



เครื่องหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

Induction Melting



โดย

นาย ธานี หนุดำ 37013113

นาย วีรพัฒน์ ชลเจริญ 37013127

นาย สุธีพงศ์ โพนนา 37013175

วัน เดือน ปี.....30.09.2541.....

เลขทะเบียน.....038216.....

เลขเรียกหนังสือ.....139236 ดิ517ด.....

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

ปีการศึกษา 2539

เครื่องหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

Induciton Melting



นาย ธานี หนุดำ 37013113

นาย วีรพัฒน์ ชลเจริญ 37013127

นาย สุรียงค์ โทชนา 37013175

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วิริยะ พิเชษฐจำริณ

อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

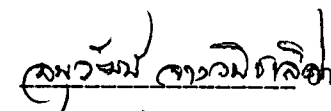
เรื่อง เครื่องหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

โดย



นายธานี	หนูดำ	37013113
นายวีรพัฒน์	ชลเจริญ	37013127
นายสุธีพงศ์	โพชนา	37013175


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. วีริยะ พิเชษฐจำเรียม)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำความร้อนและรีโซแนนซ์	2
2.1 หลักการเบื้องต้น	2
2.2 ผลของสกินเอฟเฟค	6
2.3 ความหนาแน่นของกระแส เส้นแรงแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.4 ผลรวมของกระแส	10
2.5 การรีโซแนนซ์	13
บทที่ 3 การออกแบบหม้อแปลง	22
3.1 ขนาดของตัวหม้อแปลง	22
3.2 ประสิทธิภาพที่เหมาะสม	22
3.3 การคำนวณขนาดของหม้อแปลงในเทอมของพื้นที่แกนที่ใช้งาน	22
3.4 ผลของความถี่กับขนาดของหม้อแปลง	24
3.5 การคำนวณหาจำนวนรอบ	24
3.6 ขนาดของตัวนำ	25
3.7 เทคนิคการพันขดลวดหม้อแปลง	26
3.8 ผลจากสกินเอฟเฟค และความถี่ผิวของตัวนำ	29
3.9 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ	33
บทที่ 4 เรคตีไฟเออร์ และอินเวอร์เตอร์	35
4.1 วงจรเรคตีไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น	35
4.2 วงจรเรคตีไฟเออร์แบบเต็มคลื่น	36
4.3 ระบบฟิลเตอร์ที่ใช้ในวงจรจ่ายไฟตรง	38
4.4 อินเวอร์เตอร์	42
บทที่ 5 ไอจีบีที	44
5.1 โครงสร้างไอจีบีที	44
5.2 ลักษณะการทำงาน	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
5.3 คุณสมบัติในการสวิตช์	47
5.4 ขอบเขตปลอดภัยการทำงาน	49
5.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการทำงานของไอจีบีที กับอุปกรณ์สวิตช์ประเภทอื่น	49
5.6 การเปรียบเทียบของกำลังงานสูญเสียในภาวะออน	50
บทที่ 6 วงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนของไอจีบีที	52
6.1 วงจรควบคุมการขับเคลื่อนของไอจีบีที	52
6.2 พื้นฐานการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานไอจีบีที	56
บทที่ 7 ผลการทดลอง	57
บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	63
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รูปวงจรการต่ออุปกรณ์และรูปภาพชิ้นงานจริง	
ภาคผนวก ข. ข้อมูลตัวอุปกรณ์ไอจีบีที	
ภาคผนวก ค. ข้อมูลและตารางขนาดเบอร์ของตัวนำ	
ภาคผนวก ง. Tranformer Area Product	
ภาคผนวก จ. ข้อมูลแกนเฟอร์ไรต์ของบริษัทผู้ผลิตและเบอร์เทียบ	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

การหลอมโลหะโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ

นายธานี หนูคำ

นายวีรพัฒน์ ชลเจริญ

นายสุธีพงศ์ โภชนา

ดร. วิริยะ พิเศษฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

จากทฤษฎีของฟาราเดย์ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเตาหลอมโลหะโดยการอาศัยการเหนี่ยวนำ ซึ่งหลักการพื้นฐานจะเป็นการอาศัยการเหนี่ยวนำของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้น ภายในชิ้นวัสดุที่จะทำการหลอมจนเกิดความร้อน ในการหลอมโลหะโดยวิธีนี้จำเป็นต้องทำงานที่ความถี่ไซเรนเนส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุด แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟสลับจะถูกแปลงให้เป็นแรงดันไฟตรงโดยวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ หลังจากนั้นจะถูกแปลงกลับเป็นไฟสลับที่มีความถี่สูงจ่ายยังโหลดอีกทีโดยวงจรอินเวอร์เตอร์

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายเข้าไปในแท่งตัวนำ	3
รูป 2.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด	3
รูป 2.3 ผลของสนามเส้นแรงแม่เหล็กของสารไม่เป็นแม่เหล็กและสารที่เป็นแม่เหล็ก	4
รูป 2.4 กระแสไหลวนเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำ	5
รูป 2.5 แผ่นชิ้นงานที่มีการวางตัวนำตามแนวแกน X	6
รูป 2.6 ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับความถี่	8
รูป 2.7 ค่าความสูญเสียกับความถี่	12
รูป 2.8 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับอนุกรม LCR	13
รูป 2.9 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์กระแสและมุมเฟสกับความถี่	14
รูป 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_R , V_C และ V_L กับความถี่	16
รูป 2.11 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร LCR รีโซแนนซ์	17
รูป 2.12 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นของกระแสที่จูดรีโซแนนซ์ของวงจร LCR ขนาน	18
รูป 2.13 แสดงวงจรปกติของการต่อแบบ LCR ขนาน	19
รูป 2.14 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อความถี่	20
รูป 3.1 แสดงการกำหนดจำนวนชั้นในพอร์ซัน	26
รูป 3.2 แสดงการลดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของฟลักซ์รั่วโดยการแบ่งครึ่งขดลวดปฐมภูมิ	26
รูป 3.3 แสดงการลดจำนวนชั้นในหนึ่งพอร์ซันลงไปอีกโดยการแบ่งครึ่งขดทุติยภูมิ	27
รูป 3.4 แสดงค่า F_r ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นในหนึ่งพอร์ซัน	27
รูป 3.5 แสดงลักษณะพอร์ซันที่มีจำนวนชั้นเท่ากับครึ่งชั้น	28
รูป 3.6 แสดงการพันขดลวดโดยใช้ขดลวดทองแดงขนานกัน	28
รูป 3.7 แสดงความเหมาะสมของขดลวดทองแดงกับจำนวนชั้นของขดลวดที่ค่า $F_r = 1.5$	30
รูป 3.8 แสดงความเหมาะสมของสตริปทองแดงกับจำนวนชั้นที่ค่า $F_r = 1.5$	31
รูป 3.9 ค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วน F_r ของขดลวดทองแดงและสตริปทองแดงที่ F_r ต่ำกว่า 1.5	32
รูป 3.10 แสดงรูปคลื่นแบบต่างๆค่ากระแสอาร์เอ็มเอสและค่ากระแสเฉลี่ย	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDUCTION MELTING

Thanee Nudum

Weerapat Cholcharean

Sutepong Pochana

Dr. Viriya Pichetjumreon adviser

Anuwat Jangwanitlert

1996

Abstract

Faraday's law is applied for induction melting . Basically an induction melting is a melting that melts metal using electro-magnetic induction . This electro-magnetic applied eddy current to heat energy for melts metal . The induction melting must works at the resonant frequency for maximum efficiency . AC voltage will be changed by the diode bridge rectifier into DC voltage afterthat it changed again by inverter . The power output of inverter is used to generated electro-magnetic .

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่จ่ายเข้าไปในแท่งตัวนำ	3
รูป 2.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด	3
รูป 2.3 ผลของสนามเส้นแรงแม่เหล็กของสารไม่เป็นแม่เหล็กและสารที่เป็นแม่เหล็ก	4
รูป 2.4 กระแสไหลวนเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำ	5
รูป 2.5 แผ่นชิ้นงานที่มีการวางตัวนำตามแนวแกน X	6
รูป 2.6 ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับความถี่	8
รูป 2.7 ค่าความสูญเสียกับความถี่	12
รูป 2.8 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับอนุกรม LCR	13
รูป 2.9 แสดงกราฟอิมพีแดนซ์กระแสและมุมเฟสกับความถี่	14
รูป 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_R , V_C และ V_L กับความถี่	16
รูป 2.11 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร LCR รีโซแนนซ์	17
รูป 2.12 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปคลื่นของกระแสที่จตุรีโซแนนซ์ของวงจร LCR ขนาน	18
รูป 2.13 แสดงวงจรปกติของการต่อแบบ LCR ขนาน	19
รูป 2.14 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์และกระแสต่อความถี่	20
รูป 3.1 แสดงการกำหนดจำนวนชั้นในพอร์ซัน	26
รูป 3.2 แสดงการลดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของฟลักซ์รั่วโดยการแบ่งครึ่งขดลวดปฐมภูมิ	26
รูป 3.3 แสดงการลดจำนวนชั้นในหนึ่งพอร์ซันลงไปอีกโดยการแบ่งครึ่งขดทุติยภูมิ	27
รูป 3.4 แสดงค่า F_r ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นในหนึ่งพอร์ซัน	27
รูป 3.5 แสดงลักษณะพอร์ซันที่มีจำนวนชั้นเท่ากับครึ่งชั้น	28
รูป 3.6 แสดงการพันขดลวดโดยใช้ขดลวดทองแดงขนานกัน	28
รูป 3.7 แสดงความเหมาะสมของขดลวดทองแดงกับจำนวนชั้นของขดลวดที่ค่า $F_r = 1.5$	30
รูป 3.8 แสดงความเหมาะสมของสตริปทองแดงกับจำนวนชั้นที่ค่า $F_r = 1.5$	31
รูป 3.9 ค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วน F_r ของขดลวดทองแดงและสตริปทองแดงที่ F_r ต่ำกว่า 1.5	32
รูป 3.10 แสดงรูปคลื่นแบบต่างๆค่ากระแสอาร์เอ็มเอสและค่ากระแสเฉลี่ย	33

	หน้า
รูป 3.11 แสดงแฟกเตอร์อุณหภูมิความต้านทานขดลวดทองแดง	34
รูป 4.1 การใช้ไดโอดในวงจรเรกติไฟเออร์และแสดงสัญญาณรูปคลื่นของกระแสและแรงดัน	35
รูป 4.2 วงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงที่มีแทปกึ่งกลาง	36
รูป 4.3 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์	37
รูป 4.4 การใส่ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์	38
รูป 4.5 แสดงผลต่อโหลดที่มีการต่อวงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ C เพียงตัวเดียว	38
รูป 4.6 วงจรฟิลเตอร์ใช้ R-C ประกอบเป็นรูป Π และ T	39
รูป 4.7 วงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ L, C ประกอบกันและการใช้ตัวเหนี่ยวนำฟิลเตอร์กระแสได้ราบเรียบ	40
รูป 4.8 กราฟแสดงผลของการใช้ L หรือ C เป็นฟิลเตอร์	41
รูป 4.9 แสดงผลของระดับเอาท์พุทซึ่งการทำงานในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์	42
รูป 5.1 แสดงโครงสร้างของไอจีบีที	44
รูป 5.2 ก สัญลักษณ์ของ n chanal IGBT ข วงจรสมมูลย์	45 45
รูป 5.3 คุณสมบัติของแรงดันและกระแสทางเอาท์พุท	46
รูป 5.4 แสดงคุณลักษณะของ i_d และ V_s	47
รูป 5.5 สภาวะการนำกระแส	48
รูป 5.6 สภาวะการหยุดนำกระแส	48
รูป 5.7 แสดงด้านการทำงานที่ปลอดภัยของไอจีบีที	49
รูป 5.8 เปรียบเทียบความต่างศักย์ตกคร่อมในสภาวะออนของมอสเฟตและไอจีบีที	50
รูป 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตัวถังกับค่าคิวดีไซ์เกิ้ล	51
รูป 6.1 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี เบอร์ TL 494	52
รูป 6.2 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL 494	53
รูป 6.3 แสดงการทำงานของวงจรเดดทามย์	54
รูป 6.4 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	56
รูป 7.1 รูปสัญญาณขั้วเกทไอจีบีทีตัวที่ 1 และ ตัวที่ 4	57
รูป 7.2 รูปสัญญาณขั้วเกทไอจีบีทีตัวที่ 2 และตัวที่ 3	57
รูป 7.3 รูปสัญญาณขั้วเกทเปรียบเทียบระหว่าง ไอจีบีทีทั้งสองตัว	58

	หน้า
รูป 7.4 แสดงแรงดันอินพุทของหม้อแปลง	58
รูป 7.5 แสดงกระแสอินพุทของหม้อแปลง	59



บทที่ 1

บทนำ

เครื่องหลอมโลหะเหนียวนำ สามารถทำให้เกิดความร้อนได้โดยอาศัยทฤษฎีของฟาราเดย์ คือ เมื่อจ่ายไฟสลับเข้าไปยังขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและจะใช้ผลจากกระแสเอ็ดดี้ (eddy current) นี้ไหลวนในตัวชิ้นงานเป็นส่วนทำให้เกิดความร้อนที่ตัวชิ้นงาน โดยจะป้อนกระแสและแรงดันผ่านวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ความถี่สูงให้ได้ความถี่ที่จุกรีโซแนนซ์ ซึ่งจะเป็จุดให้เกิดกำลังสูงสุด โดยจะมีหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสูงสุดต่อไว้เพื่อเพิ่มกระแสและจะจ่ายไปสู่ชุดเบ้าหลอม เพื่อให้เกิดการเหนียวนำให้ชิ้นงานต่อไป

ส่วนของวงจรสร้างพัลส์ จะใช้สร้างพัลส์เพื่อควบคุมการทำงานเป็นสวิทซ์ของ IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor) จะศึกษารายละเอียดได้ภายในเล่ม

ข้อดีที่จะเห็นได้ชัดจากเครื่องหลอมโลหะแบบเหนียวนำก็คือ ให้ความร้อนได้เร็ว มีค่าการสูญเสียน้อยกว่า เริ่มเดินเครื่องได้สะดวก ใช้พื้นที่ในการทำงานน้อย เงียบ ปลอดภัย ค่าบำรุงรักษาต่ำ ไม่มีเขม่าควัน ไม่มีก๊าซพิษจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ส่วนประกอบหลังการหลอมไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการหลอมโลหะโดยการเหนียวนำที่ความสูงโดยการถี่ใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งศึกษารายละเอียดต่างๆได้ตามบทต่างๆต่อไปนี้

- บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงโครงงานต่างๆไป
- บทที่ 2 ทฤษฎีการเหนียวนำความร้อน และการรีโซแนนซ์
- บทที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง การออกแบบหม้อแปลง เทคนิคการพันหม้อแปลง
- บทที่ 4 เรคตีไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์
- บทที่ 5 ไอจีบีที
- บทที่ 6 วงจรควบคุมสัญญาณเกิดของ ไอจีบีที
- บทที่ 7 ผลการทดลอง ลักษณะรูปคลื่นกระแสและแรงดัน
- บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองรวมไปถึงข้อเสนอแนะต่างๆเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีการเหนี่ยวนำความร้อนและวงจรรีโซแนนซ์

2.1 หลักการเบื้องต้นของการให้ความร้อน

การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ

1) การให้พลังงานความร้อนทางอ้อมอาศัยการพาความร้อน โดยให้ความร้อนที่ตัวเบ้าหลอมแล้วค่อยถ่ายเทความร้อนจากตัวเบ้าหลอมไปสู่ตัวชิ้นงาน

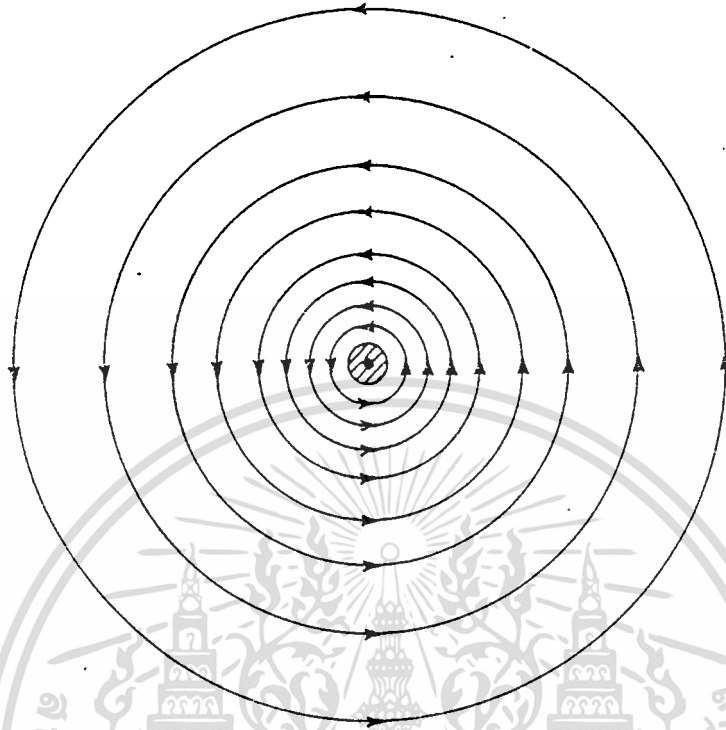
2) การให้พลังงานความร้อนโดยใช้ การฮีสเทอรีซิสของแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis) การให้พลังงานความร้อนทางอ้อมนั้นในตอนแรกจะผลิตความร้อนให้เกิดขึ้น ในวัสดุที่เป็นสารไม่เป็นแม่เหล็ก (Nonmagnetic) เช่น ทองแดง (Copper) , เหล็ก สแตนเลส (Stainless steel) , เหล็กคาร์บอน (Carbon steel) หลังจากนั้นพลังงานความร้อนก็จะถูกถ่ายเทไปยังชิ้นงานที่จะหลอมเหลวต่อไป

ส่วนการให้พลังงานความร้อนโดยใช้ การฮีสเทอรีซิสของแม่เหล็กนั้นจะเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานที่ต้องการจะหลอมเหลว ชิ้นงานจะต้องเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) การเหนี่ยวนำในชิ้นงานนี้ทำให้เกิดการขัดสีของโมเลกุลตามความถี่ของกระแสไฟฟ้า จนกระทั่งทำให้เกิดความร้อนในตัวชิ้นงานนั้นๆ

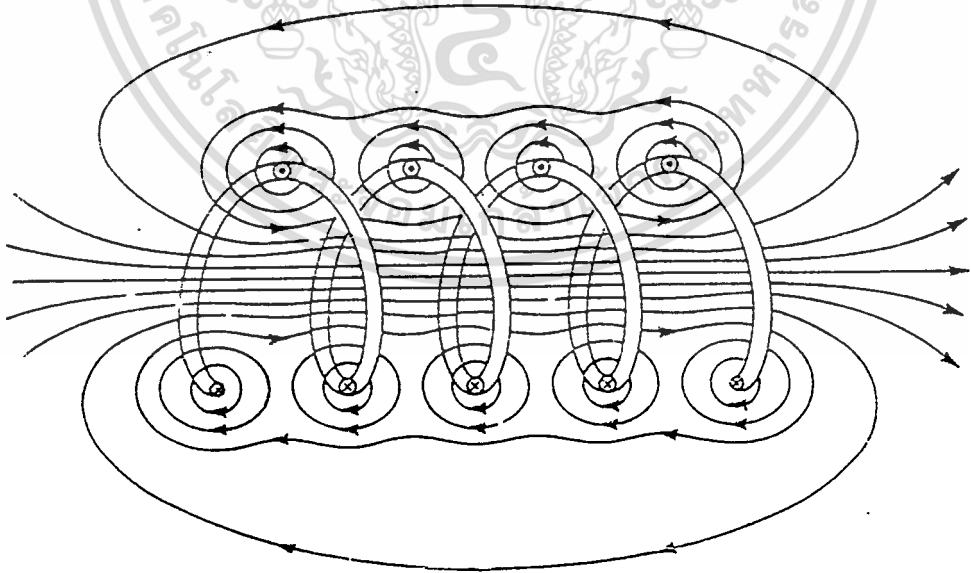
สำหรับทฤษฎีพื้นฐานก็จะอาศัยการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนพิจารณาจากสูตร

$$VI = I^2 R \quad \dots(2.1)$$

เมื่อเราจ่ายไฟกระแสตรงเข้าไปในตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆแท่งตัวนำซึ่งเป็นไปตามกฎมือขวา ที่บริเวณใกล้ๆกับแท่งตัวนำจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงกว่าจุดอื่น และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ความเข้มของสนามแม่เหล็กยังขึ้นอยู่กับกระแสไฟที่จ่ายเข้าไปยังแท่งตัวนำด้วย รูปที่ 2.1 ถ้าเราจ่ายไฟตรงไปยังขดลวดโซลินอยด์ ผลที่เกิดขึ้นคือที่ภายในขดลวดจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าบริเวณภายนอกขดลวด รูปที่ 2.2

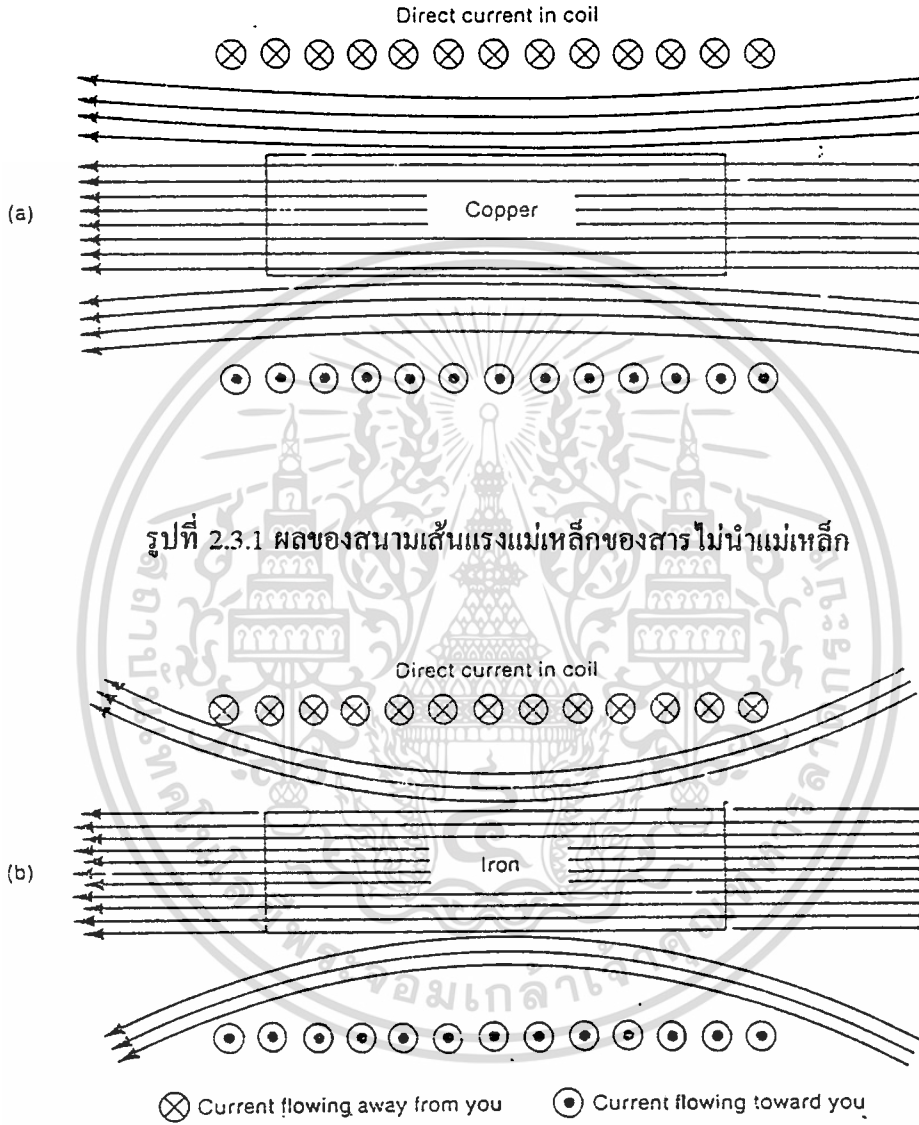


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็ก
ในแท่งตัวนำทรงกระบอก



รูปที่ 2.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3.1 ผลของสนามเส้นแรงแม่เหล็กของสารไม่นำแม่เหล็ก

รูปที่ 2.3.2 ผลของสนามแม่เหล็กของสารนำแม่เหล็ก

พิจารณาเมื่อนำเอาแท่งตัวนำไปใส่ไว้ในคอยล์ที่เราจ่ายไฟกระแสตรงเข้าไป ถ้าแท่งตัวนำไม่เป็นสารแม่เหล็กจะสังเกตเห็นว่าจะไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก รูปที่ 2.3.1 เมื่อเราเปลี่ยนแท่งตัวนำเป็นสารแม่เหล็ก จะสังเกตเห็นว่าจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กจะเพิ่มมากขึ้น รูปที่ 2.3.2 ก็เนื่อง

จากค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก (Permeability) ของสารแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก

เมื่อเรานำแท่งตัวนำไปไว้ในคอยล์ที่จ่ายไฟกระแสตรงเข้าไป จะไม่มีกระแสไหลวน (Eddy current) ถ้าเราเปลี่ยนจากไฟกระแสตรงมาเป็นไฟกระแสสลับ ก็จะเกิดกระแสไหลวนและความร้อนขึ้นภายในแท่งตัวนำ ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย ฟาราเดย์ (FARADAY)

$$E = -N(\Delta\Phi / \Delta t) \quad \dots(2.2)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวด

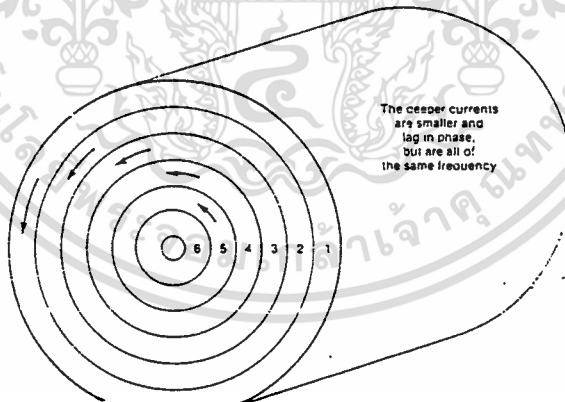
$(\Delta\Phi / \Delta t)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อเวลา Wb/sec

2..1.1 กระแสไหลวนในแท่งตัวนำ

สำหรับขนาดของกระแสไหลวนภายในแท่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟที่จ่ายไปยังคอยล์ และรูปร่างของแท่งตัวนำนั้น

พิจารณาแท่งตัวนำที่อยู่ในคอยล์ ประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำบางๆ หลายๆ ชั้นประกบกัน

รูป 2.4



รูปที่ 2.4 ของกระแสไหลวนเหนี่ยวนำในแท่งตัวนำ

สนามแม่เหล็กจะผ่านชั้นนอกของแท่งตัวนำและเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน ที่ตัวนำชั้นนอกสุด (ชั้นที่ 1) พิจารณาชั้นที่ 2 ของตัวนำจะเห็นว่าพื้นที่วงจะน้อยกว่าชั้นที่ 1 ของตัวนำ ทำให้กระแสไหลวน ที่เกิดขึ้นในชั้นที่ 2 มีขนาดน้อยกว่ากระแสไหลวนในชั้นที่ 1 ของตัวนำ ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นกับชั้นที่ 3 , 4 , 5 โดยที่กระแสไหลวนจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สกินเอฟเฟกต์ (Skin effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลของสกินเอฟเฟค

การให้ความร้อนแก่วัตถุโลหะตามหลักทฤษฎีของแม่เหล็กไฟฟ้า กิจผลของ แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อชิ้นงานที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกเส้นแรงแม่เหล็ก กระแส และการถ่ายเทพลังงานเป็นแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

2.2.1 พิจารณาผลของสกินเอฟเฟคที่มีต่อแผ่นโลหะบางที่มีความยาวมากๆ (Skin Effect for Semi - infinite Slab)

การใช้งานชิ้นงานที่เป็นรูปทรงกระบอกนั้น ซึ่งเป็นการยากต่อการพิจารณาทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจะพิจารณาถึงชิ้นงานที่มีลักษณะเป็น โลหะแผ่นบางหรือเป็นรูปทรงกระบอกที่มีรัศมีมากๆ ซึ่งจะไม่มีผลของสกินเอฟเฟคต่ออีกด้านหนึ่ง

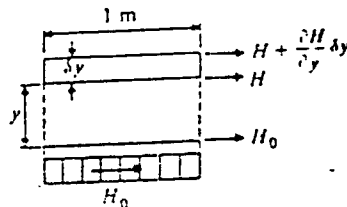
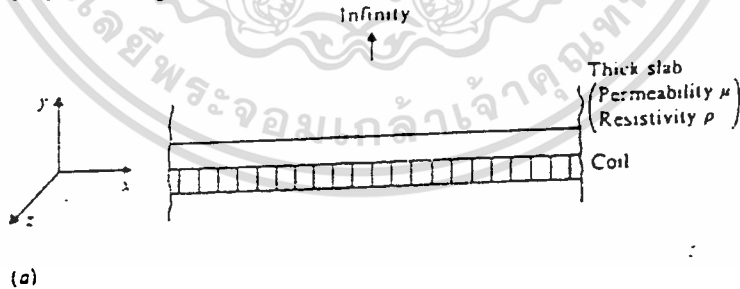
จากรูปที่ 2.5 พิจารณาแผ่นชิ้นงานที่มีการวางตามแนวแกน X ซึ่งมีความยาวเป็น 1 เมตร คอยล์จะเหนี่ยวนำในรูปสนามแม่เหล็ก H_0 ซึ่งมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (Ampere per Meter) และจะไม่พิจารณาความสูญเสีย จะได้ว่าที่คอยล์จะสร้างสนามแม่เหล็ก H_0 จากคุณสมบัติทางกายภาพ H_0 ในทิศทางแกน X ก่อให้เกิดทิศทางกระแสขึ้นในทิศทางแกน Z และมีเงื่อนไข

$$H_{x(y=0)} = H_{0m} \cos \omega t$$

$$\left. \begin{matrix} H_y \\ H_z \end{matrix} \right\} = 0 \text{ everywhere}$$

...(2.3)

เมื่อ H_{0m} เป็นค่าสูงสุดของ H_0 ที่พื้นผิว



รูปที่ 2.5 แผ่นชิ้นงานที่มีการวางตัวตามแนวแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการกระจายของสนามแม่เหล็ก (H) สนามไฟฟ้า (E) และความหนาแน่นกระแส (J) ในโลหะจะได้จากสมการอนุพันธ์ดังนี้

$$\nabla^2 H = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H}{\partial t}; \quad \nabla^2 E = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial E}{\partial t}; \quad \nabla^2 J = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial J}{\partial t} \quad \dots(2.4)$$

พิจารณาจากสนามแม่เหล็ก (H) จะได้

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial (H_x + H_y + H_z)}{\partial t} \quad \dots(2.5)$$

จากเงื่อนไข (1) จะได้

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad \dots(2.6)$$

พิจารณาคำตอบจะพบว่า

$$H_x = H_x(y) \cos \omega t \quad \dots(2.7)$$

ซึ่ง H_x จะเปลี่ยนค่าไปตามความลึก Y สามารถเขียนสมการในรูปของ

$$H_x(y) \exp(j\omega t) \quad \dots(2.8)$$

แทนในสมการ (2) จะได้ว่า

$$\frac{d^2 H_x}{d y^2} - \frac{\mu}{\rho} j\omega H_x = 0 \quad \dots(2.9)$$

กำหนดให้ $\alpha^2 = \mu\omega/2\rho$, i.e.,

$$\frac{d^2 H_x}{d y^2} - 2j\alpha^2 H_x = 0 \quad \dots(2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $k^2 = 2j\alpha^2$

คำตอบจะได้

$$H_x = A_1 \exp(ky) + A_2 \exp(-ky) \quad \dots(2.11)$$

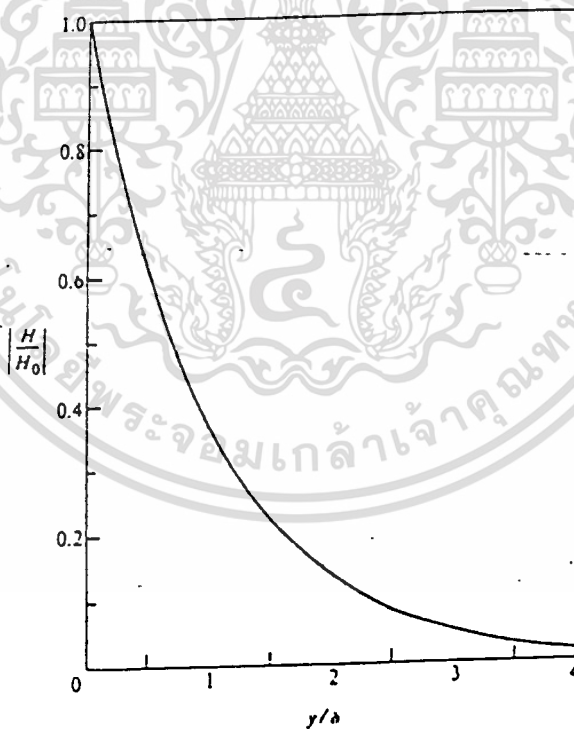
จากเงื่อนไข 1

เมื่อ $Y = \infty$, H_x ต้องเป็นค่าคงที่ ดังนั้น $A_1 = 0$

และเมื่อ $Y = 0$ $H_x = H_{om} \exp(j\omega t)$

จะได้

$$H_x(Y) = H_{om} \exp(-\alpha Y) \cos(\omega t - \alpha Y) \quad \dots(2.12)$$



รูป 2.6 ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับความลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ความลึกในสกินเอฟเฟค (Skin Depth)

ในชั้นความลึกต่างๆ ขนาดสนามแม่เหล็กจะลดลงและมีมุมเฟส(Phase)ที่ต่างกับผิวเป็นมุม $(-\alpha Y)$ เมื่อ Y มีค่า $(1/\infty)$ ขนาดจะเหลือ e เท่าของพื้นที่ผิว และ มุมเฟสต่างกันเป็น 1 เรเดียน (57.3°) ซึ่งขนาด $1/e = 0.368$ ของที่ผิว ให้เรียกว่า “ ความลึกในสกินเอฟเฟค ” (Skin Depth) หรือ (Depth of penetration) , δ เราจะกำหนดให้

จะได้ว่า α^2 as $\mu\omega/2\rho$

$$\text{Depth of penetration } \delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad \dots(2.13)$$

2.3 ความหนาแน่นของกระแส เส้นแรงแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการที่ (10) และจากสมการ $B = \mu H$
 โดยให้ความสัมพันธ์ ดังกล่าวเป็นแบบเชิงเส้นจะได้ว่า

$$B_x(Y) = B_{om} \exp(-\alpha Y) \cos(\omega t - \alpha Y) \quad \dots(2.14)$$

และจากสมการแมกเวลล์ (Maxwell Equation) $J = \text{curl } H$

จากเงื่อนไขที่กำหนด ใน การวิเคราะห์ให้ $H_y = 0$ และ $H_x = 0$ จะได้ว่า

$$J_x(Y) = J_{om} \exp(-j\omega t - \alpha Y \sqrt{2j}) = J_{om} \exp(-\alpha Y) \cos(\omega t - \alpha Y) \quad \dots(2.15)$$

และจากความสัมพันธ์ของ

$$E = \rho J$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$E_x = \rho J_x = \rho J_{om} \exp(-\alpha Y) \cos(\omega t - \alpha Y) \quad \dots(2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ผลรวมของกระแส (Total Current)

กระแสในความกว้าง 1 เมตร สามารถหาผลรวมกระแสที่เหนี่ยวนำ ได้โดยการอินทิเกรต J ใน Slab Depth

$$\begin{aligned} \text{Current per meter width} &= \int_0^{\infty} J_x dy (X1) = \int_0^{\infty} J_{om} \exp(-\alpha y) \cos(\omega t - \alpha y) dy \\ &= J_{om} \text{ Real part of } \int_0^{\infty} \exp[j\omega t - (1+j)\alpha y] dy \\ &= \frac{J_{om}}{\sqrt{2\alpha}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}$$

ดังนั้นกระแสต่อหน่วยความกว้าง ซึ่ง lag ไปจากความหนาแน่นของกระแสที่ผิว ประมาณ 45 องศา

$$\text{Current per meter width} = \frac{\sqrt{2} H_{om} \alpha \exp j\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \frac{\exp(-j\pi/4)}{\sqrt{2\alpha}}}{H_{om} \exp(j\omega t)}$$

2.4.1 กำลังงานและเส้นแรงแม่เหล็กในชิ้นงานรูปทรงกระบอกตัน

จากความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กในรูปโลหะที่มีรูปทรงกระบอกตัน ที่ให้

$$H_x = H_{om} \cos \omega t$$

จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} - k^2 H = 0, \quad \text{where} \quad k^2 = \frac{j\mu\omega}{\rho} = 2j\alpha^2$$

ซึ่งสามารถที่จะหาคำตอบมาอยู่ในรูปของความสัมพันธ์แบบเบสเซล โดยที่คำตอบของสมการจะมีรูปดังนี้

$$H = A I_0(kr) + B K_0(kr) \quad \dots(2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_0 และ K_0 เป็นอันดับที่ศูนย์ของเบสเซลฟังก์ชัน
ซึ่งผลของเส้นแรงแม่เหล็กรวมจะได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

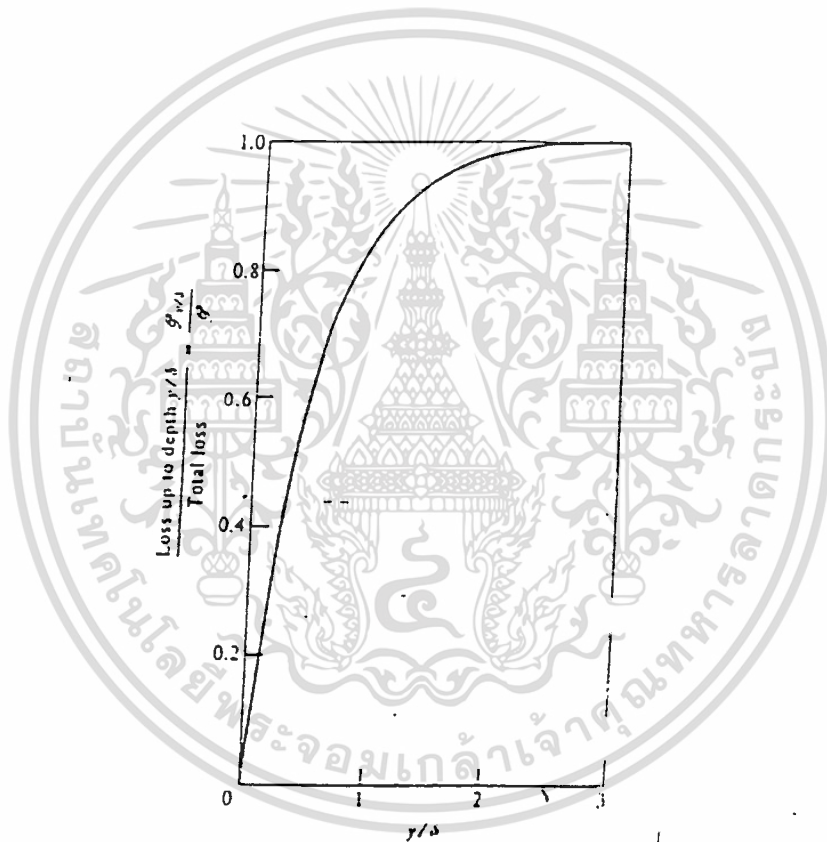
$$\phi_R = \mu H_{om} A_w (q - jp) = \phi_q - j\phi_p \quad \dots(2.18)$$

และผลรวมของพลังงานสูญเสียจะได้ว่า

$$\begin{aligned} P_w &= (I_w wb) \mu f \Pi H^2_{sm} P \\ &= (I_w A_w) (\Pi f \mu) H^2_{sm} P \end{aligned} \quad \dots(2.19)$$

จากการที่ได้มีการวิเคราะห์ผลของค่าความถี่ที่มีผลกับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้มีการอธิบายผลของความถี่จากการดูดซับพลังงานในชิ้นงานที่มีรูปทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับพลังงานของขดลวดเหนี่ยวนำ โดยที่มีการแทน (d/δ) 4.5 จะมีผลต่อการเหนี่ยวนำ เมื่อไม่สามารถที่จะเพิ่มความถี่ขึ้นได้อีก โดยค่าความถี่วิกฤตหาได้จาก

$$\frac{\text{Loss up to depth } y/\delta}{\text{Total loss}} = \zeta \frac{y/\delta}{\zeta} \quad \dots(2.20)$$



รูปที่ 2.7 ค่าความสูญเสียกับความลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การรีโซแนนซ์

เมื่อเราปรับความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรอนุกรม RLC จะพบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่ง ค่า X_L จะเท่ากับ X_C เป็นผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจร RLC มีค่าต่ำที่สุด นั่นคือ $Z=R$ ในสภาวะเช่นนี้เราเรียกว่าอยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์ ค่าความถี่ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความถี่รีโซแนนซ์ (Resonance Frequency) เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำสุด กระแสที่ไหลในวงจรจึงมีค่ามากที่สุด และเป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อม L และ C มีค่าเพิ่มขึ้น

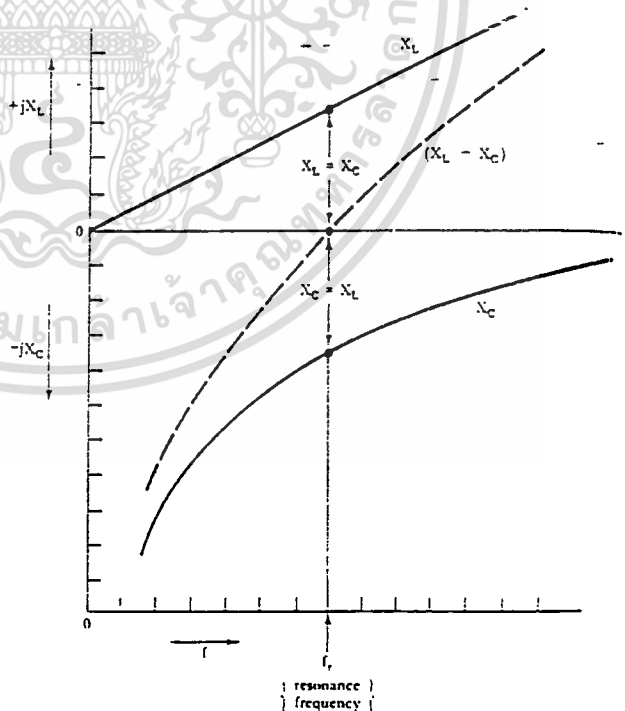
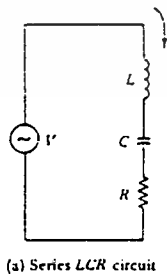
วงจรขนาน LC ก็สามารถที่ทำให้อยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์ได้เช่นกัน และ X_L จะเท่ากับ X_C ในขณะเช่นนี้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่ามากที่สุด และส่งผลให้ค่ากระแสมีค่าน้อยที่สุด แต่กระแสที่ไหลวนในลูป (LOOP) ของ L และ C จะมีค่ามากขึ้น วงจรสามารถปรับให้รีโซแนนซ์ได้โดยการปรับค่า L และ C

2.5.1 อนุกรมรีโซแนนซ์

ผลของความถี่ที่มีต่ออิมพีแดนซ์

วงจรอนุกรม RLC แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad \dots(2.21)$$



ก) วงจรอนุกรม LCR

ข) X_L, X_C เมื่อพล็อตกับความถี่

รูปที่ 2.8 การพล็อตค่า $+jX_L$ และ $-jX_C$ กับความถี่สำหรับ

วงจรถูกอนุกรม LCR รีโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

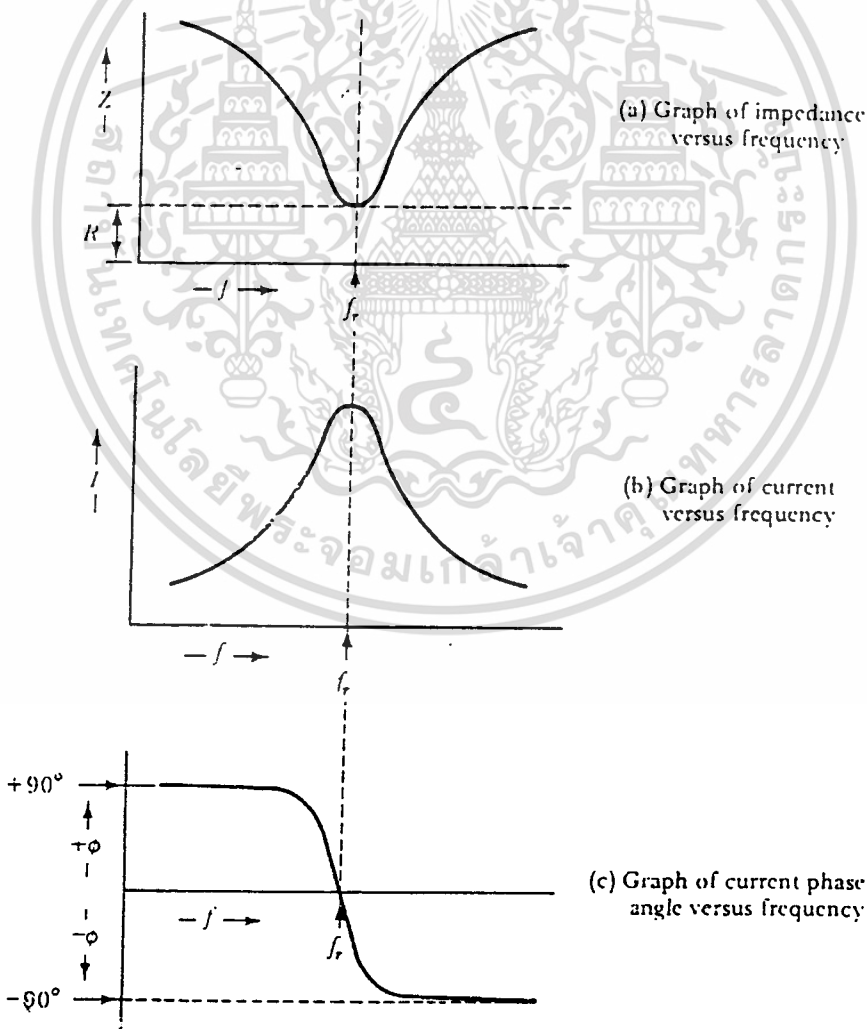
เนื่องจากค่า $X_L = 2\pi fL$ และ $X_C = 1/(2\pi fC)$ ดังนั้นค่าของอิมพีแดนซ์จึงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ดังรูป 2.8 ข) จะพบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า X_L เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น (Linear) ในทางกลับกัน X_C จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่ค่า X_C จะไม่มีทางเท่ากับศูนย์

ผลรวมของรีแอกแตนซ์คือ $X_L - X_C$ ดังแสดงไว้คือเส้นประในกราฟของรูปที่ 2.8ข) ที่ความถี่ค่า X_L จะมีค่าน้อยกว่าค่า X_C ดังนั้นผลรวมของรีแอกแตนซ์จะเป็นค่าของ X_C ที่ความถี่สูง ค่าที่ความถี่รีโซแนนซ์

$$Z = R + j(O) \quad \dots(2.22)$$

$$Z = R$$

เมื่อ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ นำมาเขียนเป็นกราฟที่แปรผันตามความถี่จะได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟ อิมพีแดนซ์ กระแส และ มุมเฟสกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{กระแสในวงจรอนุกรม } I = \frac{V}{R + j(X_L - X_C)}$$

กระแสที่ไหลเมื่อรีโซแนนซ์ ($X_L = X_C$)

$$I = \frac{V}{R} \quad \dots(2.23)$$

จากรูปจะพบว่ากราฟจะมีค่าต่ำเมื่อความถี่ในวงจร ไม่อยู่ที่จุดรีโซแนนซ์

2.5.1.1 ความถี่รีโซแนนซ์

$$X_L = 2\pi fL \quad \dots(2.24)$$

$$X_C = 1/2\pi fC \quad \dots(2.25)$$

$$2\pi fL = 1/2\pi fC \quad \dots(2.26)$$

ดังนั้น

เมื่อ L มีหน่วยเป็น เฮนรี่ (henrys)

C มีหน่วยเป็นฟารัด (farads)

R มีหน่วยเป็นเฮิร์ต (Hertz)

2.5.1.2 แรงดันที่จุดรีโซแนนซ์

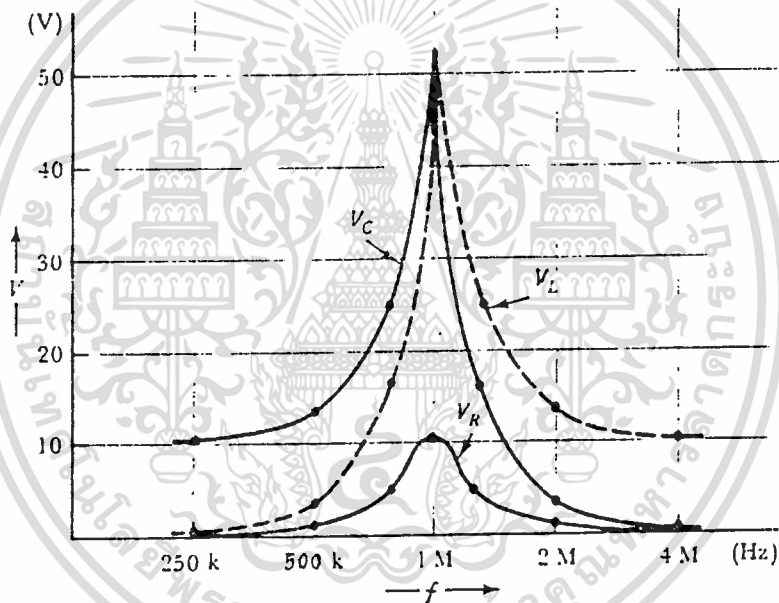
แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในวงจร LCR รูปที่ 2.8ก) จะมีค่าเท่ากับ $I \times R$ และที่จุดรีโซแนนซ์ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีค่าเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย

ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าดังนี้

$$V_C = I X_C \quad \dots(2.27)$$

$$V_L = I X_L \quad \dots(2.28)$$

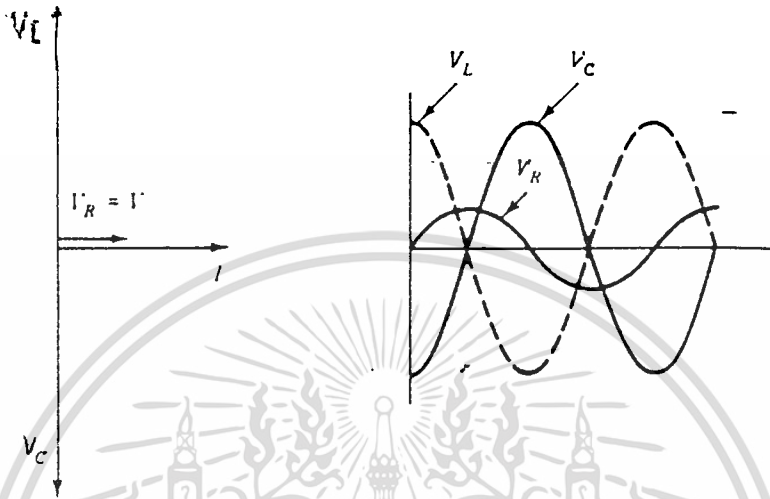
เมื่อนำค่า V_R , V_C และ V_L มาพล็อตกราฟกับค่าความถี่จะพบว่ามีลักษณะคล้ายกับกราฟของกระแสกับความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_R , V_C และ V_L กับความถี่ ซึ่งจะพบว่า V_C และ V_L ที่จุดรีโซแนนซ์จะมีค่ามากกว่าแรงดันที่แหล่งจ่ายอยู่หลายเท่า

2.5.1.3 พลังงานที่ส่งผ่านระหว่าง L และ C

เมื่อเรานำรูปคลื่นของ V_R , V_C และ V_L ที่จุดรีโซแนนซ์มาพล็อตดังรูปที่ 2.11 ก) จะพบว่า V_L จะกลับเฟสกัน 180 องศา ส่วน V_R จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ V_C และ V_L มีค่าเท่ากับศูนย์ จากที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่าจะมีการส่งผ่านพลังงานระหว่าง L กับ C กลับไปมา เมื่ออยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์



ก) รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรม
ของวงจร LCR รีโซแนนซ์

ข) รูปคลื่นแรงดัน V_R , V_C และ V_L
ที่จุดรีโซแนนซ์

รูปที่ 2.11 รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันในวงจร LCR รีโซแนนซ์

อย่างไรก็ตามที่จุดรีโซแนนซ์นี้จะ ไม่มีการสะสมพลังงาน

2.5.1.4 Q แฟคเตอร์ของวงจรอนุกรม LC

พิจารณาสมการ I, V_L, V_C ที่จุดรีโซแนนซ์

$$V_L = IX_C \tag{2.29}$$

$$I = \frac{V}{R} \tag{2.30}$$

$$V_L = \frac{V * X_L}{R} \tag{2.31}$$

ดังนั้น

$$\frac{V_L}{V} = \frac{X_L}{R} \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน $\frac{V_L}{V}$ และ $\frac{V_C}{V}$ คือค่าควอลิตี้ (Quality) ของวงจรรีโซแนนซ์ หรือคือค่า Q แฟกเตอร์นั่นเอง

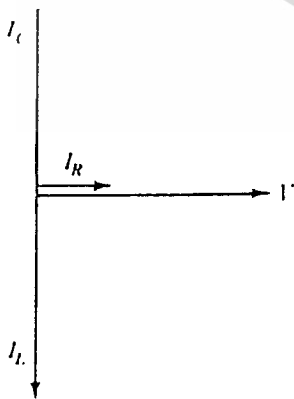
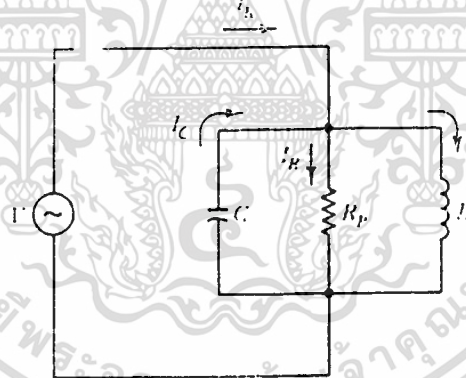
$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \dots(2.33)$$

จากสมการพบว่าค่า Q แฟกเตอร์ของวงจรอนุกรมรีโซแนนซ์สามารถเพิ่มได้เมื่อลดความต้านทานหรือโดยการเพิ่มอัตราส่วนของ $\frac{L}{C}$

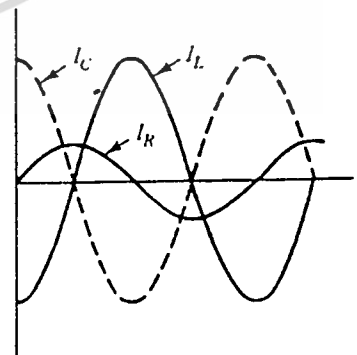
2.5.2 ขนานรีโซแนนซ์

วงจรขนานรีโซแนนซ์แสดงไว้ดังรูป 2.8.1 ค่าแอดมิตแตนซ์ (admittance) ของวงจรมีค่า

$$Y = \frac{1}{R_f} - j\frac{1}{X_L} + j\frac{1}{X_C} \quad \dots(2.34)$$



(b) Phasor diagram for parallel



(c) Waveforms of I_c , I_L , and I

รูปที่ 2.12 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรม รูปคลื่น ของกระแสที่จุดรีโซแนนซ์

ของวงจร LCR ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ถ้าปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไปจนกระทั่ง X_L และ X_C มีค่าเท่ากันค่าแอดมิตแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ

$$Y = \frac{1}{R_p} \quad \dots(2.35)$$

และค่าอิมพีแดนซ์มีค่า

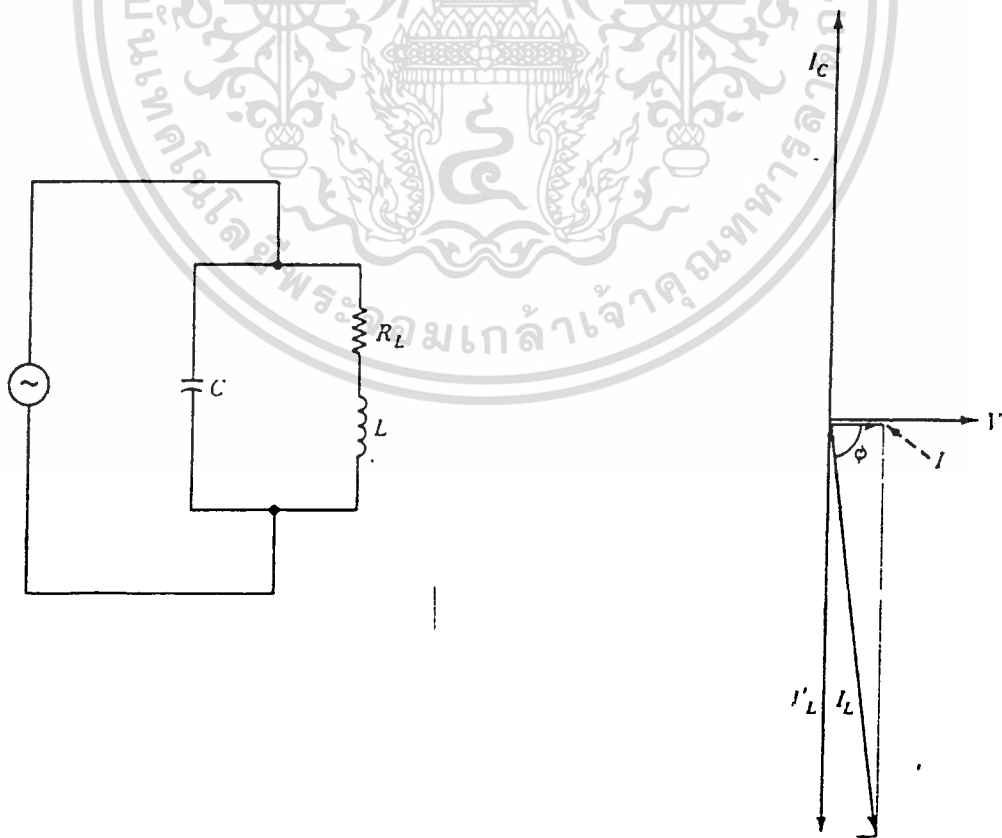
$$Z = R_p \quad \dots(2.36)$$

กระแสจากแหล่งจ่ายมีค่า

$$I = \frac{V}{R_f} \quad \dots(2.37)$$

กระแสที่ไหลผ่าน จะมีมุมอินเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่าย กระแสที่ไหลผ่าน จะล่าหลังแรงดันไป 90 องศา ส่วนกระแสที่ไหลผ่าน จะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3.8 นั่นคือมีการส่งผ่านพลังงานกลับไปมาระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

เนื่องจากในความเป็นจริงในตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าความต้านทานรวมอยู่ด้วยโดยทั่วไปที่ตัวเก็บประจุมีความต้านทานอยู่น้อยมาก จึงเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ได้ดังรูป 2.8.2



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรปกติของการต่อแบบ LCR ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าความถี่ที่จุดรีโซแนนซ์สำหรับวงจรขนาน LC เมื่อ $Q > 10$ คือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \dots(2.43)$$

ในกรณีที่ $Q < 10$ ความถี่ที่จุดรีโซแนนซ์จะมีค่า

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR_L^2}{L}} \quad \dots(2.44)$$



บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลง

หม้อแปลงกำลัง (Power Transformer) จะเป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มกระแสที่จะไปสู่ตัวชุดเบ้า หลอมให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อไปทำให้เกิดกระแสเอ็ดดี้ในตัวชิ้นงาน การทำงานที่ความถี่สูงแกนของหม้อแปลงจะใช้แกนเฟอร์ไรต์ ในบทนี้จะกล่าวถึง 5 ส่วนดังนี้คือ ขนาดของหม้อแปลง, จำนวนรอบ การสูญเสียในแกน (core loss) , การสูญเสียในขดลวด (copper loss) , ผลของสกินเอฟเฟค (skin effect)

3.1 ขนาดของตัวหม้อแปลง

จะเกี่ยวเนื่องกับขนาดของกำลังเอาต์พุต ผลกระทบของค่าสูญเสียในแกน ค่าสูญเสียในขดลวดสกินเอฟเฟค พร็อกซิมิตีเอฟเฟค (proximity effect) , ประสิทธิภาพการระบายความร้อน, การคำนวณการอุปกรณ์ซึ่งจำกัดเขตการเพิ่มของอุณหภูมิ (temperature rise) และขนาดของหม้อแปลง ความจำเป็นที่ต้องจำกัด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้เป็นค่าที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะการทำงานจริงก็เป็นตัวไปจำกัดเขตพื้นที่ผิวที่ต้องการและขนาด

3.2 ประสิทธิภาพที่เหมาะสม

ประสิทธิภาพที่เหมาะสมจะเกิดขึ้นเมื่อการสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียในขดลวดมีค่าต่ำสุดในทอมทัวไป ในการส่งผ่านกำลัง การสูญเสียในแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดและการสวิงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น และการสูญเสียในขดลวดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดแกนและการสวิงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลง ดังนั้นถ้าจะให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดก็ต้องให้การสูญเสียในแกนสมดุลกับการสูญเสียในขดลวด

ในทางปฏิบัติการแบ่งปันเป็นส่วนค่าความสูญเสียเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจะเกี่ยวเนื่องกับวัสดุที่ใช้ทำแกน รูปทรงของแกน และความถี่ที่ใช้งาน นอกจากนี้แฟคเตอร์ที่ส่งผลต่อขนาดแกนก็คือ ความถี่ที่ใช้งาน, จำนวนรอบ, วัสดุที่ใช้ทำแกน จำนวนและตำแหน่งการวางของฉากกัน และการทำฉนวนแบบพิเศษ ผลจากที่หม้อแปลงที่ทำงานที่ความถี่สูงการลงขดลวดแบบธรรมดาและข้อกำหนดทางฉนวน จะต้องการใช้ที่แกนขนาดเล็ก

3.3 การคำนวณขนาดของแกนในทอมของพื้นที่แกนที่ใช้งาน (Area Product)

แอเรียโปรดักต์ ความสัมพันธ์กับกำลังที่พิกัดของแกน โดยการจำกัดจำนวนของค่าที่แปรค่าได้ สมการของการเชื่อมของแกน Area Product กับกำลังเอาต์พุตสามารถสร้างได้

ค่า แอเรียโปรดักต์ ผู้ผลิตแกนจะมีค่าต่าง ๆ ให้ขนาดของแกนก็สามารถทำการเลือกได้อย่างรวดเร็วโดยการคำนวณ แต่ถ้าไม่มีมาให้ก็จะหาได้จากมิติความกว้างยาวของแกน

$$(A_p = A_w * A_e)$$

$$A_p = (11.1 * Pin / K' * B * f) \text{ cm}^4 \text{ ที่มาหาได้จากภาคผนวก}$$

$$\text{เมื่อ } A_p = \text{Area Product, cm}^4$$

$$Pin = \text{กำลังอินพุต, w}$$

$$K' = \text{แฟคเตอร์การใช้ประโยชน์ของขดลวดทองแดงทั้งหมด}$$

$$B = \text{การสวิงของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกน T}$$

$$f = \text{ความถี่ (Hz)}$$

จากสมการนี้สมมติค่าตามนี้

- 1) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (temperature rise) สำหรับอากาศอิสระตามธรรมชาติ 30 C
- 2) ความหนาแน่นกระแสในสาย Ia ตัวนำทองแดงทำงานที่ความหนาแน่นกระแสเป็นสัดส่วนกันกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 30 C (ค่าที่ 450 /cm² สำหรับ Area product of unity) หม้อแปลงตัวใหญ่ต้องมีความหนาแน่นกระแสต่ำเทียบได้กับอัตราส่วนของพื้นที่ผิวการระบายความร้อนต่อปริมาตรของส่วนที่ความร้อนถูกผลิตขึ้น ซึ่งอัตราส่วนนี้จะมีค่าต่ำ (ดูได้จาก ซึ่งได้มาจากการสังเกตและทดลอง)
- 3) ประสิทธิภาพ สมมติมีค่าเกินกว่า 98 % (การออกแบบที่ดีควรได้ค่าตามนี้)
- 4) แฟคเตอร์การใช้ประโยชน์ของขดลวดทองแดงทั้งหมด (K') $K' = K_u * K_p * K_t$ ค่า K' ดูได้จากตารางซึ่งค่าขึ้นกับชนิดของคอนเวอร์เตอร์, กรรมวิธีการเรคตีไฟร์, การทำฉนวน, รูปแบบของตัวนำแฟคเตอร์การใช้ประโยชน์ตรงที่ช่องหน้าต่าง ดูที่แฟคเตอร์ย่อยซึ่งจะได้อธิบายไว้

Converter type	Primary form	Secondary form	$K_p(A_p/w_b)$	K_u	$K_t(I_{dc}/I_p)$	$K' (K_p * K_u * K_t)$
forward	SE	T	0.32	0.4	0.71	0.091
	SE	SE	0.4	0.4	0.71	0.114
full and half	SE	CT	0.41	0.4	1.0	0.164
bridge	SE	SE	0.5	0.4	1.0	0.2
CT pushpull	CT	CT	0.25	0.4	1.41	1.141
	CT	SE	0.295	0.5	1.41	0.208

4.1) แฟคเตอร์พื้นที่ทางปฐมภูมิ (primary area factor K_p)

แฟคเตอร์นี้เป็นอัตราส่วน A_p/w_b (the effective primary copper area a_p to the available winding window area w_b) A_p เกี่ยวเนื่องกับหัวข้อคอนเวอร์เตอร์ เช่น ตัวอย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณฟูลเวฟ มีแท็ปตรงกลางขด (a full wave center tapped winding) ใช้ค่าที่ 50 % ค่าแฟคเตอร์ สำหรับหัวข้อย่อยในแบบอื่นก็ดูได้จากตารางข้างต้น

4.2) แฟคเตอร์การจัดวางขดลวด (winding packing factor K_u)

ในทางปฏิบัติประมาณ 40 % ของพื้นที่แกนช่องหน้าต่างใช้ประโยชน์สำหรับขดลวด K_u ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับจำนวนของการขดลวดและการทำฉนวนที่ใช้

4.3) แฟคเตอร์ของกระแสอาร์เอ็มเอส (RMS current factor K_t)

แฟคเตอร์อัตราส่วน I_{dc}/I_p เกี่ยวพันกับกระแสอินพุตต่อกระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุดของทางด้านปฐมภูมิ (the maximum rms primary current) มันจะมีผลมาจากชนิดของคอนเวอร์เตอร์ และการทำงานที่โหลดต่าง ๆ ค่า K_t สำหรับคอนเวอร์เตอร์ทั่วไปดูได้จากตารางข้างบน

3.4 ผลของความถี่กับขนาดของหม้อแปลง

$$\text{สมการหม้อแปลง} \quad N = 10^3 * V / K * f * B * A_e \quad \dots(3.1)$$

N = ค่าจำนวนรอบต่ำสุด (รอบ)

V = แรงดันที่ขดลวด

f = ค่าความถี่

B = ความหนาแน่นเส้นแรงสูงสุด

A_e = ค่าพื้นที่แกนที่ใช้

$K = 4.44$ สำหรับรูปคลื่นไซน์

$K = 4$ สำหรับรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม

จากสูตรนี้จะแสดงให้เห็นว่า จำนวนรอบและความถี่เป็นสัดส่วนกลับกัน เช่นสมมติเพิ่มความถี่ไป 2 เท่า จำนวนรอบก็จะลดเหลือครึ่งหนึ่งได้ จุดนี้เองที่ส่งผลให้ที่ความถี่เพิ่มขึ้นหม้อแปลงตัวเล็กลงได้ แต่ในทางปฏิบัติจริงจะทำให้การสูญเสียในแกนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น การใช้ที่ความถี่สูงความหนาแน่นเส้นแรงจะลดลงไปได้ แต่จำนวนของขดลวดไม่สามารถลดได้ตามที่คาดไว้ การลดของขนาดหม้อแปลงก็เป็นจริงไปไม่ได้ เว้นเสียแต่ใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่ประยุกต์ใช้ในความถี่สูงได้ดี การออกแบบก็ต้องวิเคราะห์ควัสดุที่ใช้และการสวิงของความหนาแน่นเส้นแรงที่เหมาะสมด้วยที่การทำงานที่ความถี่สูง

3.5 การคำนวณหาจำนวนรอบ

3.5.1 จำนวนรอบทางปฐมภูมิ

ขนาดแกนที่ถูกเลือก จำนวนของขดปฐมภูมิจะต้องถูกเลือกสำหรับที่ประสิทธิภาพที่เหมาะสม ให้มีความสูญเสียทางขดลวดน้อยที่สุด การจัดให้ความถี่และแรงดันคงที่, จำนวนรอบทางปฐมภูมิที่น้อย, การสวิงของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่มีค่าตามวัสดุที่ทำแกน ในการจำกัดนี้แกนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดการอ้อมตัว ผลกระทบที่สองของการลดจำนวนรอบและการเพิ่มความหนาแน่นเส้นแรงก็จะเป็นการเพิ่มความสูญเสียในแกนเหล็กด้วย ที่ความถี่ต่ำ จะมีค่าน้อยกว่ามาก และแฟลคเตอร์ที่จะมาจำกัดจำนวนรอบน้อยที่สุดจะมีความจำเป็นเพื่อมาใช้ป้องกันการอ้อมตัวของแกน

การอ้อมตัวของแกนจะต้องถูกหลีกเลี่ยงไป ค่าอิมพีแดนซ์ของขดปฐมภูมิในย่านที่อ้อมตัวจะตกลงมามีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานไฟตรงของขดลวด ความต้านทานต่ำจะทำให้เกิดความเสียหายมีกระแสสูงไหลในขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง

รูปคลื่นทางปฐมภูมิในสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์เป็นรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม สมการหม้อแปลงตามกฎของฟาราเดย์ในสมการนี้รอบมีความสัมพันธ์กับ โวลท์ - วินาที ตามนี้

$$N = V * T/B * A_c \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ N = รอบทางปฐมภูมิ

V = Dc voltage ที่ขดลวดเมื่อการสวิงในช่วง “on”

T = ช่วง เวลาของครึ่งคาบ

B = การสวิงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด

A_c = พื้นที่หน้าตัดขวางของแกน

3.5.2 การคำนวณรอบทางทุติยภูมิ

เมื่อจำนวนรอบทางปฐมภูมิได้ถูกคำนวณมาแล้ว รอบทางทุติยภูมิก็สามารถสร้างได้จากอัตราส่วนแรงดันทางปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ

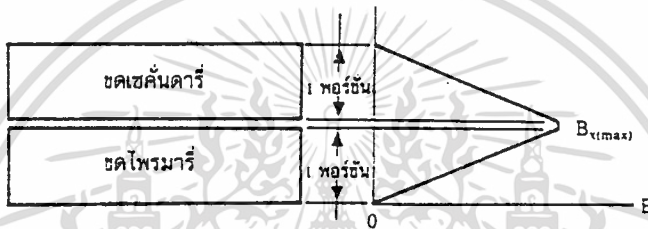
$$\text{แรงดันปฐมภูมิ/แรงดันทุติยภูมิ} = \text{จำนวนรอบทางปฐมภูมิ/จำนวนรอบทางทุติยภูมิ}$$

3.8 ขนาดของตัวนำ

อันดับแรกต้องรู้ความหนาแน่นกระแสของตัวนำ เลือกที่อุณหภูมิ 30°C (ตามสมการ $J = 450 * 10^4 * A_p^{-0.125} \text{ a/m}^2$) หลังจากนั้นก็เอามาเลือกขนาดของพื้นที่หน้าตัดขวางของตัวนำ ก็รู้ได้ว่าที่กระแสเท่าไรจะต้องใช้ตัวนำเบอร์อะไร (ดูจากตารางขดลวดภาคผนวก) หรือจะทำการขนานตัวนำอย่างไรบ้าง จะได้ศึกษาในเรื่องเทคนิคการพันต่อไป

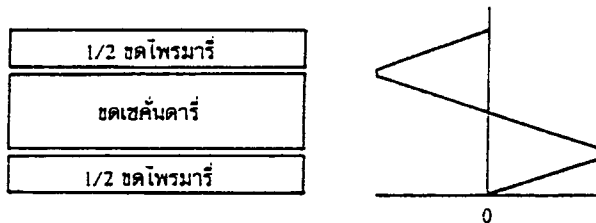
3.7 เทคนิคการพันขดลวดทองแดงสำหรับหม้อแปลง

ในการพันขดลวดทองแดงมีความหมายดังนี้ หนึ่งพอร์ชั้น กำหนดจากชั้นของขดลวดชุดหนึ่งๆที่มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์น้อยที่สุดไปจนถึงชั้นที่มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์รั่วสูงสุด และจำนวนชั้นในหนึ่งพอร์ชั้น (Layer) จะหมายถึง จำนวนชั้นของลวดทองแดงที่เรียงซ้อนกันอยู่ในพอร์ชั้นนั้นๆดูได้จากรูป 3.1 จำนวนชั้นทั้งหมดของขดลวดไพรมารีพันอยู่ในหนึ่งพอร์ชั้น และจำนวนชั้นของขดลวดเซคันดารีก็พันอยู่ในหนึ่งพอร์ชั้นเช่นเดียวกัน



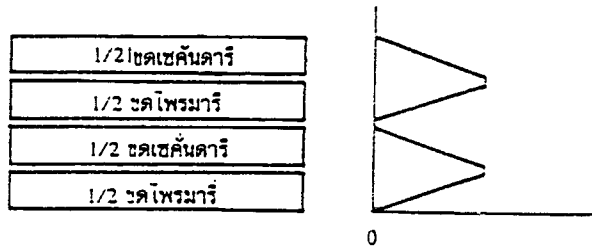
รูปที่ 3.1 แสดงการกำหนดจำนวนชั้นในพอร์ชั้น

ถ้าแยกขดไพรมารีออกเป็นสองส่วนดังรูป 3.2 จะทำให้ความหนาแน่นสูงสุดของฟลักซ์รั่วและจำนวนชั้นต่อหนึ่งพอร์ชั้นลดลงครึ่งหนึ่งด้วย(เนื่องจากความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วจะขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของขดลวด) ไม่ว่าจะเป็นที่ขดไพรมารีหรือเซคันดารีก็ตาม จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการลดลงของจำนวนชั้นต่อหนึ่งพอร์ชั้นจะทำให้ค่าอัตราส่วน F_r ของขดลวดลดลงดังนั้นหากมีการจัดรูปแบบในการพันที่เหมาะสมจะทำให้ลดการสูญเสียที่เกิดในขดลวดทองแดงได้

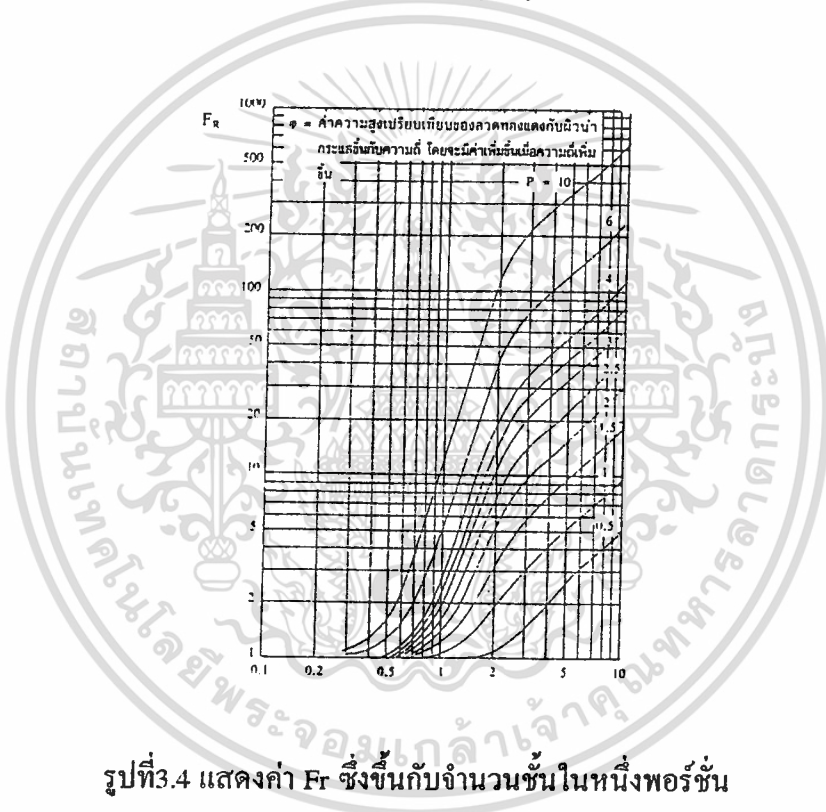


รูปที่ 3.2 แสดงการลดค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดของฟลักซ์รั่วโดยการแบ่งครึ่งขดลวดทางปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงการลดจำนวนชั้นในหนึ่งพอร์ซันลงไปอีก โดยการแบ่งครึ่งชุดทุติยภูมิด้วย



รูปที่3.4 แสดงค่า Fr ซึ่งขึ้นกับจำนวนชั้นในหนึ่งพอร์ซัน

3.7.1 การพันขดลวดแบบธรรมดา (Simple winding)

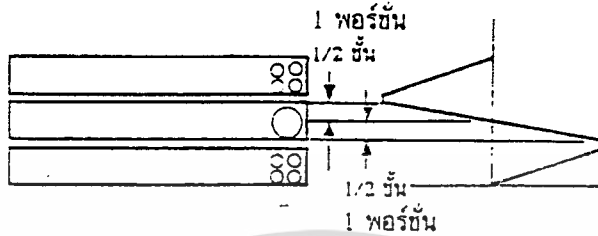
ทำได้โดยพันขดลวดทองแดงรอบแกนให้ครบเพื่อให้เป็นขดไพรมารี แล้วก็พันขดเซคันดารีทับลงไปบนขดไพรมารี ดังรูป 3.1

3.7.2 การจัดขดลวดแบบแบ่งครึ่งพัน (Split Winding)

ก็จะพันให้ได้จำนวนรอบตามต้องการแต่จะแบ่งขดลวดออกเป็นสองส่วนและนำชุดอื่นมาแทรกคั่นระหว่างกลาง การแบ่งส่วนพันจะเป็นการลดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์รั่วและจำนวนชั้นในแต่ละพอร์ซันลงได้ หลักคือ จำนวนรอบของขดลวดที่แบ่งพันจะต้องเป็นจำนวนคู่ และจำนวนชั้นทั้งหมดก่อนแบ่งพันจะต้องเป็นจำนวนคู่ด้วยเพื่อความสมมาตรหลังจากพันแล้ว

3.7.3 การจัดขดลวดแบบพันแทรกกลาง (Sandwiched winding)

คือจะพันแทรกเข้าไประหว่างกลางของขดลวดที่พันแบบครึ่งพัน ดังรูป 3.5

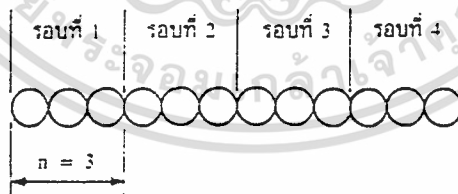


รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะพอร์ชันที่มีจำนวนชั้นเท่ากับครึ่งชั้น

3.7.4 การพันขดลวดโดยใช้ลวดทองแดงขนานกัน

เมื่อเทียบกับการใช้ลวดทองแดงเพียงเส้นเดียว จะทำให้ค่าความต้านทานที่กระแสสลับของขดลวดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดลดลงประมาณ $n^{-\frac{1}{3}}$ แต่ความสูงจะเพิ่มขึ้นประมาณ $n^{\frac{1}{3}}$ ด้วย เมื่อ n คือจำนวนเส้นลวดทองแดงขนานกัน

โดยทั่วไปการขนาน 2 เส้นลดความต้านทานไฟสลับไป 20 % แต่ความสูงเพิ่มไป 30% ถ้าขนาน 3 เส้นลดความต้านทานไฟสลับไป 30% แต่ความสูงเพิ่มขึ้น 45 %



รูปที่ 3.6 แสดงการพันขดลวดโดยใช้ขดลวดทองแดงขนานกัน

3.8 ผลจากสกินเอฟเฟกต์และความลึกของตัวนำ

ก่อนที่จะเลือกขนาดสาย สกินเอฟเฟกต์ (Skin Effect) และผลของการอยู่ใกล้เคียงกัน (Proximity Effect) จะต้องถูกนำมาพิจารณาด้วย ที่ความถี่สูงเอฟเฟกต์ทั้งสองนี้ เกิดจากสนามไฟฟ้าภายในตัวนำเองและสนามไฟฟ้าที่ขดลวดที่อยู่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นแรงให้กระแสไหลที่ผิวบางๆ ของตัวนำ การไหลของกระแสไหลวนจะเป็นการจำกัดพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดงลดลงจากพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดง และมีผลเหมือนพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดงลดลงจากพื้นที่หน้าตัดเดิม

จากผิวทองแดงลึกลงมาในเนื้อทองแดงจนถึงจุดที่ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่ากระแสดลดลงมาเหลือเพียง 37 % ของความหนาแน่นกระแสที่ผิวนั้น ระยะที่ความลึกของกระแสที่ทะลุผ่าน (Penetration Depth) คือ

$$\Delta = \frac{66}{\sqrt{f}} \quad \dots(3.3)$$

เมื่อ Δ = ความหนาผิวนำกระแสของลวดทองแดง

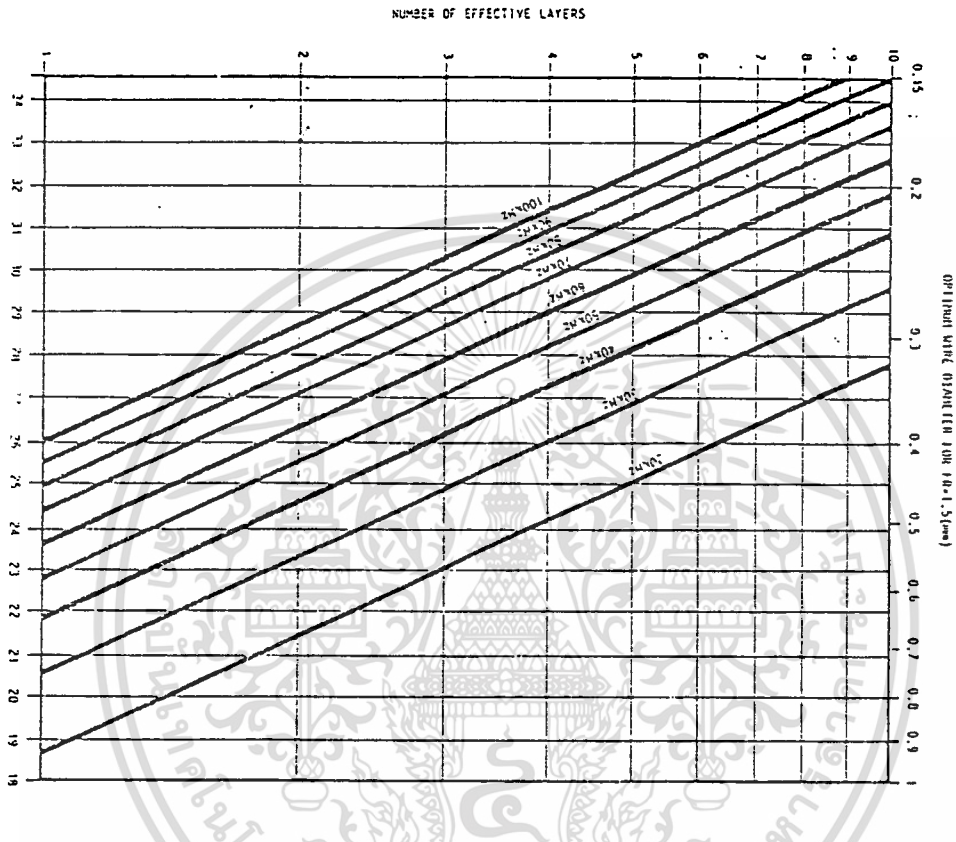
f = ความถี่ (Hz)

ดังนั้น ถ้ารัศมีของตัวนำเกินความหนาผิวกระแส มันก็จะเป็นตัวนำที่ไม่ดีเป็นการเพิ่มค่าความสูญเสียในทองแดง

ในหม้อแปลงจะมีความซับซ้อนมากกว่านี้ เพราะว่าสนามแม่เหล็กจากขดลวดที่อยู่ใกล้ๆ กัน ดังนั้นชนิดการพันขดลวดก็จะมีผลสำคัญในการเลือกขนาดตัวนำ การวางขดลวดไว้ใกล้กันและชั้นต่างๆก็จะไปส่งผลไปที่ขอบด้านในและขอบด้านนอกของตัวนำได้ ทำให้เอฟเฟกต์พื้นที่การนำกระแสลดลง ดังนั้นเมื่อใช้การพันมากกว่า 1 ชั้น ขนาดของตัวนำควรจะลดลงด้วย

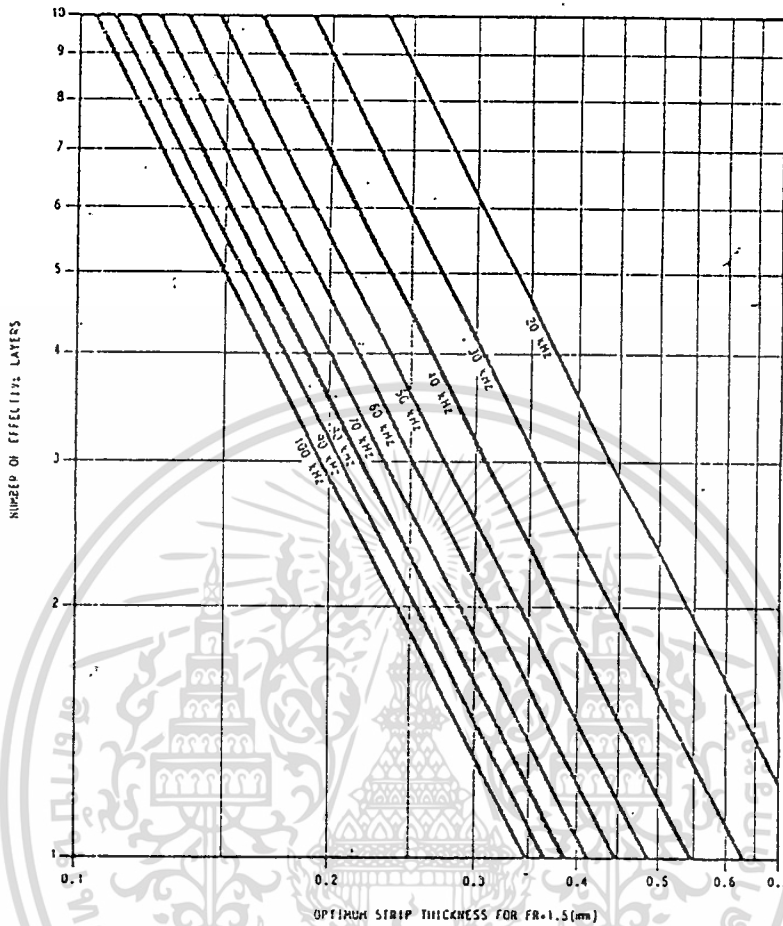
ในทางปฏิบัติ ค่าอัตราต่ำสุด Fr (ค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านทานระหว่างความต้านทานไฟตรงต่อความต้านทานไฟสลับ)ค่าต่ำสุดจะประมาณ 1.5 ในการออกแบบที่ดี การทำให้ได้ผลดี เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำหรือความหนาของสตริป (Strip Thickness) ต้องเหมาะสมสำหรับการทำงานที่ความถี่และจำนวนของชั้น รูปที่ 3.7 , 3.8 , 3.9 จะแสดงให้เห็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำสูงสุดหรือความหนาสตริปสูงสุดที่ใช้ในหม้อแปลงที่ค่า $Fr = 1.5$

ถ้าพื้นที่หน้าตัดขวางของตัวนำที่ใส่ให้เต็มพื้นที่ตรงช่องหน้าต่างหรือขนาดที่แสดงโดยความหนาแน่นของกระแสมีค่าเกิน ซึ่งจะต้องใช้สองอันหรือหลายอันขึ้นไป ก็เซคเอาตามพื้นที่หน้าตัดขวาง



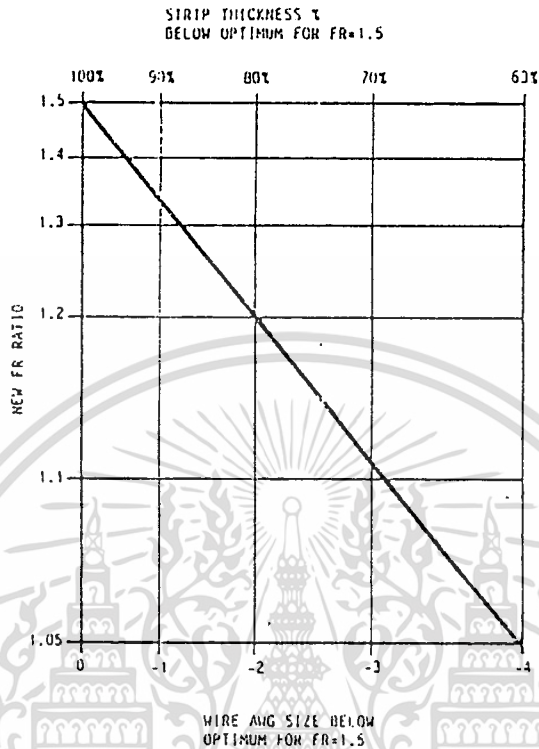
รูปที่ 3.7 แสดงความเหมาะสมของลวดทองแดง
กับจำนวนชั้นของขดลวดที่ค่า $Fr = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงความเหมาะสมของสไตรปทองแดงกับจำนวนชั้นที่ค่า $Fr = 1.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วน Fr ของลวดทองแดงและสตริปทองแดง
ที่ค่า Fr ต่ำกว่า 1.5

อัตราส่วน Fr จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขนาดของลวดทองแดงมากขึ้น ตามความจริงค่าความต้านทานของขดลวดทองแดงที่กระแสสลับจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดลวดทองแดงใหญ่ขึ้น แต่เนื่องจากค่าความต้านทานที่ไฟกระแสตรงมีค่าลดลงมากกว่า เมื่อขนาดของลวดทองแดงใหญ่ขึ้น ดังนั้นค่า Fr จึงมีค่ามากขึ้น ดังนั้นการใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ที่ความถี่สูง จะเกิดการสูญเสียมากกว่า เนื่องจากค่าความต้านทานที่กระแสสลับของมันขณะที่มีกระแสไหล

ค่าอัตราส่วน Fr จึงมีประโยชน์ในการเลือกขนาดของลวดทองแดง การกำหนดขนาดของลวดทองแดงและวิธีการพันขดลวดที่ให้ค่า Fr น้อยสุด จะทำให้เกิดการสูญเสียในลวดทองแดงมีค่าน้อยที่สุดเช่นกัน

3.9 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Temperature Rise)

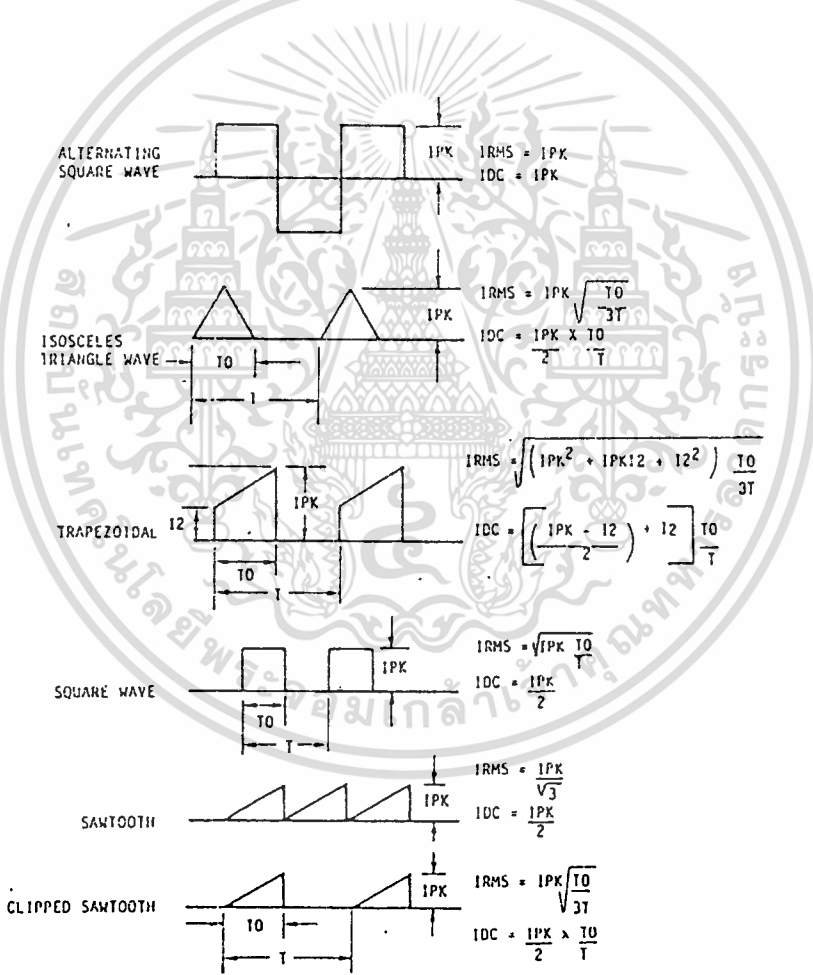
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเกี่ยวข้องกับผลรวมของค่าความสูญเสียภายใน และพื้นที่ผิว การ ออกแบบโดยทั่วไปควรเชคคำนวณค่าความสูญเสียด้วย

3.9.1 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)

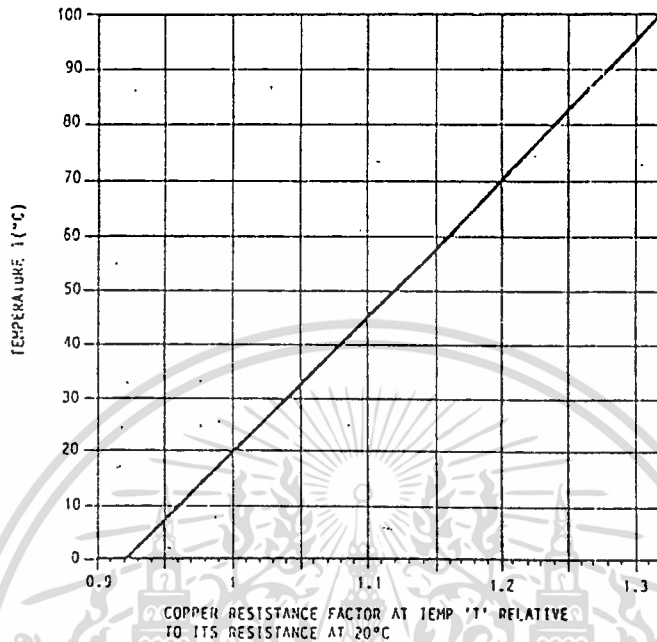
จะเกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ทำแกน, การสวิงของฟลักซ์, ความถี่ และขนาดของแกน สามารถดูได้จากคู่มือแกนของผู้ผลิต

3.9.2 ค่าความสูญเสียของขดลวดทองแดง (Copper Loss)

จะเกี่ยวข้องกับความต้านทานของขดลวด, อัตราส่วน F_r และค่ากระแสอาร์เอ็มเอส



รูปที่ 3.10 แสดงรูปคลื่นแบบต่างๆค่ากระแสอาร์เอ็มเอสและค่ากระแสเฉลี่ย



รูปที่ 3.11 แสดงแฟกเตอร์อุณหภูมิความต้านทานขดลวดทองแดง

ค่าความต้านทานไฟกระเสตรงของขดลวดคำนวณจากผลรวมความยาวเฉลี่ยของลวดคูณด้วยจำนวนรอบและความต้านทานต่อหน่วยความยาว ค่าความต้านทานไฟตรงคูณด้วยอัตราส่วน F_r จากรูปที่ 3.9 และแฟกเตอร์อุณหภูมิความต้านทานของขดลวดทองแดงจากรูปที่ 3.11 ก็จะได้ค่าประสิทธิภาพผลความต้านทานไฟสลัที่ความถี่ที่ใช้งานและค่าประมาณอุณหภูมิการทำงาน

$$P_w = I_{rms}^2 R_e$$

เมื่อ P_w = ค่าความสูญเสียของการพันขดลวด

I_{rms} = กระแสอาร์เอ็มเอส

R_e = ค่าประสิทธิภาพผลความต้านทานของขดลวด

ค่าความสูญเสียในขดลวดควรจะทำในแต่ละขด ผลรวมของค่าความสูญเสียของแกนเหล็กและค่าความสูญเสียของขดลวดก็คือ ผลรวมความสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลง

ประสิทธิภาพ (Efficiency)

$$\text{คำนวณได้จากสูตร } \text{Eff} = \frac{\text{power output}}{\text{power output} + \text{loss}} * 100 \quad \%$$

บทที่ 4

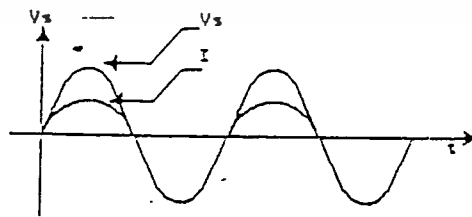
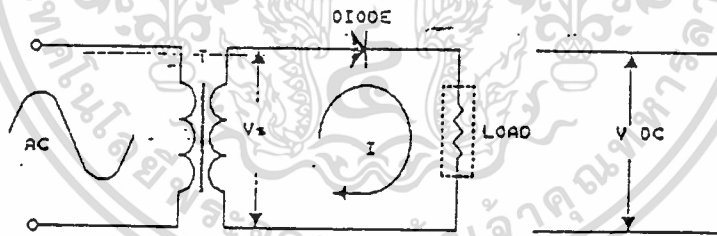
เรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์

เรกติไฟเออร์ คือ วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง หรือมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศทางหนึ่งเท่านั้น แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรกันแพร่หลายทั่วไปได้แก่ ไดโอด

4.1 วงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น (Half Wave rectifier)

หม้อแปลงทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันให้พอเหมาะกับความต้องการของผู้ใช้งาน แรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง จะยังคงเป็นไฟสลับอยู่ ในกรณีนี้ไดโอดจะนำกระแสได้ในขณะที่แรงดัน V_z อยู่ทางด้านบวกและจะไม่นำกระแสเมื่อแรงดัน V_z อยู่ทางด้านลบ กระแสต่างๆ ตามจังหวะของแรงดันไฟสลับ

ผลของกระแสที่ไหลผ่านโหลดจึงมีลักษณะไหลในทิศทางเดียว คือ เป็นของไฟตรงนั่นเอง แรงดันไฟตรงที่ตกคร่อมโหลดมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดัน V และมีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 4.1 การใช้ไดโอดในวงจรเรกติไฟเออร์และแสดงสัญญาณรูปคลื่นของกระแสและแรงดัน

ให้แรงดัน V_z มีค่าเท่ากับ $V_p \sin \omega t$
 V_p เป็นแรงดันค่าสูงสุดของค่าไฟสลับ
 เราจะได้ค่าแรงดัน V_{dc} ที่ไหลดเป็น

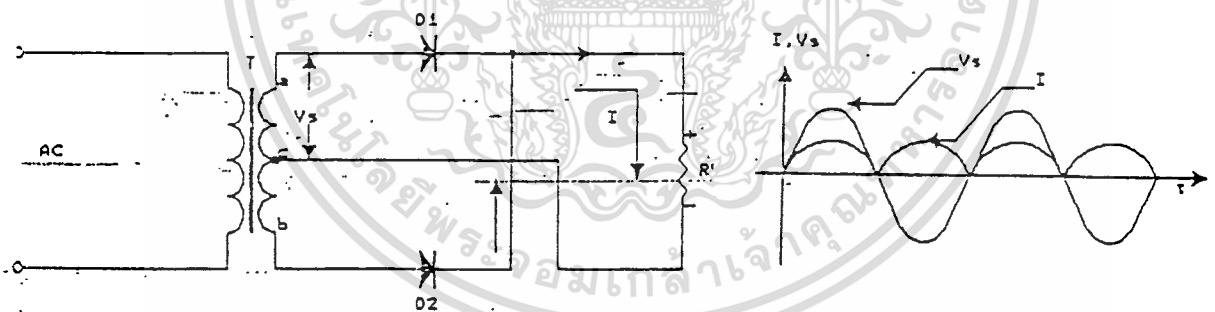
$$V_{dc} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

$$= 0.3183V_p \quad \dots(4.1)$$

4.2 วงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier)

ในกรณีของ วงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น ส่วนของกระแสตรงจะมีมาเพียงครึ่งเดียวเกิดเท่านั้น แต่ในกรณีของวงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่น ส่วนของกระแสตรงจะมาจากทั้งครึ่งคลื่นบวกและครึ่งครึ่งลบของไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรจ่ายไฟตรงแบบนี้จึงมีข้อดีกว่าแบบครึ่งคลื่นหลายประการลักษณะของวงจรที่นิยมใช้กันมากมีสองแบบคือ

ก. วงจรที่ใช้หม้อแปลงที่มีแทปกึ่งกลาง



รูป 4.2 วงจรเรกติไฟเออร์แบบเต็มคลื่นใช้หม้อแปลงที่มีแทปกึ่งกลาง

ใน รูป 4.2 เมื่อการเปลี่ยนแปลงของไฟสลับที่จุด a เป็นบวกเมื่อเทียบกับจุด c ไดโอด D_1 จะนำกระแส โดยที่ D_2 จะไม่นำกระแสเพราะที่จุด c มีศักดาเป็นบวกเมื่อเทียบกับจุด b ครั้นเมื่อศักดาที่จุด a เป็นลบเมื่อเทียบกับจุด c จุด b ก็จะมีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับจุด c ไดโอด D_2 จึงนำกระแสบ้าง กระแสที่ไหลผ่าน R_L จึงเป็นไปได้ทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบ กระแสที่ไหลในกรณีนี้จึงมีค่ามากกว่ากรณีเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่น การหาค่าแรงดันไฟ DC หรือแรงดันค่าเฉลี่ยที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ไฟตรงหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $V_s = V_p \sin \omega t$

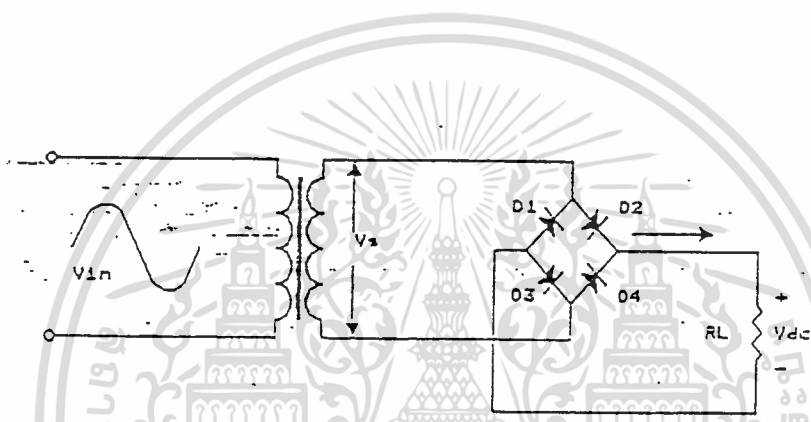
V_p คือ ค่าแรงดันสูงสุดของ V_s

แรงดัน V_{dc} คร่อม $R_L = 2V_p$

$$= 0.636 V_p$$

...(4.2)

ข. วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier)



รูป 4.3 วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์

การเรกติไฟเออร์สามารถทำได้โดยไม่ใช่หม้อแปลงที่มีแทปกึ่งกลางได้ แต่ต้องเพิ่มจำนวนไดโอดให้กับวงจรอีกเป็น 4 ตัว การจัดเรียงของไดโอดจะเรียงกันอยู่ในรูปของบริดจ์ที่เราเรียกว่า วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์

การทำงานของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ จะมีทิศทางการทำงานตามลักษณะของลูกศรนั้น คือ เมื่อ V_s เพิ่มขึ้นมาทางบวกไดโอด D2 และ D3 จะนำกระแส ครั้นที่แรงดัน V_s ลงไปทางลบไดโอด D1 และ D4 จะนำกระแสของไดโอดทั้งสองชุดนี้ เป็นผลให้กระแสไหลผ่าน R_L ในทิศทางเดียวเท่านั้น

วงจรเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์เป็นที่นิยมกันมาก เพราะไม่ต้องยุ่งยากในการพันหม้อแปลงให้มีแทปกึ่งกลาง และในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตไดโอดหลายบริษัทได้ผลิตไดโอดในรูปแบบของรวมอยู่ในกล่องซึ่งสะดวกในการใช้ คือ สามารถต่อเข้ากับหม้อแปลง และโหลดได้ทันที ทำให้สะดวกต่อการใช้งานยิ่งขึ้น

4.3 ระบบฟิลเตอร์ที่ใช้ในวงจรจ่ายไฟตรง

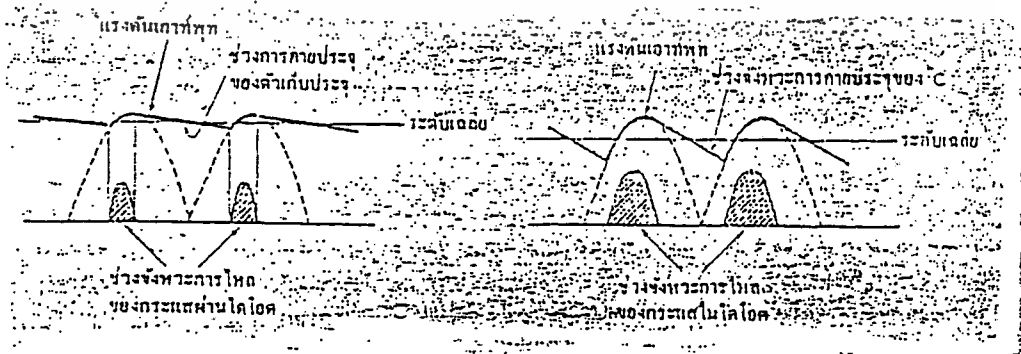
แรงดันที่ผ่านวงจรเรกติไฟเออร์แบบครึ่งคลื่นและเต็มคลื่น ออกมานั้น ถ้าพิจารณากันอย่างละเอียดแล้วจะเห็นว่า ลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ได้มานั้นไม่ราบเรียบ จำเป็นจะต้องมีวงจรช่วยทำให้ลักษณะกระแสและแรงดันนั้นราบเรียบขึ้น วิธีง่ายๆ ที่เราใช้คือ การฟิลเตอร์ (Filter)

แรงดันไฟฟ้าที่ได้ที่โหลคนั้น เราต้องการให้เป็นไฟตรงที่เรียบ วิธีการง่ายๆ ที่ทำให้แรงดันที่เป็นระลอกคลื่นเรียบขึ้นด้วยการใช้ตัวเก็บประจุ (Capaciter) ทั้งนี้เพราะตัวเก็บประจุหน้าที่สำคัญคือ การสะสมประจุไว้ในตัวมัน เมื่อใดที่กระแสป้อนน้อยมันก็จะเอาประจุที่เก็บสะสมไว้ในตัวมันจ่ายแทน เมื่อใดที่จะต้องจ่ายโหลคน้อย (โหลดใช้กระแสต่ำ) มันจะแบ่งมาสะสมไว้ ลักษณะของวงจรสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การใส่ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์

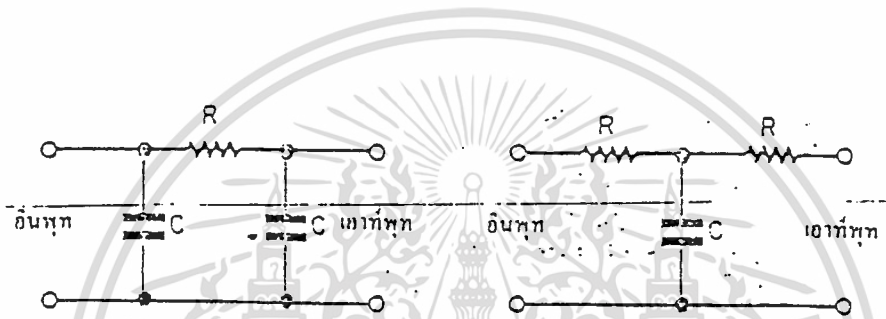
การใส่ตัวเก็บประจุฟิลเตอร์เป็นที่นิยมกันมาก เพราะใช้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวจะมีผลต่อโหลดของกระแสเพราะเมื่อมีการโหลดกระแสมากการจ่ายกระแสจากตัวเก็บประจุจะต้องมากทำให้แรงดันตกลงและมีขนาดของแรงดันกระเพื่อมสูงขึ้น (ripple)



รูป 4.5 แสดงผลของการโหลดที่มีต่อวงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ C เพียงตัวเดียว

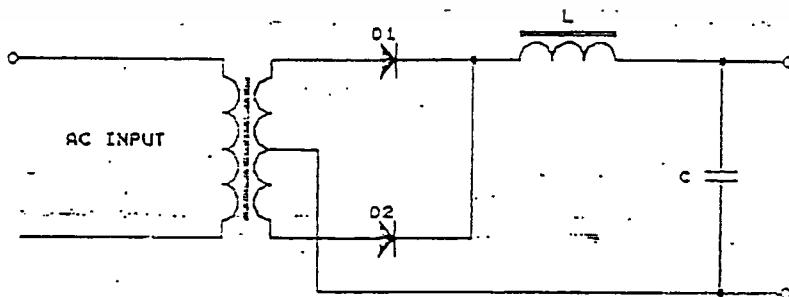
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ตัวเก็บประจุจะต้องเลือกขนาดของตัวเก็บประจุให้ใหญ่เพียงพอ เพื่อการคายประจุไปยังโหลดได้อย่างพอเพียง มิฉะนั้นผลของรีปเปิ้ลจะปรากฏให้เห็นมาก คือ แรงดันเอาต์พุตไม่เรียบ และขนาดของแรงดันโหลดเฉลี่ยจะตกลงด้วย การเพิ่มประสิทธิภาพของการฟิลเตอร์วิธีหนึ่ง คือ การต่อฟิลเตอร์ในรูปตัวพาย (π section) หรือตัวที (T section) โดยมีลักษณะของวงจรเป็นดังนี้



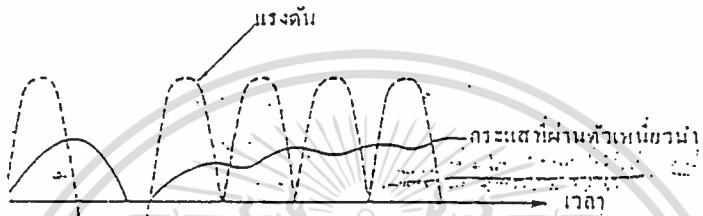
รูปที่ 4.6 วงจรฟิลเตอร์ใช้ R-C ประกอบเป็นรูปตัวพายและที

ในกรณีของรูปที่ 4.6 จะทำให้ขนาดของคลื่นรีปเปิ้ลมีค่าลดน้อยลง แต่ก็ยังมีข้อเสียในแง่ของกำลังสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในรูปตัวต้านทาน ดังนั้นถ้าต้องการจ่ายกระแสสูงๆ วิธีนี้จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียได้มาก และหนทางที่จะลดกำลังสูญเสียในความต้านทาน R คือ ใช้ตัวเหนี่ยวนำต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.7 (ก) วงจรฟิลเตอร์ที่ใช้ L กับ C ประกอบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

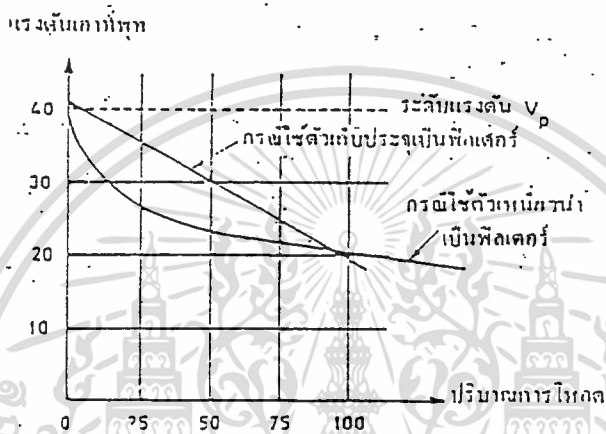


รูปที่ 4.7 (ข) รูปแสดงถึงกระแสที่ได้ราบเรียบ

ในกรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นฟิลเตอร์ การใช้ตัวเหนี่ยวนำมาใช้ร่วมในวงจรฟิลเตอร์นับว่าเป็นข้อดี เพราะคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำมีคุณสมบัติต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสในทันทีทันใดลักษณะของกระแสที่ได้จะราบเรียบ และจ่ายไปยังโหลดได้ดีแม้ว่าโหลดเปลี่ยนแปลงก็จะไม่ทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดเปลี่ยนแปลงมากนัก

และเพื่อรวมคุณสมบัติข้อดีของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ วงจรฟิลเตอร์ที่ใช้จึงต่อตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำรวมกัน (โดยทั่วไปมักจะให้ตัวเหนี่ยวนำต่อชิดกับวงจรไดโอด เพื่อกรองกระแสค่าเฉลี่ยก่อน แล้วจึงใช้ตัวเก็บประจุประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.7)

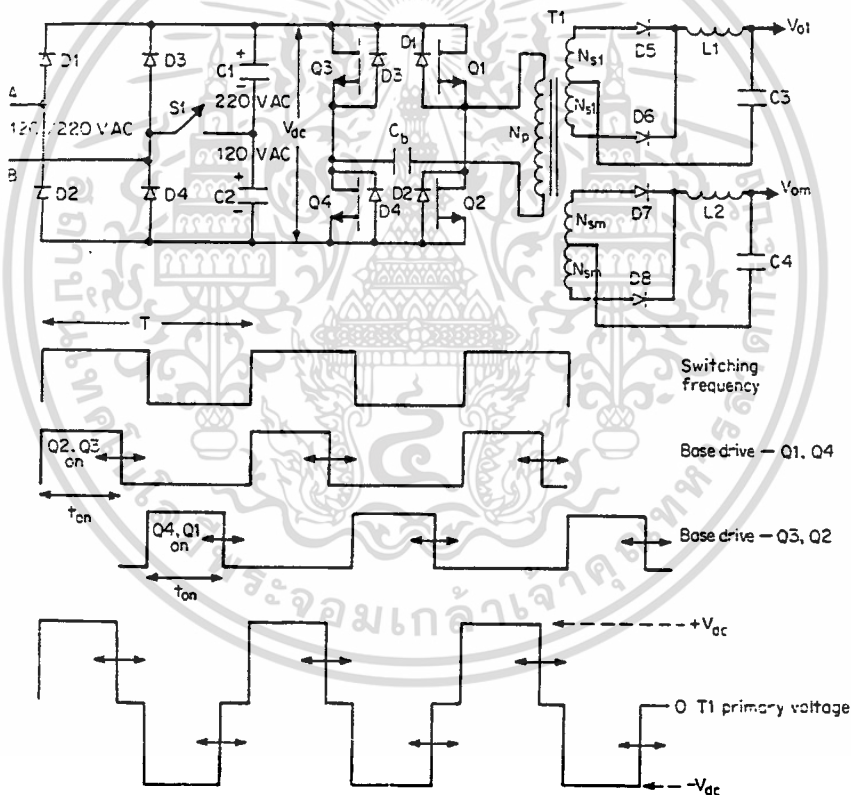
ในการพิจารณา ในแง่รูปคลื่นของวงจร หรือกระแสโหลดมีผลต่อแรงดันเอาต์พุตอย่างไรเราจะใช้หลักการที่กล่าวมาแล้วอธิบายได้ โดยการใช้ตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียวนั้นเป็นตัวฟิลเตอร์ ในกรณีที่กระแสโหลดเป็น 0 ค่าแรงดันก็จะอยู่ที่ประมาณ V_p หรือแรงดันจุดสุดยอดครึ่งเมื่อโหลดด้วยกระแสเพียงเล็กน้อย แรงดันก็จะตกลงมามาก ต่อจากก็จะลดน้อยลงเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าเป็นตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียวลักษณะของแรงดันจะลดน้อยลงลงแปรตามกันกับค่าของกระแสโหลดซึ่งสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลของการใช้ L หรือ C เป็นฟิลเตอร์

4.4 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แสดงไว้ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งมีข้อดีคือแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์จะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ซึ่งมีระดับแรงดันเท่ากับ $\pm V_{dc}$ เมื่อเทียบกับวงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ระดับแรงดันจะมีค่าเพียง $\pm V_{dc} / 2$ ดังนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์จึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ามากกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ถึง 2 เท่า



รูปที่ 4.9 แสดงผลของระดับแรงดันเอาท์พุท

ซึ่งการทำงานของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์มีดังนี้ ไอจีบีทีที่อยู่ตรงกันข้ามกันในแนวทแยงมุม (Q_1 กับ Q_4 และ Q_2 กับ Q_3) จะทำงานพร้อมกันในแต่ละครึ่งคาบการทำงาน เราสามารถควบคุมการทำงานของไอจีบีที ได้โดยควบคุมสัญญาณขับเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไปว่ากรณีใด ข้อสี่สิบ สิบเจ็ดห้ามมิให้คัดลอกเปลี่ยนแปลง และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีใด ๆ

ตัวเก็บประจุป้องกันหม้อแปลง

รูปที่ 4.9 จะแสดงตัวเก็บประจุลือกิ่งเป็นชนิด ไม่มีขั้วต่ออนุกรมกับหม้อแปลง ซึ่งมีความจำเป็นต้องต่อไว้เพื่อป้องกันปัญหาการไม่สมดุลย์ของฟลักซ์ในหม้อแปลง ซึ่งการไม่สมดุลย์ของฟลักซ์ในหม้อแปลงเกิดมาจากช่วงเวลาการทำงานของ Q1 กับ Q4 และ Q2 กับ Q3 ไม่เท่ากัน นั่นคือแรงดันอินพุทเข้าหม้อแปลงจะมีส่วนประกอบดีซี (dc componant) ประกอบอยู่เราจึงใช้ตัวเก็บประจุลือกิ่งสัญญาณดีซีเอาไว้



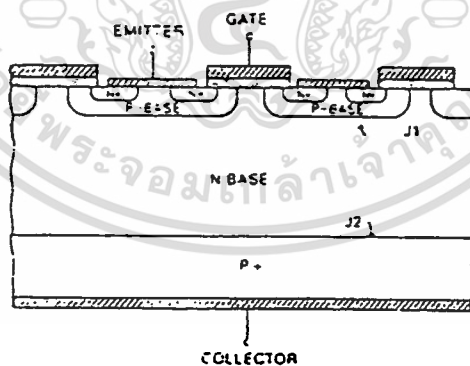
บทที่ 5

Insulate Gate Bipolar Transistor (IGBT)

Bipolar Junction Transistor (BJT) และ MOSFET ต่างก็มีลักษณะเด่นต่างกันไป BJT จะมีกำลังสูญเสียขณะนำกระแสต่ำ และยังมีอัตราทนแรงดันสูง แต่จะมีความหยุดนำกระแสได้อย่างรวดเร็วกว่า จากข้อดีของอุปกรณ์ทั้งสองจึงทำให้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ขึ้นมา โดยรวมเอา BJT และ MOSFET ลงใน WAFER เดียวกันเรียกว่า Insulate Gate Bipolar Transistor (IGBT) ซึ่งคาดว่าจะได้มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายต่อไปในอนาคต ชื่ออื่น ๆ ของอุปกรณ์ชนิดนี้ก็มี GEMFET , COMFET (Conductivity-Modulated Field Effect Transistor) , IGT (Insulategate Transistor) และ Bipolar-mode mosfet หรือ Bipolar-mostransistor ในส่วนนี้เราจะได้นำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องต่อไป

5.1 โครงสร้างของ IGBT

จากภาพตัดขวางของ n-channed IGBT ในรูปที่ 1 จะมีโครงสร้างที่คล้ายกับโครงสร้างของมอสเฟตมาก แต่จะมีข้อที่แตกต่างกันคือจะมีชั้น P^+ ที่ต่ออยู่กับขา drain ของ IGBT รอยต่อ pn junction ที่ชั้น $J1$ จะเป็นรอยต่อที่จะทำให้มี minority carries เคลื่อนผ่านไปชั้น drain drift region ส่วนระหว่างเกิดกับขอรส์ของ IGBT จะมีโครงสร้างคล้ายกับมอสเฟต



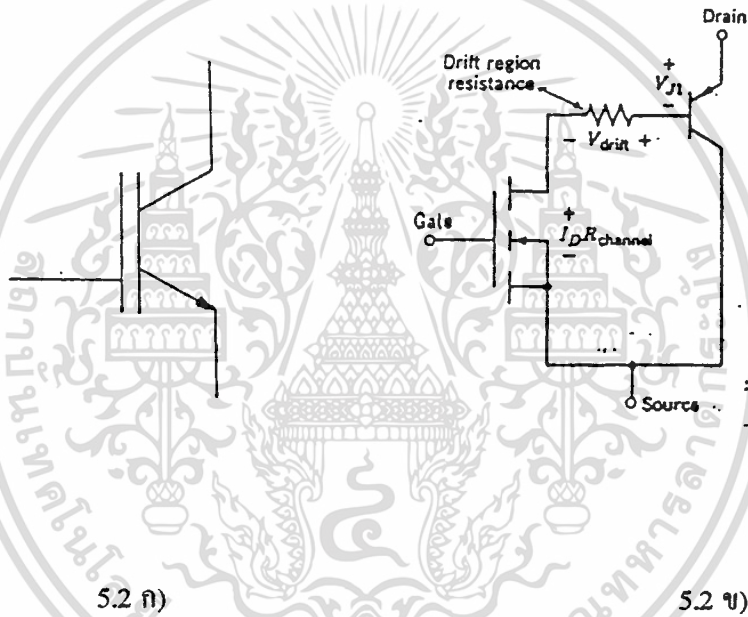
รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างของ IGBT

จากรูปที่ 5.1 โครงสร้างของ IGBT จะเหมือนกับมีไทรสเตอร์อยู่ภายใน เนื่องจากการ doped สาร ทำให้เกิดเป็นรอยต่อที่มีคุณสมบัติเป็นไทรสเตอร์อยู่ภายในการ doped ความหนาแน่นของชั้นสารและความหนาของชั้นเป็นสิ่งที่สามารถจะปรับปรุงการทำงานของ IGBT ได้ โดยมีเหตุผลสำคัญอยู่ 2 ประการคือ 1) ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในการนำกระแสต่ำ และ 2) จะมีค่า turn-off time สั้น แต่อย่างไรก็ตามการที่ทำเช่นนี้ จะทำให้ลดความสามารถในการทนแรงดัน

เอกส (reverse blocking capability) ต่ำลง ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ของ n channel IGBT แสดงดังรูปที่ 5.2ก) สัญลักษณ์นี้จะคล้าย ๆ กับ n channel MOSFET แต่จะเพิ่มหัวลูกศรที่ชี้เข้าไปข้างในที่ขา drain ซึ่งแสดงถึงทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน

รูปที่ 5.2ข) จะเป็นวงจรสมมูลของ IGBT ซึ่งจะมีลักษณะของ MOSFET ทางด้านอินพุต แต่ทางด้านเอาต์พุตจะมีลักษณะของทรานซิสเตอร์



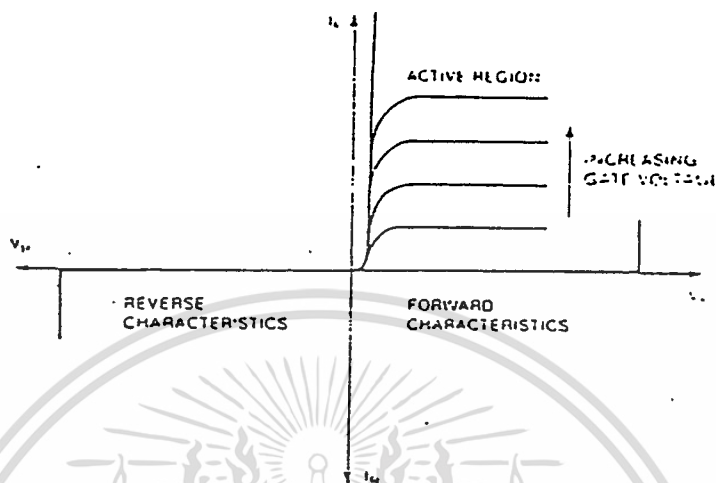
5.2 ก) สัญลักษณ์ของ n channel IGBT

5.2 ข) วงจรสมมูล

5.2 ลักษณะการทำงาน

จากรูปโครงสร้างของ IGBT กระแสจะถูกกั้นไว้ไม่ให้ไหลผ่านได้. ในกรณีที่ให้ negative bias ที่ขาคอลเลกเตอร์เมื่อเทียบกับ อิมิตเตอร์ เพราะว่าที่ junction j2 จะถูก reverse bias มันจะทำให้เป็นค่าของ reverse blocking capability จะมีแรงดันบวกที่ขาคอลเลกเตอร์ แต่ยังไม่มีความดันไบอัสที่เกต junction ด้านบน j1 จะได้รับ reverse bias และ IGBT จะทำงานในย่าน forward blocking mode อย่างไรก็ตาม ถ้ามีแรงดันมาจ่ายให้ที่เกตพอเพียงที่จะ invert surface ของ p-base region ทำให้เกิดมีอิเล็กตรอนมาออกกันที่ชั้น p ภายใต้เกต IGBT จะอยู่ในภาวณำกระแสได้ เพราะว่าอิเล็กตรอนขณะนี้สามารถไหลจากย่านอิมิตเตอร์ n+ ไปสู่ ย่าน n base ในสภาวณำกระแสนี้ junction j2 จะได้รับ forward bias และคอลเลกเตอร์ p+ จะฉีด holes ไปในเขต n base รูปคุณลักษณะของ IGBT แสดงดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



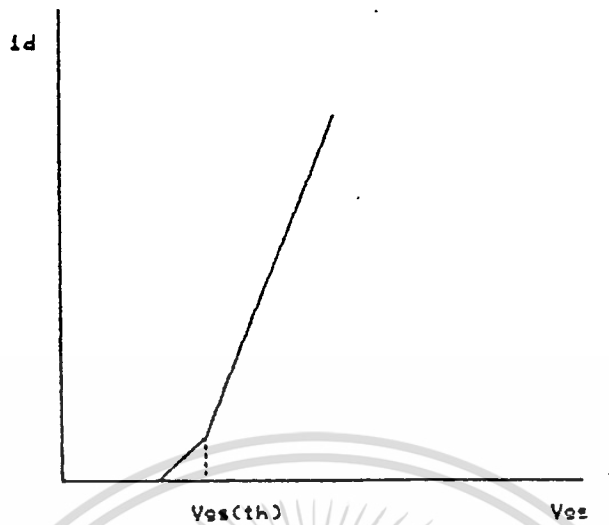
รูปที่ 5.3 คุณสมบัติของแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุต

ในการที่จะ switch IGBT จากภาวะนำกระแสไปสู่ภาวะการหยุดนำกระแสจะต้อง สวิตซ์ gate bias off โดยการ short gate กับอิมิตเตอร์ ที่ภาวะนี้จะเป็นการดึง inverseregion ที่ surface ของ p-base ได้ เกท และมันจะปิดแหล่งจ่ายของอิเล็กตรอนไป n-base นี่จะเป็นการ เริ่มที่จะ turn off ผลจากข้อนี้ จะมีอิเล็กตรอนหนีไปที่ p+ collector region จะเกิดขนะที่มี hole ไหลไปใน p-base ขณะที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเริ่มลดลงอิเล็กตรอนที่หนีไปใน p+ collector จะลดลงด้วย การรวมตัวของอิเล็กตรอนและ hole ใน n-base จะลดลง

จากการทำงานของ IGBT จะเห็นได้ว่ามันสามารถทำงานได้ที่กระแสสูง ๆ ในทิศ ของ forward conduction mode และยังแสดงถึงความสามารถในการ turn off ยิ่งไปกว่านี้ IGBT ยังต้องการ gate drive power ต่ำ เพียงต้องการ charge และ discharge ตัวเก็บประจุที่ อยู่ภายในตัว IGBT เท่านั้น จะเห็นได้ว่ามันสามารถทำงานได้เหมือน ideal switch มาก

ข้อเสียของโครงสร้างของ IGBT ที่แสดงในรูปที่ 5.1 คือจะมี parasitic p-n p-n ไทรสเตอร์ ภายในอยู่ระหว่าง คอลเลคเตอร์, อิมิตเตอร์ ถ้าไทรสเตอร์เกิด latches on กระแสจะ ไม่สามารถที่จะควบคุมได้ที่ mos gate ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบไว้ไม่ให้ไทรสเตอร์ ทำงานได้โดยการป้องกันไม่ให้มีการฉีดอิเล็กตรอนจาก n+ อิมิตเตอร์ region ไปใน p-base ขณะที่ IGBT ทำงาน ดังนั้น n+ p junction เริ่มได้รับ forward bias โดยมีค่าแรงดันมากกว่า 0.7 V ที่เกิดขึ้นเป็นผลข้างเคียงเนื่องมาจากมีกระแสไหลเข้าไปใน p-base การฉีดอิเล็กตรอนจะ สามารถหายไปได้ โดยการออกแบบให้มีช่วง n+ อิมิตเตอร์ ย่นแคบ ๆ และรักษาให้ p-base sheet resistance ต่ำ ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงคุณลักษณะของ I_d และ V_{gs}

จากรูปที่ 5.4 เป็นรูปคุณลักษณะของ I_d และ V_{gs} จะเห็นว่ากราฟจะเป็นเชิงเส้นที่ย่านกระแสส่วนใหญ่ แต่จะไม่ใช่เชิงเส้นที่ย่านกระแส drain ต่ำ ๆ ที่ซึ่งแรงดัน เกท source เข้าใกล้ค่า threshold ถ้า V_{gs} น้อยกว่าแรงดัน threshold $V_{gs(th)}$ IGBT จะอยู่ในภาวะหยุดนำกระแส (off state)

5.3 คุณสมบัติในการสวิตช์

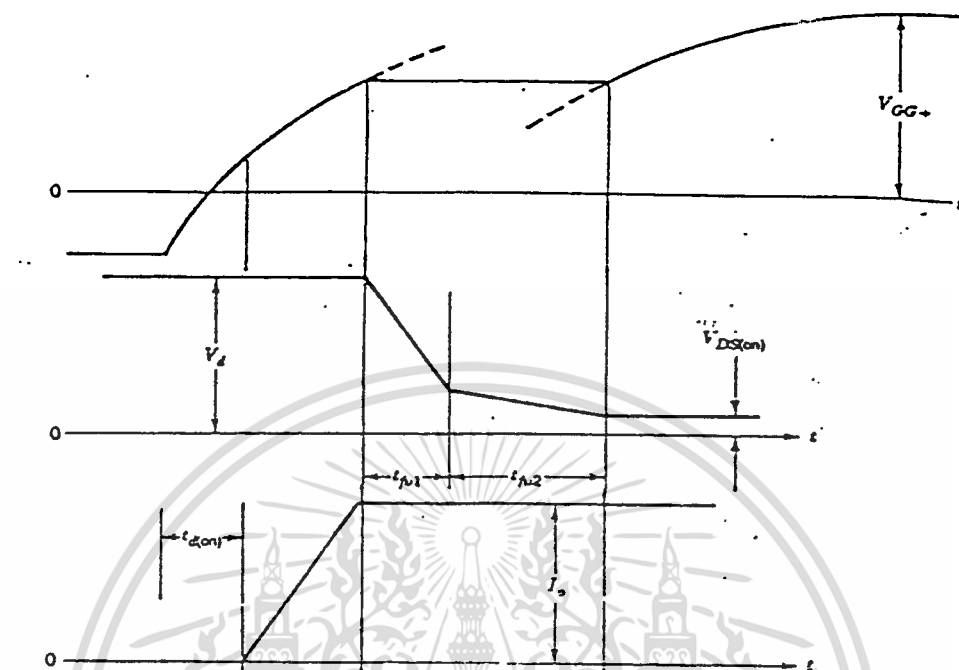
5.3.1 ภาวะนำกระแส

เส้นกราฟของแรงดัน และกระแสขณะ turn off ของ IGBT จะคล้ายกับของ มอสเฟต จากรูปเป็นการให้แรงดันที่ เกทจาก 0 TO V_{gs} , turn on delay time $t_{d(on)}$ คือช่วงเวลาตั้งแต่แรงดัน V_{gs} ตั้งแต่ 0 to $V_{gs(th)}$ เพราะว่ากระแสที่ไหลผ่าน C_{gs} และ C_{gd} ทำให้อัตราการเพิ่มของ V_{gs} เป็นแบบ exponential แรงดัน drain V_d จะยังคงที่จนกว่า $I_d < I_o$ (diode ในตัว มอสเฟตจะเริ่มนำกระแส) ช่วงเวลานี้จะเรียกว่า current rise time t_{r1} ช่วงเวลา t_{fv1} เป็นช่วงที่มันทำงานอยู่ในย่าน active ส่วนช่วงเวลา t_{fv2} เป็นช่วงเวลาที่มันทำงานอยู่ในช่วง ohmic region ส่วนค่าแรงดัน $V_{ds(on)}$ คือค่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟตขณะนำกระแสที่เกิดจาก $I_o \cdot R_{ds(on)}$

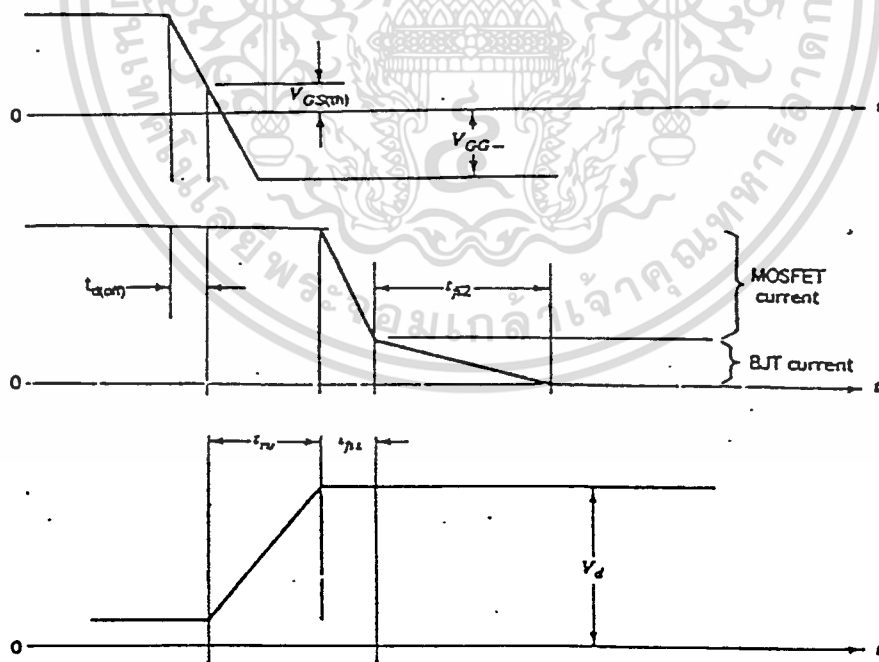
5.3.2 ภาวะหยุดนำกระแส

ลักษณะกราฟของแรงดันและกระแสขณะ turn off ของ IGBT ซึ่งคล้ายกับมอสเฟต แต่ข้อแตกต่างที่เด่นชัดคือ turn off ของ IGBT กระแสที่ลดลงอย่างทันทีที่จะเกิด 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นการหยุดนำกระแสของมอสเฟตภายในตัว IGBT ส่วนช่วงเวลาที่สองจะเป็นช่วงที่หยุดนำกระแสของทรานซิสเตอร์ภายใน ซึ่งช่วงเวลานี้จะนานกว่าช่วงแรกซึ่งจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียได้

มาก



รูปที่ 5.5 ภาชนะนำกระแส

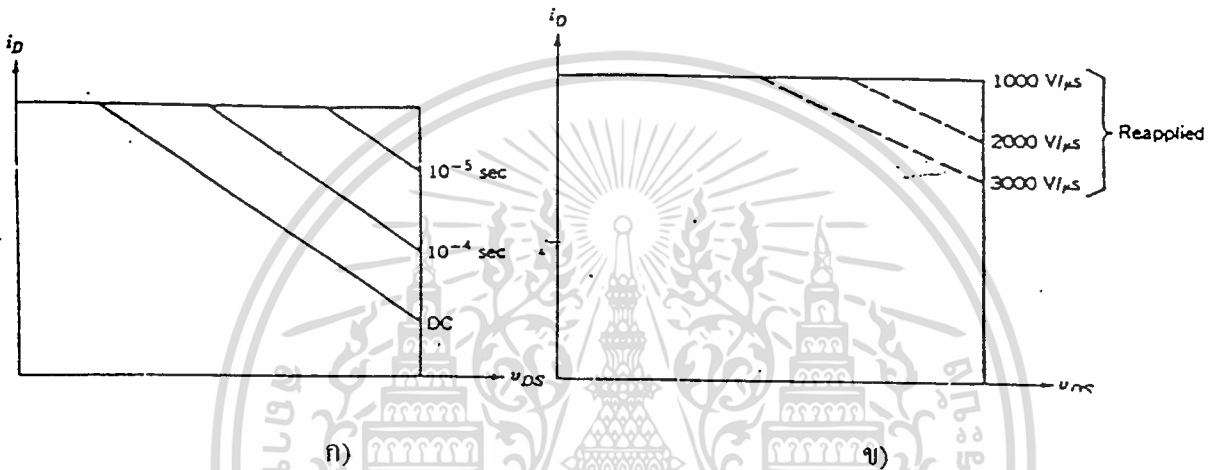


รูปที่ 5.6 ภาชนะหยุดนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ขอบเขตปลอดภัยในการทำงาน

forward bias safe operation area แสดงดังรูปที่ 5.7ก)เมื่อเทียบกับมอสเฟตแล้วจะพบว่า IGBT สามารถทำงานได้ในช่วงที่กว้างกว่าเมื่อมี switching time เท่ากัน reverse bias safe operation area แสดงดังรูปที่ 5.7ข) จะแตกต่างกับ FBSOA คือจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน drain-source เทียบกับเวลา



รูปที่ 5.7 แสดงย่านการทำงานที่ปลอดภัยของ ไอจีบีที

5.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของไอจีบีที กับอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งประเภทอื่น

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ไอจีบีที มีความต่างศักย์ตกคร่อมใกล้เคียงกับทรานซิสเตอร์ ขณะที่มีความต้านทานด้านอินพุตสูง และมีความเร็วในการเทิร์นออนสูงเหมือนกับมอสเฟต

ที่ย่านการใช้งานที่ความถี่ปานกลาง สามารถนำไอจีบีทีไปใช้งานแทนมอสเฟต ทรานซิสเตอร์ และไทรสเตอร์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับไทรสเตอร์ทั่วไป ไอจีบีที มีความเร็วในการสวิตซ์ที่สูงกว่าและมีความต้านทานของอินพุตสูงกว่า สามารถทนต่อการเปลี่ยนของความต่างศักย์ dv/dt ที่สูงกว่า และมีวงจรถับที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ในขณะที่ไทรสเตอร์บางประเภท เช่น จีทีโอ (GTO) ก็สามารถควบคุมการออนออฟได้ ด้วยสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าขาเกตได้ แต่ก็ต้องการกระแสไหลกลับทิศ ในการออฟฟิทีโอในขณะที่ การออฟไอจีบีที ทำได้โดยการให้ตัวเก็บประจุที่ขาเกต ได้ขับประจุออกมา แต่ไทรสเตอร์มีความต่างศักย์ตกคร่อม ในสภาวะออนต่ำกว่าไอจีบีที และมีค่าพิคการทนต่อกระแสลิร์จ (Surge-Current) ที่สูงกว่าไอจีบีที

ในการเปรียบเทียบความยากง่ายของวงจรถับ ให้สมมติว่าต้องการให้อุปกรณ์รับกระแสได้ 10 แอมป์ ถ้าใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง จะต้องการกระแสจำนวนมากเพื่อที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ให้ทางสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

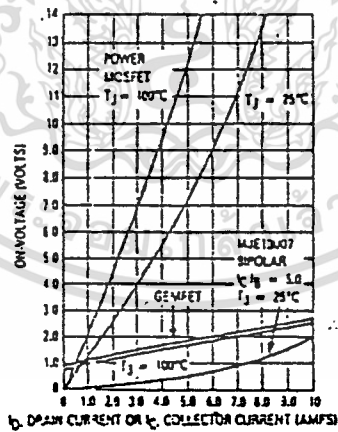
ยกตัวอย่างเช่น ทรานซิสเตอร์ที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 5 ในการที่จะจ่ายกระแสคอลเลกเตอร์ ได้ถึง 10 แอมป์ จะต้องป้อนกระแสประมาณ 2 แอมป์ เข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ ในขณะที่ไอจีบีทีที่ควบคุมการทำงานด้วยความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าระหว่างขาเกต และอิมิตเตอร์ซึ่งต้องการกระแสจำนวนน้อยมาก อยู่ในหน่วยนาโนแอมป์ ก็สามารถทำให้ไอจีบีทีทำงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรขับขาเกตของไอจีบีทีที่มีความง่ายกว่า วงจรขับของทรานซิสเตอร์มาก

ทรานซิสเตอร์อาจจะใช้วงจรคาร์ลิงตัน (Darlington) ในการขยายค่าเพื่อให้วงจรขับง่ายขึ้น แต่ความต่างศักย์ตกคร่อมในสถานะออนจะสูงขึ้น

ส่วนวงจรขับของไอจีบีทีกับมอสเฟต มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาก จนสามารถใช้แทนกันได้แต่ถ้าใช้งานในด้านความถี่ปานกลางที่พิกัดกระแสและความต่างศักย์ที่สูงแล้ว ก็ควรจะเลือกใช้ไอจีบีทีในการทำงานแทนมอสเฟต เนื่องจากมีความต่างศักย์ตกคร่อมในสถานะออนต่ำกว่า

5.6 การเปรียบเทียบของกำลังงานสูญเสียในสถานะออน

ข้อได้เปรียบของ ไอจีบีทีที่เหนือกว่ามอสเฟตก็คือ มีความต้านทานในขณะนำกระแสที่ต่ำกว่า V_{ON} ของมอสเฟต ที่ใช้กับความต่างศักย์สูง ๆ จะมีค่าสูงตามไปด้วย และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของรอยต่อ และกระแสเดรนเพิ่มขึ้น ต่างกับไอจีบีที ที่ความต้านทานจะไม่เพิ่มเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อกระแสและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบความต่างศักย์ตกคร่อมในสถานะออน ของมอสเฟตและไอจีบีที

จากการเปรียบเทียบความต่างศักย์ตกคร่อมในสถานะออน ของมอสเฟต (MTP4N50) และ ไอจีบีที (MTM20N50) ที่กระแสเดรนค่าต่าง ๆ และที่อุณหภูมิของรอยต่อที่ 25 และ 100 องศาเซลเซียส เพราะมอสเฟตไม่มีความต่างศักย์ออฟเซต (off set voltage) ดังนั้นที่กระแสต่ำ ๆ มอสเฟตจะมีความต่างศักย์ตกคร่อม เพียงเล็กน้อย แต่ที่อุณหภูมิสูง ๆ ความต่างศักย์คร่อมของ

มอสเฟตกลับมีค่ามากกว่าของไอจีบีที จะเห็นได้ว่าความต่างศักย์ในสภาวะออนของทรานซิสเตอร์ ขึ้นกับค่า และกระแสเบส

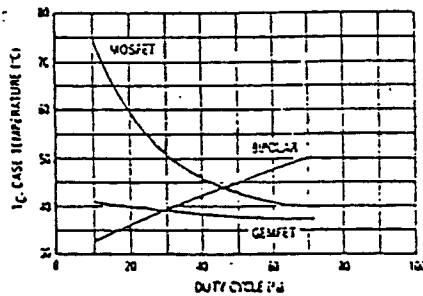
ประสิทธิภาพในการนำกระแสไม่ได้กำหนดด้วยความต่างศักย์เพียงอย่างเดียว แต่กระแสเบส หรือ กระแสเกทก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคิดถึง เนื่องจากความต้านทานของอินพุตของไอจีบีทีมีค่าสูงมาก ทำให้ประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีค่า = 5 ซึ่งจะมีกำลังงานสูญเสีย เนื่องจากกระแสเบสสูงมาก

เปรียบเทียบประสิทธิภาพในขณะออน ของอุปกรณ์แต่ละชนิดได้ใช้อุปกรณ์ต่อไปนี้ ในการเปรียบเทียบ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ (MTE1300C) พิกัด 8 A , 400V และ มอสเฟต (MTP4N50) 4A , 500V และ ไอจีบีที (MGM20N50) 20A , 500V ความถี่ในการสวิทซ์ซึ่งคงที่ ที่ 90 Hz แต่ดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 9% - 71% ในการจ่าย โหลดให้แด่มอเตอร์

TABLE 4 — On-State Efficiency Testing: Pulse Width Modulation of DC Motor

	Pulse Width (ms)	Duty Cycle %	I _c (max) or I _D (max) (A)	Case Temp (°C)	Power Dissipation (W)	On Voltage (Volts)	V _{DS} or V _{CE(pk)} (Volts)	Relative Power Out (Speed)	Relative Power In
GEMFET (MTM20N50)	8.0	71	0.75	37.2	0.69	1.0	1.75	78	2.0
	6.0	54	1.0	37.4	0.70	1.1	2.0	77	2.0
	4.0	36	1.6	38.5	0.75	1.1	2.5	73	2.0
	2.0	18	2.75	39	0.79	1.5	4.0	64	2.0
	1.0	9.0	4.50	40.9	0.86	2.0	6.5	49	2.0
TMOS (MTP4N50)	8.0	71	0.75	38.6	0.76	1.0	1.75	78	2.0
	6.0	54	0.80	42.1	0.91	1.3	2.25	77	2.0
	4.0	36	1.25	49.4	1.22	2.0	3.25	70	2.0
	2.0	18	2.25	62	1.77	4.5	6.50	48	2.0
	1.0	9.0	3.50	77.4	2.44	7.5	11.00	18	2.0
BIPCLAR (MJE1300C7)	8.0	71	0.80	49.7	1.24	0.1	0.8	82	140
	6.0	54	1.1	45.7	1.06	0.2	1.0	81	104
	4.0	36	1.5	40.7	0.85	0.2	1.5	78	72
	2.0	18	2.75	34.8	0.59	0.3	3.0	70	35
	1.0	9.0	4.5	32.6	0.50	0.5	5.0	59	20

T = 11.2ms T_A = 21.2°C I = 50 Hz V_{DD} = 14 V R_{thJC} = 27°C/W



รูปที่ 5.9 แสดงความระหว่างอุณหภูมิที่ตัวถังกับค่าดิวตี้ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

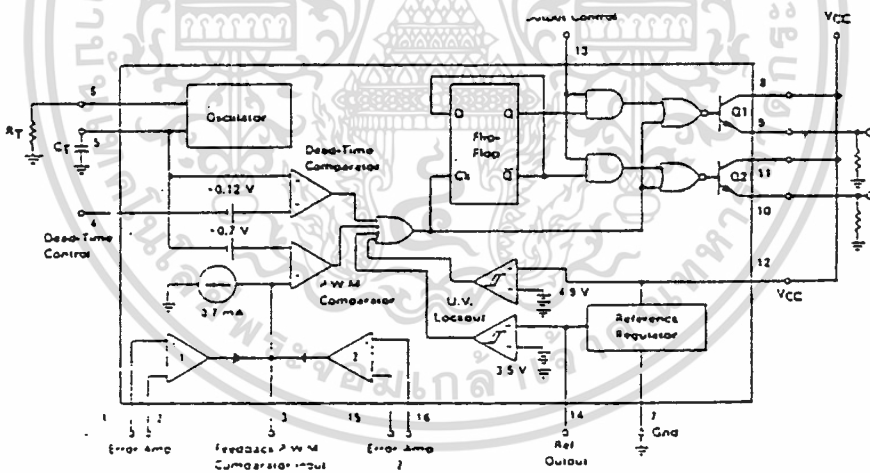
วงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนของไอจีบีที

6.1 วงจรควบคุมการขับเคลื่อนของไอจีบีที

วงจรควบคุมการขับเคลื่อนของไอจีบีทีจะมีหน้าที่ในการทำให้ไอจีบีทีทำงานเป็นสวิตช์ปิดเปิด เพื่อทำให้เกิดความถี่สูงตามที่ต้องการที่โหลด วงจรส่วนเพาเวอร์เป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพราะฉะนั้นจึงต้องสร้างวงจรขับเคลื่อนมา 4 ชุดมาขับไอจีบีทีให้สลับกันสวิตช์ วงจรที่สร้างสัญญาณพัลส์ได้ใช้ IC เบอร์ TL494 กำหนดสัญญาณที่ความถี่ 13 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนวงจรขับใช้วิธีการต่อหม้อแปลงในการขับนำเกทของไอจีบีที

6.1.1 ไอซีเบอร์ TL494 สำหรับโหมดควบคุมจากแรงดัน

ไอซีเบอร์ TL494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยทำงานควบคุมจากโหมดแรงดัน ซึ่งจะได้นำมาเป็นวงจรสร้างพัลส์ที่ความถี่ 13 กิโลเฮิร์ตซ์ โครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL494 แสดงในรูปที่ 5.1 การทำงานของไอซีจะเป็นดังนี้



รูปที่ 6.1 แสดงการจัดโครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ TL494

6.1.2 การกำหนดเวลาคาบการทำงาน

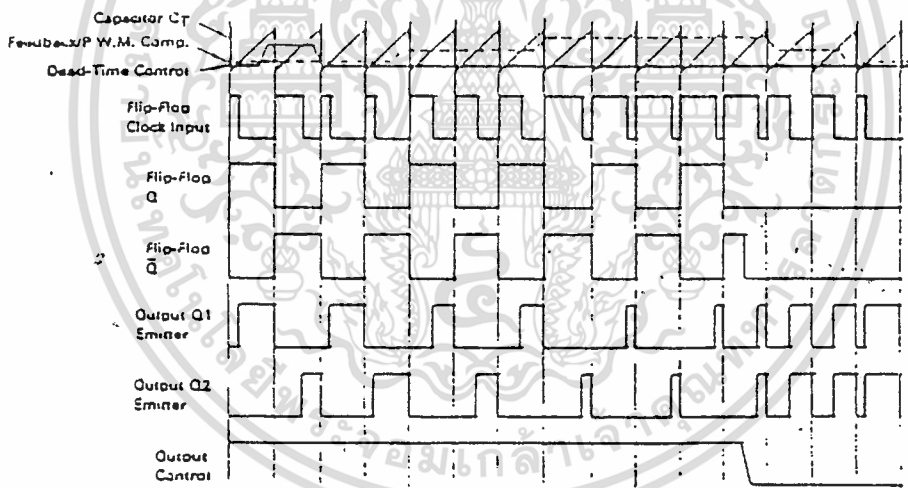
วงจรของ TL494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตพัลส์กำหนดได้โดยค่าของ R และ C จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของไอซี

6.1.3 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซี จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 6 กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัว ที่ PWM Comparator ส่วน NOR เกทที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาต์พุต Q1 และ Q2 จะทำงานก็ต่อเมื่อขา ของ Flip-Flop

อยู่ในสถานะ low เท่านั้น ซึ่ง จะเป็น low ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณพื้นเล็ยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้ง 2 สอง นั่นคือแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ หากมีค่าสูงขึ้น ความกว้างเอาต์พุตของไอซีจะลดลง ในทางกลับกันแรงดันที่ป้อนหากมีค่าลดลงความกว้างเอาต์พุตของไอซีจะเพิ่มขึ้น

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของไอซีสามารถกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 โวลต์ จนถึง 3.5 โวลต์ ส่วน Error Amp ทั้งสองตัวจะมีช่วงของอินพุตคอมมอนโหมด ตั้งแต่ -0.3 ถึง $V_{cc}-2$ โวลต์ และสามารถใช้ตรวจจับแรงดันหรือกระแสที่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ได้ Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาต์พุตในลักษณะให้สถานะ High (Active high) โดยต่ออยู่กับในลักษณะ OR ที่ขา non-inverting ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้ Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาต์พุตพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างเอาต์พุตของไอซี

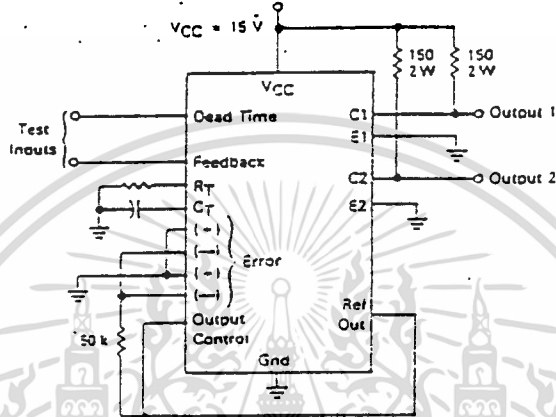


รูปที่ 6.2 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL494

6.1.4 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ (Dead Time)

TL494 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดค่าเวลาเพื่อของวงจรได้เอง ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 โวลต์ที่ขา 4 ของไอซี อย่างไรก็ตาม หากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ค่าเวลาเพื่อต่ำสุดของไอซี จะไม่ต่ำกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ของค่าคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 มิลลิโวลต์ต่ออยู่ภายใน ดังนั้นช่วงเวลา สูงสุดของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากไอซี จะเท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 (output control) เข้ากับขา 14 (+5) และ มีค่าเท่ากับ 96 เปอร์เซ็นต์ ของค่าคาบเวลาเมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์

FIGURE 12 — DEAD-TIME AND FEEDBACK CONTROL TEST CIRCUIT



รูปที่ 6.3 แสดงวงจรการต่อเดดทائم

จากสูตร

$$\% \text{ ON} = 45 - [80 / (1 + R1/R2)]$$

6.1.5 การเลือกใช้ Q1 และ Q2 ที่เอาพุทของไอซี

เอาท์พุท Q1 และ Q2 ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมด คือ ทำงานพร้อมกัน หรือ สลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (output control) โดยขณะที่ ดิสชาร์จ เอาท์พุทของ Dead-Time Comparator จะให้พัลส์ออกมา จะมีสถานะเป็น High และหยุดการทำงานของ Q1 และ Q2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น High โดยการ ต่อเข้ากับขา 4 (+5 V_{ref}) Q1 และ Q2 จะสลับกันทำงานตามจังหวะของ Flip-Flop เพื่อ ใช้ขับอินเวอร์เตอร์แบบ พุชพูล ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะเป็น 2 เท่าของค่าคาบ เวลาสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี แต่ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น low โดยการต่อลงกราวด์ (ยกเลิก Flip-Flop) Q1 และ Q2 จะทำงานพร้อมกันและสามารถขนาน Q1 และ Q2 เข้า ด้วยกันได้ ถ้าต้องการให้น้ำกระแสได้มากขึ้น ในกรณีนี้คาบเวลาการทำงานจะมีค่าเท่ากับค่าคาบ เวลาของสัญญาณฟันเลื่อยของไอซี (ช่วงนำกระแสสูงสุดเท่ากับ 96 % ของค่าคาบเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

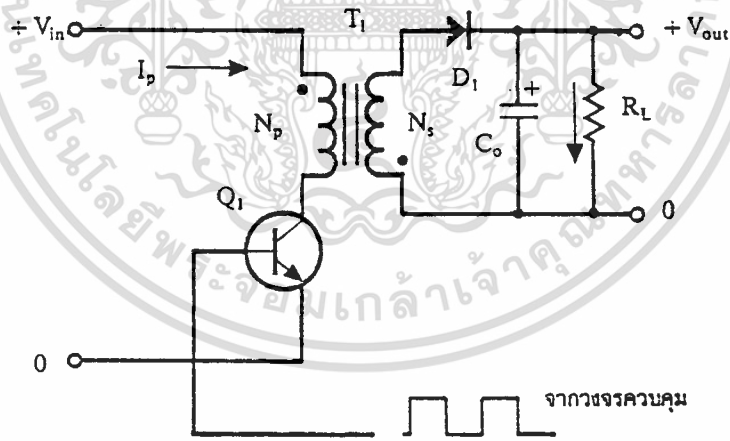
TL494 ต้องการไฟเลี้ยงในช่วง = 7 ถึง 40 โวลต์ มีแรงดันอ้างอิงภายในโวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 10 มิลลิแอมป์เพื่อใช้กับวงจรภายนอกได้ โดยมีค่าความถูกต้อง 1.5 % ความคลาดเคลื่อนทางอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า 50 มิลลิโวลต์เมื่อทำงานในช่วง 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 พื้นฐานการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานไอจีบีที

วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6.4 โดยจะรับอินพุตมาจาก TL 494 และจะส่งสัญญาณเอาต์พุตไปควบคุมไอจีบีทีของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ การทำงานของวงจรเป็นดังนี้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะทำงานโดยนำกระแส (ON) และหยุดนำกระแส (OFF) สลับกันไปเมื่อ Q_1 นำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านขดปฐมภูมิ (I_p) แต่เนื่องจากหม้อแปลงถูกกำหนดให้ขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ พันอยู่ในลักษณะกลับทิศทาง ดังนั้นในขณะที่ Q_1 นำกระแสไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะไบแอสกลับและไม่มีกระแสไหลผ่านไปยังโหลด R_L พลังงานจึงถูกสะสมอยู่ที่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลง เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแสสนามแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงยุบตัว ทำให้มีการกลับขั้วของแรงดันที่ขดทุติยภูมิ ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง พลังงานที่ถูกสะสมไว้ที่ขดปฐมภูมิจะถูกถ่ายเทไปยังขดทุติยภูมิ และจะมีกระแสไหลผ่านไปยังโหลดและตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o ได้

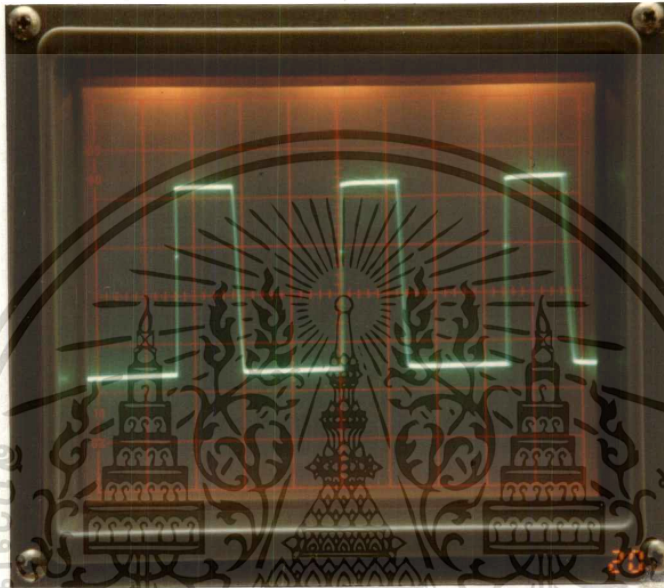


รูปที่ 6.4 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

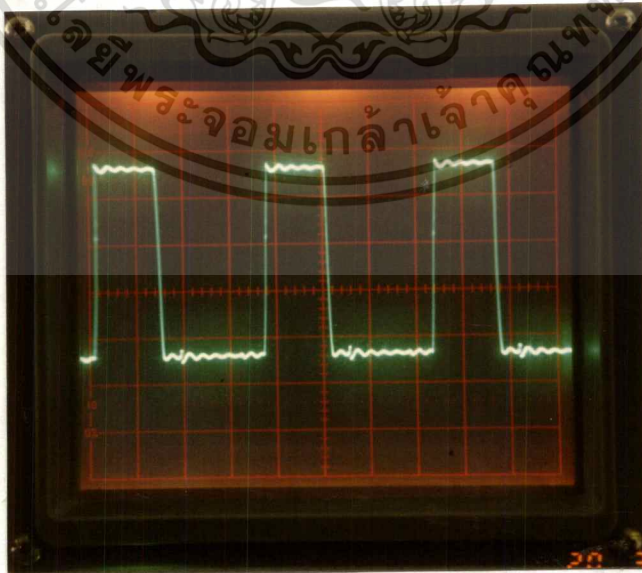
บทที่ 7

ผลการทดลอง

จากการทดลองทำการหาลอมโลหะ ที่จุดสภาวะรีโซแนนซ์ 14.7 กิโลเฮิร์ต สามารถวัดสัญญาณได้ดังนี้



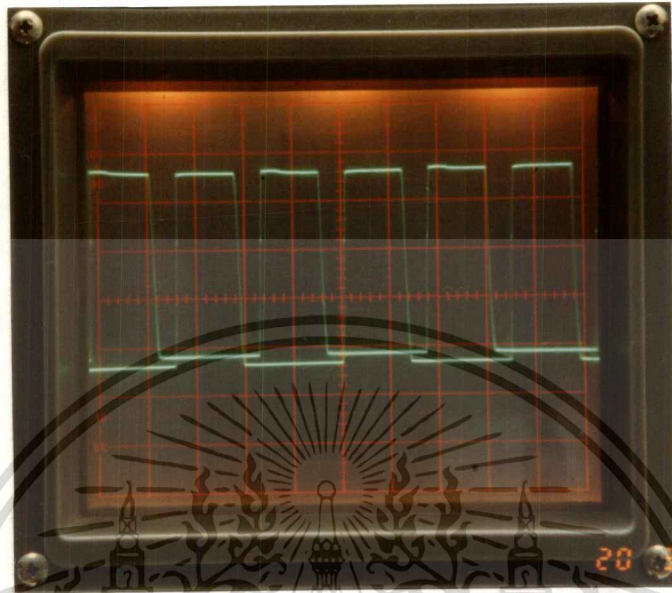
รูปที่ 7.1 สัญญาณขั้วเกตไอจีบีที่ตัวที่ 1 และ 4
5V/DIVISION 20 msec



รูปที่ 7.2 สัญญาณขั้วเกตไอจีบีที่ตัวที่ 2 และ 3

5V/DIVISION 20 msec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



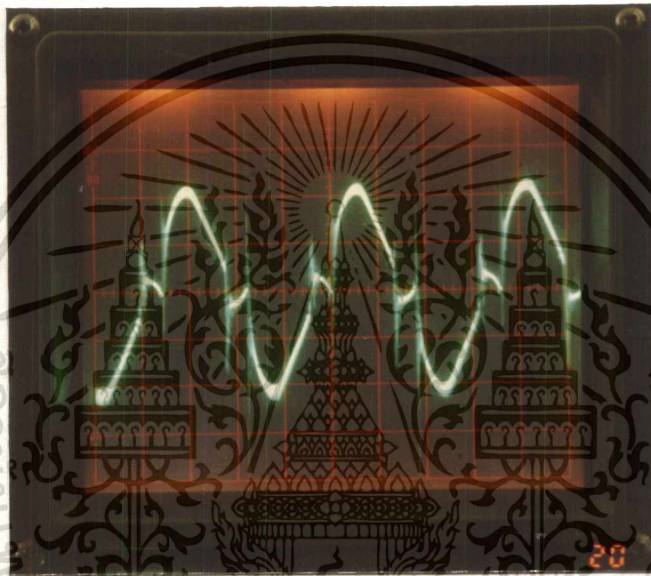
รูปที่ 7.3 สัญญาณขั้วเกตเปรียบเทียบระหว่าง ไอจีบีทีทั้งสองตัว
5V/DIVISION 20 msec



รูปที่ 7.4 แสดงแรงดันอินพุทหม้อแปลง

10V/DIVISION 20 msec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 แสดงกระแสอินพุทของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองหลอมโลหะที่ แรงดัน 165V กระแส 5A 14.7 กิโลเฮิร์ต แรงดันที่เป้า 14V_p
ที่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)
0.20	85
0.40	112
1.00	133
1.20	156
1.40	179
2.00	200
2.20	217
2.40	240
3.00	255
3.20	270
3.40	285
4.00	298
4.20	307
4.40	312
5.00	321
5.20	323
5.40	327
6.00	321
6.20	325
6.40	353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (°C)
7.00	363
7.20	370
7.40	380
8.00	385
8.20	388
8.40	393
9.00	403
9.20	407
9.40	422
10.00	425
10.20	426
10.40	427
11.00	440
11.20	440
11.40	447
12.00	450
13.00	458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการหลอมโลหะที่ แรงดัน 250V กระแส 7A 14.7กิโลเฮิรต์ แรงดันที่เบ้า 17V_p
ที่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (°C)
0.20	102
0.40	153
1.00	200
1.20	239
1.40	280
2.00	315
2.20	330
2.40	360
3.00	390
3.20	417
3.40	444
4.00	465
4.20	482
4.40	507
5.00	521

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลักการของการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กที่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สำหรับเครื่องหลอมโลหะ ซึ่งจะให้ความร้อนแก่เบ้าหลอมโลหะได้อย่างรวดเร็ว สามารถควบคุมอุณหภูมิในการหลอมได้อย่างง่ายและสะดวก

จากผลการทดลองในการหลอมโลหะที่ความถี่ 14.7 กิโลเฮิร์ต ซึ่งโลหะที่ใช้เป็นโลหะผสมตะกั่ว มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 327 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกระแสอินพุทให้มีค่ามากขึ้น อุณหภูมิที่เบ้าหลอมเพิ่มขึ้นตาม โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เบ้าหลอมเมื่อคงค่ากระแสไว้ค่าๆ หนึ่งจะเป็นไปอย่างเป็นเชิงเส้น จะเห็นได้จากตารางผลการทดลองที่กระแส 7 แอมป์ 250 โวลต์ จะมีอุณหภูมิที่เวลา 5 นาที มีค่าเท่ากับ 521 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าใช้เวลาในการทดลองมากกว่านี้ อุณหภูมิยังสามารถเพิ่มขึ้นไปได้อีก แต่เนื่องจากยังไม่มีระบบการระบายความร้อนที่เหมาะสมจึงไม่สามารถทดลองไปที่พิกัดได้

ในการจ่ายพลังงานให้กับชุดเบ้าหลอมทำได้โดย การปรับกระแสและแรงดันของแหล่งจ่าย ในขณะที่ทำการหลอมจะต้องพยายามคงความถี่ให้อยู่ที่จตุรีโซแนนซ์เสมอ

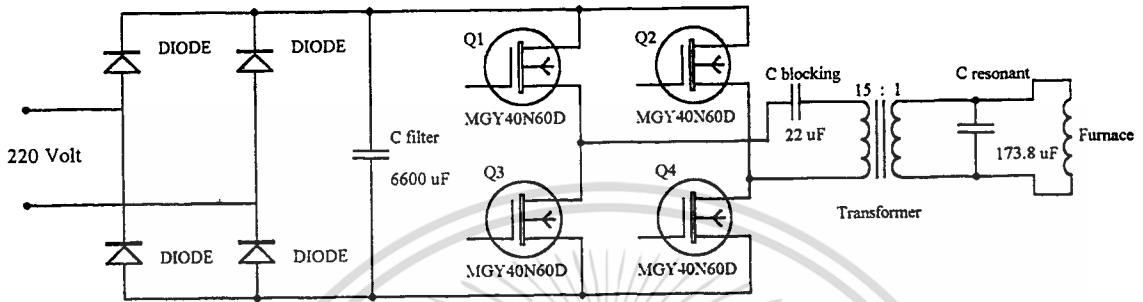
วงจรโซแนนซ์เป็นการต่อแบบ LC ขนานซึ่งจะมีค่ากระแสไหลวนในวงจรแท็งก์ (Tank) สูงมาก ชีตจำกัดของโครงการคือพิกัดของหม้อแปลง ซึ่งขณะจ่ายโวลต์ที่กระแสสูงๆ จะทำให้หม้อแปลงร้อนมาก การแก้ไขสามารถทำได้โดย การระบายความร้อนที่ดี การควบคุมความถี่ให้อยู่ที่จตุรีโซแนนซ์ ส่วนการแก้ไขโดยการเปลี่ยนขนาดขดลวดนั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นแกนหม้อแปลงมีขีดจำกัด การที่จะหลอมเหล็กได้นั้นต้องปรับความถี่ให้ต่ำลงและเพิ่มพิกัดกำลังให้สูงขึ้น



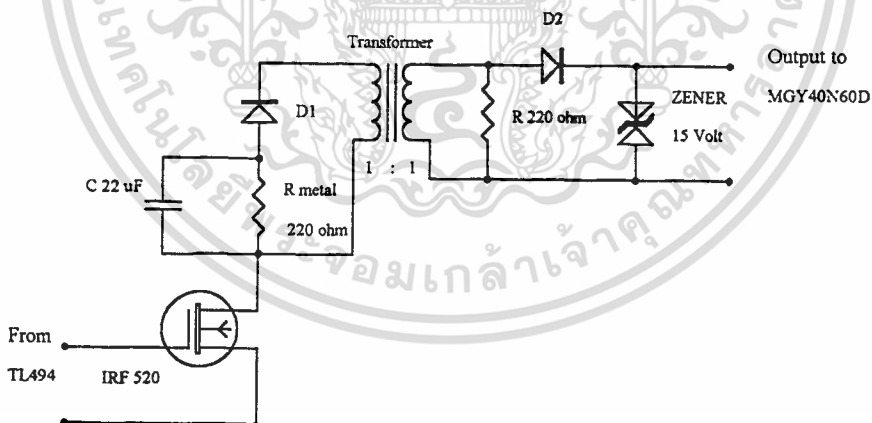
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

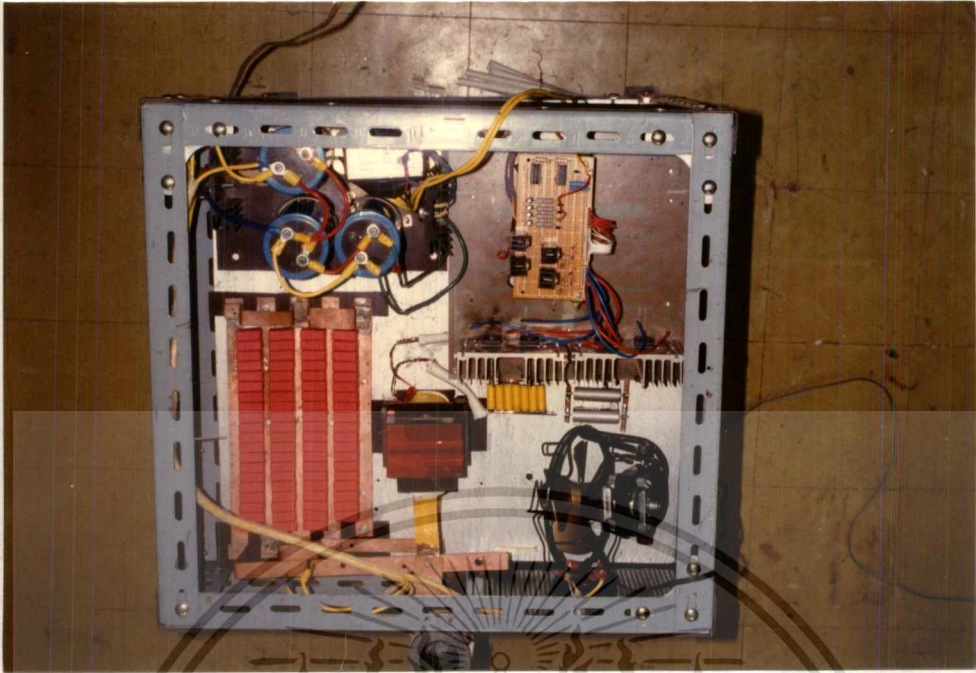


รูปวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

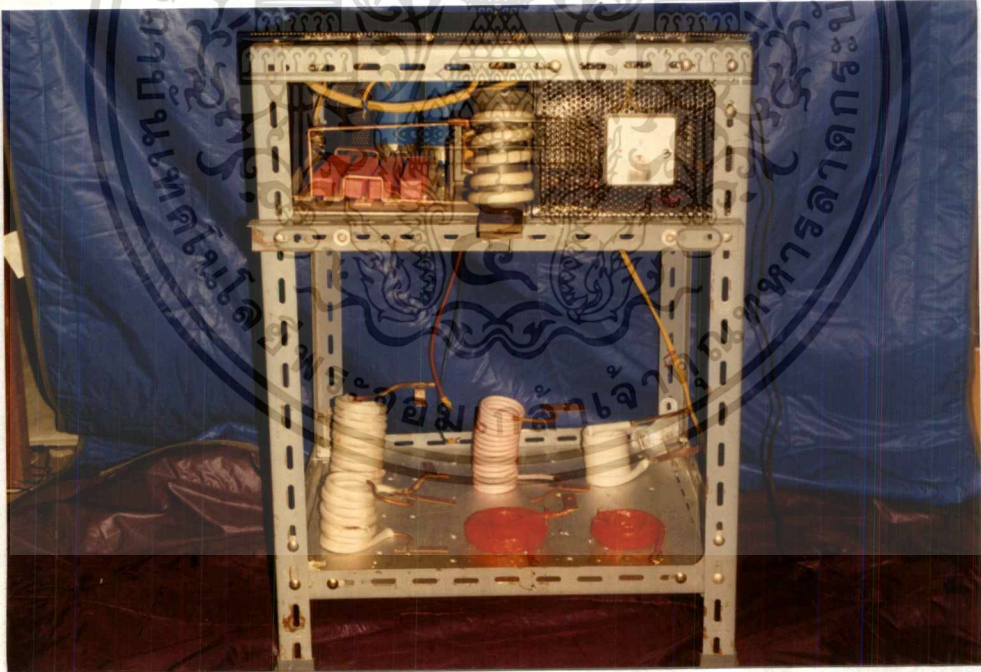


รูปแสดงการต่อวงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

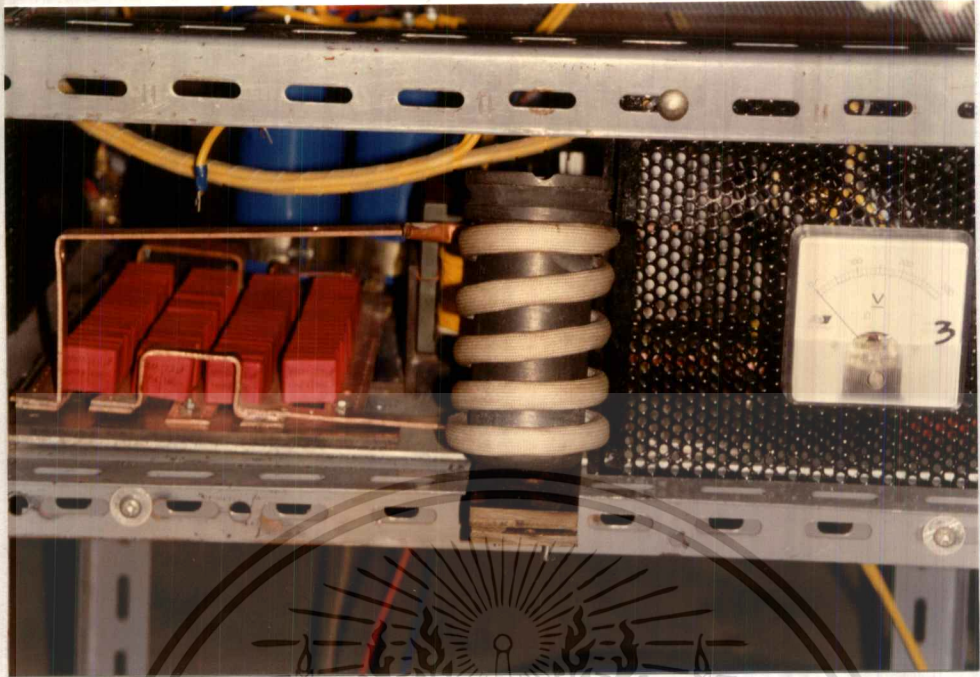


รูปโครงสร้างภายใน



รูปแบบของคอยล์ขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปลักษณะของเบ้าที่ใช้หลอม



รูปหม้อแปลงที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงาน
ไปยังชุดเบ้าหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Designer's™ Data Sheet
**Insulated Gate Bipolar Transistor
with Anti-Parallel Diode**
N-Channel Enhancement-Mode Silicon Gate

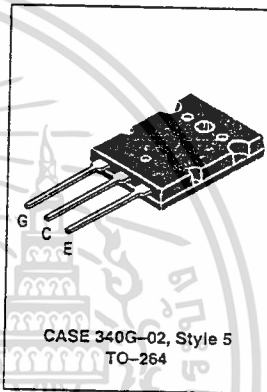
MGY40N60D

Motorola Preferred Device

IGBT & DIODE IN TO-264
40 A @ 90°C
66 A @ 25°C
600 VOLTS
SHORT CIRCUIT RATED

This Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) is co-packaged with a soft recovery ultra-fast rectifier and uses an advanced termination scheme to provide an enhanced and reliable high voltage-blocking capability. Short circuit rated IGBT's are specifically suited for applications requiring a guaranteed short circuit withstand time such as Motor Control Drives. Fast switching characteristics result in efficient operations at high frequencies. Co-packaged IGBT's save space, reduce assembly time and cost.

- Industry Standard High Power TO-264 Package (TO-3PBL)
- High Speed E_{off} : 60 μ s per Amp typical at 125°C
- High Short Circuit Capability - 10 μ s minimum
- Soft Recovery Free Wheeling Diode is included in the package
- Robust High Voltage Termination
- Robust RBSOA



MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CES}	600	Vdc
Collector-Gate Voltage ($R_{GE} = 1.0 \text{ M}\Omega$)	V_{CGR}	600	Vdc
Gate-Emitter Voltage — Continuous	V_{GE}	± 20	Vdc
Collector Current — Continuous @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ — Continuous @ $T_C = 90^\circ\text{C}$ — Repetitive Pulsed Current (1)	I_{C25} I_{C90} I_{CM}	66 40 132	A dc A dc A pk
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	PD	260 2.08	Watts W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to 150	°C
Short Circuit Withstand Time ($V_{CC} = 360 \text{ Vdc}, V_{GE} = 15 \text{ Vdc}, T_J = 25^\circ\text{C}, R_G = 20 \Omega$)	t_{sc}	10	μ s
Thermal Resistance — Junction to Case — IGBT — Junction to Case — Diode — Junction to Ambient	$R_{\theta JC}$ $R_{\theta JC}$ $R_{\theta JA}$	0.48 1.13 35	°C/W
Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	T_L	260	°C
Mounting Torque, 6-32 or M3 screw		10 lbf·in (1.13 N·m)	

(1) Pulse width is limited by maximum junction temperature.

Designer's Data for "Worst Case" Conditions — The Designer's Data Sheet permits the design of most circuits entirely from the information presented. SOA Limit curves — representing boundaries on device characteristics — are given to facilitate "worst case" design.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

MGY40N60D

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_J = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS

Collector-to-Emitter Breakdown Voltage (V _{GE} = 0 Vdc, I _C = 250 μAdc) Temperature Coefficient (Positive)	BV _{CES}	600	— 870	—	Vdc mV/°C
Zero Gate Voltage Collector Current (V _{CE} = 600 Vdc, V _{GE} = 0 Vdc) (V _{CE} = 600 Vdc, V _{GE} = 0 Vdc, T _J = 125°C)	I _{CES}	—	—	100 2500	μAdc
Gate-Body Leakage Current (V _{GE} = ± 20 Vdc, V _{CE} = 0 Vdc)	I _{GES}	—	—	250	nAdc

ON CHARACTERISTICS (1)

Collector-to-Emitter On-State Voltage (V _{GE} = 15 Vdc, I _C = 20 Adc) (V _{GE} = 15 Vdc, I _C = 20 Adc, T _J = 125°C) (V _{GE} = 15 Vdc, I _C = 40 Adc)	V _{CE(on)}	—	2.20 2.10 2.60	2.80 — 3.25	Vdc
Gate Threshold Voltage (V _{CE} = V _{GE} , I _C = 1 mAdc) Threshold Temperature Coefficient (Negative)	V _{GE(th)}	4.0	6.0 10	8.0 —	Vdc mV/°C
Forward Transconductance (V _{CE} = 10 Vdc, I _C = 40 Adc)	g _{fe}	—	12	—	Mhos

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Input Capacitance	C _{ies} , C _{oes} , C _{res}	—	6810	—	pF
Output Capacitance					
Transfer Capacitance					

(V_{CE} = 25 Vdc, V_{GE} = 0 Vdc, f = 1.0 MHz)

SWITCHING CHARACTERISTICS (1)

Turn-On Delay Time	t _{d(on)}	—	126	—	ns
Rise Time	t _r	—	95	—	
Turn-Off Delay Time	t _{d(off)}	—	530	—	ns
Fall Time	t _f	—	180	—	
Turn-Off Switching Loss	E _{off}	—	1.50	2.10	mJ
Turn-On Switching Loss	E _{on}	—	2.30	—	
Total Switching Loss	E _{ts}	—	3.80	—	mJ
Turn-On Delay Time	t _{d(on)}	—	113	—	
Rise Time	t _r	—	104	—	ns
Turn-Off Delay Time	t _{d(off)}	—	588	—	
Fall Time	t _f	—	346	—	mJ
Turn-Off Switching Loss	E _{off}	—	2.70	—	
Turn-On Switching Loss	E _{on}	—	3.80	—	mJ
Total Switching Loss	E _{ts}	—	6.50	—	
Gate Charge	Q _T	—	248	—	nC
	Q ₁	—	49	—	
	Q ₂	—	81	—	

(V_{CC} = 360 Vdc, I_C = 40 Adc, V_{GE} = 15 Vdc, L = 300 μH, R_G = 20 Ω, T_J = 25°C)
Energy losses include "tail"

(V_{CC} = 360 Vdc, I_C = 40 Adc, V_{GE} = 15 Vdc, L = 300 μH, R_G = 20 Ω, T_J = 125°C)
Energy losses include "tail"

(V_{CC} = 360 Vdc, I_C = 40 Adc, V_{GE} = 15 Vdc)

DIODE CHARACTERISTICS

Diode Forward Voltage Drop (I _{EC} = 20 Adc) (I _{EC} = 20 Adc, T _J = 125°C) (I _{EC} = 40 Adc)	V _{FEC}	—	1.19 1.04 1.36	1.70 — 2.00	Vdc
--	------------------	---	----------------------	-------------------	-----

(1) Pulse Test: Pulse Width ≤ 300 μs, Duty Cycle ≤ 2%.

(continued)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS — continued ($T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
DIODE CHARACTERISTICS — continued					
Reverse Recovery Time ($I_F = 40 \text{ A dc}$, $V_R = 360 \text{ V dc}$, $di/dt = 200 \text{ A}/\mu\text{s}$)	t_{rr}	—	138	—	ns
	t_a	—	78	—	
	t_b	—	60	—	
Reverse Recovery Stored Charge	Q_{RR}	—	2.1	—	μC
Reverse Recovery Time ($I_F = 40 \text{ A dc}$, $V_R = 360 \text{ V dc}$, $di/dt = 200 \text{ A}/\mu\text{s}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$)	t_{rr}	—	213	—	ns
	t_a	—	122	—	
	t_b	—	91	—	
Reverse Recovery Stored Charge	Q_{RR}	—	4.9	—	μC
INTERNAL PACKAGE INDUCTANCE					
Internal Emitter Inductance (Measured from the emitter lead 0.25" from package to emitter bond pad)	L_E	—	13	—	nH

TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

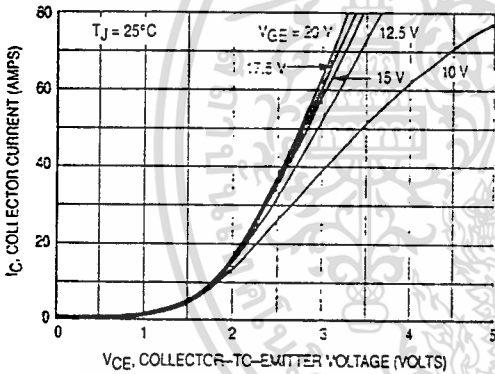


Figure 1. Output Characteristics, $T_J = 25^\circ\text{C}$

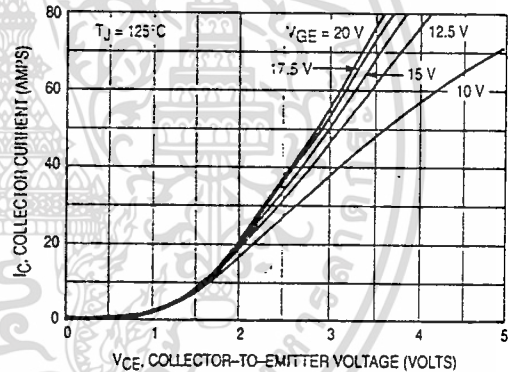


Figure 2. Output Characteristics, $T_J = 125^\circ\text{C}$

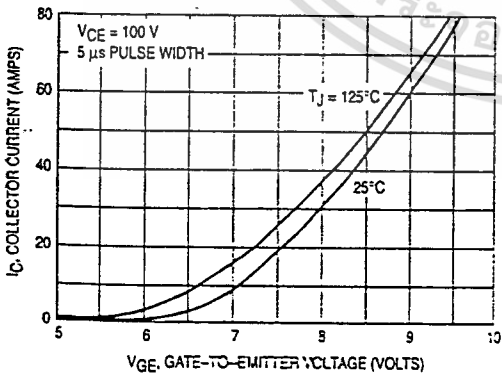


Figure 3. Transfer Characteristics

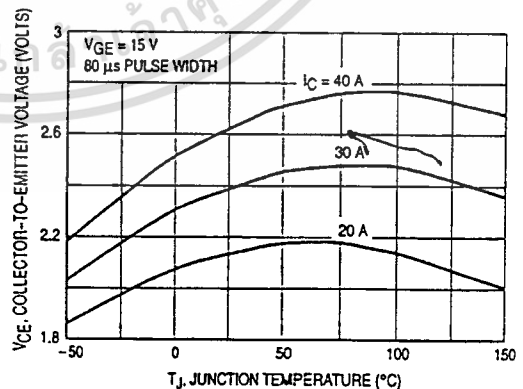


Figure 4. Collector-to-Emitter Saturation Voltage versus Junction Temperature

4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MGY40N60D

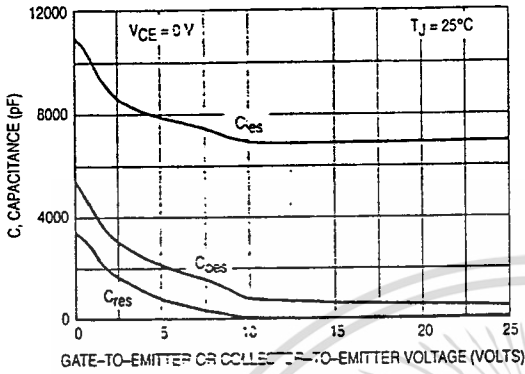


Figure 5. Capacitance Variation

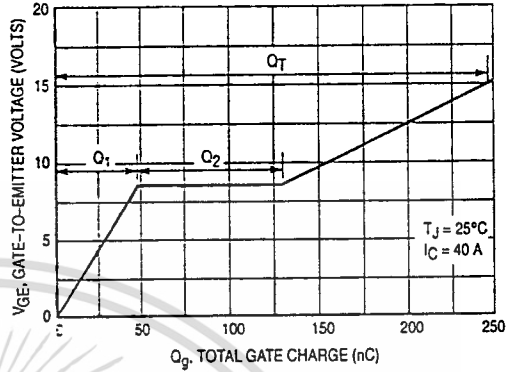


Figure 6. Gate-to-Emitter Voltage versus Total Charge

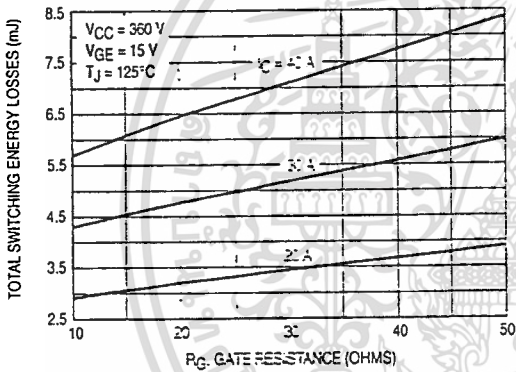


Figure 7. Total Switching Losses versus Gate Resistance

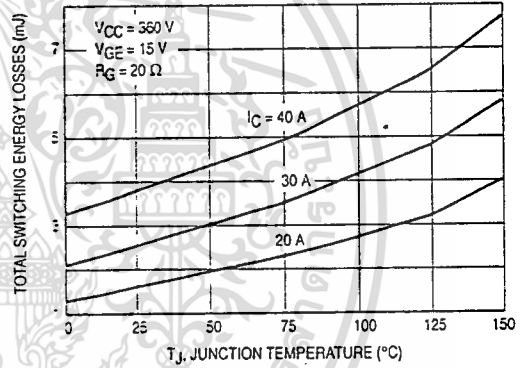


Figure 8. Total Switching Losses versus Junction Temperature

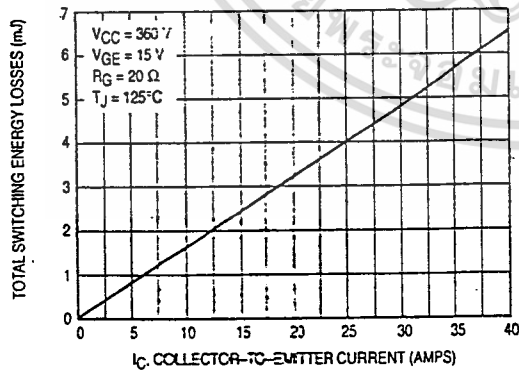


Figure 9. Total Switching Losses versus Collector-to-Emitter Current

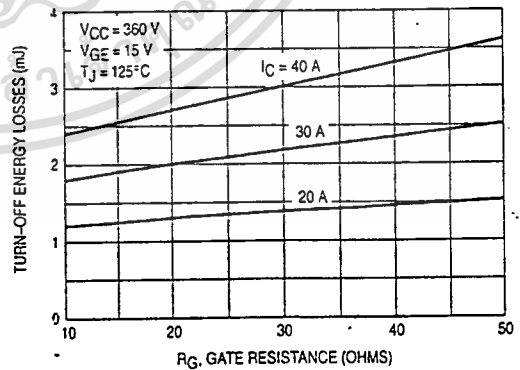


Figure 10. Turn-Off Losses versus Gate Resistance

4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

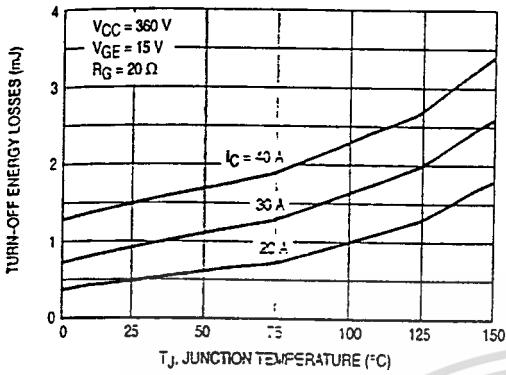


Figure 11. Turn-Off Losses versus Junction Temperature

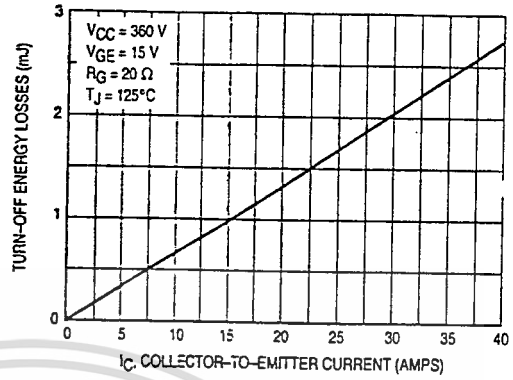


Figure 12. Turn-Off Losses versus Collector-to-Emitter Current.

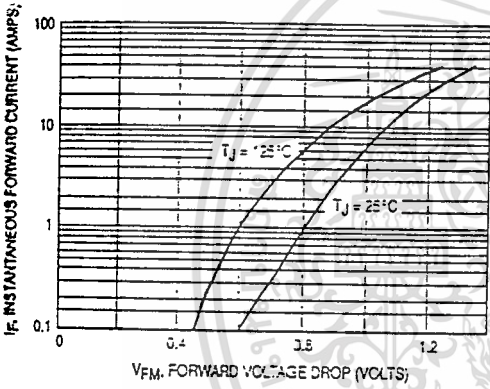


Figure 13. Typical Diode Forward Drop versus Instantaneous Forward Current

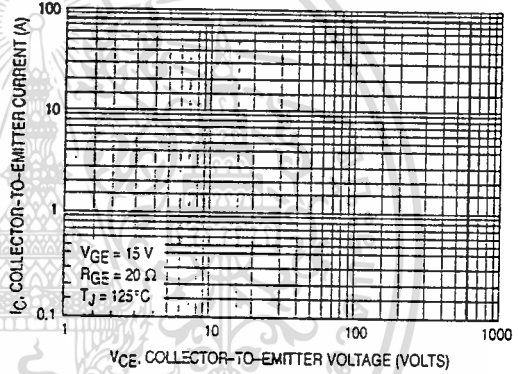


Figure 14. Reverse Biased Safe Operating Area



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 4-8 MAGNET WIRE DESIGN DATA (Courtesy Electronic Design)

AWG Size	Bare Wire				Single Film					Double Film				
	Max OD	Max I	Max Tensile Strength	Ω/ft	Max OD	ft/lb	Ω/lb	T_{pi}	T_{pi}^2	Max OD	ft/lb	Ω/lb	T_{pi}	T_{pi}^2
10	0.1024	33.6	82.4	0.00100	0.1047	31.6	0.0316	9.551	91.22	0.1061	31.5	0.0315	9.425	89.53
11	0.0912	28.2	65.3	0.00125	0.0935	39.8	0.0501	10.70	114.4	0.0948	39.7	0.0500	10.55	111.3
12	0.0812	23.7	51.8	0.00159	0.0834	50.3	0.0800	11.99	143.8	0.0847	50.0	0.0755	11.81	139.4
13	0.0724	19.9	41.2	0.00200	0.0746	63.3	0.1256	13.40	179.7	0.0757	62.9	0.1255	13.21	174.5
14	0.0644	16.7	32.5	0.00252	0.0666	79.9	0.2013	15.02	225.5	0.0662	79.3	0.1998	14.66	215.0
15	0.0574	14.1	25.9	0.00318	0.0594	101	0.3212	16.84	283.4	0.0609	100	0.3180	16.42	269.6
16	0.0511	11.8	20.5	0.00402	0.0531	127	0.5105	18.63	354.7	0.0545	126	0.5055	18.35	336.7
17	0.0455	9.94	16.3	0.00505	0.0475	159	0.8029	21.05	443.2	0.0488	158	0.7979	20.49	419.9
18	0.0405	8.35	12.9	0.00639	0.0424	201	1.284	23.55	556.2	0.0437	199	1.272	22.66	523.6
19	0.0361	7.02	10.2	0.00805	0.0379	253	2.037	26.39	696.2	0.0391	251	2.020	25.58	654.1
20	0.0322	5.92	8.14	0.0101	0.0339	318	3.212	29.50	870.2	0.0351	315	3.182	29.49	811.7
21	0.0285	4.95	6.42	0.0128	0.0303	402	5.146	33.00	1069	0.0314	397	5.032	31.25	1014
22	0.0254	4.15	5.07	0.0162	0.0270	508	8.230	37.04	1372	0.0281	503	8.144	35.53	1258
23	0.0227	3.50	4.05	0.0203	0.0243	633	12.85	41.15	1694	0.0253	625	12.69	39.53	1552
24	0.0202	2.94	3.20	0.0257	0.0217	806	20.71	46.08	2124	0.0227	794	20.41	44.05	1941
25	0.0180	2.47	2.54	0.0324	0.0194	1013	32.62	51.55	2657	0.0203	990	32.08	49.26	2427
26	0.0160	2.07	2.01	0.0410	0.0173	1282	52.56	57.80	3341	0.0182	1260	51.66	54.95	3019
27	0.0143	1.75	1.61	0.0514	0.0156	1608	82.65	64.10	4109	0.0164	1580	81.21	60.96	3718
28	0.0127	1.47	1.27	0.0653	0.0140	2033	132.8	71.43	5102	0.0147	1990	129.9	68.03	4625
29	0.0114	1.25	1.02	0.0812	0.0126	2525	205.0	79.37	6299	0.0133	2470	200.6	75.13	5653
30	0.0101	1.04	0.801	0.104	0.0112	3215	334.4	89.29	7972	0.0119	3140	326.6	84.03	7052
31	0.0090	0.874	0.636	0.131	0.0100	4065	532.5	100.0	10000	0.0108	3950	517.4	92.59	8573
32	0.0081	0.747	0.515	0.162	0.0091	5000	810.0	109.9	12076	0.0098	4830	790.6	102.0	10412
33	0.0072	0.626	0.407	0.206	0.0081	6369	1312	123.5	15242	0.0088	6170	1271	113.6	12913
34	0.0064	0.524	0.322	0.261	0.0072	8064	2105	138.9	19290	0.0078	7870	2054	125.2	16437

35	0.0057	0.441	0.255	0.331	0.0064	10210	3380	156.2	24414	0.0070	9940	3290	142.9	20466
36	0.0051	0.373	0.204	0.415	0.0058	12760	5295	172.4	29727	0.0063	12440	5163	158.7	25195
37	0.0046	0.319	0.166	0.512	0.0052	15800	8090	192.3	36982	0.0057	15300	7834	175.4	30779
38	0.0041	0.269	0.132	0.648	0.0047	19920	12908	212.8	45269	0.0051	19300	12506	195.1	38447
39	0.0036	0.221	0.101	0.847	0.0041	26040	22056	243.9	59488	0.0045	25100	21260	222.2	49383
40	0.0032	0.185	0.0804	1.08	0.0037	33110	35759	270.3	73046	0.0040	32200	34776	250.0	62500
41	0.0029	0.160	0.0661	1.32	0.0033	40100	52932	303.0	91827	0.0036	39500	52140	277.8	77160
42	0.0026	0.136	0.0531	1.66	0.0030	51000	84660	333.3	111111	0.0032	49800	82668	312.5	97656
43	0.023	0.113	0.0475	2.14	0.0026	65800	140.8k	384.6	147928	0.0029	63700	136.3k	344.8	116906
44	0.0021	0.0985	0.0346	2.59	0.0024	79400	205.6k	416.7	173611	0.0027	76300	197.6k	370.4	137174
45	0.00176	0.0756	0.0243	3.62	0.00205	104k	376.5k	487.8	237954	0.00230	99600	360.6k	434.8	189036
46	0.00157	0.0637	0.0194	4.54	0.00185	132k	599.3k	540.5	292184	0.00210	126k	572.0k	476.2	226757
47	0.00140	0.0536	0.0154	5.71	0.00170	162k	925.0k	588.2	346020	0.00190	153k	873.6k	526.3	277003
48	0.00124	0.0447	0.0121	7.29	0.00150	205k	1.494M	666.6	444444	0.00170	199k	1.451M	588.2	346020
49	0.00111	0.0379	0.0097	9.09	0.00130	258k	2.345M	769.2	591716	0.00150	252k	2.291M	666.6	444444
50	0.00099	0.0319	0.0077	11.4	0.00120	312k	3.557M	833.3	694444	0.00140	306k	3.488M	714.3	510204
51	0.00088	0.0267	0.0061	14.5	0.00110	416k	6.032M	909.1	826446					
52	0.00078	0.0223	0.0048	18.4	0.00100	555k	10.21M	1000	1.000M					
53	0.00070	0.0190	0.0038	22.9	0.00085	667k	15.27M	1176	1.384M					
54	0.00062	0.0158	0.0030	29.1	0.00075	859k	25.00M	1333	1.777M					
55	0.00055	0.0132	0.0024	37.0	0.00070	1.090M	40.33M	1429	2.041M					
56	0.00049	0.0111	0.0019	46.6	0.00065	1.380M	64.31M	1538	2.367M					
Units	Inches	Amperes	Pounds	Ω/ft	Inches	ft/lb	Ω/lb	T_{pi}	T_{pi}^2	Inches	ft/lb	Ω/lb	T_{pi}	T_{pi}^2

Maximum ODs, Ω/ft and ft/lb are taken from Materials and Processes Handbook. Maximum rated current is 10% of the fusing current at 20°C. Maximum tension is based upon a tensile strength of 10.00 PSI. Ω/lb is derived from $(\Omega/\text{ft}) \times (\text{ft}/\text{lb})$. $T_{pi} = 1/\text{Max OD}$. $T_{pi}^2 = (1/\text{Max OD})^2$.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่แกนที่ใช้งานของหม้อแปลง (Transformer Area Product , Ap)

ค่ากำลังอินพุทเกี่ยวข้องกับกำลังเอาต์พุทโดยค่าประสิทธิภาพ

$$P_{in} = P_{out}/\eta \quad (1)$$

η = ประสิทธิภาพ

I_{dc} คือกระแสอินพุทเฉลี่ยที่ไปยังหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ ก็มีการเกี่ยวข้องกับกำลังอินพุท P_{in} และแรงดันอินพุทดีซี ดังนี้

$$I_{dc} = P_{in}/V_{in} \quad (2)$$

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสทางด้านปฐมภูมิ(I_{pm}) เกิดขึ้นเมื่อแรงดันอินพุทมีค่าต่ำสุด $V_{in(min)}$ และความกว้างพัลส์สูงสุดแฟคเตอร์ K_t สัมพันธ์กับอินพุทดีซี ไปยังกระแสปฐมภูมิในคอนเวอร์เตอร์

$$K_t = I_{dc}/I_{pm}$$

$$I_{pm} = I_{dc}/K_t \quad (3)$$

แทนที่สมการ (2) ลงในสมการ (3) ที่แรงดันอินพุทต่ำสุด

$$I_{pm} = P_{in}/V_{in(min)} * K_t \quad (4)$$

ค่า (window area) A_p (หาได้สำหรับขดลวดปฐมภูมิมี่มีความเกี่ยวข้องกับผลรวมหน้าต่าง window area (primary area factor) K_p (antilization factor) K_u ดังนั้น

$$A_p = A * K_p * K_u \quad (5)$$

จำนวนของขดลวดปฐมภูมิ N_p ซึ่งจะต้องใส่ในช่องว่างพื้นที่หน้าต่าง A_p โดยที่มีความหนาแน่นของกระแส J สัมพันธ์ด้วยกับกระแสปฐมภูมิ ดังนี้

$$N_p = A_p * J / I_{pm} \quad (6)$$

แทนสมการ (4) , (5) ในสมการที่ (6)

$$N_p = A_w * K_p * K_u * J * V_{in(min)} * K_t / P_{in} \quad (7)$$

หรือ

$$A_w = N_p P_{in} / K_p * K_u * J * V_{in(min)} * K_t$$

จากกฎของฟาราเดย์

$$E_{dt} = N C_0 \quad (8)$$

$$\text{ดังนั้น } V_{in(min)} * t_{on(max)} = N_p * B * C$$

หรือ

$$A_c = V_{in(min)} * t_{on(max)} / N_p * B$$

เมื่อ t_{on} = คาบช่วง on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B = ความหนาแน่นฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วง “ on ”

C = ความหนาแน่นฟลักซ์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วง effective core area
ค่าสูงสุด “ on ” คือการทำงานครึ่งคาบที่ความถี่ทำงาน f ดังนั้น

$$f_{on(max)} = 1/2f \quad (9)$$

แทนที่ (9) ลงในสมการ (8)

$$A_c = V_{in(min)} / N_p * B * 2f \quad (10)$$

$$A_p = A_w * A_c$$

รวมสมการ (7) และ (10)

$$A_p = P_{in} / K_t * K_u * K_p * J * b * 2f \quad (11)$$

ถ้าหม้อแปลงจำกัดที่ 30 C การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ภายใต้สภาวะ ความหนาแน่นของกระแสที่ได้
มาจากการสังเกตและทดลอง

$$J = 450 * 10^4 * A_p^{-0.125} \quad a/m^2$$

(สำหรับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งที่ , ความหนาแน่นของกระแสตกลงก็เท่ากับว่าขนาดของ
หม้อแปลงเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นที่ผิวตกลงด้วยการเพิ่มขึ้นของขนาด)

แทนสมการ (12) ลงใน (11) และเปลี่ยน A_p ไปเป็นหน่วยเซนติเมตร

$$A_p = P_{in} * 10^8 / K_t * K_u * K_p * 450 * 10^4 * A_p^{-0.125} * B * 2f \quad cm^4$$

$$A_p^{(1-0.125)} = (P_{in} * 10^4 / K_t * K_u * K_p * 450 * B * 2f)^{1.143} \quad cm^4$$

ดังนั้น

$$A_p = P_{in} * 10^8 / K_t * K_u * K_p * 450 * 10^4 * A_p^{-0.125} * B * 2f \quad cm^4 \quad (13)$$

$K' = K_t * K_u * K_p$ (ดูตารางที่หัวข้อ 3.3 บทที่ 3) และแทนค่า K' ลงในสมการ (13) และทำให้ง่าย
ลงคือ

$$A_p = (11.1 P_{in} / k' * B * f)^{1.143} \quad cm^4$$

ดังนั้นขนาดของหม้อแปลงของ A_p สามารถหาได้โดยการรู้ (P_{in}) กำลังอินพุต, B , ความถี่ (f) ,
และค่าคงที่ K' สำหรับอากาศทั่วไปที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (temperature rise) 30 °C

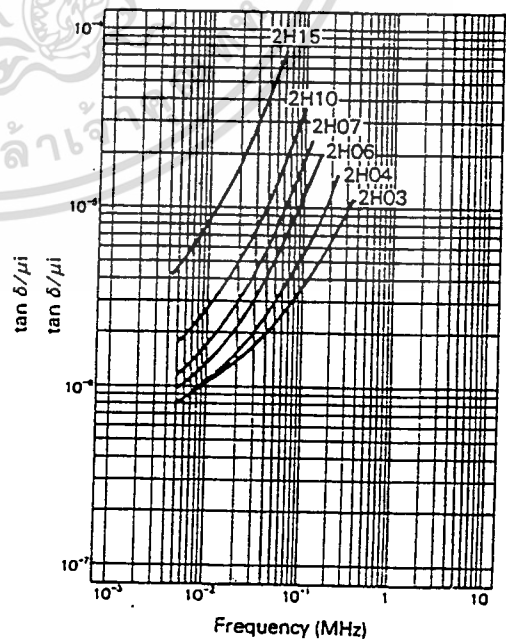
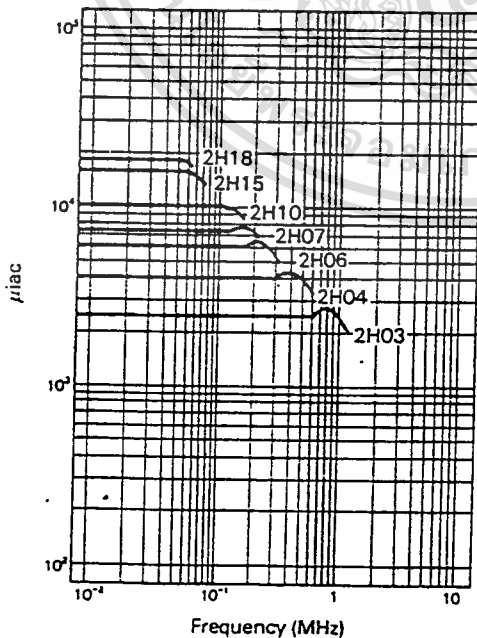


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Standard material characteristics (Linear material)

Property	Symbol	Unit	2H03	2H04	2H06	2H07	2H10	2H15	2H18
Initial permeability	μ_{iac}		2500 ±20%	4000 ±20%	5500 ±20%	7500 ±25%	10000 ±30%	15000 ±30%	18000 ±30%
Relative loss factor	$\frac{\tan \delta}{\mu}$	$\times 10^{-6}$	< 4 (100kHz)	< 10 (100kHz)	< 30 (100kHz)	< 5 (10kHz)	< 7.0 (10kHz)	< 15 (10kHz)	< 90 (10kHz)
Temperature coefficient	-30 to 20°C	α_{μ}	$\times 10^{-6}$	0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 1.5	0 to 1.5	0 to 1.5
	20 to 55°C			0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5
	20 to 70°C			0 to 2.0	0 to 2.0	0 to 2.0	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5	-0.5 to 1.5
Saturation magnetic flux density	B_s	Gauss	4700	4200	4200	4100	4000	4000	4000
		mT	470	420	420	410	400	400	400
Residual magnetic flux density	B_r	Gauss	1000	800	800	600	600	600	800
		mT	100	80	80	60	60	60	80
Coercivity	H_c	Oe	0.16	0.10	0.10	0.05	0.025	0.02	0.02
		A/m	12.8	8	8	4	2	1.6	1.6
		$\times 10^{-3}$							
Hysteresis material constant	η_a	$\frac{\times 10^{-8}}{\text{mT}}$	< 0.8 (10kHz)	< 0.8 (10kHz)	< 0.6 (10kHz)	< 1.0 (10kHz)	< 2.0 (10kHz)	< 2.0 (10kHz)	
Disaccommodation factor	DF	$\times 10^{-4}$	< 3.0	< 3.0	< 3.0	< 2.0	< 1.0	< 1.0	
Curie temperature	T_c	°C	> 200	> 140	> 140	> 130	< 120	< 120	< 120
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot \text{m}$	1	1	0.2	0.1	0.01	0.01	0.01
Density	d	$\text{kg/m}^3 \times 10^3$	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	5.0

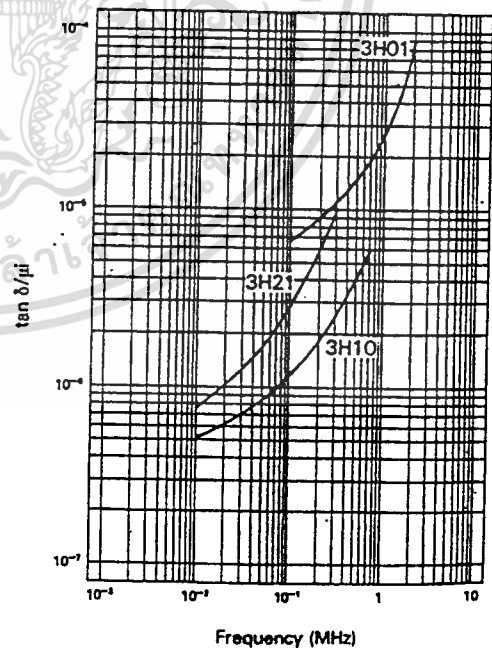
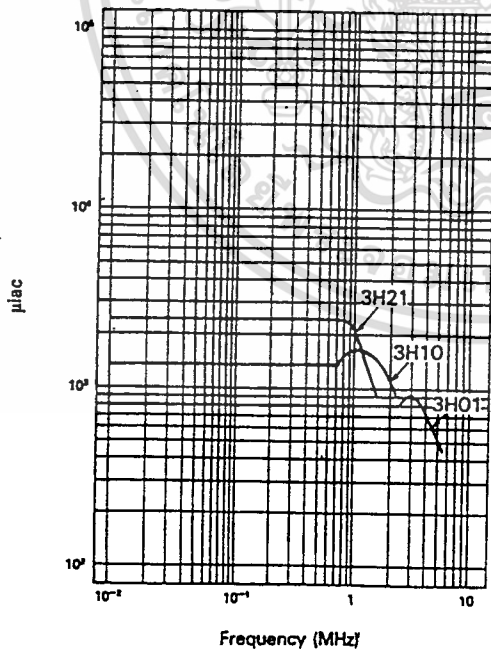
- Note: 1) The values were obtained with toroidal cores (FR25φ/15φ/5).
 2) The values were obtained at 23±2°C unless otherwise specified.
 3) Initial permeability was measured at 10kHz, 0.8A/m.



Standard material characteristics (Linear material)

Property	Symbol	Unit	3H01	3H10	3H20	3H21	
Initial permeability	μ_{iac}		800 $\pm 20\%$	1200 $\pm 20\%$	2200 $\pm 20\%$	2400 $\pm 20\%$	
Relative loss factor	$\frac{\tan \delta}{\mu}$	$\times 10^{-4}$	< 20 (0.5MHz) < 40 (1MHz)	< 1.5 (0.1MHz) < 4 (0.5MHz)	< 2.5 (0.1MHz)	< 3.5 (0.1MHz)	
Temperature coefficient	-30 to 20°C	$\alpha_{\mu r}$	$\times 10^{-6}$	0 to 2	0.3 to 2	0.4 to 1.6	0.4 to 2
	20 to 55°C			0 to 2	0.2 to 1	0.4 to 1.2	0.4 to 2
	20 to 70°C			0 to 2	0.2 to 1	0.4 to 1.2	0.4 to 2
Saturation magnetic flux density	B_s	Gauss	3900	4650	4200	4100	
Residual magnetic flux density	B_r	mT	390	465	420	410	
		Gauss	1700	1500	800	1100	
Coercivity	H_c	Oe	0.7	0.5	0.15	0.3	
		A/m	56	40	12	24	
Hysteresis material constant	η_a	$\frac{\times 10^{-9}}{mT}$	< 1.8 (10kHz)	< 0.4 (100kHz)	< 0.4 (10kHz)	< 0.6 (10kHz)	
Disaccommodation factor	DF	$\times 10^{-9}$	< 20	< 4	< 2	< 3	
Curie temperature	T_c	°C	> 250	> 200	> 160	> 160	
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot m$	5	5	5	4	
Density	d	$kg/m^3 \times 10^3$	4.6	4.7	4.8	4.8	

- Note: 1) The values were obtained with toroidal cores (FR25 ϕ /15 ϕ /5).
 2) The values were obtained at 23 \pm 2°C unless otherwise specified.
 3) Initial permeability was measured at 10kHz, 0.8A/m.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FERRITE MATERIALS

Material characteristics

Material	Symbol	Unit	H 56 Z	H 55 Z	H 54 Z	H 53 Z	H 52 A	H 52 B	H 52 Z	H 51 A	H 51 Z
Initial permeability	μ_{iac}		11 ±20%	17 ±20%	50 ±20%	130 ±20%	250 ±20%	800 ±20%	1200 ±20%	1200 ±20%	1200 ±15%
Relative loss factor	$\frac{\tan \delta}{\mu}$	$\times 10^{-4}$	<200 40MHz <250 100MHz	<160 40MHz <220 100MHz	<60 5 MHz <80 10MHz	<30 1 MHz <120 10MHz	<25 1 MHz <60 5 MHz	<20 0.5MHz <40 1 MHz	<5 0.1MHz <12 0.5MHz	<3 0.1MHz <8 0.5MHz	<1.5 0.1MHz <4 0.5MHz
Temperature factor -30~20 °C 20~55 °C 20~70 °C	$\alpha \mu r$	$\times 10^{-4}$			4~20	3~10 3~10	0~5	0~2	1.5~7 1.5~7	0.2~2	0.3~2 0.2~1
Saturation flux density	Bs	Gauss	2000	2100	2500	2900	3300	3900	3800	4650	4650
		mT	200	210	250	290	330	390	380	465	465
Residual flux density	Br	Gauss	1100	1200	1300	1600	2200	1700	1600	1500	1500
		mT	110	120	130	160	220	170	160	150	150
Coercive force	Hc	Oe	12	10	8.0	3.0	2.0	0.7	0.5	0.5	0.5
		A/m	960	800	640	240	160	56	40	40	40
Hysteresis material constant	ηB	$\frac{\times 10^{-4}}{mT}$						<1.8 10kHz	<0.5 10kHz	<0.6 100kHz	<0.4 100kHz
Disaccommodation factor	DF	$\times 10^{-4}$	<50	<50	<30	<20	<10	<20	<10	<6	<4
Curie temperature	Tc	°C	>450	>450	>400	>350	>300	>250	>230	>200	>200
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot cm$	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	500	500	500	500
Density	d	g/cm ³	4.3	4.3	4.5	4.5	4.4	4.6	4.7	4.7	4.7

Note : 1) The values were obtained with toroidal cores (FR 25 ϕ /15 ϕ /5).

2) The values were obtained at 23±2 °C unless otherwise specified.

3) Initial permeability were measured at 10 kHz, 0.8 A/m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H 21 B	H 22 Z	H 23 B	H 24 B	H 24 A	H 24 Z	H 25 Z	H 28 B	H 49 N	H 49 B	H 45	H 63	H 63 B	H 45 A	H 63 A
2000 ±20%	2000 ±20%	3500 ±20%	4000 ±20%	5000 ±20%	7000 ±25%	12000 ±30%	3500 ±20%	1600 ±20%	1700 ±20%	2500 ±20%	2500 ±20%	2000 ±20%	2400 ±20%	1250 ±20%
<3.5 100kHz	<2.5 100kHz	<3.0 10kHz	< 15 100kHz	< 40 100kHz	< 7 10kHz	< 8 10kHz	< 50 100kHz	< 5 100kHz	< 8 100kHz	< 4 100kHz	< 4 100kHz	< 5 100kHz	< 5 100kHz	< 3 100kHz
0.5~2	0.4~1.2	0~2.0	0~1.5	0.5~2	0~2.0	0~1.5	-3~3							
0.5~2	0.4~1.2	0~2.0	0~1.5	0.5~2	0~2.0									
4100	4200	4000	4400	4500	4000	4000	4700	5000	5300	4700	5200	5000	4800	4700
410	420	400	440	450	400	400	470	500	530	470	520	500	480	470
1100	800	900	1500	1500	900	950	1000	1500	1800	1000	1200	1500	1200	3100
110	80	90	150	150	90	95	100	150	180	100	120	150	120	310
0.30	0.15	0.30	0.13	0.13	0.13	0.05	0.20	0.16	0.20	0.16	0.16	0.16	0.16	0.25
24.0	12.0	24.0	10.4	10.4	10.4	4.0	16.0	12.8	16.0	12.8	12.8	12.8	12.8	20.0
<0.4 10kHz	<0.4 10kHz	<1.0 10kHz	<1.0 10kHz	<1.0 10kHz	<1.0 10kHz	<1.0 10kHz	<0.8 100kHz							
<3.0	<2.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<2.0	<3.0							
>160	>170	>125	>145	>145	>125	>125	>200	>230	>230	>200	>230	>200	>200	>270
400	500	20	20	10	3	3	100	100	1000	100	100	100	100	1000
4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Terms and definitions

I. Permeability

1-1. Initial permeability, μ_i

This is the limit value of B/H where H is indefinitely close to zero ($H \rightarrow 0$) at the virgin magnetization curve of a ferromagnetic substance, and is derived by the following equation:

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

Where μ_0 : permeability in vacuum

H: AC magnetic field strength

B: AC magnetic flux density

(Note) The essential permeability of a core material is measured using a toroidal core wound with a coil, and is represented by the following equation:

$$\mu_e = \frac{L - L_0}{4\pi N^2} \cdot \frac{2e}{Ae} \cdot 10^7$$

Where L: self-inductance of core including coil (mH)

L_0 : self-inductance of coil (mH)

N: number of turns

Ae : average cross-sectional area of toroidal core (mm^2)

$2e$: average magnetic path length of toroidal core (mm)

1-2. Effective permeability, μ_e

This is usually defined as the permeability of a core forming a closed circuit where leakage flux is negligibly small.

$$\mu_e = \frac{L - L_0}{4\pi N^2} \cdot \frac{2e}{Ae} \cdot 10^7$$

Where L: self-inductance of core with coil (mH)

N: number of turns

$$\frac{2e}{Ae} = C_1 = \text{core factor (mm}^{-1}\text{)}$$

1-3. Apparent effective permeability, μ_{app}

This is generally a ratio of two inductances in a closed circuit:

$$\mu_{app} = \frac{L}{L_0}$$

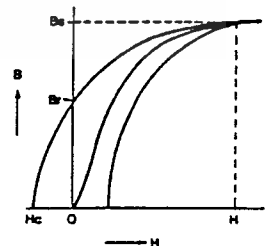
Where L: self-inductance of coil including core

L_0 : self-inductance of coil not including core

Magnetization curves

2-1. Saturation magnetic flux density, B_s

When the strength of a DC magnetic field H is intensified around a completely demagnetized magnetic core, the magnetic flux density B increases from the initial point "0" as shown in the figure on the right. This is called an initial magnetization curve. The magnetic flux density eventually reaches its upper limit, called the saturation magnetic flux density B_s , where the value of B is defined as B_{10} , when $H = 10 \text{ Oe}$.



3. Loss

2-2. Residual magnetic flux density, Br

This is the amount of residual magnetic flux density retained by the core after the DC magnetic field is weakened and finally removed to the level of $H = 0$.

2-3. Coercivity, Hc

This is the strength of the magnetic field whereby the residual flux density becomes zero under the intensification, in the opposite direction, of the DC magnetic field.

3-1. Loss factor $\tan \delta$

The core loss factors of three different types of losses: hysteresis loss, eddy-current loss and residual loss.

$$\begin{aligned}\tan \delta &= \tan \delta_h + \tan \delta_e + \tan \delta_r \\ &= h_1 \sqrt{\frac{L}{V}} + e_1 \cdot f + r_1\end{aligned}$$

The loss coefficient $\tan \delta$ can be also represented by the ratio of resistance to reactance as follows:

$$\tan \delta = \frac{R_m}{\omega L} = \frac{R_{eff} - R_w}{\omega L}$$

Where $\tan \delta_h$: hysteresis loss coefficient

$\tan \delta_e$: eddy-current loss coefficient

$\tan \delta_r$: residual loss coefficient

L: self inductance of core with coil (mH)

V: core volume (mm³)

i: current (A)

h_1 : hysteresis loss coefficient

e_1 : eddy-current loss coefficient

r_1 : residual loss coefficient

f: frequency (Hz)

R_m : resistance of magnetic core (Ω)

R_{eff} : resistance of core and coil (Ω)

R_w : resistance of coil (Ω)

ω : angular velocity (rad/sec.)

(Note) h_1 is expressed as follows:

$$h_1 = \frac{1}{\omega L} \cdot \sqrt{\frac{V}{L}} \cdot \frac{R_2 - R_1}{i_2 - i_1}$$

Where R_1 = resistance for current i_1

R_2 = resistance for current i_2

rms and definitions

3-2. Relative loss factor $\tan\delta/\mu i$

This is the amount of loss per unit permeability and is expressed as follows:

$$\tan\delta/\mu i \text{ (for magnetic materials)}$$

$$\tan\delta/\mu_0 \text{ (where gaps are added to the magnetic circuit)}$$

3-3. Relative hysteresis loss coefficient, h_{10} (h-one-zero)

This is the value of h_i when $\mu_i=1000$ and is used for comparing different materials. It is expressed as:

$$h_{10} = h_i \cdot \left(\frac{1000}{\mu_i}\right)^2$$

(Note) The relationship between h_{10} and η_0 is represented as follows:

$$h_{10} = 50.1 \eta_0 \times 10^3$$

3-4. Quality factor, Q

This is the reciprocal of the loss coefficient and is given by:

$$Q = \frac{1}{\tan\delta} = \frac{\omega L}{R_m}$$

(Note) The Q for the coil with the core is expressed as follows:

$$Q_c = \frac{\omega L}{R_{eff}}$$

Temperature characteristics

4-1. Temperature coefficient, α_μ

This is the fractional difference of permeability per 1°C in a temperature range of from T_1 to T_2 .

$$\alpha_\mu = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}$$

Where μ_1 : permeability at temperature T_1 ,

μ_2 : permeability at temperature T_2 .

4-2. Relative temperature coefficient, $\alpha_{\mu r}$

This is the temperature coefficient per unit permeability and is represented by:

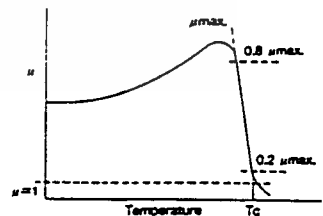
$$\alpha_{\mu r} = \frac{\alpha_\mu}{\mu_1}$$

Thus, the temperature coefficient of an actual core is obtained as follows:

$$\alpha_\mu = \alpha_{\mu r} \times \mu_0$$

4-3. Curie point, T_c

As shown by the typical temperature characteristic of permeability in the figure on the right, the Curie point T_c is defined as the temperature at which the magnetic core changes from the ferromagnetic to the paramagnetic state. It is the temperature obtained at the intersection point of the horizontal line of $\mu=1$ and the line passing through the points $0.8\mu_{max}$ and $0.2\mu_{max}$.



5. Disaccommodation factor, DF

This is the factor representing the variation of permeability through time after a complete demagnetization of the core at a constant temperature.

$$DF = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\log \frac{t_2}{t_1}} \cdot \frac{1}{\mu_1^2} \quad (t_2 > t_1)$$

Where μ_1 : initial permeability t_1 minutes after complete demagnetization

μ_2 : initial permeability t_2 minutes after complete demagnetization

(Note) Generally, t_1 to t_2 is set at 10 to 100 minutes.

6. Electrical resistivity, ρ (Ω -m)

This is the electrical resistance per unit length and cross-sectional area of a magnetic core.

7. Density, d (kg/m^3)

This is the weight per unit volume of a magnetic core as expressed below:

$$d = \frac{W}{V}$$

Where W: weight of magnetic body (kg)

V: volume of magnetic body (m^3)

8. Power loss

Power loss denotes the loss by an electrical transformer, such as a switching regulator, under a magnetization condition featuring a high frequency and a large amplitude. Operating magnetic flux density, B, is generally expressed as follows:

$$B = \frac{E}{4.44 f N A_e} \times 10^8 \quad (\text{mT})$$

Where B: magnetic flux density (mT)

E: coil terminal voltage (V)

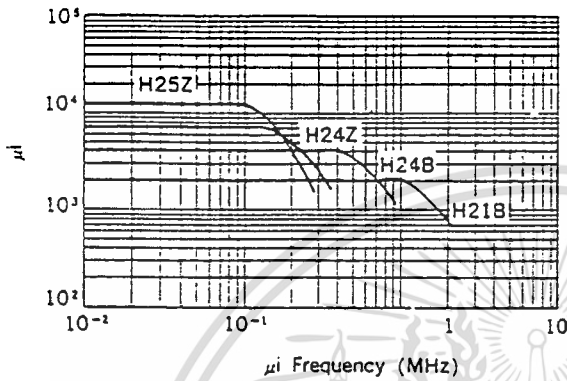
f: frequency (kHz)

N: number of coil turns

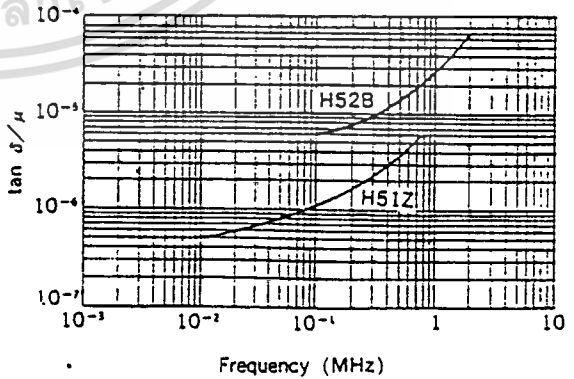
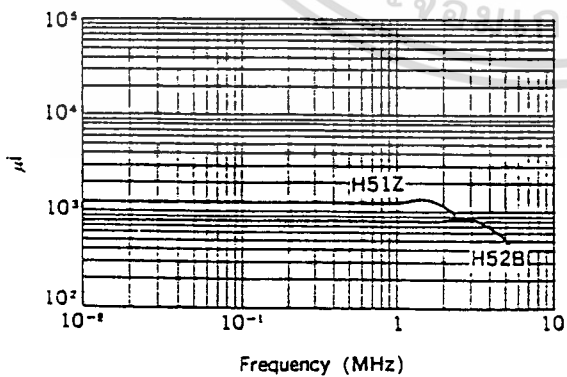
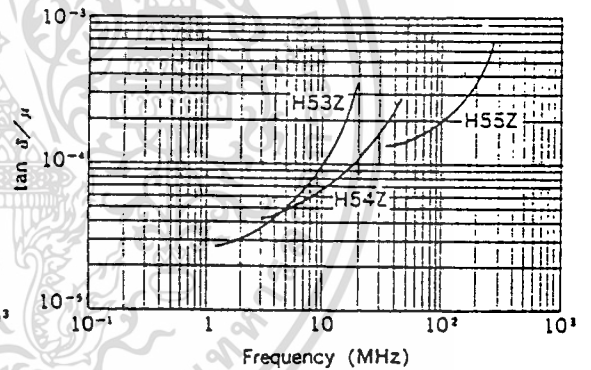
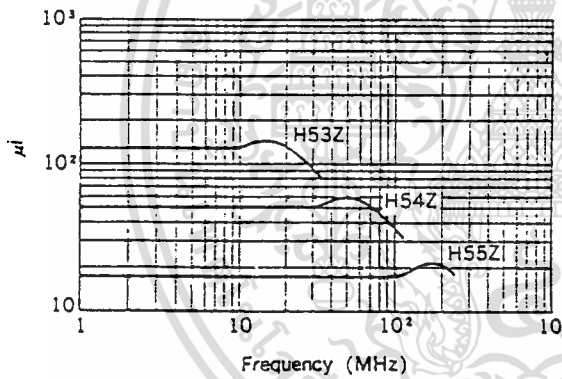
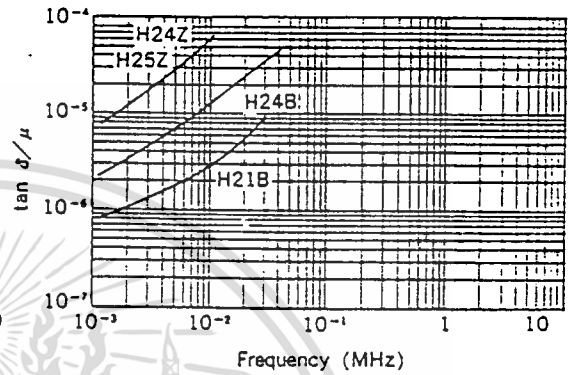
A_e : effective cross-sectional area (mm^2)

FERRITE MATERIALS

μ_i vs. frequency

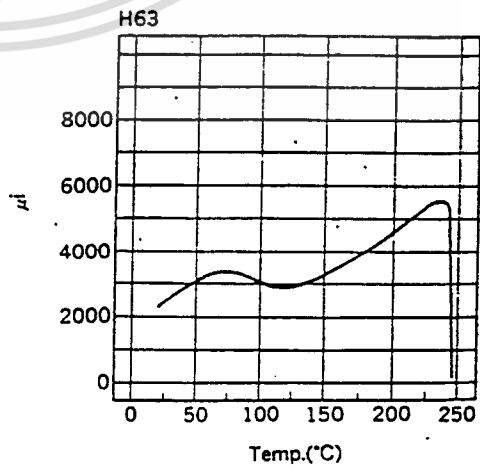
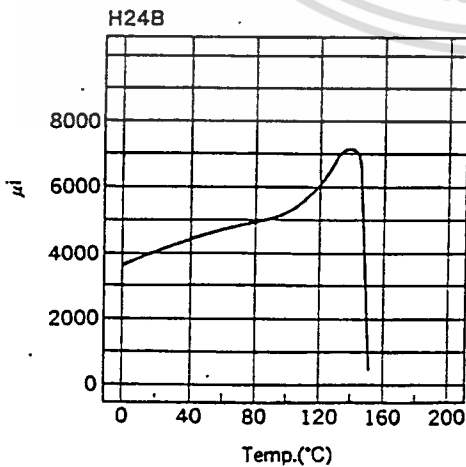
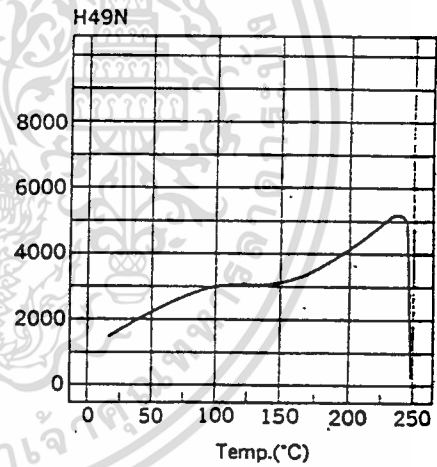
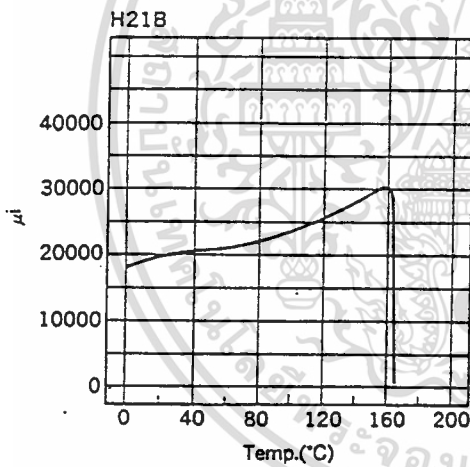
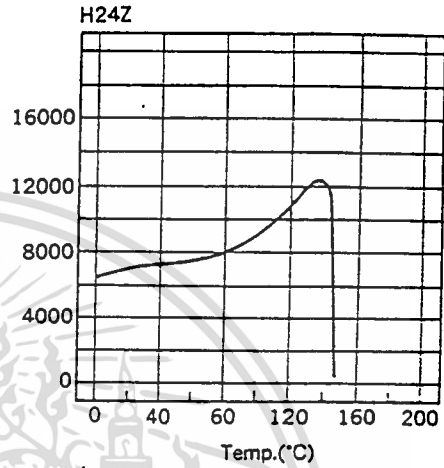
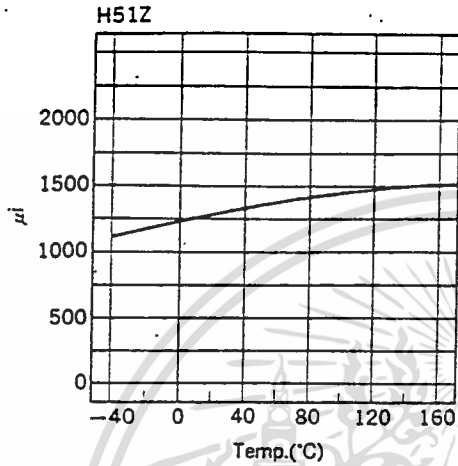


$\tan \delta / \mu_i$ vs. frequency



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

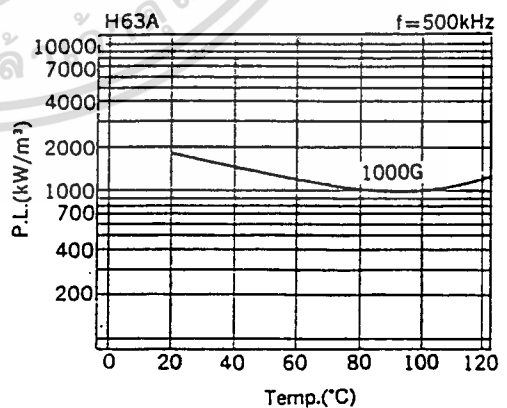
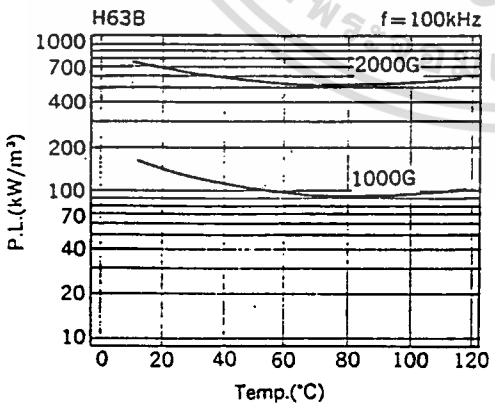
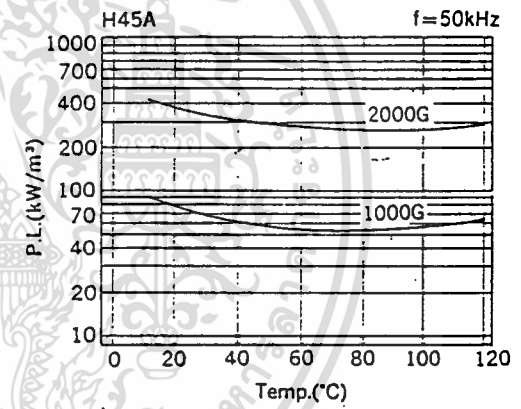
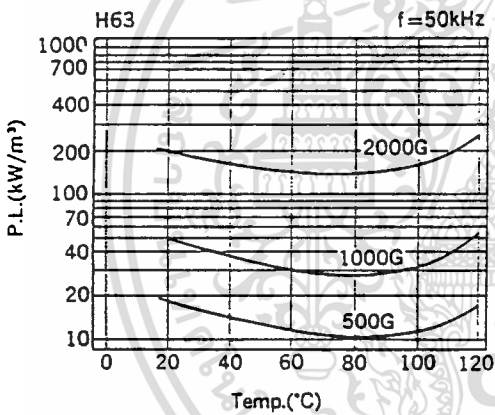
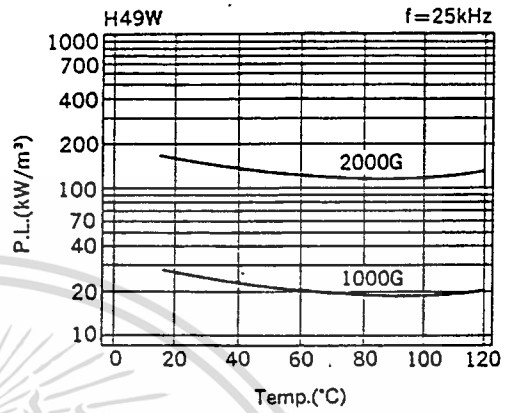
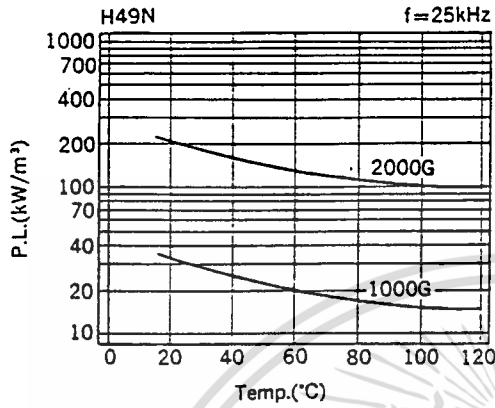
μ i vs. temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

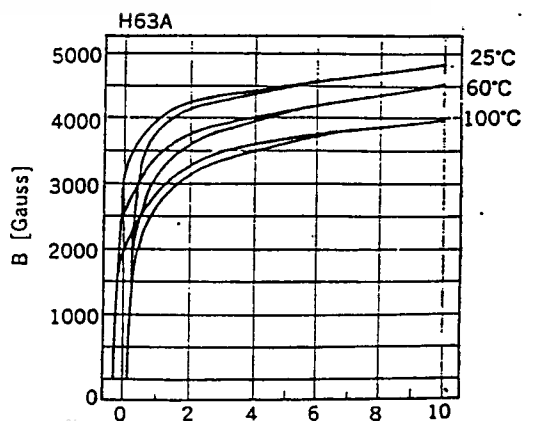
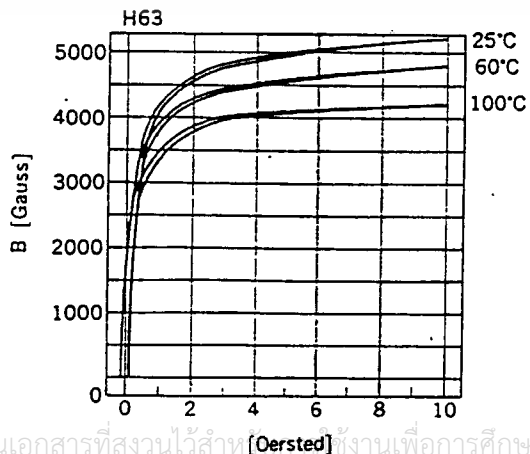
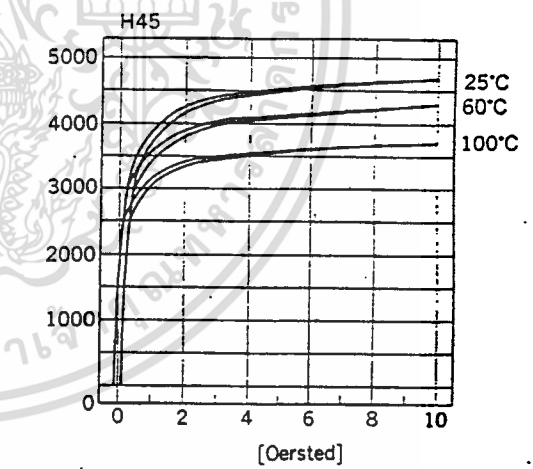
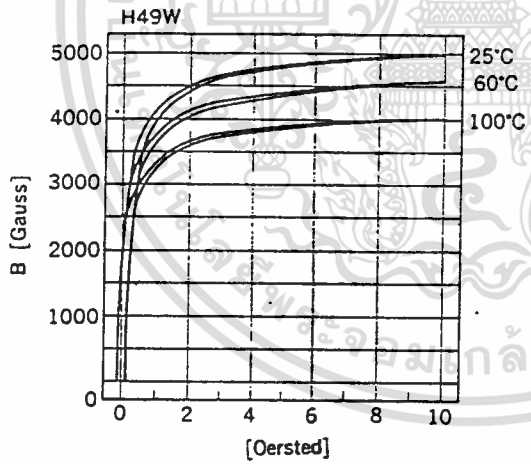
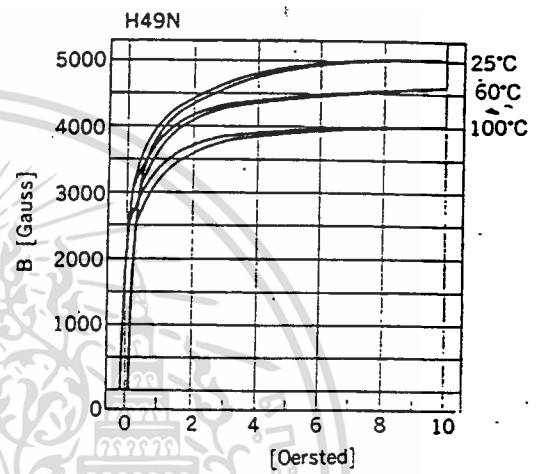
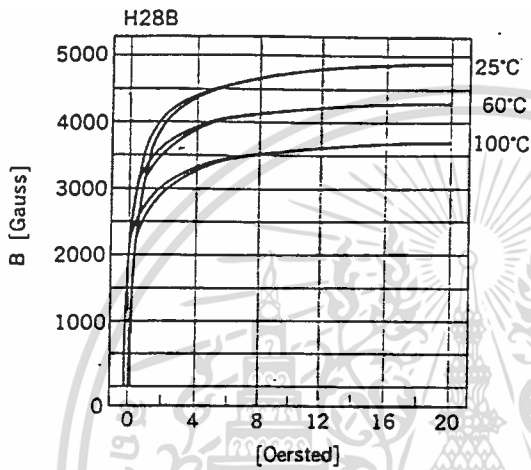
FERRITE MATERIALS

Power loss vs. temperature



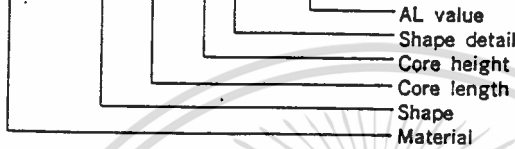
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Static magnetization curves

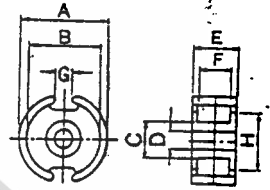


SP CORES

H21B SP 26 16 T-160



Type A



Core name	Type	Dimension (mm)								Magnetic characteristics				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I (A/cm ²)	μ (cm)	A_e (cm ²)	V_e (cm ³)	(g/set)
SP 0704 T	A	7.35 \pm 0.2	5.8 \pm 0.1	3.0 \pm 0.1	1.4 \pm 0.05	4.2 \pm 0.1	2.8 \pm 0.2	1.7 \pm 0.2	5.5 \pm 0.25	14.3	1.00	0.07	0.07	0.5
SP 0905 T	A	9.3 \pm 0.35	7.5 \pm 0.3	3.9 \pm 0.2	2.0 \pm 0.1	5.4 \pm 0.3	3.6 \pm 0.3	2.1 \pm 0.2	6.5 \pm 0.25	12.5	1.24	0.099	0.123	0.8
SP 1107 T	A	11.1 \pm 0.2	9.0 \pm 0.4	4.7 \pm 0.2	2.0 \pm 0.1	6.5 \pm 0.1	4.4 \pm 0.3	2.1 \pm 0.2	7.0 \pm 0.5	9.56	1.55	0.162	0.251	1.8
SP 1408 T	B	14.0 \pm 0.2	11.6 \pm 0.4	6.0 \pm 0.2	3.0 \pm 0.2	8.4 \pm 0.2	5.6 \pm 0.4	3.3 \pm 0.6	9.5 \pm 0.3	7.89	1.98	0.251	0.496	3.2
SP 1414 T	B	14.0 \pm 0.2	12.0 \pm 0.1	6.0 \pm 0.15	3.1 \pm 0.1	14.0 \pm 0.3	11.0 \pm 0.4	1.9 \pm 0.3	10.0 \pm 0.4	11.3	2.93	0.259	0.759	3.8
SP 1811 T	B	17.9 \pm 0.3	14.9 \pm 0.5	7.6 \pm 0.3	3.0 \pm 0.2	10.7 \pm 0.3	7.2 \pm 0.5	3.5 \pm 0.6	13.0 \pm 0.5	5.97	2.59	0.434	1.12	6.4
SP 2213 T	B	22.0 \pm 0.8	17.9 \pm 0.8	9.4 \pm 0.3	4.4 \pm 0.2	13.5 \pm 0.4	9.2 \pm 0.4	3.8 \pm 0.6	15.0 \pm 0.3	4.97	3.15	0.634	2.00	12.6
SP 2614 T	A	25.5 \pm 0.5	21.7 \pm 0.5	11.3 \pm 0.2	5.55 \pm 0.15	14.0 \pm 0.3	9.2 \pm 0.5	4.0 \pm 0.3	18.2 \pm 0.3	3.65	3.40	0.931	3.17	19
SP 2616 T	B	25.5 \pm 0.5	21.2 \pm 0.8	11.5 \pm 0.4	5.5 \pm 0.2	16.0 \pm 0.7	11.0 \pm 0.4	2.8 \pm 0.6	18.0 \pm 0.4	4.00	3.55	0.898	3.15	21.6
SP 3019 T	B	30.0 \pm 0.5	25.0 \pm 0.8	13.5 \pm 0.4	5.5 \pm 0.2	19.0 \pm 0.5	13.0 \pm 0.5	4.3 \pm 0.6	20.5 \pm 0.5	3.30	4.50	1.36	6.12	36

Letter for AL value tolerance

S : \pm 3% J : \pm 10% T : \pm 25%
 U : \pm 5% N : \pm 20% M : \pm 30%

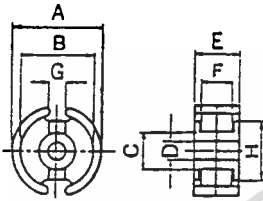
Core name	Gap	Ferrite material AL value (nH/N ²), tolerance									
		H53 Z	H52 B	H51 Z	H21 B	H24 B	H24 A	H24 Z	H25 Z	H63	H28 B
SP 0704 T	with gap	8, 25/S	63/S		100/S						
	without gap	90/T			1000/T	1300/T	1400/T	2800/T	3500/M		
SP 0905 T	with gap	10, 16/S	25, 40, 63/S		100, 160/S	200, 250/U					
	without gap	100/T			1250/T	1700/T	1800/T	3500/T	5000/M		
SP 1107 T	with gap	16, 25, 40/S	63, 100/S	100, 160/S	250/S	400/U					
	without gap	130/T			1600/T	2500/T	2700/T	5000/T	6500/M		
SP 1408 T	with gap	16, 25/S	40, 63/S	100, 160/S	250, 315/S	400/U					
	without gap	160/T			2100/T	3200/T	3500/T	6500/M	9000/M		
SP 1414 T	with gap	25/S	40, 63/S	100, 160/S	250, 315/S	400/U					
	without gap	140/T			2000/T	3000/T	3000/T	5500/T	7800/M		
SP 1811 T	with gap	25, 40/S	63, 100, 160/S	250, 315/S	400/U	630, 1000/J					
	without gap	200/T			2800/T	5000/T	5700/T	(9000/T)	(12000/M)		
SP 2213 T	with gap	40, 63/S	100, 160/S	250, 315, 400/S	630, 1000/U	1600/U					
	without gap				3700/T	6500/T	7500/T	(12000/T)	(16000/M)	3300/T	4700/T
SP 2614 T	with gap	63, 100/S	180, 250/S		315, 400 630, 800/S	1000/U 1800/J					
	without gap				4600/T	8000/T	9500/T			4200/T	5700/T
SP 2616 T	with gap	63, 100/S	180, 250/S		315, 400 630, 800/S	1000/U 1600/J					
	without gap				4500/T	8000/T	9000/T			4000/T	5500/T
SP 3019 T	with gap				315, 400 630, 800/S	1000/U 1600/J					
	without gap				6500/T	10000/T	(12000/T)			6000/T	8000/T

() : Upon request

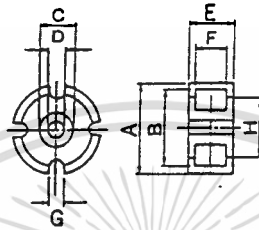
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ก่อการซื้อ ขาย หรือให้บริการอื่นใดที่เกี่ยวข้องกับเอกสารฉบับนี้

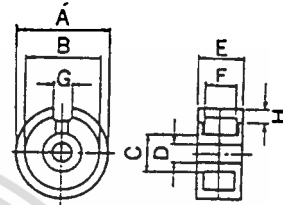
Type B



Type C



Type G



Core name	Type	Dimension (mm)								Magnetic characteristics				
		A	B	C	D	E	F	G	H	μ (cm ⁻¹)	δ (cm)	Ae (cm ²)	Ve (cm ³)	(g/seat)
SP 3523 T	B	35.0±0.5	27.0±0.5	13.3±0.2	5.4	23.0	13.6±0.4	5.0±0.3	23.0±0.3	2.72	4.38	1.61	7.05	60
SP 3622 T	B	36.0 ^{+0.5} _{-1.0}	29.9 ^{+1.0} _{-1.0}	16.0 ^{+0.4} _{-0.4}	5.5 ^{+0.2} _{-0.2}	22.0 ^{+0.5} _{-0.5}	14.6 ^{+0.4} _{-0.4}	4.9±0.6	26.2±0.6	2.64	5.30	2.01	10.7	56
SP 5936 T	B	58.6±1.2	48.8 ^{+1.5} _{-1.5}	25.5 ^{+0.8} _{-0.8}	5.5 ^{+0.2} _{-0.2}	35.6 ^{+0.8} _{-0.8}	23.6 ^{+0.8} _{-0.8}	7.5±0.5	41.5±1.0	1.84	8.80	4.77	42.0	270
SP 1408 FU	C	14.0±0.2	11.6 ^{+0.4} _{-0.4}	6.0 ^{+0.2} _{-0.2}	3.0 ^{+0.2} _{-0.2}	8.4 ^{+0.1} _{-0.1}	5.6 ^{+0.4} _{-0.4}	2.7±0.3	8.2±0.5	8.67	2.04	0.235	0.480	3.2
SP 1814 FU	C	17.7±0.3	14.9 ^{+0.5} _{-0.5}	7.6 ^{+0.3} _{-0.3}	3.0 ^{+0.2} _{-0.2}	14.0 ^{+0.3} _{-0.3}	10.8 ^{+0.4} _{-0.4}	2.9±0.3	11.5±0.4	7.07	3.01	0.426	1.28	9
SP 2614 FU	C	25.5±0.5	21.7±0.5	11.3±0.2	5.55±0.15	14.0 ^{+0.3} _{-0.3}	9.2±0.5	4.0±0.3	17.0±0.4	3.98	3.47	0.872	3.03	19
SP 3019 FU	C	30.0±0.5	25.5±0.5	13.3±0.2	5.55±0.15	18.0 ^{+0.3} _{-0.3}	13.0 ^{+1.0} _{-1.0}	4.0±0.3	20.3±0.4	3.61	4.62	1.28	5.91	36
SP 1211 TVG	A	12.0 ^{+0.3} _{-0.5}	9.8 ^{+0.3} _{-0.3}	5.0±0.15		10.8 ^{+0.4} _{-0.4}	8.2 ^{+0.6} _{-0.6}	3.0±0.3	7.0±0.3	10.1	2.47	0.238	0.588	2.3
SP 1814 LVG	D	18.0 ^{+0.3} _{-0.4}	14.7 ^{+0.5} _{-0.5}	7.4 ^{+0.2} _{-0.2}		14.2 ^{+0.6} _{-0.6}	10.1 ^{+0.8} _{-0.8}	3.0±0.3	3.3±0.8	6.75	3.01	0.446	1.34	9.5
SP 6656 LV	D	66.5±1.5	53.5 ^{+0.2} _{-0.2}	28.8 ^{+1.0} _{-1.0}	6.35 ^{+0.3} _{-0.3}	56.0 ^{+1.2} _{-1.0}	42.0 ^{+1.2} _{-0.7}	7.0 ^{+0.7} _{-0.7}	10.0±0.8	1.74	12.40	7.13	88.5	554

Letter for AL value tolerance

S : ±3%

J : ±10%

T : ±25%

U : ±5%

N : ±20%

M : ±30%

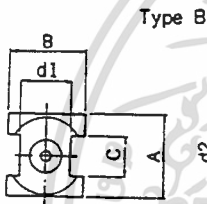
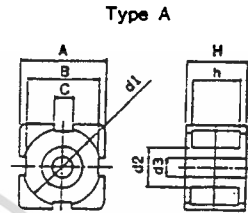
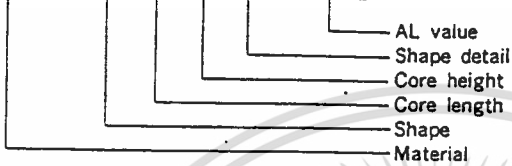
Core name	Gap	Ferrite material AL value (nH/N ²), tolerance									
		H51 Z	H52 B	H51 Z	H21 B	H24 B	H24 A	H24 Z	H25 Z	H63	H28 B
SP 3523 T	with gap				315, 400 630, 1000/S	120, 180/U					
	without gap				7500/T	13000/T	(15000/T)		6700/T	9500/T	
SP 3622 T	with gap				315, 400 630, 1000/S	1600/U	2500/J				
	without gap				7700/T	13000/T	(15000/T)		7000/T	10000/T	
SP 5936 T	with gap				315, 400 630, 1000/S	1600/U	2500/J				
	without gap				12000/T	19000/T					
SP 1408 FU	with gap			100, 180/S	250, 315/S	400/U					
	without gap				2100/T	3200/T	3500/T	6000/T	8500/M		
SP 1814 FU	with gap			250, 315/S	400/U	630, 1000/J					
	without gap				2800/T	4500/T	5200/T	(8500/T)	(11000/M)		
SP 2614 FU	with gap				315, 400 630, 800/S						
	without gap				4400/T	7600/T	8500/T		4000/T	5500/T	
SP 3019 FU	with gap				315, 400 630, 800/S	1000/U	1800/J				
	without gap				6200/T	9500/T	(11000/T)		5700/T	7500/T	
SP 1211 TVG	with gap	25, 40/S	63/S	100, 180/S	250, 315/S						
	without gap	120/T			1500/T	2300/T	2500/T	4500/T	5500/M		
SP 1814 LVG	with gap	25, 40/S	63, 100/S	250, 315/S	400/U	630, 1000/J					
	without gap	150/T			2300/T	4500/T	5000/T	(8000/T)	(11000/M)		
SP 6656 LV	with gap				315, 400 630, 1000/S	1600/U	2500/J				
	without gap				14000/T						

() : Upon request

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CP CORES

H21B CP 1309 FV-160



Core name	Type	Dimension (mm)								Magnetic characteristics				
		A	B	C	d1	d2	d3	H	h	μ_i (mT ⁻¹)	μ_e (cm)	A_e (cm ²)	V_e (cm ³)	(g/set)
CP 0906 FV	A	3.4 ^{+0.6}	7.0	2.0	8.3 ^{+0.3}	4.0 ^{+0.2}	1.8 ^{+0.3}	6.5 ^{+0.4}	3.7 ^{+0.3}	10.2	1.26	0.127	0.160	1.10
CP 1309 FV	A	13.5 ^{+0.4}	11.4	3.0	12.1 ^{+0.4}	6.6 ^{+0.3}	3.0 ^{+0.2}	9.5 ^{+0.3}	6.7 ^{+0.4}	7.44	2.25	0.300	0.675	4.3
CP 1409 TV	B	15.2 ^{±0.3}	14.7 ^{±0.3}	7.75 ^{±0.25}	9.5 ^{±0.25}	6.0 ^{±0.15}	2.05 ^{±0.1}	9.6 ^{±0.2}	7.0 ^{±0.2}	7.56	1.80	0.238	0.428	4.8
CP 1715	C	16.7 ^{+0.8}	20.0 ^{+0.8}	9.9 ^{+0.4}	13.8 ^{+0.8}	7.0 ^{+0.3}	1.0 ^{+0.1}	15.2 ^{±0.2}	10.6 ^{±0.2}	8.62	3.18	0.369	1.17	8.5
CP 2014 FV	A	20.0 ^{+0.5}	16.5	6.0	18.4 ^{+0.5}	9.8 ^{+0.3}	1.0 ^{+0.2}	13.5 ^{+0.4}	10.0 ^{+0.4}	4.80	3.34	0.700	2.33	13
CP 2323 FV	A	23.3 ^{+0.5}	20.0	6.0	21.2 ^{+0.5}	11.65 ^{+0.3}	1.0 ^{+0.2}	23.3 ^{+0.5}	17.0 ^{+0.4}	4.12	4.96	1.20	6.00	32

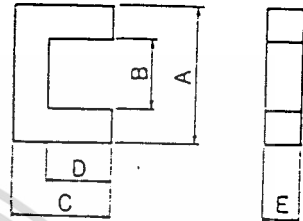
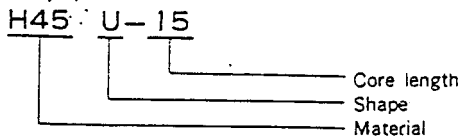
Letter for AL value tolerance
 S : ± 3% N : ± 20%
 U : ± 5% T : ± 25%
 J : ± 10% M : ± 30%

Core name	Gap	Ferite material AL value (nH/N ²), tolerance									
		H 53 Z	H 52 B	H 51 Z	H 21 B	H 24 B	H 24 A	H 24 Z	H 25 Z	H 63	H 28 B
CP 0906 FV	with gap	10, 16/S	25, 40, 63/S		100, 160/S	200, 250/S					
	without gap	120/T			1500/T	2100/T	2000/T	4000/T	6000/M		
CP 1309 FV	with gap	16, 25/S	40, 63/S	100, 160, 250/S	315/S	400/U					
	without gap	160/T			2300/T	3400/T	3800/T	7000/T	10000/M		
CP 1409 TV	with gap			160, 250/T	250/T	315/T					
	without gap				2000/T	3500/T	3300/T	6500/T	9000/M		
CP 1715	with gap			160, 250/S	315/S	400/U					
	without gap				2400/T	3500/T	3900/T	(7000/T)	(10000/M)		
CP 2014 FV	with gap	63/S	100, 160/S	20, 315, 400/S	600, 800/U	1000/U					
	without gap				3500/T	6700/T	7700/T			3300/T	4600/T
CP 2323 FV	with gap			20, 315, 400/S	630, 1000/S	1250, 1600/U					
	without gap				4500/T	8000/T	(8200/T)			4000/T	5400/T

() : Upon request

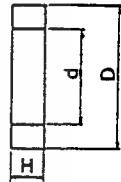
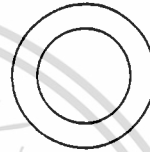
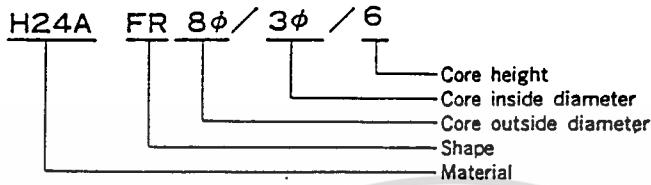
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U CORES



Characteristics		Core name						
		U-15	U-21	U-25	U-30	U-40	U-50	U-60
Dimension	A (mm)	15.2±0.7	21.6 max.	24.8±0.7	30.0±0.5	39.9±0.5	50.0±0.6	60.0±1.0
	B (mm)	5.2±0.3	6.0 min.	8.2±0.3	20.0±0.5	22.9±0.5	34.0±0.6	30.0±1.0
	C (mm)	11.2±0.5	15.8 max.	19.5±0.5	10.5±0.3	25.15±0.3	12.5±0.3	28.0±0.3
	D (mm)	6.0±0.4	8.0 min.	11.2±0.3	5.5±0.3	16.65±0.3	4.0±0.3	13.0±0.3
	E (mm)	6.5±0.3	7.5±0.3	11.7±0.3	10.7±0.3	8.5±0.3	15.0±0.5	15.0±0.5
Core factor	$\Sigma \frac{l}{A}$ (cm ⁻¹)	15.2	12.6	8.99	14.52	19.25	8.76	7.07
Effective length	$2e$ (cm)	5.04	6.88	8.73	7.77	13.91	10.99	15.91
Effective area	A_e (cm ²)	0.33	0.54	0.97	0.54	0.72	1.25	2.25
Effective volume	V_e (cm ³)	1.66	3.75	8.48	4.20	10.05	13.78	35.80
AL value (nH/N ² ±25%)	H45	1550	1900	2650	1650	1250	2800	3500
	H49N	1240	1520	2120	1320	1000	2240	2800

TOROIDAL CORES

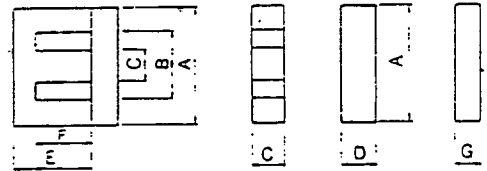
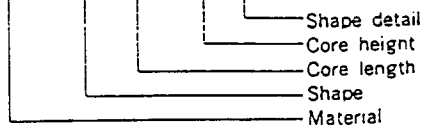


Core name	Dimension (mm)			AL value (nH/N ²)				
	ϕD	ϕd	H	H 45 ($\pm 25\%$)	H 24 B ($\pm 25\%$)	H 24 A ($\pm 25\%$)	H 24 Z ($\pm 25\%$)	H 25 Z ($\pm 30\%$)
FR 4 ϕ / 2.2 ϕ / 2.7	4.0 \pm 0.2	2.2 \pm 0.2	2.7 \pm 0.2	800	1250	1600	2200	3800
FR 5 ϕ / 3.2 ϕ / 3	5.0 \pm 0.2	3.2 \pm 0.2	3.0 \pm 0.2	650	1100	1350	1850	3200
FR 8 ϕ / 3 ϕ / 6	8.0 \pm 0.3	3.0 \pm 0.2	6.0 \pm 0.3	2700	4300	5400	7600	13000
FR 11 ϕ / 5 ϕ / 3	11.0 \pm 0.3	5.0 \pm 0.2	3.0 \pm 0.3	1100	1750	2200	3100	5300
FR 13 ϕ / 7 ϕ / 5	13.0 \pm 0.4	7.0 \pm 0.3	5.0 \pm 0.3	1500	2400	3000	4200	(7100)
FR 14 ϕ / 7 ϕ / 7	14.0 \pm 0.4	7.0 \pm 0.3	7.0 \pm 0.3	2300	3700	4600	6500	(11000)
FR 15 ϕ / 9 ϕ / 13	15.0 \pm 0.3	9.0 \pm 0.3	13.0 \pm 0.3	3250	5200	6500	9100	(15000)
FR 16 ϕ / 10 ϕ / 7	16.0 \pm 0.5	10.0 \pm 0.5	7.0 \pm 0.3	1600	2600	3200	4500	(7000)
FR 16 ϕ / 12 ϕ / 8	16.0 \pm 0.3	12.0 \pm 0.3	8.0 \pm 0.3	1150	1800	2300	3200	
FR 19 ϕ / 10 ϕ / 10	18.45 \pm 0.3	9.75 \pm 0.3	10.25 \pm 0.3	3000	4800	6000	(8300)	
FR 20 ϕ / 12 ϕ / 4	19.95 \pm 0.3	12.05 \pm 0.3	4.15 \pm 0.3	3400	5500	7000	(9700)	
FR 25 ϕ / 15 ϕ / 12	25.0 \pm 0.5	15.0 \pm 0.5	12.0 \pm 0.5	3000	4800	6000	(8300)	
FR 31 ϕ / 20 ϕ / 10	31.0 \pm _{-0.8} ⁰	20.0 \pm ₋₀ ^{+0.5}	10.0 \pm _{-0.6} ⁺⁰	2100	3500	4300	(6000)	
FR 38 ϕ / 19 ϕ / 13	38.1 \pm 0.5	19.0 \pm 0.5	12.7 \pm 0.5	4300	(6900)	(8500)		
FR 40 ϕ / 20 ϕ / 12	40.0 \pm _{-1.0} ⁰	20.0 \pm ₋₀ ^{+0.5}	12.0 \pm ₋₀ ^{+0.6}	5000	(8000)	(9800)		
FR 50 ϕ / 25 ϕ / 10	50.0 \pm _{-1.2} ⁰	25.0 \pm ₋₀ ^{+0.6}	10.0 \pm ₋₀ ^{+0.6}	3300	(5300)	(6500)		

(): Upon request

EI CORES

H63 EI 30/26K



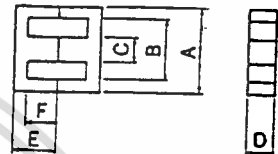
Characteristics	Core name								
	EI 22/19K	EI 25/19	EI 28/20	EI 30/26K	EI 35/29	EI 40/35K	EI 50/42K	EI 60/44K	
Dimension	A (mm)	22.0±0.3	25.0±0.5	28.0±0.5	30.0±0.4	35.0±0.5	40.0±0.5	50.0±0.7	60.0±0.8
	B (mm)	12.8 min.	13.15 min.	13.6 min.	19.5 min.	24.5 min.	26.8 min.	33.5 min.	43.6 min.
	C (mm)	6.0 ^{+0.5} _{-0.5}	6.5±0.25	7.5 ^{+0.5} _{-0.5}	11.0 ^{+0.5} _{-0.5}	10.3 ^{+0.5} _{-0.5}	12.0 ^{+0.7} _{-0.7}	15.0 ^{+0.8} _{-0.8}	16.0 ^{+0.8} _{-0.8}
	D (mm)	6.0 ^{+0.5} _{-0.5}	6.5±0.25	11.0 ^{+0.6} _{-0.6}	11.0 ^{+0.6} _{-0.6}	10.3 ^{+0.5} _{-0.5}	12.0 ^{+0.7} _{-0.7}	15.0 ^{+0.8} _{-0.8}	16.0 ^{+0.8} _{-0.8}
	E (mm)	14.3 ^{+0.5} _{-0.5}	16.3 ^{+0.5} _{-0.5}	16.5±0.5	21.0 ^{+0.5} _{-0.5}	24.2±0.4	27.0 ^{+0.5} _{-0.5}	33.0 ^{+0.7} _{-0.7}	35.5 ^{+0.7} _{-0.7}
	F (mm)	10.3 ^{+0.5} _{-0.5}	13.0 ^{+0.5} _{-0.5}	12.0 ^{+0.5} _{-0.5}	16.0 ^{+0.5} _{-0.5}	18.2±0.3	20.0 ^{+0.5} _{-0.5}	24.5 ^{+0.7} _{-0.7}	27.5 ^{+0.7} _{-0.7}
	G (mm)	4.5±0.2	3.0±0.2	3.5±0.2	5.5±0.2	5.0±0.2	7.5±0.3	9.0±0.3	8.5±0.3
Core factor	$\Sigma \frac{l}{A} (\text{cm}^{-1})$	9.53	11.7	5.69	5.24	5.59	5.22	4.12	4.43
Effective length	$2le (\text{cm})$	-	4.86	4.84	5.81	6.76	7.69	9.48	10.97
Effective area	$Ae (\text{cm}^2)$	0.41	0.42	0.85	1.11	1.21	1.47	2.30	2.48
Effective volume	$Ve (\text{cm}^3)$	1.64	2.02	4.11	6.45	8.18	11.3	21.8	27.2
Approx. weight	W(g/set)	9.4	10	22	34	37	60	114	139
AL value (nH/N ² ±25%)	H45	2400	2050	4200	4200	3700	4600	5800	5300
	H49N	1650	1350	2750	2750	2600	3100	3900	3600
	H49W	2300	1950	4050	4050	3500	4500	5600	4900
	H63	2100	1800	3700	3700	3300	4200	5500	4500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EE CORES

H63 EE 30/26 K

Shape detail
Core height
Core length
Shape
Material



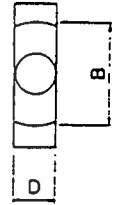
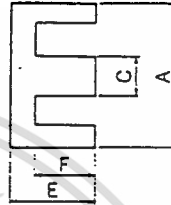
Characteristics		Core name									
		EE16/14K	EE19/16K	EE22/18K	EE30/26K	EE40/34K	EE42/42A-15W	EE42/42A-20W	EE50/42K	EE55/55A	EE60/44K
Dimension	A (mm)	16.0±0.3	19.1±0.3	22.0±0.3	30.0±0.5	40.0±0.5	42.0 ^{+1.0} _{-0.7}	42.0 ^{+1.0} _{-0.7}	50.0±0.7	55.0 ^{+1.5} _{-0.5}	60.0±0.8
	B (mm)	11.7 min.	14.2 min.	12.8 min.	19.5 min.	27.4 min.	29.5 min.	29.5 min.	34.2 min.	37.5 min.	43.8 min.
	C (mm)	4.0 ^{+0.4} _{-0.4}	4.7 ^{+0.3} _{-0.3}	6.0 ^{+0.5} _{-0.5}	11.0 ^{+0.6} _{-0.6}	11.0 ^{+0.6} _{-0.6}	12.2 ^{+0.5} _{-0.5}	12.2 ^{+0.5} _{-0.5}	15.2 ^{+0.6} _{-0.6}	17.2 ^{+0.5} _{-0.5}	16.0 ^{+0.6} _{-0.6}
	D (mm)	5.0 ^{+0.4} _{-0.4}	5.2 ^{+0.4} _{-0.4}	6.0 ^{+0.5} _{-0.5}	11.0 ^{+0.6} _{-0.6}	11.0 ^{+0.6} _{-0.6}	15.2 ^{+0.5} _{-0.5}	20.0 ^{+0.6} _{-0.6}	15.0 ^{+0.6} _{-0.6}	21.0 ^{+0.6} _{-0.6}	16.0 ^{+0.6} _{-0.6}
	E (mm)	7.1 ^{+0.2} _{-0.2}	7.8 ^{+0.3} _{-0.3}	9.2 ^{+0.3} _{-0.3}	13.0 ^{+0.3} _{-0.3}	16.7 ^{+0.6} _{-0.6}	21.2 ^{+0.4} _{-0.4}	21.2 ^{+0.4} _{-0.4}	21.0 ^{+0.5} _{-0.5}	27.5 ^{+0.6} _{-0.6}	22.0 ^{+0.6} _{-0.6}
	F (mm)	5.1 ^{+0.25} _{-0.25}	5.5 ^{+0.2} _{-0.2}	5.2 ^{+0.3} _{-0.3}	8.0 ^{+0.3} _{-0.3}	10.0 ^{+0.5} _{-0.5}	14.8 ^{+0.7} _{-0.7}	14.8 ^{+0.7} _{-0.7}	12.5 ^{+0.5} _{-0.5}	18.5 ^{+0.6} _{-0.6}	13.8 ^{+0.5} _{-0.5}
Core factor	$\Sigma \frac{l}{A} (\text{cm}^{-1})$	18.0	17.0	9.75	5.28	6.05	5.42	4.22	4.25	3.51	4.50
Effective length	$l_e (\text{cm})$	3.52	3.96	3.97	5.78	7.73	9.70	9.70	9.61	12.40	11.0
Effective area	$A_e (\text{cm}^2)$	0.19	0.23	0.41	1.09	1.28	1.79	2.30	2.26	3.53	2.45
Effective volume	$V_e (\text{cm}^3)$	0.68	0.92	1.62	6.33	9.86	17.36	22.31	21.7	43.77	27.1
Approx. weight	W(g/set)	3.3	4.6	9.2	33	52	89	116	113	222	140
AL value (nH/N ² ±25%)	H45	1100	1250	2400	4600	3900	4300	5700	5700	6000	5300
	H49N	850	950	1650	3000	2700	3000	4000	4000	4300	3600
	H49W	1050	1200	2300	4400	3800	4000	5300	5300	6000	4800
	H63	1050	1200	2100	4100	3500	3700	4900	4900	5200	4500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EER CORES

H63 EER 35/34

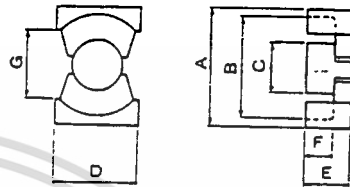
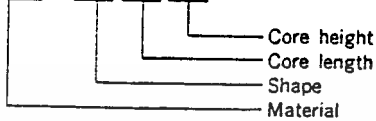
Core height
Core length
Shape
Material



Characteristics		Core name									
		EER19/24	EER26/33	EER34/35 (ETD34)	EER35/41	EER39/44	EER39/40 (ETD39)	EER42/42	EER44/45 (ETD44)	EER49/62	EER49/49 (ETD49)
Dimension	A (mm)	19.2±0.4	26.2±0.4	35.0±0.6	35.0±0.5	39.0±0.5	40.0±0.6	42.0±0.5	45.0±0.6	49.0±0.6	49.8±0.2
	B (mm)	13.6 min.	19.6 min.	25.6±0.4	25.6 min.	28.5 min.	29.3±0.6	31.0±0.5	32.5±0.6	36.4 min.	36.1±0.8
	C (mm)	5.6±0.3	7.2±0.3	11.1±0.6	11.3±0.3	12.8±0.3	12.8±0.6	15.2±0.3	15.2±0.6	17.2±0.2	16.7±0.6
	D (mm)	5.6±0.3	7.2±0.3	11.1±0.6	11.3±0.3	12.8±0.3	12.8±0.6	15.2±0.3	15.2±0.6	17.2±0.3	16.7±0.6
	E (mm)	12.1±0.2	16.3±0.3	17.3±0.2	20.7±0.3	22.0±0.3	19.8±0.2	21.2±0.3	22.3±0.2	31.2±0.3	24.7±0.2
	F (mm)	8.9±0.2	12.8±0.3	11.8±0.6	14.7±0.3	17.0±0.3	14.2±0.6	15.2±0.3	16.1±0.6	22.7±0.3	17.7±0.6
Core factor	$\Sigma \frac{l}{A} (\text{cm}^{-1})$	18.8	16.89	8.12	8.12	7.61	7.38	5.26	5.93	6.21	5.40
Effective length	$l_e (\text{cm})$	5.23	7.43	7.90	9.01	10.12	9.22	9.63	10.35	14.60	11.40
Effective area	$A_e (\text{cm}^2)$	0.28	0.44	0.97	1.11	1.33	1.25	1.83	1.75	2.35	2.11
Effective volume	$V_e (\text{cm}^3)$	1.45	3.27	7.68	10.0	13.5	11.53	17.64	18.09	34.3	24.05
Approx. weight	W(g/set)	7.3	17	40	52	69	60	91	94	171	124
AL value (nH/N ² ±25%)	H45			2500	2600	3100	3200	4100	3600	3500	4000
	H49N	900	900	1700	1800	2100	2200	2700	2500	2500	2700
	H49W			2300	2400	2900	3000	3800	3400	3300	3700
	H63	1150	1200	2100	2200	2600	2700	3500	3200	3000	3500
	H24 B H24 A	2000 2350	2000 2400								

PM CORES

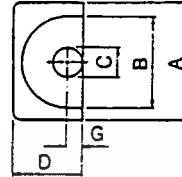
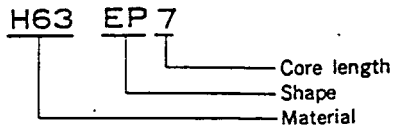
H63 PM3230



Characteristics		Core name							
		PM-2016	PM-2020	PM-2620	PM-2625	PM-3220	PM-3230	PM-3535	PM-4040
Dimension	A (mm)	20.5±0.4	20.5±0.4	26.5±0.45	26.5±0.45	32.0±0.5	32.0±0.5	35.0±0.5	40.0±0.4
	B (mm)	18.0±0.4	18.0±0.4	22.5±0.45	22.5±0.45	27.5±0.5	27.5±0.5	32.0±0.5	37.0±0.6
	C (mm)	9.0 ⁺⁰ _{-0.4}	9.0 ⁺⁰ _{-0.4}	12.2 ⁺⁰ _{-0.4}	12.2 ⁺⁰ _{-0.4}	13.7 ⁺⁰ _{-0.5}	13.7 ⁺⁰ _{-0.5}	14.6 ⁺⁰ _{-0.5}	15.2 ⁺⁰ _{-0.6}
	D (mm)	14.0±0.4	14.0±0.4	19.0±0.45	19.0±0.45	22.0±0.5	22.0±0.5	26.0±0.5	28.0±0.5
	E (mm)	8.2 ⁺⁰ _{-0.2}	10.2 ⁺⁰ _{-0.2}	10.2 ⁺⁰ _{-0.25}	12.5 ⁺⁰ _{-0.25}	10.4 ⁺⁰ _{-0.25}	15.3 ⁺⁰ _{-0.25}	17.5 ⁺⁰ _{-0.25}	20.0 ⁺⁰ _{-0.25}
	F (mm)	5.0 ⁺⁰ _{-0.3}	7.0 ⁺⁰ _{-0.3}	5.6 ⁺⁰ _{-0.3}	7.9 ⁺⁰ _{-0.3}	5.6±0.3	10.5 ⁺⁰ _{-0.3}	12.35 ⁺⁰ _{-0.3}	14.6 ⁺⁰ _{-0.3}
	G (mm)	12.0 min.	12.0 min.	15.5 min.	15.5 min.	19.0 min.	19.0 min.	23.5 min.	27.5 min.
Core factor	$\Sigma \frac{l}{A} (\text{cm}^{-1})$	6.05	7.38	3.91	4.71	3.26	4.64	4.48	5.08
Effective length	$l_e (\text{cm})$	3.74	4.54	4.63	5.55	5.55	7.46	8.79	10.19
Effective area	$A_e (\text{cm}^2)$	0.62	0.62	1.19	1.18	1.70	1.61	1.96	2.01
Effective volume	$V_e (\text{cm}^3)$	2.31	2.79	5.45	6.53	9.42	11.97	17.26	20.45
Approx. weight	W(g/set)	13	15	31	36	42	55	73	95
AL value (nH/N ² ±25%)	H63	3500	3000	5500	5200	6200	5000	5000	4500
	H45	3700	3200	5900	5500	7200	5200	5200	4700
	H49W	3600	3100	5600	5300	6500	5100	5100	4600
	H49N	2600	2200	4100	3900	4600	3700	3700	3400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EP CORES



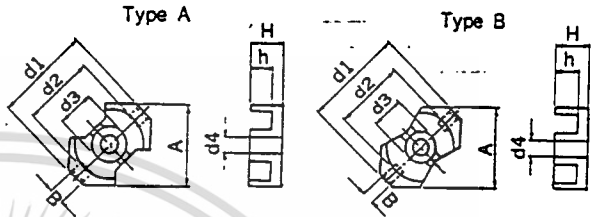
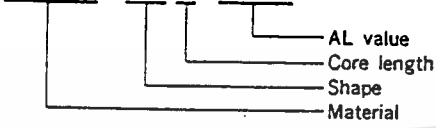
Characteristics		Core name					
		EP 7	EP 10	EP 13	EP 15	EP 17	EP 20
Dimension	A (mm)	9.2±0.2	11.5±0.2	12.5±0.3	15.0±0.5	18.0±0.4	24.0±0.5
	B (mm)	7.4±0.2	9.4±0.2	10.0±0.3	11.8±0.5	12.0±0.4	16.5±0.4
	C (mm)	3.4 ⁺⁰ _{-0.2}	3.45 ⁺⁰ _{-0.3}	4.5 ⁺⁰ _{-0.3}	4.8±0.5	5.85 ⁺⁰ _{-0.35}	9.0 ⁺⁰ _{-0.5}
	D (mm)	6.5 ⁺⁰ _{-0.3}	7.85 ⁺⁰ _{-0.4}	9.0 ⁺⁰ _{-0.4}	10.0±0.4	11.25 ⁺⁰ _{-0.5}	15.3 ⁺⁰ _{-0.7}
	E (mm)	7.5 ⁺⁰ _{-0.2}	10.4 ⁺⁰ _{-0.4}	13.0 ⁺⁰ _{-0.3}	15.0±0.4	17.0 ⁺⁰ _{-0.4}	21.6 ⁺⁰ _{-0.4}
	F (mm)	5.0 ⁺⁰ _{-0.4}	7.2 ⁺⁰ _{-0.4}	9.0 ⁺⁰ _{-0.4}	10.4±0.3	11.0 ⁺⁰ _{-0.6}	14.0 ⁺⁰ _{-0.6}
	G (mm)	1.8 ⁺⁰ _{-0.3}	1.95 ⁺⁰ _{-0.25}	2.5 ⁺⁰ _{-0.25}	2.75±0.2	3.25±0.2	4.5±0.2
Core factor	$\Sigma \frac{l}{A}$ (cm ⁻¹)	15.2	17.0	12.4	10.3	8.0	5.0
Effective length	l e (cm)	1.57	1.92	2.42	3.1	3.4	4.5
Effective area	Ae (cm ²)	0.10	0.11	0.20	0.30	0.43	0.84
Effective volume	Ve (cm ³)	0.16	0.22	0.47	0.93	1.50	3.80
Approx. weight	W (g/set)	1.4	2.8	5.1	7.5	11.8	27.6
AL value (nH/N ² ±25%)	H49N	600	600	900	1050	1350	2300
	H63	850	850	1200	1350	1750	2800
	H24B	1100	1100	1700	1900	2500	4200
	H24A	1600	1600	23000	2650	3400	5700
	H24Z	2200	2200	3400	3800	(5000)	

(): Upon request

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RM CORES

H21 B RM 6-400



Core name	Type	Dimension (mm)								Magnetic characteristics				
		A	B	d1	d2	d3	d4	H	h	$I_l / (A \cdot cm^{-1})$	$L_e (cm)$	$A_e (cm^2)$	$V_e (cm^3)$	(g/set)
RM 5	A	$12.3^{+0.4}_{-0.4}$	$2.5^{+0.3}_{-0.3}$	$14.6^{+0.5}_{-0.5}$	$10.2^{+0.4}_{-0.4}$	$4.9^{+0.2}_{-0.2}$	$2.0^{+0.1}_{-0.1}$	$5.25^{+0.1}_{-0.1}$	$3.15^{+0.2}_{-0.2}$	10.1	2.14	0.21	0.45	3.1
RM 6	B	$14.7^{+0.6}_{-0.6}$	$2.8^{+0.3}_{-0.3}$	$17.9^{+0.6}_{-0.6}$	$12.4^{+0.5}_{-0.5}$	$6.2^{+0.2}_{-0.2}$	$3.0^{+0.1}_{-0.1}$	$6.25^{+0.1}_{-0.1}$	$4.0^{+0.2}_{-0.2}$	8.63	2.70	0.31	0.85	4.7
RM 8	A	$19.7^{+0.7}_{-0.7}$	$5.0^{+0.3}_{-0.3}$	$23.2^{+0.9}_{-0.9}$	$17.0^{+0.8}_{-0.8}$	$8.55^{+0.3}_{-0.3}$	$4.4^{+0.2}_{-0.2}$	$8.25^{+0.2}_{-0.2}$	$5.4^{+0.3}_{-0.3}$	6.80	3.55	0.52	1.85	10
RM 10	A	$24.7^{+0.7}_{-0.7}$	$5.0^{+0.3}_{-0.3}$	$28.5^{+1.0}_{-1.0}$	$21.2^{+0.9}_{-0.9}$	$10.9^{+0.4}_{-0.4}$	$5.4^{+0.2}_{-0.2}$	$9.35^{+0.2}_{-0.2}$	$6.2^{+0.3}_{-0.3}$	5.06	4.20	0.83	3.47	20
RM 14	A	$34.7^{+0.9}_{-0.9}$	$5.6^{+0.3}_{-0.3}$	$42.2^{+1.2}_{-1.2}$	$29.0^{+1.0}_{-1.0}$	$15.0^{+0.5}_{-0.5}$	$5.4^{+0.2}_{-0.2}$	$14.5^{+0.2}_{-0.2}$	$10.4^{+0.3}_{-0.3}$	3.9	7.0	1.78	12.4	65

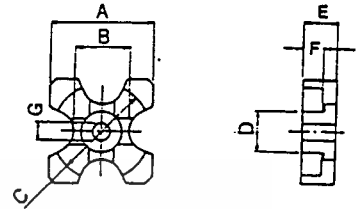
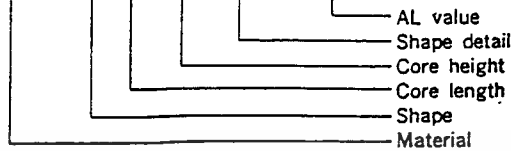
Letter for AL value tolerance
 S : ±3% N : ±20%
 U : ±5% T : ±25%
 J : ±10% M : ±30%

Core name	Gap	Ferrite material AL value (nH/N ²), tolerance									
		H 53 Z	H 52 B	H 51 Z	H 21 B	H 24 B	H 24 A	H 24 Z	H 25 Z	H 63	H 28 B
RM 5	with gap	10, 16, 25/S	40, 63/S	100, 160/S	250, 315/S	400/S					
	without gap	120/T	800/T		1600/T	* 2100/T	* 3400/T	* 5500/T	* 6300/M	* 1700/T	* 2200/T
RM 6	with gap	16, 25, 40/S	63, 100, 160/S	250, 315/S	400/U 630/J	1000, 1250/J					
	without gap	140/T	940/T	2000/T	* 3200/T	* 4000/T	* 6500/T	* 8000/M	* 2000/T	* 3000/T	
RM 8	with gap	40, 63/S	100, 160, 250/S	315, 400/S	630, 1000/U	1250, 1600/J					
	without gap	180/T	1200/T	2600/T	* 5400/T	* 6300/T	* (11000/T)	* (13000/M)	* 2900/T	* 4300/T	
RM 10	with gap			250, 315 400, 630/S	1000/U 1600/J						
	without gap				* 7500/T	* 8800/T			* 3900/T	* 5700/T	
RM 14	with gap			315, 400 630, 800/S	1250, 1600/J						
	without gap				8000/T	(9300/T)			3700/T	5400/T	

() : Upon request
 * without center hole

X CORES

H21B X 25 15 FUG-350



Type A With center hole
Type B Without center hole

Core name	Type	A	B	C	D	E	F	G
X 2515 FU	A	24.5 ⁺⁰ _{-0.9}	13.7 ⁺⁰ _{-0.6}	23.6 ^{+0.9} ₋₀	9.8 ⁺⁰ _{-0.4}	7.8 ⁺⁰ _{-0.2}	4.8 ^{+0.2} ₋₀	4.4 ^{+0.2} ₋₀
X 2515 FUG	B	24.5 ⁺⁰ _{-0.9}	13.7 ⁺⁰ _{-0.6}	23.6 ^{+0.9} ₋₀	9.8 ⁺⁰ _{-0.4}	7.8 ⁺⁰ _{-0.2}	4.8 ^{+0.2} ₋₀	
X 3023 FU	A	28.9±0.5	16.3±0.4	26.8 ^{+1.2} ₋₀	11.4 ⁺⁰ _{-0.5}	11.5 ^{+0.3} ₋₀	7.5 ^{+0.5} ₋₀	4.4 ^{+0.2} ₋₀
X 3023 FUG	B	28.9±0.5	16.3±0.4	26.8 ^{+1.2} ₋₀	11.4 ⁺⁰ _{-0.5}	11.5 ^{+0.3} ₋₀	7.5 ^{+0.5} ₋₀	
X 3623 FUG	B	36.5±0.8	22.1±0.4	35.2 ^{+1.6} ₋₀	15.2 ⁺⁰ _{-0.5}	11.8 ⁺⁰ _{-0.3}	7.5 ^{+0.5} ₋₀	

Core name	Σ L/A	Σ e	Ae	Ve	W
X 2515 FU	5.7	4.15	0.73	3.03	16.5
X 2515 FUG	5.7	4.15	0.73	3.03	16.7
X 3023 FU	4.89	5.58	1.14	6.36	38
X 3023 FUG	4.90	5.5	1.15	6.3	39
X 3623 FUG	3.15	6.60	2.10	13.9	74

Core name	Gap	H 53 Z	H 52 B	H 51 Z	H 21 B	H 24 B	H 24 A	H 24 Z	H 25 Z
X 2515 FU	with gap	100/S	250/S	400/S 800/U	1250, 1600/J				
	without gap				3500/T				
X 2515 FUG						1000, 1250/J			
						5400/T	6200/T	11000/T	16000/M
X 3023 FU			250/s	400, 800/S 1000/U	1250, 1600/U				
					4300/T				
X 3023 FUG						1250, 1600/J			
						6300/T	(7200/T)	13000/T	18500/M
X 3623 FUG									
						6400/T	9500/T	11000/T	19000/T
									28000/M

FERRITE MATERIAL REFERENCE TABLE

VOL. 1

SEPTEMBER, 1984
FUJI-ELECTROCHEMICAL CO., LTD.

F U J I	PHILIPS	SIEMENS	FERRINOX (L C C)	CERAMAG STACKP.	FERROX- CUBE	TUITA FERRITE	INDIANA GENERAL	MAGNE- TICS	FAIR- RITE	T . D . K
H 2 1 B	3 B 1 3 H 2	N 2 2 T 2 6	T 1 0 T 1 3 T 1 4	2 6 2 8	3 B 9		T C - 9	D G	7 2 7 3	H 6 A H 6 Z H 6 B
H 2 3 B	3 E 1					>D3				H 5 A
H 2 4	3 E 2	T 3 5	T 4	2 4 K		2E4				H 5 B 2
H 2 4 A	3 E 4	N 3 0		2 4 H	3E2A	2E1	O - 6		7 5	HP5000
H 2 4 B			T 6							HP4000
H 2 5	3 E 3	T 3 8				2E2				H 5 C 2
H 2 8 B		N 4 1	T 2 2			2E6				H 7 A
H 5 2	3 C 2	N 5 8		2 7 A				C		H 6 H 3
H 5 2 1	3 B 3 3 D 3	M 2 5 M 3 3	T 3 1 B 1 0	2 5	3 D 3			A	3 3	H 6 F
H 5 2 N	4 B 1		H 2 0	9					6 2 6 4	K 5
H 5 3	4 C 1		H 3 2	1 1	4 C 4		Q - 1		6 1	K 6 A
H 5 4	4 D 1 4 D 2		H 5 2	1 2			Q - 2		6 7	
H 5 5	4 E 1	K 1 2	H 6 2	1 4			Q - 3		6 8	K 8
H 5 6		U 1 7		1 4 A						
H 6 3			B 5 1			2E7				H 7 C 1
H 6 4						2E8				H 7 C 4
H 4 4										H 4 M
H 4 5	3 C 8		B 5 0	2 4	3 C 8	2E6	O - 5			H 3 S
H 4 9	3 C 6	N 2 7	B 3 0	2 4 B					7 7	H 3 T
H 4 9 N										H 7 C 2
H45A										H7C1

กิตติกรรมประกาศ

- ขอขอบคุณ
- ดร. วิริยะ พิเศษจำเริญ , อ. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ
อาจารย์ที่ให้คำปรึกษาด้วยดีมาโดยตลอด
 - พี่ โรมัส ธรรมาธิฐาน สำหรับคำแนะนำ และอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ
ต่างๆ
 - บิดามารดา ที่คอยให้กำลังใจอยู่เสมอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ABRAHAM I. PRESSMAN “Switching Power Supply Design” McGraw-Hill , New York 1991
- [2] GEORGE C. CHRYSIS “High Frequency Switching Power Supply Theory And Design” second edition McGraw-Hill , New York 1990
- [3] MARTY BROWN “Practical Switching Power Supply Design” Academic Press, Inc. San Diego 1990
- [4] สุวัฒน์ คั่น “เทคนิคและการออกแบบสวิตซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย” เอนเทลไทย มกราคม 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้