



การออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้คอมพิวเตอร์
CAD FOR HIGH FREQUENCY TRANSFORMERS AND INDUCTORS



โดย
นายกิตติ โปธีรัมย์
นายสมสวัสดิ์ ตั้งภัทรชนวงศ์
นายอิทธิชัย กิตติสมิทธิ์

30 ก.ย 2541
วัน เดือน ปี.....
เลขทะเบียน..... 038188
เลขเรียกหนังสือ..... MO39.208 ส.บ.มก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ปีการศึกษา 2539 จำขอเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2539

การออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้คอมพิวเตอร์
CAD FOR HIGH FREQUENCY TRANSFORMERS AND INDUCTORS



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของ **อ.อนุวัฒน์ กิจางวนิชเลิศ** กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

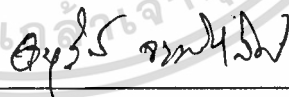
ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้คอมพิวเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติ โปธิ์ริง
2. นายสมสวัสดิ์ ตั้งภัทรธนะวงศ์
3. นายอิทธิชัย กิตติสมิทธิ์



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.อนวัจน์ จางวนิชเลิศ)

การออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้คอมพิวเตอร์

นายกิตติ โปธิ์รัง

นายสมสวัสดิ์ ตั้งภัทรธนวงศ์

นายอิทธิชัย กิตติสมิทธิ์

อ.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ในกระบวนการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีความจำเป็นที่จะต้องใช้หม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งบ่อยครั้งหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำจะทำให้ขนาดและน้ำหนักของระบบหรืออุปกรณ์นั้นมีค่ามาก นอกจากนี้ยังมีผลอย่างสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ จึงนำมาซึ่งการออกแบบที่จะทำให้ได้ค่าตัวประกอบทั้งน้ำหนัก ประสิทธิภาพ ราคา ซึ่งมีความเกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงพยายามหาวิธีการในการออกแบบที่จะทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้ทำการศึกษาถึงวิธีการและขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง เพื่อการวิเคราะห์ที่เหมาะสมที่สุด พร้อมทั้งนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบ และยังคำนึงถึงตัวประกอบต่างๆ ที่จะได้จุดที่เหมาะสมในการออกแบบ

CAD FOR HIGH FREQUENCY TRANSFORMERS AND INDUCTORS

Kirti Phorang

Somsawas Tungpataratanawong

Itthichai Kittismidh

Anuwat Jangwanitlert Advisor

1997

ABSTRACT

The conversion process in power electronics requires the utilization of high frequency transformers and inductors those are frequently the heaviest and bulkiest items in the conversion circuits. They also have a significant effect upon the overall performance and efficiency of the system. Accordingly, the design of such transformers and inductors has an important effect on the total system weight, efficiency of conversion for power and expenditure. All parameters are interdependent therefore, the designers have to try to scale to the optimum point of the design which is the destination or purpose of the high frequency transformers and inductors.

On this thesis, it represents the methods and steps for the expected optimum design, and searches for the optimization parameters, and then develops the computer program for the convenient use and least time taken in the design process with keeping in mind for optimal parameters. For the developed program reliability the designers can accept, this thesis also illustrates the results from the test.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 พื้นฐานของวงจรแม่เหล็กและการเลือกวัสดุสำหรับใช้เป็นแกนหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 พื้นฐานค่านวงจรแม่เหล็ก	4
บทที่ 3 คุณลักษณะต่าง ๆ ของการออกแบบหม้อแปลง	22
3.1 บทนำ	22
3.2 ความสามารถในการรองรับพลังงาน	22
3.3 ความสัมพันธ์ของค่าผลคูณพื้นที่กับค่าความสามารถในการรองรับพลังงาน	22
3.4 ค่าผลคูณพื้นที่และความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดและพื้นที่ตัดขวางของแกน	23
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงและค่าผลคูณพื้นที่	25
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าทางเรขาคณิตของแกนและคุณสมบัติแรงดันกระเพื่อมของหม้อแปลง	43
บทที่ 4 การออกแบบหม้อแปลงกำลัง	45
4.1 บทนำ	45
4.2 คุณสมบัติการรองรับพลังงาน	46
4.3 พลังงานขาออกกับความสามารถในการรองรับพลังงาน	46
4.4 กรณีที่หม้อแปลงมีหลายเอาต์พุต	49

4.5	การกระเพื่อมของแรงดัน	51
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของ แกนกับแรงคั้นกระเพื่อมของหม้อแปลง	53
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่และความสามารถในการ รองรับพลังงาน	53
4.8	การตัดสินใจชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนหม้อแปลง	54
4.9	ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลง โดยใช้วิธีผลคูณพื้นที่	54
4.10	ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลง โดยวิธีเรขาคณิตของแกน	58
บทที่ 5	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	62
5.1	บทนำ	62
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน และความสามารถในการรองรับพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ	62
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่และความสามารถในการ รองรับพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ	62
5.4	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยวิธีผลคูณพื้นที่	65
5.5	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยวิธีสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิต ของแกน	68
บทที่ 6	การเลือกแกนทอรรอยด์ชนิดพาวเวอร์คอร์ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้า กระแสตรง	73
6.1	บทนำ	73
6.2	ตัวเหนี่ยวนำ	74
6.3	ข้อพิจารณาขั้นพื้นฐานในการออกแบบ	76
6.4	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนแบบทอรรอยด์โดยใช้วิธี ผลคูณพื้นที่	78
6.5	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนแบบทอรรอยด์โดยใช้วิธี สัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน	81
บทที่ 7	ตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าตัด	85
7.1	บทนำ	85

7.3 ค่าตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าต่างสำหรับแกนทวเดอร์ ทอรอยด์	88
บทที่ 8 ประสิทธิภาพ ค่าอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำ	91
8.1 บทนำ	91
8.2 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง	91
8.3 ค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ	92
8.4 ปฏิกิริยาการฉีก	93
บทที่ 9 ผลการทดลอง	95
9.1 การทดลองตัวเหนี่ยวนำ	95
9.2 การทดลองหม้อแปลง	95
บทที่ 10 บทสรุป และ บทวิจารณ์	99
10.1 บทสรุป	99
10.2 บทวิจารณ์	99
ภาคผนวก	101
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงสนามแม่เหล็ก	4
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะทิศทางของสนามแม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.3 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดพันรอบแกนอากาศ	6
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H ในแกนอากาศของรูปที่ 2.3	7
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H ในแกนอากาศเมื่อแหล่งจ่ายไฟเป็น ชนิดกระแสสลับ	8
รูปที่ 2.6 แสดงเส้นทางเดินเฉลี่ยของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก	9
รูปที่ 2.7 Magnetization Curve	10
รูปที่ 2.8 แกนเหล็กในสภาวะไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง	10
รูปที่ 2.9 แกนเหล็กในสภาวะมีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วน	11
รูปที่ 2.10 แกนเหล็กในสภาวะอิ่มตัว	11
รูปที่ 2.11 Hysteresis loop	12
รูปที่ 2.12 B-H loop ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน	12
รูปที่ 2.13 กระแสไหลวนที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก	13
รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบของวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.15 แสดงให้เห็น A_c และ MPL ของแกนเหล็ก	15
รูปที่ 2.16 แสดงช่องอากาศในแกนเหล็ก	16
รูปที่ 2.17 ค่า B_0 และ H_0 ที่ความถี่ใช้งานใน B-H loop	18
รูปที่ 2.18 แสดง dc B-H loop ต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ทำแกนโดยทั่วไป	20
รูปที่ 3.1 แสดงแกนแบบซี่	23
รูปที่ 3.2 แสดงแกนแบบแผ่น รูปอี-ไอ	23
รูปที่ 3.3 แสดงแกนแบบพอด	24
รูปที่ 3.4 แสดงแกนทอรอยด์แบบ Tape-wound	24
รูปที่ 3.5 แสดงแกนแบบพาวเคอร์	24
รูปที่ 3.6 แสดงปริมาตรของแกนแบบแผ่น อี-ไอ	26
รูปที่ 3.7 แสดงปริมาตรของแกนแบบซี่	27
รูปที่ 3.8 แสดงปริมาตรของแกนแบบซี่ ชนิดเดี่ยว	27

รูปที่ 3.9 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบพอด	28
รูปที่ 3.10 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบพาวเคอร์	28
รูปที่ 3.11 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบแผ่น	29
รูปที่ 3.12 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบซี่	29
รูปที่ 3.13 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบซี่ ชนิดเดียว	30
รูปที่ 3.14 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนทอรอยด์แบบทแยง	30
รูปที่ 3.15 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบพอด	31
รูปที่ 3.16 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบพาวเคอร์	32
รูปที่ 3.17 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบแผ่น	32
รูปที่ 3.18 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบซี่	33
รูปที่ 3.19 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบซี่ ชนิดเดียว	33
รูปที่ 3.20 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนทอรอยด์ชนิดทแยง	34
รูปที่ 3.21 แสดงพื้นที่ผิวสำหรับแกนแบบแผ่น อี-ไอ	35
รูปที่ 3.22 แสดงพื้นที่ผิวสำหรับแกนแบบซี่	36
รูปที่ 3.23 แสดงพื้นที่ผิวสำหรับแกนแบบซี่ ชนิดเดียว	36
รูปที่ 3.24 กราฟพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบพอด	37
รูปที่ 3.25 กราฟพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบพาวเคอร์	37
รูปที่ 3.26 กราฟพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบแผ่น อี-ไอ	38
รูปที่ 3.27 กราฟพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบซี่	38
รูปที่ 3.28 กราฟพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบซี่ ชนิดเดียว	39
รูปที่ 3.29 กราฟพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนทอรอยด์แบบทแยง	39
รูปที่ 3.30 กราฟความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่ของแกนแบบพอด	40
รูปที่ 3.31 กราฟความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่ของแกนแบบพาวเคอร์	41
รูปที่ 3.32 กราฟความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่ของแกนแบบแผ่น	41
รูปที่ 3.33 กราฟความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่ของแกนแบบซี่	42
รูปที่ 3.34 กราฟความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่ของแกนแบบซี่ ชนิดเดียว	42
รูปที่ 3.35 กราฟความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่ของแกนทอรอยด์ชนิดทแยง	43
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างแฟลคเตอร์แต่ละตัวที่ต้องพิจารณาในการ ออกแบบ	46

รูปที่ 4.2 แสดงวงจรฟูลเวฟบริดจ์	48
รูปที่ 4.3 แสดงวงจรที่มีฟูลเวฟเซนเตอร์แทปทางด้านทุติยภูมิ	49
รูปที่ 4.4 แสดงวงจรฟูล-ฟูล ฟูลเวฟเซนเตอร์แทป	49
รูปที่ 4.5 แสดงวงจรด้านขาออกเป็นแบบเซนเตอร์แทปและฟูลเวฟบริดจ์	50
รูปที่ 6.1 แสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับค่า I_{dc} , ΔI	77
รูปที่ 7.1 ค่าตัวคูณแก้ไขสำหรับที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ	87
รูปที่ 7.2 แสดงพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการพันขดลวดของแกนพาวเวอร์ทรอยด์	88
รูปที่ 7.3 การพันเทปที่ทำให้เกิดการทับกันที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากไป	89
รูปที่ 7.4 การพันเทปเพื่อแก้ไขการทับกันที่มากเกินไป	90
รูปที่ ผ1.1 แสดงให้เห็นแกนที่ทำจากสารแม่เหล็กในลักษณะต่าง ๆ กัน	103
รูปที่ ผ3.1 แสดงหม้อแปลง 2 ขด	109
รูปที่ ผ5.1 แสดงตัวเหนี่ยวนำในวงจร	114
รูปที่ ผ7.1 แสดงหน้าจอกับข้อมูลการออกแบบโดยวิธีผลคูณพื้นที่	119
รูปที่ ผ7.2 แสดงหน้าจอกับข้อมูลการออกแบบโดยวิธีการใช้ลักษณะทาง กายภาพของแกน	120
รูปที่ ผ7.3 แสดงหน้าจอกับข้อมูลเพิ่มเติมของหม้อแปลง	120
รูปที่ ผ7.4 แสดงหน้าจอกับข้อมูลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	121
รูปที่ ผ7.5 แสดงหน้าจอกับข้อมูลในการออกแบบโดยใช้แกนพาวเวอร์ทรอยด์	122
รูปที่ ผ7.6 แสดงรายละเอียดของแกน	122
รูปที่ ผ7.7 แสดงข้อมูลการพัน	122
รูปที่ ผ7.8 แสดงขนาดมิติ	123
รูปที่ ผ7.9 แสดงหน้าจอแสดงข้อผิดพลาด	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแกนที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	18
ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของแกนแบบต่าง ๆ	25
ตารางที่ 6.1 ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ของแกนแบบพาวเคอร์	76
ตารางที่ ผ1.1 คุณสมบัติของสารพาวเคอร์ไอรอน ของบริษัท Micro-metal Corp.	105
ตารางที่ ผ6.1 ตารางขดลวด	118



บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน วิศวกรที่ทำหน้าที่ในด้านการออกแบบวงจร ได้พยายามหาหนทางใหม่ ๆ ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรที่ออกแบบ ในขณะที่เดียวกันก็จะพยายามลดขนาดของวงจรมันลงให้เล็กที่สุด ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบของวงจรที่ใช้แปลงพลังงานและส่งถ่ายพลังงาน (power-conversion circuit) ในอุปกรณ์ติดต่อสื่อสารแบบเคลื่อนที่ , อุปกรณ์เกี่ยวกับระบบบันทึกภาพและเสียง รวมไปถึงคอมพิวเตอร์พกพาแบบกระเป๋าหิ้ว (notebook computer) ซึ่งการออกแบบวงจรส่งถ่ายพลังงานนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้แหล่งจ่ายพลังงานแบบความถี่สูง คือ แหล่งจ่ายพลังงานที่เป็นแบบ high-frequency switched-voltage power supply เหตุผลที่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟในลักษณะนี้ก็คือ ที่ความถี่ที่สูงกว่า ส่วนประกอบในวงจรที่เป็นสารแม่เหล็ก จะสามารถรองรับพลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่มากกว่า ดังนั้นผลที่เราจะได้รับก็คือ หม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำก็สามารถที่จะมีขนาดที่เล็กลงได้ ทำให้อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ รอบข้างเราสามารถมีขนาดที่เล็กลงได้อย่างมาก

แต่อย่างไรก็ตามสารแม่เหล็กที่ใช้ทำเป็นแกนเหล็กของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำนั้น ที่ความถี่สูง ก็จะมีการสูญเสียในลักษณะ hysteresis และกระแสไหลวน (eddy current) มากยิ่งขึ้น และนอกจากนี้ที่ความถี่สูง ๆ ก็ยังมีผลของ skin effect ในขดลวดอีกด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงานเช่นกัน

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเลือกวัสดุที่จะนำมาทำเป็นแกนเหล็ก และวิธีการในการคำนวณออกแบบ เพื่อที่จะให้หม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำที่เราทำการออกแบบนั้น สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ที่ความถี่ที่ใช้งาน

และในปริภูมิทัศน์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาทางด้านทฤษฎีพื้นฐานของวงจรแม่เหล็ก เพื่อเป็นความรู้เบื้องต้นสำหรับคนที่ยังไม่มีความรู้ทางด้านนี้ และต่อไปก็จะเป็นการกล่าวถึงการเลือกแกนหม้อแปลงและแกนของตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ว่าเราสามารถที่จะเลือกแกนที่ทำจากวัสดุอะไรได้บ้าง ซึ่งจะมีประสิทธิภาพเมื่อเรานำมันมาใช้ในงานในย่านความถี่สูง ต่อจากนั้น ก็จะเป็นการกล่าวถึงวิธีการในการออกแบบ ซึ่งจะเป็นการออกแบบตั้งแต่ การเลือกชนิดแกน และการเลือกขนาดของขดลวดที่จะใช้โดยคำนึงถึงผลของ skin effect ด้วย ตลอดจนถึงจำนวนรอบของการพันขดลวดนั้น เพื่อที่จะให้ได้หม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงที่มีประสิทธิภาพที่สุด

ตามที่เรากำลังต้องการ โดยวิธีการในการออกแบบนั้น เราจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการใหญ่ ๆ คือ วิธีผลคูณพื้นที่ (Area product Approach -Ap Approach-) และวิธีเรขาคณิตของแกน (Core geometry Approach -Kg Approach-) ซึ่งค่า Ap นั้นจะเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะทางกายภาพของแกนเหล็กกับความสามารถที่แกนเหล็กนั้นสามารถรองรับพลังงานที่ผ่านตัวมันได้ หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ ค่า Ap นั้นเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของแกนเหล็กและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมันนั่นเอง ส่วนค่า Kg นั้นก็จะมีลักษณะเดียวกันกับค่า Ap คือแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของแกนหรือขนาดของแกนเหล็ก กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแกนนั้น แต่วิธีการของผลคูณพื้นที่นั้นจะเป็นวิธีการออกแบบที่มีการคำนึงถึงค่าของอุณหภูมิเพิ่ม (Temperature Rise $-\Delta T-$) ของหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำขณะใช้งาน ส่วนวิธีเรขาคณิตของแกน จะเป็นวิธีการที่มีการคำนึงถึงขนาดของการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulation $-\alpha-$) ในขณะที่นำหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้นไปใช้งานที่พิกัด ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้ จะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่จะไม่เหมือนกันทีเดียว ซึ่งการเลือกใช้วิธีการใดในการออกแบบนั้น ขึ้นอยู่กับว่าผู้ใช้นั้นถึงปัจจัยใดที่ผู้ใช้งานต้องการควบคุมให้มีค่า ณ จุดหนึ่ง ระหว่างอุณหภูมิเพิ่มและการกระเพื่อมของแรงดัน เมื่อผู้ใช้นำหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงที่ทำการออกแบบนั้นไปใช้งานที่พิกัด

นอกจากนี้ ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนต่าง ๆ ตามลำดับขั้นในการออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยวิธีการผลคูณพื้นที่ และ วิธีเรขาคณิตของแกน และในโครงการนี้ก็จะมีระเบียบวิธีการคำนวณมาเขียนเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งดำเนินงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ เพื่อสะดวกต่อผู้ใช้ ในการออกแบบโดยไม่ต้องมาทำการคำนวณโดยมือ และในตอนท้ายของปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดลองสร้างตัวขึ้นงานจริงของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาทำการคำนวณหาชนิดของแกนเหล็ก ขนาดของลวดที่ใช้ และจำนวนรอบของขดลวด เพื่อที่จะทำให้เราทราบว่า การคำนวณโดยวิธีการนี้มีข้อผิดพลาดประการใด และการนำผลการคำนวณนั้นมาใช้สร้างชิ้นงานจริงได้มีประสิทธิภาพดีเพียงไร และในตอนท้ายสุดก็จะเป็นส่วนของบทสรุปและวิจารณ์ตัวโครงการที่ได้ทำมานี้

1.2 วัตถุประสงค์ของปฏิญญาพันธบัตร

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาถึงวิธีการออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงที่สามารถนำมาใช้งานได้

2. เพื่อให้การออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงเป็นไปได้ง่ายขึ้นโดยการรวบรวมวิธีการคำนวณให้อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรสวิตซ์ต่าง ๆ เป็นไปได้ง่ายขึ้นยิ่งขึ้น เนื่องจากวงจรเหล่านั้นเกือบทั้งหมด ต้องใช้หม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงเป็นหลัก



บทที่ 2

พื้นฐานของวงจรแม่เหล็กและการเลือกวัสดุ สำหรับใช้เป็นแกนหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

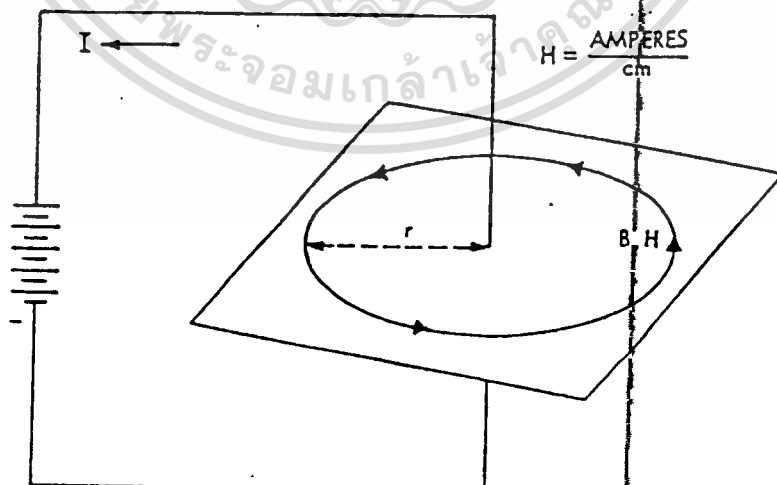
2.1 บทนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำต่าง ๆ นั้น ถ้าเรามีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสิ่งต่าง ๆ หรือทฤษฎีต่าง ๆ เกี่ยวกับวงจรแม่เหล็กแล้ว จะทำให้เราสามารถออกแบบหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำต่าง ๆ เหล่านั้น โดยคำนึงถึงผลดีผลเสียจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ขนาด หรือความคุ้มค่าของวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาสร้างเป็นหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำ รวมถึงเราจะรู้ว่าทำไมที่ความถี่ช่วงต่าง ๆ จึงเหมาะสำหรับวัสดุที่ใช้ทำเป็นแกนชนิดใดชนิดหนึ่ง

2.2 พื้นฐานด้านวงจรแม่เหล็ก

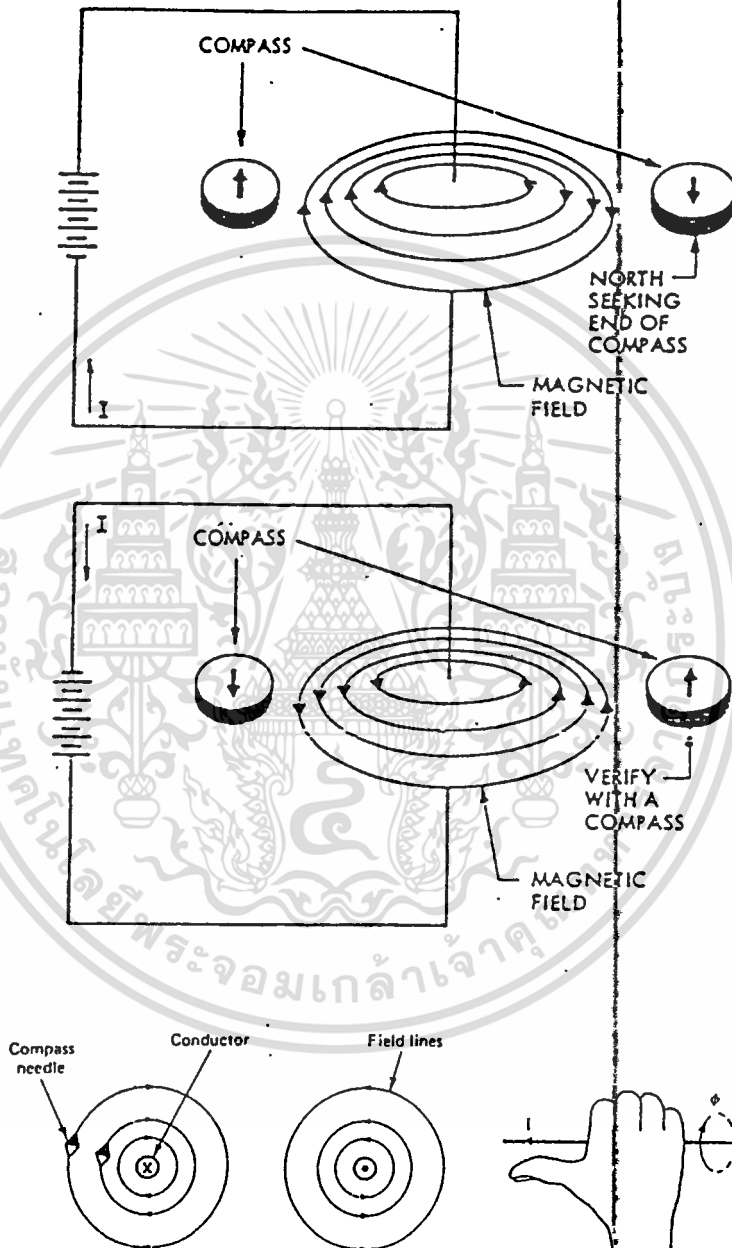
ในการคำนวณทางด้านวงจรแม่เหล็กเพื่อให้ง่ายและสะดวก เราจะใช้หน่วยต่าง ๆ ในระบบ cgs (centimeter-gram-second) ซึ่งจะสะดวกกว่าหน่วยในระบบ mks (meter-kilogram-second)

เมื่อมีกระแสไฟตรง (I_0) ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำหรือสายไฟ กระแสนี้จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ตัวนำดังกล่าวซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงสนามแม่เหล็ก

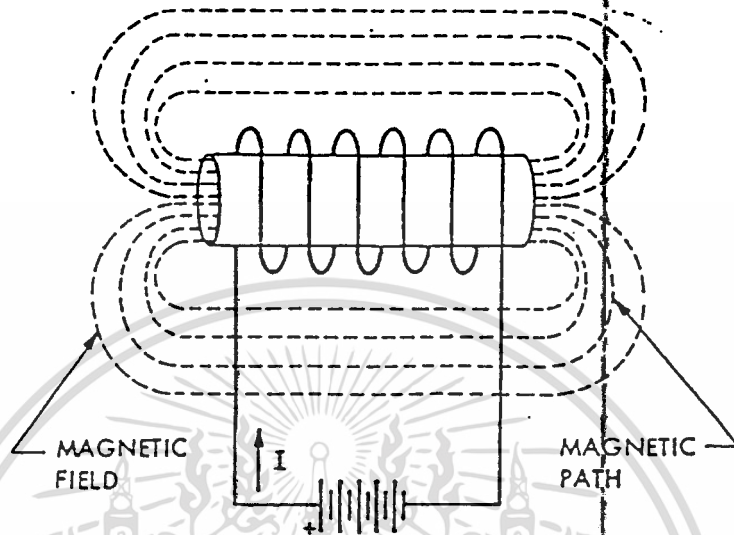
สนามแม่เหล็กดังกล่าวนี้มีทิศทางตามลักษณะทิศทางกรไหลของกระแสไฟฟ้าด้วย ซึ่งจะเป็นไปตามกฎมือขวา ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะทิศทางของสนามแม่เหล็ก

ถ้าตัวนำนี้ถูกพันอยู่รอบแกน ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กรวมตัวกันอย่างหนาแน่นขึ้น ซึ่งเราก็จะเปรียบได้ว่าขดลวดที่พันรอบแกนนั้นทำหน้าที่เหมือนกับแท่งแม่เหล็กซึ่งจะมีขั้วเหนือขั้วใต้ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เหมือนยูทูบที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย ซึ่งขั้วเหนือขั้วใต้สามารถกลับทิศกันได้เมื่อเราป้อนกระแสที่ไหลผ่านนั้นกลับขั้วกัน เราสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดพันรอบแกนอากาศ

ในสนามแม่เหล็กจะมีเส้นทางแม่เหล็ก ซึ่งเราเรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux) ซึ่งแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ Φ ซึ่งมีหน่วยตามปกติเป็น เวบเวอร์ (Weber -Wb-) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดรอบ ๆ แท่งตัวนำนั้นจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กนั้น ถูกเรียกว่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux density) ซึ่งแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ B ซึ่งมีหน่วยเป็น เทสลา (Tesla -T-) ถ้าพื้นที่นั้นมีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

$$\text{Tesla} = \frac{\text{Weber}}{m^2}$$

ส่วนความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) แทนได้ด้วยสัญลักษณ์ H ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของกระแสไฟฟ้าตามสมการของแมกซ์เวล (Maxwell's equation) ดังนี้

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

r คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่

l คือ เส้นทางการเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก

a คือ พื้นที่ที่เส้นทางการเดินของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นปิดล้อมอยู่

หรือเราจะได้สมการคือ

$$Hl = NI$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวด

กรณีแท่งตัวนำเดี่ยว ($N = 1$) และ r เป็นระยะทางจากจุดที่เราต้องการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กถึงจุดกึ่งกลางแท่งตัวนำนั้น ดังรูปที่ 2.1 เราจะได้

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [\text{Ampere-turn (At)/m}]$$

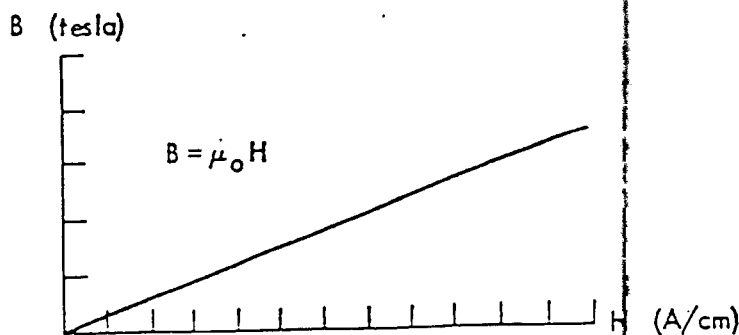
เมื่อ r มีหน่วยเป็น เมตร [m]

หรือเราจะได้ $H = \frac{2I}{10r} \quad [\text{Oersted}]$

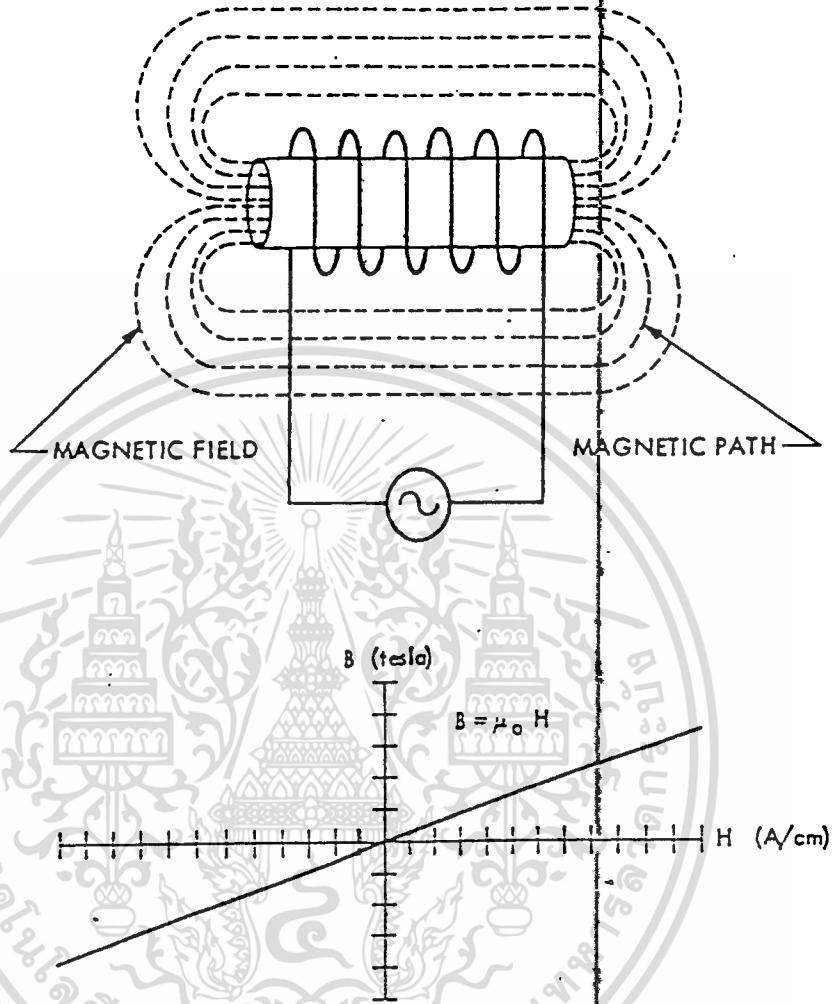
เมื่อ r มีหน่วยเป็น เซนติเมตร [cm]

และเราจะได้ว่า $1 \text{ At/m} = 0.0126 \text{ Oersted}$

ดังนั้น ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กในรูปที่ 2.3 นั้น จะมีความสัมพันธ์กับผลคูณของจำนวนรอบขดลวด กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดนั้น และค่า NI นี้เราเรียกว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force -mmf-) อัตราส่วนระหว่าง B ต่อ H เราเรียกว่า ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็ก (permeability - μ -) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถที่จะนำเส้นแรงแม่เหล็กของวัสดุซึ่งเป็นตัวกลาง และในรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดในแกนอากาศของรูปที่ 2.3



ถ้าแหล่งจ่ายไฟเป็นกระแสสลับ เราจะได้ความสัมพันธ์ของ B และ H เป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H ในแกนอากาศเมื่อแหล่งจ่ายไฟเป็นชนิดกระแสสลับ

ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กนั้น เราสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการได้ดังนี้

$$\mu = \frac{B}{H}$$

ซึ่งค่า μ ของสุญญากาศหรือวัสดุที่มีความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กเหมือนกับสุญญากาศ เช่น อากาศ , ไม้ , กระดาษ , พลาสติก , ทองแดง เป็นต้น เราจะแทนด้วยค่า μ_0 และเรียกว่า absolute permeability และมีค่าดังนี้

ในระบบ cgs : $\mu_0 = 1$ [Gauss/Oersted]

หรือ $\mu_0 = 10^{-4}$ [Tesla/Oersted]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบ mks : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-4}$ [H/m]

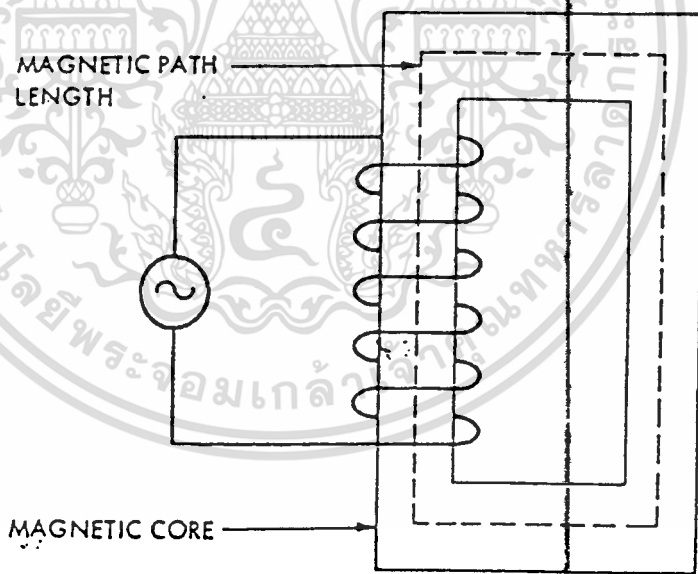
วัสดุบางอย่างนั้นเป็นสารซึ่งมีความนำแม่เหล็กต่ำ ซึ่งสารเหล่านั้นจะมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กต่ำเช่นเดียวกัน วัสดุเหล่านั้นได้แก่ สูญญากาศ , อากาศ , ไม้ , กระจก ทองแดง เป็นต้น แต่ก็มีสารบางชนิด เช่น เหล็ก , นิกเกิล , โคบอลต์ และโลหะผสมที่มีสารใน 3 ชนิดนี้ผสมอยู่ โลหะเหล่านี้จะมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงมาก และโลหะเหล่านี้จะถูกนำมาสร้างเป็นแกนเหล็กที่จะนำไปใช้ในการสร้างหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำนั่นเอง

ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของวัสดุใด ๆ แสดงให้เห็นได้โดยสมการ

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

เมื่อ μ_r คือ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) ซึ่งเป็นค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของวัสดุเมื่อเทียบกับค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กในสูญญากาศ

ในรูปที่ 2.6 จะแสดงให้เห็นถึงเส้นทางเดินเฉลี่ยของเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic path length -MPL-) ในแกนเหล็ก

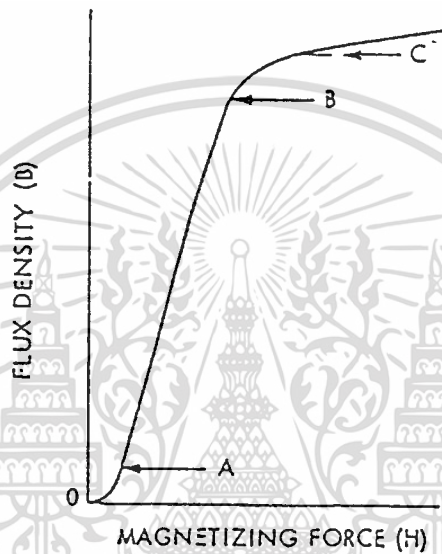


รูปที่ 2.6 แสดงเส้นทางเดินเฉลี่ยของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก

ในรูปที่ 2.7 จะแสดงให้เห็นถึง magnetizing curve ของแกนเหล็กเมื่อเราทำการกระตุ้นด้วยแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (H) เข้ากับแกนเหล็กที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ (demagnetized core) ให้เริ่มมีเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งเราสังเกตจากค่า B ที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ นั่นเอง เราจะ

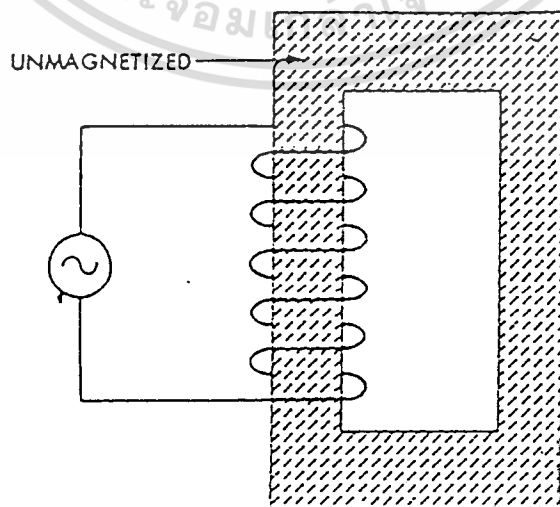
สังเกตได้ว่า ที่จุด A ของเส้นโค้งนั้นแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นด้วยอัตราที่ต่ำ แต่ตรงช่วงระหว่างจุด A ถึงจุด B ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่เพิ่มสูงมากขึ้น จนถึงจุด B ซึ่งเราเรียกว่า knee point ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจากจุด B นี้เป็นต้นไปจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลงมากจนกระทั่งถึงจุด C แกนเหล็กนั้นก็เริ่มเข้าสู่สถานะอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก (saturated) ซึ่งที่ตั้งแต่จุด C นี้เป็นต้นไป ถ้าเราเพิ่มแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (H) เข้าไปอีกจะทำให้ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย



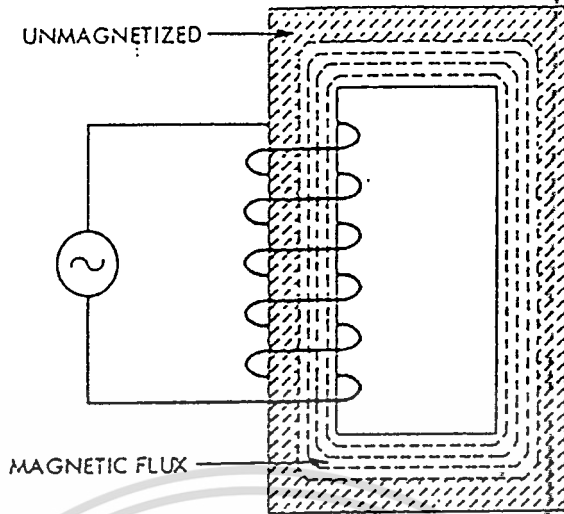
รูปที่ 2.7 Magnetization curve

ส่วนในรูปที่ 2.8-2.10 จะแสดงให้เห็นแกนเหล็กในสถานะต่างๆ ตั้งแต่สถานะที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างจนถึงสถานะที่แกนเหล็กอิ่มตัว

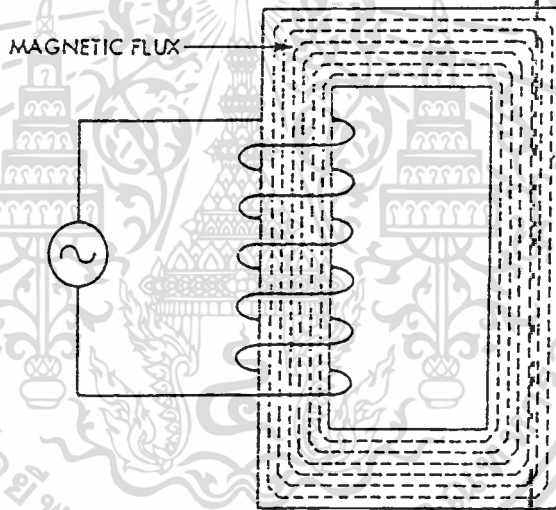


รูปที่ 2.8 แกนเหล็กในสถานะไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แกนเหล็กในสถานะมีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วน

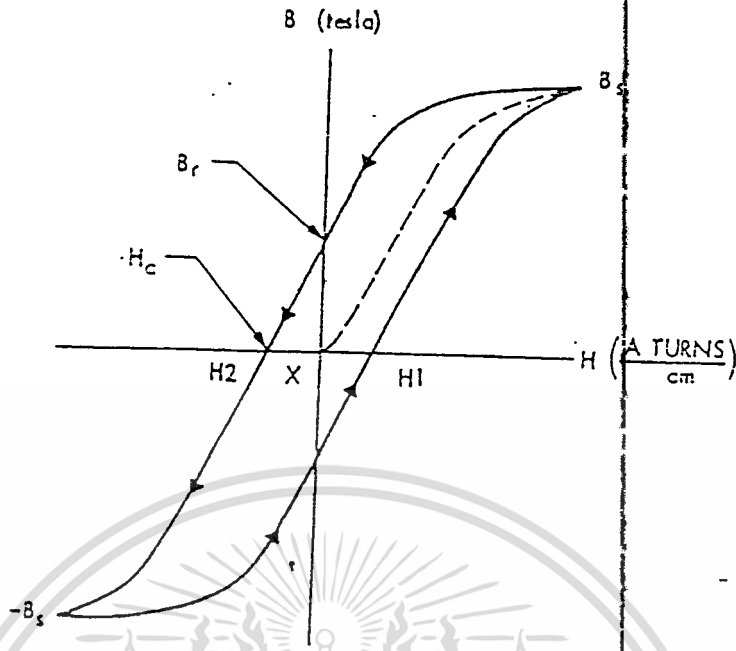


รูปที่ 2.10 แกนเหล็กในสภาวะอิ่มตัว

เมื่อแกนเหล็กถูกกระตุ้นจนครบรอบของการ magnetization และ demagnetization เราจะได้เส้นโค้งปิดของ hysteresis loop หรือ B-H loop ดังแสดงในรูปที่ 2.11

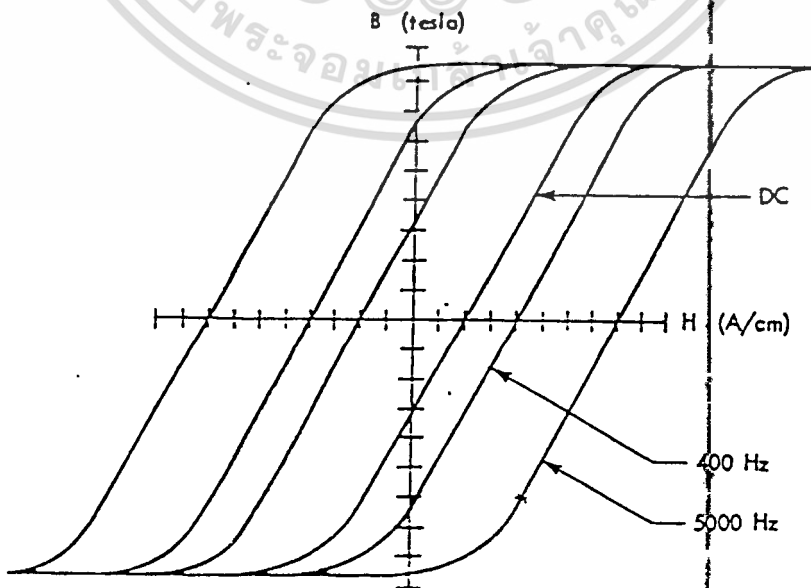
ซึ่ง hysteresis loop นี้จะแสดงถึงพลังงานที่สูญเสียในแกนเหล็กนั้น ในรูปที่ 2.11 นั้น B_r คือ เส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก (remnant flux) ซึ่งเป็นจุดที่แรงเคลื่อนแม่เหล็ก ลดลงจนมีค่าเป็น 0 และ B_c ในรูปก็จะเป็นค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก ซึ่งเราจะเห็นว่า ที่จุดนี้ เมื่อเราเพิ่มค่าแรงกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยมาก หรือเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในปริมาณที่น้อยมากเนื่องจากแกนนั้นถึงจุดอิ่มตัวนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



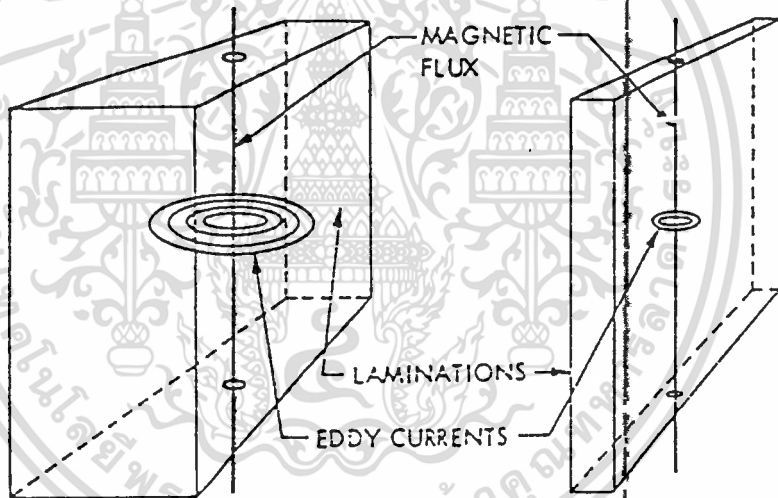
รูปที่ 2.11 Hysteresis loop

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ที่ใช้ในการลดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจากจุด B_r ให้ลงมาเป็น 0 นั้น ถูกเรียกว่า coercive force (H_c) พื้นที่ภายใน hysteresis loop นั้นจะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่สูญเสียในแกนเหล็กนี้ในระหว่างครบรอบของการ magnetization และ demagnetization และในระบบไฟ ac นั้น กระบวนการ magnetization และ demagnetization นี้จะเกิดขึ้นซ้ำกันไปมาอย่างต่อเนื่องกัน และพลังงานที่สูญเสียจาก hysteresis loss นี้ยังขึ้นกับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟอีกด้วย ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.12 B-H loop ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม พลังงานที่สูญเสียในแกนเหล็กจาก hysteresis loss นี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของพลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก อันเนื่องจากแกนเหล็กนี้ถูกกระตุ้นด้วยสนามของกระแสสลับ เส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเหนี่ยวนำให้ถ่านที่ทำแกนเหล็กนี้ สร้างกระแสไฟฟ้าไหลวนขึ้น ซึ่งขนาดของกระแสไหลวนเหล่านี้จะขึ้นกับความถี่และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และยังขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะ (specific resistivity) และความหนาของแกนเหล็กอีกด้วย และในรูปที่ 2.12 นั้นก็จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานสูญเสียที่เกิดจาก hysteresis loss และพลังงานสูญเสียอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนรวมกันด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่สูงขึ้น พลังงานสูญเสียก็จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน และในรูปที่ 2.13 ก็แสดงให้เห็นว่า เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กนั้น จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้าขึ้น และศักดาไฟฟ้านี้ก็เป็นสาเหตุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลรอบ ๆ เส้นแรงแม่เหล็กนั้น ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นจะสามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวา



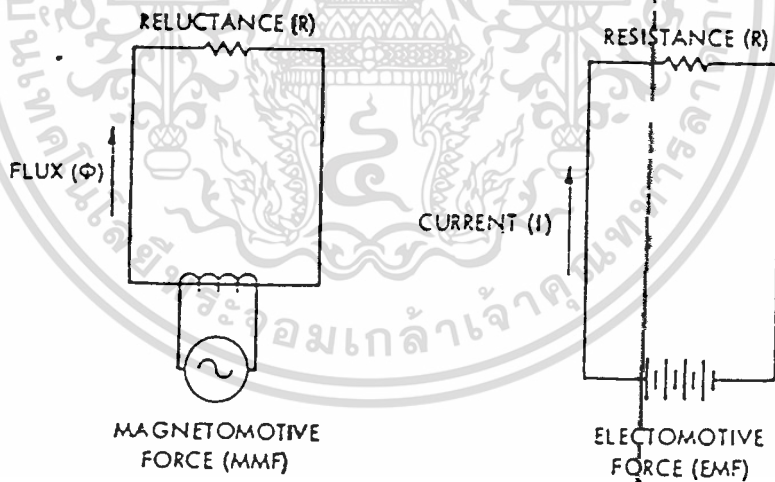
รูปที่ 2.13 กระแสไหลวนที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็ก

ขนาดของกระแสไหลวนเหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันของศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก และค่าความต้านทานของแกนเหล็ก ซึ่งเราสามารถลดขนาดของกระแสไหลวนเหล่านี้ได้โดยใช้แกนเหล็กซึ่งทำเป็นแผ่น ๆ มาประกบกันคั่นด้วยฉนวนไฟฟ้า ซึ่งถ้าเราใช้แผ่นที่มีความหนาเป็นครึ่งหนึ่งของความหนาของแกนเหล็กทั้งหมด มาประกบกัน 2 แผ่น จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กและค่าสูงสุดของศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กแต่ละแผ่นนั้นที่เป็นสาเหตุของกระแสไหลวนนั้น ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของขนาดของกระแสไหลวนเดิมที่เกิดขึ้น และค่าความต้านทานของแกนเหล็กแต่ละแผ่นนั้นก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากแกนเหล็กเดิมที่ไม่ได้ทำจากแผ่น

เหล็กมาประกบกัน แต่ผลของมันจะน้อยกว่าผลของศักดาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งทำให้พลังงานที่สูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนนั้นมีค่าลดลงได้อย่างมาก

พลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (core loss) นั้นเป็นผลรวมของพลังงานสูญเสียที่เกิดจาก hysteresis loss และพลังงานสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อกิโลกรัมของแกนเหล็กนั้นที่จุดทำงานที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและที่ความถี่ที่จุดทำงานนั้น

เส้นแรงแม่เหล็กซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในแกนเหล็กโดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กนั้น มีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก (reluctance - \mathcal{L} -) ของแกนเหล็กนั้น ซึ่งค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กใด ๆ เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่ใช้ทำแกนเหล็กนั้น และลักษณะทางกายภาพของแกนเหล็กนั้น และเราจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กนี้มีความคล้ายคลึงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance - R -) ซึ่งเราจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) , เส้นแรงแม่เหล็ก (\mathcal{O}) และค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก (\mathcal{L}) เปรียบเทียบกับ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force-emf) , กระแสไฟฟ้า (I) และค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบของวงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า

$$\text{mmf} = NI = \mathcal{O}\mathcal{L}$$

$$\text{emf} = IR$$

แกนเหล็กซึ่งมีความสามารถในการนำเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ ก็แสดงว่ามีค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กสูงนั่นเอง และถ้าค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ต้องใช้เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กก็ต้องมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กนั้น เช่นเดียวกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$R_m = \frac{MPL}{\mu_r \mu_0 A_c}$$

เมื่อ R_m คือ ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก

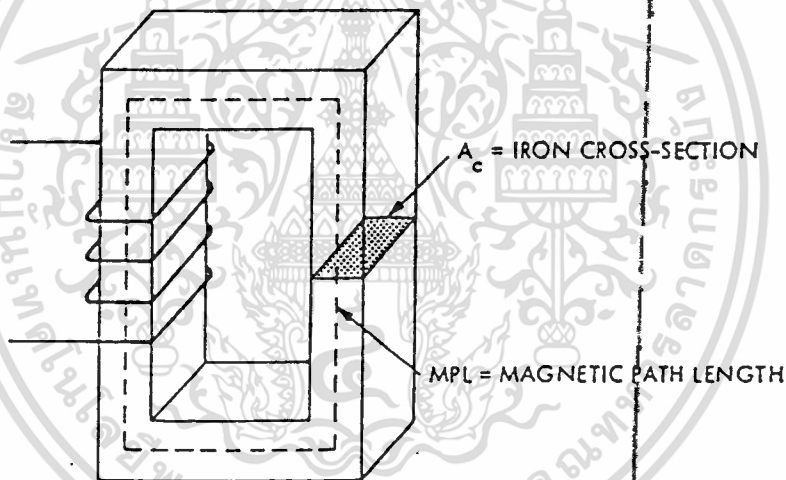
MPL คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก [cm]

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (cross-sectional area of core) [cm²]

μ_r คือ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ

เราจะแสดง A_c และ MPL ให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.15



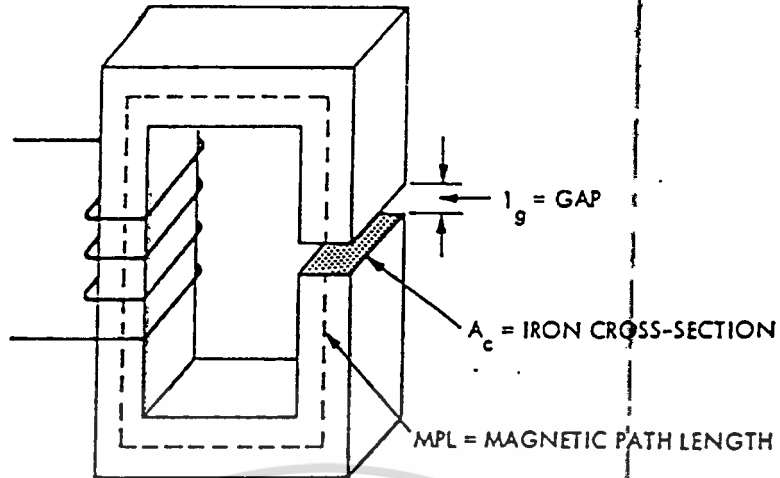
รูปที่ 2.15 แสดงให้เห็น A_c และ MPL ของแกนเหล็ก

ถ้ามีการเพิ่มช่องว่างอากาศ (air gap) ลงไปในแกนเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กรวมของวงจรแม่เหล็กนี้จะมีค่าเกือบเท่ากับค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กของช่องอากาศนั้น เพราะค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กของอากาศนั้นมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็กอย่างมาก ดังนั้นการควบคุมขนาดของช่องอากาศก็สามารถควบคุมค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กรวมของวงจรแม่เหล็กนั้นได้

เราสามารถแสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กของช่องอากาศ (R_g) ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_c}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงช่องอากาศในแกนเหล็ก

ค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กรวมของวงจรแม่เหล็ก (\mathcal{R}) สามารถแสดงได้ดังสมการ

ดังนี้

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_g + \mathcal{R}_m$$

$$\mathcal{R} = \frac{l_g}{\mu_0 A_c} + \frac{MPL}{\mu_r \mu_0 A_c}$$

$$\mathcal{R} = \frac{l_t}{\mu_e A_c}$$

และ

เมื่อ $l_t = l_g + MPL$

μ_e คือ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กประสิทธิผล (effective permeability)

ดังนั้น

$$\frac{l_t}{\mu_e} = \frac{l_g}{\mu_0} + \frac{MPL}{\mu_r \mu_0}$$

$$\mu_e = \frac{l_t}{(l_g/\mu_0) + (MPL/\mu_r \mu_0)}$$

$$\mu_e = \frac{l_t}{(l_g/\mu_0) + (MPL/\mu_r \mu_0)} \times \frac{1/(MPL/\mu_r \mu_0)}{1/(MPL/\mu_r \mu_0)}$$

$$\mu_e = \frac{\mu_r \mu_0 \left(\frac{l_g + MPL}{MPL} \right)}{1 + \mu_r (l_g/MPL)}$$

ถ้า $l_g \ll MPL$ เราจะได้

$$\mu_e = \frac{\mu_r \mu_0}{1 + \mu_r (l_g/MPL)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะเห็นได้ว่าถ้าช่องว่างอากาศ (l_g) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กประสิทธิภาพ (μ_r) จะมีค่าลดลง หรือค่าความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็กรวมของวงจรแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้น ที่แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ที่กำหนด ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) สามารถถูกควบคุมได้โดยการปรับระยะห่างของช่องว่างอากาศนั้น

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) นั้น เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{mmf} = 0.47\text{CNI} \quad [\text{gilbert}]$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวด

I คือ ขนาดของกระแส [A]

ค่า mmf นั้น เป็นค่าของแรง ส่วนค่า H นั้นเป็นสนามแรง หรือแรงต่อหน่วยความยาว

$$H = \frac{\text{mmf}}{MPL} \quad [\text{gilbert/cm} = \text{Oersted}]$$

$$H = \frac{0.4 \pi NI}{MPL} \quad [\text{Oersted}]$$

เมื่อ MPL คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก [cm]

จากนิยามของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เราจะได้สมการ

$$B = \frac{\Phi}{A_c}$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กนี้เกิดจากสนามแม่เหล็กกระตุ้น (H) ซึ่งขึ้นกับค่าความนำเส้นแรงแม่เหล็ก (μ) ของแกนเหล็ก และความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังแสดงได้ในสมการ

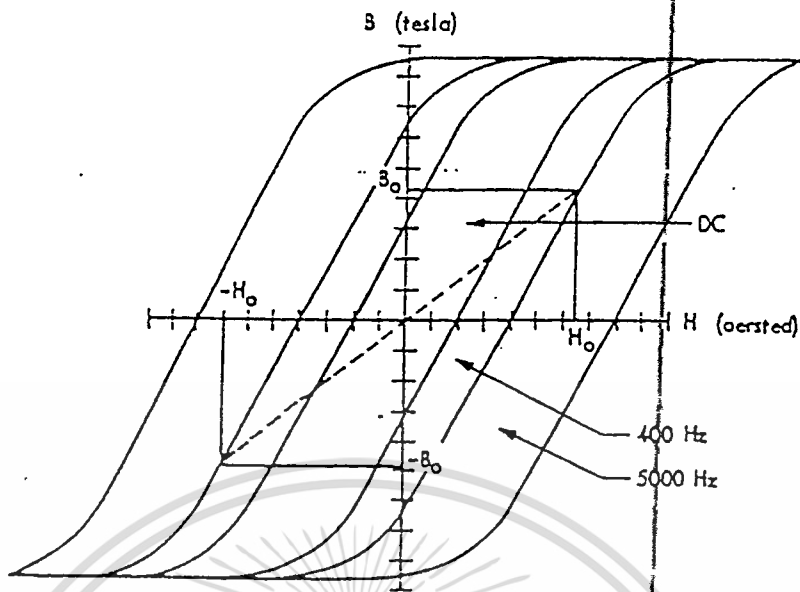
$$B = \mu H \quad [\text{Gauss}]$$

ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าสูงสุดของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (peak magnetizing current $-I_m-$) จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_m = \frac{H_0 MPL}{0.4 \pi N}$$

เมื่อ H_0 คือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดที่จุดทำงานนั้น [Oersted]

ซึ่งการหาค่าของ H_0 นี้ เราต้องใช้เส้นโค้งของพลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss curve) ของผู้ผลิตแกนที่ความถี่และที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดทำงาน (B_0) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ค่า B_0 และ H_0 ที่ความถี่ใช้งานใน B-H loop

2.3 การเลือกวัสดุสำหรับใช้ทำเป็นแกนหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง

ในการออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้น ผู้ออกแบบควรที่จะคำนึงถึงความนำเชือคือ ประสิทธิภาพ ราคา และน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ออกแบบนั้น ซึ่งต้องไม่มีน้ำหนักมากจนท้อทะจนเกินไป

dc B-H loops ต่าง ๆ สำหรับแกนที่ใช้กันโดยทั่วไป แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.18 และคุณสมบัติต่าง ๆ ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะคล้ายคลึงกับข้อมูลที่ได้จากแกนที่มีขายอยู่ทั่วไป ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในทางด้านใดด้านหนึ่ง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแกนที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ

Trade Names	Composition	Saturated Flux Density (Tesla)	DC Coercive Force (A/cm)	Squareness Ratio	Material Density (g/cm ²)	Curie Temp (°C)	Weight Factor
Supermendur	49% Co	1.9-2.2	0.18-0.44	0.9-1.0	8.15	930	1.066
Permendur	49% Fe 2% V						
Magnesil	3% Si	1.5-1.8	0.5-0.75	0.75-0.85	7.63	750	1.00
Silectron	97% Fe						
Microsil							
Supersil							



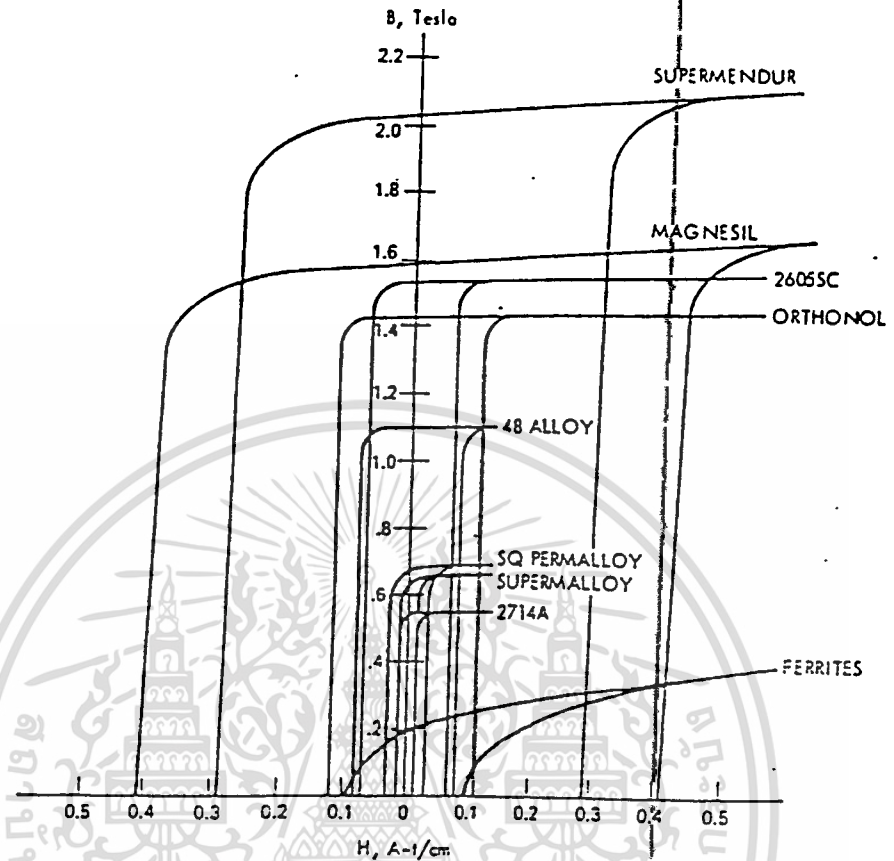
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแกนที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ (ต่อ)

Trade Names	Composition	Saturated Flux Density (Tesla)	DC Coercive Force (At/cm)	Squareness Ratio	Material Density (g/cm ²)	Curie Temp (°C)	Weight Factor
Deltamax Orthonol 49 sq. Mu	50% Ni 50% Fe	1.4-1.6	0.125-0.25	0.94-1.0	8.24	500	1.079
Allegheny 4750 48 Alloy Carpenter 49	48% Ni 52% Fe	1.15-1.4	0.062-0.187	0.8-0.92	8.19	480	1.073
4-79Permalloy Sp.Permalloy 80 sq. Mu 79	79% Ni 17% Fe	0.66-0.82	0.025-0.82	0.8-1.0	8.73	460	1.144
Supermalloy	78% Ni 17% Fe 5% Mo	0.65-0.82	0.00037-0.01	0.4-0.7	8.76	400	1.148
Metglas : 2605SC	81% Fe 3.5% Si 13.5% B 2% C	1.5-1.6	0.03-0.08	0.9-0.98	7.32	370	0.96
2714A	66% Co 4% Fe 15% Si 14% B 1% Ni	0.5-0.65	0.008-0.015	0.9-0.98	7.59	205	0.995
Ferrites F N27 3C8F	Mn Zn	0.45-0.5	0.25	0.3-0.5	4.8	250	0.629

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038188



รูปที่ 2.18 แสดง dc B-H loop ต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ทำแกนโดยทั่วไป

วัสดุที่ใช้ทำแกน ที่ยอมให้มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมาก จะให้ผลคือ ขนาดของแกนเหล็กจะเล็ก ซึ่งจะเป็นวัสดุที่เราต้องพิจารณาถ้าเราคำนึงถึงขนาดของอุปกรณ์ที่จะออกแบบเป็นเกณฑ์สำคัญ และถ้าเป็นวัสดุที่ยอมให้มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าต่ำ เช่น วัสดุชนิด Supermalloy ซึ่งแม้ว่าจะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้วัสดุนี้ต้องมีขนาดใหญ่ แต่ว่าวัสดุนี้จะมีค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนมีค่าต่ำ

การออกแบบโดยส่วนใหญ่แล้ว เรามุ่งที่จะให้อุปกรณ์ที่ออกแบบนั้นมีขนาดที่เล็กที่สุดในขณะเดียวกัน อุปกรณ์ที่ออกแบบนั้นจะต้องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุดภายใต้สภาวะแวดล้อมใด ๆ แต่เป็นที่น่าเสียดายที่วัสดุที่จะใช้ทำเป็นแกนที่ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กที่สุดนั้น ก็จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดเช่นกัน ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบก็จะต้องทำการออกแบบโดยคำนึงถึงขนาดและประสิทธิภาพที่จะได้รับพร้อม ๆ กัน ซึ่งความเหมาะสมที่สุดจะมีปัจจัยต่าง ๆ มาประกอบในการพิจารณา แต่โดยทั่วไป วิศวกรผู้ออกแบบจะค่อนข้างให้ความสำคัญของขนาดของอุปกรณ์ที่ออกแบบมากกว่าประสิทธิภาพที่จะได้รับ ซึ่งจะพิจารณาให้พลังงานสูญเสียที่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นในแกนอยู่ในขนาดจำกัดที่ยอมรับได้ และที่ความถี่ที่สูง วัสดุประเภทเฟอร์ไรท์ (ferrites) จะถูกนำมาใช้ทำเป็นแกนของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ซึ่งจะทำให้ขนาดของอุปกรณ์ประสิทธิภาพ และราคา อยู่ในระดับที่เหมาะสม

สารจำพวกเฟอร์ไรท์นั้น ทำมาจากออกไซด์ประเภทเซรามิกที่เป็นสารแม่เหล็ก (magnetic ceramic oxide) ซึ่งประกอบไปด้วยผลึกจำนวนมากของสารประกอบเหล็กหรือออกไซด์ ($\text{Fe III oxide-Fe}_2\text{O}_3$) และออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ เช่น FeO , NiO , ZnO , MnO , CuO , BaO , CaO อย่างใดอย่างหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งทำให้สารจำพวกเฟอร์ไรท์นั้น มีค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) สูงมาก คือ อยู่ในช่วง 10^0 - $10^5 \Omega\cdot\text{m}$ ซึ่งถ้าเป็นโลหะทั่ว ๆ ไป จะมีค่าความต้านทานจำเพาะอยู่ในช่วง 10^{-7} - $10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$ ดังนั้นแกนที่ทำจากสารเฟอร์ไรท์ก็จะมีพลังงานที่สูญเสียในแกนเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนนั้นมีค่าน้อยมาก จนอาจจะถือว่าไม่มีเลยเมื่อเปรียบเทียบกับแกนที่ทำจากสารจำพวกเหล็กหรือโลหะอื่น ๆ

บทที่ 3

คุณลักษณะต่าง ๆ ของการออกแบบหม้อแปลง

3.1 บทนำ

ในการที่จะได้ทำการออกแบบหม้อแปลงนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ เพื่อที่จะได้หม้อแปลงที่เหมาะสมตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในเบื้องต้น ดังนั้น ในการออกแบบหม้อแปลงนั้น ในบทนี้จะได้แสดงถึงคุณลักษณะต่าง ๆ กับการออกแบบ

3.2 ความสามารถในการรองรับพลังงาน (Power Handling Ability)

ในการผลิตแกน ได้มีการกำหนดถึงค่าที่ใช้ในการเลือกแกน กล่าวคือได้ทำการกำหนดถึงค่าการรองรับพลังงานที่แกนสามารถที่จะรับได้ โดยค่าตัวเลขนี้ได้แสดงในรูปของค่า ผลคูณพื้นที่ หรือที่ได้ใช้ตัวย่อว่า A_p ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการคูณของพื้นที่หน้าต่าง (Window Area) หรือ W_a และ ค่าพื้นที่หน้าตัดขวางของแกน (Core Cross Section Area) หรือ A_c ซึ่งค่า ผลคูณพื้นที่นั้น ได้ใช้ในการกำหนด หรือ เรียกใช้แกนในทางปฏิบัติ

นอกจากนั้นได้มีการพัฒนาค่าที่ใช้ในการเลือกแกน ออกมาอีกค่าหนึ่ง ซึ่งได้มีการพัฒนาถึงค่าความสัมพันธ์ของค่า ผลคูณพื้นที่ และ ค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) หรือ J และค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ ได้ค่าออกมาเป็นค่าทางเรขาคณิตของแกน และได้แสดงในรูปสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน (Core Geometry Coefficient)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในทั้งสองย่อหน้าข้างต้น สามารถที่จะสรุปได้ว่า จะมีค่าที่จะใช้ในการกำหนดในการเลือกแกน ที่จะใช้ในการพิจารณาหม้อแปลง อยู่ 2 ค่า คือ ค่าผลคูณของพื้นที่ และ ค่าทางเรขาคณิตของแกน ซึ่ง เป็นการพัฒนาจากความสัมพันธ์ของค่าผลคูณพื้นที่ กับค่าตัวประกอบอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว

3.3 ความสัมพันธ์ของ ค่าผลคูณพื้นที่กับค่าความสามารถในการรองรับพลังงาน

สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ของค่าการรองรับพลังงาน และค่าผลคูณพื้นที่ ได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$A_p = \frac{P_t \times 10^4}{K_f B_m f K_u J} \quad [\text{cm}^4]$$

ซึ่ง ค่า K_f จะได้แก่ค่าคงที่ตามลักษณะของรูปคลื่นที่ใช้ หรือ ค่าสัมประสิทธิ์รูปคลื่น (Wave Coefficient)

โดย $K_f = 4.0$ สำหรับรูปคลื่นเหลี่ยม (square wave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

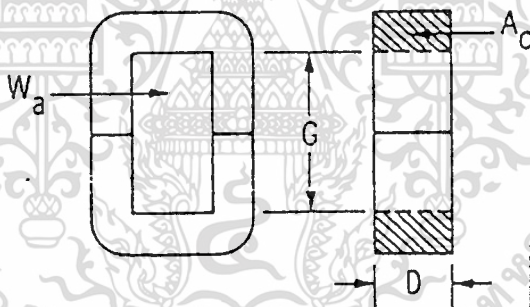
$K_r = 4.4$ สำหรับรูปคลื่นไซน์ (sine wave)

ซึ่งค่าผลคูณพื้นที่ หรือค่า A_p จะมีค่าปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง คือ ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก , ความถี่ที่ใช้งาน (Frequency at Operation) , ค่าตัวประกอบการใช้พื้นที่หน้าต่างของแกน (Window Utilization Factor - K_u -) , ความหนาแน่นของกระแส รวมถึงค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ

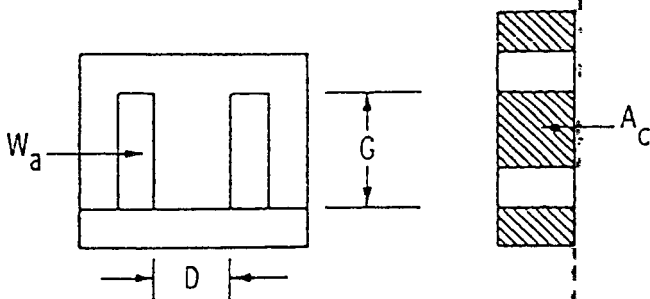
3.4 ค่าผลคูณพื้นที่และความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าต่างและพื้นที่ตัดขวางของแกน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ค่าผลคูณพื้นที่ เป็นค่าที่เกิดจากความสัมพันธ์ของค่า 2 ค่า คือ พื้นที่หน้าต่าง (W_a) และพื้นที่หน้าตัดขวางของแกน (A_c) ซึ่งค่าพื้นที่หน้าตัดขวางนั้น จะเป็นค่าที่จะต้องพิจารณาในแกนแต่ละแบบที่จะมีค่าพื้นที่นี้ตามแต่ละที่เฉพาะตัว ที่จะได้แสดงต่อไป สมการแสดงความสัมพันธ์คือ

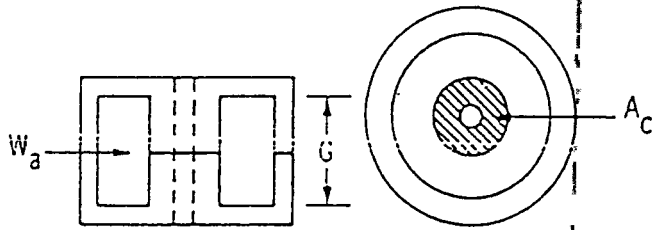
$$A_p = W_a \times A_c$$



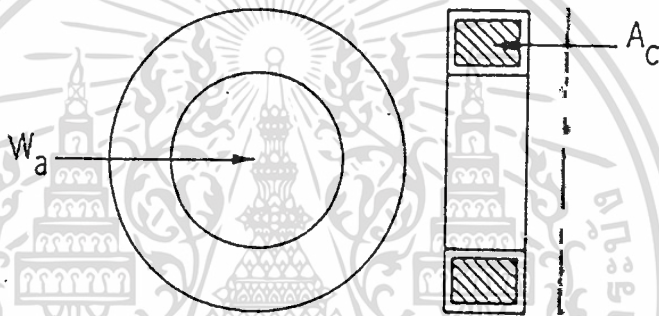
รูปที่ 3.1 แสดงแกนแบบซี (C core)



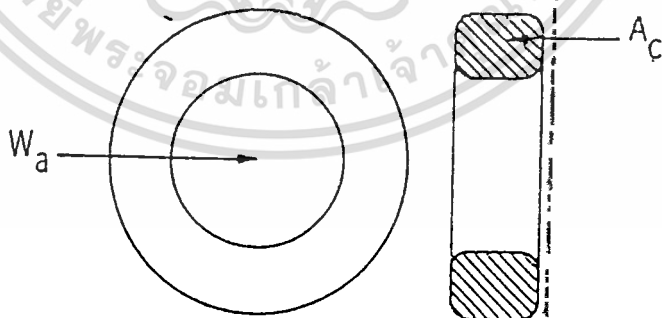
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.2 แสดงแกนแบบแผ่น รูปอี-ไอ (E-I lamination) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงแกนแบบพอด (Pot core)



รูปที่ 3.4 แสดงแกนทอรอยด์ แบบ Tape-Wound



รูปที่ 3.5 แสดงแกนแบบพาวเดอร์ (Powder Core)

นอกจากนี้ได้มีการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ ในการที่จะได้มีการนำข้อมูลจำนวนมาก นำมาทำการคำนวณ และ ประมวลผล โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า กำลังสองน้อยที่สุด (Least square curve method) และสามารถที่จะได้ผลจากการประมวลผล นำมาแสดงได้ในตารางคั่งที่จะได้แสดงต่อไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญเข้า ให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ของแกนแบบต่าง ๆ

แกน Core	ค่าสูญเสีย losses	K_j 25 c	K_j 50 c	x	y	K_v	K_w	K_v
Pot Core	cu = fe	433	632	1.20	-0.17	33.8	48.0	14.5
Powder Core	cu >> fe	403	590	1.14	-0.12	32.5	58.8	13.3
Lamination	cu = fe	366	534	1.14	-0.12	41.3	68.2	19.7
C core	cu = fe	323	468	1.16	-0.14	39.2	66.6	17.9
Single-coil	cu >> fe	395	569	1.16	-0.14	44.5	76.6	25.6
Tape-wound	cu = fe	250	365	1.15	-0.13	50.9	82.3	25.0

หมายเหตุ cu , fe หมายถึง ความสูญเสียจากทองแดง และ ความสูญเสียจากเหล็ก ตามลำดับ

โดยค่า

$$J = K_j \times A_p^x$$

$$A_t = K_s \times A_p^{0.50}$$

$$W_t = K_u \times A_p^{0.75}$$

$$Vol = K_v \times A_p^{0.75}$$

เมื่อ

J คือ ค่าความหนาแน่นกระแส

A_p คือ พื้นที่ผิว (Surface Area)

W_t คือ น้ำหนักทั้งหมด

Vol คือ ปริมาตรทั้งหมด

K_j คือ ค่าคงที่เกี่ยวกับการเพิ่มของอุณหภูมิ

K_s คือ ค่าคงที่เกี่ยวกับพื้นที่ผิว

K_u คือ ค่าคงที่การใช้พื้นที่หน้าตัด สำหรับแกนแบบต่าง ๆ

K_v คือ ค่าคงที่เกี่ยวกับปริมาตร

K_w คือ ค่าคงที่เกี่ยวกับน้ำหนัก

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง คุณสมบัติต่าง ๆ ของหม้อแปลง และค่าผลคูณพื้นที่

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นถึงค่าที่ใช้ในการกำหนดสำหรับแกนหม้อแปลง ที่จะกล่าวถึงค่าผลคูณพื้นที่ (A_p) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.5.1 ความสัมพันธ์กับค่าปริมาตรของตัวหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการเลือกแกนที่จะใช้ในการสร้างหม้อแปลง ปริมาตรเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นจะต้องมีการพิจารณา ซึ่งปริมาตรสำหรับแกนแต่ละแบบจะมีการแตกต่างกันไปใน ตามแต่ละรูปแบบ เช่นเดียวกันกับค่าผลคูณพื้นที่ที่ได้กล่าวไปแล้ว ที่มีความสัมพันธ์กับ ค่าขนาดของแกนนั้น ๆ

สามารถที่จะทำการพิสูจน์ ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาตร} = K_1 \times l^3 \quad (1)$$

$$A_p = K_2 \times l^4 \quad (2)$$

เมื่อ K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่

$$l^4 = (A_p) / (K_2) \quad (3)$$

$$l = (A_p / K_2)^{0.25} \quad (4)$$

$$l^3 = [(A_p / K_2)^{0.25}]^3 = (A_p / K_2)^{0.75} \quad (5)$$

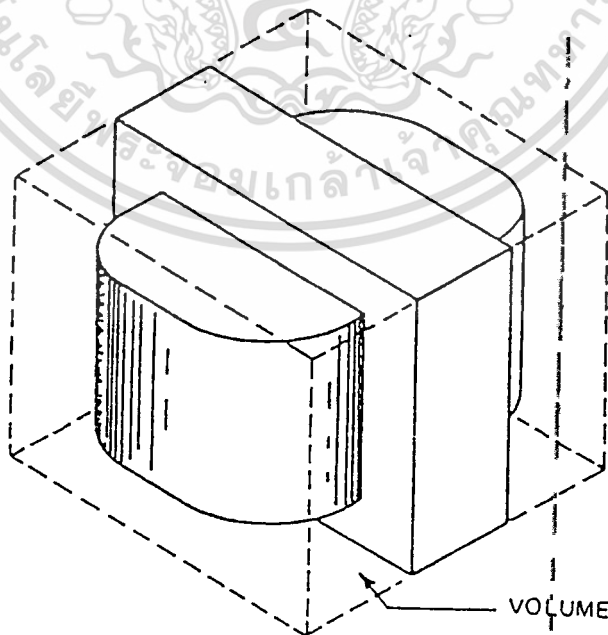
$$\text{ปริมาตร} = K_1 (A_p / K_2)^{0.75} \quad (6)$$

$$K_v = (K_1) / (K_2^{0.75}) \quad (7)$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาตร} = K_v \times A_p \quad (8)$$

สมการที่ (8) นั้น เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของหม้อแปลงและผลคูณพื้นที่

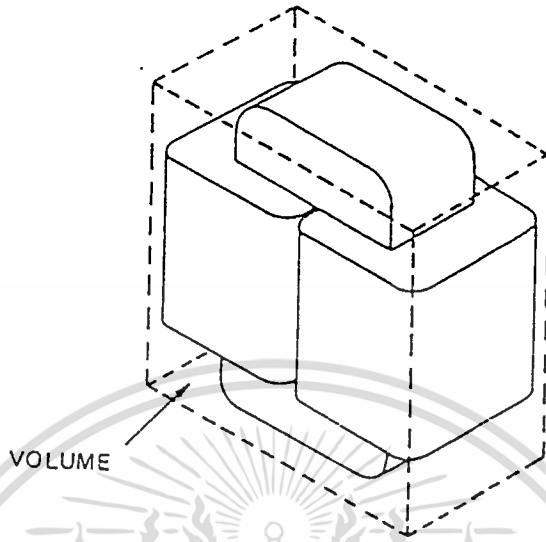
รูปต่อไปนี้จะเป็นการแสดงถึงปริมาตรของแกนแบบต่าง ๆ



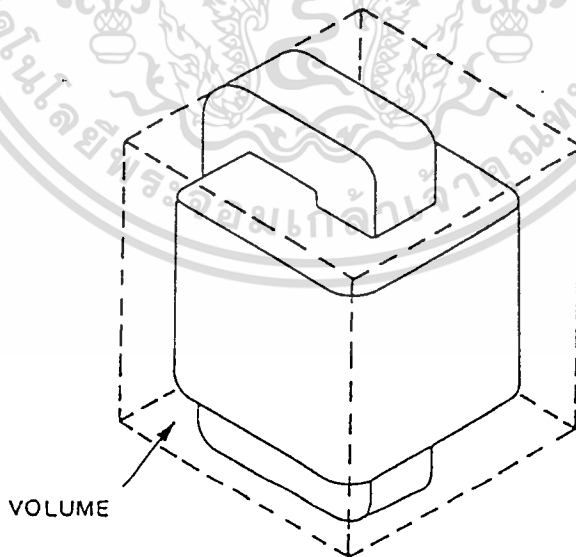
รูปที่ 3.6 ปริมาตรของแกนแบบแผ่น อี-ไอ (E-I lamination Core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

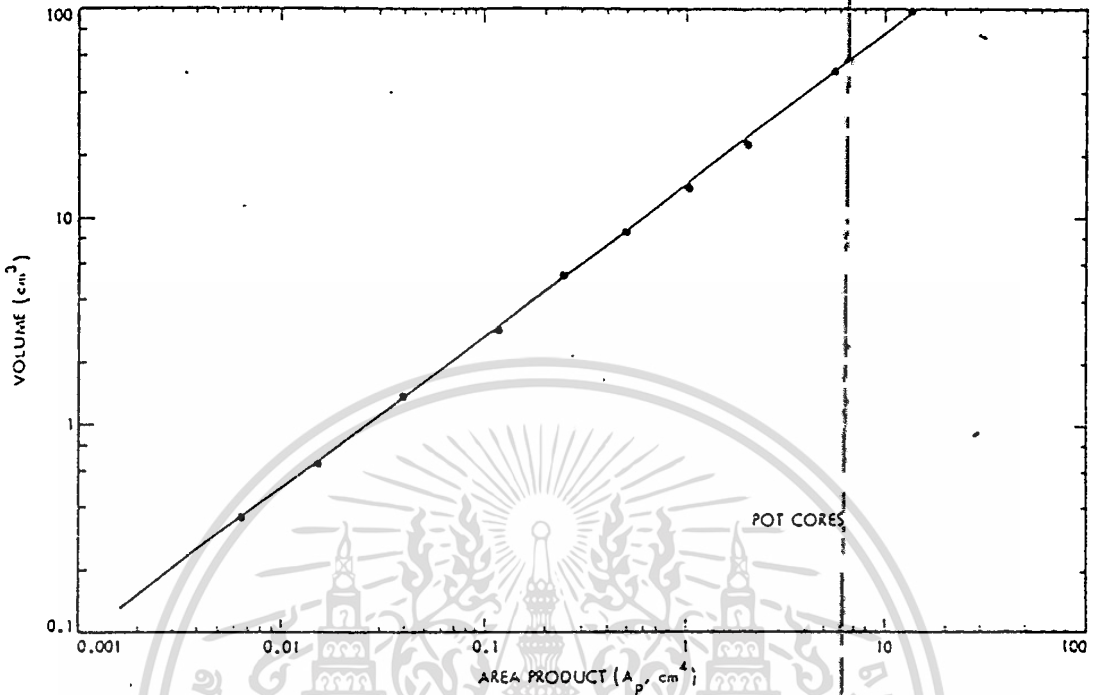


รูปที่ 3.7 แสดงปริมาตรของแกนแบบซี (C core)

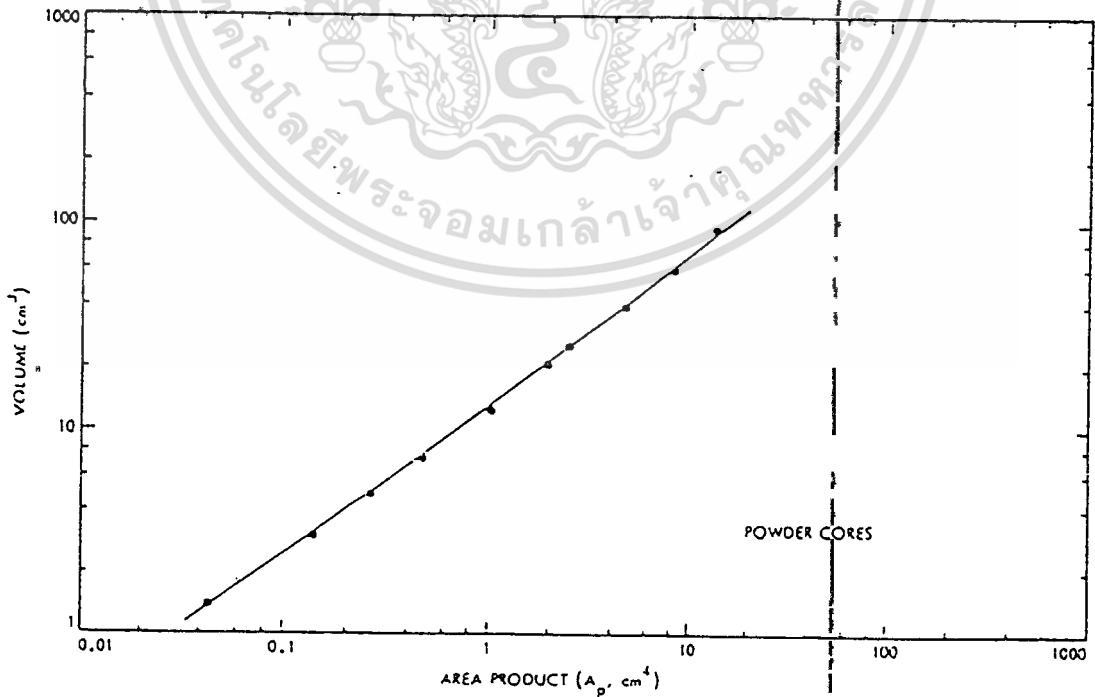


รูปที่ 3.8 แสดงปริมาตรของแกนแบบซี ชนิดเดี่ยว (Single-coil C-core volume)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



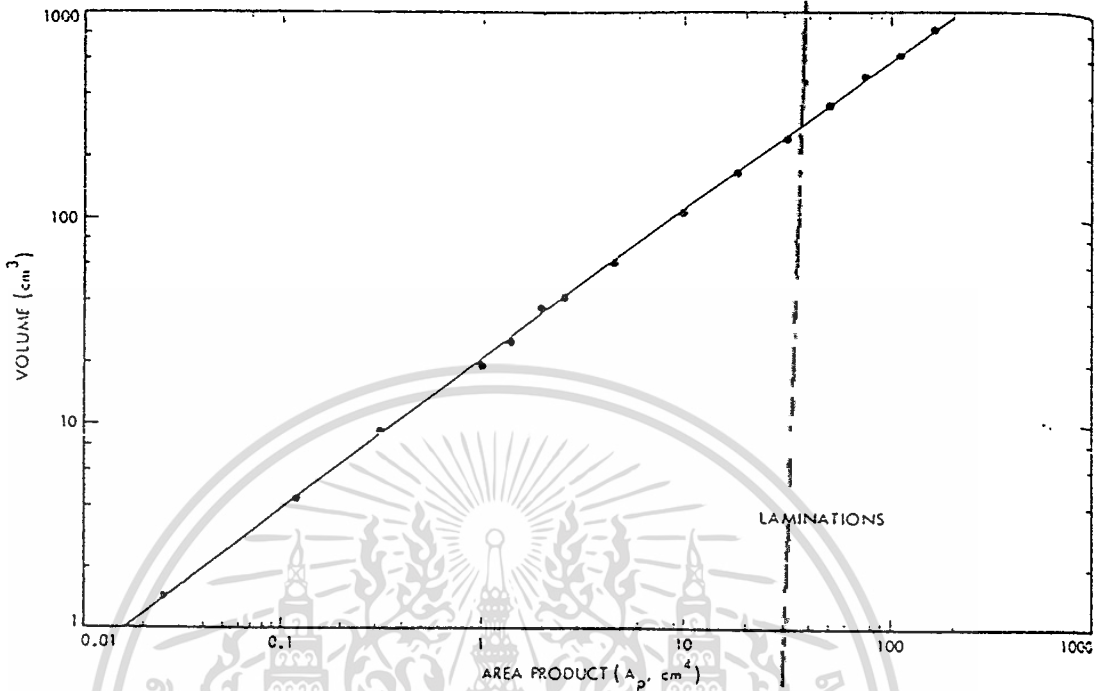
รูปที่ 3.9 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบพอด (Volume and Area Product for pot core)



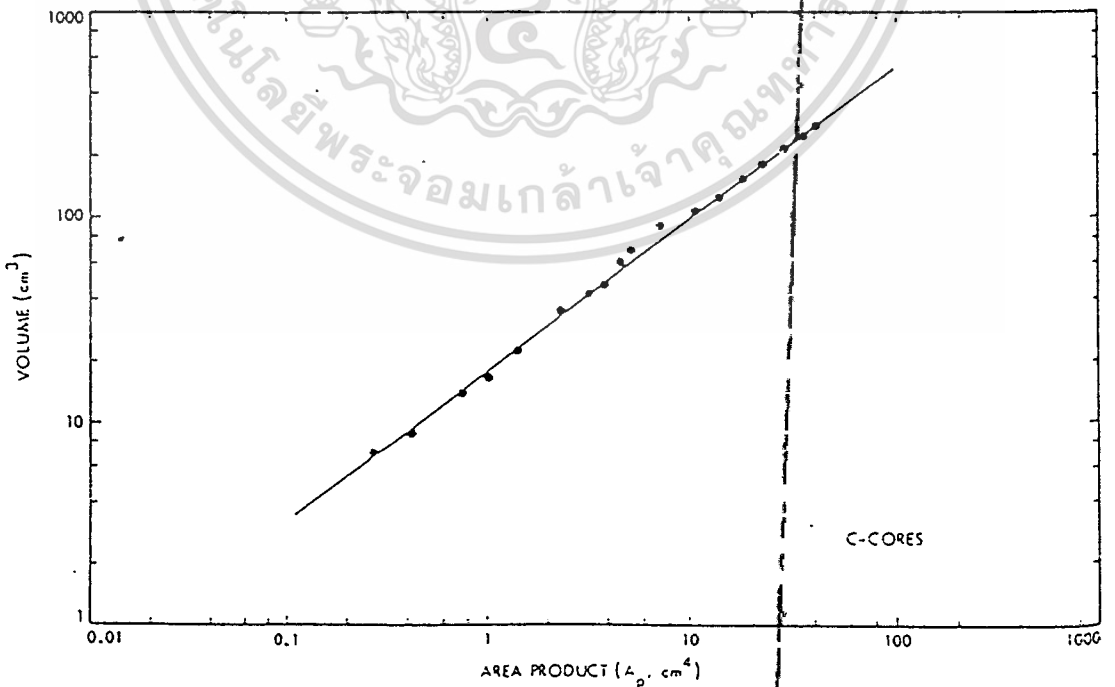
รูปที่ 3.10 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบพาวเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (Volume and Area Product for powder core) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

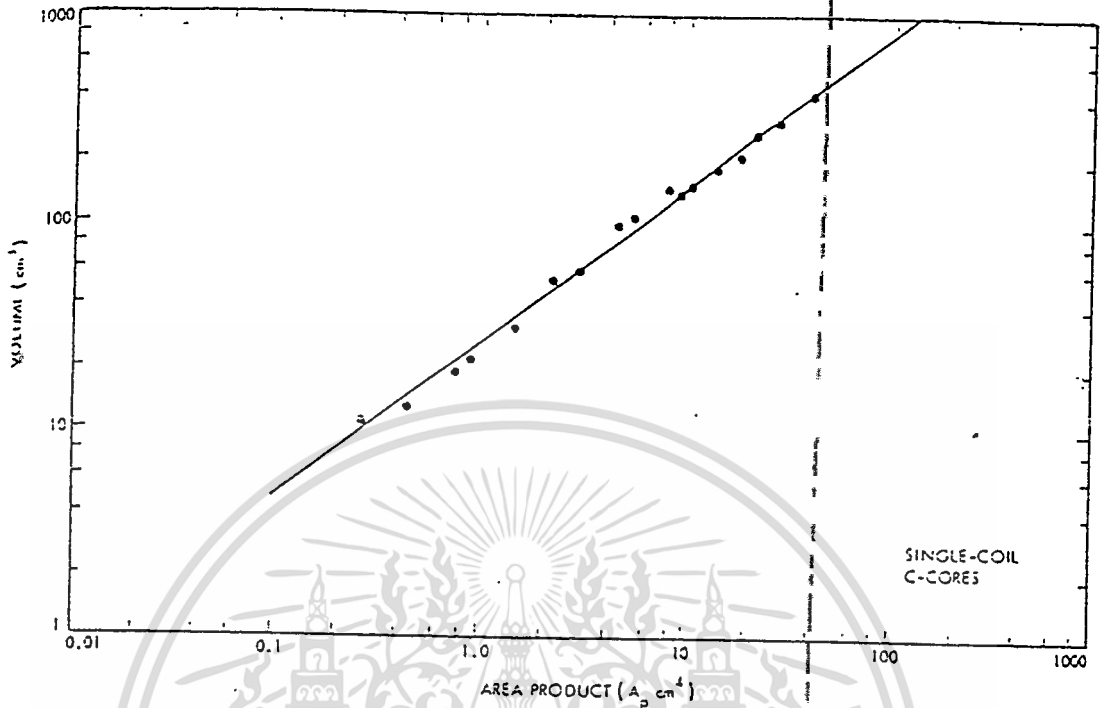


รูปที่ 3.11 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบแผ่น
(Volume and Area Product for lamination)

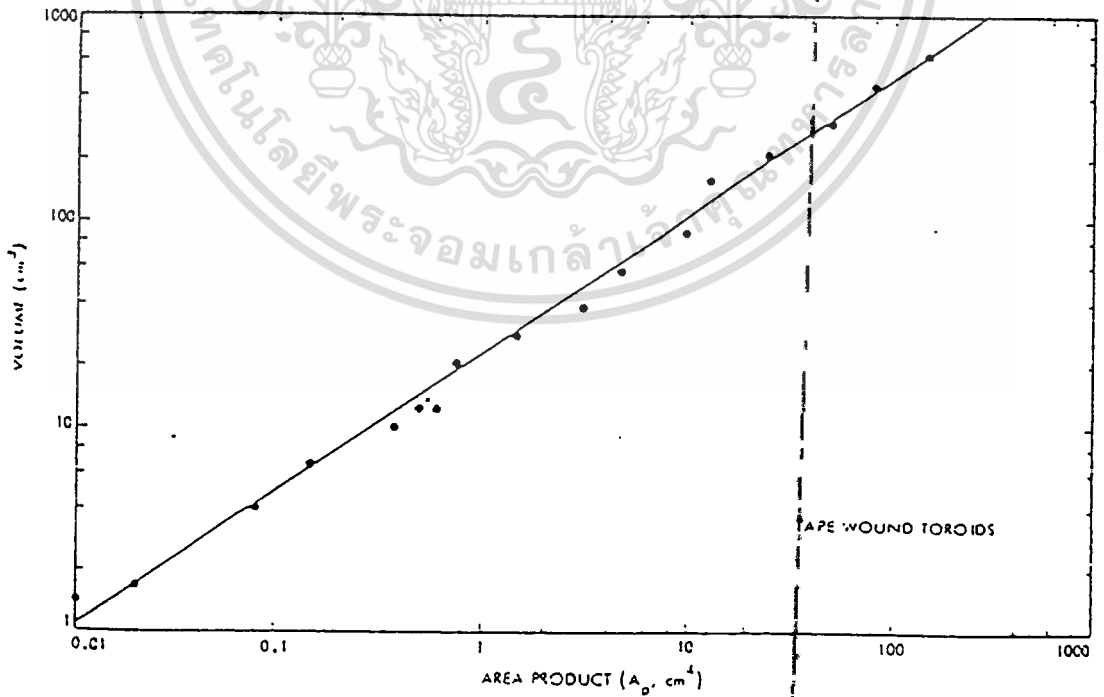


รูปที่ 3.12 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบซี (Volume and Area Product for C core)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบซี ชนิดเดี่ยว
(Volume and Area Product for single-coil C Core)



รูปที่ 3.14 แสดงกราฟปริมาตรและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนทอรอยด์แบบเทป
(Volume and Area Product for tape-wound toroid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ความสัมพันธ์กับน้ำหนัก

น้ำหนักเป็นสิ่งสำคัญสำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของแกนที่จะใช้ในการสร้างหม้อแปลง เช่นเดียวกับกับคุณสมบัติข้อปริมาตร น้ำหนักเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความยาวยกกำลังและเช่นเดียวกับค่าผลคูณพื้นที่

สามารถที่จะทำการพิสูจน์ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนัก} = K_3 \times l^3 \tag{1}$$

$$Ap = K_2 \times l^4 \tag{2}$$

เมื่อ K_2, K_3 เป็นค่าคงที่

$$l^4 = (Ap) / (K_2) \tag{3}$$

$$l = (Ap / K_2)^{0.25} \tag{4}$$

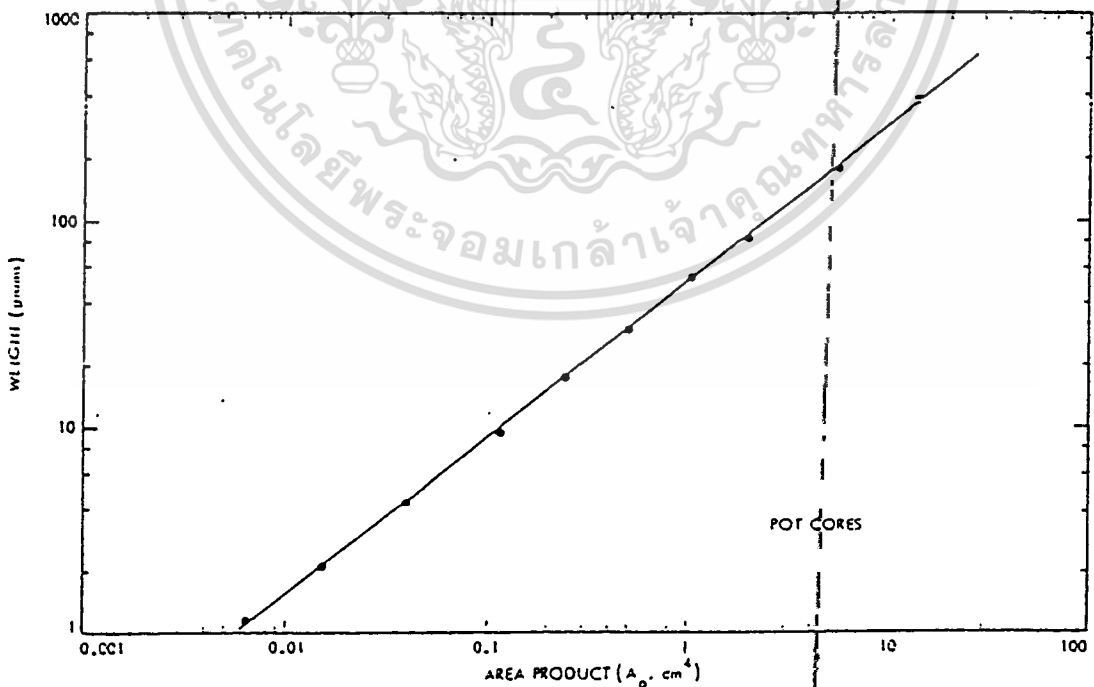
$$l^3 = [(Ap / K_2)^{0.25}]^3 = (Ap / K_2)^{0.75} \tag{5}$$

$$\text{น้ำหนัก} = K_3 \times (Ap / K_2)^{0.75} \tag{6}$$

$$K_w = (K_3) / (K_2)^{0.75} \tag{7}$$

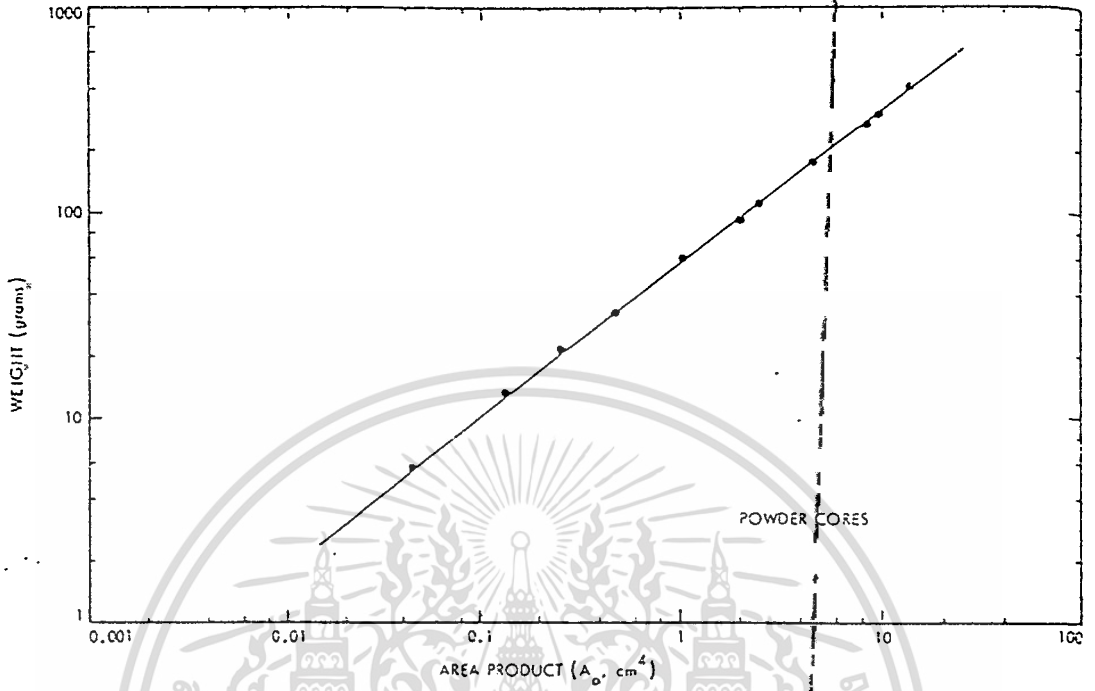
$$\text{ดังนั้น น้ำหนัก} = K_w \times Ap^{0.75} \tag{8}$$

สมการที่ (8) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักหม้อแปลงและค่าผลคูณพื้นที่ ที่ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงรูปสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและค่าผลคูณพื้นที่

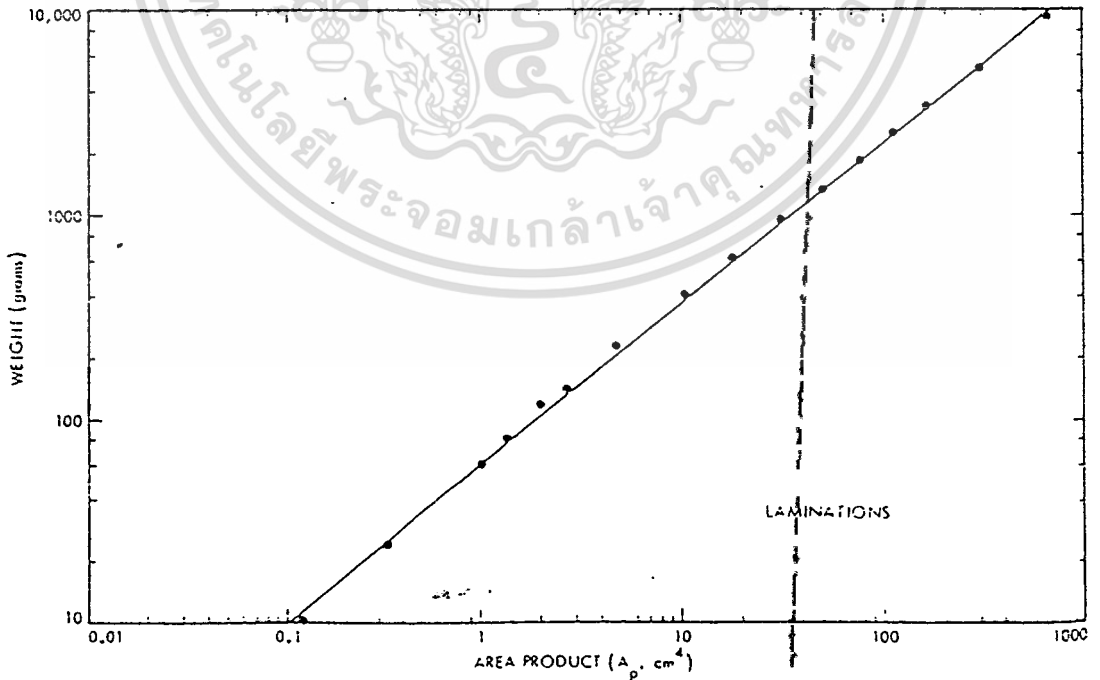


รูปที่ 3.15 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบพอด
(Total weight and Area Product for pot core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



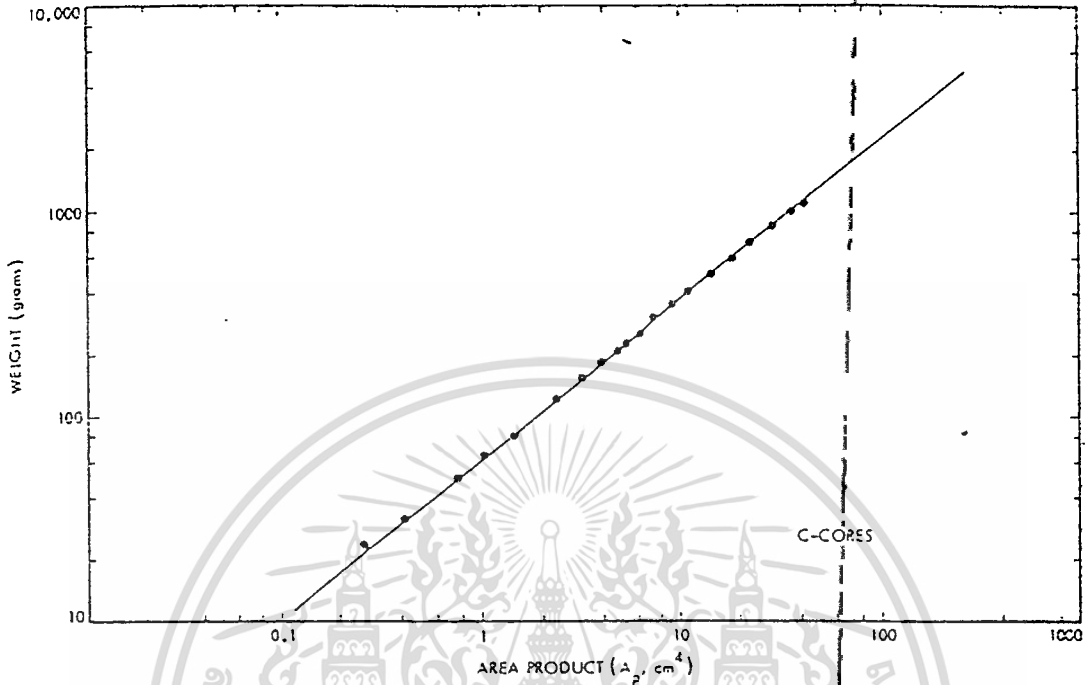
รูปที่ 3.16 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบปาวเดอร์
(Total weight and Area Product for powder core)



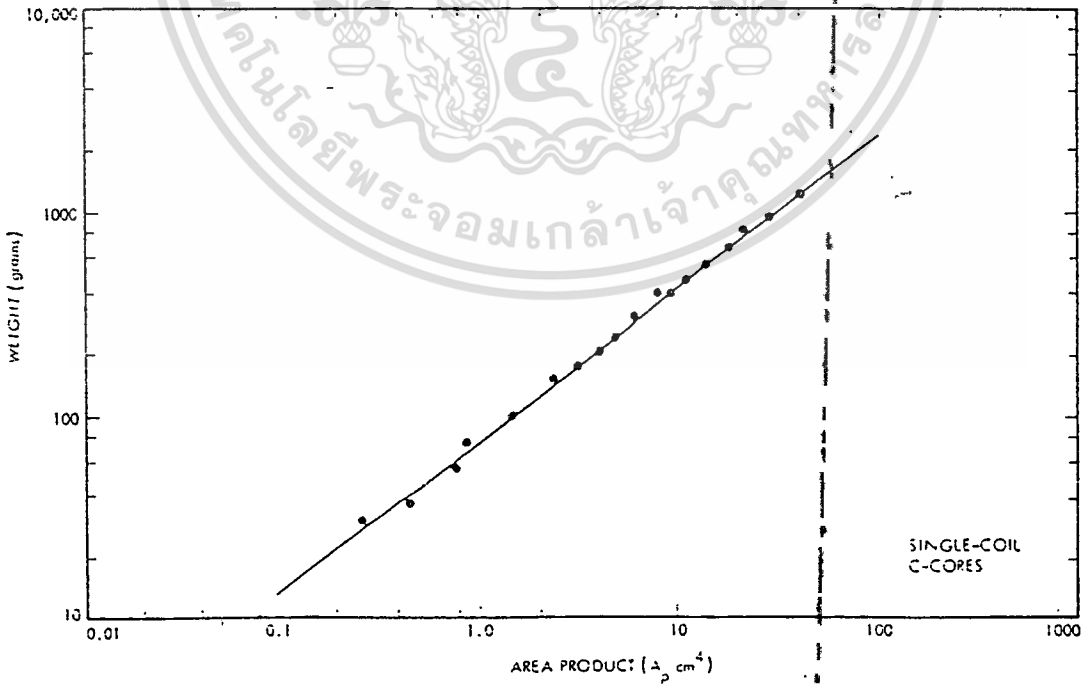
รูปที่ 3.17 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบแผ่น

(Total weight and Area Product for laminated core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



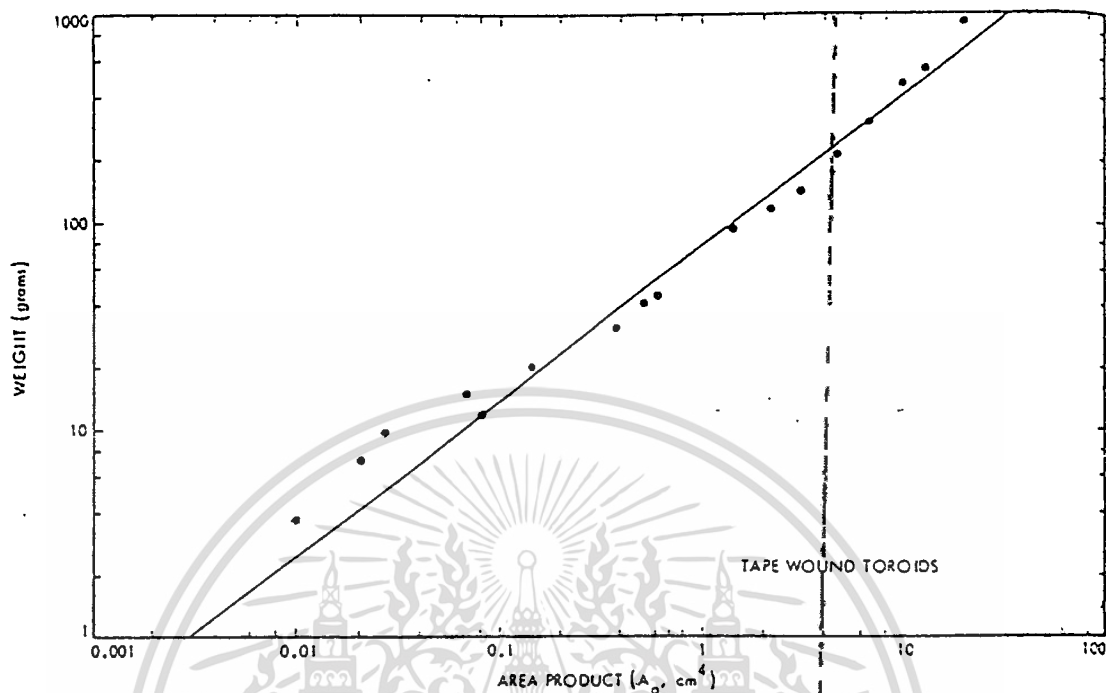
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงน้ำหนักและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบซี่
(Total weight and Area Product for C core)



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงน้ำหนักและผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบซี่ ชนิดเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 แสดงกราฟน้ำหนักและผลคูณพื้นที่สำหรับแกนทออยด์ชนิดเทป
(Total weight and Area Product for tape-wound toroids)

3.5.3 ความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิว

จากที่ได้แสดงมาแล้วในหัวข้อสองหัวข้อก่อนหน้าที่ว่า ค่าผลคูณพื้นที่นั้นมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังสี่ของขนาดความยาว ดังนั้นค่าผลคูณพื้นที่ นั้นย่อมมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิว ที่เป็นค่ากำลังสองของขนาดความยาว

ต่อไปนี้จะเป็นการพิสูจน์

$$\text{พื้นที่ผิว} = K_4 \times l^2 \tag{1}$$

$$A_p = K_2 \times l^4 \tag{2}$$

เมื่อ K_2, K_4 คือค่าคงที่

$$l^4 = (A_p) / (K_2) \tag{3}$$

$$l = [(A_p) / (K_2)]^{0.25} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} l^2 &= [(A_p / K_2)^{0.25}]^2 \\ &= (A_p / K_2)^{0.5} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\text{พื้นที่ผิว} = K_4 \times (A_p / K_2)^{0.5} \tag{6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $K_7 = (K_4) / (K_2)^{0.5}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (7) ราค

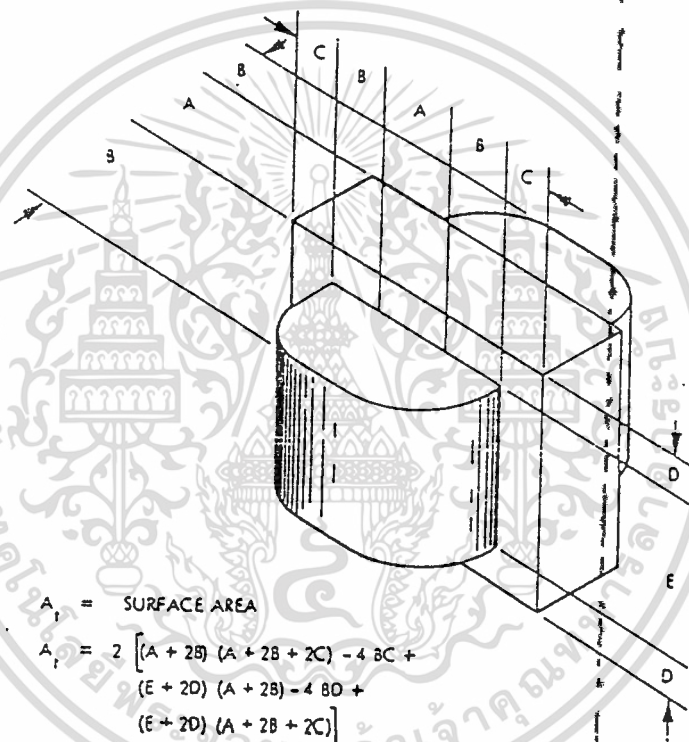
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{คังนั้ัน} \quad \text{พื้นที่ผิว} = K_p \times A_p^{0.5} \quad (8)$$

สมการที่ (8) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่ และพื้นที่ผิวของหม้อแปลง

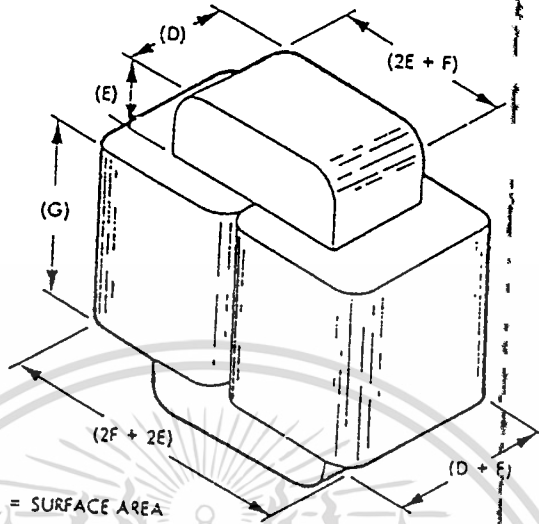
สำหรับค่าคงที่ K_p จากที่ได้กล่าวไปแล้วคือค่าคงที่เกี่ยวข้งกับพื้นที่ผิว

ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงรูปสำหรับการหาพื้นที่ผิว และจะได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่กับพื้นที่ผิวสำหรับแกนแบบต่าง ๆ



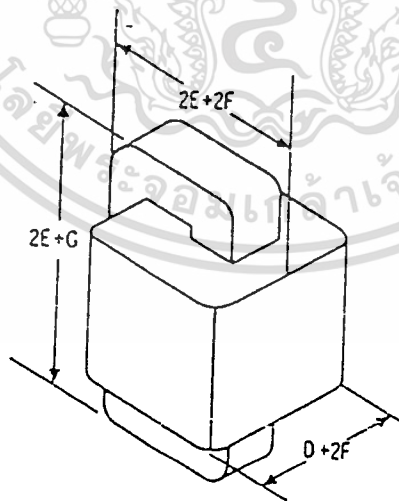
รูปที่ 3.21 แสดงพื้นที่ผิวสำหรับแกนแบบแผ่น อี-ไอ (Surface Area for E-I lamination)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$A_s = \text{SURFACE AREA}$
 $A_s = 2 [(G + 2E) (D + F) - 2FE + (G + 2E) (2F + 2E) - 2FE + (D + F) (2F + 2E)]$

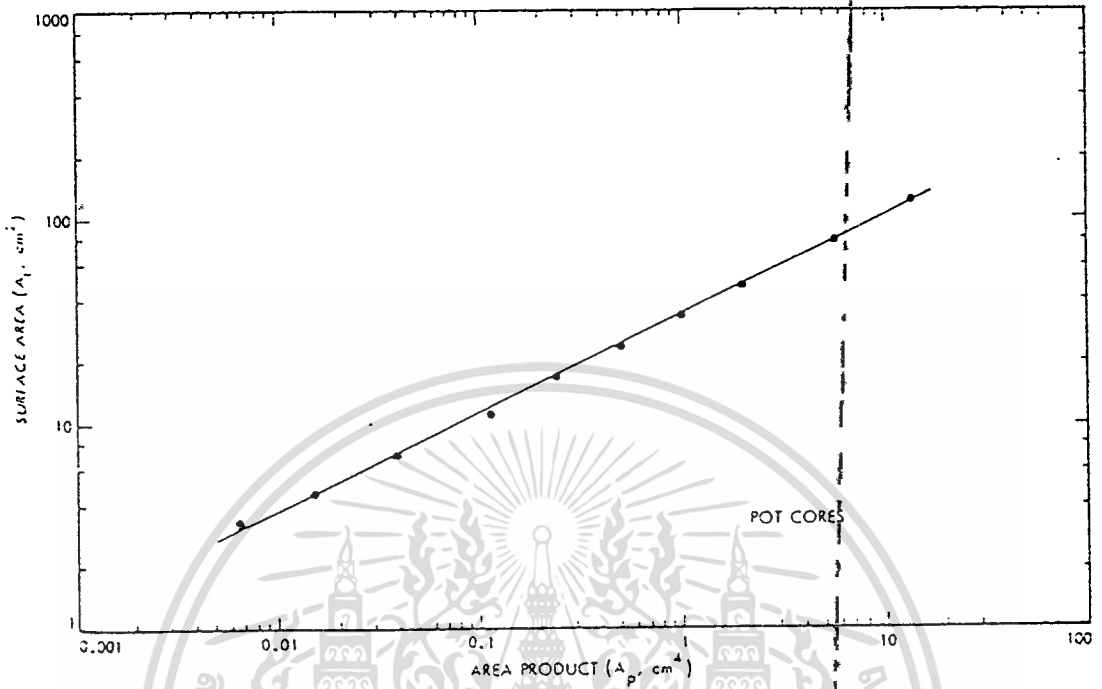
รูปที่ 3.22 แสดงพื้นที่ผิวสำหรับแกนแบบซี (Surface Area for C core)



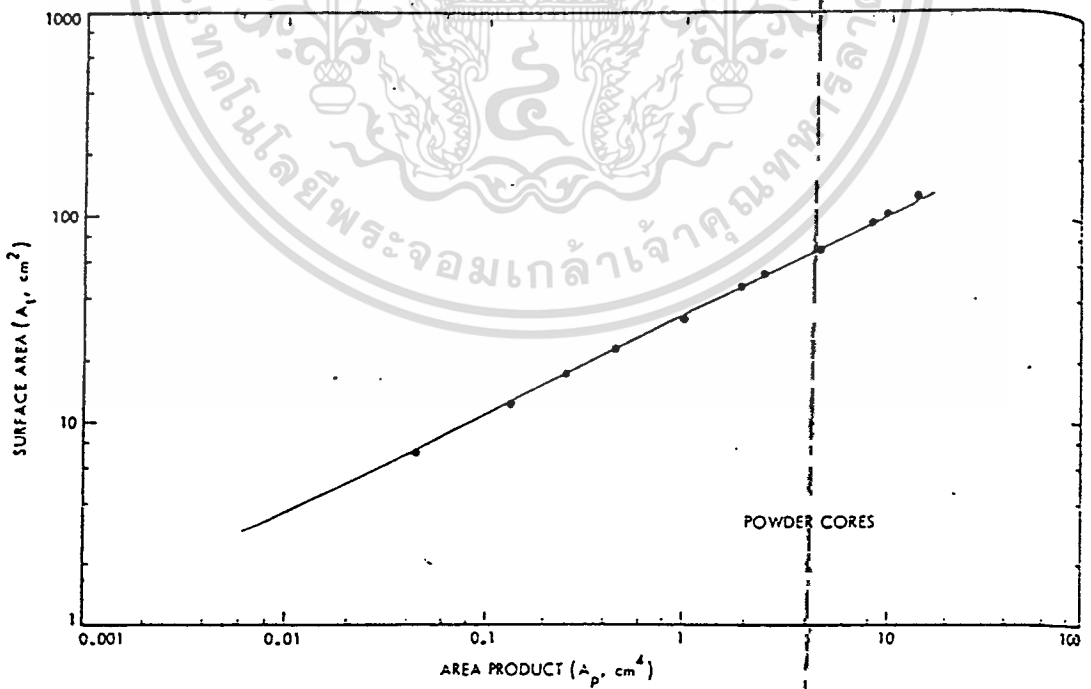
$$A_s = 2 \{ 2(E+F) [(D+2F) + (G+2E)] + (G+2E) (D+2F) - 8EF \}$$

รูปที่ 3.23 แสดงพื้นที่ผิวสำหรับแกนแบบซี ชนิดเดี่ยว (Surface Area for single-coil C core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

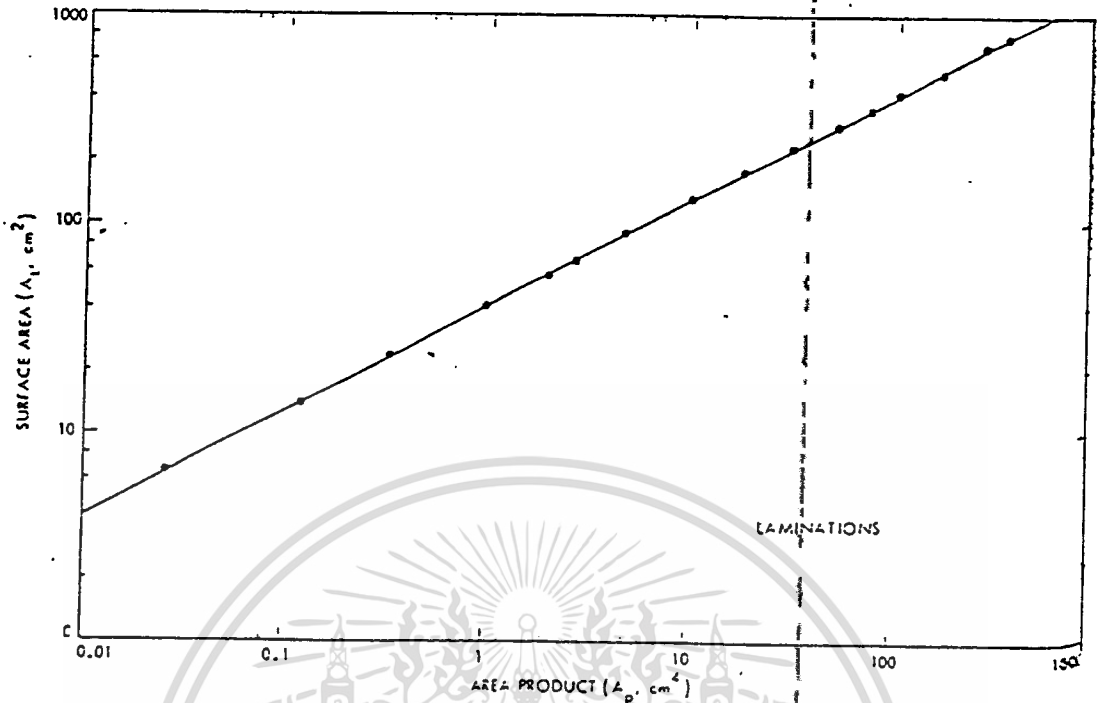


รูปที่ 3.24 แสดงกราฟพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่ (Surface Area and Area Product for pot core)

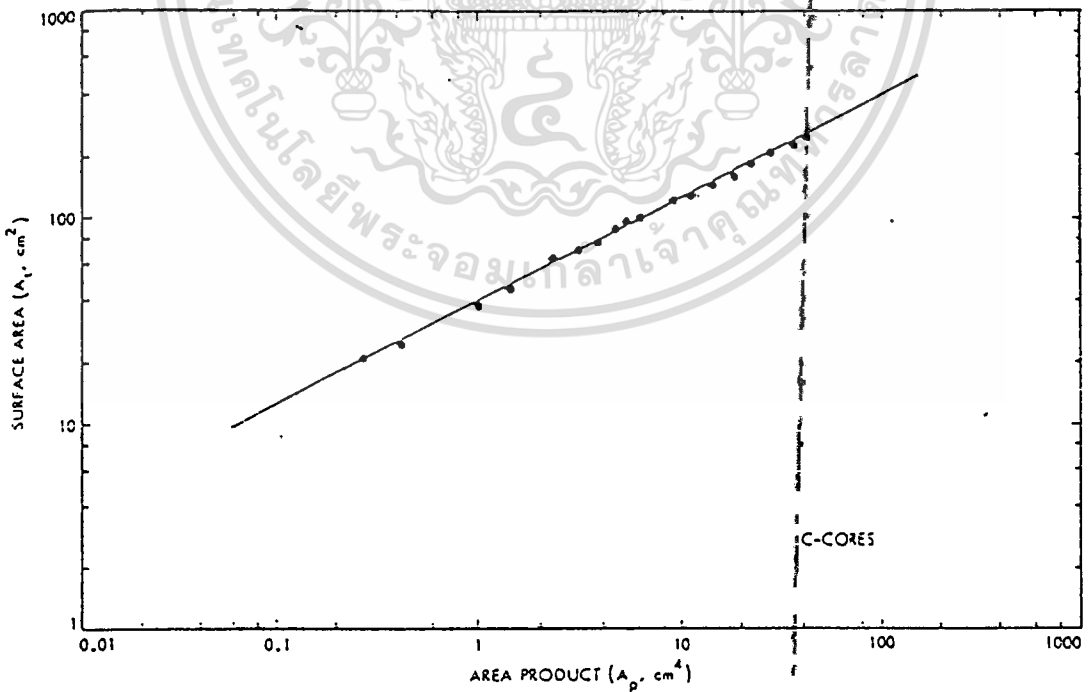


รูปที่ 3.25 กราฟระหว่างพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่ (Surface Area and Area Product for powder core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

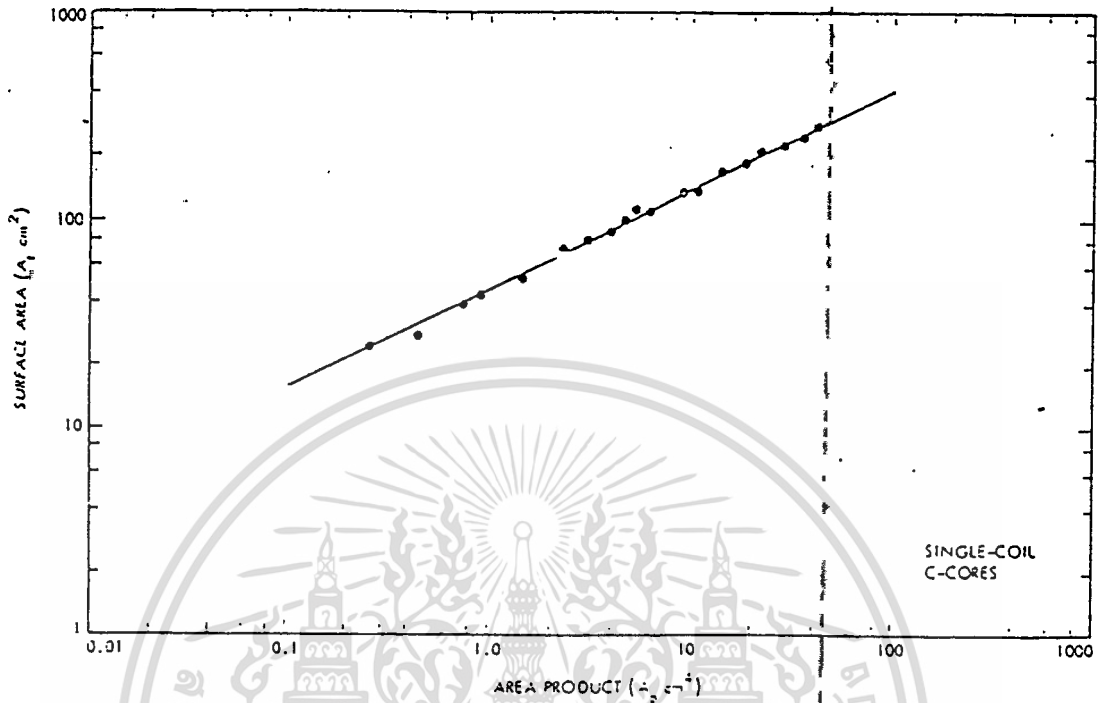


รูปที่ 3.26 กราฟระหว่างพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบแผ่น
(Surface Area and Area Product for lamination)

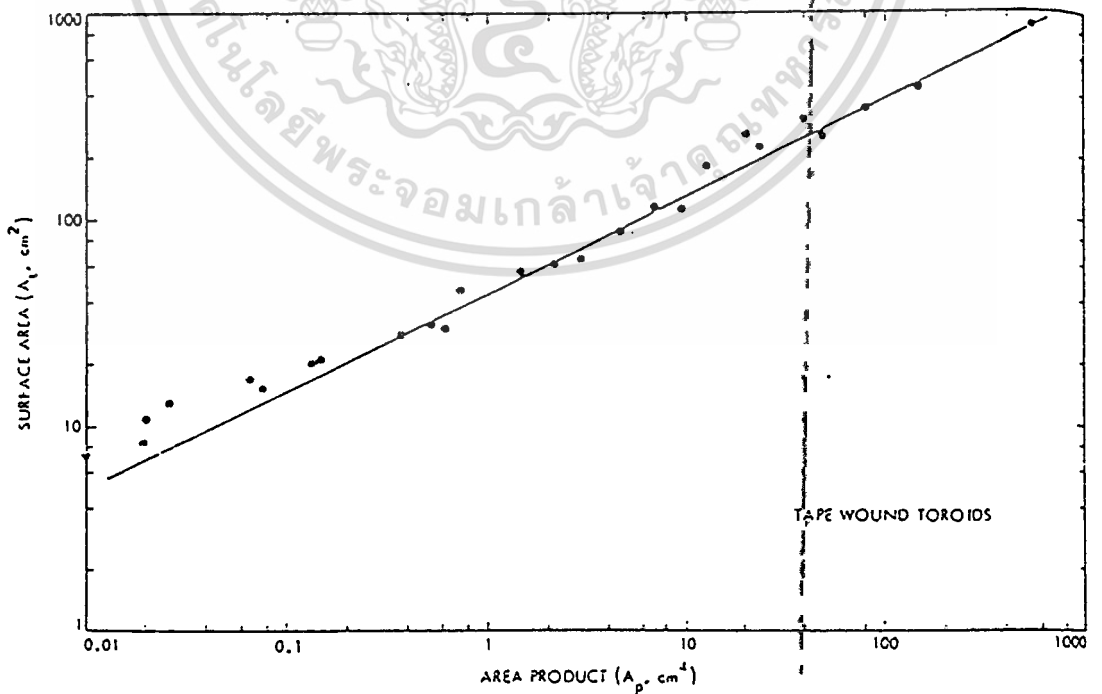


รูปที่ 3.27 กราฟระหว่างพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบซี
(Surface Area and Area Product for C core)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 กราฟระหว่างพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบขี ชนิดเดี่ยว
(Surface Area and Area Product for single-coil C core)



รูปที่ 3.29 กราฟระหว่างพื้นที่ผิวและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนทอรรอยด์แบบเทป
(Surface Area and Area Product for tape-wound toroid)

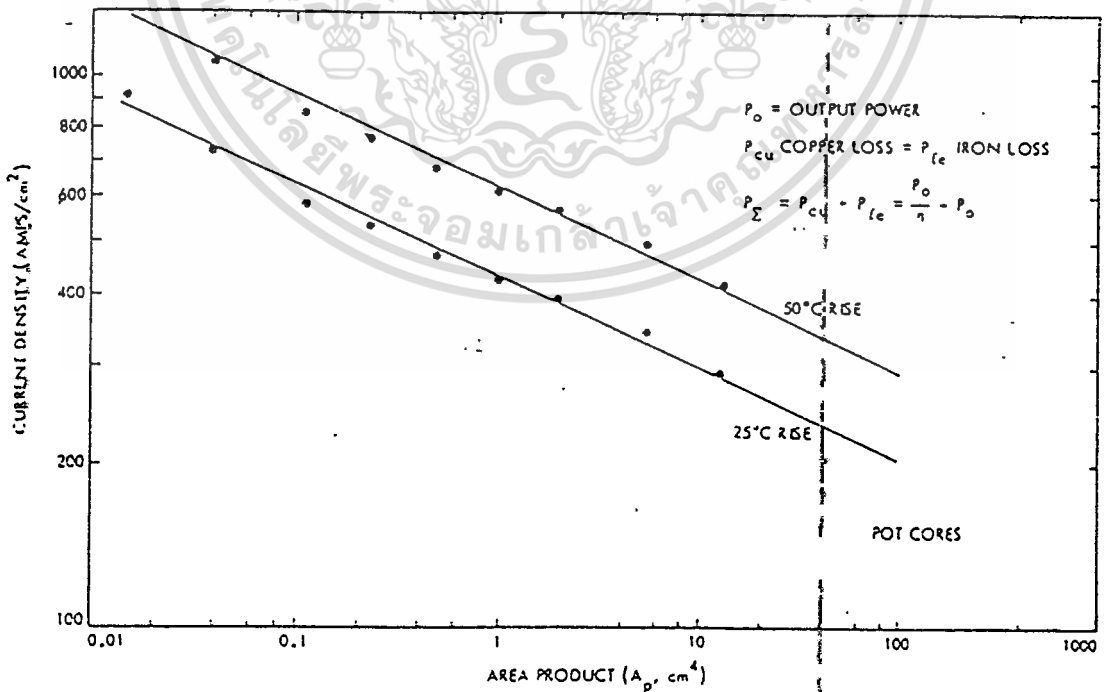
3.5.4 ความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นกระแส

ความหนาแน่นของกระแสสำหรับหม้อแปลงนั้นจะเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับค่าผลคูณพื้นที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ ซึ่งค่าการเพิ่มของอุณหภูมิที่ได้แสดงไปแล้วในตารางที่ 3.1 (ตารางค่าคงที่ของแกนแบบต่าง ๆ) จะพบว่าได้มีการแสดงค่าการเพิ่มของอุณหภูมิอยู่สองค่า คือค่า 25 และ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งในหัวข้อภายหน้า จะได้แสดงค่าการเพิ่มของอุณหภูมิที่จะใช้ ในรูปของการกำหนดในค่าคงที่สำหรับการคูณ จากการสร้างสมการเส้นตรง (linear equation) ขึ้น มาเพื่อใช้ในการคำนวณสำหรับโปรแกรมที่จะได้ใช้

โดยความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นของกระแส และ ค่าผลคูณพื้นที่จะสามารถในรูป ของสมการคือ

$$J = K_j \times A_p^{-0.125}$$

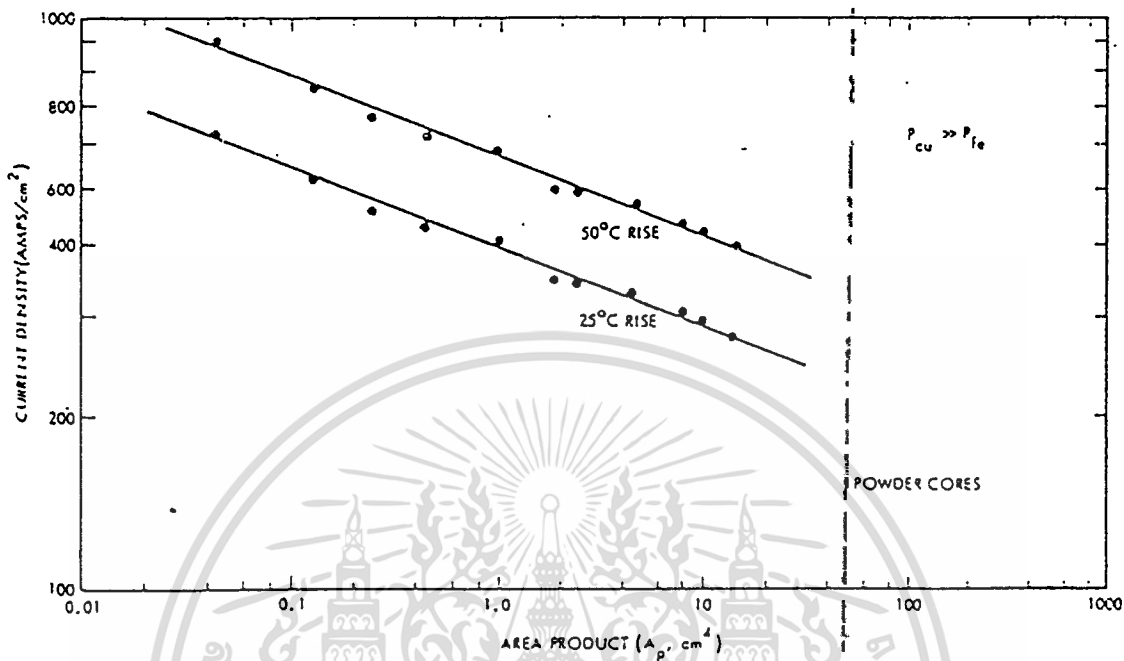
ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงรูปสำหรับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสและ ค่าผลคูณพื้นที่



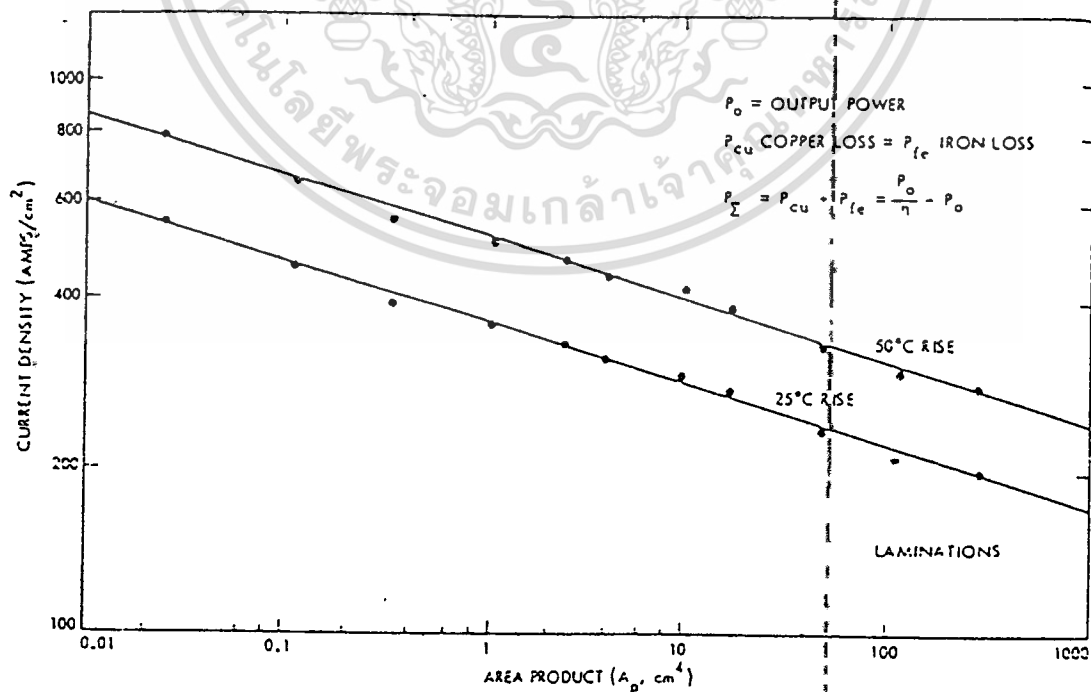
รูปที่ 3.30 กราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (Current Density and Area Product for pot core)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

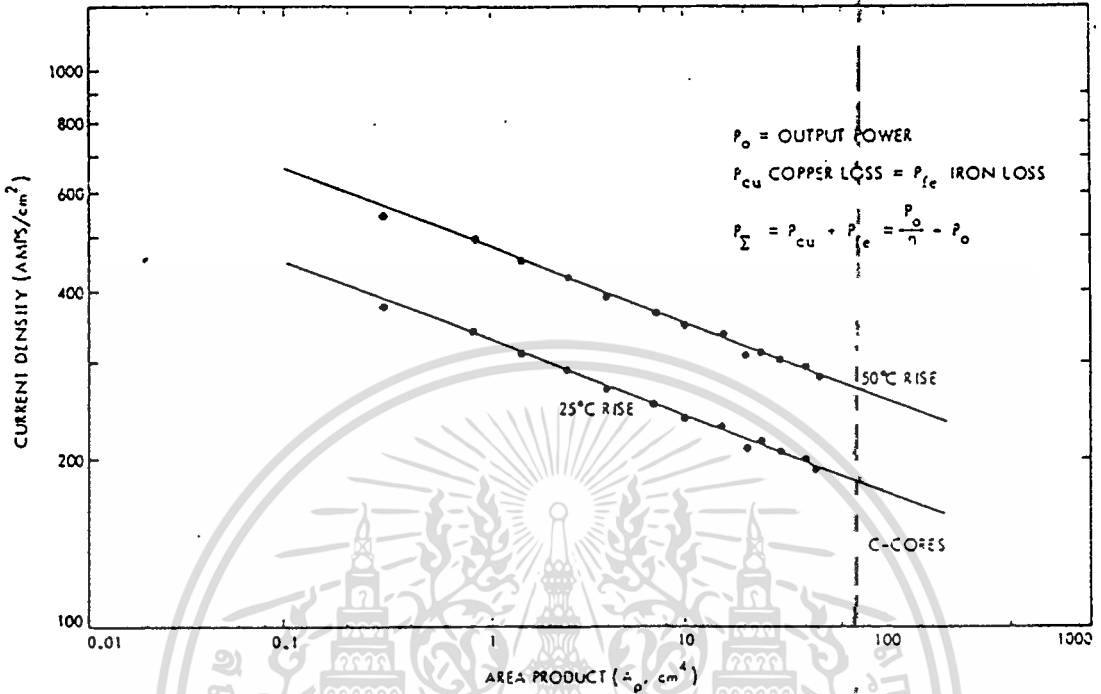


รูปที่ 3.31 กราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนพาวเดอร์
(Current Density and Area Product for powder core)

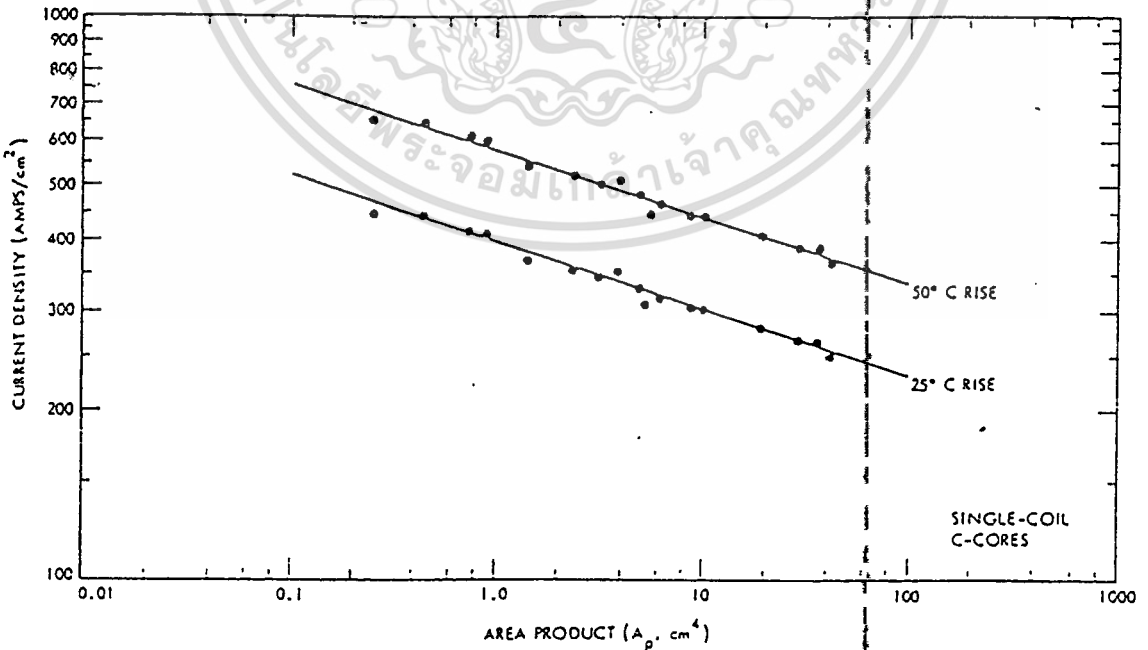


รูปที่ 3.32 กราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบแผ่น
(Current Density and Area Product for lamination)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 กราฟระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสและผลคูณพื้นที่สำหรับแกนแบบซี
(Current density and Area Product for C core)

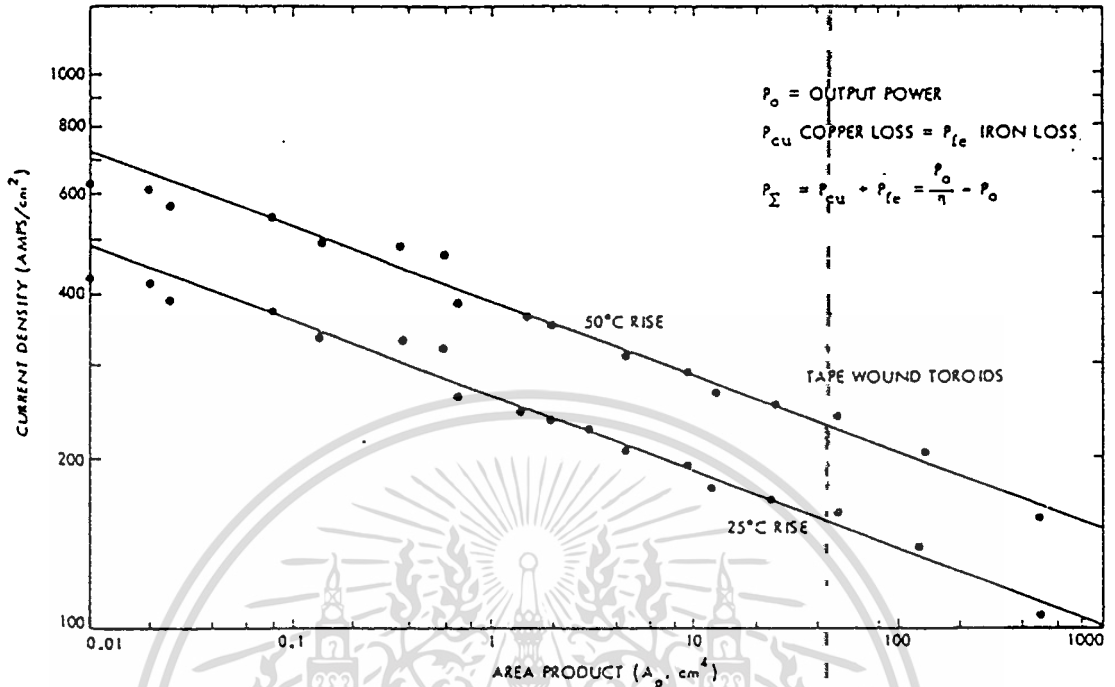


รูปที่ 3.34 กราฟระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสและผลคูณพื้นที่สำหรับแกนซี ชนิดเคียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(Current Density and Area Product for single-coil C core)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 กราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสและผลคูณพื้นที่ สำหรับแกนแบบทอรอยด์ ชนิดเทป
(Current Density and Area Product for tape-wound toroid)

3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ค่าทางเรขาคณิตของแกน และคุณสมบัติแรงดันกระแสเฟืองของหม้อแปลง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเป็นการกล่าวถึง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่และค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของหม้อแปลง ซึ่งค่าผลคูณพื้นที่นั้น จะเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดถึงแกนที่จะนำมาใช้ในการสร้างหม้อแปลง นอกจากค่าผลคูณพื้นที่นั้นจะมีค่าอีกค่าหนึ่ง ที่สามารถนำมาใช้ได้ในการกำหนดถึงการนำแกนมาใช้ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะเป็นค่าที่ได้รับการพัฒนามาภายหลัง และปัจจุบันนี้ค่าดังกล่าวนี้เป็นค่าที่ทางบริษัทผู้ผลิตหลายบริษัท ได้นำมาใช้ในรายการแกนสำหรับการเลือกใช้แล้ว ซึ่งค่าดังกล่าวนี้คือ สัมประสิทธิ์ค่าทางเรขาคณิตของหม้อแปลง (Kg) ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวข้างต้นกับคุณสมบัติแรงดันกระแสเฟืองของหม้อแปลง (Regulation Capability - α -) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ จะเป็นค่าที่จะใช้ควบคู่กับการพิจารณาเลือกแกนมาใช้ในการสร้างหม้อแปลงสำหรับวิธีการคำนวณโดยใช้ค่าทางด้านเรขาคณิตของแกน

ในการคำนวณโดยใช้ค่ากายภาพนี้ จะต้องมีการคำนวณถึงค่าครั้งที่ 2 ค่าด้วยกัน ประกอบ

ด้วย ค่าเรขาคณิตของแกน และค่าคงที่ตามสภาวะใช้งาน (Operating Condition Coefficient - K_o -) จากคุณสมบัติแรงดันกระเพื่อมของหม้อแปลง ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนในหม้อแปลงทุกตัวที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา เนื่องจากการที่ขดลวดที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงนั้น ประกอบด้วยค่าความต้านทานเสมอ ในหน่วยของ (หน่วยความต้านทาน ต่อ หน่วยของความยาวของขดลวด ดังนั้น ค่าดังกล่าวนี้ย่อมจะเกิดขึ้นได้ เนื่องจากจะเกิดค่าแรงดันตกคร่อม ที่ค่าความต้านทานดังกล่าวข้างต้น และ ค่าดังกล่าวนี้ จะมีความสัมพันธ์กับค่าของคุณสมบัติการรองรับพลังงานของแกน ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{คุณสมบัติการคงค่าของหม้อแปลง} = [\text{ค่าคุณสมบัติการรองรับพลังงาน}] / [2 \times K_g \times K_o]$$

อยู่ในรูปของ เปอร์เซนต์ [%]



ค่าคงที่ตามสภาวะการใช้งาน (Operating Condition Coefficient : K_o) คือ ค่าคงที่ ซึ่งได้ประกอบด้วยค่าตัวประกอบที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ ดังนี้คือ 1. ค่าคงที่ตามรูปแบบของคลื่น (K_f) 2. ค่าความถี่ และ 3. ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$K_o = 0.145 \cdot K_f^3 \cdot f^3 \cdot B_{max}^2 \cdot 10^{-4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ให้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบหม้อแปลงกำลัง

4.1 บทนำ

ในการออกแบบหม้อแปลงจะมีข้อจำกัดอยู่หลายประการด้วยกัน ที่ผู้ออกแบบมักจะพบอยู่เสมอ หนึ่งในจำนวนนั้นก็คือ ปัญหาเกี่ยวกับกำลังในด้านขาออก (ซึ่งเกิดขึ้นจากผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแส) โดยขดลวดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะต้องสามารถที่จะส่งผ่านกำลังไปยังภาระได้โดยมีแรงดันกระเพื่อมอยู่ภายใต้ค่าที่กำหนด นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่องของประสิทธิภาพ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูญเสียสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในหม้อแปลง และปัญหาเกี่ยวกับค่าอุณหภูมิที่ยอมให้เพิ่มขึ้นได้ โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่ได้ระบุเอาไว้

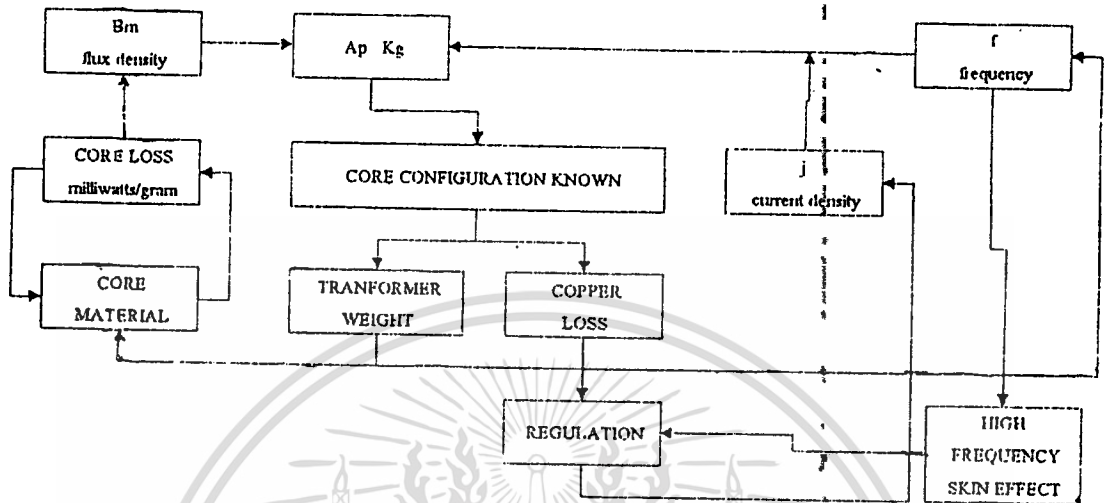
ขั้นตอนพื้นฐานในการออกแบบหม้อแปลงก็คือ การเลือกวัสดุทำแกนหม้อแปลงที่เหมาะสม โดยชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนหม้อแปลงนี้จะมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพและน้ำหนักของหม้อแปลง และผู้ออกแบบจะต้องทราบด้วยว่าวัสดุที่ใช้ทำแกนหม้อแปลงแต่ละชนิดนั้นมีราคาแตกต่างกันอย่างไร

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงปริมาณของหม้อแปลงและน้ำหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทางด้านการบินนั้น การออกแบบหม้อแปลงให้ได้น้ำหนักเบาจะถือว่าเป็นเป้าหมายที่สำคัญมาก และนอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ในการออกแบบนั้นจะมีข้อจำกัดอยู่มากมาย ดังนั้นเราจะต้องพยายามหาวิธีการสร้างความสมดุลระหว่างข้อจำกัดต่างๆเหล่านี้ เพื่อที่จะให้ได้การออกแบบหม้อแปลงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่ต้องการมากที่สุด

ยกตัวอย่างเช่น ถ้าน้ำหนักและปริมาตรเป็นสิ่งที่เราให้ความสนใจมากที่สุด เราก็จะสามารถทำการลดข้อจำกัดทั้งสองนี้ได้ โดยการให้หม้อแปลงทำงานภายใต้ความถี่สูง แต่จะมีผลเสียคือทำให้ประสิทธิภาพลดลง แต่ถ้าเราไม่สามารถเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นได้เราก็จะต้องทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกน โดยเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูงขึ้นแต่ผลเสียที่ตามมาก็คือ ค่าใช้จ่ายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

เราสามารถแสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวพันกันระหว่างแฟกเตอร์แต่ละตัวที่เราจะต้องทำการพิจารณาในขั้นตอนของการออกแบบหม้อแปลงกำลัง ดังในแผนผังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงถึงความเกี่ยวพันกันระหว่างแฟกเตอร์แต่ละตัวที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ

4.2 คุณสมบัติการรองรับพลังงาน

ผู้ผลิตแกนหม้อแปลงทั้งหลายพยายามที่จะสร้าง ใค้ด ให้กับแกนของตนเองโดยที่ ใค้ด นี้ จะแสดงถึงความสามารถในการรองรับพลังงานของแกน วิธีการนี้ก็คือการทำให้แกนแต่ละอันมี เลขประจำตัวเป็นของตนเองซึ่งก็คือเลข A_p และ K_g นั้นเอง

ซึ่งผู้จำหน่ายแกนหม้อแปลงจะใช้ตัวเลขเหล่านี้แสดงถึงขนาดและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ แกนหม้อแปลง ซึ่งเลขเหล่านี้สามารถใช้ได้กับแกนหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น แกนลามิเนต แกนซี คอร์ แกนฟ็อดคอร์ แกนฟาวเคอร์คอร์ แกนเฟอร์ไรท์ แกนทอรอยด์และแกนทอรอยด์เทป-วานด์ คอร์

ค่าแรงดันกระเพื่อมและความสามารถในการรองรับพลังงาน จะมีความสัมพันธ์กับเลข K_g ภายในตัวเองอยู่แล้ว การออกแบบด้วยเลข A_p และ K_g นี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากช่วยให้ การออกแบบสะดวกขึ้นและประหยัดเวลาด้วย จึงกล่าวได้ว่าการใช้เลขทั้งสองเป็นวิธีการใหม่ที่ ช่วยให้การออกแบบง่ายขึ้นและยังช่วยให้ได้หม้อแปลงที่มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพที่ ดีที่สุด

4.3 พลังงานขาออกกับความสามารถในการรองรับพลังงาน (Output Power versus Apparent Power Capability)

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ใช้จะให้ความสนใจกับกำลังทางด้านขาออกมากที่สุด แต่สำหรับผู้ออกแบบหม้อแปลงแล้วนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานปรากฏและลักษณะทางเรขาคณิตของหม้อแปลงจะถือว่ามี ความสำคัญมาก และเพื่อให้การพิจารณาง่ายขึ้น เราจะสมมุติให้มีขดลวดอยู่เพียงสองขดภายในพื้นที่ของหน้าตัดของแกนหม้อแปลง ซึ่งก็คือ ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมินั่นเอง และยังสมมุติต่อไปอีกด้วยว่า ขดลวดปฐมภูมิรับกำลังงานเท่ากับ P_m ส่วนของขดลวดทุติยภูมิจะจ่ายกำลังงานเท่ากับ P_o ไปยังโหลด

ในขั้นแรกนั้นเราจะต้องออกแบบให้ หม้อแปลงสามารถที่จะทนกำลังงานขาเข้า (P_m) และกำลังงานขาออก (P_o) ได้ โดยในที่นี้เราจะกำหนดให้

$$P_t = P_{in} + P_o \quad [\text{Watt}]$$

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} \quad [\text{Watt}]$$

จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิสามารถหาได้จากกฎของฟาราเดย์คือ

$$N_p = \frac{V_p \times 10^4}{K_f B_m A_c F} \quad [\text{turn}]$$

พื้นที่ซึ่งใช้งานจริงของขดลวดหาได้จาก

$$K_u W_a = N_p A_{wp} + N_s A_{ws}$$

เมื่อ

K_u = วินโดวี่ที่ไลเซชันเฟกเตอร์

W_a = พื้นที่ของหน้าตัด

N = จำนวนรอบของขดลวด

A_w = พื้นที่ของลวดตัวนำ

และกำหนดให้

$$A_w = \frac{I}{J}$$

โดยที่ I = กระแสเฉลี่ย rms

J = ความหนาแน่นของกระแส [A/cm]

ทำการจัดสมการใหม่จะได้

$$K_u W_a = \frac{N_p I_p}{J} + \frac{N_s I_s}{J}$$

แทนค่าลงไปนสมการของฟาราเดย์จะได้

$$K_u W_a = \left(\frac{V_p \times 10^4}{K_f B_m A_c F} \cdot \frac{I_p}{J} \right) + \left(\frac{V_s \times 10^4}{K_f B_m A_c F} \cdot \frac{I_s}{J} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดสมการใหม่จะได้

$$W_a A_c = \frac{(V_p I_p + V_s I_s) \times 10^4}{K_u K_f B_m F J}$$

กำลังขาออกคือ

$$P_o = V_s I_s$$

กำลังขาเข้าคือ

$$P_{in} = V_p I_p$$

และ

$$P_t = P_{in} + P_o$$

ดังนั้น

$$W_a A_c = \frac{P_t \times 10^4}{K_u K_f B_m F J}$$

เมื่อกำหนดให้

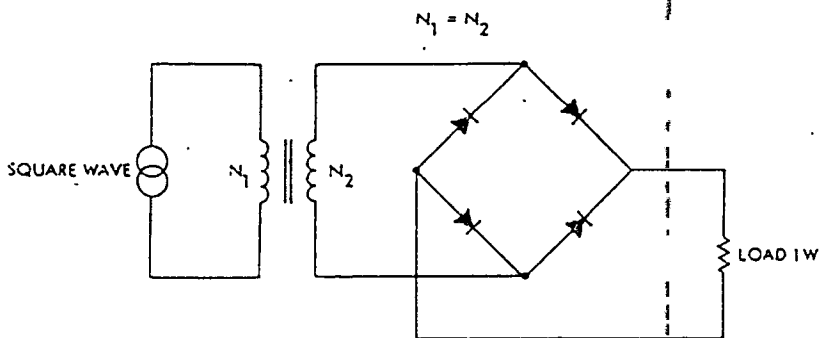
$$A_p = W_a A_c$$

ดังนั้น

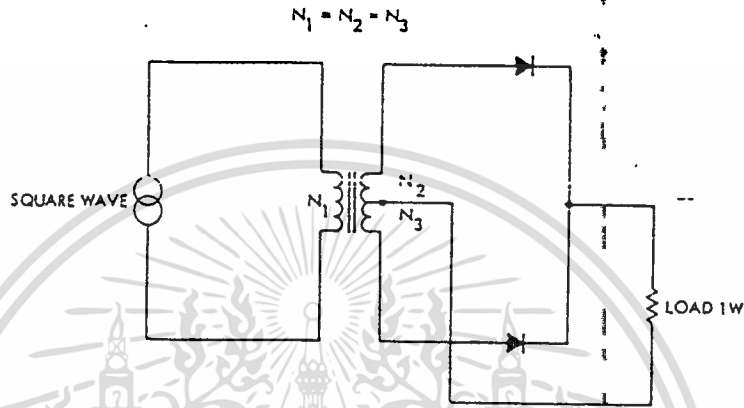
$$A_p = \frac{P_t \times 10^4}{K_u K_f B_m F J}$$

ผู้ออกแบบจะต้องให้ความสนใจกับ ความสามารถในการรองรับพลังงานที่ปรากฏ (P_t) ของแกนหม้อแปลงและขดลวด โดย P_t นี้จะมีค่าอยู่ช่วง 2-2.828 เท่าของ P_{in} โดยจะมีค่าเป็นเท่าไรนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรที่ใช้หม้อแปลงนั้นๆ ขนาดของหม้อแปลงที่ใช้ นั้น นอกจากจะถูกกำหนดโดยโหลดแล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งานด้วย เพราะว่า ลักษณะของกระแสที่แตกต่างกันจะทำให้ความสูญเสียในลวดทองแดงมีค่าแตกต่างกันด้วย

ยกตัวอย่างเช่น สำหรับวงจรฟูลเวฟบริดจ์ดังในรูป จะมี $P_t = 2P_{in}$

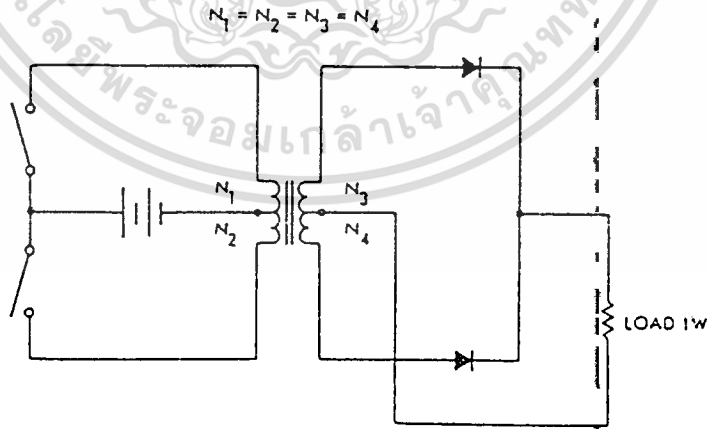


ส่วนวงจรที่มีฟูลเวฟเซนเตอร์เทปทางด้านทุติยภูมิคงในรูป จะมีพลังงานที่ปรากฏ เพิ่มขึ้น เป็น 20.7 % เนื่องจากลักษณะของรูปคลื่นกระแสที่เปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากผลของกระแสอินเทอร์รับที่ไหลในขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะทำให้ได้ $P_r = P_o \left(\frac{1 + \sqrt{2}}{\eta} \right)$



รูปที่ 4.3 แสดงวงจรที่มีฟูลเวฟเซนเตอร์เทปทางด้านทุติยภูมิ

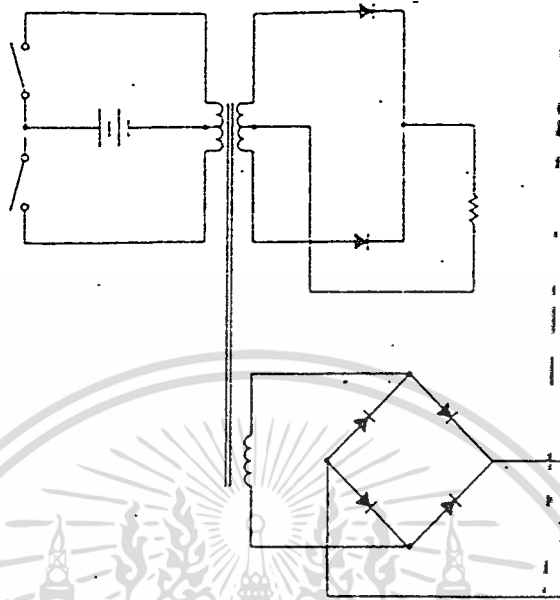
และสำหรับวงจรฟูลฟูลเวฟเซนเตอร์เทปคงในรูป ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ในวงจรดีซี-ทู-ดีซี คอนเวอร์เตอร์จะมีกำลังงานที่ปรากฏ เพิ่มขึ้นเป็น 2.828 เท่าของ P_{in} อันเนื่องมาจากผลของกระแสอินเทอร์รับที่ไหลทั้งในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิซึ่งจะได้ $P_r = P_o \left(\frac{\sqrt{2} + \sqrt{2}}{\eta} \right)$



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรฟูลฟูลเวฟเซนเตอร์เทป

4.4 กรณีที่หม้อแปลงมีหลาย Output

ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงถึงการหากำลังงานที่ปรากฏ (P) สำหรับกรณีที่หม้อแปลงมีการต่อ โหลดทางด้านขาออกมากกว่า 1 ชุด โดยในที่นี้สมมติให้วงจรทางด้านขาออกเป็นแบบ เซน เอกสาร์เตอร์เทป และฟูลเวฟบริดจ์ ดังในรูปที่ 4.5 การศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรด้านขาออกเป็นแบบเซนเตอร์แทปและฟูลเวฟบริดจ์

กำหนดให้เอาต์พุตของเซนเตอร์แทปเป็น 5 V และ 10 A ส่วนเอาต์พุตของ ฟูลเวฟบริดจ์ เป็น 15V และ 1A สำหรับสัปดาห์ไฟฟ้าตกคร่อม ไดโอดจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1V และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.95

จากข้อความที่กำหนดให้ข้างต้นจะสามารถหาค่ากำลังทางด้านขาออกของหม้อแปลงได้ดังนี้

$$P_{o1} = (V_{o1} + V_d)(I_{o1})$$

$$P_{o1} = (5 + 1)(10)$$

$$P_{o1} = 60 \quad [\text{Watt}]$$

และ

$$P_{o2} = (V_{o2} + 2V_d)(I_{o2})$$

$$P_{o2} = (15 + 2)(1)$$

$$P_{o2} = 17 \quad [\text{Watt}]$$

จากการที่มีวงจรแบบเซนเตอร์-แทปต่ออยู่กับขดลวดของหม้อแปลงซึ่งจะทำให้ได้กระแสที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นกำลังที่เกิดขึ้นในขดลวดของหม้อแปลงไม่ว่าเซนเตอร์-แทปทางด้านปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ จะต้องถูกคูณด้วยแฟกเตอร์ U โดยถ้าขดลวดมีเซนเตอร์-แทป U จะมีค่าเท่ากับ 1.41 และถ้าไม่มีเซนเตอร์-แทป U จะเท่ากับ 1 และจากการที่ลักษณะของวงจรที่ต่อกับขดลวดของหม้อแปลงมีหลายรูปแบบ ดังนั้น P_r ของวงจรทั้งหมดจะหาได้จากผลรวมของกำลังขาออกของวงจรแต่ละแบบ ซึ่งเราจะได้ว่า

ผลรวมของกำลังขาออก คือ

$$P_{\Sigma} = P_{o1}(U) + P_{o2}(U) + \dots + P_{on}(U)$$

สำหรับวงจรในรูปจะได้ว่า

$$P_{\Sigma} = P_{o1}(U) + P_{o2}(U)$$

$$P_{\Sigma} = (60)(1.41) + (17)(1)$$

$$P_{\Sigma} = 101.6 \quad [\text{Watt}]$$

หลังจากที่เรารวมกำลังทางด้านทุติยภูมิเรียบร้อยแล้ว ก็จะสามารหกำลังทางด้านปฐมภูมิได้โดย

$$P_{in} = \frac{P_{\Sigma}}{\eta}$$

$$P_{in} = \frac{101.6}{0.95}$$

$$P_{in} = 106.3 \quad [\text{Watt}]$$

ดังนั้นจะได้ P_t คือ

$$P_t = P_{in}(U) + P_{\Sigma}$$

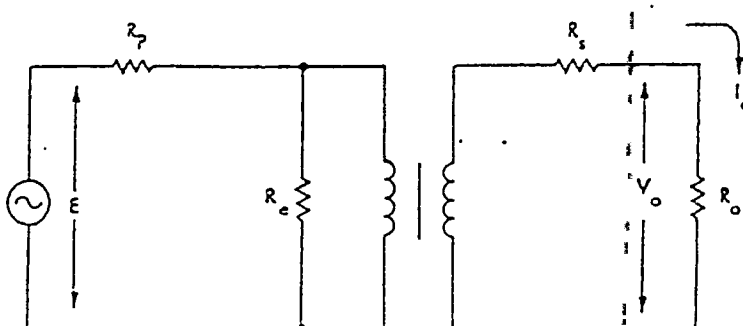
$$P_t = (106.3)(1.41) + 101.6$$

$$P_t = 251 \quad [\text{Watt}]$$

4.5 การกระเพื่อมของแรงดัน

โดยทั่วไปแล้วขนาดของหม้อแปลงจะถูกกำหนดโดยข้อจำกัดทางด้านอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และค่าแรงดันกระเพื่อมซึ่งเราสามารถที่จะยอมรับได้โดยที่เรากู้เรชั่นนี้จะถูกกำหนดด้วยสัญญาณลักษณะ α และจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์

ในรูปที่ 4.6 แสดงถึงวงจรของหม้อแปลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.6 แสดงถึงวงจรของหม้อแปลง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุทางด้านทุติยภูมิมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ และ ลักษณะการพันขดลวดจะถูกออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นแรงไม่เหล็กรั่วอยู่ในระดับที่คำนวณสามารถละทิ้งได้ที่ทุกๆสภาวะการทำงาน

แรงดันกระเพื่อมของหม้อแปลงสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

$$\alpha = \frac{V_{o(NL)} - V_{o(FL)}}{V_{o(FL)}} \times 100 \quad [\%]$$

โดยที่ $V_{o(NL)}$ คือ โวลต์เทจของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด

$V_{o(FL)}$ คือ โวลต์เทจของหม้อแปลงขณะรับโหลด

และเพื่อความสะดวกจึงกำหนดให้ หม้อแปลงในรูปที่ 3.6 เป็นหม้อแปลงแบบแยกขดลวด โดยมีอัตราส่วนระหว่างขดลวดเท่ากับ 1:1 และกำหนดให้ ความต้านทานของแกนเหล็กมีค่าเป็นอนันต์

ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{in} = I_o \quad \text{และ} \quad R_p = R_s$$

และถ้าขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิใช้พื้นที่ของหน้าตัดเท่ากันและมีความหนาแน่นของกระแสเท่ากันจะได้ว่า

$$\Delta V_p = I_{in} R_p = \Delta V_s = I_o R_s$$

ดังนั้นแรงดันกระเพื่อมจะเท่ากับ

$$\alpha = \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \times 100 \right) + \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} \times 100 \right)$$

คุณสมบัติข้างต้นด้วยกระแส

$$\alpha = \left(\frac{\Delta V_p I_{in}}{V_p I_{in}} \times 100 \right) + \left(\frac{\Delta V_s I_o}{V_s I_o} \times 100 \right)$$

ความสูญเสียของขดลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ คือ

$$P_p = \Delta V_p I_{in}$$

ความสูญเสียของขดลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ คือ

$$P_s = \Delta V_s I_o$$

ดังนั้นจะได้ความสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด คือ

$$P_{cu} = P_p + P_s$$

สามารถเขียนสมการเรกกูเรชันได้ใหม่เป็น

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} \times 100 \quad [\%]$$

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกนกับแรงดันกระแสเพิ่มของหม้อแปลง

นอกจากเราจะใช้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นข้อกำหนดในการออกแบบหม้อแปลงแล้วก็ตาม เรายังสามารถใช้การกำหนดแรงดันกระแสเพิ่มมาช่วยในการออกแบบหม้อแปลงได้อีกด้วย โดยที่แรงดันกระแสเพิ่มและความสามารถในการรองรับพลังงาน หรือ P_t ของแกนจะมีความสัมพันธ์กัน โดยอาศัยแฟกเตอร์สองตัวคือ K_g และ K_e ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{P_t}{2K_g K_e} \quad [\%]$$

โดยที่ α คือ ค่าแรงดันกระแสเพิ่ม

ค่าคงที่ K_g คือ สัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน และจะถูกกำหนดโดยลักษณะทางเรขาคณิตของแกน คือ

$$K_g = \frac{W_a A_c^2 K_u}{MLT} \quad [\text{cm}^5]$$

ค่าคงที่ K_e จะถูกกำหนดโดยสภาพทางแม่เหล็กและไฟฟ้าที่สภาวะการทำงานดังนี้ คือ

$$K_e = 0.145 K_f^2 F^2 B_m^2 \times 10^{-4}$$

โดยที่ K_f คือ สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับลักษณะของรูปคลื่นของกระแส ดังนี้

$$K_f = 4.44 \quad \text{สำหรับแรงดันที่เป็นคลื่นรูปไซน์ (Sine Wave)}$$

$$K_f = 4.0 \quad \text{สำหรับแรงดันที่เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave)}$$

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่และความสามารถในการรองรับพลังงานของแกน

จากการพัฒนาขึ้นมาของเทคนิคใหม่ทำให้เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการรองรับพลังงานของแกน และค่า A_p ดังนี้ คือ

$$A_p = \left(\frac{P_t \times 10^4}{K_f B_m K_u K_j F} \right)^x \quad [\text{cm}^4]$$

โดยที่ค่า x จะหาได้จากตารางที่ 4.1 และ K_f จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปคลื่นของกระแส

จากสมการข้างต้นเราจะพบว่า แฟกเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ความถี่สัมประสิทธิ์ของหน้าต่าง ซึ่งแสดงถึงพื้นที่สูงสุดที่สามารถใช้ได้ของขั้วลวด ค่าคงที่ K_j ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิเพิ่ม เหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อค่า A_p ของหม้อแปลง และค่า K_j นี้จะเป็นพารามิเตอร์ตัวใหม่ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถใช้ในการควบคุมความสูญเสียในลวดทองแดงของหม้อ

เอกสารนี้แปลได้อีกด้วย วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของแกนแบบต่าง ๆ

แกน Core	ค่าสูญเสีย losses	K_j 25 c	K_j 50 c	x	y	K_v	K_w	K_v
Pot Core	cu = fe	433	632	1.20	-0.17	33.8	48.0	14.5
Powder Core	cu >> fe	403	590	1.14	-0.12	32.5	58.8	13.3
Lamination	cu = fe	366	534	1.14	-0.12	41.3	68.2	19.7
C core	cu = fe	323	468	1.16	-0.14	39.2	66.6	17.9
Single-coil	cu >> fe	395	569	1.16	-0.14	44.5	76.6	25.6
Tape-wound	cu = fe	250	365	1.15	-0.13	50.9	82.3	25.0

โดยที่ cu คือความสูญเสียในขดลวด และ fe คือความสูญเสียในแกน

4.8 การตัดสินใจ ชนิดของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนหม้อแปลง

ค่า A_p และ K_g ของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิต ซึ่งได้แก่พื้นที่ผิว, ปริมาตร, น้ำหนัก และ เฟกเตอร์อื่นๆ ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิ เพิ่ม ซึ่งได้แก่ความหนาแน่นของกระแส โดยที่ A_p และ K_g นี้จะไม่มีมีความเกี่ยวข้องกับชนิดของสารแม่เหล็กเลย แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบมักจะต้องมีการตัดสินใจเลือกระหว่างประสิทธิภาพและขนาดของหม้อแปลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารแม่เหล็กที่เลือกไว้

4.9 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงโดยใช้วิธีผลคูณพื้นที่

1.) ก่อนการคำนวณเราจะต้องทราบข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวกับหม้อแปลงดังนี้

1. แรงดันขาเข้า (โวลต์)
2. แรงดันขาออก (โวลต์)
3. กระแสขาเข้า (แอมแปร์)
4. ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิรตซ์)
5. ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
6. อุณหภูมิเพิ่ม (องศาเซลเซียส)
7. ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา)
8. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก
9. ลักษณะของแกนเหล็ก

2.) คำนวณหาค่ากำลังทางด้านขาออก (โดยที่จะต้องพิจารณาถึงแรงดันตกคร่อมไดโอดที่อยู่ในวงจรด้วย)

จาก

$$P_o = VA \quad [\text{Watt}]$$

$$V = V_o + V_d \quad [\text{Volt}]$$

โดยที่

P_o คือกำลังทางด้านขาออก

V_o คือแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

V_d คือแรงดันตกคร่อมไดโอด

V คือแรงดันทางด้านขาออกของวงจร

A คือกระแสด้านขาออก

3.) คำนวณค่าพลังงานปรากฏ ; P_t

จาก

$$P_t = P_{in} + P_o \quad [\text{Watt}]$$

โดยที่

η คือประสิทธิภาพของหม้อแปลง

4.) คำนวณค่าผลคูณพื้นที่ ; A_p

จาก

$$A_p = \left(\frac{P_t \times 10^4}{K_f B_m K_u K_j F} \right)^x \quad [\text{cm}^2]$$

โดย

K_u คือสัมประสิทธิ์ของช่องหน้าต่าง = 0.4

K_j คือสัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นกระแส

K_f คือสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปคลื่นของกระแสคังนี้

$K_f = 4.4$ สำหรับคลื่นรูปไซน์ (Sine Wave)

$K_f = 4.0$ สำหรับคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave)

B_m คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

5.) ทำการเปรียบเทียบผลคูณพื้นที่ ที่คำนวณได้จากข้อมูลของแกนเพื่อทำการเลือกชนิดของ

แกน และต้องทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญลักษณ์ของแกน
- ผลคูณพื้นที่ ; A_p
- ความยาวเฉลี่ยของลวด 1 รอบ ; MLT
- พื้นที่หน้าตัดของแกน ; A_c
- พื้นที่ของหน้าตัด ; W_s
- พื้นที่ผิวของแกน ; A_s
- ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก ; MPL
- น้ำหนักของแกน ; W_{Fe}

6.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดซึ่งอยู่ทางด้านปฐมภูมิ ; N_p

จาก

$$N_p = \frac{V_p \times 10^4}{K_f B_m A_c F} \quad [\text{turn}]$$

7.) คำนวณหากระแสทางด้านปฐมภูมิ ; I_p

จาก

$$I_p = \frac{P_o}{\eta V_p} \quad [\text{A}]$$

8.) คำนวณหาความหนาแน่นของกระแส ; J โดยใช้ K_j และ y จากตาราง 3.1

จาก

$$J = K_j A_p^y \quad [\text{A/cm}^2]$$

9.) คำนวณหาขนาดขดลวดตัวนำเปลือย $A_{w(B)}$ ที่ใช้ทางด้านปฐมภูมิ (โดยถ้าวงจรเป็นแบบ เซ็นเตอร์-แทป จะต้องคูณ I_p ด้วย 0.707)

จาก

$$A_{w(B)} = \frac{I_p}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

10.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย (โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือก สายที่ขนาดเล็กกว่าถัดลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- เบอร์ของสาย
- ขนาดของสาย
- $\mu\Omega/\text{cm}$

11.) คำนวณหาความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $R_p = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) \times 10^{-6}$ ไม่นับ [Ω] ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.) คำนวณหาความสูญเสียในขดลวดปฐมภูมิ

$$P_p = I_p^2 R_p \quad [\text{Watt}]$$

13.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$$N_s = \frac{N_p V_s}{V_p} \quad [\text{turn}]$$

14.) คำนวณหาขนาดขดลวดตัวนำเปลือก $A_{w(B)}$ ที่ใช้ทางด้านทุติยภูมิ (โดยถ้าวงจรเป็นแบบ เซ็นเตอร์-แทป จะต้องคูณ I_p ด้วย 0.707)

จาก

$$A_{w(B)} = \frac{I_o}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

15.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย (โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือก สายที่ขนาดเล็กลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- เบอร์ของสาย
- ขนาดของสาย
- $\mu\Omega/\text{cm}$

16.) คำนวณหาความต้านทานของขดลวดด้านทุติยภูมิ

$$R_s = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

17.) คำนวณหาความสูญเสียในขดลวดทุติยภูมิ

$$P_s = I_o^2 R_s \quad [\text{Watt}]$$

18.) คำนวณหาความสูญเสียของขดลวดโดยรวม ; P_{cu}

$$P_{cu} = P_p + P_s \quad [\text{Watt}]$$

19.) คำนวณหาค่าความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ; P_Σ

$$P_\Sigma = \frac{P_o}{\eta} - P_o \quad [\text{Watt}]$$

20.) คำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ; P_{fe}

$$P_{fe} = P_\Sigma - P_{cu} \quad [\text{Watt}]$$

21.) คำนวณหาค่าความสูญเสียในหน่วยของ มิลลิวัตต์ต่อกรัม

$$\text{Core loss} = \frac{P_{fe}}{W_{fe} \times 10^{-3}} \quad [\text{mW/g}]$$

22.) ใช้กราฟของความสูญเสียในแกนเหล็กที่เหมาะสม เพื่อหาวัสดุที่ใช้ทำแกนตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

23.) หาค่า พลังงานสูญเสียต่อพื้นที่ผิว ; Ψ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Psi = \frac{P_{cu} + P_{fe}}{A_t} \quad [\text{W/cm}^2]$$

4.10 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงโดยวิธีเรขาคณิตของแกน

1.) ก่อนการคำนวณเราจะต้องทราบข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวกับหม้อแปลงดังนี้

1. แรงดันขาเข้า (โวลต์)
2. แรงดันขาออก (โวลต์)
3. กระแสขาเข้า (แอมแปร์)
4. ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิรตซ์)
5. ประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)
6. แรงดันกระเพื่อม (โวลต์)
7. ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (เทสลา)
8. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก
9. ลักษณะของแกนเหล็ก

2.) คำนวณหาค่ากำลังทางด้านขาออก (โดยที่จะต้องพิจารณาถึงแรงดันตกคร่อมไดโอดที่อยู่ในวงจรด้วย)

จาก

$$P_o = VA \quad [\text{Watt}]$$

$$V = V_o + V_d \quad [\text{Volt}]$$

โดยที่

- P_o คือกำลังทางด้านขาออก
 V_o คือแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง
 V_d คือแรงดันตกคร่อมไดโอด
 V คือแรงดันทางด้านขาออกของวงจร
 A คือกระแสด้านขาออก

3.) คำนวณค่าพลังงานปรากฏ ; P_t

จาก

$$P_t = P_{in} + P_o \quad [\text{Watt}]$$

4.) คำนวณหาสภาพทางไฟฟ้า : K_e

จาก

$$K_e = (0.145) K_f^2 B_m^2 F^2 \times 10^{-4}$$

5.) คำนวณหาค่าคอร์ จีออเมทรี ; K_g

จาก

$$K_g = \frac{P_t}{2K_e \alpha}$$

โดยที่

α คือค่าแรงดันกระเพื่อม

6.) ทำการเปรียบเทียบคอร์ จีออเมทรี ที่คำนวณได้จากข้อมูลของแกนเพื่อทำการเลือกชนิดของแกน และต้องทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- สัญลักษณ์ของแกน
- ผลคูณพื้นที่ ; A_p
- K_g
- ความยาวเฉลี่ยของสวด 1 รอบ ; MLT
- พื้นที่หน้าตัดของแกน ; A_c
- พื้นที่ของหน้าตัด ; W_s
- พื้นที่ผิวของแกน ; A_t
- ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเค้นแม่เหล็ก ; MPL
- น้ำหนักของแกน ; W_{fe}

7.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดซึ่งอยู่ทางด้านปฐมภูมิ ; N_p

จาก

$$N_p = \frac{V_p \times 10^4}{K_f B_m A_c F} \quad [\text{turn}]$$

8.) คำนวณหากระแสทางด้านปฐมภูมิ ; I_p

จาก

$$I_p = \frac{P_o}{\eta V_p} \quad [A]$$

9.) คำนวณหาความหนาแน่นของกระแส ; J

จาก

$$J = \frac{P_t \times 10^4}{K_f B_m A_p F} \quad [A/cm^2]$$

10.) คำนวณหาขนาดขดลวดตัวนำเปลือย $A_{w(2)}$ ที่ใช้ทางด้านปฐมภูมิ (โดยถ้าวงจรเป็นแบบ เซ็นเตอร์-แทป จะต้องคูณ I_p ด้วย 0.707)

จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_w(B) = \frac{I_p}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

11.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย(โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือก สายที่ขนาดเล็กกว่าถัดลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- เบอร์ของสาย
- ขนาดของสาย
- $\mu\Omega/\text{cm}$

12.) คำนวณหาความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิ

$$R_p = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

13.) คำนวณหาความสูญเสียในขดลวดปฐมภูมิ

$$P_p = I_p^2 R_p \quad [\text{Watt}]$$

14.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$$N_s = \frac{N_p V_s}{V_p} \left(1 + \frac{\alpha}{100} \right) \quad [\text{turn}]$$

15.) คำนวณหาขนาดขดลวดตัวนำเปลือย $A_w(B)$ ที่ใช้ทางด้านทุติยภูมิ (โดยถ้าวงจรเป็นแบบ เซ็นเตอร์-แทป จะต้องคูณ I_p ด้วย 0.707)

จาก

$$A_w(B) = \frac{I_o}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

16.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย(โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือก สายที่ขนาดเล็กกว่าถัดลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- เบอร์ของสาย
- ขนาดของสาย
- $\mu\Omega/\text{cm}$

17.) คำนวณหาความต้านทานของขดลวดด้านทุติยภูมิ

$$R_s = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

18.) คำนวณหาความสูญเสียในขดลวดทุติยภูมิ

$$P_s = I_o^2 R_s \quad [\text{Watt}]$$

19.) หาค่าแรงดันกระแสเฟืองของหม้อแปลง

จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{P_{cu} \times 100}{P_o} \quad [\%]$$

โดยที่

$$P_{cu} = P_p + P_s \quad [\text{Watt}]$$

20.) คำนวณหาค่าความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง ; P_{Σ}

$$P_{\Sigma} = \frac{P_o}{\eta} - P_o \quad [\text{Watt}]$$

21.) คำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ; P_{fe}

$$P_{fe} = P_{\Sigma} - P_{cu} \quad [\text{Watt}]$$

22.) คำนวณหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็กในหน่วยของ มิลลิวัตต์ต่อกรัม

$$\text{Core loss} = \frac{P_{fe}}{W_{fe}} \quad [\text{mW/g}]$$



บทที่ 5

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

5.1 บทนำ

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำนั้น ก็จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการออกแบบหม้อแปลงกำลัง และมีตัวแปรในการพิจารณาค่า ๆ กัน นอกจากนั้น ยังมีวิธีการออกแบบซึ่งใช้หลักการเดียวกัน อีกด้วย คือ พิจารณาโดยอาศัยอุณหภูมิเพิ่ม และ พิจารณาจากแรงดันกระแสเพิ่ม ให้อยู่ในขอบเขตที่เราต้องการ

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกนและความสามารถในการรองรับพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำนั้น ดังได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้ว ก็จะคล้ายกับการออกแบบหม้อแปลงคือ นอกจากจะออกแบบโดยอาศัยอุณหภูมิเพิ่มแล้ว ยังสามารถออกแบบโดยใช้แรงดันกระแสเพิ่มได้อีกด้วย โดยแรงดันกระแสเพิ่มและความสามารถในการรองรับพลังงานของแกน จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ K_g และ K_e ดังสมการคือ

$$\alpha = \frac{(Energy)^2}{K_g K_e} \quad [%]$$

เมื่อ α คือ แรงดันกระแสเพิ่ม [%]

โดยที่ค่าคงที่ K_g จะถูกกำหนดโดยลักษณะทางเรขาคณิตของแกนดังนี้คือ

$$K_g = \frac{W_a A_c^2 K_u}{MLT} \quad [cm^3]$$

ค่าคงที่ K_e จะถูกกำหนดโดยสภาพทางแม่เหล็กและไฟฟ้าที่สภาวะการทำงาน

$$K_e = 0.145 P_o B_m^2 \times 10^{-4}$$

โดยที่ P_o คือ กำลังทางค่านาออก

และ

$$B_m = B_{dc} + \frac{B_{ac}}{2} \quad [T]$$

ซึ่งจากสมการข้างต้นจะเห็นว่าขนาดของอินดักเตอร์จะขึ้นกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กด้วย

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่และความสามารถในการรองรับพลังงานของ

ตัวเหนี่ยวนำที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ความสามารถในการรองรับพลังงานของแกนจะมีความสัมพันธ์กับค่า A_p ดังในสมการนี้
คือ

$$A_p = \left(\frac{2(\text{Energy}) \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right)^{1.14} \quad [\text{cm}^4]$$

โดยที่

K_j คือ สัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นกระแส

K_u คือ สัมประสิทธิ์ของช่องหน้าต่าง

B_m คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

Energy จะมีหน่วยเป็น Watt-Second

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก, สัมประสิทธิ์ของช่องหน้าต่างและค่าคงที่ K_j ต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าผลคูณพื้นที่ของตัวเหนี่ยวนำ และนอกจากนี้ค่าคงที่ K_j ยังเป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถใช้กำหนดค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงได้อีกด้วย

5.3.1 การพิจารณาขั้นพื้นฐาน

การออกแบบลิเนียร์รีแอกเตอร์ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ 4 ตัวดังนี้คือ

1 ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

2 กระแสไฟตก

3 กระแสไฟสลับ

4 กำลังสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่ม

เมื่อมีความต้องการเหล่านี้เกิดขึ้น ผู้ออกแบบจะต้องทำการกำหนดค่าสูงสุดของ B_{dc} และ B_{ac} ซึ่งจะต้องไม่ทำให้เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็กและจะต้องได้ค่าความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กสูงที่สุดด้วย ซึ่งสารแม่เหล็กแต่ละชนิดจะเกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็กต่างกัน

มีข้อเสนอแนะว่า ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงที่สุดซึ่งขึ้นกับผลรวมของ B_{dc} และ B_{ac} ควรจะเป็นดังนี้คือ

$$B_{\max} = B_{dc} + B_{ac} \quad [T]$$

$$B_{dc} = \frac{0.4 \pi N I_{dc} \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [T]$$

$$B_{ac} = \frac{0.4 \pi N \left(\frac{\Delta I}{2}\right) \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [T]$$

เมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกันจะได้

$$B_{\max} = \frac{0.4 \pi N I_{dc} \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} + \frac{0.4 \pi N (\frac{\Delta I}{2}) \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [T]$$

ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีแกนที่ทำจากสารแม่เหล็ก ซึ่งรับกระแสตรงและมีช่องว่างอากาศ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$L = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [\text{Henry}]$$

ซึ่งสมการนี้แสดงให้เห็นว่า ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นกับความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลรวมของความยาวของช่องอากาศ (l_g) และอัตราส่วนระหว่างความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็กในแกนกับความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ของตัวนำแม่เหล็ก (l_m/μ_r)

และเมื่อความยาวของช่องอากาศ มีค่ามากกว่าอัตราส่วน l_m/μ_r มาก ๆ เนื่องจากความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสูงมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ μ_r จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความยาวเฉลี่ยทั้งหมดของเส้นทางเดินแม่เหล็ก หรือ ค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของความเหนี่ยวนำได้ใหม่คือ

$$L = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g} \quad [\text{Henry}]$$

ส่วนในการหาขนาดของช่องว่างอากาศนั้นจะต้องพิจารณาถึงผลของ ฟริงกิง ฟลักซ์ ด้วย โดยฟริงกิง ฟลักซ์ นี้จะเป็นฟังก์ชันกับ ขนาดความยาวของช่องว่างอากาศ, รูปร่างของผิวหน้าของขั้ว, รูปขนาดและตำแหน่งของขดลวด ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีผลทำให้ความยาวของช่องอากาศเสมือนว่าสั้นลง

ฟริงกิง ฟลักซ์จะทำให้ค่า รีลักแตนซ์ โดยรวมของเส้นทางเดินแม่เหล็กลดลง ซึ่งทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นโดยเป็น ฟังก์ชันกับ F (ฟริงกิง ฟลักซ์) ซึ่งจะทำให้ความเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าในสมการข้างต้น

ฟริงกิง ฟลักซ์ หาได้จาก

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln \left(\frac{2G}{l_g} \right)$$

โดยที่ G เป็นขนาดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำเมื่อรวมผลของฟริงกิง ฟลักซ์ จะเป็นดังนี้คือ

$$L = \frac{0.4 \pi N^2 A_c F \times 10^{-8}}{l_g} \quad [\text{Henry}]$$

ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_{\Delta} = \frac{\mu_m}{I + \mu_m(l_g/l_m)}$$

โดย μ_m คือ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ทำแกน

หลังจากที่หาค่าความเหนี่ยวนำและกระแสไฟตรงได้แล้ว เราก็จะสามารถกำหนดขนาดของตัวเหนี่ยวนำได้ โดยอาศัยการพิจารณาจากค่าความสามารถในการรองรับพลังงาน ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับค่า A_p อีกต่อหนึ่ง

โดยที่ ค่าความสามารถในการรองรับพลังงานของแกนจะหาได้จาก

$$Energy = \frac{LI^2}{2} \quad [\text{Watt-second}]$$

และ

$$A_p = \left(\frac{2(Energy) \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right)^{1.16} \quad [\text{cm}^4]$$

โดยที่

B_m = ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด Bdc+Bac

K_u = 0.4

5.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธีผลคูณพื้นที่

1.) ก่อนการออกแบบจะต้องทราบค่าต่างๆดังนี้

1. ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี่)
2. ค่ากระแสไฟตรง (แอมแปร์)
3. ค่ากระแสไฟสลับ (แอมแปร์)
4. ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิร์ตซ)
5. ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เทสลา)
6. อุณหภูมิเพิ่ม (องศาเซลเซียส)
7. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกน
8. ลักษณะของแกน

2.) คำนวณหาค่าความสามารถในการรองรับพลังงาน

จาก

$$Energy = \frac{LI^2}{2} \quad [\text{Watt-second}]$$

3.) คำนวณค่าผลคูณพื้นที่ ; A_p

จาก

$$A_p = \left(\frac{2(\text{Energy}) \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right)^x \quad [\text{cm}^4]$$

โดยที่

$$K_u = \text{สัมประสิทธิ์ของช่องหน้าต่าง} = 0.4$$

4.) ทำการเปรียบเทียบค่า A_p ที่คำนวณได้กับข้อมูลของแกน เพื่อทำการเลือกชนิดของแกน จากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- ลักษณะของแกน
- ค่าผลคูณพื้นที่ ; A_p
- ความยาวเฉลี่ยของลวด 1 รอบ ; MLT
- พื้นที่หน้าตัดของแกน ; A_c
- พื้นที่ของช่องหน้าต่าง ; W_a
- พื้นที่ผิวของแกน ; A_t
- ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก ; MPL
- น้ำหนักของแกน ; W_{fe}
- ขนาดของช่องหน้าต่าง ; G

5.) คำนวณหาความหนาแน่นกระแส ; J

จาก

$$J = K_j A_p^y \quad [\text{A/cm}^2]$$

6.) คำนวณหาขนาดของสายตัวนำเปลือย ; $A_{w(B)}$

จาก

$$A_{w(B)} = \frac{I_o + \Delta I / 2}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

โดยที่

I_o = กระแสไฟตรง

ΔI = กระแสไฟสลับ

7.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย (โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือกสายที่เล็กกว่าถัดลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- เบอร์ของสาย
- ขนาดของสาย
- $\mu\Omega/\text{cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จาก

$$W_{d(eff)} = W_a \times S_3$$

โดยที่

$$S_3 = 0.75 \text{ (ดูที่มาได้จากบทที่ 7)}$$

9.) จำนวนหาจำนวนรอบของขดลวด ; N

จาก

$$N = \frac{W_{d(eff)} \times S_2}{A_w} \quad [\text{turn}]$$

โดยที่

$$S_2 = 0.6 \text{ (ดูได้จากบทที่ 7)}$$

10.) จำนวนหาระยะของช่องว่างอากาศ ; l_g

จาก

$$l_g = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L} \quad [\text{cm}]$$

โดยที่ระยะของช่องว่างอากาศนี้จะต้องสอดคล้องกับค่าที่เข้าไปถึงกระดาษนี้จะมีความหนาอยู่ในหน่วยของ mil ดังนั้นเราต้องแปลง l_g ซึ่งมีหน่วยในเซนติเมตรให้เป็น mil ดังนี้

$$\text{mils} = \text{cm} \times 393.7$$

ทำการปัดค่าที่ได้ให้เป็นจำนวนเต็มคู่ที่ใกล้ที่สุดและคูณด้วย 2.54 ซึ่งจะได้ระยะช่องว่างอากาศที่ต้องการในหน่วยเซนติเมตร

11.) จำนวนหา ฟริงกิง ฟลักซ์

จาก

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln\left(\frac{2G}{l_g}\right)$$

โดยที่

G คือ ขนาดของช่องหน้าต่างของแกน

12.) จำนวนหาจำนวนรอบของขดลวดใหม่อีกครั้ง โดยใช้ ฟริงกิงฟลักซ์ ที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว

$$N = \sqrt{\frac{l_g L}{0.4 \pi A_c F \times 10^{-8}}} \quad [\text{turn}]$$

13.) จำนวนหาความต้านทานของขดลวด

จาก

$$R = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{cm} \right) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

14.) คำนวณหาความสูญเสียในลวดทองแดง ; P_{cu}

จาก

$$P_{cu} = I^2 R \quad [\text{Watt}]$$

15.) คำนวณหาผลรวมของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากส่วนของกระแสตรงและกระแสสลับ

จาก

$$B_m = \frac{0.4 \pi N (I_{dc} + \Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [\text{T}]$$

16.) คำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนของกระแสสลับ

จาก

$$B_{ac} = \frac{0.4 \pi N (\Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [\text{T}]$$

17.) หาค่าความสูญเสีย วัตต์ต่อกิโลกรัม จากกราฟของความสูญเสียในแกน จากนั้นจึงหาค่าความสูญเสียในแกน ดังนี้

$$P_{fe} = (W/kg) W_{tfe} \quad [\text{Watt}]$$

18.) คำนวณค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด

จาก

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe} \quad [\text{Watt}]$$

19.) คำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียต่อพื้นที่ผิว

จาก

$$\Psi = \frac{P_{\Sigma}}{A_f} \quad [\text{Watt/cm}^2]$$

5.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธีสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน

1.) ก่อนการออกแบบจะต้องทราบค่าต่างๆดังนี้

1. ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี่)
2. ค่ากระแสไฟตรง (แอมแปร์)
3. ค่ากระแสไฟสลับ (แอมแปร์)
4. ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิร์ตซ)
5. ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เทสลา)
6. กำลังทางค่านาออก (วัตต์)

7. แรงดันกระเพื่อม (เปอร์เซ็นต์)
8. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกน
9. ลักษณะของแกน

2.) คำนวณหาค่าความสามารถในการรองรับพลังงาน

จาก

$$Energy = \frac{LI^2}{2} \quad [\text{Watt-second}]$$

3.) คำนวณค่าสภาพทางไฟฟ้า ; K_e

จาก

$$K_e = 0.145 P_o B_m^2 \times 10^{-4}$$

4.) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน ; K_g

จาก

$$K_g = \frac{(Energy)^2}{\alpha K_e} \quad [\text{cm}^5]$$

5.) ทำการเปรียบเทียบ ค่า K_g ที่คำนวณได้กับข้อมูลของแกน เพื่อทำการเลือกชนิดของแกน จากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- ลักษณะของแกน
- ผลคูณพื้นที่ ; A_p
- ค่า K_g
- ความยาวเฉลี่ยของขดลวด 1 รอบ ; MLT
- พื้นที่หน้าตัดของแกน ; A_o
- พื้นที่ของช่องหน้าต่าง ; W_u
- พื้นที่ผิวของแกน ; A_t
- ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก ; MPL
- น้ำหนักของแกน ; W_{fe}
- ขนาดของช่องหน้าต่าง ; G

6.) คำนวณหาความหนาแน่นกระแส ; J

จาก

$$J = \frac{2(Energy) \times 10^{-4}}{B_m A_p K_u} \quad [\text{A/cm}^2]$$

7.) คำนวณหาขนาดของสายตัวนำเปลือย ; $A_{w(B)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จาก

$$A_w(B) = \frac{I_o + \Delta I / 2}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

8.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย (โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือกสายที่เล็กกว่าถัดลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- เบอร์ของสาย
- ขนาดของสาย
- $\mu\Omega/\text{cm}$

9.) คำนวณค่าความกว้างช่องหน้าต่างประสิทธิภาพ ; $W_{a(\text{cm})}$

จาก

$$W_{a(\text{eff})} = W_a \times S_3$$

โดยที่

$$S_3 = 0.75 \quad (\text{ดูที่มาได้จากบทที่ 7})$$

10.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด ; N

จาก

$$N = \frac{W_{a(\text{eff})} \times S_2}{A_w} \quad [\text{turn}]$$

โดยที่

$$S_2 = 0.6 \quad (\text{ดูได้จากบทที่ 7})$$

11.) คำนวณหาระยะของช่องว่างอากาศ

จาก

$$l_g = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L} \quad [\text{cm}]$$

โดยที่ช่องว่างอากาศนี้จะต้องสอดกระดาษฟเข้าไปซึ่งกระดาษนี้จะมีขนาดอยู่ในหน่วยของ mil ดังนั้นเราต้องแปลง l_g ซึ่งมีหน่วยในเซนติเมตรให้เป็น mil ดังนี้

$$\text{mils} = \text{cm} \times 393.7$$

ทำการปัดค่าที่ได้ให้เป็นจำนวนเต็มคู่ที่ใกล้ที่สุดและคูณด้วย 2.54 ซึ่งจะได้ระยะช่องว่างอากาศที่ต้องการในหน่วยเซนติเมตร

12.) คำนวณหา ฟริงกิง ฟลักซ์

จาก

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln\left(\frac{2G}{l_g}\right)$$

โดยที่

G คือ ขนาดของช่องหน้าต่างของแกน

13.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดใหม่อีกครั้ง โดยใช้ ฟริงกิงฟลักซ์ ที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว

$$N = \sqrt{\frac{l_g L}{0.4 \pi A_c F \times 10^{-8}}} \quad [\text{turn}]$$

14.) คำนวณหาความต้านทานของขดลวด

จาก

$$R = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

15.) คำนวณหาความสูญเสียในลวดทองแดง ; P_{cu}

จาก

$$P_{cu} = I^2 R \quad [\text{Watt}]$$

16.) คำนวณหาค่าแรงดันกระเพื่อม ; α

จาก

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} \times 100 \quad [\%]$$

17) คำนวณหาผลรวมของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจากส่วนของกระแสดวงและกระแสดลัด

จาก

$$B_m = \frac{0.4 \pi N (I_{dc} + \Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [\text{T}]$$

18.) คำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนของกระแสดลัด

จาก

$$B_{ac} = \frac{0.4 \pi N (\Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [\text{T}]$$

19.) หาค่าความสูญเสีย วัตต์ต่อกิโลกรัม จากกราฟของความสูญเสียในแกนเหล็ก จากนั้นจึงหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนี้

$$P_{fe} = (W/kg) W_{tfe} \quad [\text{Watt}]$$

20.) คำนวณค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด

จาก

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe} \quad [\text{Watt}]$$

21.) คำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเหนี่ยวนำ

จาก

$$\eta = \frac{P_o \times 100}{P_o + P_{\Sigma}} \quad [\%]$$

22.) คำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียต่อพื้นที่ผิว

จาก

$$\Psi = \frac{P_{\Sigma}}{A_t} \quad [\text{Watt/cm}^2]$$



บทที่ 6

การเลือกแกนทอรอยด์ชนิดพาวเดอร์คอร์ที่ใช้ในวงจรไฟกระแสตรง

6.1 บทนำ

6.1.1 แกนชนิด โมลิบดีนัมเพอร์มัลลอยด์พาวเดอร์ (Molybdenum Permalloy Powder Core)

แกนชนิดโมลิบดีนัมเพอร์มัลลอยด์พาวเดอร์ หรือชื่อย่อว่า MPP core นั้น ถูกผลิตจากอนุภาคเล็ก ๆ ของ นิกเกิล 81% , เหล็ก 17% , โมลิบดีนัมอัลลอยด์ 2% ซึ่งผงละเอียดของอนุภาคเหล่านี้จะถูกเคลือบด้วยสารที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดกระแสไหลวนลงได้ และดังนั้น ก็จะทำให้พลังงานสูญเสียในแกนลดลงด้วย และยังเป็นตัวทำให้มีการกระจายช่องว่างอากาศให้กระจายไปตลอดทั่วทั้ง โครงสร้างของแกนนั้นด้วย หลังจากนั้นส่วนผสมต่าง ๆ นี้ก็จะถูกอัดขึ้นรูปให้อยู่ในลักษณะของแกนแบบทอรอยด์ ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกตั้งแต่ 0.1-5 นิ้ว และแกนชนิด MPP นี้จะมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ตั้งแต่ 14 จนถึง 550

แกนชนิด MPP นั้นมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่โดดเด่น ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภท

คุณสมบัติบางชนิดที่โดดเด่นของแกนชนิด MPP ได้แก่

มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง (0.7 T)

มีค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างต่ำ (น้อยกว่า 0.5 T)

ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อได้รับการกระตุ้นที่ระดับต่างๆ (เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 5% เมื่อกระตุ้นให้มีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจาก 0.001-0.2 T)

ค่าความสูญเสียในแกนมีค่าต่ำ (น้อยกว่า 20W/kg ที่ 50 kHz 0.1 T)

ต้านทานต่อกระแสไฟตรงที่มีขนาดมากโดยปราศจากการทำให้แกนอิ่มตัว

แกนชนิด MPP นี้ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในงานที่ต้องการความเชื่อถือได้สูง เช่น ในกิจการทหาร และกิจการทางอวกาศ เนื่องจากแกนชนิดนี้มีเสถียรภาพในช่วงของอุณหภูมิที่กว้าง และนอกจากนี้ ยังมีความสามารถในการต้านทานต่อการสั่นสะเทือน และรังสีต่าง ๆ โดยปราศจากการเสื่อมคุณสมบัติ การนำแกนชนิด MPP ไปใช้งานต่าง ๆ ได้แก่ ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นโหลดเพื่อลดสัญญาณรบกวนของตัวเก็บประจุในสายโทรศัพท์ , ตัวกรองสัญญาณรบกวน

แบบ differential mode , ตัวเก็บพลังงานหรือ ไซค์ (choke) ในวงจรที่มีกระแสไหลผ่านในปริมาณสูง เป็นต้น

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะเน้นเกี่ยวกับการเลือกแกนและออกแบบตัวเก็บพลังงานหรือ ไซค์ที่ใช้ในวงจรไฟกระแสตรง ซึ่งมีลูกคลื่นของไฟกระแสสลับปรากฏอยู่ด้วย

6.1.2 แกนชนิดไอรอนพาวเดอร์ (Iron Powder Core)

ในช่วงสมัยปัจจุบันและอนาคตต่อไปนี้ เรามีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่มีความถี่สูง ๆ การใช้แกนเหล็กที่ทำจากเหล็กแผ่นมาเรียงต่อกันนำมาใช้เป็นแกนของตัวเหนี่ยวนำ เราจะพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น และความสูญเสียในแกนก็จะสูงมากขึ้นเช่นกัน และถ้าเหล็กที่เป็นแผ่นนั้นมีขนาดบางมากขึ้น หรืออาจจะใช้วัสดุที่เป็นอนุภาคละเอียดมาก ๆ แล้วเคลือบอนุภาคนั้นด้วยฉนวน ก็จะสามารถลดกระแสไหลวนได้มาก ทำให้แกนประเภทนี้เหมาะสมสำหรับทำงานที่ความถี่สูง ๆ

ที่ความถี่สูงขึ้นไปมาก ๆ กระแสไหลวนจะไหลอยู่ทุกทิศทางในแกน ดังนั้นแกนที่ทำจากอนุภาคละเอียดดังเช่น แกนแบบไอรอนพาวเดอร์ ก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานในย่านความถี่ที่สูง ๆ นั้น

ช่องว่างอากาศที่กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในแกนประเภทนี้ ทำให้แกนมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 4-100 และเมื่อบวกกับคุณสมบัติของเหล็กเอง ที่มีจุดอิ่มตัวสูงอยู่แล้ว ทำให้แกนชนิดนี้ ยากที่จะอิ่มตัวได้

อย่างไรก็ตาม แกนชนิดนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่ที่ ความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ซึ่งมีค่าต่ำ ซึ่งจะทำให้ค่าสูญเสียในแกนมีค่ามากกว่าความถี่สูง ๆ แต่แกนชนิดนี้มีราคาต่ำเมื่อเทียบกับแกนชนิดอื่น

6.2 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรไฟกระแสตรง จะถูกนำมาใช้บ่อยครั้งในงานประเภทต่าง ๆ การเลือกชนิดของแกนก็มักจะทำโดยการลองผิดลองถูก

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำบ่อยครั้งเราต้องพิจารณาถึงผลของสนามแม่เหล็กที่จะไปรบกวนอุปกรณ์อื่น ๆ ในละแวกใกล้เคียง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าตัวเหนี่ยวนำนั้นถูกใช้ในวงจรที่มีกระแสสูง เช่น คอนเวอร์เตอร์ และสวิตชิงเรกกูเลเตอร์ ที่ใช้ในยานอวกาศ ถ้าเป็นเช่นนั้น แกนเทอร์อยด์ก็จะถูกนำมาใช้เพื่อลดปัญหาดังกล่าว

6.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณพื้นที่ และความสามารถในการรองรับพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ

ตามวิธีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ ความสามารถในการรองรับพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ มีความสัมพันธ์กับค่าผลคูณพื้นที่ ดังนี้

$$A_p = \left(\frac{2(\text{Energy}) \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right)^{1.14} \quad [\text{cm}^4]$$

โดยที่

K_j คือ สัมประสิทธิ์ของความหนาแน่นกระแส

K_u คือ สัมประสิทธิ์ของช่องหน้าต่าง

B_m คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

Energy จะมีหน่วยเป็น Watt-Second

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก, สัมประสิทธิ์ของช่องหน้าต่างและค่าคงที่ K_j ต่างก็มีอิทธิพลต่อค่า A_p ของตัวเหนี่ยวนำ และนอกจากนี้ค่าคงที่ K_j ยังเป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถใช้กำหนดค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงได้อีกด้วย

ค่าพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Energy} = \frac{LI^2}{2} \quad [\text{Watt-second}]$$

6.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน และความสามารถในการรองรับพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำก็เช่นเดียวกับหม้อแปลง ซึ่งสามารถออกแบบได้โดยการกำหนดอุณหภูมิเพิ่มให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด นอกจากนี้เรายังสามารถออกแบบโดยการกำหนดแรงดันกระแสเพิ่มให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดได้ด้วยเช่นกัน

$$\alpha = \frac{(\text{Energy})^2}{K_g K_e} \quad [\%]$$

เมื่อ α คือ แรงดันกระแสเพิ่ม [%]

โดยที่ค่าคงที่ K_g จะถูกกำหนดโดยลักษณะทางเรขาคณิตของแกนดังนี้คือ

$$K_g = \frac{W_a A_c^2 K_u}{MLT} \quad [\text{cm}^3]$$

ค่าคงที่ K_e จะถูกกำหนดโดยสภาพทางแม่เหล็กและไฟฟ้าที่สภาวะการทำงาน

$$K_e = 0.145 P_o B_m^2 \times 10^{-4}$$

โดยที่ P_0 คือ กำลังทางค่านขาออก

และ

$$B_m = B_{dc} + \frac{B_{ac}}{2} \quad [T]$$

$$B_{ac} = \frac{0.4 \pi N (\Delta I / 2) \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [T]$$

6.3 ข้อพิจารณาขั้นพื้นฐานในการออกแบบ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็น linear reactor ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สัมพันธ์กันดังนี้

1. ค่าความเหนี่ยวนำ (L)
2. ค่ากระแสไฟตรง (I_{dc} หรือ I_0)
3. ค่ากระแสไฟสลับ (ΔI)
4. ค่าพลังงานสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่ม

ตารางที่ 6.1 ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ของแกนแบบพาวเวอร์

PERMEABILITY	PERMEABILITY WITH DC BIAS HDC = 50 Oersted
10	10
22	20
33	27.7
35	31.9
55	40.7
60	37.2
75	38.5

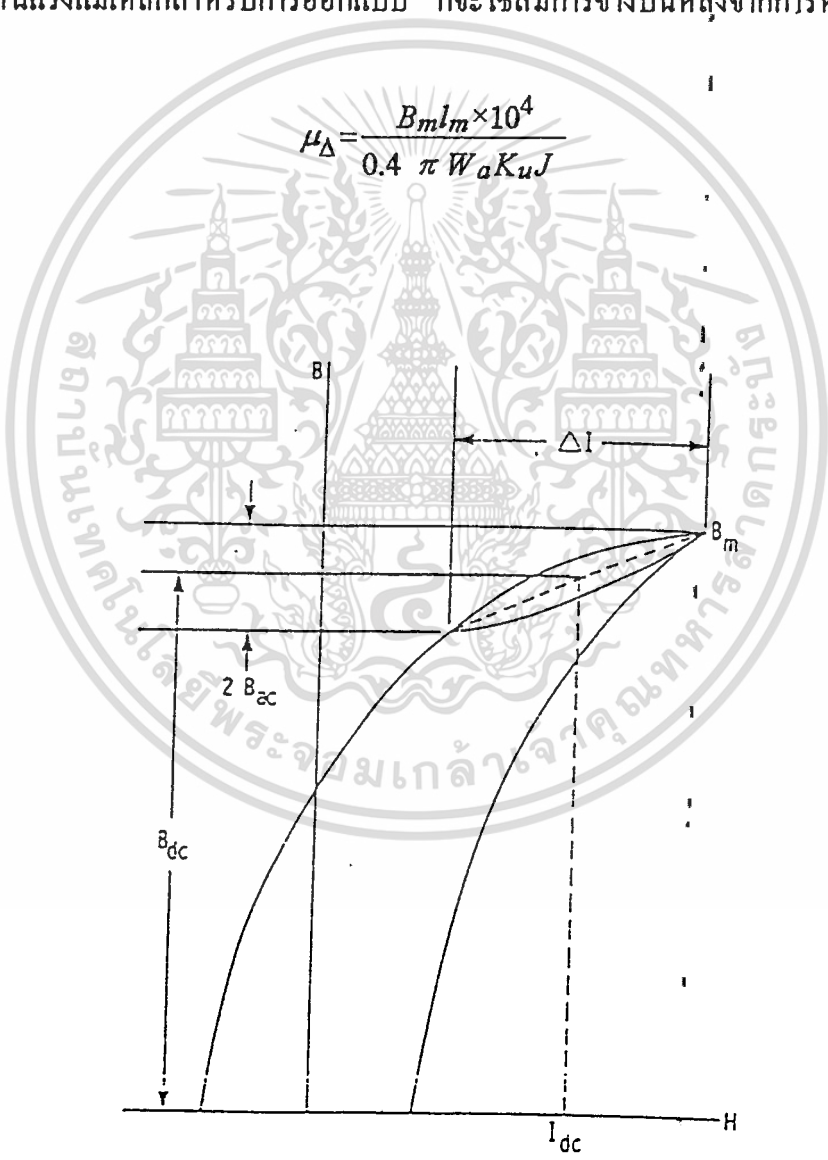
ผู้ออกแบบต้องกำหนดค่าสูงสุดของ B_{dc} และ B_{ac} ที่จะไม่ทำให้แกนเกิดการอิ่มตัวได้ และต้องทำการปรับค่าต่าง ๆ จนกว่าจะได้ค่าความเหนี่ยวนำสูงที่สุดต่อปริมาตรที่กำหนด ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของแกนที่ถูกเลือก จะเป็นตัวกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดของกระแสไฟตรง (B_{dc}) ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ของแกนแบบพาวเวอร์แสดงในตารางที่ 6.1

ถ้าค่าความเหนี่ยวนำคงที่เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดก็จะบ่งบอกถึงความสามารถของแกนได้

$$H = \frac{NI}{l_m} \quad [\text{At/cm}]$$

เมื่อ l_m คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก (MPL)

ค่าความเหนี่ยวนำลดลง เมื่อความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงเคลื่อนแม่เหล็กเพิ่มขึ้น สำหรับสารชนิดต่าง ๆ และค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กต่าง ๆ (μ_Δ) การเลือกค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสำหรับการออกแบบ ก็จะใช้สมการข้างบนหลังจากกรหาค่าผลคูณพื้นที่ได้แล้ว



รูปที่ 6.1 แสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับค่า I_{dc} , ΔI

ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดขึ้นอยู่กับค่า B_{dc} และ B_{ac} ดังแสดงในรูปที่ 6.1

$$B_{max} = B_{dc} + B_{ac} \quad [T]$$

$$B_{dc} = \frac{0.4 \pi N I_{dc} \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [T]$$

$$B_{ac} = \frac{0.4 \pi N (\frac{\Delta I}{2}) \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [T]$$

เมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกันจะได้

$$B_{max} = \frac{0.4 \pi N I_{dc} \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} + \frac{0.4 \pi N (\frac{\Delta I}{2}) \times 10^{-4}}{l_g + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad [T]$$

ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดสำหรับการออกแบบแกนชนิด MPP ควรจำกัดอยู่ที่ 0.3 T ในการออกแบบขั้นต้น และค่าความสูญเสียในแกนแบบ MPP เนื่องจาก B_{dc} จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าความสูญเสียในขดลวด เนื่องจากกระแสไฟตรง ดังนั้นความสูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นความสูญเสียในขดลวด

$$P_{cu} \ll P_{fe}$$

6.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนแบบทอรอยด์โดยใช้วิธีผลคูณพื้นที่

1.) ก่อนการออกแบบจะต้องทราบค่าต่างๆดังนี้

1. ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
2. ค่ากระแสไฟตรง (แอมแปร์)
3. ค่ากระแสไฟสลับ (แอมแปร์)
4. ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิรตซ์)
5. ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เทสลา)
6. อุณหภูมิเพิ่ม (องศาเซลเซียส)
7. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกน
8. ลักษณะของแกน

2.) คำนวณหาค่าความสามารถในการรองรับพลังงาน

จาก

$$Energy = \frac{LI^2}{2} \quad [Watt-second]$$

$$I = I_o + \frac{\Delta I}{2} \quad [A]$$

I_0 คือ กระแสไฟตรง

ΔI คือ กระแสไฟกระเพื่อมหรือกระแสไฟสลับ

3.) จำนวนค่าผลคูณพื้นที่ ; A_p

จาก

$$A_p = \left(\frac{2(\text{Energy}) \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right)^x \quad [\text{cm}^4]$$

โดยที่

K_u = สัมประสิทธิ์ของช่องหน้าต่าง = 0.4

4.) ทำการเปรียบเทียบค่า A_p ที่คำนวณได้กับข้อมูลของแกน เพื่อทำการเลือกชนิดของแกน จากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- ลักษณะของแกน
- ค่าผลคูณพื้นที่ ; A_p
- ความยาวเฉลี่ยของลวด 1 รอบ ; MLT
- พื้นที่หน้าตัดของแกน ; A_c
- พื้นที่ของช่องหน้าต่าง ; W_a
- พื้นที่ผิวของแกน ; A_t
- ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก ; MPL
- น้ำหนักของแกน ; W_{fe}

5.) จำนวนหาความหนาแน่นกระแส ; J

จาก

$$J = K_j A_p^y \quad [\text{A/cm}^2]$$

6.) จำนวนหาขนาดของสายตัวนำเปลือย ; $A_{w(B)}$

จาก

$$A_{w(B)} = \frac{I_0 + \Delta I / 2}{J} \quad [\text{cm}^2]$$

โดยที่

I_0 = กระแสไฟตรง

ΔI = กระแสไฟสลับ

7.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย (โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือกสายที่เล็กกว่าถัดลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- ขนาดของสาย
- $\mu\Omega/cm$

8.) คำนวณค่าความกว้างช่องหน้าต่างประสิทธิภาพ ; $W_{a(eff)}$

จาก

$$W_{a(eff)} = W_a \times S_3$$

โดยที่

$$S_3 = 0.75 \text{ (คู่นี้มาได้จากบทที่ 7)}$$

9.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด ; N

จาก

$$N = \frac{W_{a(eff)} \times S_2}{A_w} \quad [\text{turn}]$$

โดยที่

$$S_2 = 0.6 \text{ (คู่นี้ได้จากบทที่ 7)}$$

10.) คำนวณค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ที่แกนต้องการ ; μ_r

จาก

$$\mu_r = \frac{L \times MPL \times 10^8}{0.4 \pi N^2 A_c}$$

แล้วทำเป็นเลขจำนวนเต็ม และเลือกแกนจากกลุ่มที่มีค่าผลคูณพื้นที่ ตามที่เราเลือกไว้ ให้เลือกแกนที่มีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าที่คำนวณได้ แล้วบันทึกค่า MH/1000

11.) คำนวณรอบที่ที่ต้องการ ; N

จาก

$$N = \frac{1000 \times L}{(MH/1000)}$$

เมื่อ L มีหน่วยเป็น millihenry

12.) คำนวณหาความต้านทานของขดลวด

จาก

$$R = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{cm} \right) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

13.) คำนวณหาความสูญเสียในลวดทองแดง ; P_{cu}

จาก

$$P_{cu} = I^2 R \quad [\text{Watt}]$$

14.) คำนวณหาผลรวมของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากส่วนของกระแสตรงและกระแสสลับ

จาก

$$B_m = \frac{0.4 \pi N (I_{dc} + \Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [\text{T}]$$

15.) คำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนของกระแสสลับ

จาก

$$B_{ac} = \frac{0.4 \pi N (\Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [\text{T}]$$

16.) คำนวณค่าสนามกระตุ้นสนามแม่เหล็กกระแสตรง

จาก

$$H = \frac{0.4 \pi NI}{MPL} \quad [\text{Oersted}]$$

6.5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนแบบทอรอยด์โดยใช้วิธีสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตของแกน

1.) ก่อนการออกแบบจะต้องทราบค่าต่างๆดังนี้

1. ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี่)
2. ค่ากระแสไฟตรง (แอมแปร์)
3. ค่ากระแสไฟสลับ (แอมแปร์)
4. ความถี่ที่ใช้งาน (เฮิร์ตซ)
5. ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เทสลา)
6. กำลังทางด้านขาออก (วัตต์)
7. แรงดันกระเพื่อม (เปอร์เซ็นต์)
8. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกน
9. ลักษณะของแกน

2.) คำนวณหาค่าความสามารถในการรองรับพลังงาน

จาก

$$\text{Energy} = \frac{LI^2}{2} \quad [\text{Watt-second}]$$

โดยที่

$$I = I_o + \frac{\Delta I}{2} \quad [\text{A}]$$

ΔI คือ กระแสไฟกระเพื่อมหรือกระแสไฟสลับ

3.) คำนวณค่าสภาพทางไฟฟ้า ; K_e

จาก

$$K_e = 0.145 P_o B_m^2 \times 10^{-4}$$

4.) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เรขาคณิตของแกน ; K_g

จาก

$$K_g = \frac{(Energy)^2}{\alpha K_e} \quad [cm^5]$$

5.) ทำการเปรียบเทียบ ค่า K_g ที่คำนวณได้กับข้อมูลของแกน เพื่อทำการเลือกชนิดของแกน จากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- ลักษณะของแกน
- ผลคูณพื้นที่ ; A_p
- ค่า K_g
- ความยาวเฉลี่ยของขดลวด 1 รอบ ; MLT
- พื้นที่หน้าตัดของแกน ; A_o
- พื้นที่ของช่องหน้าต่าง : W_w
- พื้นที่ผิวของแกน ; A_t
- ความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเคินแม่เหล็ก ; MPL
- น้ำหนักของแกน ; W_{tfe}

6.) คำนวณหาความหนาแน่นกระแส ; J

จาก

$$J = \frac{2(Energy) \times 10^{-4}}{B_m A_p K_u} \quad [A/cm^2]$$

7.) คำนวณหาขนาดของสายตัวนำเปลือย ; $A_w(B)$

จาก

$$A_w(B) = \frac{I_o + \Delta I / 2}{J} \quad [cm^2]$$

8.) เลือกขนาดของสายจากตารางสาย (โดยถ้าขนาดของสายมากกว่า 10% ของค่าที่คำนวณได้ ให้เลือกสายที่เล็กกว่าถัดลงไปอีก 1 เบอร์) และจากนั้นทำการบันทึกค่าต่างๆดังนี้

- เบอร์ของสาย
- ขนาดของสาย

- $\mu\Omega/cm$

9.) คำนวณค่าความกว้างช่องหน้าต่างประสิทธิภาพ ; $W_{a(eff)}$

จาก

$$W_{a(eff)} = W_a \times S_3$$

โดยที่

$$S_3 = 0.75 \text{ (ดูที่มาได้จากบทที่ 7)}$$

10.) คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด ; N

จาก

$$N = \frac{W_{a(eff)} \times S_2}{A_w} \quad [\text{turn}]$$

โดยที่

$$S_2 = 0.6 \text{ (ดูได้จากบทที่ 7)}$$

11.) คำนวณค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ที่แกนต้องการ ; μ_r

จาก

$$\mu_r = \frac{L \times MPL \times 10^8}{0.4 \pi N^2 A_c}$$

แล้วทำเป็นเลขจำนวนเต็ม และเลือกแกนจากกลุ่มที่มีค่าผลคูณพื้นที่ ตามที่เราเลือกไว้ ให้เลือกแกนที่มีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าที่คำนวณได้ แล้วบันทึกค่า MH/1000

12.) คำนวณรอบที่ต้องการ ; N

จาก

$$N = \frac{1000 \times L}{(MH/1000)}$$

เมื่อ L มีหน่วยเป็น millihenry

13.) คำนวณหาความต้านทานของขดลวด

จาก

$$R = (MLT)(N) \left(\frac{\mu\Omega}{cm} \right) \times 10^{-6} \quad [\Omega]$$

14.) คำนวณหาความสูญเสียในสวดทองแดง ; P_{cu}

จาก

$$P_{cu} = I^2 R \quad [\text{Watt}]$$

15.) คำนวณหาค่าแรงดันกระแสเพิ่ม ; α

จาก

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} \times 100 \quad [\%]$$

16.) คำนวณหาผลรวมของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากส่วนของกระแสดตรงและกระแสลับ

จาก

$$B_m = \frac{0.4 \pi N (I_{dc} + \Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [T]$$

17.) คำนวณหาความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนของกระแสลับ

จาก

$$B_{ac} = \frac{0.4 \pi N (\Delta I/2) \times 10^{-4}}{l_g} \quad [T]$$

18.) คำนวณค่าสนามกระตุ้นสนามแม่เหล็กกระแสดตรง

จาก

$$H = \frac{0.4 \pi NI}{MPL} \quad [\text{Oersted}]$$

บทที่ 7

ตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าต่าง

7.1 บทนำ

สำหรับค่าตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าต่าง (Window Utilization Factor - K_u -) จะเป็นแสดงถึงปริมาณของขดลวดที่จะปรากฏอยู่ในพื้นที่หน้าต่างของแกน

ซึ่งสำหรับค่าตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าต่าง นี้ จะขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ ต่อไปนี้ 4 ค่า ได้แก่

1. ขนาดฉนวนของขดลวด (wire insulation)
2. ตัวประกอบการพันขดลวดในพื้นที่หน้าต่าง (fill factor)
3. พื้นที่ของบอบบิน (bobbin area)
4. ขนาดฉนวนที่ต้องการสำหรับการพันขดลวดหลายชั้น (multi-layer windings)

สำหรับการออกแบบหม้อแปลง ขนาดของตัวนำจริง ๆ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.673 - 0.941 ของพื้นที่ตัวนำทั้งหมด ขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวด และ สำหรับตัวประกอบการพันขดลวดในพื้นที่หน้าต่าง (fill factor) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.55 - 0.7 ขึ้นอยู่กับลักษณะการพันขดลวด และ เทคนิคที่ใช้ ส่วนสำหรับขนาดของฉนวนจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันที่ใช้

7.2 การคำนวณเพื่อหาค่าตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าต่าง

สำหรับการคำนวณเพื่อหาค่าตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าต่างนั้น จะทำการคำนวณได้ดังนี้ คือ

$$K_u = S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4$$

โดย จะมีค่าดังนี้

$$S_1 = (\text{ขนาดของพื้นที่ตัวนำจริง ๆ}) \div (\text{ขนาดของพื้นที่ตัวนำทั้งหมด})$$

$$S_2 = (\text{จำนวนรอบ} \times \text{พื้นที่ตัวนำทั้งหมด ใน 1 รอบ}) \div (\text{พื้นที่หน้าต่างที่จะใช้จริง ๆ})$$

$$S_3 = (\text{พื้นที่หน้าต่างที่จะใช้จริง ๆ}) \div (\text{พื้นที่หน้าต่างทั้งหมด})$$

$$S_4 = (\text{พื้นที่หน้าต่างที่จะใช้จริง ๆ}) \div (\text{พื้นที่หน้าต่างที่จะใช้จริง ๆ} + \text{พื้นที่ของฉนวน})$$

• พื้นที่ตัวนำจริง ๆ (conductor area) ได้แก่ พื้นที่ของทองแดงที่จะนำกระแสจริง ๆ

- พื้นที่ตัวนำทั้งหมด (wire area) ได้แก่ พื้นที่ของทองแดงที่จะนำกระแสจริง ๆ รวมกับ พื้นที่ของฉนวน

- พื้นที่ตัวนำทั้งหมดใน 1 รอบ (wire area of one turn) ได้แก่ พื้นที่ขงตัวนำทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่หน้าต่างในการพัน 1 รอบ
- พื้นที่หน้าต่างที่จะใช้จริง ๆ (usable window area) ได้แก่ พื้นที่หน้าต่างที่จะได้ใช้ในการพันขดลวดจริง ๆ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าต่างทั้งหมด หัก พื้นที่หน้าต่างที่เหลือจากการพันขดลวดแล้ว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเทคนิค
- พื้นที่หน้าต่างทั้งหมด (window area) ได้แก่พื้นที่หน้าต่างที่มีอยู่
- พื้นที่ของฉนวน (Insulation area) ได้แก่ พื้นที่ของฉนวนทั้งหมดที่ได้ทำการพันอยู่ในพื้นที่หน้าต่าง

นั่นคือ จะสามารถพิจารณาได้ว่า

1. S_1 จะขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวด
2. สำหรับ S_2 จะมีค่าไม่เกิน 0.91 เสมอ ในทางปฏิบัติ ค่ามากที่สุดสำหรับ S_2 จะขึ้นอยู่กับความหนาของขดลวด และความหนาของฉนวน รวมถึงจำนวนชั้นในการพันขดลวด ซึ่งปกติจะมีค่าไม่เกิน 0.6
3. สำหรับ S_3 จะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของบอบบิน (bobbin configuration) ซึ่งสำหรับบอบบินเดี่ยว (single bobbin) จะมีค่าอยู่ประมาณ 0.835 - 0.929 ในขณะที่บอบบินคู่ (two bobbin) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.687 - 0.872 ซึ่งค่าสำหรับ S_3 ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 0.75 แต่สำหรับการออกแบบแกนแบบพอด (pot core) จะมีค่าที่ลดลง คือประมาณ 0.55 - 0.71
4. จะเป็นการแสดงถึงค่าของพื้นที่หน้าต่างที่ถูกใช้ในการที่จะเป็นพื้นที่ของฉนวน จะมีค่าอยู่ที่ 1.0 และจะลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ ทุก ๆ ขดลวดทุติยภูมิ (secondary windings) ที่เพิ่มขึ้น 1 ขด

ตัวอย่าง พิจารณา ขดลวดตัวนำขนาด AWG 20 (จากภาคผนวกที่ 7 ข้อมูลขดลวด)

$$S_1 = 0.855$$

$$S_2 = 0.600$$

$$S_3 = 0.750$$

$$S_4 = 1.000$$

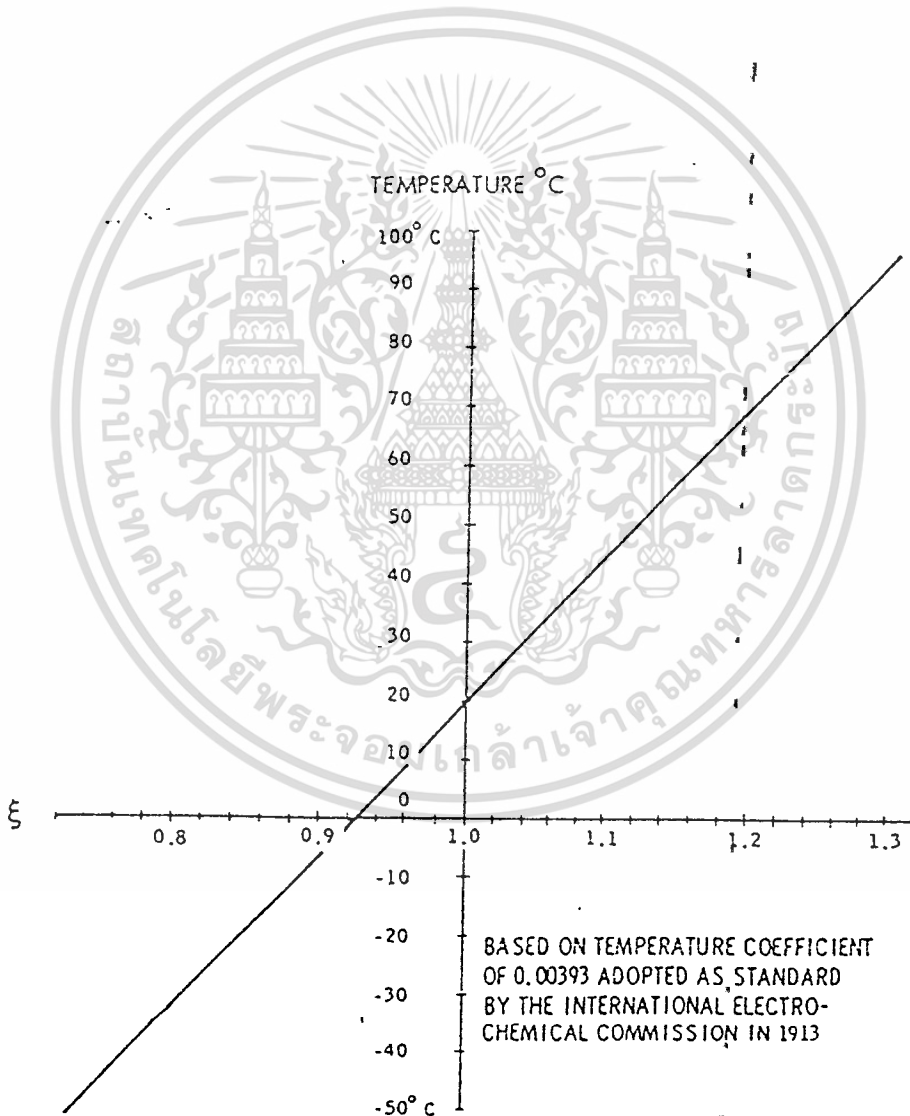
ดังนั้น $K_u = 0.385$ ซึ่ง สามารถประมาณได้ 0.400 ดังนั้นในการคำนวณตามปกติ จะคิดค่า K_u เท่ากับ 0.400

จากข้อมูลของขดลวด ในภาคผนวกที่ 7 และจากข้อมูลของแกนในภาคผนวกที่ 6 จะสามารถที่จะนำข้อมูลมาพิจารณาได้ โดยสามารถที่จะพิจารณาเพื่อหาค่าความต้านทานของขดลวดได้คือ

ความต้านทานทั้งหมดของขดลวดที่พื้น (R) มีค่าเท่ากับ

(MLT) x (จำนวนรอบทั้งหมด) x (ความต้านทานต่อหน่วยความยาว) x (ค่าตัวคูณแก้ไข) x 10^{-6}

สำหรับค่าตัวคูณแก้ไข (correction factor) จะสามารถพิจารณาได้ โดยจะมีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับที่อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส ส่วนที่ค่าอื่นพิจารณาจากกราฟ ดังนี้คือ



รูปที่ 7.1 ค่าตัวคูณแก้ไข สำหรับที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Correction Factor)

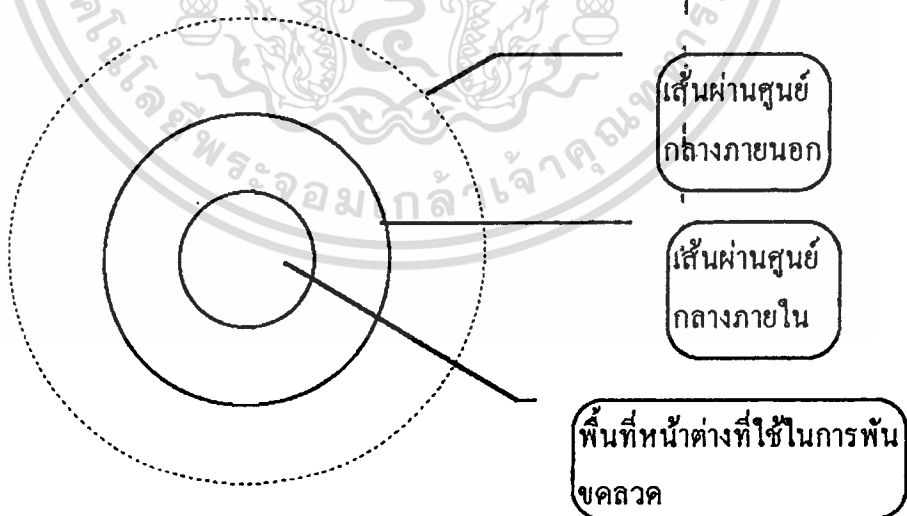
จากตารางจะเห็นว่า ค่าความต้านทานที่ถูกดัดแปลง (corrected resistance) เท่ากับ (ค่าความต้านทาน) \times (ค่าตัวคูณแก้ไข)

7.3 ค่าตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าตัด สำหรับแกนพาวเดอร์ทอรรอยด์

สำหรับแกนพาวเดอร์ทอรรอยด์ (Toroidal Powder Core) จะมีการใช้กันอย่างมากมายโดยเฉพาะที่ความถี่สูง อันเป็นผลมาจากอัตราส่วนที่สูงระหว่างค่าพื้นที่หน้าตัดต่อ พื้นที่หน้าตัดของแกน นอกจากนี้ ความหนาของ เทปฉนวน ที่ใช้พันแกนก่อนที่จะพันขดลวด ก็เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณา สำหรับแกนแบบนี้จะเห็นว่า ค่าความสูญเสียจากกระแสไหลวน จะมีค่าน้อยลงที่ความถี่สูง สำหรับค่าอัตราส่วนที่สูงระหว่างพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่หน้าตัดของแกน จะทำให้มีพื้นที่หน้าตัดในการพันขดลวดมาก ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก และ ค่าความสูญเสียของแกนมีค่าน้อยที่สุดด้วย

สำหรับการพิจารณาค่าตัวประกอบการใช้งานพื้นที่หน้าตัด (K_u) จะมีการพิจารณาดังนี้

1. สำหรับค่า พื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการพันขดลวด (Effective Window Area) นั้นจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\pi \times (\text{รัศมีภายใน}^2)}{4}$$


รูปที่ 7.2 แสดงพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการพันขดลวดของแกนพาวเดอร์ทอรรอยด์

2. สำหรับแกนพาวเดอร์ทอรรอยด์ จะสามารถที่จะมีค่า ตัวประกอบการพันขดลวดในพื้นที่หน้าตัด ได้สูงถึง 0.7 แต่สำหรับในแกนที่ได้รับการพัฒนามาใหม่นั้น จะมีค่าตัวประกอบดัง

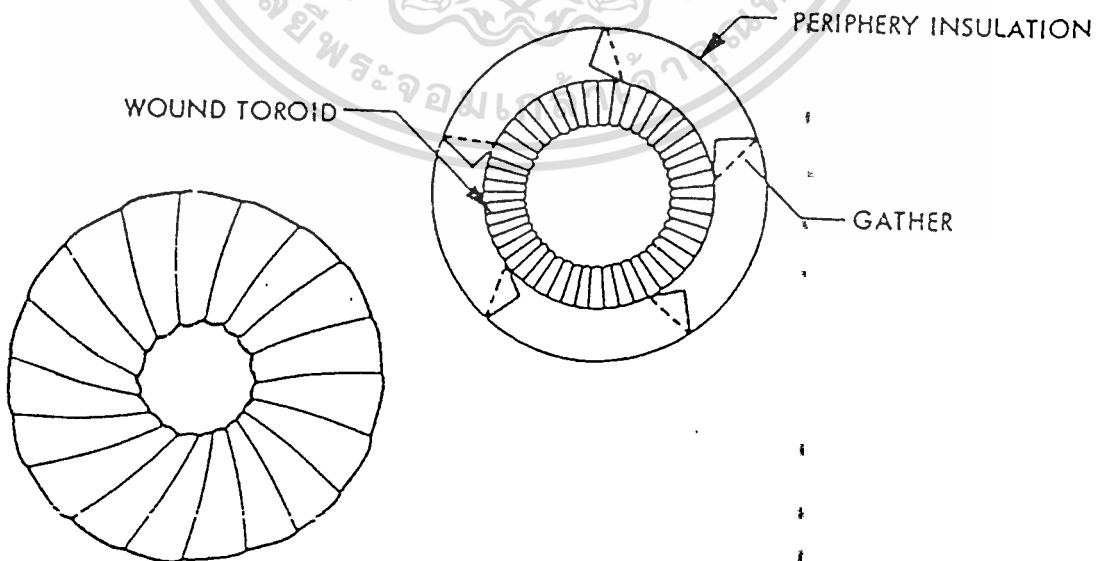
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวนี้ได้เพียง 0.55 ดังนั้นในการพิจารณาจะใช้ค่าที่เหมือนกับค่าของแกนชนิดอื่น กล่าวคือ S_2 เท่ากับ 0.6

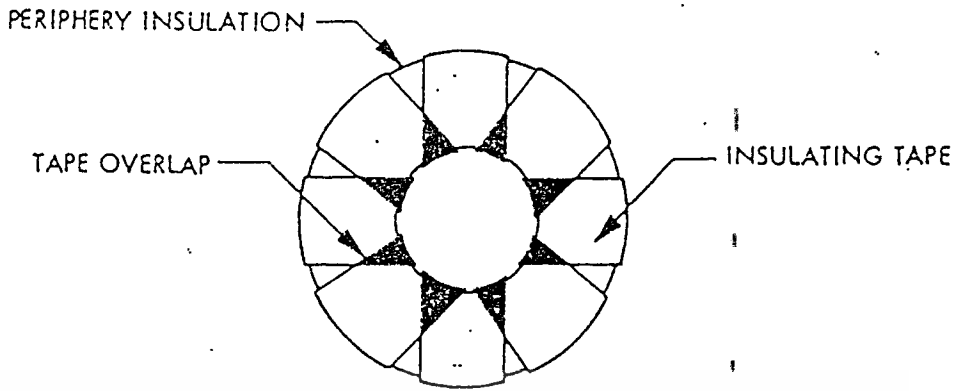
3. สำหรับค่า S_3 จะมีค่าที่เหมือนกันกับแกนชนิดอื่น ซึ่งการพิจารณานั้นจะอยู่ที่ข้อสมมติที่ว่า เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (inside diameter) เป็นครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (outside diameter) ดังนั้น ค่า S_3 เท่ากับ 0.75

4. สำหรับค่า S_4 จะมีอิทธิพลกับแกนพาวเดอร์ทอรอยด์มาก เนื่องจากการพันเทปฉนวนก่อนที่จะได้ทำการพันขดลวดนั้น จะส่งผลให้เกิดขนาดของฉนวนที่มีความหนาในส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ได้มากกว่า ในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เนื่องจากส่วนภายในนั้น จะมีการทับกัน (overlap) ของเทป ที่มีมากกว่าส่วนนอก เพราะว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า โดยจะได้ว่าขนาดความหนาของเทปฉนวนที่ใช้พันนั้น เมื่อพันแล้วสำหรับส่วนภายใน จะมีขนาดเป็นประมาณ 4 เท่าของความหนาของเทป ซึ่งจากที่ได้อธิบายแล้วนั้นจึงทำให้ค่า S_4 มีค่าน้อยลงอย่างชัดเจน พิจารณาได้จากรูปที่ 7.3

ดังนั้น จึงมีการหาวิธีการในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ เพื่อที่จะทำให้ค่า S_4 มีค่ามากขึ้น โดยจะเป็นเทคนิคในการพันเทป เพื่อที่จะให้การทับกันลดน้อยลง โดยจะทำการพันที่จะไม่พันรอบเหมือนกับแบบแรก ที่จะมีการพันทับกันของเทป ค่อนข้างมาก แต่สำหรับการพันเทป เพื่อแก้ไขนี้ จะได้ทำการพันเทปให้มีการทับกันให้ลดลง เพื่อที่จะให้ขนาดความหนาของเทปที่พันอยู่ภายใน มีค่าลดลงซึ่งจะช่วยทำให้ค่า S_4 เพิ่มมากขึ้น พิจารณาได้จากรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.3 การพันเทปที่ทำให้เกิดการทับกันที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในมาก



รูปที่ 7.4 การพันเทปเพื่อแก้ไขการรั่วซึมที่มากเกินไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ประสิทธิภาพ ค่าอุณหภูมิเพิ่ม ของหม้อแปลง และ ตัวเหนี่ยวนำ

8.1 บทนำ

ประสิทธิภาพ (efficiency) ค่าเรกูเลชัน (regulation) และ ค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ (temperature rise) มีความสำคัญมากสำหรับหม้อแปลง และ ตัวเหนี่ยวนำ! จากการทำงานด้านเข้า (input power) จะไม่สามารถที่จะมีการส่งผ่านไปเป็นกำลังงานทางด้านออก (output power) ได้ ทั้งหมด ซึ่งส่วนที่แตกต่างกันนั้นจะ ได้กลายเป็นความร้อน (heat) ซึ่งจะเป็นความสูญเสีย (loss) ซึ่งจะมียู่ 2 ส่วน ได้แก่ ความสูญเสียในแกน (core loss) และ ความสูญเสียในขดลวด (copper loss) ซึ่งความสูญเสียในแกน จะเป็นความสูญเสียที่คงที่ (fixed loss) แต่สำหรับความสูญเสียในขดลวด จะเป็นความสูญเสียที่แปรตามกระแสของภาระ (load) ยกกำลังสอง ที่ต้องการ ประสิทธิภาพที่สูงสุดของหม้อแปลงนั้นจะเกิดขึ้นได้ เมื่อ ความสูญเสียในแกน มีค่าเท่ากับ ความสูญเสียของขดลวดที่พิกัดภาระ (rated load) สำหรับ ค่าเรกูเลชัน จะมีค่าเท่ากับ ความสูญเสียในขดลวดหารด้วย กำลังงานทางด้านออก

8.2 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Transformer Efficiency)

จะเป็นทางที่จะสามารถวัดความมีประสิทธิภาพของการออกแบบหม้อแปลงตัวนั้น ๆ ซึ่งจะแสดงในรูปของ อัตราส่วนระหว่างกำลังงานทางด้านออก (output power) ต่อ กำลังงานทางด้านเข้า (input power)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ความสูญเสียในแกน จะเป็นความสูญเสียที่คงที่ แต่ ความสูญเสียในขดลวดที่แปรตามกระแสของภาระ จะสามารถในรูปของสมการได้ดังนี้คือ

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe}$$

เมื่อ P_{Σ} คือ ความสูญเสียทั้งหมด

P_{cu} คือ ความสูญเสียในขดลวด

P_{fe} คือ ความสูญเสียในแกน

ซึ่งค่าความสูญเสียในแกนจะคงที่เสมอ เนื่องจากแกนจะได้รับการกระตุ้น ด้วย กระแสกระตุ้น (exciting current) ค่าหนึ่ง ที่จะทำให้สามารถทำให้แกนมีค่า ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux density) เท่าตามที่ต้องการ

ส่วนความสูญเสียในขดลวด มีค่า เท่ากับผลคูณของกำลังสองของกระแสที่ไหลในขดลวด และ ความต้านทานทั้งหมดของขดลวด (ซึ่งสามารถหาได้ตามที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดของแกน จะเกิดขึ้นเมื่อความสูญเสียในขดลวด เท่ากับ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกน

8.3 ค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ (Temperature rise)

8.3.1 การเพิ่มของอุณหภูมิ (Temperature rise)

จากการที่เกิดความสูญเสียเกิดขึ้นในหม้อแปลงนั้น ที่อยู่ในรูปความร้อน (heat) ที่เกิดจาก ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และ กระแสไหลวน (eddy current) ของวัสดุที่ใช้ในการทำแกน และ เกิดจากความต้านทานของขดลวด

การที่มีสูญเสียเกิดขึ้นจึงเกิดความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งสามารถที่จะทำให้ฉนวนของขดลวดถูกทำลายลงได้ นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นนั้น สามารถที่จะระบายได้ด้วย ด้วยการแผ่รังสีความร้อน (radiation) และ การนำความร้อน (convection) ซึ่งการระบายบนพื้นผิวนั้นจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว โดยจะมีการระบายออกไปจากพื้นผิว ของขดลวด และ แกน

8.3.2 การคำนวณค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ (Temperature rise Calculation)

การพิจารณาค่าการเพิ่มของอุณหภูมิ ไม่สามารถจะทำนายได้ง่าย ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการสมมติ ขึ้นเป็นข้อสมมติ (assumption) ขึ้นมา กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการระบายออกไปจากพื้นผิวของแกน และ พื้นผิวของขดลวด

ซึ่งการแผ่รังสีความร้อน (radiation) เมื่ออุณหภูมิมีการเพิ่ม มากขึ้นมากกว่า อุณหภูมิรอบด้าน (surrounding) จะทำให้มีการแผ่รังสีความร้อน พลังงานความร้อน ในรูปของคลื่น ตามกฎของ สเตฟาน โบลซ์มานน์ (Stefan-Boltzmann) สามารถแสดงในรูปได้คือ

$$W_r = KrE (T_2^4 - T_1^4)$$

เมื่อ W_r คือ กำลังงานในรูปวัตต์ (watts) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่พื้นผิว

$$Kr = 5.70 * 10^{-12} \text{ วัตต์ ต่อ ตารางเซนติเมตร}$$

E คือ ตัวประกอบการส่งผ่าน

T_2 คือ อุณหภูมิของส่วนที่มีความร้อนภายในหม้อแปลง

T_1 คือ อุณหภูมิของส่วนแวดล้อม

แต่สำหรับการนำความร้อน (convection) จะเกิดขึ้นเมื่อความร้อนของส่วนที่มีความร้อนเกิดขึ้นภายในหม้อแปลง มีความร้อนมากกว่า อุณหภูมิของตัวกลางที่อยู่โดยรอบ (surrounding medium) ซึ่งปกติได้แก่อากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดการนำความร้อนเกิดขึ้น โดยชั้นของอากาศที่อยู่ใกล้ส่วนความร้อนของหม้อแปลงมากที่สุด จะรับความร้อน และ ในเมื่อชั้นของอากาศที่อยู่ถัดไปมีอุณหภูมิต่ำกว่า ก็จะมีการส่งผ่านความร้อนไปเรื่อย ๆ จนกว่าความร้อนที่ส่งผ่านนั้นจะมีอุณหภูมิลดน้อยลง ซึ่งการส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อนนั้น จะพิจารณาได้ด้วยสมการดังนี้ คือ

$$W_c = K_c F \theta^\eta \sqrt{P}$$

เมื่อ W_c คือ ค่ากำลังงานที่ส่งผ่านในหน่วยวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

$$K_c = 2.17 \cdot 10^{-4}$$

F คือ ตัวประกอบการต้านทานของอากาศ (air friction factor)

θ คือ อุณหภูมิที่เพิ่ม (องศาเซลเซียส)

P คือ ค่าความดันบรรยากาศสัมพัทธ์ (relative pressure) เท่ากับ 1 ที่ระดับน้ำทะเล

η คือ ค่าเอกโพเนนเชียล (exponential) อยู่ระหว่าง 1.00 ถึง 1.25 ขึ้นอยู่กับรูปร่าง และ ตำแหน่งของพื้นผิว

นั่นคือ ความร้อนทั้งหมดที่มีการระบายออกมา ได้แก่ความร้อนที่ได้มีการระบาย (W_r) รวมกับ ความร้อนที่ได้มีการนำความร้อน (W_c)

8.3.3 พื้นที่พื้นผิวที่ต้องการสำหรับการส่งผ่านความร้อน (Surface Area Required for Heat Dissipation)

สำหรับ พื้นที่ที่ต้องการในการส่งผ่านความร้อน (effective surface area) ได้นั้น จะมีค่าเท่ากับ (ความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้น) หารด้วย (ความหนาแน่นของกำลังงานของพื้นผิว)

โดย ความหนาแน่นของกำลังงาน (Power Density) จะเป็นค่ากำลังงานที่จะส่งผ่านได้ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ของหม้อแปลง

ค่าความหนาแน่นของกำลังงาน ของพื้นผิวนั้นจะมีค่าดังนี้

1. ที่อุณหภูมิเพิ่มเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.03
2. ที่อุณหภูมิเพิ่มเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.07

8.4 ปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect)

การใช้งานตัวนำกระแสที่ความถี่สูง การไหลของกระแสจะมีลักษณะที่แตกต่างจากในความถี่ต่ำ โดยที่ความถี่สูง กระแสที่จะไหลในพื้นที่หน้าตัดของตัวนำนั้น จะเป็นกระแสตรงเท่านั้น และจะมีกระแสที่ไหลที่บริเวณผิวของตัวนำ แทนที่จะเป็นในพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ จะเรียกว่า ปรากฏการณ์ผิว (skin effect) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนวนอยู่ในส่วนของตัวนำบางส่วนเท่านั้น

ซึ่งความลึกของผิวของตัวนำที่มีกระแสไหลนั้น จะมีค่าตามสมการดังนี้

$$\text{ความลึกจากปรากฏการณ์ผิว} = (6.61 / f^{1.2}) * K \quad (\text{เซนติเมตร})$$

โดย ค่าคงที่ K มีค่าดังนี้

$$K = \rho^{1.2} / (\rho_c * \mu_r)^{1.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ρ_c คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (resistivity) ของตัวนำทองแดง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่า 1.724 ไมโคร โอห์ม-เซนติเมตร

μ_r คือ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability)

สำหรับทองแดง ค่า $K = 1$

จากหลักการที่ได้แสดงไปแล้วนั้น จะนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงได้กล่าวคือ ที่ความถี่สูงจะเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ ซึ่งจะต้องพิจารณาหาขนาดของขดลวดที่เหมาะสมในการใช้ กล่าวคือ จะคิดค่าความลึกผิวที่กระแสน้ำไหลผ่าน (skin depth) ให้มีค่าเท่ากับ รัศมีของขดลวด (radius) เพื่อที่จะให้มีการนำกระแสทั้งหน้าตัดตัวนำ แทนที่จะมีการนำกระแสเพียงผิวของตัวนำเท่านั้น

สามารถสรุปได้ว่าจากปรากฏการณ์ผิวที่เกิดขึ้นจะมีผลอย่างมากในการออกแบบหม้อแปลง และ ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง ดังนั้นการที่จะเลือกขนาดขดลวดที่จะใช้จำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาความลึก ดังกล่าวนี้ด้วย ซึ่งหลักการสำคัญคือ การที่จะให้กระแสสามารถนำได้ในตัวนำนั้น ได้เต็มพื้นที่หน้าตัด ดังนั้น ในเบื้องต้นจะทำการคำนวณหาค่าความลึกที่เกิดจากปรากฏการณ์ผิว (skin depth) และทำการเลือกขนาดขดลวดที่มีรัศมีของขดลวด มีค่าเท่ากับค่าความลึกดังกล่าวนี้ หรือ ให้มีค่ามากกว่าที่ใกล้เคียงที่สุด เพื่อให้พื้นที่ที่มีการนำกระแสจริง ๆ นั้นมีค่าใกล้เคียงกันกับพื้นที่หน้าตัดจริง ๆ มากที่สุด

บทที่ 9

ผลการทดลอง

9.1 การทดลองตัวเหนี่ยวนำ

ทำการทดลองโดยใช้วงจร R-L อนุกรม ตัวต้านทานที่ใช้จะมีค่าน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำประมาณ 100 เท่า เพื่อใช้เป็นตัวจับกระแส จากนั้นจะทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำแล้วนำมาหารด้วยค่ากระแสที่ได้ ก็จะได้อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ทดลองได้ ซึ่งทำให้สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำได้

ค่าความเหนี่ยวนำที่ออกแบบใช้ทดลอง มีค่า 0.00001 เฮนรี ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดคือ 0.3 เทสลา ตัวต้านทานที่ใช้จับกระแสมีค่า 0.03 โอห์ม แก๊นขนาด EI-28 เหมือนกันทั้ง 3 ตัว ได้ผลการทดลองดังนี้

ตัวที่	ความถี่ (kHz)	แรงดันทดสอบ (โวลต์)	V_R (โวลต์)	V_L (โวลต์)	กระแส (แอมแปร์)	ความเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
1	50	20	0.20	19.7	5.443	0.00001152
2	75	40	0.23	39.5	6.259	0.00001339
3	100	50	0.23	49.6	6.259	0.00001261

โดย V_R คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle wave) โดยจะได้ค่าในรูปแรงดันสูงสุด สามารถหาค่าในรูป rms โดยคูณด้วย $2/\sqrt{6}$

V_L คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันทดสอบมาก และมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave)

กระแส คือค่าที่ได้จากการคำนวณ (แอมแปร์)

ความเหนี่ยวนำในตาราง คือค่าที่ได้จากการคำนวณจากผลการทดลอง ซึ่งมีค่าแตกต่างจากที่ทำการออกแบบเล็กน้อย

9.2 การทดลองหม้อแปลง

ผลการทดลองในลักษณะของแรงดันเข้าและออก

ตัวที่	ความถี่ (kHz)	V_{pn}	V_{sec}	I_{out}	แกน	V_{in} ทดลอง	V_{out} ทดลอง
1	50	50	50	5	EI-33	30	28
						40	37
						50	47

ตัวที่	ความถี่ (kHz)	V_{pri}	V_{sec}	I_{out}	แกน	V_{in} ทดลอง	V_{out} ทดลอง
2	55	30	15	6	EE30/26K	10	4.9
						20	9.5
						30	14
3	100	50	50	5	EE19/16K	30	35
						40	46
						50	57

โดย V_{pri} และ V_{sec} คือค่าแรงดันที่พิกัดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ออกแบบ

I_{out} คือ ค่ากระแสพิกัดทางด้านทุติยภูมิที่ออกแบบ

V_{in} ทดลอง และ V_{out} ทดลอง คือ ค่าแรงดันที่ป้อนทดสอบทางด้านปฐมภูมิและแรงดันที่วัดได้ทางด้านทุติยภูมิ

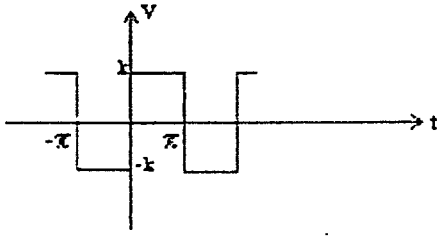
ผลการทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

ใช้ตัวต้านทาน 0.13 โอห์ม เป็นตัวจับกระแส โดยแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม

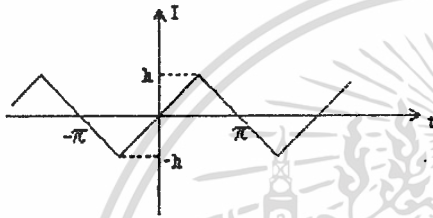
	ตัวที่ 1		ตัวที่ 2		ตัวที่ 3	
	Pri	Sec	Pri	Sec	Pri	Sec
แรงดันทดสอบ (โวลต์)	30	40	30	15	40	40
V_R	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.06
V_L	30	40	30	15	40	40
ความเหนี่ยวนำ (เฮนรี)	0.0003799	0.0003379	0.0003455	0.0001331	0.0001953	0.0001299

ผลการทดลองหาค่าความสูญเสียของแกน

ทำการทดลองโดยการเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ และป้อนแรงดันที่พิกัดทางด้านปฐมภูมิ โดยมีตัวต้านทาน 0.16 โอห์ม เป็นตัวจับกระแส ลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนกระแสจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม



แรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีอนุกรมฟูเรียร์คือ $\frac{4k}{\pi} (\sin t + \frac{1}{3}\sin 3t + \frac{1}{5}\sin 5t + \dots)$



กระแสรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีอนุกรมฟูเรียร์คือ $\frac{8h}{\pi^2} (\sin t - \frac{1}{9}\sin 3t + \frac{1}{25}\sin 5t - \frac{1}{49}\sin 7t + \dots)$

การหาค่าความสูญเสียในแกน (core loss) สามารถคำนวณจากค่า V_{rms} และ I_{rms} ของคลื่นฟังก์ชันไซน์ที่มีความถี่เดียวกันคูณกัน และคูณด้วย $\cos \phi$ เมื่อ ϕ คือ มุมที่กระแสดตามแรงดัน (มุม lag) ซึ่งเราจะทำการคิดเฉพาะที่ความถี่ fundamental เท่านั้น เพราะฮาร์โมนิกอื่น ๆ ค่า V_{rms} และ I_{rms} มีค่าน้อยมาก คือคำนวณจาก $\frac{4k}{\sqrt{2}\pi} \times \frac{8h}{\sqrt{2}\pi^2} \times \cos \phi$

ได้ผลการทดลองดังนี้

ตัวที่	แรงดันทดสอบ (โวลต์)	V_L	V_R (ค่า peak)	I_R (ค่า peak)	ϕ (Radian)	Core loss (Watt)
1	50	50	0.08	0.5	0.4π	3.98
2	30	30	0.036	0.225	0.4π	1.07
3	50	50	0.036	0.225	0.32π	3.10

ผลการทดลองหาค่าความสูญเสียในขดลวด

ทำการทดลองโดยการลัดวงจรด้านทุติยภูมิ แล้วจ่ายแรงดันที่ทำให้กระแสไหลผ่านทางด้านปฐมภูมิที่พิกัด มีความต้านทาน 0.16 โอห์มใช้สำหรับเป็นตัวจุ่มกระแส ลักษณะรูปคลื่นแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนลักษณะรูปคลื่นของกระแสจะมีลักษณะคล้ายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกัน เราก็จะประมาณว่ารูปคลื่นกระแสมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกับแรงดัน

เราสามารถทำการคำนวณค่าความสูญเสียในขดลวด (Cu loss) จากค่า V_{rms} และ I_{rms} ของคลื่นฟังก์ชันไซน์ที่มีความถี่เดียวกันทุกอัน และคูณด้วย $\cos\phi$ เมื่อ ϕ คือ มุมที่กระแสตามแรงดัน (มุม lag) ซึ่งเราจะทำการคิดเฉพาะที่ความถี่ fundamental และฮาร์โมนิคตัวถัดไปเท่านั้น เพราะฮาร์โมนิคอื่น ๆ ค่า V_{rms} และ I_{rms} มีค่าน้อยมาก

$$\text{คือคำนวณจาก } \left(\frac{4k(v1)}{\sqrt{2} \pi} \times \frac{4k(I1)}{\sqrt{2} \pi} \times \cos\phi\right) + \left(\frac{4k(v3)}{\sqrt{2} \pi} \times \frac{4k(I3)}{\sqrt{2} \pi} \times \cos\phi\right)$$

ได้ผลการทดลองดังนี้

ตัวที่	V_L	V_s	I	ϕ (Radian)	Cu loss (Watt)
1	4	0.8	5	0.05π	17.97
2	2	0.48	3	0.05π	5.289
3	5	0.8	5	0.1π	19.245

ถ้าแรงดันป้อนเข้าและกระแสที่ไหลผ่านมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และค่ามุม ϕ มีค่าเป็น 0 เราจะสามารถคำนวณประสิทธิภาพหม้อแปลงได้ดังนี้

หม้อแปลงตัวที่ 1 $eff = \frac{(50 \times 5) - (3.98 + 17.97)}{(50 \times 5)} \times 100 = 91.22\%$

หม้อแปลงตัวที่ 2 $eff = \frac{(30 \times 3) - (1.07 + 5.289)}{(30 \times 3)} \times 100 = 92.93\%$

หม้อแปลงตัวที่ 3 $eff = \frac{(50 \times 5) - (3.10 + 19.245)}{(50 \times 5)} \times 100 = 91.06\%$

บทที่ 10

บทสรุป และ บทวิจารณ์

10.1 บทสรุป

สำหรับโครงการ การออกแบบหม้อแปลง และ ตัวเหนี่ยวนำความถี่สูง โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้มีการศึกษาถึงวิธีการ ข้อมูลต่าง ๆ จากนั้นจึงได้มีการนำมาทำการสรุปวิธีการ และ เขียนโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ ให้ได้ค่าตัวประกอบต่าง ๆ ตามที่ได้ทำการแสดงในบทต่าง ๆ ข้างต้น ที่มีความเหมาะสมที่สุด จากการทำโครงการ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบหม้อแปลง และ ตัวเหนี่ยวนำ ความถี่สูง ซึ่งมี 2 วิธีการ ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ได้แก่ การหาค่าผลคูณพื้นที่ (Area Product : Ap) และ การหาค่าทางกายภาพของแกน (Core Geometry : Kg)
2. ได้ทำการศึกษา รวบรวม และ สรุปข้อมูลของแกน ขดลวด ที่ได้มีการจำหน่ายจริง ในเชิงพาณิชย์ เพื่อให้ผู้ใช้ได้อย่างอิง
3. ได้ทำการเขียนโปรแกรม เพื่อคำนวณจากวิธีการที่ทำการศึกษำ รวมถึง ข้อมูลที่ได้ทำการสรุปเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก
4. จากโปรแกรมที่ได้ทำการเขียน ได้มีการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม จากการที่ได้ทำส่วนเสริมขึ้น ด้วยการสร้างวงจรสำหรับการทดลอง ซึ่งเป็นวงจรสวิตซ์ สำหรับความถี่สูง
5. ได้มีการสรุปโครงการทั้งหมด แสดงอยู่ในรูปของรายงานปริญญานิพนธ์ เพื่อแสดงต่อผู้ที่ต้องการศึกษา ได้สามารถที่จะทำความเข้าใจ และ พัฒนาต่อไปได้ตามความต้องการ

10.2 บทวิจารณ์

สำหรับโครงการนี้ ผู้ที่สนใจสามารถที่จะทำการศึกษาโครงการนี้ต่อไปได้ และ สามารถพัฒนาได้ โดยสำหรับส่วนของการคำนวณตามวิธีการนั้น เป็นส่วนพื้นฐาน ที่สามารถทำการสรุป รวบรวมข้อมูลของแกน ชนิดอื่น ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ได้ต่อไป

ความยากของโครงการนี้ ได้แก่การที่จะได้ทำการสรุป และ รวบรวมข้อมูลของแกน และ ขดลวดที่มีอยู่ เพื่อที่จะให้โปรแกรมได้ทำการอ้างอิง รวมถึงการหาซื้อแกนที่มีจำหน่ายจริงในเชิงพาณิชย์ เนื่องจาก แกนที่มีจำหน่ายนั้น ไม่ได้มีการจำหน่ายทุกแกนที่ได้แสดงไว้ในรูปของรายการสินค้า ตามที่ตัวแทนจำหน่ายได้มอบให้ จากแกนที่โปรแกรม ได้ทำการคำนวณแล้ว ในบางกรณีไม่มีจำหน่าย ซึ่งข้อนี้ จะเป็นสาเหตุสำคัญของความผิดพลาด ในการทดลองที่เกิดขึ้น ดังนั้นสามารถที่จะทำการสรุป และ วิจารณ์โครงการนี้ ได้โดยในภายหลังจะมีผู้สนใจ สามารถนำวิธีการที่แสดงนั้น

ไปใช้พัฒนาต่อไปได้ โดยโครงการนี้ ได้มีการตรวจสอบถึงความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการทดลอง เพื่อเป็นการแสดงถึงความน่าเชื่อถือของโปรแกรมในระดับหนึ่งด้วย

และสำหรับโครงการนี้ หลังจากที่โปรแกรมได้ทำการคำนวณแล้ว แต่ไม่ได้มีการคำนวณถึงค่าความสูญเสียในแกน และความสูญเสียในขดลวด ดังนั้นผู้สนใจที่ต้องการจะพัฒนาโปรแกรมต่อไป ทางผู้ร่วมโครงการขอเสนอให้มีการคำนวณค่าความสูญเสียเหล่านี้ด้วย รวมทั้งการทดลองเพื่อคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ของสารแม่เหล็ก เมื่อป้อนด้วยแรงดันที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะทำให้เราทราบถึงจุดทำงานที่เหมาะสมของสารแม่เหล็กนั้นได้ โดยในโปรแกรมที่ผู้ร่วมโครงการได้ทำไว้ ไม่ได้บอกผู้ใช้ถึงช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งอาจทำให้ผู้ใช้ออกแบบผิดพลาดได้ เช่น ออกแบบที่ความถี่ต่ำเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับแกนประเภทความถี่สูง ดังนั้นจึงควรที่จะพัฒนาโปรแกรมให้มีการจำกัดช่วงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับสารแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

นอกจากนี้ ยังอาจจะนำข้อมูลของผู้ผลิตแกนที่แสดงถึง ค่าความสูญเสียของแกนที่ความถี่ต่าง ๆ และที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดที่ใช้งานต่าง ๆ มาเสริมในตัวโปรแกรมให้สามารถทำการคำนวณจากข้อมูลเหล่านี้ได้ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้ทราบได้ทันทีว่าหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบนั้นมีค่าความสูญเสียมากน้อยเพียงใด และยังสามารถนำค่าเหล่านั้นไปพัฒนาวิธีการออกแบบ ซึ่งจะช่วยให้ผลที่ได้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก 1 พื้นฐานของวัสดุสารแม่เหล็ก

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้มีการเกี่ยวข้องกับสารแม่เหล็กอย่างมาก เพราะสารที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงนั้นก็คือสารแม่เหล็กประเภทหนึ่ง ดังนั้นสารแม่เหล็กจึงมีส่วนเข้าไปเกี่ยวข้องกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ อย่างมากมาย เช่น หม้อแปลงของแหล่งจ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน switching power supplies , หม้อแปลงในอุปกรณ์ด้านเครื่องเสียงคือใช้หม้อแปลงเป็นตัว matching impedance , หม้อแปลงสำหรับคลื่นวิทยุช่วงกว้างและช่วงแคบ รวมถึง ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็น filter ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ อีกด้วย ซึ่งแกนที่เป็นสารแม่เหล็กนี้ก็จะมีความสัมพันธ์กันกับหลายลักษณะ เช่น EE , EI , U หรือ C , Toroidal , Pot , Rod และอื่น ๆ ลักษณะแต่ละแบบนั้นก็ก็จะเกี่ยวข้องกับงานที่นำไปใช้ ซึ่งลักษณะทางกายภาพของแกนนี้ก็จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของกระแสในตัวนำด้วย นอกจากนี้คุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กก็มีความสำคัญต่องานที่นำไปใช้ด้วย

ประเภทของสารแม่เหล็ก

เราสามารถแบ่งสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนออกเป็น hard magnetic material และ soft magnetic material ซึ่งคำว่า hard หรือ soft นั้นไม่ได้บ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของสารแม่เหล็กว่าแข็งหรืออ่อน แต่มันบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวสารแม่เหล็กนั้นต่างหาก กล่าวคือ hard magnetic material นั้นเป็นสารแม่เหล็กซึ่งมีความสามารถในการคงสภาพความเป็นแม่เหล็กหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กแล้ว ตัวอย่างของสิ่งที่ทำจากสารแม่เหล็กนี้ก็คือ แม่เหล็กในลำโพง ส่วน soft magnetic material จะมีคุณสมบัติตรงกันข้าม คือ มันจะสูญเสียความเป็นแม่เหล็กในทันทีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กมากระตุ้นมัน ซึ่งสารแม่เหล็กประเภทนี้จะมีค่าความสูญเสียเนื่องจาก hysteresis loss มีค่าต่ำ เราจะพบสารแม่เหล็กประเภทนี้ในแกนหม้อแปลงความถี่สูงต่าง ๆ รวมถึงตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงต่าง ๆ ด้วย และในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ก็เน้นเฉพาะแกนหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำที่ทำมาจาก soft magnetic material เท่านั้น

ลักษณะทางกายภาพและไฟฟ้าของแกนที่ทำจากสารแม่เหล็ก

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของแกนแม่เหล็ก ได้แก่ แกนแบบแท่ง(rods) , แผ่นแบน(flat bars) , กลม(toroids) , EI , EE , U (หรือ C) และแกนแบบ pot cores ดังแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างบางชนิดดังรูปที่ ผ1.1



รูปที่ พ.1 แสดงให้เห็นแกนที่ทำจากสารแม่เหล็กในลักษณะต่าง ๆ กัน

ซึ่งการเลือกใช้แกนในแต่ละลักษณะก็ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบที่จะคำนึงถึงระดับพลังงานของวงจรรวมถึงลักษณะรูปร่างของหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นสมบูรณ์ และยังอาจรวมไปถึงเวลาในการประกอบขึ้นมาเป็นหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำที่สมบูรณ์ด้วย และแกนชนิด pot core , U core , EI core และ BE core ก็สามารถประกอบเป็นหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำได้อย่างรวดเร็ว เพราะแกนเหล็กนี้จะมีบอบบิน (bobbin) ซึ่งจะช่วยในการพันขดลวดให้ง่ายขึ้นได้เป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าแกนชนิดกลมและชนิด solenoidal magnetic core สามารถพันขดลวดได้อย่างรวดเร็วโดยการใช้เครื่องพัน แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการหรือขั้นตอนต่าง ๆ ในการพันขดลวดในแกนชนิดนี้ก็ค่อนข้างที่จะซับซ้อนกว่าการพันขดลวดบนบอบบิน

ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็ก (permeability) แสดงได้โดยสัญลักษณ์กรีก คือ μ (mu) ซึ่งเราอาจแสดงความสัมพันธ์ของมันได้ดังนี้

$$B = \mu H$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

ซึ่งค่า μ_r นี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กว่ามีค่าเป็นกี่เท่าของอากาศ โดยที่อากาศจะมีค่า μ_r เท่ากับ 1 และมีค่า μ และ μ_0 เท่ากับ 1 (Gauss/Oersted)

แกนชนิดเพาเวอร์ไอออน(Powdered Iron)

ในการเลือกว่าจะใช้แกนเฟอร์ไรท์ (ferrite) หรือ แกนพาวเดอร์ไอรอน (powdered iron) นั้น ผู้ออกแบบจะพิจารณาถึงว่า แกนพาวเดอร์ไอรอนนั้นจะทำงานถึงจุดอิ่มตัวยากกว่า แต่แกนเฟอร์ไรท์นั้นจะทำงานถึงจุดอิ่มตัวได้ง่ายกว่า ดังนั้นแกนชนิดเฟอร์ไรท์จึงเหมาะสมสำหรับใช้ในวงจรเช่น dc-to-dc converter และ magnetic amplifier แต่ถึงอย่างไรก็ตาม แกนเฟอร์ไรท์ก็มีข้อได้เปรียบเหนือแกนชนิดพาวเดอร์ไอรอน กล่าวคือ ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของแกน ชนิดเฟอร์ไรท์จะมีค่ามากกว่าค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กของแกนชนิดพาวเดอร์ไอรอน ซึ่งแกนชนิดพาวเดอร์ไอรอนนี้จะมีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์อยู่ในระดับสูงสุดเพียง 90 แต่ในแกนชนิดเฟอร์ไรท์ เราสามารถได้ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสัมพัทธ์ได้ถึง 5000 ดังนั้นเราอาจจะนึกว่า ทำไมเราไม่ใช้แกนชนิดเฟอร์ไรท์ทั้งหมดในงานต่าง ๆ เพราะแกนชนิดพาวเดอร์ไอรอนมีข้อได้เปรียบเหนือแกนเฟอร์ไรท์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่จริง ๆ แล้วผู้ออกแบบต้องพยายามทำการพิจารณาระหว่างค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กและความเสถียรของอุณหภูมิในขณะที่ใช้งานของแกนด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สารที่มีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กสูง ก็จะไม่เสถียรที่ความถี่ใช้งานสูง ๆ ซึ่งปัจจัยนี้จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อตัวเหนี่ยวนำในวงจรสำคัญต่าง ๆ เช่น narrow-band filter , narrow-band tuned transformer และ วงจรจําพวก oscillators อุณหภูมิรอบข้าง (ambiance) ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน ดังนั้นแกนชนิดพาวเดอร์ไอรอนจึงนิยมนำมาใช้ในวงจรประเภทความถี่ช่วงคลื่นวิทยุ (RF circuits) ซึ่งวงจรเหล่านี้ ต้องให้มีความปลอดภัยจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กและเสถียรภาพที่แน่ด้วย

แกนชนิดพาวเดอร์ไอรอนนั้นจะทำจากอนุภาคที่ละเอียดของแก่นเหล็กซึ่งถูกหุ้มด้วยฉนวนซึ่งเป็นสารที่ทำให้อนุภาคเหล่านี้ยึดเกาะกันได้ แล้วอนุภาคเหล่านี้ก็สามารถยึดติดเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ โดยจะถูกอัดอยู่ในแกนลักษณะต่าง ๆ เช่น แกนชนิดกลม , แกนชนิดแท่ง และ แกนชนิด slug แล้วก็จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำได้แก่แกนที่มีค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กที่สม่ำเสมอได้ ซึ่งค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับ ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคของเหล็ก ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคที่ละเอียดมากและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ก็ จะเหมาะสำหรับใช้งานที่ความถี่ช่วง VHF หรือสูงกว่า ในตารางที่ ผ1,1 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของสารพาวเดอร์ไอรอนที่นิยมใช้กัน ซึ่งผลิตโดยบริษัท Micro-Metal Corp.

ตารางที่ ผ.1.1 คุณสมบัติของสารเฟอร์ไรต์ไอรอน ของบริษัท Micro-Metal Corp.

Material Mix No.	Permeability (μ)	Material Density (g/cm^3)	Relative Cost	Color Code
-2	10	5.0	2.3	Red/Clear
-8	35	6.5	4.0	Yellow/Red
-18	55	6.6	2.8	Green/Red
-26	75	7.0	1.2	Yellow/White
-28	22	6.0	1.7	Gray/Green
-33	33	6.3	1.6	Gray/Yellow
-40	60	6.9	1.0	Green/Yellow
-52	75	7.0	1.4	Green/Blue

แกนชนิดเฟอร์ไรท์ (Ferrite)

คำว่า เฟอร์ไรท์นี้ใช้ได้กับวัสดุจำพวกเซรามิกเกือบทุกชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) หรือสารนำแม่เหล็ก ซึ่งสารพวกที่ประพจน์ตัวเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกจะสามารถถูกกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กในขนาดที่สูงได้ และเช่นเดียวกันกับแกนชนิดเพาเวอร์ไอรอน แกนเฟอร์ไรท์ก็ประกอบไปด้วยอนุภาคที่ละเอียด และอัดตัวด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ กัน ซึ่งจะทำให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งอนุภาคที่ละเอียดเหล่านี้ก็จะประกอบไปด้วยสารจำพวกออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของสารจำพวกนิกเกิล, แมงกานีส, สังกะสี หรือ แมกนีเซียม ซึ่งจะอยู่ในรูปสารประกอบของเฟอร์ริกไอออน (ferric ion - Fe^{3+}) ในรูปของ MFe_2O_3 ซึ่ง M ก็คือไอออนของโลหะอื่นนั่นเอง สารนี้จะอยู่ในรูปของผลึกทรงเรขาคณิต และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ มีความต้านทานกระแสสูง น้ำหนักเบา และไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่น ๆ ซึ่งเมื่อถูกอัดขึ้นรูปมาแล้วจะได้แกนในลักษณะ และขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งจะมีลักษณะแข็งเปราะ และมีผิวเรียบ ถ้าแกนเฟอร์ไรท์ถูกใช้งานด้วยพลังงานที่มากเกินไป ตัวมันก็จะร้อนขึ้นและในบางกรณี แกนอาจจะพังเสียหายเลยก็เป็นไปได้ ซึ่งอาจไม่สามารถแก้ไขได้ และจะทำให้ค่าความซึมซาบเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้อย่างฉิวเฉียด และในกรณีที่เลวร้ายกว่านี้อาจถึงกับแตกหักเป็นชิ้น ๆ

แกนเฟอร์ไรท์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลาย ๆ วงจร เช่น LC filter , loading coil coupling transformer , oscillator transformer , power transformer , pulse transformer , wide-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยละเอียด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

band transformer , current transformer , drive transformer , choke , EMI filter นอกจากนี้ยังรวมถึงอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ เช่น หัวอ่านแม่เหล็ก , ตัวดักจับอุณหภูมิ (thermosensor) , ตัวดักจับสัญญาณแม่เหล็ก , สวิตช์ในแป้นพิมพ์ของคอมพิวเตอร์ และอื่น ๆ



ผนวก 2 ความสามารถในการรองรับพลังงานของหม้อแปลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรองรับพลังงานของหม้อแปลง และค่าผลคูณพื้นที่ (Ap) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday Law) สมการการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกใช้ในการออกแบบหม้อแปลง คือ

$$E = K_f B_m A_c N f \times 10^{-4} \quad [\text{V}] \quad (\text{ผ2-1})$$

เมื่อ B_m มีหน่วยเป็น T

A_c มีหน่วยเป็น cm^2

K_f เป็นค่าคงที่ มีค่า 4 สำหรับคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

และมีค่า 4.44 สำหรับคลื่นรูปไซน์

$$N A_c = \frac{E \times 10^4}{K_f B_m f} \quad (\text{ผ2-2})$$

จากคำจำกัดความของ window utilization factor เราจะได้

$$K_u = \frac{N A_w}{W_a} \quad (\text{ผ2-3})$$

เมื่อ K_u คือ window utilization factor

A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ [cm^2]

W_a คือ พื้นที่ช่องหน้าต่าง [cm^2]

$$N = \frac{K_u W_a}{A_w} \quad (\text{ผ2-4})$$

$$N A_c = \frac{K_u W_a A_c}{A_w} \quad (\text{ผ2-5})$$

และจากสมการ (ผ2-2) เราจะได้

$$\frac{K_u W_a A_c}{A_w} = \frac{E \times 10^4}{K_f B_m f} \quad (\text{ผ2-6})$$

$$W_a A_c = \frac{A_w E \times 10^4}{K_f B_m K_u f} \quad (\text{ผ2-7})$$

จากคำจำกัดความของความหนาแน่นกระแส (J) เราจะได้

$$J = \frac{I}{A_w} \quad [\text{A}/\text{cm}^2] \quad (\text{ผ2-8})$$

$$A_w = \frac{I}{J} \quad (\text{ผ2-9})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงแสดงได้โดย

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \quad \text{และ} \quad P_{in} = E I \quad (\text{ผ2-10})$$

จากสมการ (ผ2-7) เราจะได้

$$A_w E = K_f B_m f K_u W_a A_c \times 10^{-4} = \frac{EI}{J} \quad (\text{ผ2-11})$$

และเนื่องจาก

$$\frac{EI}{J} = \frac{P_{in}}{J} = \frac{P_o}{J\eta} \quad (\text{ผ2-12})$$

$$W_a A_c|_{total} = W_a A_c|_{primary} + W_a A_c|_{secondary} \quad (\text{ผ2-13})$$

ดังนั้น

$$W_a A_c|_{total} = \frac{P_o \times 10^4}{\eta K_f B_m K_u f J} + \frac{P_o \times 10^4}{K_f B_m K_u f J}$$

$$W_a A_c|_{total} = \frac{P_o \times 10^4}{K_f B_m K_u f J} \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right) \quad (\text{ผ2-14})$$

$$P_i = \frac{P_o}{\eta} + P_o \quad (\text{ผ2-15})$$

เราจะได้

$$W_a A_c|_{total} = \frac{P_i \times 10^4}{K_f B_m K_u f J} \quad (\text{ผ2-16})$$

หรือ

$$A_p = \frac{P_i \times 10^4}{K_f B_m K_u f J} \quad (\text{ผ2-17})$$

แต่

$$J = K_j A_p^y \quad (\text{ค่า } y, K_j \text{ ดูจากตาราง 3.1}) \quad (\text{ผ2-18})$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$A_p = \frac{P_i \times 10^4}{K_f B_m K_u f (K_j A_p^y)} \quad (\text{ผ2-19})$$

$$A_p = \left(\frac{P_i \times 10^4}{K_f B_m K_u f K_j} \right)^x \quad (\text{ค่า } x, K_j \text{ ดูจากตาราง 3.1}) \quad (\text{ผ2-20})$$

ผนวก 3 การออกแบบหม้อแปลง เมื่อกำหนดค่าแรงดันกระแสเพิ่ม

แม้ว่าหม้อแปลงส่วนใหญ่ จะออกแบบให้มีอุณหภูมิเพิ่มอยู่ในขอบเขตที่กำหนด แต่เราสามารถออกแบบหม้อแปลงให้มีค่าแรงดันกระแสเพิ่มอยู่ในขอบเขตที่เรากำหนดได้เช่นเดียวกัน โดยที่ ค่าแรงดันกระแสเพิ่ม และความสามารถในการรองรับพลังงานของแกน มีความสัมพันธ์กัน โดยมีค่าคงที่ K_g และ K_e ดังสมการ

$$P_f = 2 \alpha K_g K_e \tag{ผ3-1}$$

เมื่อ α คือ ค่าแรงดันกระแสเพิ่ม [%]

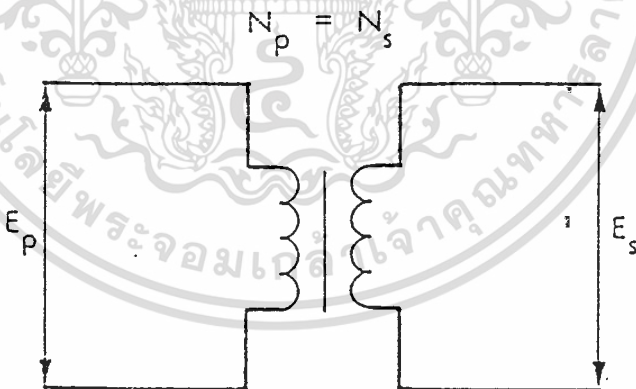
ค่าคงที่ K_g ถูกกำหนดโดยลักษณะทางเรขาคณิตของแกน

$$K_g = f (A_c ; W_{ai} ; MLT) \tag{ผ3-2}$$

ค่าคงที่ K_e ถูกกำหนดโดยสภาพทางแม่เหล็กและไฟฟ้า

$$K_e = f (f ; B_m) \tag{ผ3-3}$$

การหาสมการของ K_g และ K_e นั้น ขั้นแรก เราจะสมมติหม้อแปลง 2 ขด ซึ่งมีแรงดันกระแสเพิ่มเท่ากันทั้งทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ ผ3.1



รูปที่ ผ3.1 แสดงหม้อแปลง 2 ขด

ให้ขดลวดทางด้านปฐมภูมิมีความต้านทาน R_p โอห์ม ทางด้านทุติยภูมิมีความต้านทาน R_s โอห์ม

$$\alpha = \left(\frac{\Delta E_p}{E_p} \times 100 \right) + \left(\frac{\Delta E_s}{E_s} \times 100 \right) \tag{ผ3-4}$$

$$\Delta E_p = R_p I_p \tag{ผ3-5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $\Delta E_s = R_s I_s$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประ (ผ3-6) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{2 R_p I_p}{E_p} \times 100 \quad (\text{ผ3-7})$$

$$\alpha = \frac{200 R_p I_p}{E_p} \times \frac{E_p}{E_p} \quad (\text{ผ3-8})$$

$$\alpha = \frac{200 R_p (VA)}{E_p^2} \quad (\text{ผ3-9})$$

จากสูตรของการหาค่าความต้านทาน เราจะได้

$$R_p = \frac{MLT N_p^2}{W_a K_a} \rho \quad (\text{ผ3-10})$$

เมื่อ $\rho = 1.724 \times 10^{-6}$ [Ω -cm]

K_a คือ ค่า window utilization factor ทางด้านปฐมภูมิ

K_b คือ ค่า window utilization factor ทางด้านทุติยภูมิ

และ $K_a = K_b$

จากกฎของฟาราเดย์ เราจะได้

$$E_p = K_f f N A_c B_m \times 10^{-4} \quad (\text{ผ3-11})$$

เมื่อ $K_f = 4$ สำหรับคลื่นรูปสี่เหลี่ยม และ 4.44 สำหรับคลื่นรูปไซน์
จากสมการที่ (ผ3-9) เราเขียนใหม่ได้เป็น

$$\text{ด้านปฐมภูมิ : } VA = \frac{E_p^2}{200 R_p} \alpha \quad (\text{ผ3-12})$$

แทนสมการ (ผ3-10) และ (ผ3-11) ลงในสมการ (ผ3-12) จะได้

$$\text{ด้านปฐมภูมิ : } VA = \frac{(K_f f N_p A_c B_m \times 10^{-4})^2 \alpha}{200 (\rho MLT N_p^2 / W_a K_a)} \quad (\text{ผ3-13})$$

$$\text{ด้านปฐมภูมิ : } VA = \frac{\alpha K_f^2 f^2 A_c^2 B_m^2 W_a K_a \times 10^{-10}}{2 MLT \rho} \quad (\text{ผ3-14})$$

แทนค่า ρ จะได้

$$\text{ด้านปฐมภูมิ : } VA = \frac{0.29 \alpha K_f^2 f^2 A_c^2 B_m^2 W_a K_a \times 10^{-4}}{MLT} \quad (\text{ผ3-15})$$

$$\text{ให้ } K_e = 0.29 K_f^2 f^2 B_m^2 \times 10^{-4} \quad (\text{ผ3-16})$$

$$\text{และ ด้านปฐมภูมิ : } K_g = \frac{W_a K_a A_c^2}{MLT} \quad [\text{cm}^2] \quad (\text{ผ3-17})$$

เราจะได้ window utilization factor รวมของหม้อแปลงคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_a + K_b = K_u \quad (\text{M3-18})$$

$$K_a = \frac{K_u}{2}$$

แทนค่า K_u ในสมการ (M3-15) จะได้

$$\text{ด้านปฐมภูมิ : } VA = \alpha K_e K_g \quad (\text{M3-19})$$

เมื่อ VA เป็นพลังงานด้านปฐมภูมิ

$$K_e = 0.145 K_f^2 f^2 B_m^2 \times 10^{-4}$$

$$K_g = \frac{W_a K_u A_c^2}{MLT} \quad [\text{cm}^5]$$

K_u เป็น window utilization factor รวมทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แรงดันกระแสของหม้อแปลงมีความสัมพันธ์กับ copper loss ดังนี้

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} \times 100 \quad [\%]$$

$$\text{ด้านปฐมภูมิ : } VA = \alpha K_e K_g$$

$$\text{ด้านทุติยภูมิ : } VA = \alpha K_e K_g$$

ดังนั้น พลังงานรวมทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง คือ

$$P_t = (\text{Primary}) \alpha K_e K_g + (\text{Secondary}) \alpha K_e K_g$$

$$P_t = 2 \alpha K_e K_g$$

(M3-20)

ผนวก 4 ความสามารถในการรองรับพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ

จาก
$$E = L \frac{dI}{dt} \quad (ท4-1)$$

และ
$$L = N \frac{d\Phi}{dI} \quad (ท4-2)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า
$$E = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (ท4-3)$$

$$B_m = \frac{\mu_0 NI}{l_g + l_m/\mu_r} \quad (ท4-4)$$

$$\Phi = B_m A_c = \frac{\mu_0 NI A_c}{l_g + l_m/\mu_r} \quad (ท4-5)$$

$$\frac{d\Phi}{dI} = \frac{\mu_0 N A_c}{l_g + l_m/\mu_r} \quad (ท4-6)$$

$$L = N \frac{d\Phi}{dI} = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{l_g + l_m/\mu_r} \quad (ท4-7)$$

$$\text{Energy} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{\mu_0 N^2 A_c I^2}{2(l_g + l_m/\mu_r)} \quad (ท4-8)$$

จากสมการ (ท4-4) เราจะได้

$$I = \frac{B_m(l_g + l_m/\mu_r)}{\mu_0 N} \quad (ท4-9)$$

แทนค่าในสมการ (ท4-8) ได้

$$\text{Energy} = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{2(l_g + l_m/\mu_r)} \left(\frac{B_m(l_g + l_m/\mu_r)}{\mu_0 N} \right)^2 \quad (ท4-10)$$

$$\text{Energy} = \frac{B_m^2 A_c (l_g + l_m/\mu_r)}{2 \mu_0} \quad (ท4-11)$$

จาก พื้นที่หน้าตัดขดลวด N รอบ มีค่าเท่ากับ $K_u W_a$

ดังนั้น
$$I = \frac{K_u W_a J}{N} = \frac{B_m(l_g + l_m/\mu_r)}{\mu_0 N} \quad (ท4-12)$$

$$l_g + \frac{l_m}{\mu_r} = \frac{\mu_0 K_u W_a J}{B_m} \quad (ท4-13)$$

แทนค่าลงในสมการ (ท4-11) จะได้

$$\text{Energy} = \frac{B_m^2 A_c (\mu_0 K_u W_a J / B_m)}{2 \mu_0} \quad (ท4-14)$$

$$Energy = \frac{B_m K_u W_a A_c J}{2} \quad (M4-15)$$

เมื่อ W_a คือ พื้นที่ช่องหน้าต่าง มีหน่วยเป็น $[m^2]$

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง มีหน่วยเป็น $[m^2]$

J คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น $[A/m^2]$

H คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น $[At/m]$

l_g คือ ช่องว่างอากาศ มีหน่วยเป็น $[m]$

l_m คือ ความยาวของเส้นทางเดินแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น $[m]$

ถ้าเราต้องการทำให้เป็นหน่วย ในระบบ cgs เราจะได้

$$Energy = \frac{B_m K_u W_a A_c J}{2} \times 10^{-4} \quad (M4-16)$$

จาก

$$A_p = W_a A_c$$

เราจะได้

$$A_p = \frac{2 (Energy)}{B_m K_u J} \times 10^4 \quad (M4-17)$$

จาก

$$J = K_j A_p^y \quad (\text{ค่า } y, K_j \text{ ดูจากตาราง 3.1}) \quad (M4-18)$$

ดังนั้นจะได้

$$A_p = \frac{2 (Energy)}{B_m K_u (K_j A_p^y)} \times 10^4 \quad (M4-19)$$

$$A_p = \left(\frac{2 (Energy) \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right)^x [cm^4] \quad (\text{ค่า } x, K_j \text{ ดูจากตาราง 3.1}) \quad (M4-20)$$

ผนวก 5 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อกำหนดค่าแรงดันกระแสเพื่อม

ตัวเหนี่ยวนำก็เช่นเดียวกับหม้อแปลง คือ สามารถออกแบบโดยให้มีอุณหภูมิเพิ่มอยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ นอกจากนี้ เรายังสามารถออกแบบโดยให้ค่าแรงดันกระแสเพื่อมอยู่ในขอบเขตที่เรากำหนดได้เช่นเดียวกัน โดยที่ ค่าแรงดันกระแสเพื่อมและความสามารถในการรองรับพลังงานของแกน มีความสัมพันธ์กัน โดยมีค่าคงที่ K_g และ K_e ดังสมการ

$$(Energy)^2 = \alpha K_e K_g \tag{พ5-1}$$

เมื่อ α คือ แรงดันกระแสเพื่อม [%]

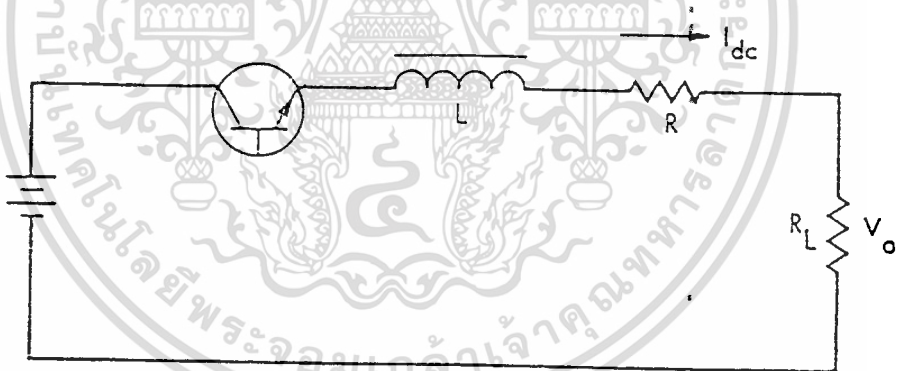
ค่าคงที่ K_g นั้นถูกกำหนดจากลักษณะทางเรขาคณิตของแกน สามารถแสดงได้ดังนี้

$$K_g = f(A_c; W_a; MLT) \tag{พ5-2}$$

ค่าคงที่ K_e ถูกกำหนดโดยสภาพทางแม่เหล็กและไฟฟ้า

$$K_e = f(P_o; B_m) \tag{พ5-3}$$

สำหรับวงจรในรูปที่ พ5.1 เราจะทำการหาค่า K_g และ K_e ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ พ5.1 แสดงตัวเหนี่ยวนำในวงจร

$$P_o = I_{dc} V_o \quad [W] \tag{พ5-4}$$

$$\alpha = \frac{I_{dc} R}{V_o} \times 100 \quad [%] \tag{พ5-5}$$

จาก
$$L = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g} \quad [H] \tag{พ5-6}$$

และ
$$B_{dc} = \frac{0.4 \pi N I_{dc} \times 10^{-4}}{l_g} \quad [T] \tag{พ5-7}$$

เราจะได้ว่า
$$\frac{L}{B_{dc}} = \frac{N A_c \times 10^{-4}}{I_{dc}} \tag{พ5-8}$$

$$N = \frac{LI_{dc} \times 10^4}{B_{dc} A_c} \quad (H5-9)$$

จากสมการความต้านทาน เราจะได้

$$R = \frac{\rho N^2 MLT}{K_u W_a} \quad [\Omega] \quad (H5-10)$$

แทนค่าในสมการ (H5-5) เราจะได้

$$\alpha = \frac{I_{dc}}{V_o} \times \frac{\rho N^2 MLT}{K_u W_a} \times 10^2 \quad (H5-11)$$

จากสมการ (H5-9) เราจะได้

$$N^2 = \left(\frac{LI_{dc}}{B_{dc} A_c} \right)^2 \times 10^8 \quad (H5-12)$$

แทนค่าในสมการ (H5-11) ได้

$$\alpha = \frac{\rho I_{dc} MLT}{V_o K_u W_a} \times \left(\frac{LI_{dc}}{B_{dc} A_c} \right)^2 \times 10^{10} \quad (H5-13)$$

$$\alpha = \frac{\rho I_{dc} MLT (LI_{dc})^2}{V_o K_u W_a B_{dc}^2 A_c^2} \times 10^{10} \quad (H5-14)$$

จาก

$$Energy = \frac{LI_{dc}^2}{2} \quad [\text{Watt-second}] \quad (H5-15)$$

จากสมการ (H5-14) เราจะได้

$$\alpha = \frac{(LI_{dc}^2)^2 MLT \rho \times 10^{10}}{V_o I_{dc} K_u W_a A_c^2 B_{dc}^2} \quad (H5-16)$$

$$\alpha = \frac{(2Energy)^2}{P_o B_{dc}^2} \times \frac{\rho MLT}{K_u W_a A_c^2} \times 10^{10} \quad (H5-17)$$

จาก $\rho = 1.724 \times 10^{-6} \quad [\Omega\text{-cm}]$

$$\text{เราจะได้} \quad \alpha = \frac{6.89 (Energy)^2}{P_o B_{dc}^2} \times \frac{MLT}{K_u W_a A_c^2} \times 10^4 \quad (H5-18)$$

$$(Energy)^2 = 0.145 P_o B_{dc}^2 \times \frac{K_u W_a A_c^2}{MLT} \times 10^{-4} \alpha \quad (H5-19)$$

$$K_g = \frac{K_u W_a A_c^2}{MLT} \quad [\text{cm}^5] \quad (H5-20)$$

$$K_e = 0.145 P_o B_{dc}^2 \times 10^{-4} \quad (H5-21)$$

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} \times 100 \quad [\%] \quad (H5-22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันกระเพื่อมในตัวเหนี่ยวนำ จะมีความสัมพันธ์กับ copper loss ดังแสดงในสมการ (ผ5-22) ซึ่ง copper loss ในตัวเหนี่ยวนำ จะมีความสัมพันธ์กับ I_{rms} ซึ่ง I_{rms} ที่ไหลในวงจรเรกทูลเตอร์ ที่แสดงในรูปที่ ผ5.1 จะมีขนาดเท่ากับหรือน้อยกว่า I_o เสมอ

$$I_{rms} \leq I_o \quad (ผ5-23)$$



ผนวก 6 ข้อมูลขดลวด

สำหรับข้อมูลของขดลวดนั้น จะได้ทำการแสดงตามขนาดของขดลวด ซึ่งจะแสดงในรูปของตัวเลข ซึ่งจะมีอยู่ 2 ระบบที่จะใช้ในการอ้างอิง ได้แก่

1. AWG (American Wire Gauge)
2. SWG (Standard Wire Gauge)

สำหรับในตารางต่อไปนี้ จะแสดงในค่าตัวประกอบต่อไปนี้ (ตามลำดับที่ปรากฏในตาราง)

1. ขนาดตาม AWG
2. ขนาดพื้นที่ของตัวนำทองแดง (bare area) ในหน่วยตารางเซนติเมตร (cm^2)
- ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาว (resistance per unit length) ในหน่วยไมโครโอห์ม ต่อเซนติเมตร ($\mu\Omega / \text{cm}$)
4. ขนาดพื้นที่ของตัวนำทั้งหมด (conductor area) ในหน่วยตารางเซนติเมตร (cm^2)
5. เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ในหน่วยตารางเซนติเมตร (cm^2)
6. ขนาดตาม SWG เทียบเท่ากับ AWG

หมายเหตุ ในปัจจุบัน การอ้างอิงขนาดของขดลวดในเชิงพาณิชย์ จะใช้การอ้างอิงตาม SWG เป็นหลัก

ตารางขดลวด (wire data)

AWG	BARE AREA	RESISTANCE	CONDUCTOR AREA	DIAMETER	SWG
10	0.05261000	40.41720	0.05590000	0.26700	12
11	0.04168000	51.13332	0.04450000	0.23800	13
12	0.03308000	64.38324	0.03564000	0.21300	14
13	0.02626000	81.13104	0.02836000	0.19000	15
14	0.02082000	102.3408	0.02295000	0.17100	16
15	0.01651000	128.9148	0.01837000	0.15300	17
16	0.01307000	162.9048	0.01473000	0.13700	--
17	0.01039000	204.9288	0.01168000	0.12200	18
18	0.00822800	258.9420	0.00932600	0.10900	19
19	0.00653100	326.1804	0.00753900	0.09800	20
20	0.00518800	410.7228	0.00606500	0.08790	21
21	0.00411600	517.7604	0.00483700	0.07850	22
22	0.00324300	656.8104	0.00385700	0.07010	23
23	0.00258800	823.1760	0.00313500	0.06320	24
24	0.00204700	1040.8356	0.00251400	0.05660	25
25	0.00162300	1312.6320	0.00200200	0.05050	26
26	0.00128000	1662.4200	0.00160300	0.04520	27
27	0.00102100	2085.8736	0.00131300	0.04090	28
28	0.00080460	2648.3772	0.00105150	0.03660	30
29	0.00064700	3293.0748	0.00085480	0.03300	31
30	0.00050670	4205.1192	0.00067850	0.02940	33
31	0.00040130	5308.1256	0.00055960	0.02670	35
32	0.00032420	6569.2164	0.00045590	0.02410	--
33	0.00025540	8341.2696	0.00036620	0.02160	36
34	0.00020110	10595.9808	0.00028630	0.01910	37
35	0.00015890	13409.3640	0.00022680	0.01700	38
36	0.00012660	16819.4880	0.00018130	0.01520	39
37	0.00010260	20766.0360	0.00015380	0.01400	41
38	0.00008107	26284.7760	0.00012070	0.01240	42
39	0.00006207	34329.9000	0.00009320	0.01090	43
40	0.00004869	43754.4000	0.00007230	0.00960	44
41	0.00003972	53648.5800	0.00005840	0.00863	--
42	0.00003166	68509.0080	0.00004550	0.00762	--
43	0.00002452	86900.6880	0.00003683	0.00685	--
44	0.00002020	105148.9920	0.00003165	0.00635	--

ตารางที่ ๘6.1 แสดงข้อมูลขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก 7 ข้อเสนอแนะในการใช้โปรแกรม

ทางผู้ออกแบบโปรแกรมมีข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำความถี่สูงโดยใช้โปรแกรมหาดังนี้คือ

การออกแบบหม้อแปลง

เมื่อเข้าสู่หน้าจอในการออกแบบหม้อแปลงแล้ว ผู้ใช้จะต้องป้อนค่าคุณสมบัติต่างๆของหม้อแปลงที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยจะต้อง ป้อนค่าต่างๆดังนี้

- แรงดันทางด้านขาเข้า (โวลท์)
- แรงดันทางด้านขาออก (โวลท์)
- กระแสขาออก (แอมแปร์)
- ความถี่ใช้งาน (เฮิร์ตซ์)
- ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (เทสลา) ซึ่งจะมีค่าไม่เกิน 0.37 เทสลา เนื่องจากเป็นการออกแบบการใช้งานที่ความถี่สูง
- ประสิทธิภาพ (ต้องมีค่าไม่เกิน 1)

และเนื่องจากการออกแบบจะมีวิธีคำนวณอยู่ 2 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีวิธีการพิจารณากันคนละแบบ โดยที่การคำนวณ โดยวิธีผลคูณพื้นที่ (area product) ผู้ใช้จะต้องป้อนอุณหภูมิเพิ่มเข้าไปด้วยโดยจะมีให้เลือก 2 ค่า คือ 25 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส ส่วนการคำนวณโดยวิธีใช้ค่าทางกายภาพของแกน (core geometry) นั้น เป็นการคำนวณโดยพิจารณาจาก เรกกูเรชัน ดังนั้นผู้ใช้จะต้องป้อนค่าเรกกูเรชัน ที่ต้องการลงไปด้วย

Input voltage	28	volt	Main menu Next Cancel
Output voltage	28	volt	
Output current	5	Ampere	
Frequency	20000	Hertz	
Efficiency	0.95		
Temperature rise	25	Calcium	
Maximum flux density	0.3	Tesla	

Input voltage	22	volt
Output voltage	10	volt
Output current	10	Ampere
Frequency	10000	Hertz
Efficiency	0.98	
Regulation	2	Calcias
Maximum flux density	0.3	Tesla

รูปที่ ๗.2 แสดงหน้าจอการรับข้อมูลการออกแบบ โดยวิธีการใช้ลักษณะทางกายภาพของแกน

หลังจากป้อนค่าต่างๆเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะปรากฏหน้าจอสำหรับกรอกรายละเอียดเพิ่มเติม อีกดังนี้คือ

- ลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ใช้งาน ซึ่งมีให้เลือก 2 แบบคือ รูปคลื่นไซน์ และ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม
- ลักษณะวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งมีให้เลือก 2 แบบคือ ฟูลเวฟบริดจ์ (full wave bridge) และ เซ็นเตอร์แทป (center-tapped)
- ลักษณะของวงจรทางด้านปฐมภูมิว่าเป็นแบบพุช-พูล (push-pull) หรือไม่

Please select the current wave form

Sine wave ▾

Is primary push-pull circuit ?

no ▾

Please select for secondary circuit

Full-wave bridge ▾

Please choose the core configuration

EE core ▾

รูปที่ ๗.3 แสดงหน้าจอการรับข้อมูลเพิ่มเติมของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

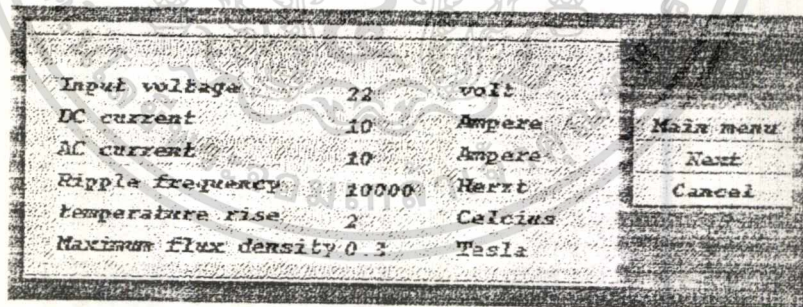
การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

สำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจะมีให้เลือก 2 ชนิด คือ แกนเฟอร์ไรต์ และ แกนพาวเวอร์ ซึ่งในการออกแบบผู้ใช้จะต้องป้อนค่าต่างๆดังนี้

- ความเหนี่ยวนำที่ต้องการ (เฮนรี)
- กระแสไฟตรง (แอมแปร์)
- กระแสไฟสลับ (แอมแปร์)
- ความถี่ใช้งาน (เฮิร์ตซ์)
- ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

อุณหภูมิเพิ่มซึ่งมี 2 ค่าคือ 25 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส (สำหรับการคำนวณโดยวิธีผลคูณพื้นที่)

เรขาคณิต และกำลังงานทางด้านขาออก (สำหรับการคำนวณโดยวิธีใช้ลักษณะทางกายภาพของแกน)



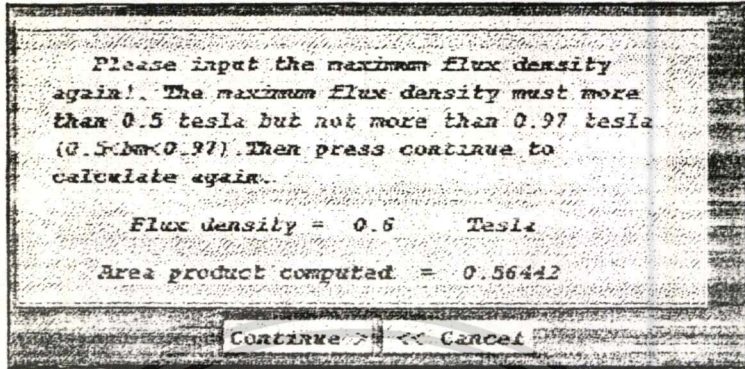
Input voltage	22	volt	
DC current	10	Ampere	Main menu
AC current	10	Ampere	Next
Ripple frequency	10000	Hertz	Cancel
temperature rise	2	Celsius	
Maximum flux density	0.3	Tesla	

รูปที่ ๗.4 แสดงหน้าจอการรับข้อมูลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

และในการออกแบบโดยใช้แกนเฟอร์ไรต์นั้น จะมีลักษณะของแกนให้เลือก 3 แบบคือ แกนEE , แกนEI และ แกนC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของแกนพาวเคอร์นั้นในบางครั้งผู้ใช้อาจจะสามารถป้อนค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าที่กำหนดไว้ได้ แต่จะต้องขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆของโปรแกรมด้วย

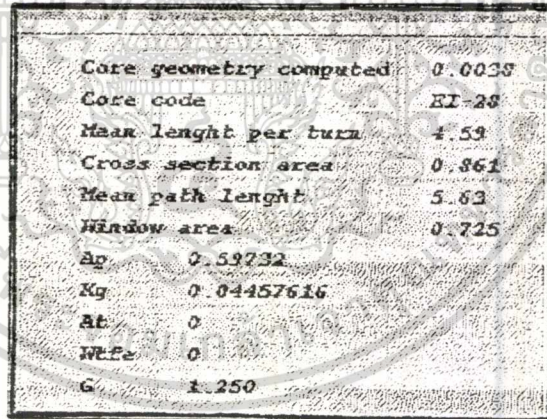


รูปที่ ๗.5 แสดงหน้าจอการรับข้อมูลในการออกแบบโดยใช้แกนพาวเคอร์ทอรอยด์

การแสดงผล

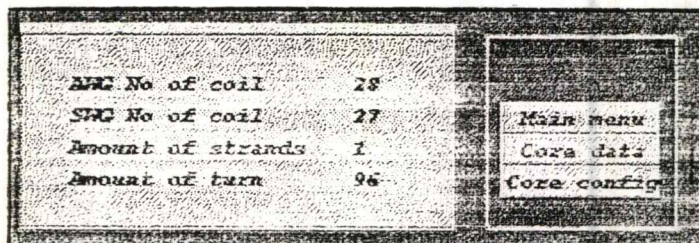
หลังจากที่ผู้ใช้ได้ป้อนค่าต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้กดปุ่ม Calculate เพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณ โดยที่ผลจากการคำนวณจะมีให้เลือกดูได้ 3 แบบคือ

- ข้อมูลของแกนซึ่งจะแสดงข้อมูลต่างๆที่เป็นลักษณะเฉพาะของแกนนั้นๆ เช่น พื้นที่ช่องหน้าต่าง, พื้นที่หน้าตัดของขากลาง, ความยาวรอบโดยเฉลี่ย, ค่าผลคูณพื้นที่, ค่าลักษณะทางกายภาพ เป็นต้น



รูปที่ ๗.6 แสดงรายละเอียดของแกน

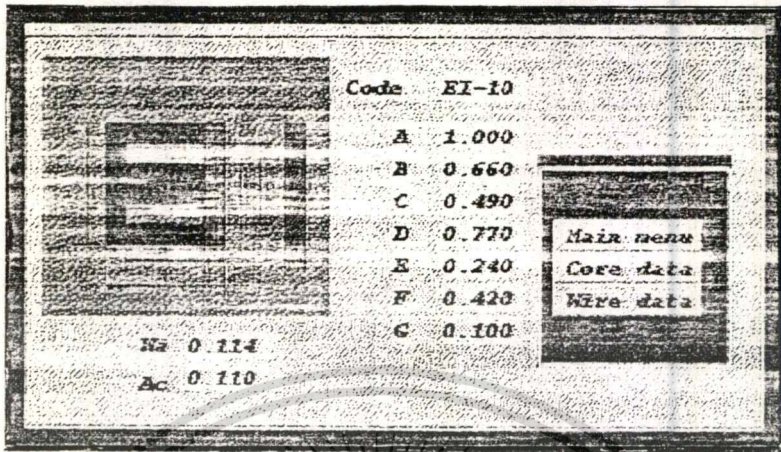
-ข้อมูลในการพันขดลวด ซึ่งจะแสดงข้อมูลต่างๆดังนี้คือ เบอร์ของขดลวด, จำนวนรอบที่ใช้พัน และจำนวนลวดที่ใช้ตีเกลียว



รูปที่ ๗.7 แสดงข้อมูลการพัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

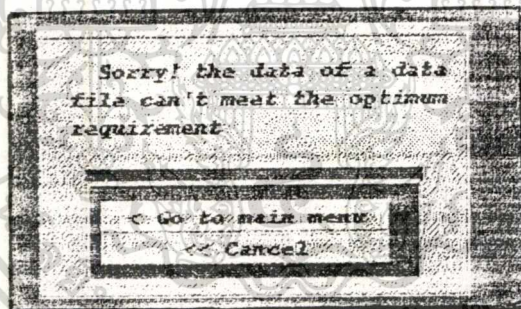
- ขนาดมิติของแกนซึ่งจะบอกความยาว ความกว้าง และความสูงของแกน



รูปที่ ๗.๘ แสดงขนาดมิติ

การแสดงผลผิดพลาด

ในบางครั้งการคำนวณอาจจะได้ผลเนื่องจากโปรแกรมไม่มีข้อมูลของแกนหรือขดลวดที่ต้องการ ซึ่งทางแก้ไขก็คือ ลองเปลี่ยนไปใช้แกนชนิดอื่น ซึ่งอาจจะมีข้อมูลที่ให้เลือกมากกว่า

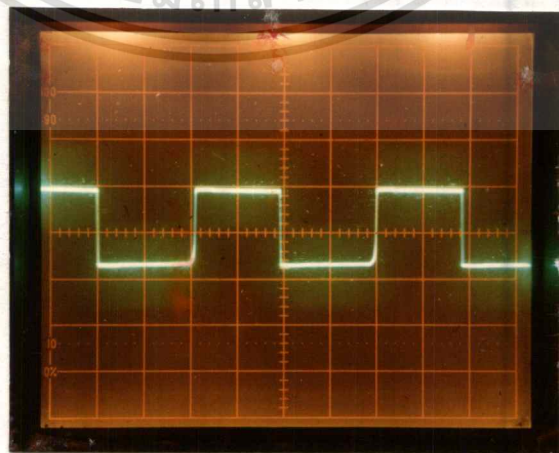
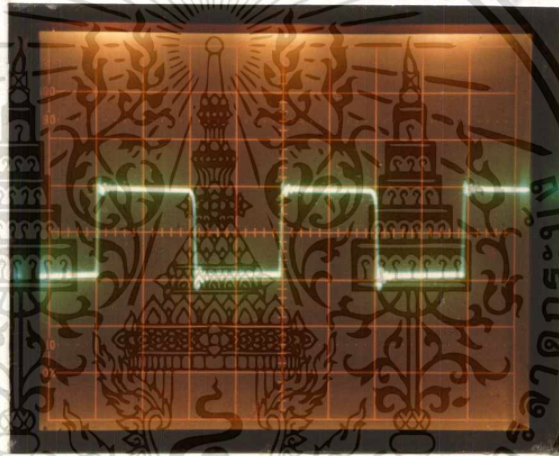


รูปที่ ๗.๙ แสดงหน้าจอแสดงผลผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

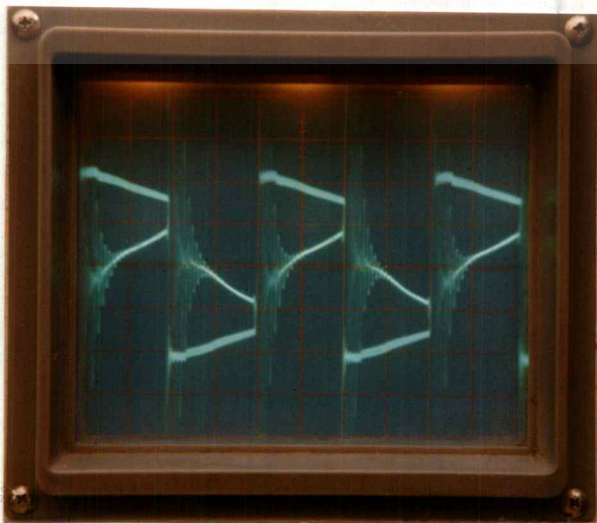
ผนวก 8 ลักษณะของรูปคลื่นที่ได้จากทดลอง

รูปถ่ายทางด้านล่างรูปแรกจะแสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 50 kHz ที่วัดจากแรงดันด้านปฐมภูมิ และรูปที่สองแสดงให้เห็นแรงดันด้านทุติยภูมิ จากการทดสอบหม้อแปลงขนาด 50/50 โวลต์, กระแสด้านทุติยภูมิสูงสุด 5 แอมแปร์, ความถี่ใช้งาน 50 kHz, แกน EI-33 โดยการเปิดวงจรด้านทุติยภูมิไว้ แล้วป้อนแรงดันด้านปฐมภูมิขนาด 50 โวลต์ ออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดตั้งไว้ที่ 5 V/div (probe x 10) และ 5 μ sec/div เหมือนกันทั้งสองรูป

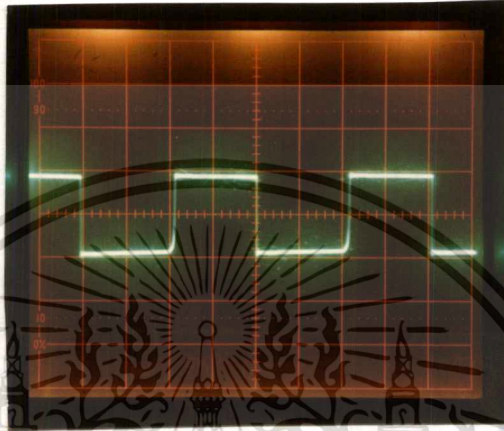


รูปถ่ายทางด้านต่างรูปแรกจะแสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 50 kHz ที่วัดจากแรงดันทดสอบจ่ายคร่อมตัวต้านทานขนาด 0.03Ω ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำทดสอบขนาด 0.00001 เฮนรี, กระแส I_{Lc} 5 แอมแปร์, กระแส I_{Lc} 0.5 แอมแปร์, ความถี่ใช้งาน 50 kHz, แกน EI-28 โดยป้อนแรงดันขนาด 20 โวลต์ ออสซิลโลสโคปที่ใช้วัดตั้งไว้ที่ 10 V/div และ $5 \mu\text{sec/div}$

ส่วนรูปที่สองจะเป็นรูปของแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ตั้งไว้ที่ 10 V/div และ $5 \mu\text{sec/div}$ และรูปแรงดันคร่อมตัวต้านทานซึ่งก็เทียบได้กับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม ตั้งไว้ที่ 0.2 V/div และ $5 \mu\text{sec/div}$



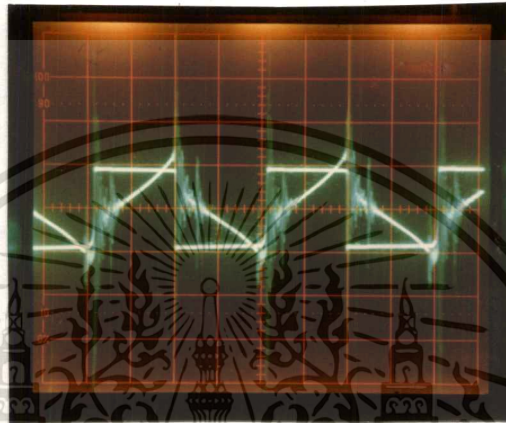
รูปถ่ายต่อไปนี้ จะแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างรูปคลื่นที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงแบบ open circuit test รูปแรกจะเป็นรูปคลื่นของแรงดันคร่อมตัวหม้อแปลง ซึ่งมีค่าเท่าที่พิกัด 50 V ตั้งออสซิลโลสโคปไว้ที่ 5 V/div (probe x 10) และ 5 $\mu\text{sec}/\text{div}$



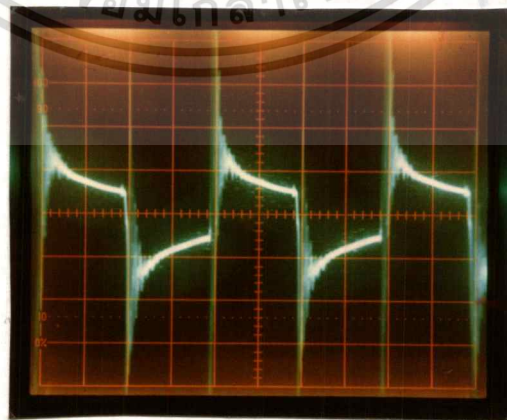
รูปต่อมาแสดงแรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.16 โอห์ม ซึ่งต่ออนุกรมกับหม้อแปลงที่ทดสอบ ซึ่งใช้สำหรับวัดกระแส ลักษณะรูปคลื่นแรงดันมีลักษณะเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งเทียบได้กับลักษณะรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวหม้อแปลงขณะทดสอบ ออสซิลโลสโคปตั้งไว้ที่ 0.1 V/div และ 5 $\mu\text{sec}/\text{div}$



รูปต่อมาเป็นรูปสุดท้ายของการทดสอบหม้อแปลงแบบ open circuit test เป็นรูปของแรงดันคร่อมตัวต้านทานซึ่งเทียบได้กับกระแส และแรงดันคร่อมหม้อแปลงที่ทดสอบ ซ้อนทับบนแกนเดียวกัน เพื่อแสดงให้เห็นมุมที่กระแสตามแรงดันอยู่



รูปต่อไปจะเป็นรูปตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงแบบ short circuit test รูปแรกจะเป็นรูปคลื่นของแรงดันคร่อมตัวหม้อแปลง ตั้งออสซิลโลสโคปไว้ที่ 2 V/div และ $5\text{ }\mu\text{sec/div}$

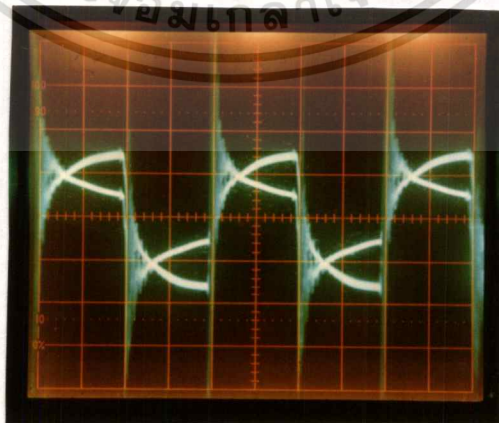


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปต่อมาเป็นรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน 0.16 โอห์ม ซึ่งใช้สำหรับวัดกระแส ซึ่งลักษณะรูปคลื่นเทียบได้กับรูปคลื่นของกระแส คือเป็นรูปคลื่นคล้ายคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานในขดลวดมีค่ามากกว่าค่าความเหนี่ยวนำในขดลวดขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจรด้านทุติยภูมิ ออสซิลโลสโคปตั้งไว้ที่ 0.5 V/div และ 5 $\mu\text{sec/div}$



รูปต่อมาเป็นรูปสุดท้ายของการทดสอบหม้อแปลงแบบ short circuit test เป็นรูปของแรงดันคร่อมตัวต้านทานซึ่งเทียบได้กับกระแส และแรงดันคร่อมหม้อแปลงที่ทดสอบ ช้อนทับบนแกนเดียวกัน เพื่อแสดงให้เห็นมุมที่กระแสตามแรงดันอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนวก 9 โปรแกรม วิชาลเบสิก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโค้ดภาษาเบสิก (Source Code) ที่ได้ทำการเขียนขึ้นมา โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของโปรแกรมย่อยเหตุการณ์ และ ส่วนของโปรแกรมย่อยทั่วไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล bp7b)

Private Sub bp7b_Click()

fp7f2.Visible = False

Hide

page6.Show

End Sub

(โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล bp7cal ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบหรือแปลงโดยใช้วิธีผลคูณพื้นที่)

Private Sub bp7cal_Click()

(กำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในโปรแกรมย่อยนี้)

Dim pin, kf, kj As Single

Dim wave, scd, po_ As Single

Dim pri, po As Single

Dim x, y As Single

Dim core_configuration As String

Dim pt As Single

Dim app As Double

Dim code, ctype As String

Dim mpl, wfe, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g As Single

Dim coretype As String

Dim a As Integer

Dim j1, nep1, nes1 As Single

Dim npp, np, ip, j As Single

Dim depth, radius, awbskin, nep As Single

Dim awgp, awbp, ohmmp, arp, diap, swgp As Single

Dim rp, ohmp, pp, nss, awwbs, nes As Single

Dim awgs, awbs, ohmms, ars, dias, swgs As Single

Dim ohms, rs, ns, ps, pcu, pe, pfee, mw As Single

Dim result As Single

Dim awwbp As Single

Dim core_data As String

Dim aa, bb, cc, dd, ee, ff, gg, hh, ii As String

Dim cfgcode As String

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(กำหนดค่าคงที่ต่างๆที่ใช้ในโปรแกรมย่อยนี้)

Const vd = 1

Const ku! = 0.3

If (cp7selwav.Text = " sine wave ") Then

 wave = 1

Elseif (cp7selwav.Text = " square wave ") Then

 wave = 2

Else

 wave = 1

End If

If (cp7selpri.Text = " yes ") Then

 pri = 1

Elseif (cp7selpri.Text = " no ") Then

 pri = 2

Else

 pri = 2

End If

If (cp7selsec.Text = " full-wave bridge ") Then

 scd = 1

Elseif (cp7selsec.Text = " center-tapped ") Then

 scd = 2

Else

 scd = 1

End If

(เรียกโปรแกรมย่อย selscdct เพื่อทำการคำนวณหาค่าพลังงานทางด้านขาออก)

selscdct scd, po_, vo, io, po

(เรียกโปรแกรมย่อย selprict เพื่อทำการคำนวณหาค่าพลังงานทางด้านขาเข้า)

selprict pri, po, pin, n

pt = pin + po_

(เรียกโปรแกรมย่อย selcurwav เพื่อหาค่า kf ตามลักษณะของกระแสที่ใช้งาน)

selcurwav wave, kf

core_configuration = cp7core.Text

(เรียกโปรแกรมย่อย selcorcon เพื่อหาค่า Dt,Kj,x,y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ทำการคำนวณหาค่าผลคูณพื้นที่โดยเรียก ฟังก์ชัน areapro)

```
app = areapro(x, pt, kf, bm, f, kj)
```

```
page8!tp8apc.Text = Str(app)
```

```
ctype = cp7core.Text
```

```
If ctype = "EE_core" Then
```

```
    coretype = "ee_ap.dat"
```

```
Elseif ctype = "EI_core" Then
```

```
    coretype = "ei_ap.dat"
```

```
Elseif ctype = "C_core" Then
```

```
    coretype = "uu_ap.dat"
```

```
Else
```

```
    coretype = "ee_ap.dat"
```

```
End If
```

(ทำการเปรียบเทียบค่าผลคูณพื้นที่ที่คำนวณได้ กับค่า Ap ในแฟ้มข้อมูล เพื่อหาเบอร์ของแกนที่ใช้

งาน)

```
findcore app, mpl, wfe, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g, result, code, coretype
```

```
If (result = 0) Then
```

```
    Hide
```

```
    sad1!fsad1f1.Visible = True
```

```
    sad1.Show
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

(แสดงข้อมูลของแกนออกทางหน้าจอ)

```
page8!tp8ap.Text = Str(ap)
```

```
page8!tp8kg.Text = Str(kg)
```

```
page8!tp8wa.Text = Str(wa)
```

```
page8!tp8mlt.Text = Str(mlt)
```

```
page8!tp8mpl.Text = Str(mpl)
```

```
page8!tp8wfe.Text = Str(wfe)
```

```
page8!tp8ac.Text = Str(ac)
```

```
page8!tp8at.Text = Str(at)
```

```
page8!tp8g.Text = Str(g)
```

```
page8!tp8ap.Text = Str(ap)
```

```
page8!tp8code.Text = code
```

(ทำการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ)

$npp = (vin * 10000) / (kf * bm * f * ac)$

$np = \text{Int}(npp)$

If $((npp - np) \geq 0.5)$ Then $np = np + 1$

Else $np = np$

End If

$ip = po / (vin * n)$

$j = kj * (\text{Exp}(y * \text{Log}(ap)))$

$j1 = \text{Int}(j)$

If $((j - j1) \geq 0.5)$ Then $j = j1 + 1$

Else $j = j1$

End If

(คำนวณหาขนาดของขดลวดที่ใช้งาน)

If $scd = 2$ Then $awwbp = (ip * 0.707) / j$

Else $awwbp = (ip / j)$

End If

(พิจารณาผลของปรากฏการณ์ผิว)

$depth = 6.61 / (\text{Sqr}(f))$

$radius = depth$

$awbskin = 3.1416 * radius * radius$

(เปรียบเทียบค่าของ skin depth ที่คำนวณได้ กับ ขนาดของขดลวดในเพิ่มข้อมูล)

findwire awbskin, awgp, awbp, ohmmp, arp, diap, swgp, a

If $(a = 0)$ Then

Hide

sad1!fsad1f2.Visible = True

sad1.Show

Exit Sub

End If

(หาจำนวนของลวดที่ใช้ในการตีเกลียว)

$nep = (awwbp / awbp)$

$nep1 = \text{Int}(nep)$

If $((nep - nep1) \geq 0.5)$ Then $nep = nep1 + 1$

Else $nep = nep1$

End If

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If ((awwbp / awbp) < 1) Then
```

```
    nep = 1
```

(ในกรณีที่ค่าของ skin depth มีขนาดมากกว่ารัศมีของขดลวดที่ใช้งานจริงจะทำการเปรียบเทียบหาขนาดของขดลวดจากเพิ่มข้อมูลอีกครั้งโดยจะใช้ขนาดของขดลวดที่คำนวณได้ในตอนแรก(awwbp) แทน awbskin)

```
    findwire awwbp, awgp, awbp, ohmmp, arp, diap, swgp, a
```

```
    If (a = 0) Then
```

```
        Hide
```

```
        sad1!fsad1f2.Visible = True
```

```
        sad1.Show
```

```
        Exit Sub
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
ohmp = ohmmp / nep
```

```
rp = (milt * np * ohmp * (10 ^ (-6)))
```

```
pp = (ip * ip * rp)
```

```
If (scd = 1) Then nss = (np * (vo + (2 * vd))) / vin
```

```
Else nss = (np * (vo + vd)) / vin
```

```
End If
```

```
ns = Int(nss)
```

```
    If ((nss - ns) >= 0.5) Then ns = ns + 1
```

```
    Else ns = ns
```

```
    End If
```

```
    If (scd = 2) Then awwbs = (io * 0.707) / j
```

```
Else awwbs = io / j
```

```
End If
```

```
depth = 6.61 / Sqr(f)
```

```
radius = depth
```

```
awbskin = 3.1416 * radius * radius
```

```
findwire awbskin, awgs, awbs, ohmms, ars, dias, swgs, a
```

```
If (a = 0) Then
```

```
    Hide
```

```
    sad1!fsad1f2.Visible = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sad1.Show
Exit Sub
End If

nes = awwbs / awbs
nes1 = Int(nes)
If ((nes - nes1) >= 0.5) Then nes = nes1 + 1
Else nes = nes1
End If

If ((awwbs / awbs) < 1) Then
nes = 1
findwire awwbs, awgs, awbs, ohmms, ars, dias, swgs, a
If (a = 0) Then
Hide
sad1!fsad1f2.Visible = True
sad1.Show
Exit Sub
End If
End If

ohms = ohmms / nes
rs = (mit * ns * ohms * (10 ^ (-6)))
ps = (io * io * rs)
pcu = (pp + ps)
pe = ((po / n) - po)
pfee = (pe - pcu)
'mw = (pfee / (wtf * (10 ^ (-3))))
( แสดงข้อมูลในการพัน )
page9!tp9tpri.Text = Str(np)
page9!tp9tsec.Text = Str(ns)
page9!tp9awgpri.Text = Str(awgp)
page9!tp9stpri.Text = Str(nep)
page9!tp9awgsec.Text = Str(awgs)
page9!tp9stsec.Text = Str(nes)
page9!tp9swgpri.Text = Str(swgp)
page9!tp9swgsec.Text = Str(swgs)

```

```

page9!tp9code.Text = code
( แสดงขนาดมิติของแกน )
If ctype = " EE_core " Then
Open "ee_ap.cfg" For Input As #1
Do Until (EOF(1)) Or (check = 1)
Line Input #1, core_data
aa = Mid(core_data, 1, 5)
bb = Mid(core_data, 7, 5)
cc = Mid(core_data, 13, 5)
dd = Mid(core_data, 19, 5)
ee = Mid(core_data, 25, 5)
ff = Mid(core_data, 31, 5)
cfgcode = Mid(core_data, 50)
If (cfgcode = code) Then check = 1
Elseif (cfgcode <> code) Then check = 0
End If
Loop
Close #1
If check = 1 Then
page41!tp41a.Text = aa
page41!tp41b.Text = bb
page41!tp41c.Text = cc
page41!tp41d.Text = dd
page41!tp41e.Text = ee
page41!tp41f.Text = ff
page41!tp41wa.Text = Str(wa)
page41!tp41ac.Text = Str(ac)
page41!tp41code.Text = code
End If
Elseif ctype = " EI_core " Then
Open "ei_ap.cfg" For Input As #2
Do Until (EOF(2)) Or (check = 1)
Line Input #2, core_data

```

```

bb = Mid(core_data, 7, 5)
cc = Mid(core_data, 13, 5)
dd = Mid(core_data, 19, 5)
ee = Mid(core_data, 25, 5)
ff = Mid(core_data, 31, 5)
gg = Mid(core_data, 37, 5)
cfgcode = Mid(core_data, 55)
If (cfgcode = code) Then check = 1
Elseif (cfgcode <> code) Then check = 0
End If
Loop
Close #2
If check = 1 Then
    page40!tp40a.Text = aa
    page40!tp40b.Text = bb
    page40!tp40c.Text = cc
    page40!tp40d.Text = dd
    page40!tp40e.Text = ee
    page40!tp40f.Text = ff
    page40!tp40g.Text = gg
    page40!tp40wa.Text = wa
    page40!tp40ac.Text = ac
    page40!tp40code.Text = code
End If

```

```

Elseif ctype = " C_core " Then
Open "uu_ap.cfg" For Input As #3
Do Until (EOF(3)) Or (check = 1)
Line Input #3, core_data
    aa = Mid(core_data, 1, 5)
    bb = Mid(core_data, 7, 5)
    cc = Mid(core_data, 13, 5)
    dd = Mid(core_data, 19, 5)
    ee = Mid(core_data, 25, 5)
    ii = Mid(core_data, 31, 5)

```

```

cfgcode = Mid(core_data, 50)
If (cfgcode = code) Then check = 1
Elseif (cfgcode <> code) Then check = 0
End If
Loop
Close #3
If check = 1 Then
    page42!tp42a.Text = aa
    page42!tp42b.Text = bb
    page42!tp42c.Text = cc
    page42!tp42d.Text = dd
    page42!tp42e.Text = ee
    page42!tp42i.Text = ii
    page42!tp42wa.Text = wa
    page42!tp42ac.Text = ac
    page42!tp42code.Text = code
End If
End If
fp7f2.Visible = True
End Sub

```

(โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล bp7can)

```

Private Sub bp7can_Click()
    End

```

End Sub

(โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล bp7coredata)

```

Private Sub bp7coredata_Click()
    Hide
    page8.Show

```

End Sub

(โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล bp7dimension)

```

Private Sub bp7dimension_Click()
    Dim core As String

```

```

    core = cp7core.Text

```

```

    If core = "EE_core" Then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        page41.Show
    Elself core = " EI_core " Then
        page40.Show
    Elself core = " C_core " Then
        page42.Show
    End If
End Sub

( โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล bp7wiring )
Private Sub bp7wiring_Click()
    Hide
    page9.Show
End Sub

( โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล cir )
Private Sub cir_Click()
    circuit.Visible = True
End Sub

( โปรแกรมย่อยสำหรับ form )
Private Sub Form_Load()
    cp7core.AddItem " EE_core "
    cp7core.AddItem " EI_core "
    cp7core.AddItem " C_core "
    cp7selwav.AddItem " sine wave "
    cp7selwav.AddItem " square wave "
    cp7selpri.AddItem " yes "
    cp7selpri.AddItem " no "
    cp7selsec.AddItem " full-wave bridge "
    cp7selsec.AddItem " center-tapped "
End Sub

( โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล gocir )
Private Sub gocir_Click()
    circuit.Visible = False
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล gowave)

```
Private Sub gowave_Click()
```

```
    waveform.Visible = False
```

```
End Sub
```

(โปรแกรมย่อยสำหรับคอนโทรล wave)

```
Private Sub wave_Click()
```

```
    waveform.Visible = True
```

```
End Sub
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(โปรแกรมย่อยสำหรับการออกแบบหม้อแปลงโดยวิธีเรขาคณิตของแกน(core geometry)

Private Sub bp11cal_Click()

Dim wav, pri As Single

Dim po_, pin, kf As Single

Dim ke, kgg As Double

Dim pt As Single

Dim result As Single

Dim code, ctype As String

Dim mpl, wtf, ml, wa, ap, at, g As Single

Dim coretype As String

Dim a As Integer

Dim j1, nep1, nes1 As Integer

Dim vp As Single

Dim npp, np, ip, j As Single

Dim depth, radius, awbskin, nep As Single

Dim awwbp As Single

Dim awgp, awbp, ohmp, arp, diap, swgp As Single

Dim rp, ohmp, pp, nss, awwbs, nes As Single

Dim awgs, awbs, ohms, ars, dias, swgs As Single

Dim ohms, rs, ns, ps, pcu, pe, pfee, mw As Single

Dim core_data As String

Dim aa, bb, cc, dd, ee, ff, gg, hh, ii As String

Dim cfgcode As String

Const vd = 1

Const ku = 0.3

If (cp11selwav.Text = " sine wave ") Then

wave = 1

Elseif (cp11selwav.Text = " square wave ") Then

wave = 2

Else

wave = 1

End If

If (cp11selpri.Text = "yes") Then

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Elseif (cp11selpri.Text = " no ") Then
    pri = 2
Else
    pri = 2
End If
If (cp11selsec.Text = " full-wave bridge ") Then
    scd = 1
Elseif (cp11selsec.Text = " center-tapped ") Then
    scd = 2
Else
    scd = 1
End If
selscdct scd, po_ vo, io, po
selpricct pri, po, pin, n
pt = pin + po_
selcurwav wave, kf
ke = 0.145 * (kf * kf) * (f * f) * (bm * bm) * (10 ^ -4)
( คำนวณหาค่าเรขาคณิตของแกน )
kkg = pt / (2 * ke * alfa)
page12!tp12kgc.Text = Str(kkg)
ctype = page11!cp11corcon.Text
If ctype = " EE core " Then
    coretype = "ee_kg.dat"
Elseif ctype = " EI core " Then
    coretype = "ei_kg.dat"
Elseif ctype = " C core " Then
    coretype = "uu_kg.dat"
Else
    coretype = "ee_kg.dat"
End If
findcore kkg, mpl, wfef, mlf, ac, wa, ap, kg, at, g, result, code, coretype
If (result = 0) Then
    Hide

```

```

sad1.Show
Exit Sub
End If
page12!tp12ap.Text = Str(ap)
page12!tp12kg.Text = Str(kg)
page12!tp12wa.Text = Str(wa)
page12!tp12mlt.Text = Str(mlt)
page12!tp12mpl.Text = Str(mpl)
page12!tp12wtfe.Text = Str(wtfe)
page12!tp12ac.Text = Str(ac)
page12!tp12at.Text = Str(at)
page12!tp12g.Text = Str(g)
page12!tp12ap.Text = Str(ap)
page12!tp12code.Text = code
vp = vin
npp = (vp * (10 ^ 4)) / (kf * bm * f * ac)
np = Int(npp)
If ((npp - np) >= 0.5) Then np = np + 1
Else np = np
End If
ip = po / (vp * n)
j = (pt * (10 ^ 4)) / (kf * ku * bm * f * ap)
j1 = Int(j)
If ((j - j1) >= 0.5) Then
j = j1 + 1
Else
j = j1
End If
If scd = 2 Then
awwbp = (ip * 0.707) / j
Else
awwbp = (ip / j)
End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

radius = depth
awbskin = 3.1416 * radius * radius
findwire awbskin, awgp, awbp, ohmmp, arp, diap, swgp, a
If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
nep = (awwbp / awbp)
nep1 = Int(nep)
If ((nep - nep1) >= 0.5) Then
    nep = nep1 + 1
Else
    nep = nep1
End If
If ((awwbp / awbp) < 1) Then
    nep = 1
    findwire awwbp, awgp, awbp, ohmmp, arp, diap, swgp, a
    If (a = 0) Then
        Hide
        sad1!fsad1f2.Visible = True
        sad1.Show
        Exit Sub
    End If
End If
ohmp = ohmmp / nep
rp = (mlt * np * ohmp * (10 ^ (-6)))
pp = (ip * ip * rp)
If (scd = 1) Then
    nss = ((np * (vo + (2 * vd))) / vin) * (1 + (alfa / 100))
Else
    nss = ((np * (vo + vd) / vin) * (1 + (alfa / 100)))
End If

```

```

ns = Int(nss)
  If ((nss - ns) >= 0.5) Then ns = ns + 1
  Else ns = ns
  End If
If (scd = 2) Then
  awwbs = (io * 0.707) / j
Else
  awwbs = io / j
End If
depth = 6.61 / Sqr(f)
radius = depth
awbskin = 3.1416 * radius * radius
findwire awbskin, awgs, awbs, ohmms, ars, dias, swgs, a
If (a = 0) Then
  Hide
  sad1!fsad1f2.Visible = True
  sad1.Show
  Exit Sub
End If
nes = awwbs / awbs
nes1 = Int(nes)
If ((nes - nes1) >= 0.5) Then nes = nes1 + 1
Else nes = nes1
End If
If ((awwbs / awbs) < 1) Then
  nes = 1
  findwire awwbs, awgs, awbs, ohmms, ars, dias, swgs, a
  If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
  End If
End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ohms = ohms / nes
rs = (mlt * ns * ohms * (10 ^ (-6)))
ps = (io * io * rs)
pcu = (pp + ps)
alfa = (pcu * 100) / po
pe = ((po / n) - po)
pfee = (pe - pcu)
'mw = (pfee / (wtf * (1 / 100000)))
page13!tp13turnpri.Text = Str(np)
page13!tp13turnsec.Text = Str(ns)
page13!tp13awgpri.Text = Str(awgp)
page13!tp13stpri.Text = Str(nep)
page13!tp13awgsec.Text = Str(awgs)
page13!tp13stsec.Text = Str(nes)
page13!tp13swgpri.Text = Str(swgp)
page13!tp13swgsec.Text = Str(swgs)
page13!tp13code.Text = code
If ctype = "EE core" Then
  Open "ee_ap.cfg" For Input As #1
  Do Until (EOF(1)) Or (check = 1)
  Line Input #1, core_data
    aa = Mid(core_data, 1, 5)
    bb = Mid(core_data, 7, 5)
    cc = Mid(core_data, 13, 5)
    dd = Mid(core_data, 19, 5)
    ee = Mid(core_data, 25, 5)
    ff = Mid(core_data, 31, 5)
    cfgcode = Mid(core_data, 50)
    If (cfgcode = code) Then
      check = 1
    Elseif (cfgcode <> code) Then
      check = 0
    End If
  Loop

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Close #1
If check = 1 Then
    page45!tp45a.Text = aa
    page45!tp45b.Text = bb
    page45!tp45c.Text = cc
    page45!tp45d.Text = dd
    page45!tp45e.Text = ee
    page45!tp45f.Text = ff
    page45!tp45wa.Text = Str(wa)
    page45!tp45ac.Text = Str(ac)
    page45!tp45code.Text = code
End If
Elseif ctype = "EI core" Then
Open "ei_ap.cfg" For Input As #2
Do Until (EOF(2)) Or (check = 1)
Line Input #2, core_data
    aa = Mid(core_data, 1, 5)
    bb = Mid(core_data, 7, 5)
    cc = Mid(core_data, 13, 5)
    dd = Mid(core_data, 19, 5)
    ee = Mid(core_data, 25, 5)
    ff = Mid(core_data, 31, 5)
    gg = Mid(core_data, 37, 5)
    cfgcode = Mid(core_data, 55)
    If (cfgcode = code) Then
        check = 1
    Elseif (cfgcode <> code) Then
        check = 0
    End If
Loop
Close #2
If check = 1 Then

```

```

    page46!tp46a.Text = aa

```

```

    page46!tp46b.Text = bb

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

page46!tp46c.Text = cc
page46!tp46d.Text = dd
page46!tp46e.Text = ee
page46!tp46f.Text = ff
page46!tp46g.Text = gg
page46!tp46wa.Text = wa
page46!tp46ac.Text = ac
page46!tp46code.Text = code
End If
Elseif ctype = " C core " Then
Open "uu_ap.cfg" For Input As #3
Do Until (EOF(3)) Or (check = 1)
Line Input #3, core_data
aa = Mid(core_data, 1, 5)
bb = Mid(core_data, 7, 5)
cc = Mid(core_data, 13, 5)
dd = Mid(core_data, 19, 5)
ee = Mid(core_data, 25, 5)
ii = Mid(core_data, 31, 5)
cfgcode = Mid(core_data, 50)
If (cfgcode = code) Then
check = 1
Elseif (cfgcode <> code) Then
check = 0
End If
Loop
Close #3
If check = 1 Then
page47!tp47a.Text = aa
page47!tp47b.Text = bb
page47!tp47c.Text = cc
page47!tp47d.Text = dd
page47!tp47e.Text = ee
page47!tp47i.Text = ii

```

```
page47!tp47wa.Text = wa
page47!tp47ac.Text = ac
page47!tp47code.Text = code]
```

```
End If
```

```
End If
```

```
fp1 1f2.Visible = True
```

```
waveform.Visible = False
```

```
End Sub
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธีผลคูณพื้นที่)

Private Sub bp16cal_Click()

Dim i As Single

Dim energy As Single

Dim ctype As String

Dim app As Double

Dim x, y, kj As Single

Dim mpl, wtf, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g As Single

Dim coretype As String

Dim result As Single

Dim a As Integer

Dim mils As Integer

Dim j As Single

Dim awwb, depth, radius As Single

Dim awg, awb, ohmm, ar, dia, swg As Single

Dim ne, ne1 As Single

Dim ohm As Single

Dim wa_eff As Single

Dim arne, nnn As Single

Dim milss, ll_gap As Single

Dim l_gap, fring As Single

Dim nf, n, r As Single

Dim pcu As Single

Dim j1, nn As Single

Dim awbskin As Single

Dim bm1, bmac As Single

Dim core_data As String

Dim aa, bb, cc, dd, ee, ff, gg, hh, ii As String

Dim cfgcode As String

Const ku = 0.3

Const s3 = 0.75

Const s2 = 0.6

i = idc + (iac / 2)

energy = (l * i * i) / 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ctype = cp16corcon.Text
selcorcon ctype, Dt, kj, x, y
app = Exp(x * Log((2 * energy * 10 ^ 4) / (bm * ku * kj)))
tp16apc.Text = Str(app)
  If ctype = "EE_core" Then
    coretype = "ee_ap.dat"
  ElseIf ctype = "EI_core" Then
    coretype = "ei_ap.dat"
  ElseIf ctype = "C_core" Then
    coretype = "uu_ap.dat"
  Else
    coretype = "ee_ap.dat"
  End If
findcore app, mpl, wtfe, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g, result, code, coretype
If (result = 0) Then
  Hide
  sad1!fsad1f1.Visible = True
  sad1.Show
  Exit Sub
End If
page17!tp17ap.Text = Str(ap)
page17!tp17kg.Text = Str(kg)
page17!tp17wa.Text = Str(wa)
page17!tp17mlt.Text = Str(mlt)
page17!tp17mpl.Text = Str(mpl)
page17!tp17wtfe.Text = Str(wtfe)
page17!tp17ac.Text = Str(ac)
page17!tp17at.Text = Str(at)
page17!tp17g.Text = Str(g)
page17!tp17code.Text = code
j = kj * (Exp(y * Log(ap)))
j1 = Int(j)
  If ((j - j1) >= 0.5) Then j = j1 + 1
  Else j = j1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
awwb = (idc + (iac / 2)) / j
depth = 6.61 / (Sqr(f))
radius = depth
awbskin = 3.1416 * radius * radius
findwire awbskin, awg, awb, ohmm, ar, dia, swg, a
If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
ne = (awwb / awb)
ne1 = Int(ne)
If ((ne - ne1) >= 0.5) Then ne = ne1 + 1
Else ne = ne1
End If
If ((awwb / awb) < 1) Then
    ne = 1
    findwire awwb, awg, awb, r, ar, dia, swg, a
    If (a = 0) Then
        Hide
        sad1!fsad1f2.Visible = True
        sad1.Show
        Exit Sub
    End If
End If
ohm = ohmm / ne
wa_eff = wa * s3
arne = ar * ne
nnn = (wa_eff * s2) / arne
nn = Int(nnn)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้คนแปลลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
ll_gap = (1.26 * nn * nn * ac * (10 ^ (-8))) / l
milss = 393.7 * ll_gap
mils = Int(milss)
If ((milss - mils) >= 0.5) Then mils = mils + 1
Else mils = mils
End If

If (mils < milss) Then mils = mils + 1
End If

If Not ((mils Mod 2) = 0) Then mils = mils + 1
End If

l_gap = (mils * 2.54 * (10 ^ (-3)))
fring = 1 + ((l_gap / (Sqr(ac))) * (Log((2 * g) / (l_gap))))
nf = Sqr((l_gap * l) / (1.26 * ac * fring * (10 ^ (-8))))
n = Int(nf)
If ((nf - n) >= 0.5) Then n = n + 1
Else n = n
End If

r = mlt * n * ohm * (10 ^ (-6))
pcu = i * i * r
bm1 = (1.26 * n * (idc + (0.5 * iac)) * (10 ^ (-4))) / (l_gap)
bmac = (1.26 * n * 0.5 * iac * (10 ^ (-4))) / (l_gap)
page18!tp18awg.Text = Str(awg)
page18!tp18swg.Text = Str(swg)
page18!tp18st.Text = Str(ne)
page18!tp18turn.Text = Str(n)
page18!tp18gap.Text = Str(l_gap)
page18!tp18code.Text = code
If ctype = "EE_core" Then
Open "ee_ap.cfg" For Input As #1
Do Until (EOF(1)) Or (check = 1)
Line Input #1, core_data

```

```
aa = Mid(core_data, 1, 5)
```

```
bb = Mid(core_data, 7, 5)
```

```

cc = Mid(core_data, 13, 5)
dd = Mid(core_data, 19, 5)
ee = Mid(core_data, 25, 5)
ff = Mid(core_data, 31, 5)
cfgcode = Mid(core_data, 50)
If (cfgcode = code) Then
    check = 1
Elseif (cfgcode <> code) Then
    check = 0
End If
Loop
Close #1
If check = 1 Then
    page50!tp50a.Text = aa
    page50!tp50b.Text = bb
    page50!tp50c.Text = cc
    page50!tp50d.Text = dd
    page50!tp50e.Text = ee
    page50!tp50f.Text = ff
    page50!tp50wa.Text = Str(wa)
    page50!tp50ac.Text = Str(ac)
    page50!tp50code.Text = code
End If
Elseif ctype = "Ei_core" Then
Open "ei_ap.cfg" For Input As #2
Do Until (EOF(2)) Or (check = 1)
Line Input #2, core_data
    aa = Mid(core_data, 1, 5)
    bb = Mid(core_data, 7, 5)
    cc = Mid(core_data, 13, 5)
    dd = Mid(core_data, 19, 5)
    ee = Mid(core_data, 25, 5)
    ff = Mid(core_data, 31, 5)
    gg = Mid(core_data, 37, 5)

```

```

cfgcode = Mid(core_data, 55)
  If (cfgcode = code) Then
    check = 1
  ElseIf (cfgcode <> code) Then
    check = 0
  End If
Loop
Close #2
If check = 1 Then
  page51!tp51a.Text = aa
  page51!tp51b.Text = bb
  page51!tp51c.Text = cc
  page51!tp51d.Text = dd
  page51!tp51e.Text = ee
  page51!tp51f.Text = ff
  page51!tp51g.Text = gg
  page51!tp51wa.Text = wa
  page51!tp51ac.Text = ac
  page51!tp51code.Text = code
End If
Elseif ctype = "C_core" Then
Open "uu_ap.cfg" For Input As #3
Do Until (EOF(3)) Or (check = 1)
Line Input #3, core_data
  aa = Mid(core_data, 1, 5)
  bb = Mid(core_data, 7, 5)
  cc = Mid(core_data, 13, 5)
  dd = Mid(core_data, 19, 5)
  ee = Mid(core_data, 25, 5)
  ii = Mid(core_data, 31, 5)
  cfgcode = Mid(core_data, 50)
  If (cfgcode = code) Then
    check = 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
check = 0
End If
Loop
Close #3
If check = 1 Then
    page53!tp53a.Text = aa
    page53!tp53b.Text = bb
    page53!tp53c.Text = cc
    page53!tp53d.Text = dd
    page53!tp53e.Text = ee
    page53!tp53i.Text = ii
    page53!tp53wa.Text = wa
    page53!tp53ac.Text = ac
    page53!tp53code.Text = code
End If
End If
fp16f3.Visible = True
End Sub
```

(โปรแกรมย่อยสำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยวิธีเรขาคณิตของแกน)

Private Sub bp21cal_Click()

Dim i, ke As Single

Dim kgg As Double

Dim energy As Single

Dim ctype As String

Dim mpl, wffe, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g As Single

Dim coretype As String

Dim result As Single

Dim j1, nn As Single

Dim awbskin As Single

Dim bm1, bmac As Single

Dim a As Integer

Dim mils As Integer

Dim j As Single

Dim awwb, depth, radius As Single

Dim awg, awb, ohmm, ar, dia, swg As Single

Dim ne, ne1 As Single

Dim ohm As Single

Dim wa_eff As Single

Dim arne, nnn As Single

Dim milss, ll_gap As Single

Dim l_gap, fring As Single

Dim nf, n, r As Single

Dim pcu As Single

Dim core_data As String

Dim aa, bb, cc, dd, ee, ff, gg, hh, ii As String

Dim cfgcode As String

Const ku = 0.3

Const s3 = 0.75

Const s2 = 0.6

i = idc + (iac / 2)

energy = (l * i * i) / 2

ke = 0.145 * po * (bm * bm) * (10 ^ (-4))

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

kgg = ((energy) * (energy)) / (ke * alfa)
tp21kgc.Text = Str(kgg)
ctype = page21!cp21corcon.Text
  If ctype = "EE_core" Then
    coretype = "ee_kg.dat"
  ElseIf ctype = "EI_core" Then
    coretype = "ei_kg.dat"
  ElseIf ctype = "C_core" Then
    coretype = "uu_kg.dat"
  Else
    coretype = "ee_kg.dat"
  End If
findcore kgg, mpl, wtfe, mit, ac, wa, ap, kg, at, g, result, code, coretype
If (result = 0) Then
  Hide
  sad1!fsad1f1.Visible = .True
  sad1.Show
  Exit Sub
End If
page22!tp22ap.Text = Str(ap)
page22!tp22kg.Text = Str(kg)
page22!tp22wa.Text = Str(wa)
page22!tp22mit.Text = Str(mit)
page22!tp22mpl.Text = Str(mpl)
page22!tp22wtfe.Text = Str(wtfe)
page22!tp22ac.Text = Str(ac)
page22!tp22at.Text = Str(at)
page22!tp22g.Text = Str(g)
page22!tp22code.Text = code
j = (2 * energy * (10 ^ 4)) / (bm * ap * ku)
j1 = Int(j)
If ((j - j1) >= 0.5) Then j = j1 + 1

```

```

awwb = (idc + (iac / 2)) / j
depth = 6.61 / (Sqr(f))
radius = depth
awbskin = 3.1416 * radius * radius
findwire awbskin, awg, awb, ohmm, ar, dia, swg, a
If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
ne = (awwb / awb)
ne1 = Int(ne)
If ((ne - ne1) >= 0.5) Then ne = ne1 + 1
Else ne = ne1
End If
If ((awwb / awb) < 1) Then
    ne = 1
    findwire awwb, awg, awb, r, ar, dia, swg, a
    If (a = 0) Then
        Hide
        sad1!fsad1f2.Visible = True
        sad1.Show
        Exit Sub
    End If
End If
ohm = ohmm / ne
wa_eff = wa * s3
arne = ar * ne
nnn = (wa_eff * s2) / arne
nn = Int(nnn)
If ((nnn - nn) >= 0.5) Then nn = nn + 1
Else nn = nn
End If

```

```

ll_gap = (1.26 * nn * nn * ac * (10 ^ (-8))) / l
milss = 393.7 * ll_gap
    mils = Int(milss)
    If ((milss - mils) >= 0.5) Then mils = mils + 1
    Else mils = mils
    End If
If (mils < milss) Then mils = mils + 1
End If
If Not ((mils Mod 2) = 0) Then mils = mils + 1
End If
l_gap = (mils * 2.54 * (10 ^ (-3)))
fring = 1 + ((l_gap / (Sqr(ac))) * (Log((2 * g) / (l_gap))))
nf = Sqr((l_gap * l) / (1.26 * ac * fring * (10 ^ (-8))))
    n = Int(nf)
    If ((nf - n) >= 0.5) Then n = n + 1
    Else n = n
    End If
r = mlt * n * ohm * (10 ^ (-6))
pcu = i * i * r
alfa = (pcu / po) * 100
bm1 = (1.26 * n * (jdc + (0.5 * iac)) * (10 ^ (-4))) / (l_gap)
bmac = (1.26 * n * 0.5 * iac * (10 ^ (-4))) / (l_gap)
page23!tp23awg.Text = Str(awg)
page23!tp23swg.Text = Str(swg)
page23!tp23st.Text = Str(ne)
page23!tp23turn.Text = Str(n)
page23!tp23gap.Text = Str(l_gap)
page23!tp23code.Text = code
If ctype = "EE_core" Then
    Open "ee_ap.cfg" For Input As #1
    Do Until (EOF(1)) Or (check = 1)
        Line Input #1, core_data
        aa = Mid(core_data, 1, 5)
        bb = Mid(core_data, 7, 5)

```

```

cc = Mid(core_data, 13, 5)
dd = Mid(core_data, 19, 5)
ee = Mid(core_data, 25, 5)
ff = Mid(core_data, 31, 5)
cfgcode = Mid(core_data, 50)
If (cfgcode = code) Then
    check = 1
Elseif (cfgcode <> code) Then
    check = 0
End If
Loop
Close #1
If check = 1 Then
    page55!tp55a.Text = aa
    page55!tp55b.Text = bb
    page55!tp55c.Text = cc
    page55!tp55d.Text = dd
    page55!tp55e.Text = ee
    page55!tp55f.Text = ff
    page55!tp55wa.Text = Str(wa)
    page55!tp55ac.Text = Str(ac)
    page55!tp55code.Text = code
End If
Elseif ctype = "EI_core" Then
Open "ei_ap.cfg" For Input As #2
Do Until (EOF(2)) Or (check = 1)
Line Input #2, core_data
    aa = Mid(core_data, 1, 5)
    bb = Mid(core_data, 7, 5)
    cc = Mid(core_data, 13, 5)
    dd = Mid(core_data, 19, 5)
    ee = Mid(core_data, 25, 5)
    ff = Mid(core_data, 31, 5)
    gg = Mid(core_data, 37, 5)

```

```

cfgcode = Mid(core_data, 55)
If (cfgcode = code) Then
    check = 1
Elseif (cfgcode <> code) Then
    check = 0
End If
Loop
Close #2
If check = 1 Then
    page56!tp56a.Text = aa
    page56!tp56b.Text = bb
    page56!tp56c.Text = cc
    page56!tp56d.Text = dd
    page56!tp56e.Text = ee
    page56!tp56f.Text = ff
    page56!tp56g.Text = gg
    page56!tp56wa.Text = wa
    page56!tp56ac.Text = ac
    page56!tp56code.Text = code
End If
Elseif ctype = "C_core" Then
Open "uu_ap.cfg" For Input As #3
Do Until (EOF(3)) Or (check = 1)
Line Input #3, core_data
    aa = Mid(core_data, 1, 5)
    bb = Mid(core_data, 7, 5)
    cc = Mid(core_data, 13, 5)
    dd = Mid(core_data, 19, 5)
    ee = Mid(core_data, 25, 5)
    ii = Mid(core_data, 31, 5)
    cfgcode = Mid(core_data, 50)
    If (cfgcode = code) Then
        check = 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        check = 0
    End If
Loop
Close #3
If check = 1 Then
    page57!tp57a.Text = aa
    page57!tp57b.Text = bb
    page57!tp57c.Text = cc
    page57!tp57d.Text = dd
    page57!tp57e.Text = ee
    page57!tp57i.Text = ii
    page57!tp57wa.Text = wa
    page57!tp57ac.Text = ac
    page57!tp57code.Text = code
End If
fp21f3.Visible = True
End Sub
```



(โปรแกรมย่อยสำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนพาวเวอร์โดยวิธีผลคูณพื้นที่)

Private Sub bp25n_Click()

Dim a As Integer

Dim n, n, r, pcu, bac, h As Single

Dim i, energy, kj As Single

Dim app As Double

Dim result As Single

Dim j, j1, awwb, depth, radius As Single

Dim awbskin, ne, ne1 As Single

Dim ohm, wa_eff, nn, nn As Single

Dim mur, mur1, aaa As Single

Dim coretype As String

Dim awg, awb, ohmm, ar, dia, swg As Single

Const ku = 0.3

Const s2 = 0.6

Const s3 = 0.75

If (tp25ind.Text = "") Or (tp25idc.Text = "") Or (tp25iac.Text = "") Or (tp25f.Text = "") Or
(tp25temp.Text = "") Or (tp25bmax.Text = "") Then

fp25f2.Visible = True

Exit Sub

End If

l = CSng(tp25ind.Text)

idc = CSng(tp25idc.Text)

iac = CSng(tp25iac.Text)

f = CSng(tp25f.Text)

bm = CSng(tp25bmax.Text)

Dt = CSng(tp25temp.Text)

i = idc + (iac / 2)

energy = (l * i * i) / 2

If (Dt = 25) Then kj = 403

Else kj = 590

End If

app = Exp(1.14 * Log(2 * energy * (10 ^ 4) / (bm * ku * kj)))

coretype = "powd_ap.dat"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

findpowder app, mpi, wfe, mit, ac, wa, ap, kg, at, g, mu, ai, result, code, coretype

If (result = 0) Then

Hide

sad1!fsad1f1.Visible = True

sad1.Show

Exit Sub

End If

$j = kj * (\text{Exp}((-0.12) * \text{Log}(ap)))$

$j1 = \text{Int}(j)$

If $((j - j1) \geq 0.5)$ Then $j = j1 + 1$

Else $j = j1$

End If

$awwb = (idc + (iac / 2)) / j$

$depth = 6.61 / (\text{Sqr}(f))$

radius = depth

$awbskin = 3.1416 * \text{radius} * \text{radius}$

findwire awbskin, awg, awb, ohmm, ar, dia, swg, a

If (a = 0) Then

Hide

sad1!fsad1f2.Visible = True

sad1.Show

Exit Sub

End If

$ne = (awwb / awb)$

$ne1 = \text{Int}(ne)$

If $((ne - ne1) \geq 0.5)$ Then $ne = ne1 + 1$

Else $ne = ne1$

End If

If $((awwb / awb) < 1)$ Then

$ne = 1$

findwire awwb, awg, awb, r, ar, dia, swg, a

If (a = 0) Then

Hide

sad1!fsad1f2.Visible = True

```

sad1.Show
Exit Sub
End If
End If
onm = onmm / ne
wa_eff = wa * s3
nn_ = (wa_eff * s2) / (ar * ne)
nn = Int(nn_)
If ((nn_ - nn) >= 0.5) Then nn = nn + 1
Else nn = nn
End If
mur = (l * mpl * (10 ^ 8)) / (1.26 * nn * nn * ac)
mur1 = Int(mur)
If ((mur - mur1) >= 0.5) Then mur = mur1 + 1
Else mur = mur1
End If
powder ap, mur, mpl, wfe, mit, ac, wa, apt, kg, at, g, mu, al, result, code, coretype
If (result = 0) Then
Hide
sad1!fsad1f1.Visible = True
sad1.Show
Exit Sub
End If
If (mu = 10) And (bm <= 0.5) Then
aaa = 1
flux.Show
flux!fluxapc.Text = Str(app)
Elseif ((mu = 10) And (bm > 0.5)) Then
aaa = 2
bm = bm1
i = idc + (jac / 2)
energy = (l * i * i) / 2
If (Dt = 25) Then kj = 403
Else kj = 590

```

```

End If
app = Exp(1.14 * Log(2 * energy * (10 ^ 4) / (bm * ku * kj)))
coretype = "powd_ap.dat"
findpowder app, mpl, wfe, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g, mu, al, result, code, coretype
If (result = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f1.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
j = kj * (Exp((-0.12) * Log(ap)))
j1 = Int(j)
If ((j - j1) >= 0.5) Then j = j1 + 1
Else j = j1
End If
awwb = (idc + (iac / 2)) / j
depth = 6.61 / (Sqr(f))
radius = depth
awbskin = 3.1416 * radius * radius
findwire awbskin, awg, awb, ohmm, ar, dia, swg, a
If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
ne = (awwb / awb)
ne1 = Int(ne)
If ((ne - ne1) >= 0.5) Then ne = ne1 + 1
Else ne = ne1
End If
If ((awwb / awb) < 1) Then
    ne = 1

```

```

If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
End If
ohm = ohmm / ne
wa_eff = wa * s3
nn_ = (wa_eff * s2) / (ar * ne)
nn = Int(nn_)
If ((nn_ - nn) >= 0.5) Then nn = nn + 1
Else nn = nn
End If
mur = (l * mpl * (10 ^ 8)) / (1.26 * nn * nn * ac)
mur1 = Int(mur)
If ((mur - mur1) >= 0.5) Then mur = mur1 + 1
Else mur = mur1
End If
powder ap, mur, mpl, wfe, mlt, ac, wa, apt, kg, at, g, mu, al, result, code, coretype
If (result = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f1.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
page26!tp26code.Text = code
page26!tp26ap.Text = Str(apt)
page26!tp26mpl.Text = Str(mpl)
page26!tp26wfe.Text = Str(wfe)
page26!tp26mlt.Text = Str(mlt)
page26!tp26ac.Text = Str(ac)
page26!tp26wa.Text = Str(wa)
page26!tp26kg.Text = Str(kg)

```

```

page26!tp26at.Text = Str(at)
page26!tp26g.Text = Str(g)
page26!tp26mu.Text = Str(mu)
page26!tp26al.Text = Str(al)
page26!tp26apc.Text = Str(app)
n_ = 1000 * (l * (10 ^ 3) / al)
n = Int(n_)
If (n_ - n > 0.5) Then n = n + 1
Else n = n
End If
r = mtl * n * ohm * (10 ^ (-6))
pcu = i * i * r
bac = (1.26 * n * 0.5 * iac * mu * 10 ^ (-4)) / mpl
h = (1.26 * n * i) / mpl
page27!tp27code.Text = code
page27!tp27awg.Text = Str(awg)
page27!tp27swg.Text = Str(swg)
page27!tp27turn.Text = Str(n)
page27!tp27str.Text = Str(ne)
fp25f3.Visible = True
Elseif (mu > 10) Then
page26!tp26code.Text = code
page26!tp26ap.Text = Str(apt)
page26!tp26mpl.Text = Str(mpl)
page26!tp26wfte.Text = Str(wfte)
page26!tp26mlt.Text = Str(mlt)
page26!tp26ac.Text = Str(ac)
page26!tp26wa.Text = Str(wa)
page26!tp26kg.Text = Str(kg)
page26!tp26at.Text = Str(at)
page26!tp26g.Text = Str(g)
page26!tp26mu.Text = Str(mu)
page26!tp26al.Text = Str(al)
page26!tp26apc.Text = Str(app)

```

```

page26!fp26f3.Visible = False
n_ = 1000 * (l * (10 ^ 3) / al)
n = Int(n_)
If (n_ - n > 0.5) Then n = n + 1
Else n = n
End If
r = mtl * n * ohm * (10 ^ (-6))
pcu = i * i * r
bac = (1.26 * n * 0.5 * iac * mu * 10 ^ (-4)) / mpl
h = (1.26 * n * i) / mpl
page27!tp27code.Text = code
page27!tp27awg.Text = Str(awg)
page27!tp27swg.Text = Str(swg)
page27!tp27turn.Text = Str(n)
page27!tp27str.Text = Str(ne)
fp25f3.Visible = True
End If

```

End Sub

(การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนพาวเวอร์โดยวิธีเรขาคณิตของแกน)

Private Sub bp30cal_Click()

Dim a As Integer

Dim n_r, n, r, pcu, bac, h As Single

Dim i, energy, ke As Single

Dim kgg As Double

Dim result As Single

Dim alfa_cal As Single

Dim j, j1, awwb, depth, radius As Single

Dim awbskin, ne, ne1 As Single

Dim ohm, wa_eff, nn_r, nn As Single

Dim awg, awb, ohmm, ar, dia, swg As Single

Dim mur, mur1, aaa As Single

Dim coretype As String

Const ku = 0.3

Const s2 = 0.6

Const s3 = 0.75

If (tp30ind.Text = "") Or (tp30idc.Text = "") Or (tp30iac.Text = "") Or (tp30f.Text = "") Or
(tp30pout.Text = "") Or (tp30bmax.Text = "") Or (tp30reg.Text = "") Then

fp30f2.Visible = True

Exit Sub

End If

l = CSng(tp30ind.Text)

idc = CSng(tp30idc.Text)

iac = CSng(tp30iac.Text)

f = CSng(tp30f.Text)

bm = CSng(tp30bmax.Text)

po = CSng(tp30pout.Text)

alfa = CSng(tp30reg.Text)

i = idc + (iac / 2)

energy = (l * i * i) / 2

ke = 0.145 * po * bm * bm * (10 ^ (-4))

kgg = (energy * energy) / (ke * alfa)

tp30kgc.Text = Str(kgg)ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

coretype = "powd_kg.dat"
findpowder kgg, mpl, wtfe, mit, ac, wa, ap, kg, at, g, mu, al, result, code, coretype
If (result = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f1.Visible = True
    sad1.Show
Exit Sub
End If
j = (2 * energy * (10 ^ 4)) / (bm * ap * ku)
j1 = Int(j)
If ((j - j1) >= 0.5) Then j = j1 + 1
Else j = j1
End If
awwb = (idc + (iac / 2)) / j
depth = 6.61 / (Sqr(f))
radius = depth
awbskin = 3.1416 * radius * radius
findwire awbskin, awg, awb, ohmm, ar, dia, swg, a
If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
Exit Sub
End If
ne = (awwb / awb)
ne1 = Int(ne)
If ((ne - ne1) >= 0.5) Then ne = ne1 + 1
Else ne = ne1
End If
If ((awwb / awb) < 1) Then
    ne = 1
    findwire awwb, awg, awb, r, ar, dia, swg, a
    If (a = 0) Then
        Hide

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sad1!fsad1f2.Visible = True
sad1.Show
Exit Sub
End If
End If
ohm = ohmm / ne
wa_eff = wa * s3
nn_ = (wa_eff * s2) / (ar * ne)
nn = Int(nn_)
If ((nn_ - nn) >= 0.5) Then nn = nn + 1
Else nn = nn
End If
mur = (l * mpl * (10 ^ 8)) / (1.26 * nn * nn * ac)
mur1 = Int(mur)
If ((mur - mur1) >= 0.5) Then mur = mur1 + 1
Else mur = mur1
End If
powder kg, mur, mpl, wtfie, mlt, ac, wa, apt, kg, at, g, mu, al, result, coretype
If (result = 0) Then
Hide
sad1!fsad1f1.Visible = True
sad1.Show
Exit Sub
End If
If (mu = 10) And (bm <= 0.5) Then
aaa = 1
flux1.Show
flux1!tflux1kgc.Text = Str(kgg)
Elseif ((mu = 10) And (bm > 0.5)) Then
aaa = 2
bm = bm1
i = idc + (iac / 2)
energy = (l * i * i) / 2

```

```

kcg = (energy * energy) / (ke * alfa)
coretype = "powd_kg.dat"
findpowder kcg, mpl, wfe, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g, mu, ai, result, code, coretype
If (result = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f1.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
j = (2 * energy * (10 ^ 4)) / (bm * ap * ku)
j1 = Int(j)
If ((j - j1) >= 0.5) Then j = j1 + 1
Else j = j1
End If
awwb = (idc + (iac / 2)) / j
depth = 6.61 / (Sqr(f))
radius = depth
awbskin = 3.1416 * radius * radius
findwire awbskin, awg, awb, ohmm, ar, dia, swg, a
If (a = 0) Then
    Hide
    sad1!fsad1f2.Visible = True
    sad1.Show
    Exit Sub
End If
ne = (awwb / awb)
ne1 = Int(ne)
If ((ne - ne1) >= 0.5) Then ne = ne1 + 1
Else ne = ne1
End If
If ((awwb / awb) < 1) Then
    ne = 1
    findwire awwb, awg, awb, r, ar, dia, swg, a

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Hide
sad1!fsad1f2.Visible = True
sad1.Show
Exit Sub
End If
End If
ohm = ohmm / ne
wa_eff = wa * s3
nn_ = (wa_eff * s2) / (ar * ne)
nn = Int(nn_)
If ((nn_ - nn) >= 0.5) Then nn = nn + 1
Else nn = nn
End If
mur = (1 * mpl * (10 ^ 8)) / (1.26 * nn * nn * ac)
mur1 = Int(mur)
If ((mur - mur1) >= 0.5) Then mur = mur1 + 1
Else mur = mur1
End If
powder kg, mur, mpl, wfe, mit, ac, wa, apt, kg, at, g, mu, al, result, code, coretype
If (result = 0) Then
Hide
sad1!fsad1f1.Visible = True
sad1.Show
Exit Sub
End If
page31!tp31code.Text = code
page31!tp31ap.Text = Str(apt)
page31!tp31mpl.Text = Str(mpl)
page31!tp31wfe.Text = Str(wfe)
page31!tp31mit.Text = Str(mit)
page31!tp31ac.Text = Str(ac)
page31!tp31wa.Text = Str(wa)
page31!tp31kg.Text = Str(kg)
page31!tp31at.Text = Str(at)

```

```

page31!tp31g.Text = Str(g)
page31!tp31mu.Text = Str(mu)
page31!tp31al.Text = Str(al)
n_ = 1000 * (l * (10 ^ 3) / al)
n = Int(n_)
If (n_ - n > 0.5) Then n = n + 1
Else n = n
End If

r = mtl * n * ohm * (10 ^ (-6))
pcu = i * i * r
alfa_cal = (pcu / po) * 100
bac = (1.26 * n * 0.5 * iac * mu * 10 ^ (-4)) / mpl
h = (1.26 * n * i) / mpl
page32!tp32code.Text = code
page32!tp32awg.Text = Str(awg)
page32!tp32swg.Text = Str(swg)
page32!tp32turn.Text = Str(n)
page32!tp32str.Text = Str(ne)
fp30f3.Visible = True

Elseif (mu > 10) Then
page31!tp31code.Text = code
page31!tp31ap.Text = Str(apt)
page31!tp31mpl.Text = Str(mpl)
page31!tp31wffe.Text = Str(wffe)
page31!tp31mit.Text = Str(mit)
page31!tp31ac.Text = Str(ac)
page31!tp31wa.Text = Str(wa)
page31!tp31kg.Text = Str(kg)
page31!tp31at.Text = Str(at)
page31!tp31g.Text = Str(g)
page31!tp31mu.Text = Str(mu)
page31!tp31al.Text = Str(al)
page31!fp31f1.Visible = False

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $n_ = 1000 * (l * (10 ^ 3) / al)$ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

n = Int(n_)
If (n_ - n > 0.5) Then n = n + 1
Else n = n
End If

r = mtl * n * ohm * (10 ^ (-6))
pcu = i * i * r
alfa_cal = (pcu / po) * 100
bac = (1.26 * n * 0.5 * iac * mu * 10 ^ (-4)) / mpl
h = (1.26 * n * i) / mpl
page32!tp32code.Text = code
page32!tp32awg.Text = Str(awg)
page32!tp32swg.Text = Str(swg)
page32!tp32turn.Text = Str(n)
page32!tp32str.Text = Str(ne)
fp30f3.Visible = True
End If

```

End Sub

(โปรแกรมย่อยสำหรับเลือกค่าตัวคูณตามลักษณะรูปคลื่นกระแสด)

```
Public Sub selcurwav(wave, kf)
    If wave = 1 Then kf = 4.44
    Else kf = 4
    End If
```

End Sub

(โปรแกรมย่อยสำหรับคำนวณกำลังงานทางด้านขาออกโดยพิจารณาจากลักษณะของวงจรทางด้าน
ทุติยภูมิของหม้อแปลง)

```
Public Sub selscdcct(scd, po_, vo, io, po As Single)
    Const vd% = 1
    If scd = 1 Then po = (vo + (2 * vd)) * io    po_ = po
    Elself scd = 2 Then po = (vo + vd) * io    po_ = po * 1.414
    End If
```

End Sub

(โปรแกรมย่อยสำหรับคำนวณหากำลังงานทางด้านขาเข้าของหม้อแปลง)

```
Public Sub selpricct(pri, po, pin, n As Single)
    If pri = 1 Then pin = (po * 1.414) / n
    Else pin = po / n
    End If
```

End Sub

(โปรแกรมย่อยสำหรับเลือกพารามิเตอร์ตามลักษณะของแกนที่ใช้ โดยอ้างอิงจากตารางที่ 3.1 ใน
ปฏิญญาพันธ)

```
Public Sub selcorcon(core_configuration, Dt, kj, x, y)
    Select Case core_configuration
    Case "EE_core "
        If Dt = 25 Then kj = 366 Else kj = 534
        x = 1.14
        y = -0.12
    Case "EI_core "
        If Dt = 25 Then kj = 366 Else kj = 534
        x = 1.14
        y = -0.12
    Case "C_core "
```

```
        If Dt = 25 Then kj = 323 Else kj = 468
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีเอส จำกัด ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
x = 1.16
```

```
y = -0.14
```

```
End Select
```

```
End Sub
```

(ฟังก์ชันสำหรับคำนวณหาค่าผลคูณพื้นที่โดยอ้างอิงจากภาคผนวกที่ 2 ในปริญญาโท)

```
Public Function areapro(x, pt, kf, bm, f, kj As Single) As Double
```

```
Const ku! = 0.3
```

```
areapro = Exp(x * Log((pt * 10000#) / (kf * bm * f * ku * kj)))
```

```
End Function
```

(โปรแกรมย่อยสำหรับเลือกแกนจากแฟ้มข้อมูล ตามค่าผลคูณพื้นที่ หรือ ค่าเรขาคณิตของแกน)

```
Public Sub findcore(app As Double, Tmpl, Twtfe, Tmlt, Tac, Twa, T_ap, Tkg, Tat, Tg, result As  
Single, Tcode, coretype As String)
```

```
Dim mpl, wtf, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g, code As String
```

```
Dim data_ap, data_kg As Double
```

```
Dim data As Double
```

```
Dim filename As String
```

```
Dim core_data As String
```

```
result = 0
```

```
filename = coretype
```

```
Open filename For Input As #1
```

```
Do Until (EOF(1)) Or (result = 1)
```

```
Line Input #1, core_data
```

```
mpl = Mid(core_data, 1, 5)
```

```
wtfe = Mid(core_data, 8, 1)
```

```
mlt = Mid(core_data, 11, 5)
```

```
ac = Mid(core_data, 18, 6)
```

```
wa = Mid(core_data, 26, 6)
```

```
ap = Mid(core_data, 34, 10)
```

```
kg = Mid(core_data, 46, 10)
```

```
at = Mid(core_data, 58, 1)
```

```
g = Mid(core_data, 61, 5)
```

```
code = Mid(core_data, 68)
```

```
If (ap <> "") Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ data_ap = CDbl(ap) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

data_kg = CDbI(kg)
If (filename = "ee_ap.dat") Or (filename = "ei_ap.dat") Or (filename = "uu_ap.dat")
Then
    data = data_ap
Elseif (filename = "ee_kg.dat") Or (filename = "ei_kg.dat") Or (filename =
"uu_kg.dat") Then
    data = data_kg
End If
If (data > app) Then result = 1
Elseif (data < app) Then result = 0
End If
Elseif (ap = "") Then
    result = 0
Exit Do
Tcode = 0
Tmpl = 0
Twtfe = 0
Tmlt = 0
Tac = 0
Twa = 0
T_ap = 0
Tkg = 0
Tat = 0
Tg = 0
End If
Loop
Close #1
If result = 1 Then
    Tcode = code
    Tmpl = CSng(mpl)
    Twtfe = CSng(wtfe)
    Tmlt = CSng(mlt)
    Tac = CSng(ac)
    Twa = CSng(wa)

```

```

        T_ap = data_ap
        Tkg = CSng(kg)
        Tat = CSng(at)
        Tg = CSng(g)
    End If
End Sub

( โปรแกรมย่อยสำหรับเลือกลดตัวนำที่จะใช้ในการพัน )

Public Sub findwire(awwb, awgno, awb, r, ar, dia, swgno As Single, a As Integer)
    Dim wire_data As String
    Dim awg, barearea, resistance, area, diameter, swg As String
    Dim awgno1, awb1, r1, ar1, dia1, swgno1 As Single
    Dim awgno0, awb0, r0, ar0, dia0, swgno0 As Single
    Dim awgnoo, awbb, rr, arr, diaa, swgnoo As Single
    .a = 0
    Open "wire80c.dat" For Input As #2
    Do Until (EOF(2)) Or (a = 1) Or (a = 2)
        Line Input #2, wire_data
        awg = Mid(wire_data, 1, 2)
        barearea = Mid(wire_data, 4, 10)
        resistance = Mid(wire_data, 16, 10)
        area = Mid(wire_data, 28, 10)
        diameter = Mid(wire_data, 40, 7)
        swg = Mid(wire_data, 49)
        tbarearea = CSng(barearea)
        If (tbarearea > (1.1 * awwb)) Then
            a = 0
        ElseIf (awwb <= tbarearea) And (tbarearea <= (1.1 * awwb)) Then
            a = 1
            awgno1 = CSng(awg)
            awb1 = tbarearea
            r1 = CSng(resistance)
            ar1 = CSng(area)
            dia1 = CSng(diameter)
            swgno1 = CSng(swg)
        End If
    Loop
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Elseif (tbarearea < awwb) Then
    a = 2
    awgno0 = CSng(awg)
    awb0 = tbarearea
    r0 = CSng(resistance)
    ar0 = CSng(area)
    dia0 = CSng(diameter)
    swgno0 = CSng(swg)
End If
Loop
Close #2
If (a = 0) Then
    Exit Sub
Elseif (a = 1) Then
    awgnoo = awgno1
    awbb = awb1
    rr = r1
    arr = ar1
    diaa = dia1
    swgnoo = swgno1
Elseif (a = 2) Then
    awgnoo = awgno0
    awbb = awb0
    rr = r0
    arr = ar0
    diaa = dia0
    swgnoo = swgno0
End If
awgno = awgnoo   awb =awbb   ar = arr   dia = diaa   swgno = swgnoo   r = rr
End Sub

```

(โปรแกรมย่อยสำหรับเลือกแกน พาวเวอร์ ตามค่าผลคูณพื้นที่ หรือ ค่าเรขาคณิตของแกน ที่คำนวณได้)

Public Sub findpowder(app As Double, Tmpl, Twtfe, Tmlt, Tac, Twa, T_ap, Tkg, Tat, Tg, Tmu, Tai,

result As Single, Tcode, coretype As String) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Dim mpl, wfte, mlt, ac, wa, ap, kg, at, g, mu, al, code As String
Dim data_ap, data_kg As Double
Dim data As Double
Dim filename As String
Dim core_data As String

result = 0
filename = coretype
Open filename For Input As #1
  Do Until (EOF(1)) Or (result = 1)
    Line Input #1, core_data
    mpl = Mid(core_data, 1, 4)
    wfte = Mid(core_data, 6, 1)
    mlt = Mid(core_data, 8, 4)
    ac = Mid(core_data, 13, 5)
    wa = Mid(core_data, 19, 8)
    ap = Mid(core_data, 28, 9)
    kg = Mid(core_data, 38, 9)
    at = Mid(core_data, 48, 1)
    g = Mid(core_data, 50, 5)
    mu = Mid(core_data, 56, 2)
    al = Mid(core_data, 59, 5)
    code = Mid(core_data, 65)
    data_ap = CDbI(ap)
    data_kg = CDbI(kg)

    If (filename = "powd_ap.dat") Then data = data_ap
    Elself (filename = "powd_kg.dat") Then data = data_kg
  End If

  If (data > app) Then result = 1
  Elself (data < app) Then result = 0
  End If
Loop
Close #1
If result = 1 Then
  Tcode = code

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Tmpl = CSng(mpl)
Twtfe = CSng(wtfe)
Tmlt = CSng(mlt)
Tac = CSng(ac)
Twa = CSng(wa)
T_ap = CSng(ap)
Tkg = CSng(kg)
Tat = CSng(at)
Tg = CSng(g)
Tmu = CSng(mu)
Tal = CSng(al)
End If
End Sub

```

(โปรแกรมย่อยสำหรับเลือกแกนพาวเดอร์โดยพิจารณาจากความชื้นขาบแม่เหล็ก ร่วมด้วย)

```

Public Sub powder(ap, mur, Tmpl, Twtfe, Tmlt, Tac, Twa, T_ap, Tkg, Tat, Tg, Tmu, Tal, result As
Single, Tcode, coretype As String)

```

```

Dim mpl, wtfe, mlt, ac, wa, ap_, kg_, at, g, mu, al, code As String

```

```

Dim data_ap, data_kg As Double

```

```

Dim data As Double

```

```

Dim filename As String

```

```

Dim core_data As String

```

```

result = 0

```

```

filename = coretype

```

```

Open filename For Input As #1

```

```

Do Until (EOF(1)) Or (result = 1)

```

```

Line Input #1, core_data

```

```

mpl = Mid(core_data, 1, 4)

```

```

wtfe = Mid(core_data, 6, 1)

```

```

mlt = Mid(core_data, 8, 4)

```

```

ac = Mid(core_data, 13, 5)

```

```

wa = Mid(core_data, 19, 8)

```

```

ap_ = Mid(core_data, 28, 9)

```

```

kg_ = Mid(core_data, 38, 9)

```

```

at = Mid(core_data, 48, 1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

g = Mid(core_data, 50, 5)
mu = Mid(core_data, 56, 2)
al = Mid(core_data, 59, 5)
code = Mid(core_data, 65)
data_ap = CDBl(ap_)
data_kg = CDBl(kg_)
Tmu = CSng(mu)
If (filename = "powd_ap.dat") Then data = data_ap
Elseif (filename = "powd_kg.dat") Then data = data_kg
End If
If (data = ap) And (Tmu > mur) Then result = 1
Elseif (data = ap) And (Tmu <= mur) Then result = 0
End If
Loop
Close #1
If result = 1 Then
Tcode = code
Tmpl = CSng(mpl)
Twtfe = CSng(wtfe)
Tmlt = CSng(mlt)
Tac = CSng(ac)
Twa = CSng(wa)
T_ap = CSng(ap_)
Tkg = CSng(kg_)
Tat = CSng(at)
Tg = CSng(g)
Tmu = CSng(mu)
Tal = CSng(al)
End If
End Sub

```

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับโครงการนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการนี้เป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำสั่งสอน การให้คำแนะนำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนทำให้โครงการนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้ง ผศ.พิชิต ลำยอง ที่ได้ช่วยแนะนำให้โครงการนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และ ผศ.ศุภกิจ จูตะวิริยะ ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

นอกจากนี้ ผู้ร่วมโครงการขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิริยะ พิเศษสูงจันทร์ ที่ได้อนุญาตให้ใช้ห้องเพื่อเป็นสถานที่ทำางจรทดสอบ รวมทั้งพี่ ไร่มัส ธรรมาธิฐาน กลุ่มโครงการ Induction Hearing กลุ่มโครงการต่างๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และพี่เจ้าหน้าที่สโตร์ พี่ห้องธุรการภาคทุกท่าน รวมถึงแม่บ้านที่ภาควิชาไฟฟ้าทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณท่านผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ทำให้โครงการนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wm. T. McLyman, "Transformer and Inductor Design Handbook", Marcel Dekker, New York, 1988.
- [2] Keith H. Billings, "Switchmode Power Supply Handbook", McGraw-Hill, New York, 1989.
- [3] M.F. DeMaw, "Ferromagnetic-core Design and Application Handbook", Prentice-Hall, New Jersey, 1981.
- [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, "Power Electronics - Converters, Applications, and Design", 2nd ed., John Wiley&Sons, 1995.
- [4] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, and Stephen D. Umans, "Electric Machinery", 5th ed.; McGraw-Hill, New York, 1992.
- [5] Peter F. Ryff, "Electric Machinery", Prentice-Hall, New Jersey, 1988.
- [6] Tore M. Undeland, Jon Lode, Robert Nilssen, William P. Robbins, and Ned Mohan, "A Single-Pass Design Method For High-Frequency Inductors", IEEE Industrial Applications Magazine, pp 44-51, September/October 1996.
- [7] Sam Kung, "Choosing The Right Ferrite Cores", Electronic Design, pp 131-134, September 5, 1995.
- [8] สุวัฒน์ คั่น, "สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย", ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท เอนเทลไทย จำกัด, 2537.