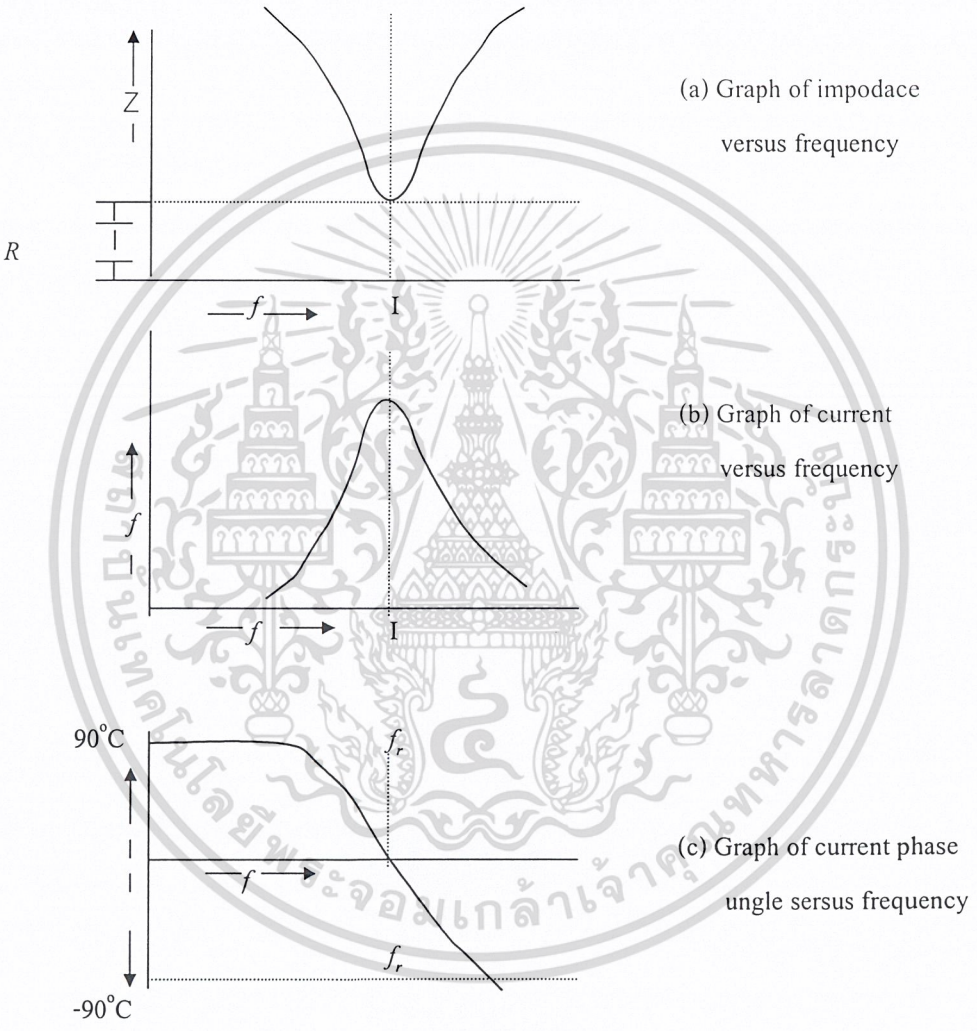
รูปที่ 2-21 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับวงจรอนุกรม RLC รีโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่า $X_L = 2\pi fL$ และ $X_C = 1/2\pi fC$ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์จึงขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่ง จ่ายไฟ จากรูป 2-21 ข) จะเห็นว่าเมื่อความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น

ค่า X_L ก็จะมีค่า เพิ่มขึ้นส่วน X_C จะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นด้วยโดยที่ผลรวมของค่ารีแอคแตนซ์จะมีค่าเท่ากับ $(X_L - X_C)$ ดังนั้นถ้าหากความถี่ของแหล่งจ่ายไฟมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์แล้วก็จะมีผลทำให้ค่านั่นคือ ค่า รีแอคแตนซ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์รวมจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของวงจร $Z = R$

จากรูป 2-22 จะได้อิมพีแดนซ์รวมและกระแสที่ไหลในวงจรที่ความถี่ใด ๆ ดังสมการ



รูปที่ 2-18 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์ กระแส และมุมเฟส กับความถี่ สำหรับรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad (2.88)$$

$$I = V/Z \qquad (2.89)$$

และที่ความถี่รีโซแนนซ์จะได้ดังสมการ

$$Z = R \qquad (2.90)$$

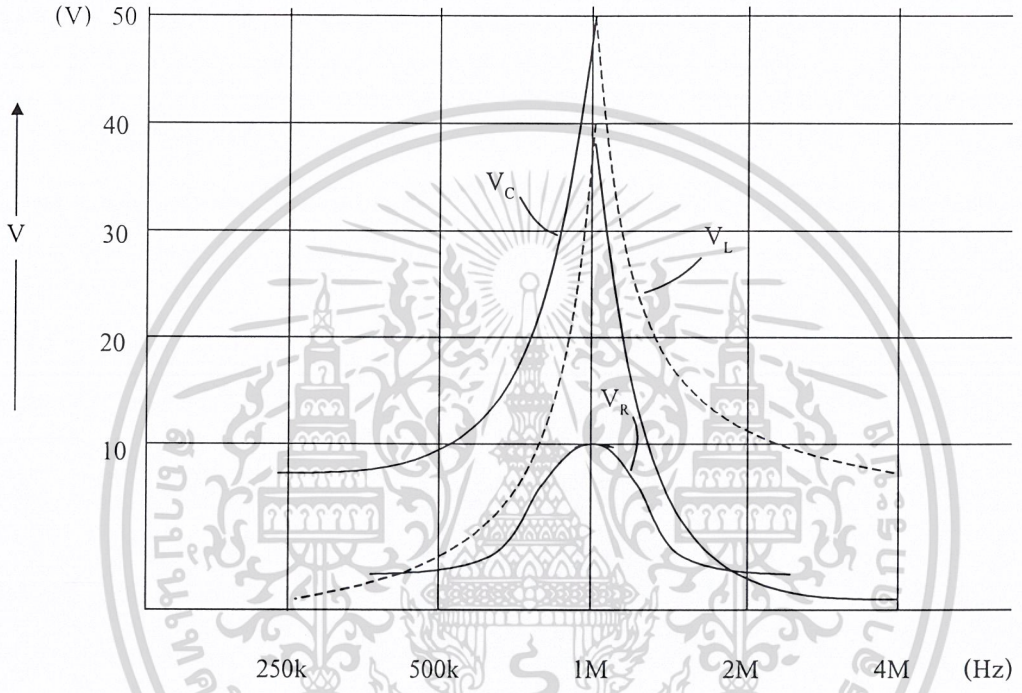
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = V/Z \qquad (2.91)$$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน , ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ความถี่ใด ๆ ดังสมการ

$$V_R = IR, \qquad V_L = IX_L, \qquad V_C = IX_C \qquad (2.92)$$

เมื่อนำ V_R , V_L และ V_C ที่ความถี่ใด ๆ มาพล็อต จะได้ดังรูป 2-23 ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่รีโซแนนซ์ นั้น ค่า V_L และ V_C จะมีค่ามากกว่าแรงดันของแหล่งจ่ายหลายเท่า แต่ว่า V_R จะมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย

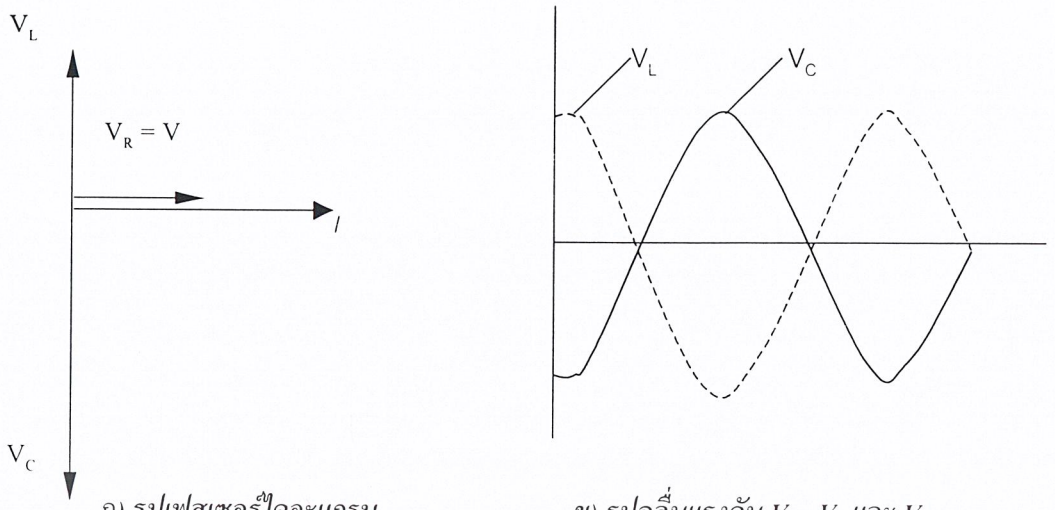


รูปที่ 2-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_R , V_C , และ V_L กับความถี่

2.4.1.1 พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L กับ C

เมื่อเรานำรูปคลื่นแรงดัน V_R , V_L และ V_C ที่ความถี่รีโซแนนซ์มาพล็อตจะได้ดังรูป 2-24 จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดัน V_L และ V_C จะกลับเฟสกันอยู่ 180 องศา ส่วนรูปคลื่น V_R จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ V_L และ V_C มีค่าเท่ากับศูนย์ จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ามีการส่งผ่านพลังงานกันระหว่าง L กับ C อย่างไรก็ตามก็จะไม่มีการสะสมพลังงานเกิดขึ้นที่จุดรีโซแนนซ์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) *รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรรีโซแนนซ์*

ข) *รูปคลื่นแรงดัน V_R , V_L และ V_C ที่จุดรีโซแนนซ์*

รูปที่ 2-24 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร RLC รีโซแนนซ์

2.4.1.2 Q แฟคเตอร์ของวงจรอนุกรม RLC

พิจารณาสมการ I , V_L และ V_C ที่จุดรีโซแนนซ์จะได้ดังสมการ

$$I = \frac{V}{R} \tag{2.93}$$

$$V_L = IX_L = \frac{V}{R}X_L \tag{2.94}$$

$$V_C = IX_C = \frac{V}{R}X_C \tag{2.95}$$

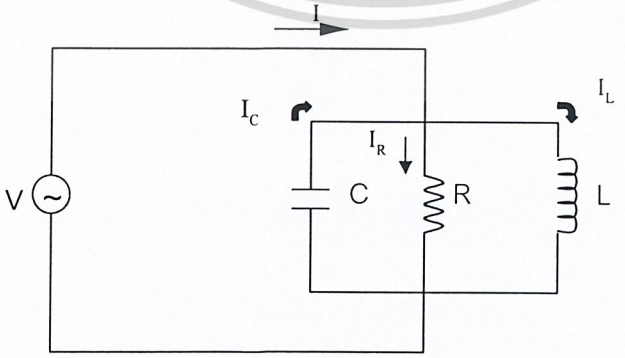
โดยอัตราส่วน V_L/V และ V_C/V จะเรียกว่า "QUALITY FACTOR" ซึ่งจะมีค่าดังสมการ

$$Q = X_L/R = X_C/R = 1/\omega CR \tag{2.96}$$

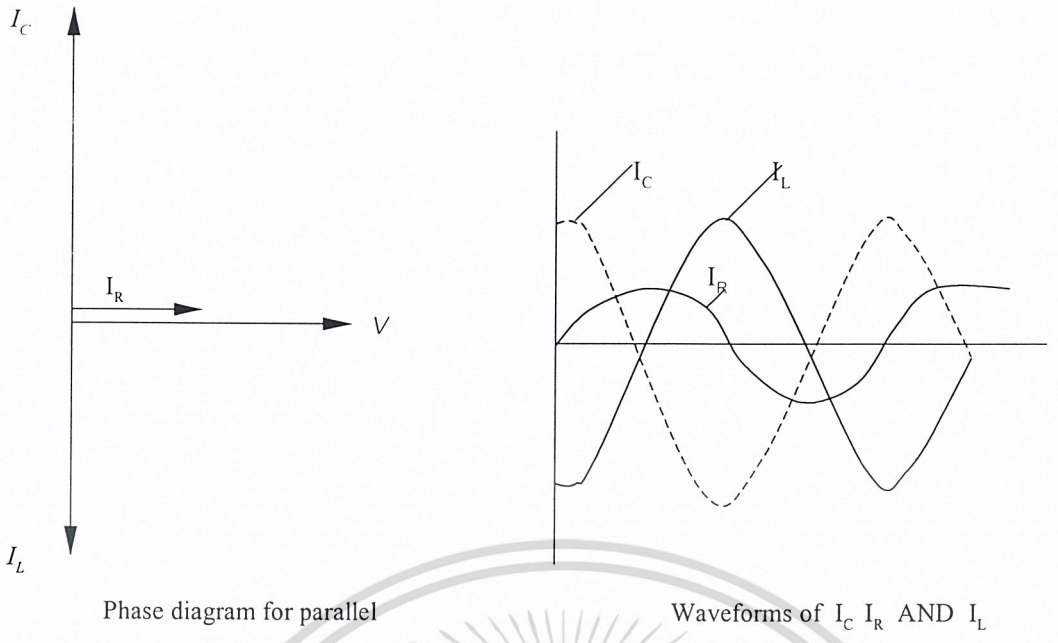
2.4.2 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน

จากรูป 2-25 จะเห็นว่าค่าอิตมิแตนซ์ของวงจรจะมีค่าดังสมการ

$$Y = 1/R + j(1/X_C - 1/X_L) \tag{2.97}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Phase diagram for parallel Waveforms of I_C I_R AND I_L

รูปที่ 2-25 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นกระแสที่จุดรีโซแนนซ์ของวงจร RLC ขนาน

ถ้าหากปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟไปจนมีค่าเท่ากับความถี่รีโซแนนซ์แล้วจะมีผลทำให้ ค่าX_L มีค่าเท่ากับ X_C เพราะฉะนั้นแอดมิตแตนซ์รวมจะมีค่าเท่าส่วนกลับของค่าความต้านทานของวงจร 1/R และกระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าต่ำสุด โดยจะมีค่าเท่ากับ V/R นอกจากนี้ก็จะมีการส่งผ่านพลังงานกันระหว่าง L กับ C เช่นเดียวกับวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

ในทางปฏิบัติวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานจะเป็นลักษณะดังรูป 2-26 โดยที่ค่าอิตมิตแตนซ์รวมของวงจรจะมีค่าดังสมการ

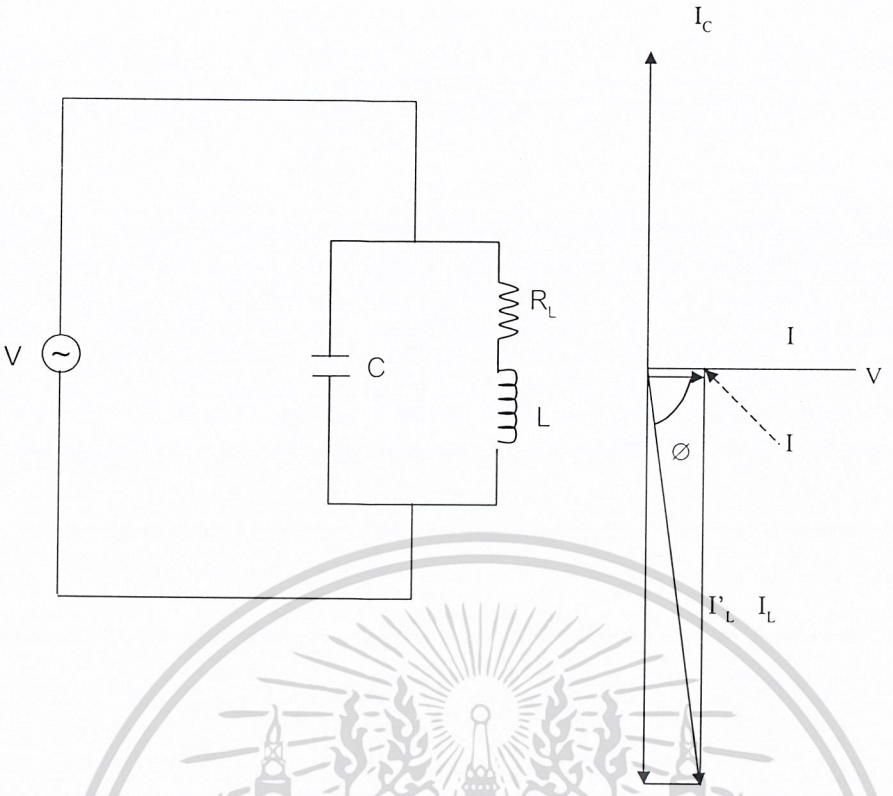
$$Y = 1/(R + jX_L) + 1/jX_C \quad (2.98)$$

โดยที่จุดรีโซแนนซ์นั้นค่า X_C จะมีค่าดังสมการ

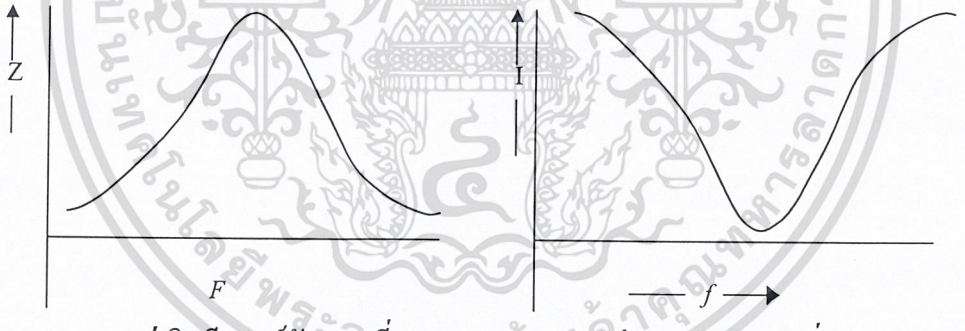
$$X_C = (R^2 + X_L^2) / X_L \quad (2.99)$$

$$Z = L/RC \quad (2.100)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-22 แสดงวงจร RLC แบบขนานในทางปฏิบัติ



ก) *ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่* ข) *ค่ากระแสกับความถี่*

รูปที่ 2.27 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อค่าความถี่สำหรับรีโซแนนซ์แบบขนาน

2.4.2.1 Q แฟคเตอร์ของวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานในทางปฏิบัติ

ค่า Q แฟคเตอร์ของวงจรนี้มีค่าดังสมการ

$$Q = I_L/I = I_C/I = X_C/R = (R^2 + X_L^2)/RX_L \qquad (2.101)$$

โดยที่ความถี่รีโซแนนซ์ (f_r) จะมีค่าดังสมการ

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{1-\frac{CR_L^2}{L}} \qquad (2.102)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2-27 จะพบว่าวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานในทางปฏิบัตินั้น จะมีค่าอิมพีแดนซ์สุงสุดและกระแสจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่รีโซแนนซ์จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าการทำงานที่จุดรีโซแนนซ์จะให้ค่ากำลังที่สูงที่สุด (P_{max}) เนื่องจากว่าจะให้ค่ากระแสที่ไลหในขดลวดเหนี่ยวนำได้สูงสุดซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในเบ้าหลอมเพื่อทำให้เกิดความร้อนสำหรับใช้ในการหลอมให้ได้มากที่สุดจนสามารถหลอมชิ้นงานหรือใช้เวลาในการหลอมให้ได้น้อยที่สุดซึ่งสามารถทำได้โดยการทำให้ความถี่ของวงจรอินเวอร์เตอร์และความถี่ของวงจรตรงส่วนโหลดมีค่าตรงกัน โดยที่ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำในวงจรจะมาจากผลของขดลวด สร้างสนามแม่เหล็ก , เบ้าหลอมและชิ้นงาน ส่วนตัวเก็บประจุที่ใส่เพิ่มเข้าไปก็เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของวงจรให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

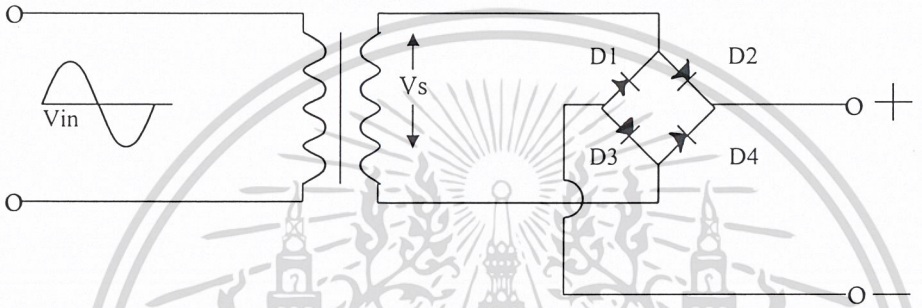
บทที่ 3
โครงสร้างของวงจร

3.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier) และวงจรกรองแรงดัน (Filter)

3.1.1 **วงจรเรียงกระแส หรือ วงจรเรคติไฟเออร์ (Rectifier)** คือ วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง หรือยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศทางเดียวเท่านั้น อุปกรณ์ทั่วไปที่ใช้ในวงจรได้แก่ ไดโอด

วงจรบริดจ์เรคติไฟเออร์ (Bridge Rectifier)

วงจรเรียงกระแสในโครงงานเป็นวงจรบริดจ์เรคติไฟเออร์หรือบริดจ์ไดโอด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3-1 วงจรบริดจ์เรคติไฟเออร์ (Bridge Rectifier)

การทำงานของบริดจ์เรคติไฟเออร์จะมีทิศทางการกำหนดตามลักษณะของลูกศร นั่นคือ เมื่อV_s เพิ่มขึ้นทางบวก ไดโอด D2 และ D3 จะนำกระแส และเมื่อแรงดัน V_s ลงไปในทางลบ ไดโอด D1 และ D4 จะนำกระแสเป็นผลทำให้กระแสไหลผ่านโหลด R_L ในทิศทางเดียวเท่านั้น

1. ค่ากระแสกระชาก I_{fsm} (Maximum Surge Current)

กระแสกระชากสูงสุดที่ผ่านบริดจ์ไดโอดขณะเปิดเครื่อง เมื่อตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ยังไม่มีประจุสะสมอยู่ ดังนั้นการเลือกบริดจ์ไดโอดจะต้องให้มีค่าอัตราทนกระแสกระชากประมาณ 20-30 เท่าของพิกัดกระแสเฉลี่ยขณะถูกไบแอสตรง

2. ค่ากระแสเฉลี่ยขณะถูกไบแอสตรง I_{fm} (Average Forward Current)

ค่ากระแสเฉลี่ยที่บริดจ์ไดโอดขณะทำงาน ควรมีการเผื่อค่าไว้ประมาณ 1.5-2 เท่าจากที่คำนวณได้ในวงจร เพื่อความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งาน

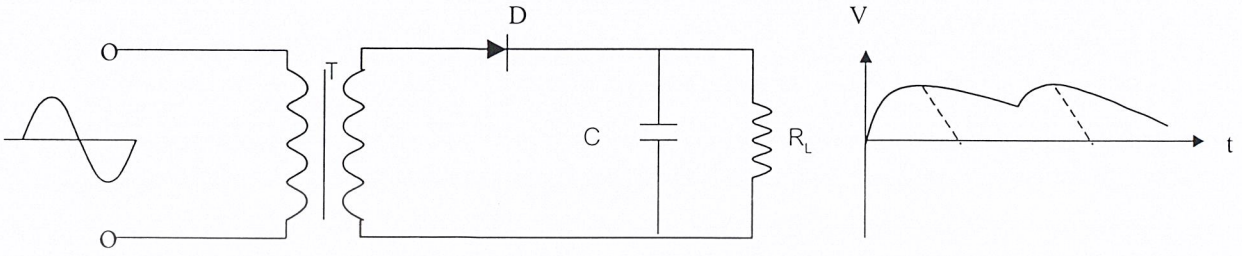
3. อัตราแรงดับไบแอสกลับสูงสุด V_{Mmn}

อัตราทนแรงดันไบแอสกลับสูงสุดของไดโอดจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าแรงดันยอดสูงสุด (V_{pack}) ของแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุท และต้องมีการเผื่อค่าให้มากกว่าแรงดันยอดสูงสุดของแรงดันไฟสลับด้วยเพื่อป้องกันทรานเซียนท์ในไฟสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วงจรกรองแรงดัน (Filter)

แรงดันที่ผ่านวงจรเรคติไฟเออร์มาแล้วนั้น ถ้าพิจารณากันอย่างละเอียดแล้วจะเห็นว่าลักษณะแรงดันที่ได้มานั้นไม่ราบเรียบ จำเป็นจะต้องมีวงจรช่วยทำให้ลักษณะกระแสและแรงดันนั้นราบเรียบขึ้น นั่นก็คือใช้วงจรฟิลเตอร์



รูปที่ 3-2 การใส่ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์

แรงดันไฟฟ้าที่ได้ที่โหลดนั้น ต้องการให้เป็นไฟตรงที่เรียบขึ้น จึงใช้วิธีการใส่ตัวเก็บประจุ ทั้งนี้เพราะตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่สำคัญคือ การสะสมประจุไว้ในตัวมัน เมื่อใดที่กระแสป้อนน้อยมันก็จะเอาประจุที่เก็บสะสมไว้ในตัวมันจ่ายแทนซึ่งก็คือการคายประจุ เมื่อใดที่จะต้องจ่ายโหลดน้อย มันก็จะแบ่งมาสะสมไว้ซึ่งก็คือการชาร์จประจุ ซึ่งจะช่วยให้ลดผลของแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) ซึ่งสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุให้เหมาะสมได้ดังนี้

$$C_{filter} = \frac{I_O t_{on(max)}}{V_r} \qquad (3.1)$$

โดย I_O คือ ค่ากระแสประสิทธิผลของวงจรเรียงกระแส (แอมแปร์)

$t_{on(max)}$ คือ ช่วงเวลาที่ C คายประจุ (วินาที)

V_r คือ ค่ายอดถึงยอดของแรงดันกระเพื่อมที่เอาท์พุทของวงจรเรียงกระแส(Vp-p)

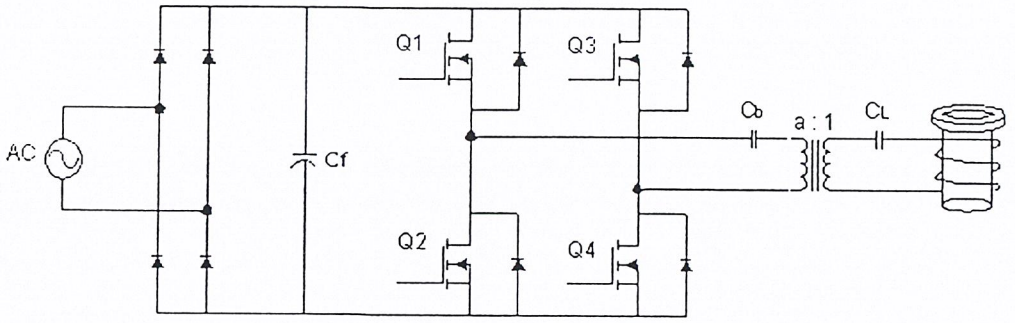
จากสมการ (3.1) พบว่า เมื่อ C มีค่ามากขึ้นทำให้แรงดันกระเพื่อมมีค่าน้อยลง ดังนั้น ชนิดและขนาดของตัวเก็บประจุจึงมีผลกับแรงดันกระเพื่อม (Ripple Voltage) ของแรงดันไฟตรงได้โดยปกติการออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะยอมให้วงจรเรียงกระแสมีค่าแรงดันกระเพื่อมไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันเอาท์พุท

3.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

3.2.1 ลักษณะการทำงานของวงจร

ในโครงงานใช้อินเตอร์แบบฟูลบริดจ์ในการแปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่สูงโดยอาศัยการสวิตชิ่งของเพาเวอร์มอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 3-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์

เราเลือกใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งเมื่อเราเปรียบเทียบกับแบบฮาล์ฟบริดจ์แล้วจะมีข้อดีกว่าตรงที่แรงดันเอาท์พุทที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนั้น จะมีระดับแรงดันเท่ากับแรงดันอินพุทไฟตรง แต่แบบฮาล์ฟบริดจ์จะมีเพียงครึ่งหนึ่งของระดับแรงดันอินพุทเท่านั้น ดังนั้นถ้าระดับแรงดันอินพุทของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบเท่ากัน แบบฟูลบริดจ์จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าฮาล์ฟบริดจ์ถึง 2 เท่า โดยที่อินเวอร์เตอร์จะคอยจ่ายไฟกระแสสลับผ่านหม้อแปลงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในเบ้าหลอมจนสามารถหลอมงานชิ้นนั้นได้ ซึ่งโครงการนี้ได้ใช้อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนความถี่ให้เป็นความถี่สูง ๆค่าหนึ่ง เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไหลวนในเบ้าหลอมนั้นแปรตามความถี่ ตามสมการ (2.50) นั่นเอง จากรูปที่ 3-3 อินเวอร์เตอร์มีหลักการทำงานดังนี้คือ เพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 4 ตัว จะทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแสสลับกันเป็นคู่ ๆ ในแต่ละครึ่งคาบเวลา Q1 และ Q4 จะนำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลา และเมื่อหยุดนำกระแสจะได้ Q2 และ Q3 นำกระแสพร้อมกันในครึ่งคาบเวลาที่เหลือ ซึ่งจะทำงานสลับกันอย่างนี้เรื่อยไป โดยได้แรงดันตกคร่อมขดไพรมารี่มีค่าเท่ากับ $V_{in} - 2V_{CE(sat)}$ และแรงดันตกคร่อม Q1 และ Q4 ขณะหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_{CEQ2(sat)}$ และ $V_{in} - V_{CEQ3(sat)}$ ตามลำดับ ส่วนแรงดันที่ตกคร่อม Q2 และ Q3 ขณะหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_{CEQ1(sat)}$ และ $V_{in} - V_{CEQ4(sat)}$ ตามลำดับเช่นเดียวกัน ส่วนไดโอดทำหน้าที่เป็นคอมมิวเตติ้งไดโอด (Comutating Diode) ให้กับวงจรโดย

1. ป้องกันการเกิดแรงดันสไปค์ขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากความเหนี่ยวนำแฝงในหม้อแปลง โดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำแฝงนี้จะถูกถ่ายทอดออกไปยังภาคอินพุทด้วยคอมมิวเตติ้งไดโอด จึงไม่ทำให้เกิดแรงดันสไปค์เมื่อพาวเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส

2. ในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟต Q1 และ Q4 เริ่มหยุดนำกระแส ขดลวดไพรมารี่ N_p จะมีการกลับขั้วแรงดันขึ้น ถ้าไม่มีคอมมิวเตติ้งไดโอด Q2 และ Q3 จะได้รับแรงดันตกคร่อมที่เดรนเป็นลบ ใน

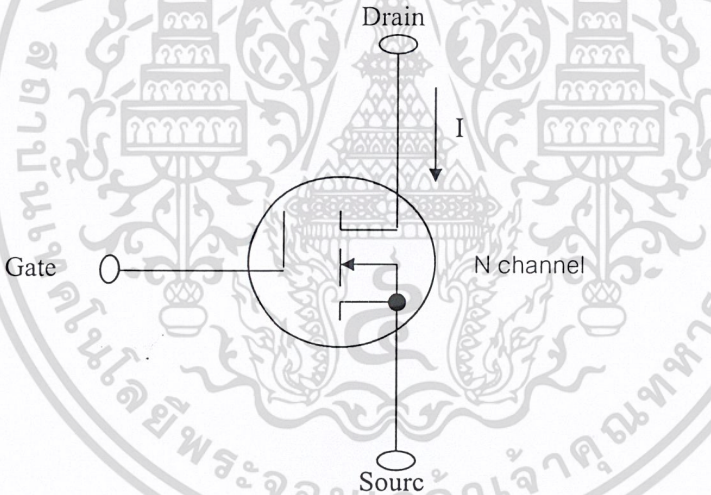
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ Q1 และ Q4 ก็จะมีแรงดันตกคร่อมมากกว่าค่า V_{in} ในกรณีนี้ ไดโอดจะอยู่ในลักษณะไบแอสตรงจากแรงดันของขดไพรมารี่และลดค่าแรงดันนี้ลงไปเพื่อป้องกันเพาเวอร์มอสเฟต

3.2.2 มอสเฟตกำลัง (Power Mosfet)

มอสเฟตกำลังหรือเพาเวอร์มอสเฟต เป็นอุปกรณ์เพาเวอร์เซมิคอนดัคเตอร์ที่มีขนาดกำลังต่ำ แต่มีความสามารถในการสวิทชิ่งที่ความถี่สูง ๆ ได้ดี มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ชนิดที่ควบคุมการทำงานด้วยแรงดัน (Voltage Controlled) โดยจะต้องมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมที่ขาเกท(gate) และซอร์ส (source) เพื่อที่จะสร้างสัญญาณกระแสสู่ขาเดรน (drain) เนื่องจากขาเกทถูกแยกออกจากขาซอร์ส โดยชั้นซิลิกอนออกไซด์ (Silicon Oxide) จึงเปรียบเสมือนมีค่าตัวเก็บประจุ C ที่ทางด้านอินพุท เราจึงกล่าวได้ว่ามอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่มี High Impedance

การหยุดทำงานของมอสเฟตไม่จำเป็นต้องทำการรีเวอร์สกระแส เพราะมอสเฟตเป็นอุปกรณ์ประเภท Majority carrier semiconductor มันจะเริ่มหยุดนำกระแสทันทีที่ไม่มีศักดาไฟฟ้าที่ขาเกทและซอร์ส ดังนั้น การหยุดนำกระแสของมอสเฟตจึงขึ้นอยู่กับค่าศักดาไฟฟ้าที่เกทและซอร์ส

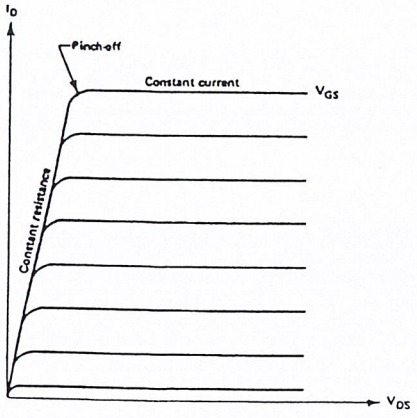


รูปที่ 3-4 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิด N Chanel

รูปที่ 3-5 แสดงลักษณะการทำงานของเพาเวอร์มอสเฟต ลักษณะของกราฟแสดงขอบเขตการทำงานที่ชัดเจน 2 ลักษณะ คือ ภาวะความต้านทานคงที่ (Constant Resistant) และ ภาวะกระแสคงที่ (Constant Current)

ที่ภาวะกระแสคงที่ เมื่อศักดาไฟฟ้าที่เดรนและซอร์สเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นตามเป็นสัดส่วน จนกระทั่งศักดาไฟฟ้าที่เดรนซอร์สเพิ่มขึ้นถึงจุดที่เรียกว่า Pinch-off กระแสเดรนจะเริ่มคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-5 แสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต

ที่ภาวะความต้านทานคงที่ ก็คือภาวะที่ศักดาไฟฟ้าตกคร่อมที่ขาเดรนและซอร์สหรือโวล์ทเตจดรอปที่ขาเดรนและซอร์ส จะเป็นสัดส่วนกับกระแสเดรน ซึ่งเปรียบเสมือนมีตัวต้านทานคงที่ตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดกำลังสูญเสีย (Power loss)

ที่ภาวะความต้านทานคงที่ ก็คือภาวะที่ศักดาไฟฟ้าตกคร่อมที่ขาเดรนและซอร์สหรือโวล์ทเตจดรอปที่ขาเดรนและซอร์ส จะเป็นสัดส่วนกับกระแสเดรน ซึ่งเปรียบเสมือนมีตัวต้านทานคงที่ตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดกำลังสูญเสีย (Power loss)

3.2.3 การกำหนดค่าเวลาเผื่อ t_D สำหรับฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

เมื่อพิจารณาจากวงจรพบว่า Q1 กับ Q2 และ Q3 กับ Q4 จะนำกระแสพร้อมกันไม่ได้เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรของแรงดันอินพุทและมอสเฟตอาจพังเสียหายได้ เพราะถึงแม้ว่าจะกำหนดให้วงจรควบคุมสั่งงานเพาเวอร์มอสเฟตที่ครึ่งหนึ่ง ของคาบเวลาเท่ากันแล้วก็ตาม เพาเวอร์มอสเฟตก็ยังไม่ปลอดภัยเพียงพอ เพราะการตอบสนองของเพาเวอร์มอสเฟตอาจเป็นไฟได้ช้าเนื่องจากการเกิดประจุสะสมขึ้นในมอสเฟตขณะนำกระแส เมื่อหยุดจ่ายกระแสไบแอสให้กับเพาเวอร์มอสเฟตที่เวลา t = T/2 ประจุสะสมจะทำให้เพาเวอร์มอสเฟตนำกระแสต่อไปได้อีกชั่วระยะเวลาหนึ่งก่อนที่กระแสจะลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะเดียวกันกับเพาเวอร์มอสเฟตตัวที่เหลือเริ่มได้รับกระแสไบแอสที่เวลา t = T/2 เช่นเดียวกัน ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตทั้ง 4 ตัวนำกระแสพร้อมกันและเกิดการพังเสียหายอย่างรวดเร็ว

ดังนั้น การกำหนดค่าเวลาเผื่อ t_D จึงมีความจำเป็น โดยปกติมักกำหนดค่าเวลาเผื่อ t_D ไว้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของครึ่งคาบเวลา ช่วงเวลานำกระแสสูงสุดของเพาเวอร์มอสเฟตจะมีค่าได้ไม่เกิน

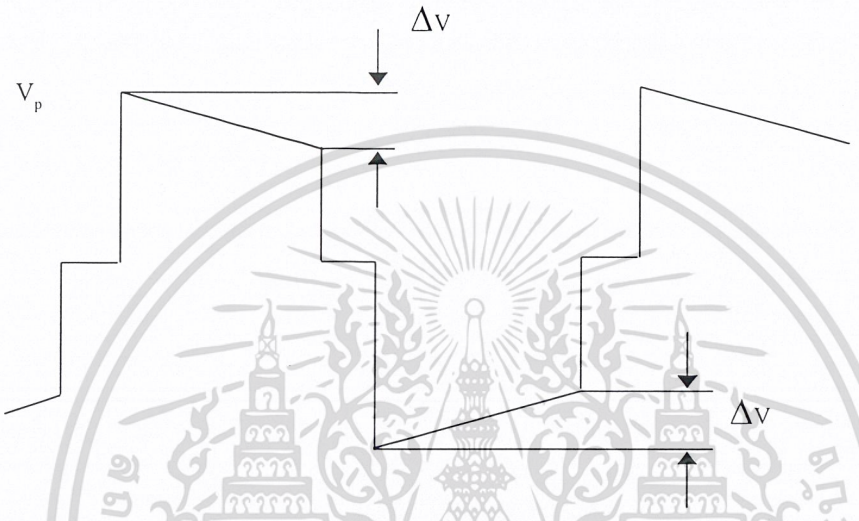
$$t_{on(max)} = 0.4T \qquad (3.2)$$

3.2.3 ตัวเก็บประจุบล็อคกิ้ง C_b เพื่อป้องกันการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็ก

ตัวเก็บประจุบล็อคกิ้ง (Blocking Capacitor) C_b ที่ต่อเพิ่มเข้ามาในวงจรนั้น มีหน้าที่หลักคือ ป้องกันการเกิดไม่สมมาตรฟลักซ์ขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ขณะวงจรทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการต่อตัวเก็บประจุบล็อคกิ้ง C_b คั่นเข้ามาในวงจร จะทำให้ C_b มีการเก็บประจุและคายประจุสลับกันไปตามทิศทางของกระแสที่ไหลในเขตไพรมารี่ N_p ถ้าผลของการเกิดประจุสะสมทำให้ Q1 และ Q4 และ Q2 กับ Q3 มีช่วงเวลานำกระแสไม่เท่ากัน ก็จะทำให้การเก็บประจุและคายประจุของ C_b ใช้เวลาไม่เท่ากัน นั่นคือ หากเพาเวอร์มอสเฟตตัวมีค่าช่วงเวลานำกระแสมากกว่า ในกรณีนี้ค่ากระแสสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นตามช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามก็จะทำให้มีประจุเหลือค้างใน C_b ดังนั้นเมื่อเพาเวอร์มอสเฟตอีกตัวเริ่มนำกระแส แรงดันตกค้างใน C_b จะช่วยเพิ่มค่าแรงดันตกคร่อมขดไพรมารี่ให้มีค่ามากขึ้น ค่าของกระแสสูงสุดก็จะมีค่าเท่ากันได้และไม่เกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์ขึ้น



รูปที่ 3-6 แสดงลักษณะของการเกิดความลาด (roop) ขึ้นบนแรงดันที่ตกคร่อมไพรมารี่ เมื่อต่อตัวเก็บประจุบล็อคกิ้ง C_b คั่นเข้ามาในวงจร

อย่างไรก็ตาม การต่อตัวเก็บประจุบล็อคกิ้ง C_b คั่นเข้ามาในวงจรจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารี่มีค่าลดลงตามเวลาหรือเกิดความลาด (droop) ขึ้นบนแรงดัน เนื่องจากแรงดันส่วนหนึ่งไปตกคร่อม C_b นั่นเอง ดูรูปที่ 3-6 และจะมีผลต่อแรงดันทางด้านเซคชั่นนารี่ทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่เอาต์พุทซึ่งไม่เป็นที่ต้องการเช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดค่า C_b ให้มีค่าเหมาะสม เพื่อให้เกิดความลาดบนแรงดันที่ขดไพรมารี่ต่ำที่สุด การกำหนดค่าของ C_b อาจทำได้ดังนี้คือ

$$C_b = \frac{I_{p(pk)}(0.4T)}{\Delta V} \qquad (3.3)$$

เมื่อ $I_{p(PK)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ขดไพรมารี่

ΔV คือ ค่าของความลาดแรงดันสูงสุดที่ยอมได้ (ไม่เกิน20%ของV_{in}/2)

T คือ ค่าคาบเวลาการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 หม้อแปลงความถี่สูง

3.3.1 ลักษณะแกนที่ใช้

โดยปกติในหม้อแปลงสวิตซ์ซึ่งนิยมใช้ "แกนเฟอร์ไรต์" เพราะมีจุดอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูงและเกิดการสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง ซึ่งในการเลือกจะต้องมีการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงขณะทำงาน ซึ่งขึ้นกับจำนวนรอบของขดลวดไพรมารี่และขนาดของแกน ดังแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Delta B = \frac{V * t}{N_p * A_e} * 10^8 \qquad (3.4)$$

โดย ΔB คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกน(เกาส์)

V คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารี่ (V)

N_p คือ ค่าจำนวนรอบของขดไพรมารี่ (รอบ)

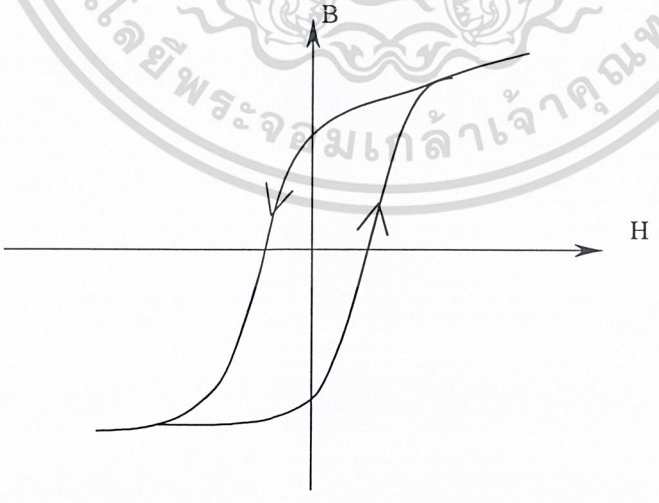
A_e คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกน (ตารางเซ็นติเมตร)

t คือ ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น (วินาที)

จากสมการ (3.4) พบว่าถ้าจำนวนรอบของขดลวดไพรมารี่มีค่าน้อยลง จะทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์มีค่ามากขึ้น ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดลวดของขดไพรมารี่ จะทำให้ใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้ และสามารถทนกระแสได้สูงทำให้หม้อแปลงให้กำลังได้สูงขึ้น

เมื่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะทำให้แรงดันตกคร่อมขดไพรมารีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุทจะไปตกคร่อมที่เพาเวอร์มอสเฟตขณะที่กำลังนำกระแสสูง ๆ แทน ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตพังเสียหายได้ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในแกนสูงอีกด้วย ดังนั้น การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สุงสุดในแกนเฟอร์ไรต์จะต้องคำนึงถึง

3.3.1.1 การอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์



รูปที่ 3-7 แสดงลักษณะเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสดังรูปที่ 3-7 พบว่า ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก H เพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก H ก็ตาม จากจุดดังกล่าวแสดงว่าแกนเฟอร์ไรต์เริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation) ดังนั้นในการใช้งานจะต้องระวังไม่ให้แกนเฟอร์ไรต์อิ่มตัว โดย

1. การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงานมีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์

2. การกำหนดช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็ก (Air gap) ซึ่งช่วยป้องกันการอิ่มตัวของแกนและช่วยให้การสะสมพลังงานของขดลวดมีค่ามากขึ้น ทำให้กำลังของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น แต่อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวน EMI ออกมาและอาจรบกวนอุปกรณ์ภายนอกได้เช่นกัน

3. การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ให้เหมาะสม เพราะถ้าแกนมีขนาดใหญ่เกินไปจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แต่ถ้าแกนมีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อน

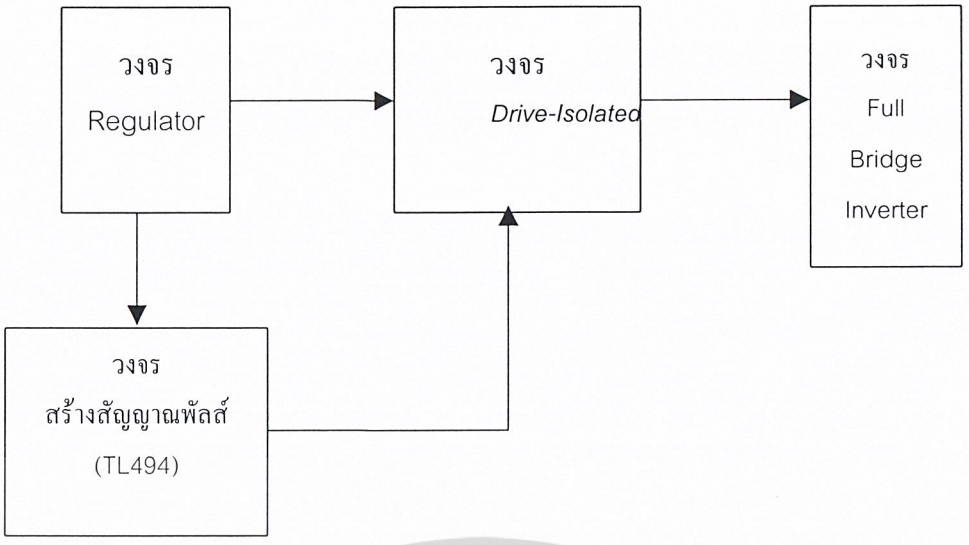
3.3.1.2 ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์

ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งทำให้แกนร้อน มีสาเหตุมาจากการสูญเสียที่เกิดจากลักษณะของฮีสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียจากการเดินกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss) ซึ่งความสูญเสียจะมีค่าขึ้นกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่การใช้งาน และอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์

3.4 วงจรควมคุมสัญญาณขับเกทของมอสเฟตกำลัง

วงจรควมคุมสัญญาณขับเกทของมอสเฟตกำลังจะมีหน้าที่ในการทำให้มอสเฟตกำลังทำงานเป็นสวิตซ์ปิดเปิดเพื่อทำให้เกิดความถี่สูงที่โหลด วงจรส่วนเพาเวอร์เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพราะฉะนั้นจึงต้องสร้างวงจรขับขึ้นมา 4 ชุดสัญญาณ เพื่อนำไปใช้ขับเกทของมอสเฟตกำลังให้สลับกันทำงานเป็นคู่ โดย 2 สัญญาณแรกมีเฟสตรงกันและสามารถปรับเลื่อนเฟสให้ต่างกันได้ และอีก 2 สัญญาณก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่จะมีเฟสตรงข้ามกันกับชุดแรก เพื่อให้สามารถควบคุมกำลังได้โดยการปรับเฟส (Phase Controlled) ด้วย ซึ่งวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ได้จาก IC เบอร์ TL 494 โดยมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนของวงจรควบคุม

3.4.1 วงจรเรกูเลเตอร์ (Regulator)

เป็นวงจรที่จ่ายแรงดันไฟตรงให้กับวงจรสร้างสัญญาณพัลส์และวงจรขับเกท ซึ่งใช้ IC Regulator เบอร์ 7812 รักษาแรงดันค่าบวกขนาด 12V ให้คงที่

3.4.2 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์

เป็นวงจรที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่สามารถปรับความถี่และสามารถปรับเฟสของสัญญาณเอาท์พุทได้ ซึ่งใช้ IC เบอร์ TL 494

3.4.2.1 ไอซีเบอร์ TL 494

TL 494 เป็นไอซี 20 ขา ที่สามารถนำมาใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งสามารถเลือกโหมดการทำงานได้ คือ เป็นโหมดแรงดันควบคุมและโหมดกระแสควบคุม โดยจะให้สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมออกมา 2 ชุด ที่มีเฟสตรงกันข้าม ซึ่งในแต่ละคู่ชุดสัญญาณมีคุณสมบัติที่สามารถปรับเฟสเลื่อนได้

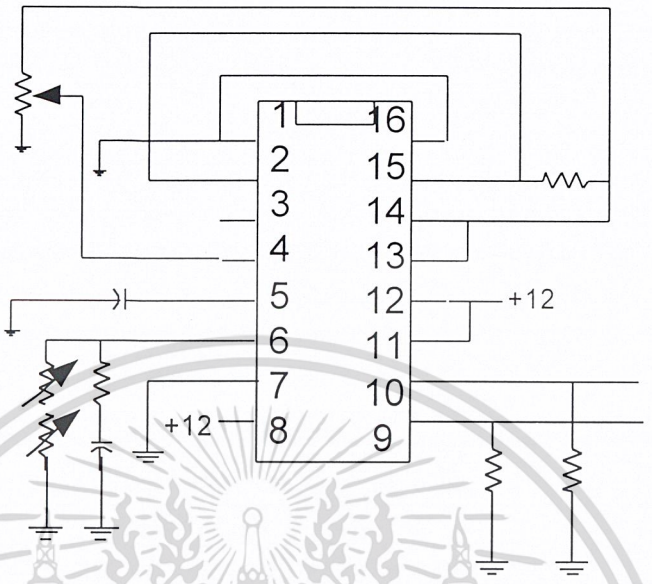
1. ที่ RAMP (ขาที่ 19) เป็นขาอินพุทของ PWM Comparator เมื่อเราต้องการให้ไอซีทำงานในโหมดแรงดัน (voltage mode control) ก็คือต้องต่อขานี้เข้ากับ C_T(ขา 4) แต่เมื่อเราต้องการโหมดกระแส (current mode control) ในการทำงานก็จะต้องต่อขานี้เข้ากับ C_S(ขา 4)

2. ที่ SS (ขาที่ 6) เป็นขาที่ใช้กำหนดเวลาในการซอท์ฟสตาร์ท (soft start) คือ เมื่อนำตัวเก็บประจุมาต่อที่ขานี้ลงไปยังกราวด์ จะเป็นการกำหนดช่วงเวลาในการซอท์ฟสตาร์ท โวล์ทเตจที่ขานี้จะมีค่าใกล้ 0 มากเมื่อ VIN ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่า UVLO (Undervoltage Lockout) โดยในภาวะที่ VIN และ VREF เริ่มเข้าสู่สภาวะที่ถูกต้องหรือเข้าที่แล้ว ค่าซอท์ฟสตาร์ทจะอยู่ที่ประมาณ 4.8 โวล์ท 9 μ A แต่เมื่อเกิดกระแสบกพร่อง (current fault) ขา SS นี้ก็จะเป็นทางผ่านของกระแสบกพร่องนี้ลงกราวด์

3. สัญญาณเอาท์พุท ที่ขา OUT A(ขาที่ 13) OUT B(ขาที่12) จะทำงานในครึ่งบริดจ์แรกของอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวอร์เตอร์ (half-bridge) และ OUT C(ขาที่8) OUT D (ขาที่7) ก็จะทำงานในอีกครึ่งบริดจ์ที่เหลือสลับกันไป โดยที่ OUT C และ OUT D จะเป็นตัวที่สามารถเลื่อนเฟสได้โดยยึด OUT A และ OUT B



รูปที่ 3-9 แสดงการต่อวงจรที่ขาไอซีเบอร์ TL 494

3.4.2.2 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจรของ TL 494 เป็นวงจรที่สร้างพัลส์สัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่ โดยคาบเวลาการทำงานของเอาท์พุทพัลส์สามารถกำหนดได้โดยค่าของ C_T และ R_T ดังนี้

$$C_T = Din/(1.08*R_T*f) \quad (3.5)$$

$$R_T = 2.5/[10Ma*(1-Din)] \quad (3.6)$$

เมื่อ Dine : linear duty cycle range

ซึ่งค่าอย่างน้อยที่สุดของ C_T ควรจะเป็น 200 pF โดยออสซิเลเตอร์ (oscilator) และ PWM ได้ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ถึง 600 กิโลเฮิร์ซ

3.4.2.3 การปรับเลื่อนเฟส

การปรับเลื่อนเฟสสามารถควบคุมได้โดยการทำงานของ COMP(ขาที่2) ซึ่งเป็นเอาท์พุทมาจากผล ของการเปรียบเทียบ Error Amplifier ถ้าระดับเอาท์พุทโวล์ทเตจของ Error Amplifier ต่ำกว่า 0.9 โวล์ท จะมีผลทำให้เป็น Zero phase shift นั่นคือ ไม่มีการเลื่อนเฟส

3.4.2.4 การปรับค่าเวลาเผื่อ Delay time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

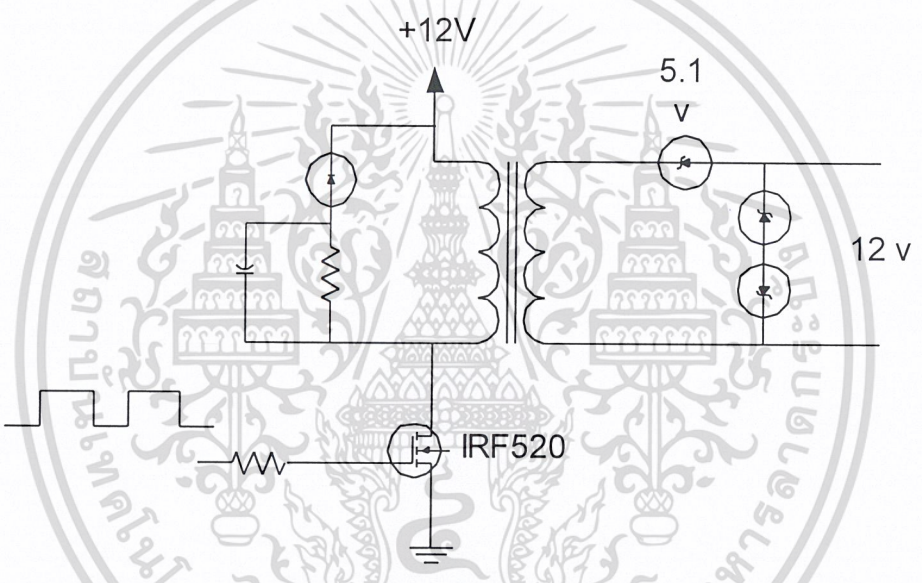
สามารถควบคุมค่าเผื่อเวลาได้โดย DELSETA-B และ DELSETC-D (ขาที่ 5,15) โดยคุมกระแสที่ผ่านทางขานี้ลงกราวด์ ด้วยการเลือกใช้ค่าความต้านทาน Rdelay มาต่อโดย

ค่าเวลาเผื่อ Delay Time = $(0.89*10^{-10}*Rdelay)$ วินาที(sec) (3.7)

ค่า Rdelay โดยปกติควรจะอยู่ในช่วง 1.9 k ถึง 10k โอห์ม

3.4.3 วงจรแยกกราวน์

วงจรนี้จะมีหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากขา 7,8 และขา 12,13 ของ IRF 520 แล้วทำการ isolate หรือแยกกราวด์ออกจากกัน จากนั้นจึงสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (full bridge inverter) ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันการลัดวงจรถึงกันของมอสเฟตกำลังในอินเวอร์เตอร์ โดยที่วงจรนี้จะมีส่วนประกอบดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 แสดงวงจร isolate

ในการใช้งานนั้นเราจะใช้หม้อแปลงความถี่สูงที่มี turn ratio เท่ากับ 1 : 1 จำนวน 4 ตัว โดยแต่ละตัวจะมีขดทุติยภูมจำนวน 1 ขด ทั้งนี้ก็เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ที่สามารถเลื่อนเฟสให้แต่ละสัญญาณเลื่อนเฟสถัดกันไปได้แตกต่างกัน และมีกราวด์แยกกันสำหรับใช้ควบคุมเพาเวอร์มอสเฟตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ให้สามารถทำงานพร้อมกันได้

จะเห็นว่าในวงจรจะมีวงจรสนับเบอร์ต่ออยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงทั้งสองทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันแรงดันเกินหรือแรงดันสไปค์ที่เกิดขึ้นขณะที่ Q1 , Q2 , Q3 และ Q4 หยุดนำกระแส (OFF) ไม่ให้เกินค่าปลอดภัยของตัวมันโดยที่จะมีหลักการทำงานดังนี้ ในขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส นั้น ตัวเก็บประจุ C จะถูกชาร์จประจุด้วยค่าแรงดันสไปค์ซึ่งเป็นผลรวมของแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงกับพลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำแผ่งของหม้อแปลงขณะนำกระแสรวมกัน โดยที่ตัวต้านทาน R ที่ต่อขนานกับ C จะทำให้แรงดันตกคร่อม C มีค่าต่ำกว่าแรงดันสไปค์ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันสไปค์ที่ตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตขณะหยุดนำกระแสถูกกันไว้ด้วยแรงดันที่ตกคร่อมตัว C และเมื่อแรงดันสไปค์มีค่าลดลงตัว C ก็จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R เพราะฉะนั้นแรงดันสไปค์ที่ตกคร่อมตัวเพาเวอร์มอสเฟตขณะเรอ่มหยุดนำกระแสจึงมีค่าลดลงจนเกือบเท่าแรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลง นอกจากนี้อาจสามารถต่อวงจรสนับเบอร์คร่อมที่ตัวเพาเวอร์มอสเฟตเพื่อลดกำลังสูญเสียในรูปความร้อนขณะเปลี่ยนสถานะโดยแพาะขณะเริ่มหยุดนำกระแส โดยจะควบคุมแรงดัน V_{DS} ของตัวเพาเวอร์มอสเฟตให้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านตัวมันลดลงได้ทันกัน เพราะฉะนั้นจึงทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง แต่เนื่องจากในวงจรดังรูป 3-10 ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวเพาเวอร์มอสเฟตขณะเปลี่ยนสถานะมีค่าน้อย ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องต่อวงจร สนับเบอร์คร่อมที่ตัวเพาเวอร์มอสเฟต

3.5 วงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น หากค่ามุมของกระแสมีค่าใกล้กับมุมของแรงดันมากเกินไป หรือมีค่านำหน้ามุมของแรงดัน จะทำให้ตัวสวิทช์ของชุดอินเวอร์เตอร์เกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ(Feedback Control) มาควบคุมกระแสแบบอัตโนมัติเพื่อไม่ให้เข้าใกล้มุมของแรงดันมากเกินไป แล้วจากการทำงานแบบอัตโนมัติทำให้เราไม่ต้องมาคอยปรับความถี่เองตลอดเวลา

ทฤษฎีที่ใช้ในวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ มีที่มาดังต่อไปนี้

จากสมการ $X_L = 2\pi fL$ (3.8)

$X_C = 1/2\pi fC$ (3.9)

โดยที่ L : ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี่)

X_L : ค่าอินดักทีฟรีแอคแต็นท์ (โอห์ม)

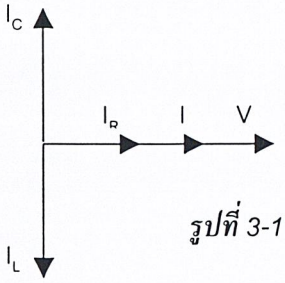
C : ค่าคาปาซิเตอร์ (ฟารัด)

X_C : ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแต็นท์ (โอห์ม)

f : ค่าความถี่ที่ใช้ในวงจร(เฮิร์ท)

กรณีที่ $X_L = X_C$

ค่ามุมกระแสจะอินเฟสกับแรงดัน
เนื่องจากในวงจรเหลือแต่ค่าความต้านทาน
ดังรูปที่ 3-1

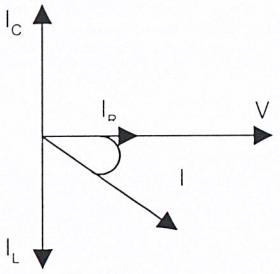


รูปที่ 3-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ $X_L > X_C$

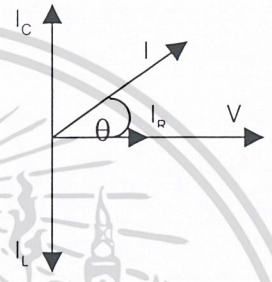
ค่ามุมกระแสจะล้าหลังแรงดัน
ดังรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12

กรณีที่ $X_L < X_C$

ค่ามุมมกระแสจะนำหน้าแรงดัน
ดังรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13

จากกรณีต่างๆ ทำให้เราทราบว่าค่า X_L , X_C มีผลกับค่ามุมของแระแสในวงจร ดังนั้นเราจึงนำมารวมเป็นสมการเดียวกัน เพื่อวิเคราะห์รวมกันทั้งวงจร

จากสมการ $X_L = 2\pi fL$

$X_C = 1/2\pi fC$

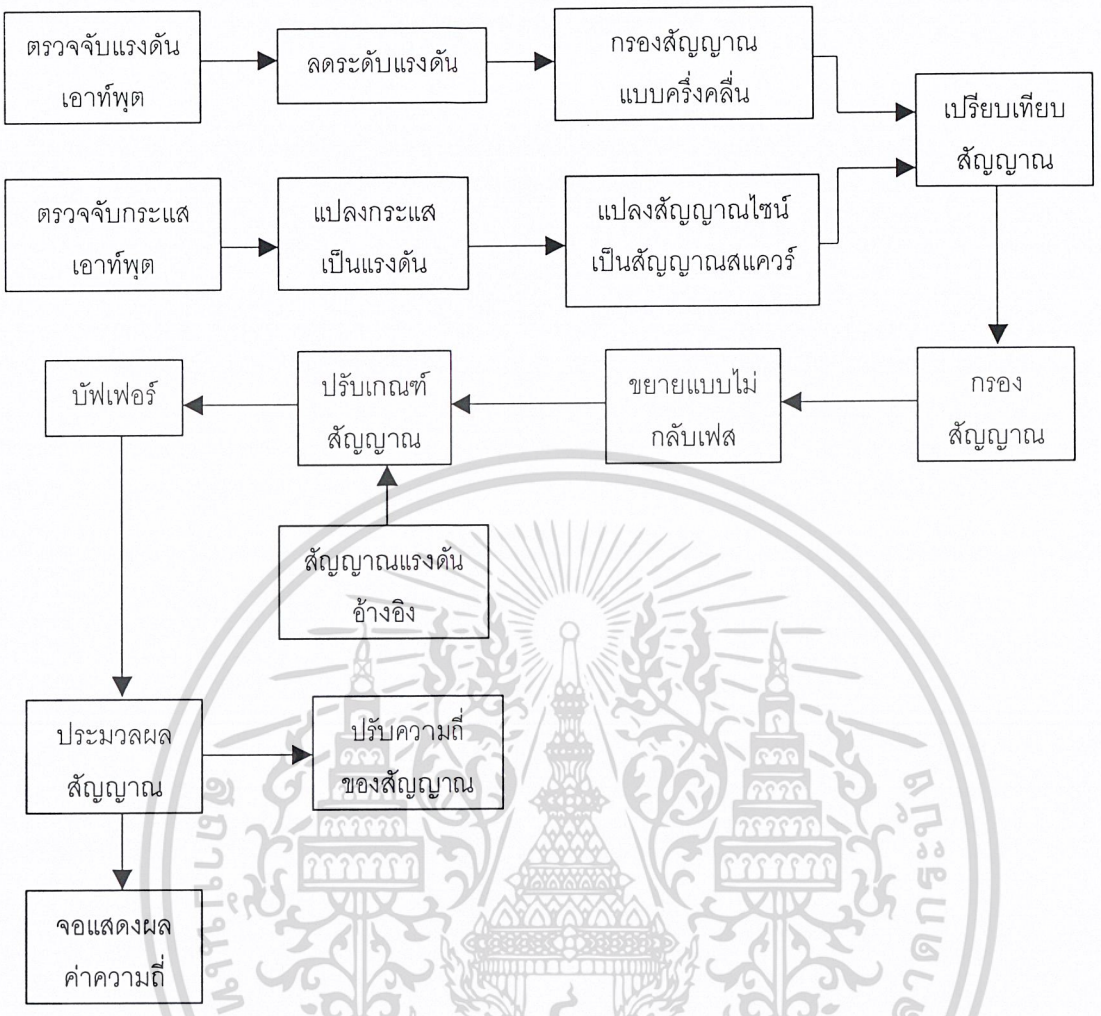
เราพบว่า $f \alpha X_L \alpha 1/X_C$

เมื่อเป็นดังนี้เราจึงวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อทำการหลอมไปสักระยะ ค่า X_L มีค่าลดลงต่ำกว่าค่า X_C จึงเป็นผลให้มุมของกระแสมีการเลื่อนเข้าหาแรงดัน ตรงกับกรณี $X_L < X_C$ ดังนั้นเพื่อให้มุมของกระแสกลับไปยังตำแหน่งเดิม เราต้องทำให้เกิดกรณี $X_L > X_C$ และจากความสัมพันธ์ $f \alpha X_L$

ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องเพิ่มความถี่ จึงเป็นที่มาของการใช้วงจรขับแบบควบคุมความถี่ และเพื่อความสะดวกจึงให้วงจรของไอซี TL494 เป็นตัวสร้างและควบคุมความถี่ โดยใช้วงจรควบคุมแบบป้อนกลับมาควบคุมความถี่ก่อนที่จะส่งเข้าวงจรขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 บล็อคไดอะแกรมของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 3-14 บล็อคไดอะแกรมวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

คำอธิบายแต่ละบล็อคไดอะแกรมการทำงาน

3.5.1.1 ตรวจจับแรงดันเอาท์พุต

- เป็นการวัดแรงดันเอาท์พุตที่ได้ ออกมาจากชุดอินเวอร์เตอร์

3.5.1.2 ลดระดับแรงดัน

- ใช้หม้อแปลงความถี่สูงลดระดับแรงดันเพื่อให้เหมาะสมกับวงจรควบคุม

3.5.1.3 กรองสัญญาณแบบครึ่งคลื่น

- กรองสัญญาณที่มีทั้งด้านบวกและลบ ให้เหลือด้านบวกด้านเดียว

3.5.1.4 ตรวจจับกระแสเอาท์พุตท์

- เป็นการวัดกระแสเอาท์พุตที่ได้ ออกมาจากชุดอินเวอร์เตอร์

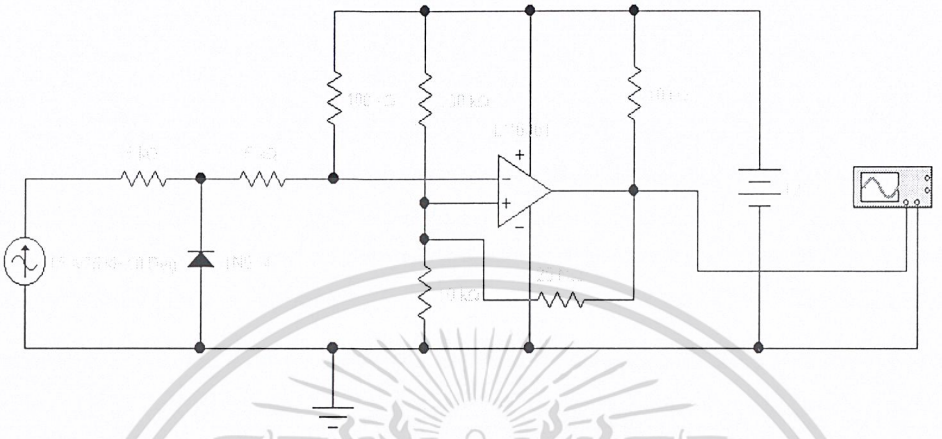
3.5.1.5 แปลงกระแสเป็นแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้การเหนี่ยวนำของกระแทที่ไหลผ่านแกนกลางของหม้อแปลงกระแสความถี่สูง

3.5.1.6 แปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสแควร์

- เพื่อง่ายต่อการควบคุมจึงทำให้เป็นสัญญาณสแควร์เหมือนแรงดัน โดยใช้วงจร ซีโรครอสซิ่ง

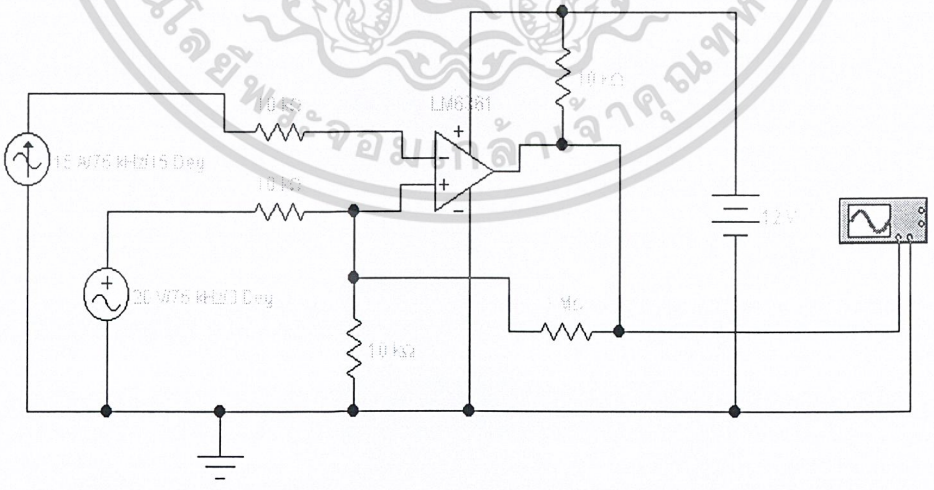


ดังรูปที่ 3-15

รูปที่ 3-15 วงจรซีโรครอสซิ่ง

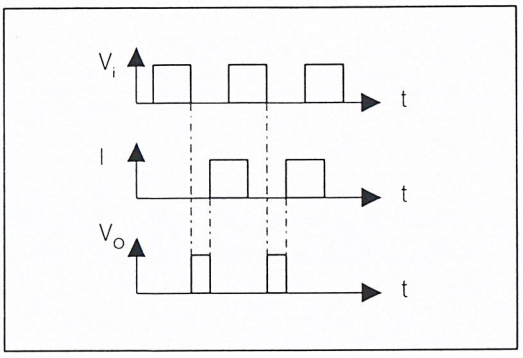
3.5.1.7 เปรียบเทียบสัญญาณ

- นำสัญญาณของกระแสและแรงดันที่ได้ มาหาระยะห่าง โดยจะแสดงในลักษณะผลต่าง คือ จะมีสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณกระแสไม่อินเฟสแรงดัน โดยใช้วงจรเฟสคอมพาราเตอร์ ดังรูปที่ 3-16



รูปที่ 3-16 วงจรเฟสคอมพาราเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-17 รูปสัญญาณเอาท์พุตจากวงจรเฟสคอมพารเตอร์

3.5.1.8 กรองสัญญาณ

- ทำให้เป็นแรงดันกระแสตรง

3.5.1.9 ขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

- เพิ่มแรงดันที่ได้ให้มีค่ามากพอตามที่วงจรควบคุมต้องการ

3.5.1.10 สัญญาณแรงดันอ้างอิง

- เป็นแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบ หากมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันอ้างอิงนี้ วงจรควบคุมต้องทำงานแต่ค่ามีค่ามากกว่าคอยตรวจสอบสัญญาณตลอดเวลา

3.5.1.11 ปรับเกณฑ์สัญญาณ

- นำสัญญาณที่มีการเปรียบเทียบแล้ว มาปรับเปลี่ยนขนาดอีกครั้งก่อนส่งเข้าวงจรควบคุม

3.5.1.12 บัฟเฟอร์

- เป็นตัวช่วยขับกระแส แต่เพื่อไม่ให้มีการสิ้นเปลืองจึงให้มีการทำงานที่สัญญาณ 0′ (กราวด์)

3.5.1.13 ประมวลผลสัญญาณ

- เป็นตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะรับค่าต่างๆเข้ามา และประมวลผลเลือกค่าความถี่ที่ถูกต้อง

3.5.1.14 จอแสดงผลสัญญาณ

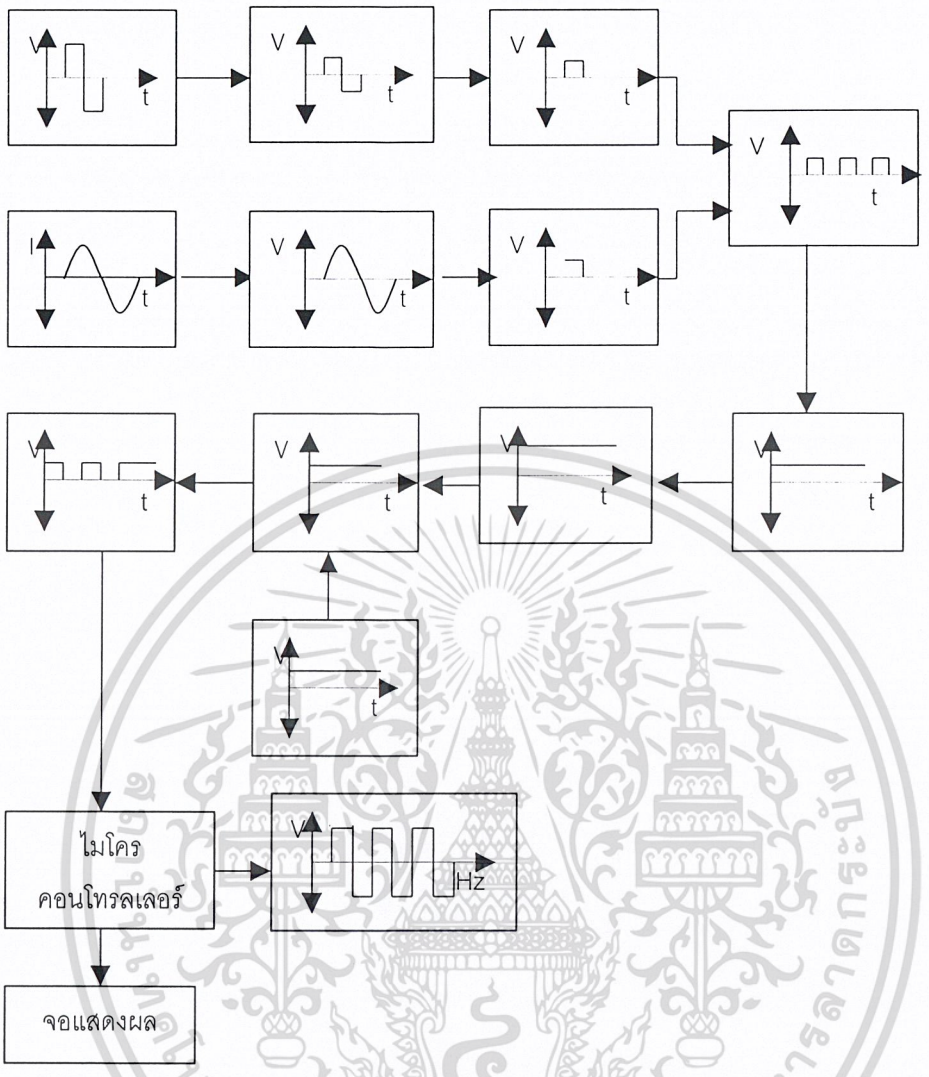
- จะแสดงค่าความถี่ที่ใช้งาน แต่จะมีค่าที่แสดงช้ากว่าความถี่ในวงจรจริง เนื่องจากการประมวลผล

3.5.1.15 ปรับความถี่ของสัญญาณ

- ส่งค่าความถี่ที่ถูกต้อง ไปยังวงจรขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 บล็อคไดอะแกรมสัญญาณของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ



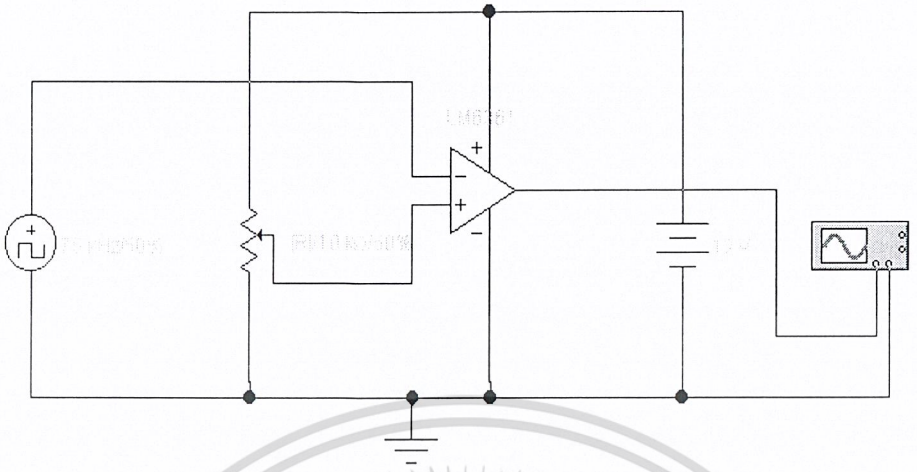
รูปที่ 3-18 บล็อคไดอะแกรมสัญญาณของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

3.5.3 หลักการทำงานของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

จากบล็อคไดอะแกรมแสดงการทำงานและรูปสัญญาณต่างๆ ดังหัวข้อที่กล่าวมาแล้วพอจะอธิบายได้ว่า เนื่องจากเราไม่สามารถควบคุมมุมของกระแสได้โดยตรง ดังนั้นเราจึงใช้การควบคุมทางอ้อม โดยแปลงระยะห่างระหว่างมุมของกระแสกับแรงดันให้เป็นแรงดันเสียก่อน จากนั้นจึงนำแรงดันนี้ไปควบคุมวงจรอื่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

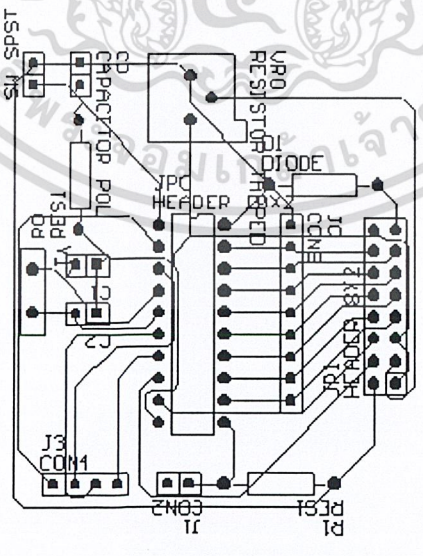
3.5.3.1 การทำงานของวงจรปรับเกณฑ์สัญญาณ



รูปที่ 3-19 วงจรปรับเกณฑ์สัญญาณ

จากรูปที่ 3.19 เป็นวงจรคอมพาราเตอร์ โดยรับสัญญาณแรงดันที่แปลงมาจากระยะห่างระหว่างมุมของกระแสและแรงดัน นำมาเปรียบเทียบกันแรงดันอ้างอิง ซึ่งเป็นแรงดันของระยะห่างระหว่างมุมกระแสและแรงดันที่ยอมได้ หากเข้าใกล้หรือมีค่าต่ำกว่าแรงดันอ้างอิงนี้ วงจรจะต้องสั่งการทำงานให้มุมของกระแสเลื่อนออกจากมุมของแรงดันทันที

3.5.3.2 การทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณ

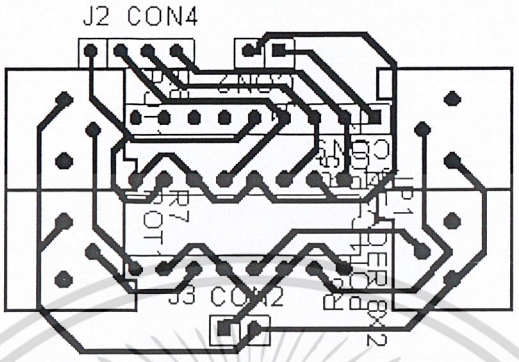


รูปที่ 3-20 วงจรประมวลผลสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.20 ใช้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาช่วยในการควบคุมสัญญาณ โดยการเขียนโปรแกรมให้มีการรับค่าสัญญาณทริก จากวงจรปรับเกณฑ์สัญญาณ แล้วส่งค่าออกไปยังพอร์ตที่ใช้ทำงานปรับความถี่ขณะเดียวกันมีการส่งค่าความถี่ของสัญญาณออกไปยังจอแสดงผลด้วย

3.5.3.3 การทำงานของการปรับความถี่ของสัญญาณ



รูปที่ 3-21 วงจรการปรับความถี่ของสัญญาณ

จากรูปที่ 3-21 ใช้ไอซี TLP521-4 ที่เป็นสวิทซ์ที่มีการสั่งงานเชื่อมโยงทางแสง (Opto Isolator) มีข้อดีคือสามารถแยกสัญญาณระหว่างขาเข้า (Input) กับขาออก (Output) ออกจากกันได้รวมทั้งมีขนาดเล็กและใช้พลังงานน้อยในการทำงานอีกด้วย ซึ่งจะทำงานเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณแอคทีฟไฮ "1" มาที่ขาอินพุตแต่ละขา จะเกิดการเชื่อมต่อต่ำความต้านทานทางด้านเอาท์พุตที่ต่อไปยังขา 6 ของไอซี TL 494 ที่เป็นวงจรขับ โดยจะไปต่อคร่อมกับค่าความต้านทานที่ต่ออยู่กับขา 6 เป็นผลให้ค่าความต้านทานรวมมีค่าลดลง

จากสมการ $R_T = R_A // R_B = R_A R_B/(R_A+R_B)$ (4.0)

เมื่อ R_A : ค่าความต้านทานเดิมที่ต่อกับขา 6 ของ TL 494

R_B : ค่าความต้านทานที่นำไปต่อคร่อม

R_T : ค่าความต้านทานรวม

ดังนั้น หากมีการทำงานอีก ค่าของ RT จะมีค่าลดลงไปตามลำดับ

จะมีค่าต่ำสุดเมื่อ $R_T = R_A // R_{B1} // R_{B2} // R_{B3} // R_{B4}$ (4.1)

และจากความสัมพันธ์ $R_T \alpha 1/f$ (4.2)

∴ ค่าความพี่เอาท์พุต จึงมีค่าสูงขึ้น

จากความสัมพันธ์ $f \alpha X_L$ (4.3)

∴ ค่า X_L มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มุมของกระแสล้าหลังแรงดันเป็นผลให้มุมของกระแสเลื่อนออกจากมุมของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 ผลการทำงานของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

จากการทดลองหลอมโลหะแบบที่ไม่มีการควบคุมสัญญาณแบบป้อนกลับ พร้อมกับวัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป เมื่อทำงานไปสักระยะหนึ่ง มุมของกระแสจะค่อยๆเลื่อนเข้าหามุมของแรงดันจนเกือบอินเฟสกัน หากปล่อยทิ้งไว้จะเกิดอันตรายกับตัวสวิทช์ที่ชุดอินเวอร์เตอร์ จึงต้องมีการปรับมุมของกระแสด้วยตัวเองตลอดเวลา แต่เมื่อนำวงจรควบคุมแบบป้อนกลับเข้ามาช่วยพบว่ามุมของกระแสจะอยู่คงที่ ณ จุดที่เราตั้งไว้ตลอดเวลา โดยจะทำการปรับมุมของกระแสเองอัตโนมัติ โดยที่เราไม่ต้องไปคอยจ้องดูที่จอออสซิลโลสโคปตลอดเวลา รวมทั้งชุดวงจรสวิทช์ที่อินเวอร์เตอร์ก็มีความปลอดภัยมากขึ้นด้วย

3.5.4.1 ข้อดีของการใช้วงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

- มีการทำงานเองอัตโนมัติ โดยที่เราไม่ต้องไปคอยปรับเอง
- การทำงานมีความต่อเนื่อง คงที่มากกว่าการที่เราปรับเอง
- วงจรสวิทช์ในชุดอินเวอร์เตอร์มีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น

3.5.4.2 ข้อเสียของการใช้วงจรควบคุมแบบป้อนกลับ

- จะต้องมีการออกแบบการควบคุมให้เหมาะสม กับโหลดที่นำมาหลอมแต่ละชนิดไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวและความถี่ที่ใช้งานไม่เท่ากัน
- อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรมีราคาแพง เนื่องจากต้องทำงานที่ความถี่สูง
- มีผลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนสูง จึงต้องออกแบบวงจรกรองที่ดีพอสมควร

3.5.5 แนวทางการพัฒนา

จากข้อเสียที่พบ เนื่องจากในโครงงานนี้พึ่งได้มีการนำวงจรควบคุมแบบป้อนกลับมาใช้งาน ดังนั้นการออกแบบต่างๆ จึงคำนึงถึงขนาดและราคาเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานจำเป็นต้องเปลี่ยนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ประมวลผล ให้มีหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งพอร์ตต่างๆต้องมากขึ้นด้วย เพื่อใช้เก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโหลดแต่ละชนิด รวมทั้งทางด้านซอฟแวร์(Program) ที่เขียนลงไปต้องสนับสนุนกับชนิดของโหลดด้วย เมื่อจะทำการหลอมก็เลือกชนิดของโหลดให้ตรงกับการทำงานที่ได้เก็บผลไว้แล้ว ทั้งนี้ไม่ว่าจะเปลี่ยนโหลดไปเป็นแบบใด ถ้ามีการเก็บค่าไว้แล้ว ก็จะมีการทำงานเหมือนกับโหลดที่ได้แสดงดังที่ผ่านมา

ส่วนข้อเสียด้านราคาแพง คงต้องยอมเนื่องจากอุปกรณ์ยิ่งมีคุณภาพสูง ก็จะแปรตามราคาด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากจะมีวิธีอื่นที่หลีกเลี่ยงอุปกรณ์เหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

วงจรโดยรวมของการหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

4.1 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเทียบกับเวลา

วัตถุประสงค์

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบกับเวลา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.
2. Variac ปรับค่า 0 ถึง 260 โวลท์ 1 ตัว
3. Storage Scope 1 ตัว
4. อลูมิเนียมขนาด 30 กรัม 1 ชิ้น
5. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermo – Hunter) 1 ตัว
6. นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับแรงดันอินพุทคงที่ 220 โวลท์ ที่ความถี่ 75 kHz. โดยใช้อลูมิเนียมน้ำหนัก 30 กรัม
2. บันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 30 วินาที จนกระทั่งชิ้นงานหลอมได้

ผลการทดลอง

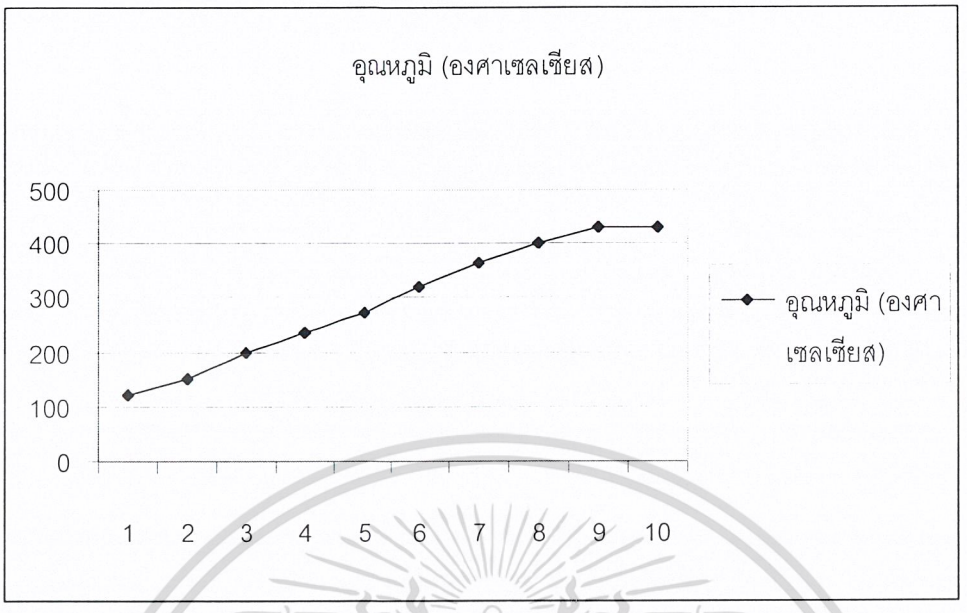
ตารางที่ 4-1 แสดงค่า เวล าและ อุณหภูมิ ในการหลอมของโหลดขนาด 30 กรัม

ครั้ง	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	0.50	120
2	1.00	150
3	1.50	198
4	2.00	235
5	2.50	273
6	3.00	320
7	3.50	365
8	4.00	400
9	4.50	430
10	5.00	430

ตารางที่ 4-1 แสดงค่า เวล าและ อุณหภูมิ ในการหลอมของโหลดขนาด 30 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟทดลองการหลอมเทียบกับเวลา



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงผลการทดลองการหลอมเทียบกับเวลา

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองกับขนาดชิ้นงานขนาด 30 กรัมผลที่ได้จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงแต่ละเวลาจะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงแรกจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะโหลดจะซึมซาบรับพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วจากสภาวะอุณหภูมิปกติเริ่มต้นของโหลด เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเนื่องจากพลังงานที่จ่ายเข้าไปเริ่มที่จะถึงจุดที่เรียกว่าเป็นจุดที่เกิดสมดุลทางพลังงาน แต่โหลดจะมีการเริ่มหลอมในช่วงเวลาผ่านไป 5 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของชิ้นงานคือประมาณ 630 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ เครื่องมือวัดอุณหภูมิมีขีดจำกัดสามารถวัดได้เพียง 430 องศาเซลเซียส

4.2 การเปลี่ยนโหลดขนาดต่างๆ

วัตถุประสงค์

เพื่อหาเวลาและกำลังในการหลอมอลูมิเนียมแต่ละขนาดโดยเทียบกับเวลา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก.

2. Variac ปรับค่า 0 ถึง 260 โวลท์ 1 ตัว

3. Storage Scope 1 ตัว

4. อลูมิเนียมขนาดต่างๆ 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับแรงดันอินพุทคงที่ 220 โวลท์ ที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 75 kHz.
2. ทำการหลอมชิ้นงานขนาด 30 กรัม , 40 กรัม และ 50 กรัม
3. บันทึกค่ากระแส และ แรงดันทางด้านเอาท์พุต ขณะเริ่มต้นและขณะหลอมละลาย และ เวลาที่ใช้ในการหลอม ของอลูมิเนียมแต่ละขนาด

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4-2 แสดงค่ากระแส กำลัง และ เวลา ในการหลอมของโหลดแต่ละขนาด

ขนาด (กรัม)	กระแสอินพุท (แอมแปร์)	กระแสเอาท์พุต (แอมแปร์) ขณะเริ่มต้น ณ.ความถี่(kHz.)	กระแสเอาท์พุต (แอมแปร์) ขณะหลอม ณ.ความถี่(kHz.)	กำลังเอาท์พุต (กิโลวัตต์)	เวลา (นาที)
30	19	16.73(75.08)	13.53(77.40)	2.871	5
40	20	16.72(76.69)	13.40(78.86)	3.323	7
50	21	18.80(75.30)	13.24(77.64)	3.532	9

สรุปผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลดแต่ละชนิดและการปรับความถี่แต่ละขนาดจะมีผลทำให้กระแสและกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วยซึ่งเวลาที่ใช้ในการหลอมอลูมิเนียมก็จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากการทำงานในแต่ละโหลดขนาดต่างๆแต่ละความถี่เริ่มต้นเมื่ออลูมิเนียมหลอม ความถี่ขณะหลอมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการปรับเพื่อรักษามุมของกระแสให้คงที่ตลอดซึ่งการปรับค่าความถี่ให้สูงขึ้นเป็นการเพิ่มค่ารีแอคแตนซ์ในวงจรรีโซแนนซ์

4.3 การทดลองการควบคุมมุมกระแสแบบอัตโนมัติและแบบมือปรับ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวงจรป้อนกลับที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบระหว่างการควบคุมมุมกระแสแบบอัตโนมัติและแบบมือปรับ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.วงจรโดยรวมและวิธีการวัดแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก. และ วงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ

2. Variac ปรับค่า 0 ถึง 260 โวลท์ 1 ตัว

3. Storage Scope 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อลูมิเนียมขนาด 30 กรัม 1 ตัว

5. นาฬิกาจับเวลา 1 เรือน

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับแรงดันอินพุทคงที่ 220 โวลท์ ที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 75 kHz.
2. วัดสัญญาณแรงดันและกระแสทางด้านเอาท์พุตและอินพุต ของทั้ง 2 แบบ
3. ทำการศึกษาพฤติกรรมของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับว่ามีผลต่อระบบอย่างไร

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 การควบคุมแบบมือปรับ

Vin (Volt)	Iin (Amp)	Pin (kW)	Vout (Volt)	Iout (Amp)	Pout (kW)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพ(%)
220	21	2.943	320	15.95	2.853	6.3	96.58

ตารางที่ 4.4 การควบคุมแบบป้อนกลับ

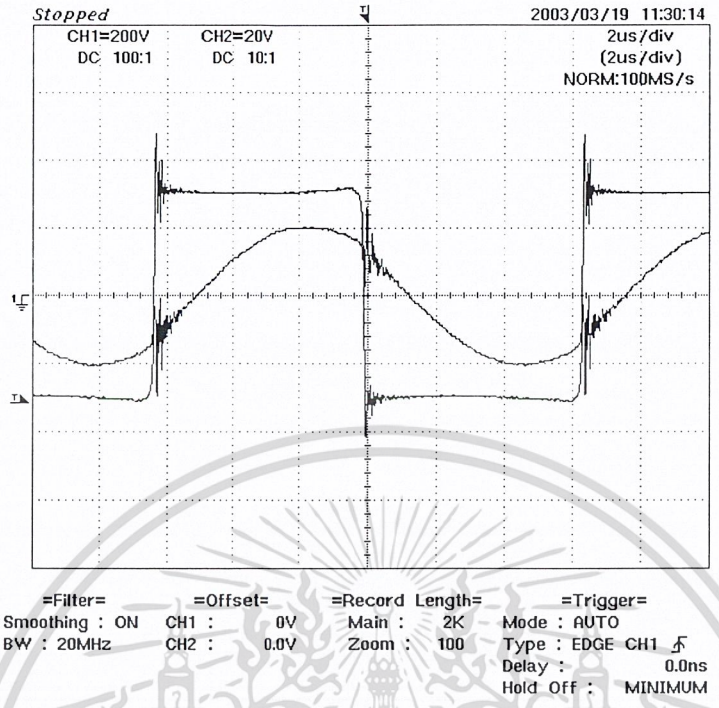
Vin (Volt)	Iin (Amp)	Pin (kW)	Vout (Volt)	Iout (Amp)	Pout (kW)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพ(%)
335.1	15.44	4.28	320.5	16.12	4.19	4.1	98

สรุปผลการทดลอง

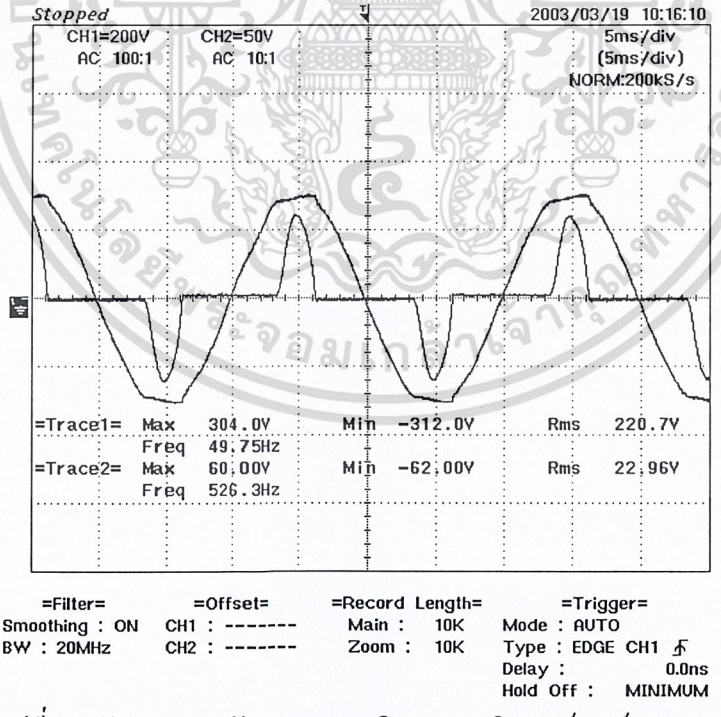
ผลจากตารางการทดลองจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการควบคุมแบบมือปรับเนื่องจาก ในการควบคุมมุมของกระแสของการควบคุมแบบป้อนกลับจะมีเสถียรภาพที่ดีกว่า เนื่องจากมีการควบคุมความถี่เข้าใกล้จุดรีโซแนนซ์ และจะมีความปลอดภัยต่อระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ภาพสัญญาณต่างๆ

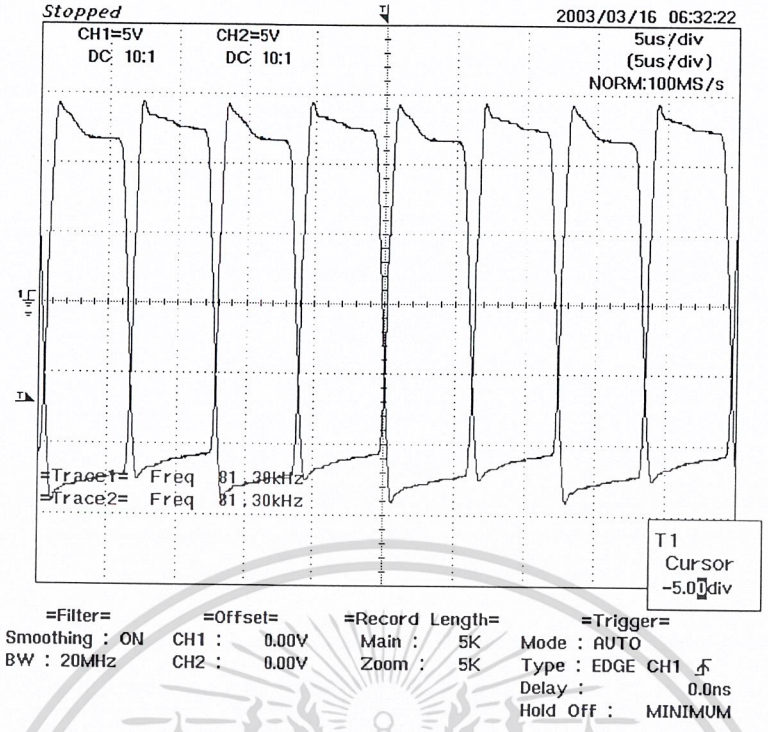


รูปที่ 4-2 สัญญาณแรงดันและกระแสเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงาน

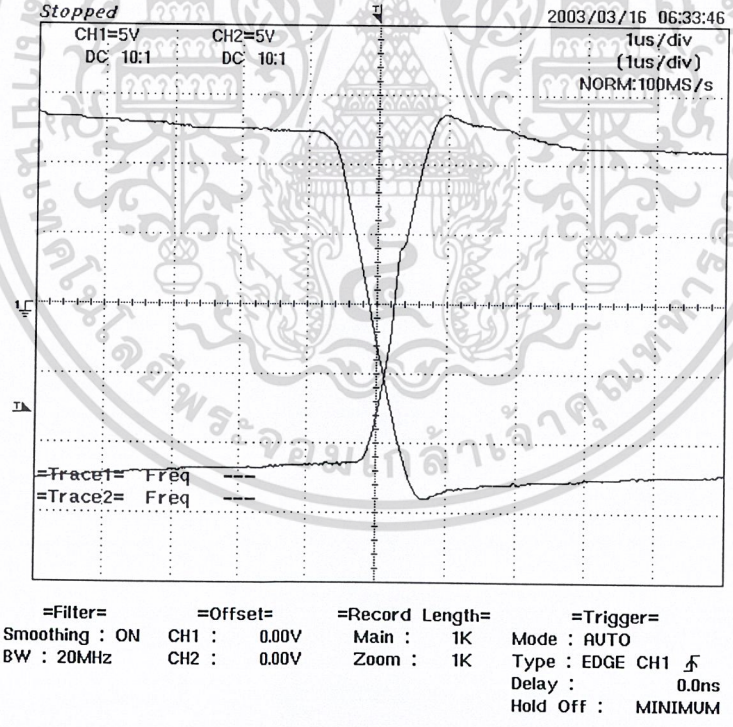


รูปที่ 4-3 สัญญาณแรงดันและกระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

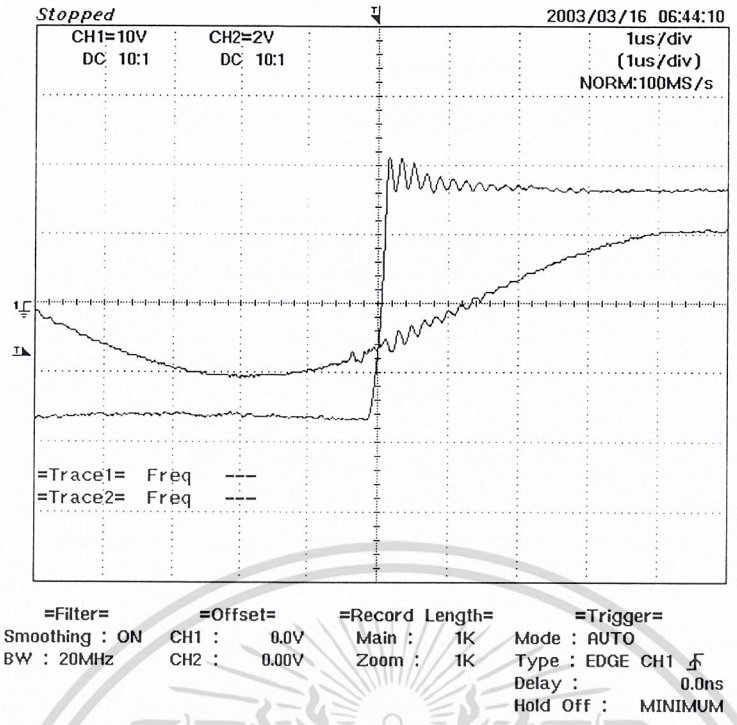


รูปที่ 4-4 สัญญาณขับมอสเฟตของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

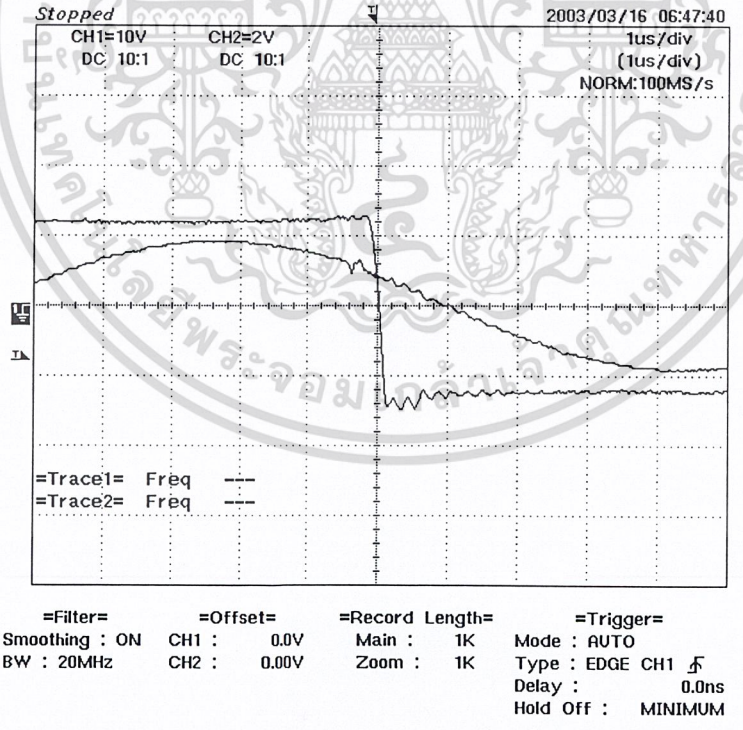


รูปที่ 4-5 แสดง Dead time ของสัญญาณขับมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-6 แสดงสัญญาณด้านขาขึ้นของแรงดันและกระแส



รูปที่ 4-7 แสดงสัญญาณด้านขาลงของแรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และสรุป

หลักการของการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กที่นำมาใช้ประยุคต์สำหรับเครื่องหลอมโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ จะให้ความร้อนแก่เบ้าหลอมอย่างรวดเร็ว

จากโครงการนี้ได้สร้างเครื่องหลอมโดยมีชุดควบคุมแบบป้อนกลับคอยควบคุมมุมของกระแสไม่ให้เกิดการนำหน้าของของแรงดัน เพื่อป้องกันความเสียหายแก่อุปกรณ์ในการสวิทช์ชิ่ง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมแบบป้อนกลับสามารถรักษามุมของกระแสให้ได้ตามที่กำหนด

ข้อดี

1. มีความปลอดภัยต่ออุปกรณ์ในการสวิทช์ชิ่ง
2. มีความสะดวกในการใช้งานเพราะไม่ต้องคอยปรับมุมของกระแส
3. ทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น

แนวทางในการแก้ไขและพัฒนา

จากข้อเสียที่พบ เนื่องจากในโครงงานนี้พึ่งได้มีการนำวงจรควบคุมแบบป้อนกลับมาใช้งาน ดังนั้นการออกแบบต่างๆ จึงคำนึงถึงขนาดและราคาเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานจำเป็นต้องเปลี่ยนตัวไมโครคอนโทรเลอร์ที่ใช้ประมวณผล ให้มีหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งพอร์ตต่างๆต้องมากขึ้นด้วย เพื่อใช้เก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโหลดแต่ละชนิด รวมทั้งทางด้านซอฟแวร์ (Program) ที่เขียนลงไปต้องสนับสนุนกับชนิดของโหลดด้วย เมื่อจะทำการหลอมก็เลือกชนิดของโหลดให้ตรงกับการทำงานที่ได้เก็บผลไว้แล้ว ทั้งนี้ไม่ว่าจะเปลี่ยนโหลดไปเป็นแบบใด ถ้ามีการเก็บค่าไว้แล้วก็จะมีการทำงานเหมือนกับโหลดที่ได้แสดงดังที่ผ่านมา

ส่วนข้อเสียด้านราคาแพง คงต้องยอมเนื่องจากอุปกรณ์ยิ่งมีคุณภาพสูง ก็จะแปรตามราคาด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากจะมีวิธีอื่นที่หลีกเลี่ยงอุปกรณ์เหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] John Davies & Peter Simpson , "Induction Heating Handbook" McGraw-Hill,New York,1979

[2] GEORGE C.CHRYSIS " High Frequency Switching Power Supply Theory And Design"second edition McGraw-Hill,New York 1990

[3] S.Zinn and S.L. Semiatin. "Elements of Induction Heating Design,Control,and Application. "ASM International:Ohio,1991

[4] Rashid,Muhammad H. "Power Electronics Circuit,Device and Application." Prentice Hall:New Jersey,1993

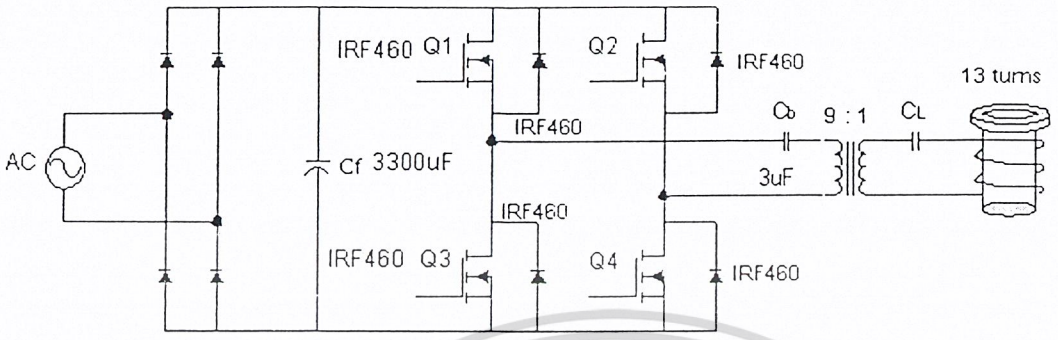
[5] สุวัฒน์ ดั่น, "เทคนิคและการออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย, บริษัท เอนเทลไทย จำกัด,2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

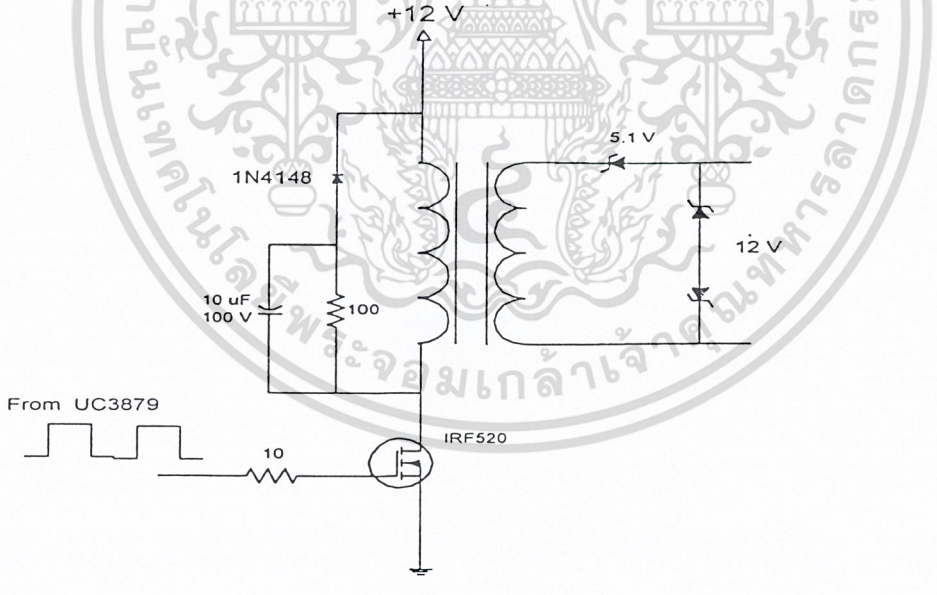


ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปวงจรIsolate นำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;************************************************
;Program of Project  INDUCTION MELTING
;************************************************
LCD_EN BIT      P3.5
LCD_RS BIT      P3.4
LCD_ADDR        EQU     030H
LCD_DATA        EQU     031H
ON_SW           BIT     P3.7
                ORG             0000H
                CLR             LCD_EN
                CLR             LCD_RS
MAIN:           MOV             P1,#00000000B
                ACALL   INIT_LCD
LOOP:           MOV             LCD_ADDR,#000H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_1
                ACALL   WRLINE_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_3
                ACALL   WRLINE_LCD
                MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_2
                ACALL   WRLINE_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_4
                ACALL   WRLINE_LCD
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   DELAY_1s
                MOV             R4,#16
LOOP_LCD_L_SHF: ACALL   LCD_LSHF
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   DELAY_100ms
                DJNZ    R4,LOOP_LCD_L_SHF
                MOV             LCD_ADDR,#000H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_5
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                ACALL   WRLINE_LCD
                MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_6
                ACALL   WRLINE_LCD
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   DELAY_1s
                MOV             R4,#16
LOOP_LCD_R_SHF: ACALL   LCD_RSHF
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   DELAY_100ms
                DJNZ    R4,LOOP_LCD_R_SHF
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   LCD_CLR
                MOV             LCD_ADDR,#000H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                ACALL   LCD_BLINK
                ACALL   DELAY_1s
                MOV             LCD_DATA,#'L'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'o'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'a'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'d'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'i'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'n'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'g'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                ACALL   DELAY_1s
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                ACALL   WRLINE_LCD
                MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_6
                ACALL   WRLINE_LCD
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   DELAY_1s
                MOV             R4,#16
LOOP_LCD_R_SHF: ACALL   LCD_RSHF
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   DELAY_100ms
                DJNZ    R4,LOOP_LCD_R_SHF
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   LCD_CLR
                MOV             LCD_ADDR,#000H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                ACALL   LCD_BLINK
                ACALL   DELAY_1s
                MOV             LCD_DATA,#'L'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'o'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'a'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'d'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'i'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'n'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_DATA,#'g'
                ACALL   WRCHAR_LCD
                MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                ACALL   DELAY_1s
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
ACALL  LCD_BLINK
ACALL  DELAY_100ms
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
ACALL  LCD_BLINK
ACALL  DELAY_100ms
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
ACALL  LCD_BLINK
ACALL  DELAY_1s
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
ACALL  LCD_BLINK
ACALL  DELAY_1s
MOV         LCD_DATA,#'.'
ACALL  WRCHAR_LCD
ACALL  LCD_BLINK
ACALL  DELAY_1s
MOV         LCD_DATA,#'.'
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ACALL   WRCHAR_LCD
        ACALL   LCD_BLINK
        ACALL   DELAY_100ms
        MOV             LCD_DATA,#'.'
        ACALL   WRCHAR_LCD
        ACALL   LCD_BLINK
        ACALL   DELAY_100ms
        MOV             LCD_DATA,#'.'
        ACALL   WRCHAR_LCD
        ACALL   LCD_BLINK
        ACALL   DELAY_100ms
        MOV             LCD_DATA,#'.'
        ACALL   WRCHAR_LCD
        ACALL   LCD_BLINK
        ACALL   DELAY_1s
        ACALL   DELAY_1s
LOOP1:  MOV             LCD_ADDR,#000H
        ACALL   SET_ADDR_LCD
        MOV             DPTR,#TITLE_7
        ACALL   WRLINE_LCD
        MOV             LCD_ADDR,#040H
        ACALL   SET_ADDR_LCD
        MOV             DPTR,#TITLE_8
        ACALL   WRLINE_LCD
        ACALL   DELAY_1s
        ACALL   LCD_OFF
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   LCD_ON
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   DELAY_100ms
        ACALL   DELAY_100ms
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   LCD_OFF
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   DELAY_100ms
                ACALL   LCD_ON
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   DELAY_1s
LOOP2:          MOV     LCD_ADDR,#000H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV     DPTR,#TITLE_9
                ACALL   WRLINE_LCD
                MOV     LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV     DPTR,#TITLE_10
                ACALL   WRLINE_LCD
LOOP2_1:        JB      ON_SW,CHK_OFF_SW1
                ACALL   DELAY_10ms
                JB      ON_SW,CHK_OFF_SW1
                SETB    P3.0
                JNB     ON_SW,$
                SETB    P3.7
                ACALL   SHOW_DATA1
LOOP2_2:        JB      ON_SW,CHK_OFF_SW2
                ACALL   DELAY_10ms
                JB      ON_SW,CHK_OFF_SW2
                SETB    P3.1
                JNB     ON_SW,$
                SETB    P3.7
                ACALL   SHOW_DATA2
LOOP2_3:        JB      ON_SW,CHK_OFF_SW3
                ACALL   DELAY_10ms
                JB      ON_SW,CHK_OFF_SW3
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                SETB    P3.2
                JNB             ON_SW,$
                SETB    P3.7
                ACALL   SHOW_DATA3
LOOP2_4:        JB              ON_SW,CHK_OFF_SW4
                ACALL   DELAY_10ms
                JB              ON_SW,CHK_OFF_SW4
                SETB    P3.3
                JNB             ON_SW,$
                ACALL   SHOW_DATA4
CHK_OFF_SW1:    ACALL   DELAY_1s
                AJMP    LOOP2_1
CHK_OFF_SW2:    ACALL   DELAY_1s
                AJMP    LOOP2_2
CHK_OFF_SW3:    ACALL   DELAY_1s
                AJMP    LOOP2_3
CHK_OFF_SW4:    ACALL   DELAY_1s
                AJMP    LOOP2_4
SHOW_DATA1:     MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_11
                ACALL   WRLINE_LCD
                RET
SHOW_DATA2:     MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_12
                ACALL   WRLINE_LCD
                RET
SHOW_DATA3:     MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_13
                ACALL   WRLINE_LCD
                RET
SHOW_DATA4:     ACALL   LCD_CLR
                MOV             LCD_ADDR,#000H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_15
                ACALL   WRLINE_LCD
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   LCD_OFF
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   LCD_ON
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   LCD_OFF
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   LCD_ON
                ACALL   DELAY_1s
                ACALL   DELAY_1s
                MOV             LCD_ADDR,#000H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_9
                ACALL   WRLINE_LCD
                MOV             LCD_ADDR,#040H
                ACALL   SET_ADDR_LCD
                MOV             DPTR,#TITLE_14
                ACALL   WRLINE_LCD
                RET
INIT_LCD:       ACALL   DELAY_100ms
                CLR             LCD_RS
                MOV             P1,#00111000B
                ACALL   LCD_CLK
                ACALL   DELAY_10ms
                MOV             P1,#00111000B
                ACALL   LCD_CLK
                ACALL   LCD_OFF
                ACALL   LCD_CLR
                MOV             P1,#00000110B
                ACALL   LCD_CLK
                ACALL   LCD_HOME
LCD_CLR:        CLR             LCD_RS
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    MOV     P1,#00000001B
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
LCD_HOME:           CLR     LCD_RS
                    MOV     P1,#00000010B
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
LCD_OFF:            CLR     LCD_RS
                    MOV     P1,#00001000B
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
LCD_CLK:            SETB    LCD_EN
                    ACALL   LCD_DELAY
                    CLR     LCD_EN
                    ACALL   LCD_DELAY
                    RET
LCD_ON:             CLR     LCD_RS
                    MOV     P1,#00001100B
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
LCD_BLINK:          CLR     LCD_RS
                    MOV     P1,#00001100B
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
LCD_LSHF:           CLR     LCD_RS
                    MOV     P1,#00011000B
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
LCD_RSHF:           CLR     LCD_RS
                    MOV     P1,#00011100B
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
SET_ADDR_LCD:CLR    LCD_RS
                    MOV     A,LCD_ADDR
                SETB    ACC.7
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    MOV     P1,A
                    ACALL   LCD_CLK
                    RET
WRCHAR_LCD:         SETB    LCD_RS
                    MOV     P1,LCD_DATA
                    ACALL   LCD_CLK
                    ACALL   LCD_ON
                    RET
WRLINE_LCD:         MOV     R0,#0
WRLINE_LCD_1: SETB  LCD_RS
                    CLR     A
                    MOVC    A,@A+DPTR
                    MOV     P1,A
                    ACALL   LCD_CLK
                    INC     DPTR
                    INC     R0
                    CJNE    R0,#16,WRLINE_LCD_1
                    ACALL   LCD_ON
                    RET
LCD_DELAY:          MOV     R7,#002
LCD_DELAY_1:        MOV     R6,#0E6H
LCD_DELAY_2:        NOP
                    NOP
                    DJNZ    R6,LCD_DELAY_2
                    DJNZ    R7,LCD_DELAY_1
                    RET
DELAY_10ms:         MOV     R7,#010
DELAY_10ms_1: MOV       R6,#0E6H
DELAY_10ms_2: NOP
                    NOP
                    DJNZ    R6,DELAY_10ms_2
                    DJNZ    R7,DELAY_10ms_1
                    RET
DELAY_100ms:        MOV     R7,#100
DELAY_100ms_1:      MOV     R6,#0E6H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DELAY_100ms_2:      NOP
                    NOP
                    DJNZ    R6,DELAY_100ms_2
                    DJNZ    R7,DELAY_100ms_1
                    RET
DELAY_1s:           MOV             R5,#100
DELAY_1s_1:         ACALL   DELAY_10ms
                    DJNZ    R5,DELAY_1s_1
                    RET
TITLE_1:    DB      '  LCD  Module  '
TITLE_2:    DB      '    Project    '
TITLE_3:    DB      '   Induction   '
TITLE_4:    DB      '    Melting    '
TITLE_5:    DB      '   Starting    '
TITLE_6:    DB      '   to  work    '
TITLE_7:    DB      '   Ready!!!    '
TITLE_8:    DB      '   to  work    '
TITLE_9:    DB      ' WORKING  DATA '
TITLE_10:   DB      'Freq.  75.78 KHz'
TITLE_11:   DB      'Freq.  78.24 KHz'
TITLE_12:   DB      'Freq.  77.86 KHz'
TITLE_13:   DB      'Freq.  77.40 KHz'
TITLE_14:   DB      'Freq.  77.64 KHz'
TITLE_15:   DB      'WARNING!!!     '
TITLE_16:   DB      '               '
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

- Compatible with MCS-51™ Products
- 4K Bytes of Reprogrammable Flash Memory
  - Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
- 3.0V to 6V Operating Range
- Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Two-Level Program Memory Lock
- 128 x 8-Bit Internal RAM
- 15 Programmable I/O Lines
- Two 16-Bit Timer/Counters
- Six Interrupt Sources
- Programmable Serial UART Channel
- Direct LED Drive Outputs
- On-Chip Analog Comparator
- Low Power Idle and Power Down Modes
- Brown-Out Detection

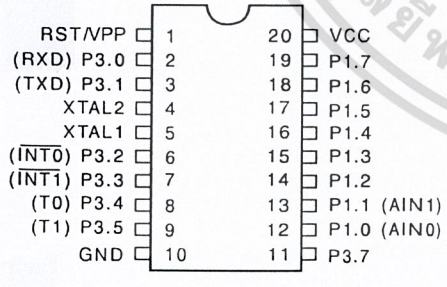
Description

The AT89C4051 is a low-voltage, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 4K Bytes of Flash programmable and erasable read only memory (PEROM). The device is manufactured using Atmel's high density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry standard MCS-51™ instruction set. By combining a versatile 8-bit CPU with Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89C4051 is a powerful microcomputer which provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The AT89C4051 provides the following standard features: 4K Bytes of Flash, 128 bytes of RAM, 15 I/O lines, two 16-bit timer/counters, a five vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, a precision analog comparator, on-chip oscillator and clock circuitry. In addition, the AT89C4051 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software-selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port and interrupt system to continue functioning. The Power Down Mode saves the RAM contents but freezes the oscillator disabling all other chip functions until the next hardware reset.

Pin Configuration

PDIP/SOIC



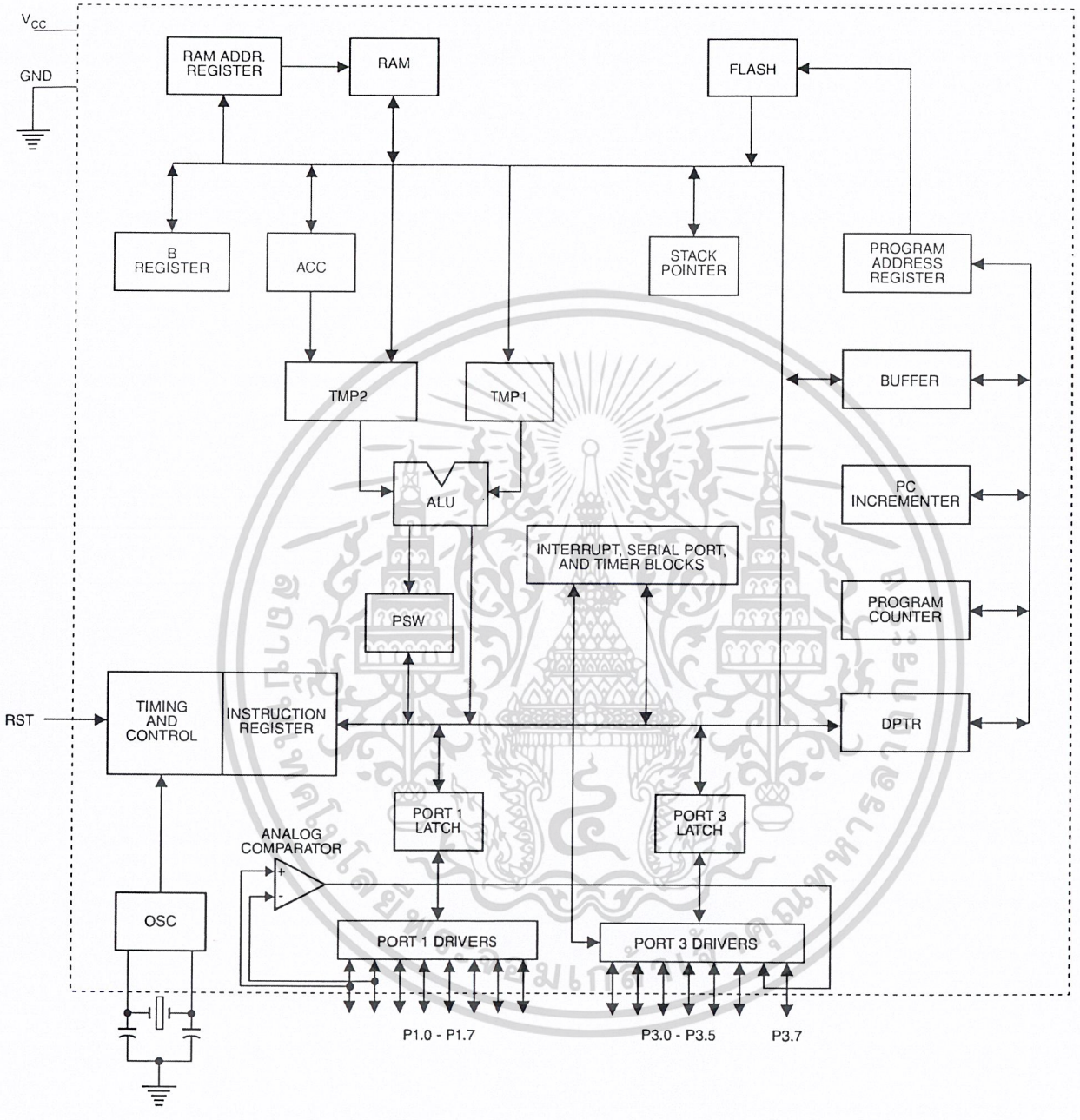
8-Bit Microcontroller with 4K Bytes Flash

AT89C4051
Preliminary

Rev. 1001A–02/98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin Description

V_{CC}
Supply voltage.

GND
Ground.

Port 1
Port 1 is an 8-bit bidirectional I/O port. Port pins P1.2 to P1.7 provide internal pullups. P1.0 and P1.1 require external pullups. P1.0 and P1.1 also serve as the positive input (AIN0) and the negative input (AIN1), respectively, of the on-chip precision analog comparator. The Port 1 output buffers can sink 20 mA and can drive LED displays directly. When 1s are written to Port 1 pins, they can be used as inputs. When pins P1.2 to P1.7 are used as inputs and are externally pulled low, they will source current (I_{IL}) because of the internal pullups.

Port 1 also receives code data during Flash programming and verification.

Port 3
Port 3 pins P3.0 to P3.5, P3.7 are seven bidirectional I/O pins with internal pullups. P3.6 is hard-wired as an input to the output of the on-chip comparator and is not accessible as a general purpose I/O pin. The Port 3 output buffers can sink 20 mA. When 1s are written to Port 3 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL}) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the AT89C4051 as listed below:

Port Pin	Alternate Functions
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	$\overline{INT0}$ (external interrupt 0)
P3.3	$\overline{INT1}$ (external interrupt 1)
P3.4	T0 (timer 0 external input)
P3.5	T1 (timer 1 external input)

Port 3 also receives some control signals for Flash programming and verification.

RST
Reset input. All I/O pins are reset to 1s as soon as RST goes high. Holding the RST pin high for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

Each machine cycle takes 12 oscillator or clock cycles.

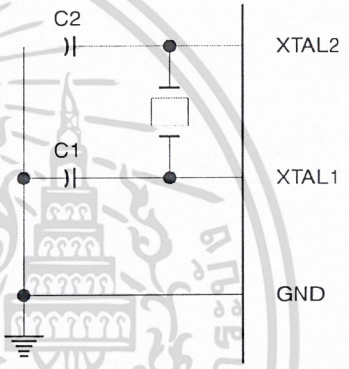
XTAL1
Input to the inverting oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

XTAL2
Output from the inverting oscillator amplifier.

Oscillator Characteristics

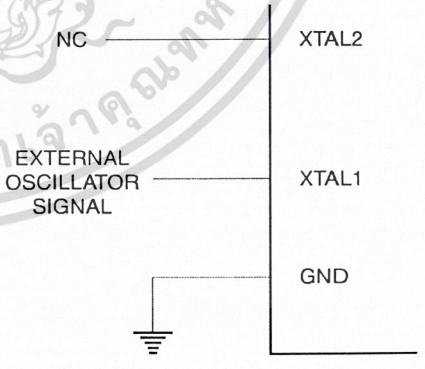
XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 1. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. To drive the device from an external clock source, XTAL2 should be left unconnected while XTAL1 is driven as shown in Figure 2. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum voltage high and low time specifications must be observed.

Figure 1. Oscillator Connections



Note: C1, C2 = 30 pF ± 10 pF for Crystals
= 40 pF ± 10 pF for Ceramic Resonators

Figure 2. External Clock Drive Configuration



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Function Registers

A map of the on-chip memory area called the Special Function Register (SFR) space is shown in the table below.

Note that not all of the addresses are occupied, and unoccupied addresses may not be implemented on the chip. Read accesses to these addresses will in general return random data, and write accesses will have an indeterminate effect.

User software should not write 1s to these unlisted locations, since they may be used in future products to invoke new features. In that case, the reset or inactive values of the new bits will always be 0.

Table 1. AT89C4051 SFR Map and Reset Values

0F8H									0FFH
0F0H	B 00000000								0F7H
0E8H									0EFH
0E0H	ACC 00000000								0E7H
0D8H									0DFH
0D0H	PSW 00000000								0D7H
0C8H									0CFH
0C0H									0C7H
0B8H	IP XXX00000								0BFH
0B0H	P3 11111111								0B7H
0A8H	IE 0XX00000								0AFH
0A0H									0A7H
98H	SCON 00000000	SBUF XXXXXXXX							9FH
90H	P1 11111111								97H
88H	TCON 00000000	TMOD 00000000	TL0 00000000	TL1 00000000	TH0 00000000	TH1 00000000			8FH
80H		SP 00000111	DPL 00000000	DPH 00000000				PCON 0XXX0000	87H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Restrictions on Certain Instructions

The AT89C4051 is an economical and cost-effective member of Atmel's growing family of microcontrollers. It contains 4K bytes of flash program memory. It is fully compatible with the MCS-51 architecture, and can be programmed using the MCS-51 instruction set. However, there are a few considerations one must keep in mind when utilizing certain instructions to program this device.

All the instructions related to jumping or branching should be restricted such that the destination address falls within the physical program memory space of the device, which is 4K for the AT89C4051. This should be the responsibility of the software programmer. For example, LJMP 0FE0H would be a valid instruction for the AT89C4051 (with 4K of memory), whereas LJMP 1000H would not.

1. Branching instructions:
LCALL, LJMP, ACALL, AJMP, SJMP, JMP @A+DPTR

These unconditional branching instructions will execute correctly as long as the programmer keeps in mind that the destination branching address must fall within the physical boundaries of the program memory size (locations 00H to FFFH for the 89C4051). Violating the physical space limits may cause unknown program behavior.

CJNE [...], DJNZ [...], JB, JNB, JC, JNC, JBC, JZ, JNZ With these conditional branching instructions the same rule above applies. Again, violating the memory boundaries may cause erratic execution.

For applications involving interrupts the normal interrupt service routine address locations of the 80C51 family architecture have been preserved.

2. MOVX-related instructions, Data Memory:
The AT89C4051 contains 128 bytes of internal data memory. Thus, in the AT89C4051 the stack depth is limited to 128 bytes, the amount of available RAM. External DATA memory access is not supported in this device, nor is external PROGRAM memory execution. Therefore, no MOVX [...] instructions should be included in the program.

A typical 80C51 assembler will still assemble instructions, even if they are written in violation of the restrictions mentioned above. It is the responsibility of the controller user to know the physical features and limitations of the device being used and adjust the instructions used correspondingly.

Program Memory Lock Bits

On the chip are two lock bits which can be left unprogrammed (U) or can be programmed (P) to obtain the additional features listed in the table below:

Lock Bit Protection Modes[1]

Program Lock Bits			
	LB1	LB2	Protection Type
1	U	U	No program lock features.
2	P	U	Further programming of the Flash is disabled.
3	P	P	Same as mode 2, also verify is disabled.

Note: 1. The Lock Bits can only be erased with the Chip Erase operation.

Idle Mode

In idle mode, the CPU puts itself to sleep while all the on-chip peripherals remain active. The mode is invoked by software. The content of the on-chip RAM and all the special functions registers remain unchanged during this mode. The idle mode can be terminated by any enabled interrupt or by a hardware reset.

P1.0 and P1.1 should be set to '0' if no external pullups are used, or set to '1' if external pullups are used.

It should be noted that when idle is terminated by a hardware reset, the device normally resumes program execution, from where it left off, up to two machine cycles before the internal reset algorithm takes control. On-chip hardware inhibits access to internal RAM in this event, but access to the port pins is not inhibited. To eliminate the possibility of an unexpected write to a port pin when Idle is terminated by reset, the instruction following the one that invokes Idle should not be one that writes to a port pin or to external memory.

Power Down Mode

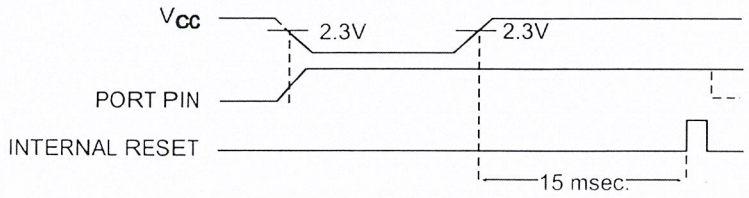
In the power down mode the oscillator is stopped, and the instruction that invokes power down is the last instruction executed. The on-chip RAM and Special Function Registers retain their values until the power down mode is terminated. The only exit from power down is a hardware reset. Reset redefines the SFRs but does not change the on-chip RAM. The reset should not be activated before V_{CC} is restored to its normal operating level and must be held active long enough to allow the oscillator to restart and stabilize.

P1.0 and P1.1 should be set to '0' if no external pullups are used, or set to '1' if external pullups are used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Brown-Out Detection

When V_{CC} drops below the detection threshold, all port pins (except P1.0 and P1.1) are weakly pulled high. When V_{CC} goes back up again, an internal Reset is automatically generated after a delay of typically 15 msec. The nominal brown-out detection threshold is 2.3V ± 10%.



Programming The Flash

The AT89C4051 is shipped with the 4K bytes of on-chip PEROM code memory array in the erased state (i.e., contents = FFH) and ready to be programmed. The code memory array is programmed one byte at a time. *Once the array is programmed, to re-program any non-blank byte, the entire memory array needs to be erased electrically.*

Internal Address Counter: The AT89C4051 contains an internal PEROM address counter which is always reset to 000H on the rising edge of RST and is advanced by applying a positive going pulse to pin XTAL1.

Programming Algorithm: To program the AT89C4051, the following sequence is recommended.

1. Power-up sequence:
   Apply power between V_{CC} and GND pins
   Set RST and XTAL1 to GND
2. Set pin RST to 'H'
   Set pin P3.2 to 'H'
3. Apply the appropriate combination of 'H' or 'L' logic levels to pins P3.3, P3.4, P3.5, P3.7 to select one of the programming operations shown in the PEROM Programming Modes table.

To Program and Verify the Array:

4. Apply data for Code byte at location 000H to P1.0 to P1.7.
5. Raise RST to 12V to enable programming.
6. Pulse P3.2 once to program a byte in the PEROM array or the lock bits. The byte-write cycle is self-timed and typically takes 1.2 ms.
7. To verify the programmed data, lower RST from 12V to logic 'H' level and set pins P3.3 to P3.7 to the appropriate levels. Output data can be read at the port P1 pins.
8. To program a byte at the next address location, pulse XTAL1 pin once to advance the internal address counter. Apply new data to the port P1 pins.
9. Repeat steps 5 through 8, changing data and advancing the address counter for the entire 4K bytes array or until the end of the object file is reached.
10. Power-off sequence:
    set XTAL1 to 'L'
    set RST to 'L'
    Turn V_{CC} power off

$\overline{\text{Data}}$ Polling: The AT89C4051 features $\overline{\text{Data}}$ Polling to indicate the end of a write cycle. During a write cycle, an attempted read of the last byte written will result in the complement of the written data on P1.7. Once the write cycle has been completed, true data is valid on all outputs, and the next cycle may begin. $\overline{\text{Data}}$ Polling may begin any time after a write cycle has been initiated.

Ready/$\overline{\text{Busy}}$: The Progress of byte programming can also be monitored by the RDY/$\overline{\text{BSY}}$ output signal. Pin P3.1 is pulled low after P3.2 goes High during programming to indicate BUSY. P3.1 is pulled High again when programming is done to indicate READY.

Program Verify: If lock bits LB1 and LB2 have not been programmed code data can be read back via the data lines for verification:

1. Reset the internal address counter to 000H by bringing RST from 'L' to 'H'.
2. Apply the appropriate control signals for Read Code data and read the output data at the port P1 pins.
3. Pulse pin XTAL1 once to advance the internal address counter.
4. Read the next code data byte at the port P1 pins.
5. Repeat steps 3 and 4 until the entire array is read.

The lock bits cannot be verified directly. Verification of the lock bits is achieved by observing that their features are enabled.

Chip Erase: The entire PEROM array (4K bytes) and the two Lock Bits are erased electrically by using the proper combination of control signals and by holding P3.2 low for 10 ms. The code array is written with all "1"s in the Chip Erase operation and must be executed before any non-blank memory byte can be re-programmed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reading the Signature Bytes: The signature bytes are read by the same procedure as a normal verification of locations 000H, 001H, and 002H, except that P3.5 and P3.7 must be pulled to a logic low. The values returned are as follows.

(000H) = 1EH indicates manufactured by Atmel
(001H) = 41H indicates 89C4051

Programming Interface

Every code byte in the Flash array can be written and the entire array can be erased by using the appropriate combination of control signals. The write operation cycle is self-timed and once initiated, will automatically time itself to completion.

All major programming vendors offer worldwide support for the Atmel microcontroller series. Please contact your local programming vendor for the appropriate software revision.

Flash Programming Modes

Mode		RST/VPP	P3.2/$\overline{PROG}$	P3.3	P3.4	P3.5	P3.7
Write Code Data[1][3]		12V		L	H	H	H
Read Code Data[1]		H	H	L	L	H	H
Write Lock	Bit - 1	12V		H	H	H	H
	Bit - 2	12V		H	H	L	L
Chip Erase		12V	(2)	H	L	L	L
Read Signature Byte		H	H	L	L	L	L

Notes:
1. The internal PEROM address counter is reset to 000H on the rising edge of RST and is advanced by a positive pulse at XTAL 1 pin.
2. Chip Erase requires a 10-ms $\overline{PROG}$ pulse.
3. P3.1 is pulled Low during programming to indicate RDY/$\overline{BSY}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3. Programming the Flash Memory

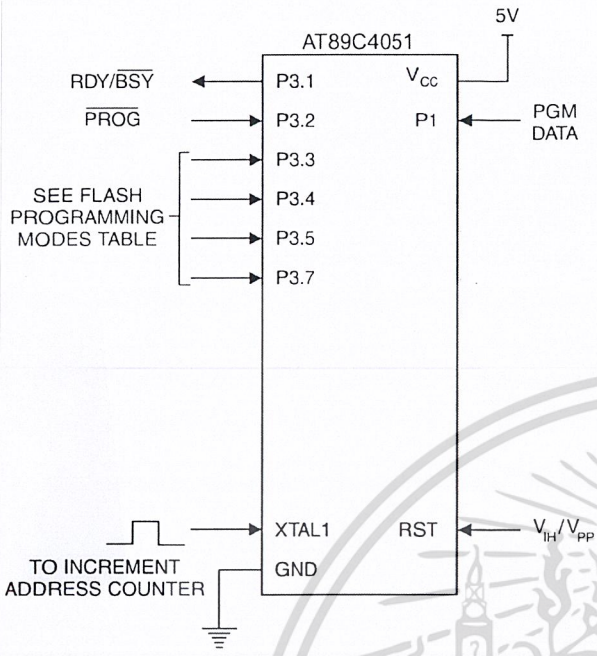
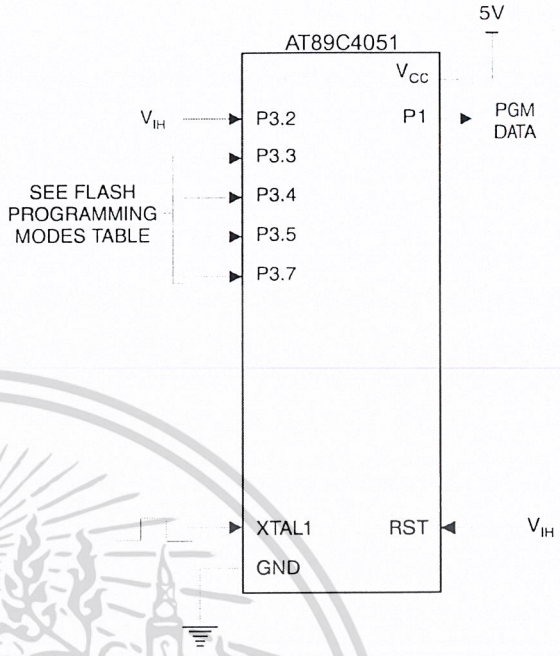


Figure 4. Verifying the Flash Memory



Flash Programming and Verification Characteristics

T_A = 0°C to 70°C, V_{CC} = 5.0 ± 10%

Symbol	Parameter	Min	Max	Units
V_{PP}	Programming Enable Voltage	11.5	12.5	V
I_{PP}	Programming Enable Current		250	µA
t_{DVGL}	Data Setup to $\overline{PROG}$ Low	1.0		µs
t_{GHDX}	Data Hold After $\overline{PROG}$	1.0		µs
t_{EHSH}	P3.4 ($\overline{ENABLE}$) High to V_{PP}	1.0		µs
t_{SHGL}	V_{PP} Setup to $\overline{PROG}$ Low	10		µs
t_{GHSL}	V_{PP} Hold After $\overline{PROG}$	10		µs
t_{GLGH}	$\overline{PROG}$ Width	1	110	µs
t_{ELQV}	$\overline{ENABLE}$ Low to Data Valid		1.0	µs
t_{EHQZ}	Data Float After $\overline{ENABLE}$	0	1.0	µs
t_{GHBL}	$\overline{PROG}$ High to $\overline{BUSY}$ Low		50	ns
t_{WC}	Byte Write Cycle Time		2.0	ms
t_{BHIH}	RDY/$\overline{BSY}$\ to Increment Clock Delay	1.0		µs
t_{IHIL}	Increment Clock High	200		ns

Note: 1. Only used in 12-volt programming mode.

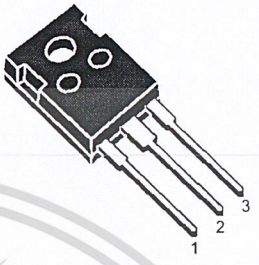
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP460

N-CHANNEL 500V - 0.22Ω - 18.4A TO-247
PowerMesh™ II MOSFET

TYPE	V_{DSS}	$R_{DS(on)}$	I_D
IRFP460	500V	< 0.27Ω	18.4A

- TYPICAL $R_{DS}(on)$ = 0.22Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- NEW HIGH VOLTAGE BENCHMARK
- GATE CHARGE MINIMIZED

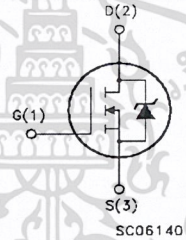


TO-247

DESCRIPTION

The PowerMESH™ II is the evolution of the first generation of MESH OVERLAY™. The layout refinements introduced greatly improve the Ron*area figure of merit while keeping the device at the leading edge for what concerns swithing speed, gate charge and ruggedness.

INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



APPLICATIONS

- SWITH MODE LOW POWER SUPPLIES (SMPS)
- HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- DC-AC CONVERTERS FOR WELDING EQUIPMENT AND UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES AND MOTOR DRIVES

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{DS}	Drain-source Voltage (V_{GS} = 0)	500	V
V_{DGR}	Drain-gate Voltage (R_{GS} = 20 kΩ)	500	V
V_{GS}	Gate- source Voltage	±30	V
I_D	Drain Current (continuos) at T_C = 25°C	18.4	A
I_D	Drain Current (continuos) at T_C = 100°C	11.6	A
I_{DM} (•)	Drain Current (pulsed)	73.6	A
P_{TOT}	Total Dissipation at T_C = 25°C	220	W
	Derating Factor	1.75	W/°C
dv/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	3.5	V/ns
T_{stg}	Storage Temperature	–65 to 150	°C
T_j	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

(•)Pulse width limited by safe operating area

(1)I_{SD} ≤18.4A, di/dt ≤100A/µs, V_{DD} ≤ $V_{(BR)DSS}$, T_j ≤ $T_{JMAX.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL DATA

Rthj-case	Thermal Resistance Junction-case Max	0.57	°C/W
Rthj-amb	Thermal Resistance Junction-ambient Max	30	°C/W
Rthc-sink	Thermal Resistance Case-sink Typ	0.1	°C/W
T_l	Maximum Lead Temperature For Soldering Purpose	300	°C

AVALANCHE CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Max Value	Unit
I_{AR}	Avalanche Current, Repetitive or Not-Repetitive (pulse width limited by T_j max)	20	A
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy (starting T_j = 25 °C, I_D = I_{AR}, V_{DD} = 50 V)	960	mJ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (TCASE = 25 °C UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)

OFF

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source Breakdown Voltage	I_D = 250 µA, V_{GS} = 0	500			V
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current (V_{GS} = 0)	V_{DS} = Max Rating			1	µA
		V_{DS} = Max Rating, T_C = 125 °C			50	µA
I_{GSS}	Gate-body Leakage Current (V_{DS} = 0)	V_{GS} = ±30V			±100	nA

ON (1)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250µA	2	3	4	V
$R_{DS(on)}$	Static Drain-source On Resistance	V_{GS} = 10V, I_D = 9 A		0.22	0.27	Ω
$I_{D(on)}$	On State Drain Current	V_{DS} > $I_{D(on)}$ x $R_{DS(on)max}$, V_{GS} = 10V	18.4			A

DYNAMIC

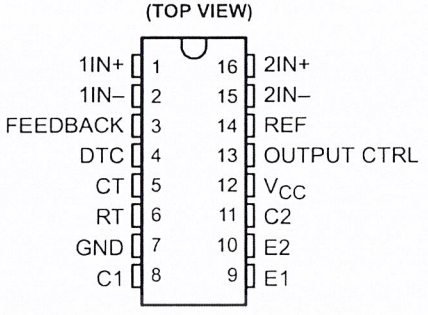
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
g_{fs} (1)	Forward Transconductance	V_{DS} > $I_{D(on)}$ x $R_{DS(on)max}$, I_D = 9A		18		S
C_{iss}	Input Capacitance	V_{DS} = 25V, f = 1 MHz, V_{GS} = 0		2980		pF
C_{oss}	Output Capacitance			410		pF
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance			58		pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SLVS074B – JANUARY 1983 – REVISED JULY 1999

- Complete PWM Power Control Circuitry
- Uncommitted Outputs for 200-mA Sink or Source Current
- Output Control Selects Single-Ended or Push-Pull Operation
- Internal Circuitry Prohibits Double Pulse at Either Output
- Variable Dead Time Provides Control Over Total Range
- Internal Regulator Provides a Stable 5-V Reference Supply With 5% Tolerance
- Circuit Architecture Allows Easy Synchronization

D, N, NS, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



description

The TL494 incorporates all the functions required in the construction of a pulse-width-modulation (PWM) control circuit on a single chip. Designed primarily for power-supply control, this device offers the flexibility to tailor the power-supply control circuitry to a specific application.

The TL494 contains two error amplifiers, an on-chip adjustable oscillator, a dead-time control (DTC) comparator, a pulse-steering control flip-flop, a 5-V, 5%-precision regulator, and output-control circuits.

The error amplifiers exhibit a common-mode voltage range from –0.3 V to V_{CC} – 2 V. The dead-time control comparator has a fixed offset that provides approximately 5% dead time. The on-chip oscillator can be bypassed by terminating RT to the reference output and providing a sawtooth input to CT, or it can drive the common circuits in synchronous multiple-rail power supplies.

The uncommitted output transistors provide either common-emitter or emitter-follower output capability. The TL494 provides for push-pull or single-ended output operation, which can be selected through the output-control function. The architecture of this device prohibits the possibility of either output being pulsed twice during push-pull operation.

The TL494C is characterized for operation from 0°C to 70°C. The TL494I is characterized for operation from –40°C to 85°C.

FUNCTION TABLE

INPUT TO OUTPUT CTRL	OUTPUT FUNCTION
V_I = GND	Single-ended or parallel output
V_I = V_{ref}	Normal push-pull operation



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

TEXAS INSTRUMENTS
POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

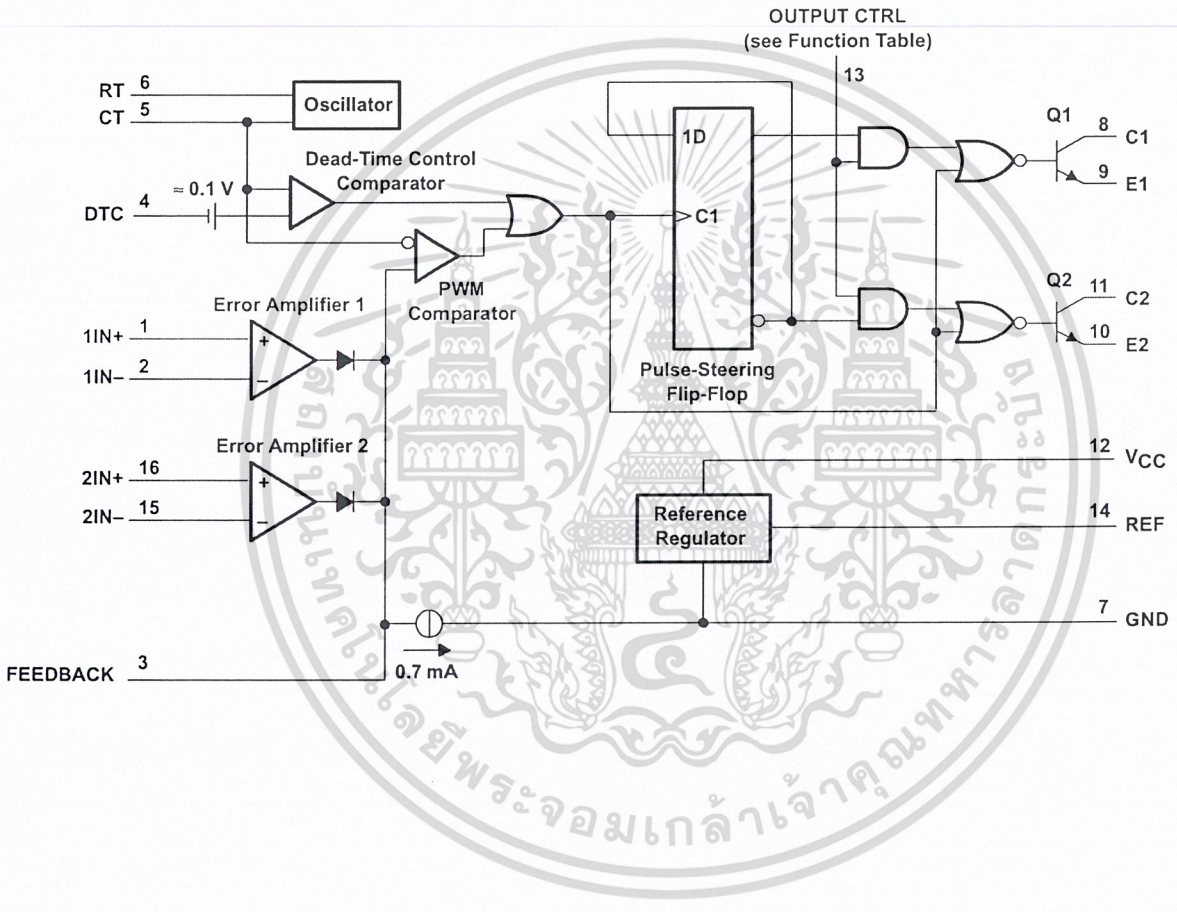
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AVAILABLE OPTIONS

T_A	PACKAGED DEVICES				CHIP FORM (Y)
	SMALL OUTLINE (D)	PLASTIC DIP (N)	SMALL OUTLINE (NS)	SHRINK SMALL OUTLINE (PW)	
0°C to 70°C	TL494CD	TL494CN	TL494CNS	TL494CPW	TL494Y
–40°C to 85°C	TL494ID	TL494IN	—	—	—

The D, NS, and PW packages are available taped and reeled. Add the suffix R to device type (e.g., TL494CDR). Chip forms are tested at 25°C.

functional block diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

		TL494	UNIT
Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)		41	V
Amplifier input voltage, V_I		V_{CC}+0.3	V
Collector output voltage, V_O		41	V
Collector output current, I_O		250	mA
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Notes 2 and 3)	D package	73	°C
	N package	88	
	NS package	64	
	PW package	108	
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	D, N, or PW package	260	°C
Storage temperature range, T_{stg}		–65 to 150	°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

NOTES: 1. All voltage values, except differential voltages, are with respect to the network ground terminal.
2. Maximum power dissipation is a function of $T_J(max)$, θ_{JA}, and T_A. The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_J(max) – T_A)/\theta_{JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can impact reliability.
3. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51, except for through-hole packages, which use a trace length of zero.

recommended operating conditions

		TL494		UNIT
		MIN	MAX	
Supply voltage, V_{CC}		7	40	V
Amplifier input voltage, V_I		–0.3	V_{CC}–2	V
Collector output voltage, V_O			40	V
Collector output current (each transistor)			200	mA
Current into feedback terminal			0.3	mA
Oscillator frequency, f_{osc}		1	300	kHz
Timing capacitor, C_T		0.47	10000	nF
Timing resistor, R_T		1.8	500	kΩ
Operating free-air temperature, T_A	TL494C	0	70	°C
	TL494I	–40	85	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range, V_{CC} = 15 V, f = 10 kHz (unless otherwise noted)

reference section

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494C, TL494I			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Output voltage (REF)	I_O = 1 mA	4.75	5	5.25	V
Input regulation	V_{CC} = 7 V to 40 V		2	25	mV
Output regulation	I_O = 1 mA to 10 mA		1	15	mV
Output voltage change with temperature	ΔT_A = MIN to MAX		2	10	mV/V
Short-circuit output current§	REF = 0 V		25		mA

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
‡ All typical values, except for parameter changes with temperature, are at T_A = 25°C.
§ Duration of the short circuit should not exceed one second.

oscillator section, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ (see Figure 1)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	TL494, TL494I			UNIT
		MIN	TYP‡	MAX	
Frequency			10		kHz
Standard deviation of frequency¶	All values of V_{CC}, CT, RT, and T_A constant		100		Hz/kHz
Frequency change with voltage	V_{CC} = 7 V to 40 V, T_A = 25°C		1		Hz/kHz
Frequency change with temperature#	ΔT_A = MIN to MAX			10	Hz/kHz

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
‡ All typical values, except for parameter changes with temperature, are at T_A = 25°C.
¶ Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} (x_n - \overline{X})^2}{N - 1}}$$

Temperature coefficient of timing capacitor and timing resistor are not taken into account.

error-amplifier section (see Figure 2)

PARAMETER	TEST CONDITIONS			TL494, TL494I			UNIT
				MIN	TYP‡	MAX	
Input offset voltage	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V				2	10	mV
Input offset current	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V				25	250	nA
Input bias current	V_O (FEEDBACK) = 2.5 V				0.2	1	μA
Common-mode input voltage range	V_{CC} = 7 V to 40 V			–0.3 to V_{CC}–2			V
Open-loop voltage amplification	ΔV_O = 3 V,	R_L = 2 kΩ,	V_O = 0.5 V to 3.5 V	70	95		dB
Unity-gain bandwidth	V_O = 0.5 V to 3.5 V,	R_L = 2 kΩ			800		kHz
Common-mode rejection ratio	ΔV_O = 40 V,	T_A = 25°C		65	80		dB
Output sink current (FEEDBACK)	V_{ID} = –15 mV to –5 V,	V (FEEDBACK) = 0.7 V		0.3	0.7		mA
Output source current (FEEDBACK)	V_{ID} = 15 mV to 5 V,	V (FEEDBACK) = 3.5 V		–2			mA

‡ All typical values, except for parameter changes with temperature, are at T_A = 25°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TLP521GB, TLP521-2GB, TLP521-4GB
TLP521, TLP521-2, TLP521-4

HIGH DENSITY MOUNTING PHOTOTRANSISTOR OPTICALLY COUPLED ISOLATORS

APPROVALS

- UL recognised, File No. E91231

DESCRIPTION

The TLP521, TLP521-2, TLP521-4 series of optically coupled isolators consist of infrared light emitting diodes and NPN silicon photo transistors in space efficient dual in line plastic packages.

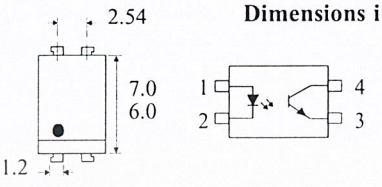
FEATURES

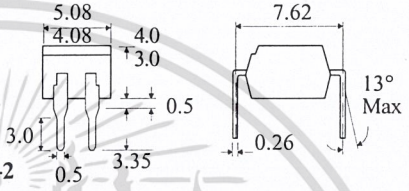
- Options :-
  10mm lead spread - add G after part no.
  Surface mount - add SM after part no.
  Tape&reel - add SMT&R after part no.
- High Current Transfer Ratio (50% min)
- High Isolation Voltage ($5.3kV_{RMS}$, $7.5kV_{PK}$)
- High BV_{CEO} (55Vmin)
- All electrical parameters 100% tested
- Custom electrical selections available

APPLICATIONS

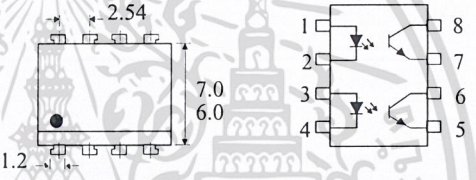
- Computer terminals
- Industrial systems controllers
- Measuring instruments
- Signal transmission between systems of different potentials and impedances

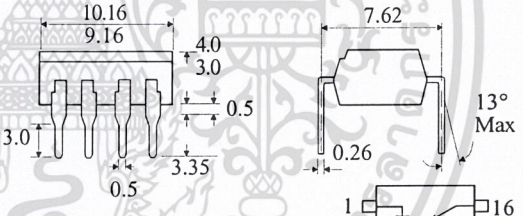
TLP521 Dimensions in mm



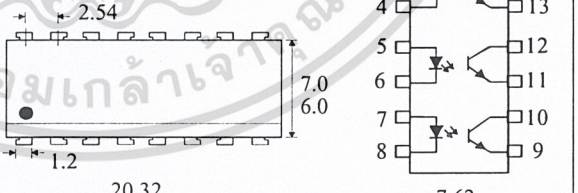


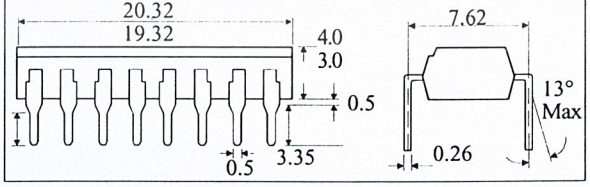
TLP521-2



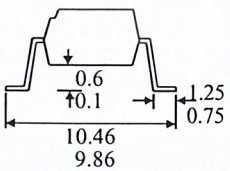


TLP521-4

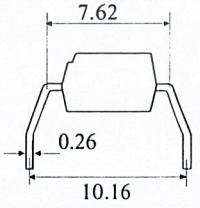




OPTION SM
SURFACE MOUNT



OPTION G



ISOCOM COMPONENTS LTD
Unit 25B, Park View Road West,
Park View Industrial Estate, Brenda Road
Hartlepool, Cleveland, TS25 1YD
Tel: (01429) 863609 Fax :(01429) 863581

ISOCOM INC
1024 S. Greenville Ave, Suite 240,
Allen, TX 75002 USA
Tel: (214) 495-0755 Fax: (214) 495-0901
e-mail info@isocom.com
http://www.isocom.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS
(25°C unless otherwise specified)

Storage Temperature	-55°C to + 125°C
Operating Temperature	-55°C to + 100°C
Lead Soldering Temperature (1/16 inch (1.6mm) from case for 10 secs)	260°C

INPUT DIODE

Forward Current	50mA
Reverse Voltage	5V
Power Dissipation	70mW

OUTPUT TRANSISTOR

Collector-emitter Voltage BV_{CEO}	55V
Emitter-collector Voltage BV_{ECO}	6V
Power Dissipation	150mW

POWER DISSIPATION

Total Power Dissipation (derate linearly 2.67mW/°C above 25°C)	200mW

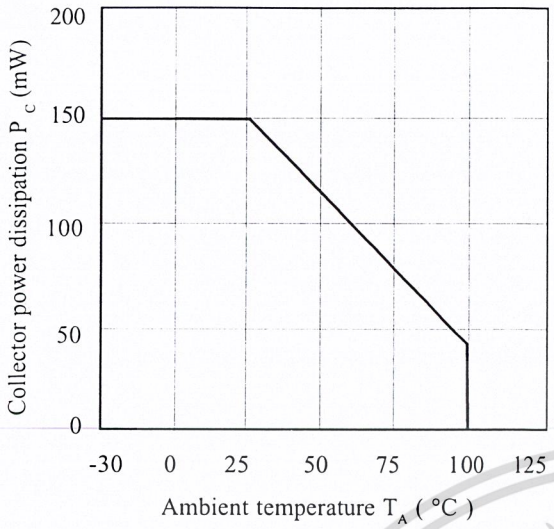
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C Unless otherwise noted)

	PARAMETER	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITION
Input	Forward Voltage (V_F)	1.0	1.15	1.3	V	I_F = 10mA
	Reverse Voltage (V_R)	5			V	I_R = 10μA
	Reverse Current (I_R)			10	μA	V_R = 5V
Output	Collector-emitter Breakdown (BV_{CEO}) (Note 2)	55			V	I_C = 0.5mA
	Emitter-collector Breakdown (BV_{ECO})	6			V	I_E = 100μA
	Collector-emitter Dark Current (I_{CEO})			100	nA	V_{CE} = 24V
Coupled	Current Transfer Ratio (CTR) (Note 2)					
	TLP521, TLP521-2, TLP521-4	50		600	%	5mA I_F, 5V V_{CE}
	CTR selection available BL	200		600	%	
	GB	100		600	%	
	GB	30			%	1mA I_F, 0.4V V_{CE}
	Collector-emitter Saturation Voltage $V_{CE\ (SAT)}$			0.4	V	8mA I_F, 2.4mA I_C
	-GB			0.4	V	1mA I_F, 0.2mA I_C
	Input to Output Isolation Voltage V_{ISO}	5300			V_{RMS}	See note 1
		7500			V_{PK}	See note 1
	Input-output Isolation Resistance R_{ISO}	$5x10^{10}$			Ω	V_{IO} = 500V (note 1)
	Rise Time tr		2		μs	V_{CC} = 10V ,
	Fall Time tf		3		μs	I_C = 2mA, R_L = 100Ω
	Turn-on Time ton		3		μs	
	Turn-off Time toff		3		μs	

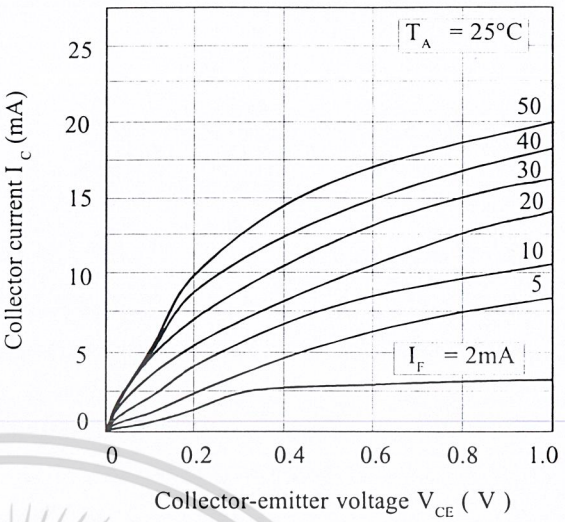
Note 1 Measured with input leads shorted together and output leads shorted together.
Note 2 Special Selections are available on request. Please consult the factory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

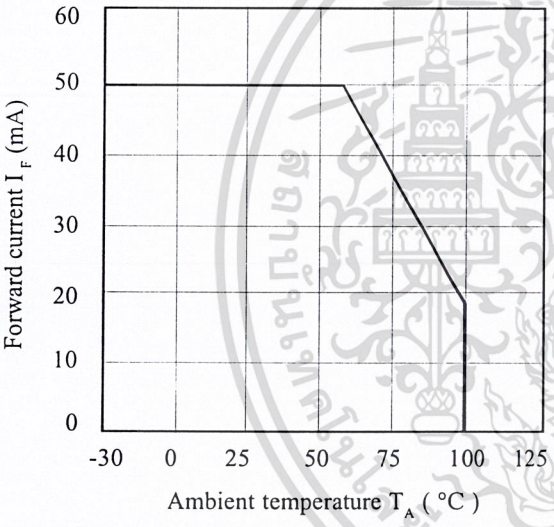
Collector Power Dissipation vs. Ambient Temperature



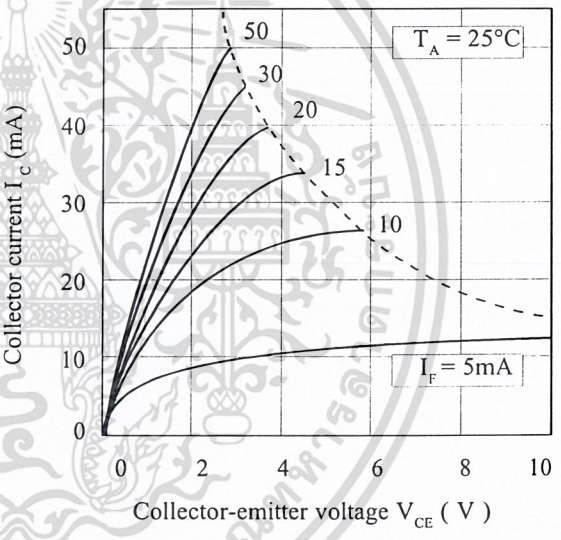
Collector Current vs. Low Collector-emitter Voltage



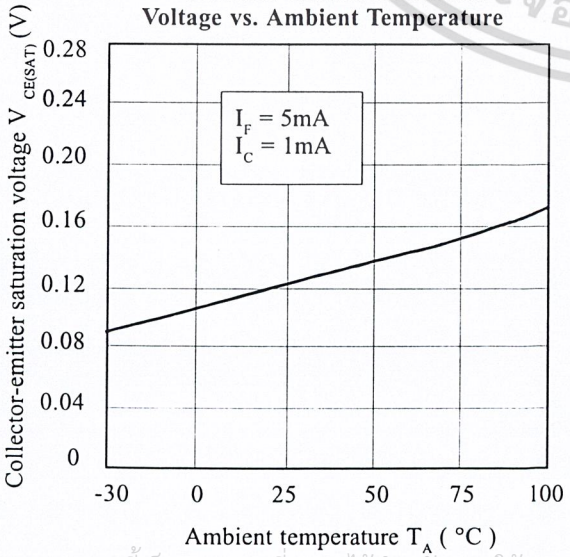
Forward Current vs. Ambient Temperature



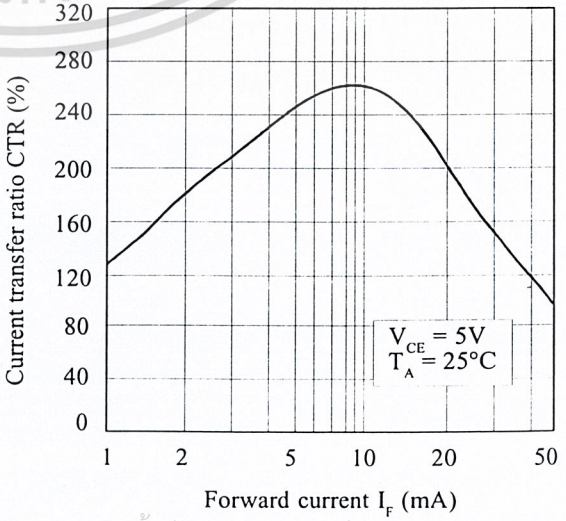
Collector Current vs. Collector-emitter Voltage



Collector-emitter Saturation Voltage vs. Ambient Temperature



Current Transfer Ratio vs. Forward Current



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้