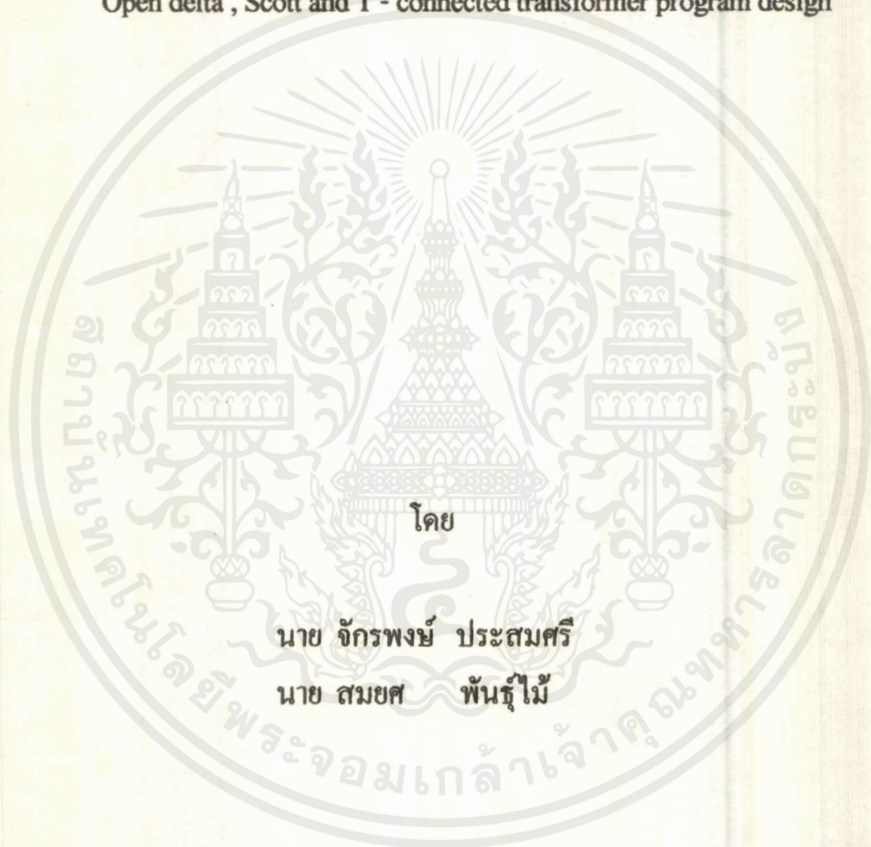




โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ โอเพ่นเดลต้า , สก็อต และ ที
Open delta , Scott and T - connected transformer program design



โดย

นาย จักรพงษ์ ประสมศรี

นาย สมยศ พันธุ์ไม้

วัน เดือน ปี.....	30.08.2561
เลขทะเบียน.....	038238
เลขเรียกหนังสือ.....	139258 จ 28ป

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

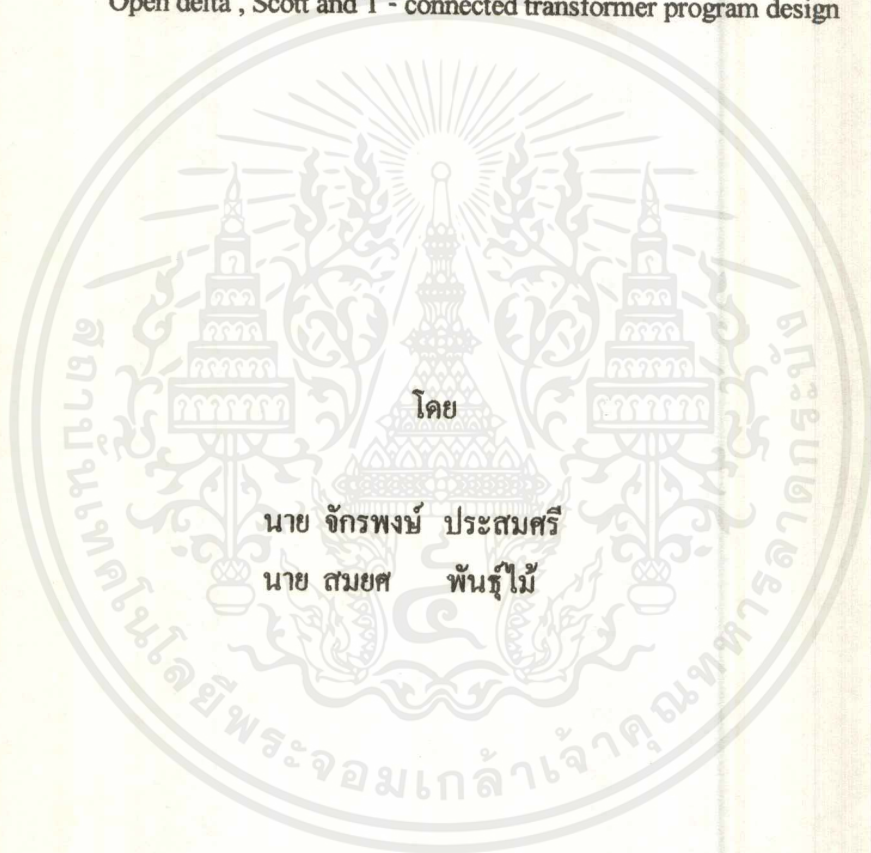
ปีการศึกษา 2539

038238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2539

โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ โอเพ่นเดลต้า , สก็อต และ ที
Open delta , Scott and T - connected transformer program design



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. จงรักษ์ บุญเส็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

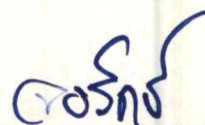
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ โอเพ่นเคตต้า , สต็อค และ ที

ผู้จัดทำ

1. นาย จักรพงษ์ ประสมศรี
2. นาย สมยศ พันธุ์ไม้



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. จงรักษ์ บุญเตียง)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 หลักการและวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ	2
2.1 การคำนวณหากระแสไฟฟ้าของหม้อแปลง	2
2.2 การคำนวณหาขนาดของลวดทองแดง	3
2.3 การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็กและ Wa Product	3
2.3.1 Permeability	4
2.3.2 Saturation	5
2.3.3 Electrical resistivity	5
2.3.4 Hysteresis (remanence และ coercivity)	6
2.4 การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด	9
2.5 การคำนวณหาจำนวนรอบต่อชั้น และ จำนวนชั้นของขดลวด	11
2.6 การตรวจสอบการออกแบบทาง Physical ของหม้อแปลง	14
2.7 การออกแบบ Bobbin	16
2.8 การคำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็ก และน้ำหนักของลวดทองแดงที่ใช้	17
2.9 การคำนวณหาวงจรมูลของหม้อแปลงที่สร้าง	21
2.9.1 การคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวด	21
2.9.2 การคำนวณหา Leakage Reactance ของหม้อแปลง	22
2.9.3 การคำนวณหา R_c และ X_m ของหม้อแปลง	26
2.10 การทดสอบหม้อแปลง	27
2.10.1 การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open Circuit Test)	27
2.10.2 การทดสอบแบบลัดวงจร (Short Circuit Test)	29
บทที่ 3 ทฤษฎีการต่อหม้อแปลงแบบ Open - Delta และ Scott , T-T	32

สารบัญ

3.1 การต่อแบบ Open - Delta หรือ V	32
3.2 การต่อหม้อแปลงแบบ T-T Connection	33
3.3 การต่อหม้อแปลงแบบ Scott Connection	37
3.4 การทดสอบหม้อแปลง Main , Teaser และหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V/V	40
3.5 การทดสอบ T-T , V/V และ Scott Connection Transformer	63
บทที่ 4 บทสรุปปริญญานิพนธ์	73
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก.	75
ภาคผนวก ข.	78
ภาคผนวก ค.	80
ภาคผนวก ง.	96
กิตติกรรมประกาศ	114
บรรณานุกรม	115

โปรแกรมการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ โอเพ่นเดลต้า , สก็อต และ ที

โดย นาย จักรพงษ์ ประสมศรี
นาย สมยศ พันธุ์ไม้
ผ.ศ จงรักษ์ บุญเต็ม อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นศึกษาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส และการศึกษาคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส เมื่อนำมาต่อเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ภายใต้เงื่อนไขของการต่อแบบ โอเพ่นเดลต้า หรือ วี , สก็อต และ ที (Open-delta or V-connection , Scott and T-connection) โดยใช้โปรแกรม Visual basic ในส่วนตัวของโปรแกรม รวมทั้งการวัดหาความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และการสูญเสียของแกนเหล็ก และนำค่าที่ได้จากการออกแบบมาสร้างและทดสอบ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับข้อกำหนดที่ได้ออกแบบไว้

Open - delta , Scott and T- connection Transformer Program Design

Chakkaphong Prasomsri

Somyos Punmai

Asst.Prof. Chongrag Boonseng Advisor

1996

Abstract

This thesis researched for educates about the property and design of 1 phase transformer when it banked to 3 phase transformer. Under Open-delta , Scott and T-connection conditions. We creates the program by using visual basic combine with method of measure B-H curve and core loss. Then the parameters from the program used to build the transformer and test their performances . Results from tests are compared with the specification .

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของ B เทียบกับ H ก่อนที่ลดความเป็นแม่เหล็กถาวร	4
รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของ μ กับ B - H curve	5
รูปที่ 2.3 แสดงการเดินทางและทิศของกระแสไหลเวียนเมื่อ Flux มีทิศทางพุ่งเข้ากระดาษ	6
รูปที่ 2.4 แสดง Hysteresis	6
รูปที่ 2.5 แสดง Dimension และพื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก	8
รูปที่ 2.6 โครงสร้างการพันแบบสุ่ม (Random - wound)	12
รูปที่ 2.7 โครงสร้างการพันแบบชั้น (Layer - wound)	12
รูปที่ 2.8 แสดงระยะ G_n , G , B_{oc} และ Margin ที่ใช้ในการคำนวณหา Turn per layer	12
รูปที่ 2.9 ภาพแสดงระยะต่างๆ ของ Bobbin	16
รูปที่ 2.10 แสดงรูปของ Bobbin ที่ประกอบเสร็จแล้ว	17
รูปที่ 2.11 แสดง Mean magnetic part length (L) ของแกนเหล็ก	19
รูปที่ 2.12 แสดง Mean length of turn (M)	20
รูปที่ 2.13 ก. แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแบบ Shell	22
รูปที่ 2.13 ข. แสดงทางเดินในอุดมคติของ Leakage flux ของหม้อแปลงแบบ Shell	23
รูปที่ 2.14 หม้อแปลงขณะทำการทดสอบแบบเบ็ดเสร็จทางด้านแรงสูงและวัดค่าต่างๆ ทางด้านแรงต่ำ	27
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบโดยเบ็ดเสร็จ ทางด้านแรงสูง	28
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Core loss , P_o , I_c , I_m และ I_o กับ V_o	29
รูปที่ 2.17 แสดงการต่อวงจรหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบแบบเบ็ดเสร็จทางด้านแรงต่ำ	29
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงที่เทียบกับด้านแรงสูงเมื่อลัดวงจรแรงต่ำ	30
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Copper loss , แรงดันกับกระแส	31
รูปที่ 3.1 การต่อแบบโอเพ่นเคลดดี หรือ V	32
รูปที่ 3.2 การต่อหม้อแปลงแบบ T-T และความสัมพันธ์ทาง Phasor ¹	34
รูปที่ 3.3 การต่อหม้อแปลงแบบ Scott connection สำหรับระบบไฟฟ้า 2 เฟส และ 4 เฟส	38
รูปที่ 3.4 กราฟผลทดลองวัดความต้านทานด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง Main	41
รูปที่ 3.5 กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง Main	42
รูปที่ 3.6 กราฟผลทดลองวัดค่าความต้านทานด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง Teaser	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่ 3.7	กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง Teaser	44
รูปที่ 3.8	กราฟผลทดลองวัดความต้านทานด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง สำหรับการต่อแบบ V	45
รูปที่ 3.9	กราฟผลทดลองวัดความต้านทานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง สำหรับการต่อแบบ V	46
รูปที่ 3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_o กับ V_o ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร	47
รูปที่ 3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_o กับ I_o ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร	48
รูปที่ 3.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_o กับ V_o ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร	50
รูปที่ 3.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_o กับ I_o ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร	50
รูปที่ 3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_o กับ V_o ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร	52
รูปที่ 3.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_o กับ I_o ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร	52
รูปที่ 3.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร	54
รูปที่ 3.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร	55
รูปที่ 3.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร	56
รูปที่ 3.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร	57
รูปที่ 3.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร	58
รูปที่ 3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร	59

สารบัญภาพ

รูปที่ 3.22 กราฟผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Main	60
รูปที่ 3.23 กราฟผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Teaser	62
รูปที่ 3.24 แสดงการต่อหม้อแปลงแบบ T-T connection เพื่อทำการทดสอบการรับ ภาระ โหลด 3 เฟส	63
รูปที่ 3.25 แสดงการต่อหม้อแปลงแบบ Scott connection เพื่อทำการทดสอบการรับ ภาระ โหลด 2 เฟส	64
รูปที่ 3.26 แสดงการต่อหม้อแปลงแบบ V/V connection เพื่อทำการทดสอบการรับ ภาระ โหลด 3 เฟส	65
รูปที่ 3.27 กราฟแสดงการทดสอบการรับภาระ โหลด 3 เฟส เมื่อหม้อแปลงต่อแบบ T-T connection	67
รูปที่ 3.28 กราฟแสดงการทดสอบการรับภาระ โหลด 2 เฟส เมื่อหม้อแปลงต่อแบบ Scott connection	69
รูปที่ 3.29 กราฟแสดงการทดสอบการรับภาระ โหลด 3 เฟส เมื่อหม้อแปลงต่อแบบ V/V connection	71
รูปที่ ค.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกำลังเมื่อเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ และ ไม่คิดค่า series impedance	80
รูปที่ ค.2 วงจรทดลองหา curve และ λ กับ I สำหรับหม้อแปลง	81
รูปที่ ค.3 วงจรวัด B-H curve โดยใช้ B-H curve measurement circuit	82
รูปที่ ค.4 ภาพกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง (Exciting current) ที่ได้จาก Oscilloscope	83
รูปที่ ค.5 ภาพของเส้นแรงแม่เหล็กที่ได้จาก Oscilloscope	84
รูปที่ ค.6 ภาพของเส้นแรงแม่เหล็กในฟังก์ชันของกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงที่ได้จาก Oscilloscope	84
รูปที่ ค.7 แสดงลักษณะของกระแส Exciting , Magnetizing และ กระแสที่ทำให้เกิด core loss	88
รูปที่ ค.8 กราฟความสัมพันธ์ของ B_m (T) กับ H_{peak} (At/m) ของแกนเหล็ก EI - 225 เมื่อใช้ $R = 0.03$ Ohms	92
รูปที่ ค.9 กราฟความสัมพันธ์ของ B_m (T) กับ Watt loss per kilograms ของแกนเหล็ก EI - 225	92

สารบัญภาพ

รูปที่ ค.10 กราฟความสัมพันธ์ของ B_m (T) กับ VA loss per kilograms ของแกนเหล็ก EI - 225	93
รูปที่ ง.1 Flowchart ของ โปรแกรมช่วยในการออกแบบ	96
รูปที่ ง.2 แสดงโปรแกรมช่วยในการออกแบบ	99
รูปที่ ง.3 แสดงค่า Input ของ โปรแกรมช่วยในการออกแบบ	100
รูปที่ ง.4 แสดงค่าการคำนวณของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V	100
รูปที่ ง.5 แสดงขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V	101
รูปที่ ง.6 แสดงค่า Impedanceของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V	101
รูปที่ ง.7 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V	102
รูปที่ ง.8 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V	102
รูปที่ ง.9 แสดงขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง Main	103
รูปที่ ง.10 แสดงค่าการคำนวณของหม้อแปลง Main	103
รูปที่ ง.11 แสดงค่า Impedanceของหม้อแปลง Main	104
รูปที่ ง.12 แสดงขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง Teaser	104
รูปที่ ง.13 แสดงค่าการคำนวณของหม้อแปลง Teaser	105
รูปที่ ง.14 แสดงค่า Impedanceของหม้อแปลง Teaser	105
รูปที่ ง.15 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Teaser	106
รูปที่ ง.16 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Teaser	106
รูปที่ ง.17 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Main	107
รูปที่ ง.18 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Main	107
รูปที่ ง.19 แสดงการป้อนค่าเกินพิกัดของแกนและขดลวด	108
รูปที่ ง.20 แสดงการเลือกค่าที่ไม่สามารถใส่แกนเหล็กได้	108

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	ชนิดของหม้อแปลง 3 เฟส ที่อาจนำมาต่อขนานได้	37
ตารางที่ 3.2	ผลการวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลง Main	41
ตารางที่ 3.3	ผลการวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลง Teaser	43
ตารางที่ 3.4	ผลการวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V	45
ตารางที่ 3.5	ผลการทดสอบหม้อแปลง Main แบบเปิดวงจร	47
ตารางที่ 3.6	ผลการทดสอบหม้อแปลง Teaser แบบเปิดวงจร	49
ตารางที่ 3.7	ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V แบบเปิดวงจร	51
ตารางที่ 3.8	ผลการทดสอบหม้อแปลง Main แบบลัดวงจร	54
ตารางที่ 3.9	ผลการทดสอบหม้อแปลง Teaser แบบลัดวงจร	56
ตารางที่ 3.10	ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อ V แบบลัดวงจร	58
ตารางที่ 3.11	ผลการทดสอบภาระของหม้อแปลง Main	60
ตารางที่ 3.12	ผลการทดสอบภาระของหม้อแปลง Teaser	61
ตารางที่ 3.13	ผลการทดสอบ T-T connection Transformer	65
ตารางที่ 3.14	ผลการทดสอบ Scott connection Transformer	68
ตารางที่ 3.15	ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V/V	70
ตารางที่ ก.	WIRE GAUGES	75
ตารางที่ ข.	DIMENSION OF EI-CORE	78
ตารางที่ ง.2	ผลการวัด B-H ของแกน EI-225	98
ตารางที่ ง.3	ผลการวัด VA ของแกน EI-225	98
ตารางที่ ง.4	ผลการวัด Watt ของแกน EI-225	99

บทที่ 1

บทนำ

ในปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ตามโครงการเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาคุณสมบัติเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดย

ใน ส่วนที่ 1 ซึ่งถูกเขียนไว้ในภาคผนวก ประกอบด้วยข้อมูลตารางลวดทองแดงตามมาตรฐาน SWG และ หมายเลขของแกนเหล็ก EI ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดรวมทั้งวิธีการวัด B-H curve ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทดสอบ เพื่อทดสอบหาความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) ที่เหมาะสมของแกนเหล็ก ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกใช้เป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมการออกแบบ และในหัวข้อสุดท้ายของภาคผนวก จะเป็นวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อนำมาต่อแบบโอเพ่นเคลดต้า , สต็อค และ ที โดยใช้โปรแกรม CAD ที่เขียนขึ้นช่วยในการออกแบบ ซึ่งมีพื้นฐานการคำนวณมาจากทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในบทที่ 2 และบทที่ 3 ประกอบกัน

ใน ส่วนที่ 2 เป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อแบบ โอเพ่นเคลดต้า , สต็อค และ ที ขนาด 2 kVA โดยเมื่อต่อแบบ วี และ ที จะได้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แรงดัน 380/380 โวลต์ และ เมื่อต่อแบบ สต็อค จะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟ 3 เฟส เป็นแรงดันไฟ 2 เฟส แรงดัน 380/220 โวลต์ ซึ่งจะมีเนื้อหาอยู่ในบทที่ 2 และ บทที่ 3 โดยในบทที่ 2 จะเป็นทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดยขั้นตอนการออกแบบได้ใช้แนวทางเดียวกับหนังสือการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส ของ Eric Lowdon^[1] ส่วนในบทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ วี , สต็อค และ ที (V-connection , Scott and T -connection) และแสดงผลการทดสอบหม้อแปลงที่สร้างขึ้น

บทที่ 2

หลักการและวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงหลักการและ วิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ ซึ่งในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วเราจะต้องมีกำหนดรายละเอียด (specification) ของหม้อแปลงที่ต้องการสร้างก่อน ว่าเราต้องการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากับระดับแรงดันไฟฟ้าเท่าไร ความถี่ของระบบไฟฟ้าเป็นเท่าไร หม้อแปลงมีขนาดกี่ VA ต้องการแรงดันขาออก (แรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง) เท่าไร และประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น ซึ่งในหัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะเป็นการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

2.1 การคำนวณหากระแสไฟฟ้าของหม้อแปลง

เมื่อเราทำการกำหนดรายละเอียดของหม้อแปลงแล้ว เราก็สามารถที่จะคำนวณหากระแสที่ไหลในขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงได้โดยอาศัย พิกัด VA ของ หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งแสดงของผลคูณของกระแสและแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{พิกัดของกระแสทางด้านทุติยภูมิ} = \frac{\text{พิกัด VA ของหม้อแปลง}}{\text{พิกัดแรงทางด้านทุติยภูมิ}}$$

$$I_2 = \frac{VA}{V_2} \quad [2.1]$$

เนื่องจากเครื่องกลไฟฟ้าทุกชนิดจะมีการสูญเสีย (loss) เกิดขึ้น ดังนั้นจะมีประสิทธิภาพของเครื่องกลไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องกลไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{\text{Power Output}}{\text{Power Input}} = \frac{\text{Power Output}}{\text{Power Output} + \text{Loss}}$$

$$\text{ดังนั้น Power input} = \frac{\text{Power Output}}{\eta} \quad [2.2]$$

เพราะฉะนั้นพิกัดของกระแสทางด้านปฐมภูมิจึงหาได้จาก

$$\text{พิกัดของกระแสทางด้านปฐมภูมิ} = \frac{\text{พิกัด VA ของหม้อแปลง}}{\eta \times \text{พิกัดแรงดันทางปฐมภูมิ}}$$

$$I_1 = \frac{VA}{\eta \times V_1} \quad [2.3]$$

2.2 การคำนวณหาขนาดของลวดทองแดง^[1]

เมื่อเราคำนวณหาพิคัดของกระแสทางด้านปฐมภูมิ และ พิคัดของกระแสทางด้านทุติยภูมิได้แล้ว ในขั้นตอนต่อไปนี้ เราจะคำนวณหาขนาดของลวดทองแดงที่ใช้ ซึ่งตามปกติแล้วลวดทองแดงที่ใช้ เราจะใช้ลวดทองแดงชนิดแข็ง (solid copper) ที่มีการชุบด้วยฉนวน ซึ่งเราเรียกว่าสายอะแนม-เอ็ล(enamelled wire) ลวดทองแดงที่เราเลือกใช้นั้นฉนวนต้องสามารถต่อแรงดันเสียสภาพ (break down) และอุณหภูมิของลวดทองแดง ขณะใช้งานจะต้องไม่สูงเกินขีดจำกัด เพราะวัสดุที่เป็นฉนวนหรือ จุดเชื่อมต่อของลวดทองแดงที่ถูกเชื่อมด้วยตะกั่วจะถูกทำลายได้ ดังนั้นในการออกแบบขนาดของลวดทองแดงเราจะใช้ส่วนกลับของความหนาแน่นของกระแส (S) ช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วเราจะใช้ส่วนกลับของความหนาแน่นของกระแส (S) ในช่วง 0.25 ถึง 0.5 mm² per ampere (500 ถึง 1000 circular mils per ampere) ดังนั้นเราสามารถหาพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงได้จากสมการ

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง} = S \times I \quad \text{mm}^2 \quad [2.4]$$

โดยที่ S คือ ส่วนกลับของความหนาแน่นของกระแสมีหน่วยเป็น mm²/A

I คือ พิคัดกระแสของหม้อแปลงในด้านที่เรากำลังสนใจมีหน่วยเป็น A

เมื่อเราคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงได้แล้ว เราก็ทำการเปรียบเทียบกับค่าในตารางสาย(WIRE GAUGES) ในภาคผนวก ก. เพื่อเลือกเบอร์ของลวดทองแดง

จากสมการที่ 2.4 ถ้าเราใช้ (S) มาก จะทำให้พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้อุณหภูมิขณะใช้งานมีค่าน้อย แต่ราคาของลวดทองแดงขนาดใหญ่จะสูงกว่าลวดทองแดงขนาดเล็ก และเมื่อพันลวดทองแดงลงในบอบบี้น(bobbins) แล้วอาจทำให้พื้นที่หน้าตัดรวมของลวดทองแดงมีค่ามากกว่า พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ทำให้ใส่แกนเหล็กไม่ได้ ดังนั้นการเลือกใช้ค่า S ที่เหมาะสมในการออกแบบจะส่งผลให้หม้อแปลงที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และตรงตามจุดประสงค์ของการใช้งานของหม้อแปลงนั้นๆ

2.3 การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็ก และ Wa Product^[1]

จากหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้น เราได้ทำการคำนวณหาขนาดของลวดทองแดงที่ใช้ได้แล้ว และในขั้นตอนต่อไปนี้จะได้เป็นการเลือกขนาดของเหล็กที่จะใช้แกนเหล็กขนาดใด ซึ่งในปริยญาณิพนธ์

นี่เราจะใช้แกนเหล็กชนิด EI ในการออกแบบหม้อแปลงเท่านั้น ซึ่งยังมีแกนเหล็กอีกหลายชนิด เช่น C Core , Pot Core แต่เราจะไม่ขอกกล่าวถึง

แกนเหล็กของหม้อแปลง โดยทั่วไปจะเป็นโลหะผสมของนิเกิล และ เหล็ก , โลหะผสมของ เหล็ก และ ซิลิกอน เป็นต้น และเราจะคำนึงถึงคุณสมบัติ 5 ข้อ ของวัสดุที่จะนำมาทำเป็นแกนเหล็ก หม้อแปลง คือ 1. permeability , 2. saturation , 3. electrical resistivity , 4. remanence และ 5. coercivity ซึ่งค่าของ remanence และ coercivity จะนำไปสู่คุณสมบัติที่สำคัญของ hysteresis

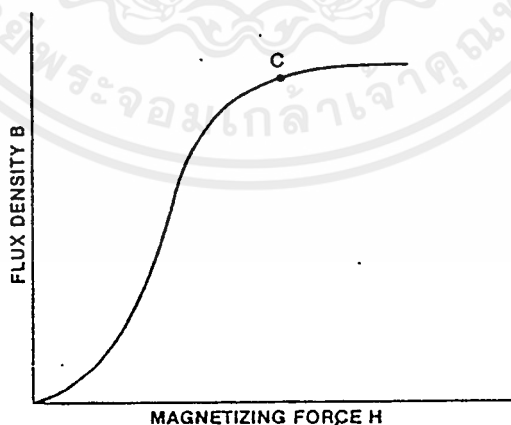
2.3.1. Permeability

Permeability สามารถอธิบายถึงความสามารถในการนำของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเขียน สมการทางคณิตศาสตร์ได้ว่า คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) กับ magnetizing force (H) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

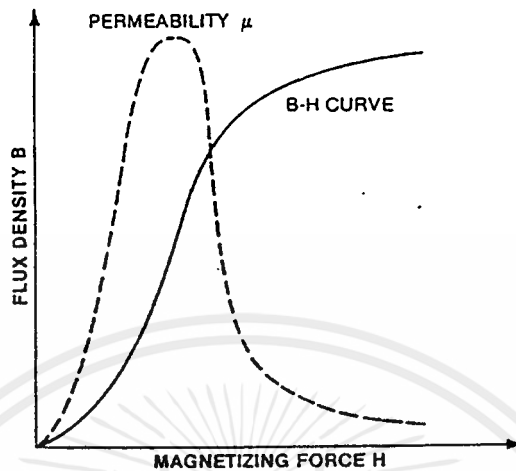
$$\mu = \frac{B}{H}$$

[2.5]

เมื่อเราทำการ plot curve ระหว่าง B กับ H เราจะได้กราฟที่มีชื่อว่า B-H curve , magnetization curve หรือ saturation curve ดังที่รูป 2.1 ซึ่ง B-H curve นี้จะได้มาจากการทดสอบวัสดุก่อนที่เรา จะทำการลดอำนาจการเป็นแม่เหล็กลง (demagnetization)



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของ B เทียบกับ H ก่อนที่จะลดความเป็นแม่เหล็กลง



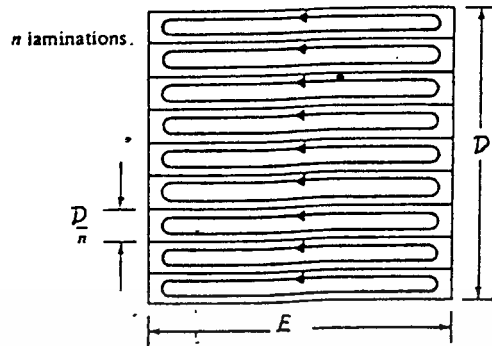
รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของ μ กับ B-H curve

2.3.2. saturation

จากรูปที่ 2.1 จุดในเส้นกราฟที่ผ่านจุด c ไปแล้ว จะมีค่าของ B เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ในขณะที่ H มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นคือแกนเหล็กของเรากำลังจะอิ่มตัว ซึ่งโลหะที่ต่างชนิดกันจะมีจุดอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ทำให้เราสังเกตได้ว่า ค่า μ จะเข้าใกล้ศูนย์หรือ มีค่าน้อยมาก ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งก็หมายถึงค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ใน shunt branch ของวงจรสมมูลของหม้อแปลง มีค่าน้อยมากๆ เมื่อแกนเหล็กอิ่มตัว ทำให้เราต้องออกแบบหม้อแปลงมาใช้งาน

2.3.3. electrical resistivity

เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กเดินทางอยู่ในแกนเหล็กของหม้อแปลง จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในแกนเหล็ก ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้ จะมีทิศทางตั้งฉากกับทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะทำให้เกิดกระแสขึ้นที่แกนเหล็กของหม้อแปลงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งกระแสตัวนี้ก็คือ กระแสไหลวน (eddy current) จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น จะมีค่าน้อย นั่นคือ จะเกิด loss น้อย ซึ่ง loss ชนิดนี้จะลดลงได้โดยการใช้แกนเหล็กที่ทำมาจากแผ่น lamination บาง และ แผ่น lamination แต่ละแผ่นจะต้องมีการฉนวนด้วยฉนวนไว้ด้วย

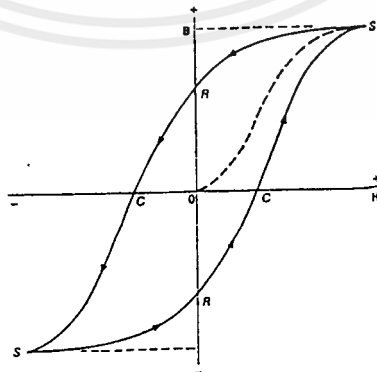


รูปที่ 2.3 แสดงการเดินทางและทิศของกระแสไหลเวียน เมื่อ flux มีทิศทางเข้ากระดาษ

2.3.4. hysteresis (remanence และ coercivity)

เมื่อเราทำการลดอำนาจความเป็นแม่เหล็กลง และทำให้เกิด loop ของ magnetization ที่สมบรูณ์ และทำการ plot B กับ H เราจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ใน 1/4 ของ cycle แรก จะเป็นเส้นประ คือ curve จะเริ่มจากศูนย์ เมื่อเราทำการเพิ่ม H จะทำให้ B เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่อิมตัวคือจุด S จากนั้นเมื่อเราลด H ลง B ก็จะลดลงตาม ซึ่งแสดงได้ในส่วน (path) SR เมื่อ H ลดลงจนเป็นศูนย์ จะเห็นว่ายังมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างอยู่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ R เราจะเรียกค่า R นี้ว่า remanence และเมื่อ H ถูกป้อนกลับขั้ว คือป้อนเป็นลบ เราจะได้ส่วน (path) RC และที่จุด C นี้จะมีเส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์

แต่ H จะมีค่าอยู่ที่ค่าๆ หนึ่ง ซึ่งค่า H ที่จุด C นี้เราเรียกว่า coercivity หลังจากนั้นเราก็เพิ่มค่า H ไปเรื่อยๆ จนแกนเหล็กอิมตัวอีก คือ จุด S ในด้านลบ แล้วเราก็ทำการลด H ลง และทำไปเรื่อยๆ เราจะได้กราฟดังรูปที่ 2.4 นั่นเอง ซึ่ง hysteresis loop ที่ได้ นี้ จะแสดงถึงพลังงานส่วนหนึ่งที่สูญเสียไปในแกนเหล็ก



รูปที่ 2.4 แสดง Hysteresis loop

จากที่กล่าวมาแล้วว่า เราจะต้องทำการออกแบบหม้อแปลงไม่ให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ในขณะที่ใช้งาน ซึ่งเราจะต้องรู้ค่าของความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux density) ก่อนอิ่มตัวนั้น โดยอ่าน จาก B-H curve ถ้าเป็นเหล็กที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศเราอาจจะได้กราฟของ B-H curve , Watt loss per kilograms และ VA loss per kilograms มา แต่ถ้าเราซื้อในประเทศเราจะไม่ได้กราฟเหล่านี้มา แต่เราสามารถหาค่าของกราฟต่างๆ ได้โดยการทดสอบแกนเหล็ก ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

เมื่อเราทราบว่าเราควรจะใช้ Flux density เท่าไรในการออกแบบแล้ว เราก็จะขอกำลังถึง สมการของความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งสมการนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่า Flux density (B) ของแกนเหล็กคือ

$$P = 0.707JfWaB \times 10^{-6} \quad \text{VA} \quad [2.6]$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าขาเข้าของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น VA

J คือ ความหนาแน่นของกระแส มีหน่วยเป็น A/mm²

f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีหน่วยเป็น Hz

W คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น mm²

a คือ พื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น mm²

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Tesla

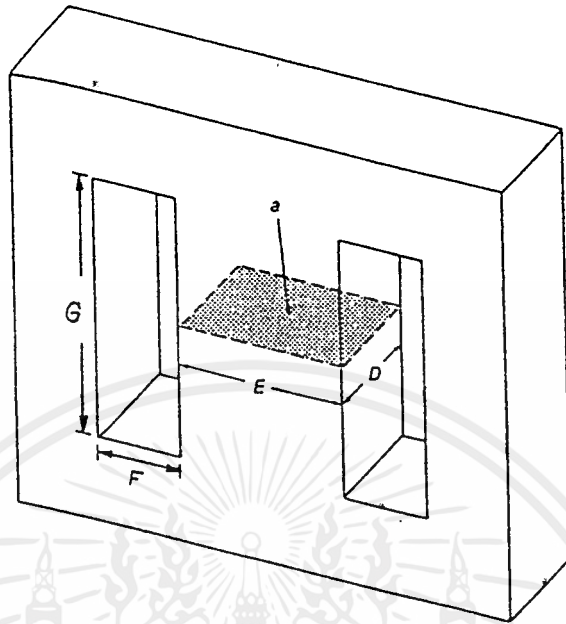
จากสมการที่ 2.6 เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก กับ พื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก ได้ดังนี้

$$Wa = \frac{1.414PS}{fB} \times 10^6 \quad \text{mm}^4 \quad [2.7]$$

โดยที่ Wa คือ ผลคูณของพื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็กกับพื้นที่ของหน้าตัดมีหน่วยเป็น mm⁴

S คือ ส่วนกลับของความหนาแน่นของกระแสมีหน่วยเป็น mm²/A

เมื่อเราคำนวณหา Wa product ที่ได้มาจากสมการของความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้า (สมการที่ 2.7) ได้แล้ว เราก็จะมาคำนวณหา Wa product ที่ได้มาจากความสัมพันธ์ของ Dimension ต่างๆ ของแกนเหล็กในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดง Dimension และพื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก กำหนดให้ Wai คือ $Wa \text{ product}$ ที่ได้มาจาก dimension ของแกนเหล็กค้ำนั้นจากรูปที่ 2.5 จะได้

$$Wai = (F \times G) \times (E \times D) \quad \text{mm}^4 \quad [2.8]$$

โดยที่ $F \times G$ คือ พื้นที่ของหน้าข้าง มีหน่วยเป็น mm^2

$E \times D$ คือ พื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น mm^2

- หมายเหตุ**
1. ระยะ F, G, E, H , ของแกนเหล็กเบอร์ต่างๆ สามารถดูได้จากตาราง dimension ของแกนเหล็ก ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.
 2. ในกรณีที่เราออกแบบโดยใช้แกนเหล็กเป็นแบบแผ่น Lamination เราจะต้องรวมเอา iron stacking factor เข้ามาคิดด้วย ซึ่งปกติแล้วเราจะใช้ iron stacking factor ในช่วง 0.85 ถึง 0.95 สำหรับปริมาณน้ำหนักเด็มนี่ใช้ iron stacking factor = 0.9

ในการออกแบบมือแปลง เราจะออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็กเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังสมการที่ 2.8 จะกลายเป็น

$$Wai = (F \times G) \times E^2 \quad \text{mm}^4 \quad [2.9]$$

ทำการเปรียบเทียบสมการที่ 2.9 กับสมการที่ 2.7 เพื่อเลือกขนาดของแกนเหล็กที่เหมาะสมโดยให้ Wai มีค่ามากกว่า Wa หรือ น้อยกว่า Wa เล็กน้อย เมื่อเราได้ dimension ของแกนเหล็กที่เหมาะสมแล้ว ให้เรานำค่า Wa ลงไปแทน Wai ในสมการที่ 2.8 เพื่อหาระยะ 'D' ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวด^{[1],[5]}

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และทางด้านทุติยภูมิ โดยใช้สมการเบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ที่มีความสัมพันธ์ของแรงดันและจำนวนรอบของขดลวด คือ

$$V = 4fBaN \times 10^{-6} \quad [2.10]$$

โดยที่ V คือ แรงดันทางด้านที่เรากำลังสนใจ มีหน่วยเป็น volt

$$F \text{ คือ Form factor} = \frac{\text{ค่า rms}}{\text{ค่า average}} = 1.11 \text{ สำหรับ sine wave}$$

f คือ ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีหน่วยเป็น Hz

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Tesla

a คือ พื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น mm²

N คือ จำนวนรอบของขดลวดด้านที่เรากำลังสนใจ มีหน่วยเป็น รอบ

จากสมการที่ 2.10 เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ จำนวนรอบ / แรงดัน (turn / volt) ได้ดังนี้

$$\text{turn per volt} = \frac{N}{V} = \frac{1}{4.44fBa \times 10^{-6}} \text{ สำหรับลูกคลื่น sine wave} \quad [2.11]$$

ดังนั้นเมื่อเราทราบแรงดันที่ป้อนเข้าทางขดปฐมภูมิว่าเป็น V_1 เราสามารถหาจำนวนรอบทางขดปฐมภูมิ (N_1) ได้จาก

$$N_1 = \frac{V_1}{4.44fBa \times 10^{-6}}$$

แต่เนื่องจากขดลวดมีความต้านทานมาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นเมื่อมีการจ่ายโหลดทางด้านทุติยภูมิ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในขดลวด เราจึงต้องทำการชดเชย (Compensated) จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เพื่อให้แรงดันขณะจ่ายโหลดเต็มพิกัดมีค่าเท่ากับที่กำหนดไว้ ซึ่งในการชดเชยจำนวนรอบของขดทุติยภูมินี้ เราจะใช้เงื่อนไขที่ว่าประสิทธิภาพสูงสุด ในการทำงานของหม้อแปลงจะเกิดขึ้น เมื่อการสูญเสียที่ขดลวดทั้งหมดจะต้องเท่ากับการสูญเสียที่แกนเหล็กของหม้อแปลง ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ของจำนวนรอบกับประสิทธิภาพดังนี้

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \sqrt{\eta}$$

$$\text{หรือ} \quad N_2 = \frac{V_2 N_1}{V_1 \sqrt{\eta}} \quad [2.12]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ เมื่อชดเชย แรงดันตกคร่อมในขดลวด

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

V_2 คือ แรงดันทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็น volt

V_1 คือ แรงดันด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น volt

η คือ ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

จากสมการที่ 2.11 เราสามารถหาจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ยังไม่ compensated เพื่อนำไปคำนวณหา voltage drop ได้ดังนี้

$$N_{2uncom} = (\text{turn / volt}) \times V_2 \quad [2.13]$$

$$\text{Voltage drop} = \frac{N_2 - N_{2uncom}}{\text{turn/volt}} \quad [2.14]$$

เมื่อเราคำนวณค่า voltage drop แล้ว เราก็จะมาคำนวณหาค่า Regulation (Reg^n) ของหม้อแปลง ซึ่งค่า Reg^n ของหม้อแปลง ก็คืออัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ตกลง หรือเพิ่มขึ้นจากขณะที่ยังไม่จ่ายโหลด (no load) ไปยังขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดเต็มพิกัด (full load) ที่ power factor ความที่ต้องการต่อแรงดันไฟฟ้า ขณะที่จ่ายโหลดเต็มพิกัด แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงไปนี้เกิดจากความต้านทานและ reactance ของขดลวดทั้งหมดที่พันอยู่ในหม้อแปลงนั้น ๆ อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงตัวเดียวกัน ย่อมมี Regulation เท่ากันไม่ว่าจะคิดคำนวณทางด้านใดก็ตาม การหา Regulation นั้นโดยปกติหาจากด้านที่ต้องจ่ายโหลด (ด้านทุติยภูมิ) ดังนั้นเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\% \text{Reg}^n = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100\% \quad (\text{ลบกันตามพีชคณิต}) \quad [2.15]$$

โดยที่ E_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิขณะที่ยังไม่จ่ายโหลด มีหน่วยเป็น volt

V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิขณะที่จ่ายโหลดเต็มพิกัด มีหน่วยเป็น volt

จากสมการของ $\% \text{Reg}^n$ ที่เขียนในข้างต้น เราจะเห็นว่าค่าแรงดัน $E_2 - V_2$ นี้ก็คือค่าของ voltage drop ที่เกิดขึ้น ดังนั้น $\% \text{Reg}^n$ สามารถหาได้จาก

$$\% \text{Reg}^n = \frac{\text{Voltage drop}}{V_2} \times 100\% \quad [2.16]$$

2.5 การคำนวณจำนวนรอบต่อชั้น และจำนวนชั้นของขดลวด^[1]

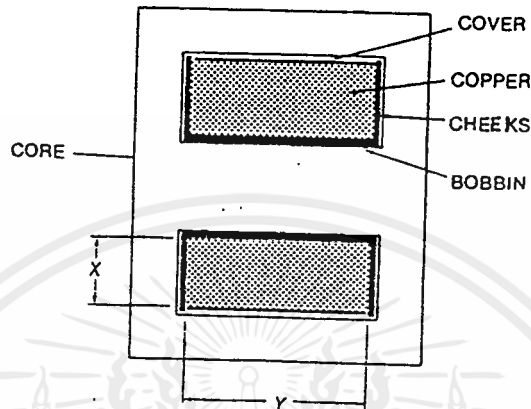
ในการพันหม้อแปลง ถึงแม้ว่าลวดทองแดงที่เราใช้จะมีการชุบฉนวนเอาไว้แล้ว แต่เราก็ต้องทำการป้องกันไม่ให้ฉนวนถูกทำให้ชำรุดด้วยขอบของแกนเหล็ก ดังนั้นเราจึงต้องพันลวดทองแดงลงใน bobbin เป็นตัวป้องกันไม่ให้ลวดทองแดงไปชูดกับแกนเหล็ก และตัว bobbin จะทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น heavy cardboard, แผ่น bakelite, พลาสติก เป็นต้น สำหรับการพันหม้อแปลงเราสามารถพันได้ 2 แบบ คือ การพันแบบสุ่ม (random - wound) และการพันแบบชั้น (layer - wound) ในรูปที่ 2.6 เป็นการพันขดลวดแบบสุ่ม ซึ่งไม่มีฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด เพราะฉะนั้นการพันชนิดนี้จำเป็นจะต้องใช้ bobbin ที่มี cheek เพื่อที่จะใช้เป็นตัวกั้นระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก ซึ่งการพันแบบนี้จะง่ายและเร็วกว่าการพันเป็นชั้น ๆ ซึ่งจะสำหรับ ขดลวดแรงต่ำ (low - voltage coil) หรือ ถ้าจะใช้กับขดลวดแรงสูง (high - voltage coil) จะต้องใช้ลวดทองแดงชนิดมีฉนวน 2 ชั้น ในรูปที่ 2.7 เป็นการพันแบบชั้น การพันจะพันอีกข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่ง และจากชั้นแรกไปยังไปยังอีกชั้นหนึ่งโดยซ้อนทับกันอย่างมีระเบียบ ซึ่งแต่ละชั้นจะมีกระดาษฉนวน หรือวัสดุกั้นระหว่างชั้น ซึ่งฉนวนจะกั้นไม่ให้ผิวของฉนวน ของลวดทองแดงชั้นบนและ ชั้นล่างถูกกัน นั่นคือเป็นการป้องกันความเครียด(stress) ทางไฟฟ้า สำหรับ bobbin อาจจะมีหรือไม่มี cheek ก็ได้ ถ้า bobbin ของเราไม่มี cheek เราจะต้องมีระยะห่างระหว่างลวดทองแดงกับแกนเหล็ก (ระยะ margin) เพราะฉนวนของลวดทองแดงอาจจะ breakdown ไปยังแกนเหล็ก ถ้าหม้อแปลงอันนั้นใช้กับไฟแรงสูง และระยะ Margin น้อยเกินไป จากรูปที่ 2.7 ระยะ Margin สามารถได้จากสูตร

$$\text{Margin} = (V_w + 500) \times 3.175 \times 10^{-3} \quad \text{mm} \quad [2.17]$$

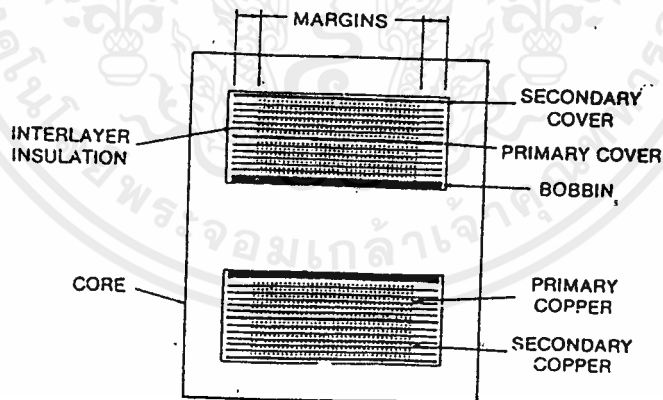
เมื่อ V_w คือ แรงดันที่ใช้งาน (working voltage) มีหน่วยเป็น volt

ตัวอย่างการคำนวณระยะ Margin : ถ้าแรงดันใช้งานของเราเป็น 380 volt เราสามารถคำนวณหา ระยะ Margin ได้เท่ากับ $(380 + 500) \times 3.175 \times 10^{-3} = 2.794 = 3 \text{ mm}$

ในการหุ้มฉนวนขดลวดเราไม่ควรที่จะใช้ฉนวนที่มากเกินไปจนเกินไป เพราะจะทำให้การระบายความร้อนออกสู่ภายนอกของขดลวดจะไม่ดี และจุดกำเนิดของความร้อนของหม้อแปลงจะเริ่มจากขดลวดด้านในที่ชิด กับแกนเหล็ก และที่สำคัญคือ ประสิทธิภาพของหม้อแปลงจะลดลง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างการพันแบบสุ่ม (random - wound)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างการพันแบบชั้น (layer - wound)

สำหรับปริมาณที่เพิ่มขึ้น เราจะทำการออกแบบหม้อแปลงโดยการพันแบบชั้น , ใช้ bobbin ที่มี cheek และมีการนำ margin มาคิดคำนวณด้วย จึงทำให้เรามีระยะในการพันลวดทองแดงน้อยกว่าระยะ G ของแกนเหล็ก ดังนั้นระยะที่เหลือสำหรับพันขดลวด สามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

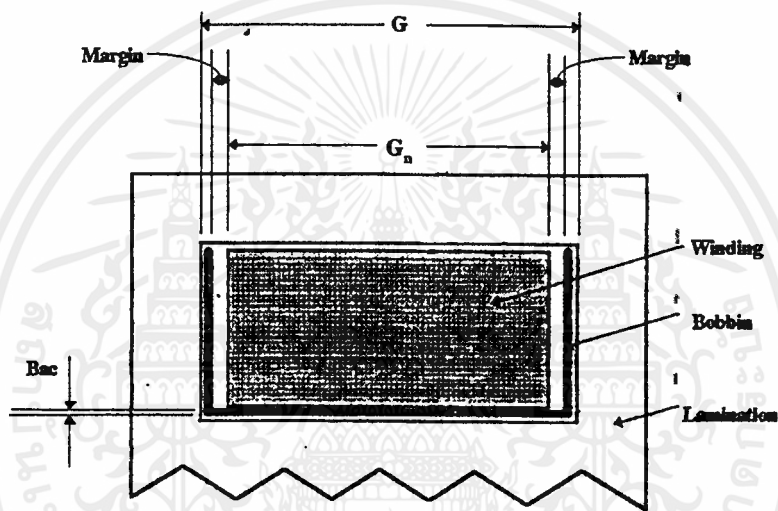
$$G_n = G - (2 \times \text{Margin}) - (2 \times \text{Bac}) \quad \text{mm} \quad [2.18]$$

โดยที่ G_n คือ ระยะที่เหลือพันขดลวดด้านที่กำล้งสนใจ มีหน่วยเป็น mm

G คือ ระยะ G ของหน้าค่างที่ใช้ มีหน่วยเป็น mm

Margin คือ ระยะ margin ที่ใช้ มีหน่วยเป็น mm

Bac คือ ความหนาแน่นของแผ่น Bakelite มีหน่วยเป็น mm



รูปที่ 2.8 แสดงระยะ G_n , G , Bac และ Margin ที่ใช้ในการคำนวณหา turn per layer ดังนั้น turn per layer ของขดลวดด้านที่เราสนใจหาได้ดังนี้

$$\frac{\text{turn}}{\text{layer}} = \frac{G_n}{\text{Diametr ของขดลวดในด้าที่กำล้งสนใจ}} \times \text{Stacking factor ในการพัน} \quad [2.19]$$

Stacking factor ในการพันขึ้นอยู่กับความสามารถในการพันเรียงเส้น ในปริญญานีพจน์นี้เรา กำหนดให้เป็น 0.8 เมื่อเราคำนวณหา turn per layer ได้แล้วการคำนวณหาจำนวนจำนวนชั้นของ ขดลวดสามารถทำได้ดังนี้

$$\text{จำนวนชั้นของขดลวดด้านที่เราสนใจ} = \frac{\text{จำนวนรอบของขดลวดด้านที่เราสนใจ}}{\text{turn/layer ด้านที่เราสนใจ}} \quad [2.20]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การตรวจสอบการออกแบบทาง Physical ของหม้อแปลง^[1]

เมื่อเราทำการออกแบบหม้อแปลงจนได้ข้อมูลที่พร้อม ที่จะสร้างหม้อแปลงได้แล้ว ในขั้นตอนต่อไปนี้จะเป็นการตรวจสอบการออกแบบทาง physical ว่ายังมีช่องว่างเหลืออยู่ในด้านกว้างของ windows (ด้านกว้างของ windows = ระยะ F ของแกนเหล็กเบอร์ที่เราจะใช้) หรือไม่ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$D_2 \text{ คือ จำนวนชั้นของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ} \times \text{Diameter ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ} \quad [2.21]$$

$$D_3 \text{ คือ จำนวนชั้นของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ} \times \text{Diameter ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ} \quad [2.22]$$

$$D_4 \text{ คือ (จำนวนชั้นของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ - 1)} \times D_2 \quad [2.23]$$

$$D_5 \text{ คือ (จำนวนชั้นของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ - 1)} \times D_3 \quad [2.24]$$

$$W_1 \text{ คือ } D_4 + D_5 + D_7 + 30\% \text{ ของ } (D_4 + D_5 + D_7) \text{ เนื่องจากความโค้ง} \quad [2.25]$$

$$W_2 \text{ คือ } D_6 + D_8 + 30\% \text{ ของ } (D_6 + D_8) \text{ เนื่องจากความโค้ง} \quad [2.26]$$

$$D_9 = W_1 + W_2 \quad [2.27]$$

$$W_4 = F_1 - D_9 \quad [2.28]$$

กำหนดให้ D_2 คือ ความหนาของกระดาษฉนวนที่กั้นแต่ละชั้นของขดลวด มีหน่วยเป็น mm

D_3 คือ ความหนาของกระดาษฉนวนที่ cover ขดลวดปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น mm

D_4 คือ ความหนาของกระดาษฉนวนที่ cover ขดลวดทุติยภูมิ มีหน่วยเป็น mm

D_5 คือ ความหนาของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น mm

D_6 คือ ความหนาของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็น mm

D_7 คือ ความหนาของกระดาษฉนวนทั้งหมดทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น mm

D_8 คือ ความหนาของกระดาษฉนวนทั้งหมดทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็น mm

D_9 คือ ระยะที่ใช้งานไปใน windows มีหน่วยเป็น mm

W_1 คือ ความหนาของขดปฐมภูมิรวมกับฉนวนที่ใช้ มีหน่วยเป็น mm

W_2 คือ ความหนาของขดทุติยภูมิรวมกับฉนวนที่ใช้ มีหน่วยเป็น mm

W_4 คือ ช่องว่างที่เหลือในด้านกว้างของ windows มีหน่วยเป็น mm

F_1 คือ ระยะ F ของหน้าต่าง-ความหนาของแผ่น Bakelite - ระยะเพื่อ 1 มีหน่วยเป็น mm

ถ้าเราคำนวณแล้วได้ W_4 ติดลบก็แสดงว่า เราไม่สามารถใส่แกนเหล็ก EI เบอร์ที่เราเลือกใช้ ลงไปใน Bobbin ได้ ดังนั้นเราจะต้องคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก และค่าต่างๆ ใหม่ โดยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็กให้มีค่ามากขึ้น (เพิ่มระยะ D ของพื้นที่หน้าตัดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแกนเหล็ก หรือเปลี่ยนขนาดของแกนเหล็กที่ใช้) และคำนวณจนกระทั่งได้ค่า W_d ที่เป็นบวก และมีค่าอยู่ในช่วงที่เราต้องการ สำหรับปริมาณพันนี้ เราจะให้ค่า W_d ที่เราต้องการในช่วง 4 mm ถึง 8 mm

เมื่อเราคำนวณได้ค่า W_d ที่อยู่ในช่วงที่เราต้องการแล้ว เราก็ลองมาทำการคำนวณหาค่าของ winding space factor (K_w) ซึ่งค่า K_w โดยทั่วไปจะเป็นค่าที่จะแสดงถึงอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของขดลวด ที่ใช้ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก สำหรับหม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิอย่างละ 1 ขด เราสามารถหาค่า K_w ได้จากสมการ

$$K_w = \frac{a_1 \times N_1 + a_2 \times N_2}{F \times G} \quad [2.29]$$

โดยที่ a_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงทางด้านปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น mm^2

a_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงทางด้านทุติยภูมิ มีหน่วยเป็น mm^2

N_1 คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

N_2 คือ จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$F \times G$ คือ พื้นที่ของหน้าตัด มีหน่วยเป็น mm^2

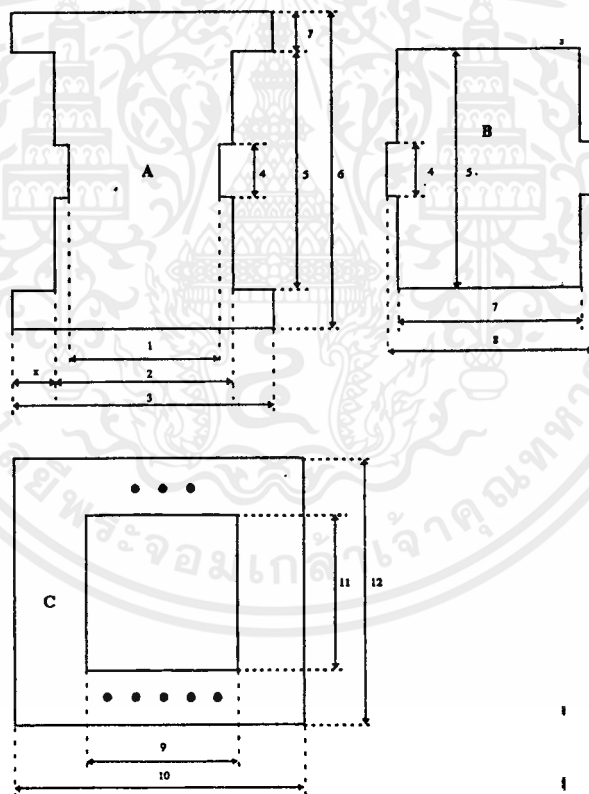
โดยทั่วไปแล้วค่า K_w จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.75 ซึ่งค่า 0.25 นั้นจะหมายถึง เราใช้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กไป 25% หรือจะพูดว่าเหลือพื้นที่ว่างในหน้าตัดของแกนเหล็ก 75% ก็ได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วพื้นที่ว่างในหน้าตัดของแกนเหล็กจะมีค่าไม่ถึง 75% เพราะช่องส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปโดยพื้นที่หน้าตัดของ Bobbin, พื้นที่ของระยะ Margin และพื้นที่ของฉนวนที่กั้นระหว่างชั้นของขดลวด ซึ่งค่าพื้นที่เหล่านี้จะค่ามาก หรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่น Bakelite และเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการพันขดลวดด้วย ดังนั้นค่า K_w ที่เหมาะสมในการออกแบบ คือ ค่า K_w ที่ไม่ทำให้มีช่องว่างในแกนเหล็กเหลือมาก หรือน้อยเกินไปจนไม่สามารถใช้แกนเหล็กได้ จะทำให้การออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพสูง และประหยัดค่าใช้จ่ายได้ ถ้าผู้ออกแบบที่ใช้วิธีการกำหนดค่า K_w ที่ต้องการขึ้นมาเพื่อนำค่านี้ไปหาขนาดของแกนเหล็กที่ต้องใช้ ค่า K_w ก็จะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากตัวหนึ่ง ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบที่มีความชำนาญและมีประสบการณ์ในการออกแบบมาก การกำหนดค่า K_w ที่เหมาะสมจึงจะไม่ใช่ว่าเรื่องยากเย็นอะไร แต่สำหรับปริมาณพันนี้ การออกแบบหม้อแปลงเราไม่สามารถที่จะกำหนดค่า K_w ที่เหมาะสมก่อนการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงสุดได้ เพราะเรายังไม่มีประสบการณ์ที่มากพอ ดังนั้นในปริมาณพันนี้ จึงใช้การกำหนดค่าระยะช่องว่างที่เหลือในด้านกว้างของหน้าตัด (W_d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน ซึ่งสามารถกำหนดพื้นที่ว่างที่เหลือในหน้าต่างได้มากกว่าการกำหนดค่า K_w และ จะทำให้เรามีความมั่นใจว่าจะสามารถใส่แกนเหล็กลงใน Bobbin ได้ และมีพื้นที่ว่างเหลือในหน้าต่างไม่มากเกินไปด้วย

2.7 การออกแบบ Bobbin

ในหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบ Bobbin ที่ต้องใช้ในการทำหม้อแปลง ซึ่งจะใช้ข้อมูลในหัวข้อต่าง ๆ ที่ผ่านแล้วมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งเราจะต้องทำการออกแบบขึ้นส่วน 3 ชั้น คือ ชั้นส่วน A, ชั้นส่วน B และ ชั้นส่วน C ดังรูป 2.9 โดยเราจะสร้างชั้นส่วน A 2 ชั้น, ชั้นส่วน B 2 ชั้น และชั้นส่วน C 2 ชั้น สำหรับชั้นส่วน C เราจะทำการเจาะรูเพื่อนำปลายสายออกมาโดยพิจารณาตามความเหมาะสม



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงระยะต่างๆ ของ Bobbin

การคำนวณหาระยะต่างๆ ของชั้นส่วน A, B และ C เราสามารถหาได้ดังนี้

หมายเลข 1 = ระยะ E ของแกนเหล็กเบอร์ที่เลือกใช้ + ระยะเผื่อ 2 มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 2 = หมายเลข 1 + 2 × ความหนาแน่นของแผ่น Bakelite มีหน่วยเป็น mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 3 = หมายเลข 2 + 2 × ระยะ X มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 4 = หมายเลข 5 × scaling factor มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 5 = ระยะ G ของแกนเหล็กเบอร์ที่เลือกใช้ - ระยะเพื่อ 1 มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 6 = หมายเลข 5 + 2 × ระยะ y มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 7 = $\frac{\text{ระยะ D ที่คำนวณได้}}{\text{iron stacking factor}}$ มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 8 = หมายเลข 7 + 2 × ความหนาของแผ่น Bakelite มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 9 = หมายเลข 2 มีหน่วยเป็น mm

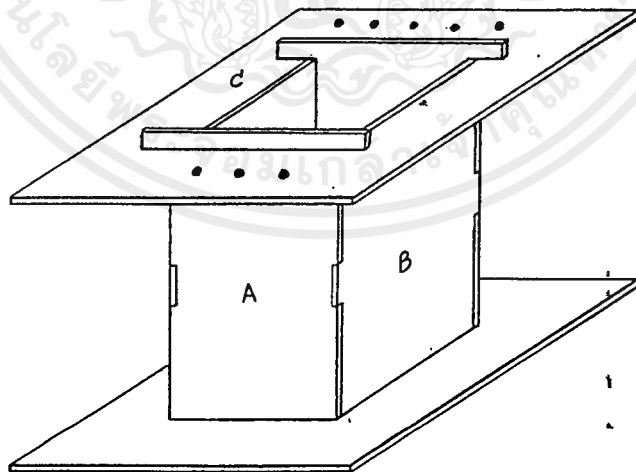
หมายเลข 10 = หมายเลข 9 + 2 × ระยะ F ของแกนเหล็กเบอร์ที่เลือกใช้ - 2 × ความหนาของแผ่น Bakelite - ระยะเพื่อ 2 มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 11 = หมายเลข 8 มีหน่วยเป็น mm

หมายเลข 12 = หมายเลข 11 + 2 × ระยะ F ของแกนเหล็กเบอร์ที่เลือกใช้ - 2 × ความหนาของแผ่น Bakelite + 2 × ระยะเพื่อ 7 มีหน่วยเป็น mm

หมายเหตุ ระยะ X, ระยะ Y และ scaling factor กำหนดตามความเหมาะสม ในปริภูมิงานนี้
แต่นี้จะใช้ระยะ X = 25, ระยะ Y = 8 และ scaling factor = 0.176

เมื่อเราสร้างชิ้นส่วน A, B และ C เรียบร้อยแล้ว เราก็นำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบกัน จะทำให้ได้ Bobbin ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงรูปของ Bobbin ที่ประกอบเสร็จแล้ว

2.8 การคำนวณหาหน้าหนักของแกนเหล็กและหน้าหนักของลวดทองแดงที่ใช้⁽¹⁾

ในหัวข้อนี้จะเป็นการคำนวณหาหน้าหนักของแกนเหล็กและหน้าหนักของลวดทองแดงที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลง เพื่อที่จะนำไปคำนวณราคาในการสร้างหม้อแปลง และคำนวณหาจรรยาบรรณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของหม้อแปลงที่เราออกแบบมา สำหรับการคำนวณน้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ เราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสัมพรรคังต่อไปนี้

$$V = a \times L \times 10^{-9} \quad \text{m}^3 \quad [2.30]$$

$$W_i = V \times \gamma \quad \text{kg} \quad [2.31]$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น m^3

a คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจริง มีหน่วยเป็น mm^2

L คือ mean magnetic path length มีหน่วยเป็น mm

W_i คือ น้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ มีหน่วยเป็น kg

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็ก = 7750.0155 kg/m^3 ซึ่งได้มา

จากการทดสอบ

สำหรับ mean magnetic path length (L) ของแกนเหล็ก คือ ความยาวเฉลี่ยของทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ในรูปที่ 2.11ก mean magnetic path length จะแสดงเป็นเส้นประ ซึ่งจะคิดเพียงหน้าตัดเดียวเท่านั้น ในกรณีที่ limb กลางมีความกว้างเป็น 2 เท่า limb ข้างๆ และด้านบน, ด้านล่างมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น mean magnetic path length จะหาได้จากสมการ

$$L = 2G + 2F + 4B \quad \text{mm} \quad [2.32]$$

สำหรับแกนเหล็กแบบ core type (รูปที่ 2.11ข) mean magnetic path length จะหาได้จากสมการ

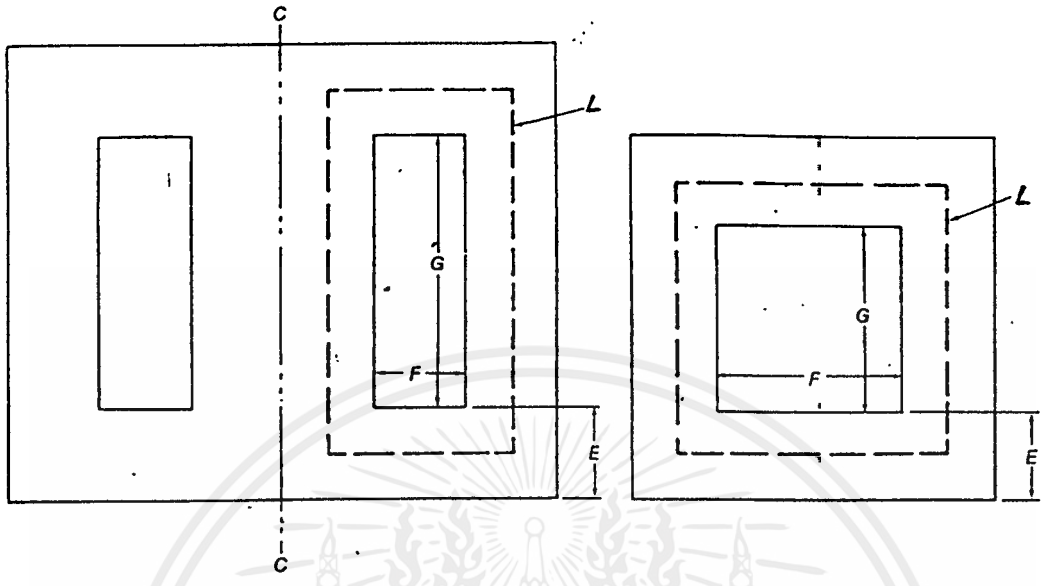
$$L = 2G + 2F + 4B \quad \text{mm} \quad [2.33]$$

ในบางครั้งเราจะสมมุติให้มุมของทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กมน ดังในรูป 2.11ค mean magnetic path length จะหาได้จากสมการ

$$L = 2G + 2F + \pi B \quad \text{mm} \quad [2.34]$$

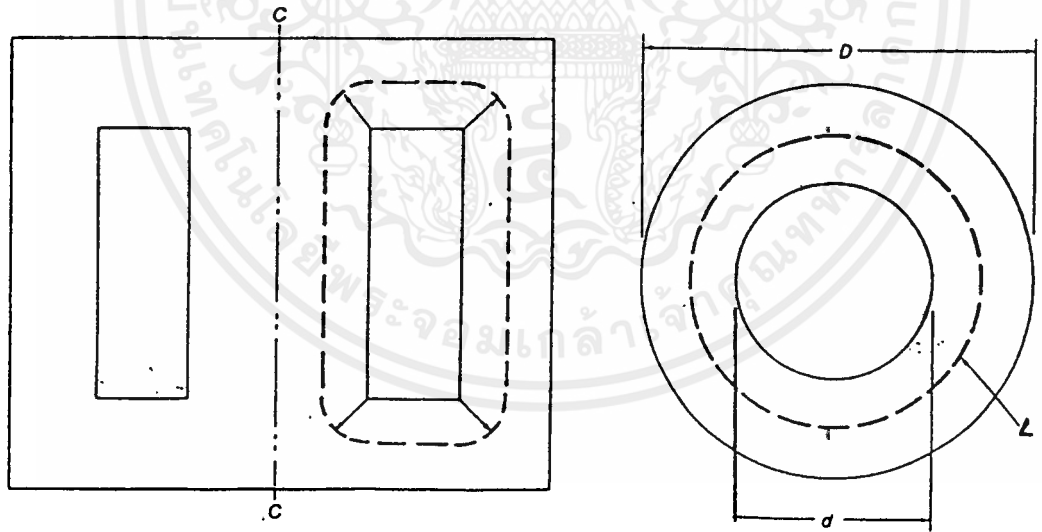
ในรูปที่ 2.11ง แกนเหล็กหม้อแปลงจะเป็นลักษณะของ toroid ซึ่งมี diameter เป็น $(D + d) / 2$ ดังนั้น mean magnetic path length จะหาได้จากสมการ

$$L = \pi (D + d) / 2 \quad \text{mm} \quad [2.35]$$



(ก) Of shell type core

(ข) Of cut type core



(ค) With rounded corners.

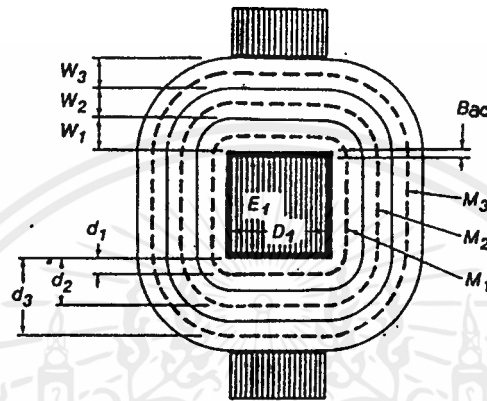
(ง) In a toroid $L = \pi (D + d) / 2$

รูปที่ 2.11 แสดง mean magnetic path length (L) ของแกนเหล็ก

ในการคำนวณหาหน้าหนักของลวดทองแดงเราต้องรู้ความยาวของลวดทองแดงที่ใช้ทั้งหมด
 แปลงก่อน ซึ่งสามารถหาความยาวของลวดทองแดงได้จากผลคูณของ mean length of turn (M)

กับจำนวนรอบของของขดลวด (N) ในรูปที่ 2.12 เป็นรูปที่ใช้ในการคำนวณหา mean length of

turn ของหม้อแปลงที่มีขดลวด 3 ขดลวด คือ ขดปฐมภูมิ 1 ขด มีความหนาของขดลวดเป็น W_1 และ ขดทุติยภูมิ 2 ขด มีความหนาของขดลวดเป็น W_2, W_3 ตามลำดับ mean length of turn ของขดปฐมภูมิ และ ขดทุติยภูมิ เป็น M_1, M_2 และ M_3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 แสดง mean length of turn (M)

จากโครงสร้างของหม้อแปลงในรูปที่ 2.12 เราพบว่า M_1 มีค่าเท่ากับผลรวมของด้านต่างๆ ของ Bobbin ($2 \times (E_1 + 2 \times Bac) + 2 \times (D_1 + 2 \times Bac)$) บวกกับส่วนวงกลมรัศมี $W_1/2$ (วงกลมนี้จะเกิดขึ้นจากมุมทั้งสี่ด้านของหม้อแปลง) ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการของ M_1, M_2 และ M_3 ได้ดังนี้

$$M_1 = 2 \times (E_1 + D_1 + 4 \times Bac) + 2\pi \left(\frac{W_1}{2} \right) \quad \text{mm} \quad [2.36]$$

$$M_2 = 2 \times (E_1 + D_1 + 4 \times Bac) + 2\pi \left(W_1 + \frac{W_2}{2} \right) \quad \text{mm} \quad [2.37]$$

$$M_3 = 2 \times (E_1 + D_1 + 4 \times Bac) + 2\pi \left(W_1 + W_2 + \frac{W_3}{2} \right) \quad \text{mm} \quad [2.38]$$

โดยที่ E_1 คือ หมายเลข 1 ในรูปที่ 2.9

D_1 คือ หมายเลข 7 ในรูปที่ 2.9

Bac คือ ความหนาของแผ่น Bakelite มีหน่วยเป็น mm

ดังนั้นความยาวของลวดทองแดง ของขดลวดแต่ละขดหาได้ดังนี้

$$L_{e1} = M_1 \times N_1 \times 10^{-3} \quad \text{m} \quad [2.39]$$

$$L_{e2} = M_2 \times N_2 \times 10^{-3} \quad \text{m} \quad [2.40]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_c = M_3 \times N_3 \times 10^{-3} \quad \text{m} \quad [2.41]$$

เมื่อเราทราบความยาวของขดลวดทองแดงแต่ละขดแล้วเราก็สามารถที่จะคำนวณหา น้ำหนักของลวดทองแดงได้โดย

$$m_c = D_c \times A_c \times L_c \times 10^{-6} \quad \text{kg} \quad [2.42]$$

โดยที่ D_c คือ ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของทองแดง = 8892.385 kg/m³

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง มีหน่วยเป็น mm²

L_c คือ ความยาวของลวดทองแดง มีหน่วยเป็น m

เมื่อเราคำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็กและน้ำหนักของลวดแดงที่ใช้ได้แล้ว เราก็สามารถที่จะคำนวณหาราคาของแกนเหล็ก และราคาของลวดทองแดงได้ โดยใช้สมการ

$$\text{COST}_{Ca} = m_c \times \text{ราคาของลวดทองแดงต่อ 1 kilogram} \quad \text{Baht} \quad [2.43]$$

$$\text{COST}_{Fe} = W_f \times \text{ราคาของแกนเหล็กต่อ 1 kilogram} \quad \text{Baht} \quad [2.44]$$

โดยที่ COST_{Ca} คือ ราคาของลวดทองแดงทั้งหมด มีหน่วยเป็น Baht

COST_{Fe} คือ ราคาของแกนเหล็กทั้งหมด มีหน่วยเป็น Baht

m_c คือ น้ำหนักของลวดทองแดงที่ใช้ มีหน่วยเป็น kilograms

W_f คือ น้ำหนักของแกนเหล็กทั้งหมดที่ใช้ มีหน่วยเป็น kilograms

- หมายเหตุ**
1. ราคาของแกนเหล็กที่ขายอยู่ในปัจจุบันคือ 40 ถึง 43 Baht / kilogram (ราคานี้ยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%)
 2. ราคาของลวดทองแดงจะขึ้นอยู่กับเกรดของลวด ซึ่งลวดทองแดงที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดจะมีอยู่ 3 เกรด คือ เกรดธรรมดา, เกรดพิเศษ และ เกรดลวดเซอร์มัน ซึ่งลวดเกรดธรรมดามีราคาประมาณ 170 Baht / kilogram, ลวดเกรดพิเศษจะมีราคาประมาณ 190 Baht / kilogram และลวดเกรดเซอร์มันจะมีราคาประมาณ 300 Baht / kilogram (ราคานี้ยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%)

2.9 การคำนวณหาจอร์สมูลของหม้อแปลงที่สร้าง

2.9.1 การคำนวณหาความต้านทานของขดลวด

การคำนวณหาความต้านทานของขดลวดของหม้อแปลงสามารถหาโดยสมการ

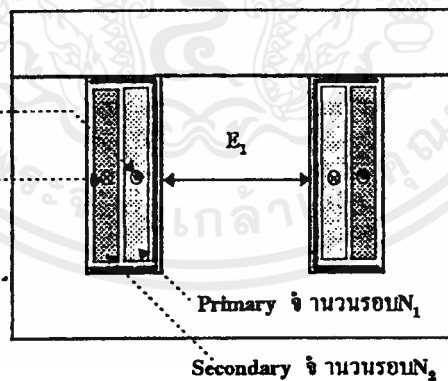
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - 20)) \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad [2.45]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{\rho L_c}{A_c} \quad \Omega \quad [2.46]$$

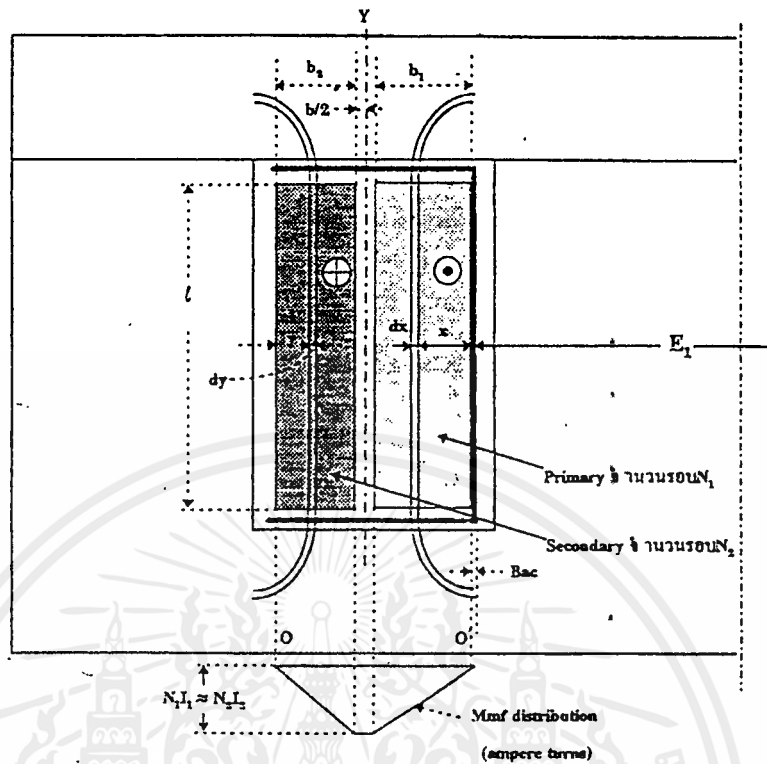
- โดยที่ ρ_0 คือ ความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิ $20^\circ\text{C} = 0.01786 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$
 ρ คือ ความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิใด ๆ มีหน่วยเป็น $\frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$
 α คือ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ = 0.00392 มีหน่วยเป็น $1 / \text{degree Celsius}$
 T คือ อุณหภูมิขณะใช้งาน มีหน่วยเป็น degree Celsius
 R คือ ความต้านทานของขดลวดในด้านที่เราสนใจ มีหน่วยเป็น Ω
 L_c คือ ความยาวของลวดทองแดงของด้านที่เราสนใจ มีหน่วยเป็น m
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงของด้านที่เราสนใจ มีหน่วยเป็น mm^2

2.9.2 การคำนวณหา Leakage Reactance ของหม้อแปลง^[2]



รูปที่ 2.13ก แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแบบ Shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13ข แสดงทางเดินในอุดมคติของ leakage flux ของหม้อแปลงแบบ Shell

พิจารณาโครงสร้างของหม้อแปลงแบบ Shell ที่เราจะสร้าง ในรูปที่ 2.13ก เราจะทำการพันขดปฐมภูมิที่มีจำนวนรอบเท่ากับ N_1 ไว้ข้างใน และ พันขดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบเท่ากับ N_2 ไว้ข้างนอกกระแสที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิ I_1 มีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสที่ไหลในทุติยภูมิ I_2 ถ้าเราไม่คิดกระแสส่วนที่กระตุ้น เราจะได้ว่า $N_1 I_1 \approx N_2 I_2$ ในรูปที่ 2.13ข จะแสดงถึงการกระจายของ Mmf (แสดงโดย Ampere-turns) ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิด leakage flux จะพบว่า Mmf มีค่าสูงสุดที่ $N_1 I_1 = N_2 I_2$ ณ จำนวนช่องว่าง b และจะลดจนเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสองข้างอย่างเป็นเชิงเส้น

ในการคำนวณ leakage reactance เราสามารถคำนวณได้ 2 วิธี คือ 1. leakage reactance by method of linkage และ 2. leakage reactance by method of energy storage สำหรับปริญญา นิพนธ์เล่มนี้จะทำการหา leakage reactance โดยวิธีการที่ 1. คือ leakage reactance by method of linkage พิจารณารูปที่ 2.13ข อีกครั้ง จากการใช้ $N_1 I_1 = N_2 I_2$ แสดงถึงรอบของขดทุติยภูมิ N_2 อาจเปลี่ยนไปเป็น N_1 ถ้ากระแสของขดทุติยภูมิ I_2 ในขณะนั้นเปลี่ยนไปเป็น I_1 ดังนั้นเราจะทำการหา leakage reactance โดยคิดเทียบทางปฐมภูมิ (refer to primary) ได้ดังนี้

จาก flux ที่อยู่ในท่อที่กว้าง dx มีค่าเท่ากับผลหารที่ประกอบด้วยส่วนหนึ่งของ Mmf ของ $\left(\frac{x}{b_1}\right) N_1$ หารด้วย reluctance ของท่อ ซึ่งเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\text{Length of path}}{\text{Permeability} \times \text{Section of path}} = \frac{k\ell}{\mu_0(2E'_1+2D'_1+8x)dx}$$

เมื่อ k เป็น factor ตัวหนึ่งที่มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งจะทำให้เกิดระยะทางเดิน ℓ ที่แท้จริง และมี $(2E'_1+2D'_1+8x)dx$ เป็นพารามิเตอร์ของภาคตัดของทางเดิน ดังนั้น element flux per ampere จะเท่ากับ

$$\frac{d\phi}{I} = \frac{xN_1}{b_1} \times \frac{\mu_0(2E'_1+2D'_1+8x)dx}{k\ell}$$

เพราะฉะนั้น flux linking per ampere ทั้งหมดสามารถหาได้โดยทำการ integration ดังนี้

$$\begin{aligned} \lambda'_{\text{Pri}} &= \int_0^{b_1} \frac{x}{b_1} N_1 \frac{d\phi}{I} = \int_0^{b_1} \left(\frac{N_1}{b_1} \right)^2 \times \frac{\mu_0 x^2 (2E'_1+2D'_1+8x) dx}{k\ell} \\ &= \left(\frac{N_1}{b_1} \right)^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \left[\frac{2x^3}{3} E'_1 + \frac{2x^3}{3} D'_1 + \frac{8x^4}{4} \right]_0^{b_1} \\ &= \left(\frac{N_1}{b_1} \right)^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \left[\frac{2b_1^3}{3} E'_1 + \frac{2b_1^3}{3} D'_1 + 2b_1^4 \right] \\ &= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \left[\frac{2b_1}{3} E'_1 + \frac{2b_1}{3} D'_1 + 2b_1^2 \right] \\ \lambda''_{\text{Pri}} &= \int_{b_1}^{b_1+\frac{1}{2}b} \mu_0 N_1^2 \left[\frac{2E'_1+2D'_1+8x}{k\ell} \right] dx \\ &= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \left[2E'_1+2D'_1+4x^2 \right]_{b_1}^{b_1+\frac{1}{2}b} \\ &= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \left[2E'_1 \left(\frac{1}{2}b \right) + 2D'_1 \left(\frac{1}{2}b \right) + 4 \left(\frac{1}{2} \right)^2 \right] \\ &= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} (bE'_1+bD'_1+b^2) \\ \lambda'_{\text{Sec}} &= \int_0^{b_2} \left(\frac{N_1}{b_2} \right)^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \times y^2 [2E'_1+2D'_1+8b_2+8b+8b_1-8y] dy \\ &= \left(\frac{N_1}{b_2} \right)^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \times \left[\frac{2}{3} E'_1 y^3 + \frac{2}{3} D'_1 y^3 + \frac{8}{3} b_2 y^3 + \frac{8}{3} b y^3 + \frac{8}{3} b_1 y^3 - 2y^4 \right]_0^{b_2} \\ &= \left(\frac{N_1}{b_2} \right)^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \times \left[\frac{2}{3} E'_1 b_2^3 + \frac{2}{3} D'_1 b_2^3 + \frac{8}{3} b_2^3 \times (b_2+b+b_1) - 2b_2^4 \right] \\ &= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \times \left[\frac{2}{3} E'_1 b_2 + \frac{2}{3} D'_1 b_2 + \frac{8}{3} b_2 \times (b_2+b+b_1) - 2b_2^2 \right] \\ \lambda''_{\text{Sec}} &= \int_{b_2}^{b_2+\frac{1}{2}b} N_1^2 \times \frac{\mu_0}{k\ell} \times y^2 [2E'_1+2D'_1+8b_2+8b+8b_1-8y] dy \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \times \left[2E'_1 y + 2D'_1 y + 8b_2 y + 8by + 8b_1 y - 4y^2 \right]_0^{b_2 + \frac{1}{2}b} \\
&= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \times \left[2E'_1 \left(\frac{1}{2}b\right) + 2D'_1 \left(\frac{1}{2}b\right) + 8\left(\frac{1}{2}b\right)(b_2 + b + b_1) - 4\left(\frac{1}{2}b\right)^2 \right] \\
&= N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \times \left[bE'_1 + bD'_1 + 4b(b_2 + b + b_1) - b^2 \right] \\
\therefore X_1 + X'_2 &= 2\pi f \times \left[\lambda'_{Pri} + \lambda''_{Pri} + \lambda'_{Sec} + \lambda''_{Sec} \right] \\
&= 2\pi f \times \left[N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \left[\frac{2b_1}{3} E'_1 + \frac{2b_1}{3} D'_1 + 2b_1^2 \right] + N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \left[bE'_1 + bD'_1 + b^2 \right] \right. \\
&\quad \left. + N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \times \left[\frac{2}{3} E'_1 b_2 + \frac{2}{3} D'_1 b_2 + \frac{8}{3} b_2 \times (b_2 + b + b_1) - 2b_1^2 \right] \right. \\
&\quad \left. + N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \times \left[bE'_1 + bD'_1 + 4b(b_2 + b + b_1) - b_1^2 \right] \right] \\
&= 2\pi f \times N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \times \left[\frac{2}{3} E'_1 (b_1 + b_2) + \frac{2}{3} D'_1 (b_1 + b_2) + 2b_1^2 + 2b(E'_1 + D'_1) + 4(b_2 + b + b_1) \left(\frac{2b_2}{3} + b\right) - 2b_1^2 \right] \\
&= 2\pi f \times N_1^2 \times \frac{\mu_0}{kl} \times \left[\frac{2}{3} (b_1 + b_2)(E'_1 + D'_1) + 2b(E'_1 + D'_1) + 4(b_2 + b + b_1) \left(\frac{2b_2}{3} + b\right) + 2(b_1^2 - b_2^2) \right] \\
\text{เมื่อ } \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \\
\therefore X_1 + X'_2 &= \frac{8\pi^2 f \times N_1^2}{kl \times 10^7} \times \left[\frac{2}{3} (b_1 + b_2)(E'_1 + D'_1) + 2(E'_1 + D'_1) + 4(b_2 + b + b_1) \left(\frac{2b_2}{3} + b\right) \right. \\
&\quad \left. + 2(b_1^2 - b_2^2) \right] \quad \Omega \quad [2.47]
\end{aligned}$$

โดยที่ k = factor ที่มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งทำให้เกิดระยะทางเดิน ℓ ที่แท้จริง

ℓ = ระยะ G ที่เหลือสำหรับพันลวด มีหน่วยเป็น m

D_3 = ความหนาของกระดาษฉนวนที่ cover ขดลวดปฐมภูมิ มีหน่วยเป็น m

D_4 = ความหนาของกระดาษฉนวนที่ cover ขดลวดทุติยภูมิ มีหน่วยเป็น m

W_1 = ความหนาของขดลวดปฐมภูมিরวมกับฉนวนที่ใช้ มีหน่วยเป็น m

W_2 = ความหนาของขดลวดทุติยภูมিরวมกับฉนวนที่ใช้ มีหน่วยเป็น m

b = $D_3 + 30\%$ ของ D_3 เนื่องจากความโค้ง มีหน่วยเป็น m

b_1 = $W_1 - b$ มีหน่วยเป็น m

b_2 = $W_2 - D_4 - 30\%$ ของ D_4 เนื่องจากความโค้ง มีหน่วยเป็น m

E'_1 = หมายเลข 1 ในรูปที่ 1.9 + 2 \times Bac มีหน่วยเป็น m

D'_1 = หมายเลข 7 ในรูปที่ 1.9 + 2 \times Bac มีหน่วยเป็น m

เมื่อเรากำหนดหา $X_1 + X'_2$ โดยใช้สมการ 2.47 แล้ว เราก็จะทำการหาค่าของ leakage reactance ของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจาก

$$X_1 = \text{Leakage Reactance ของขดลวดปฐมภูมิ} = \frac{X_1 + X'_2}{2} \quad \Omega \quad [2.48]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_2 = \text{Leakage Reactance ของขดลวดทุติยภูมิ} = \left(\frac{X_1 + X_2'}{2} \right) \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad \Omega \quad [2.49]$$

2.9.3. การคำนวณหา R_c และ X_m ของหม้อแปลง [3]

การคำนวณหา R_c และ X_m เราสามารถหาได้โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากแกนเหล็ก และค่า B_m ที่เราใช้ในการออกแบบ ค่าที่ได้มาจากแกนเหล็กก็คือ กราฟความสัมพันธ์ของ B_m กับ Watt loss per - kilograms และ กราฟความสัมพันธ์ของ B_m กับ VA loss per - kilograms ของแกนเหล็กเบอร์ที่เราเลือกใช้ในการออกแบบ ซึ่งในการคำนวณเราจะเริ่มจากการอ่านค่าของ Watt loss per - kilograms และ VA loss per - kilograms ณ จุด B_m ที่เราใช้ในการออกแบบ ดังนั้น Core loss (P_c) และ Exciting apparent power (P_a) ที่ได้คือ

$$P_c = \text{Watt loss per kilograms ที่อ่านได้จากกราฟ} \times W_t \quad \text{Watt} \quad [2.50]$$

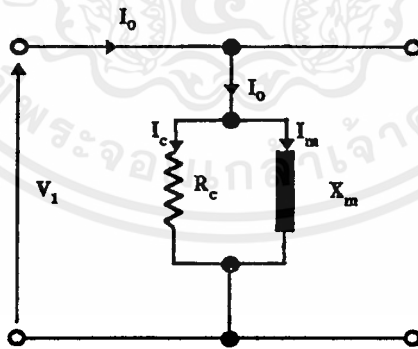
$$P_a = \text{VA loss per - kilograms ที่อ่านได้จากกราฟ} \times W_t \quad \text{VA} \quad [2.51]$$

โดยที่ P_c = คือ Core loss ของแกนเหล็กมีหน่วยเป็น Watt

P_a = คือ Exciting apparent power ของแกนเหล็ก มีหน่วยเป็น VA

W_t = คือ น้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้ มีหน่วยเป็น kg

จากนั้นเราจะใช้ความสัมพันธ์ที่ได้ทำการคำนวณหา R_c และ X_m ของวงจรสมมูล



จาก $P_c = V_1 \times I_o \times \text{Cos}\theta$

$$P_a = V_1 \times I_o$$

ดังนั้น $\text{Cos}\theta = \frac{P_c}{P_a} \quad [2.52]$

$$I_o = \frac{P_a}{V_1} \quad \text{A} \quad [2.53]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_c = I_o \times \cos\theta \quad \text{A} \quad [2.54]$$

$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_c^2} \quad \text{A} \quad [2.55]$$

$$\therefore R_c = \frac{V_1}{I_c} \quad \Omega \quad [2.56]$$

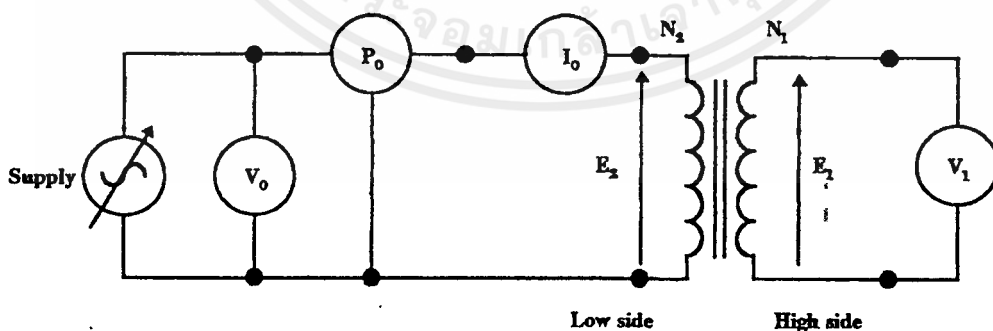
$$\therefore X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad \Omega \quad [2.57]$$

2.10 การทดสอบหม้อแปลง

เมื่อเราทำการสร้างหม้อแปลงตามที่ได้ออกแบบเรียบร้อยแล้ว เราจะนำหม้อแปลงที่สร้างนั้น มาทดสอบว่าค่ากำลังการสูญเสีย และค่าต่างๆในวงจรสมมูลของหม้อแปลง เช่น ค่า R_c , X_m , R_e และ X_e เป็นไปตามค่าที่ได้คำนวณไว้ก่อนการออกแบบหรือไม่ ซึ่งวิธีการทดสอบเพื่อจะให้ค่าที่กล่าวมานี้คือ การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open circuit test) และ การทดสอบแบบลัดวงจร (short circuit test)

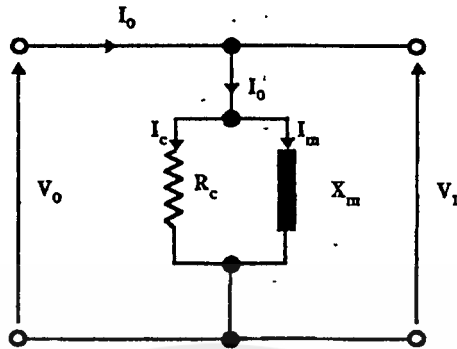
2.10.1 การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open circuit test)^{[4][5]}

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้ก็เพื่อหาส่วนสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและกระแสในขณะที่ไม่ต้องจ่ายภาระ ซึ่งช่วยทำให้หา R_c และ X_m ได้ โดยปกติการทดสอบแบบนี้จะเปิดวงจรที่แรงดันสูงของหม้อแปลง (H.V) แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางแรงดันต่ำ (L.V) เพื่อที่จะไม่ต้องใช้แรงดันสูงมากซึ่ง ในบางครั้งแรงดันไฟฟ้าที่สูงอาจจะหาได้ยากในห้องทดสอบ และกระแส Exciting จะมีค่าน้อยมากจนแทบวัดไม่ได้ อย่างไรก็ตามในการทดสอบนี้อาจวัดหรือเปิดวงจรทางด้านใดด้านหนึ่งก็ได้



รูปที่ 2.14 หม้อแปลงขณะทำการทดสอบแบบเปิดวงจรทางด้านแรงสูง และวัดค่าต่างๆทางด้านแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงขณะทำการทดสอบ โดยเปิดวงจรทางด้านแรงสูง

การวัดให้ต่อวงจรตามรูปที่ 2.14 จากนั้นทำการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ จาก 0 จนถึงค่าแรงดันพิกัดของหม้อแปลงเป็นขั้นๆ ที่แต่ละขั้นบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า P_o แรงดันไฟฟ้า V_o กระแสไฟฟ้า I_o และแรงดันด้านแรงสูง V_1 ไว้ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ก็คือ Core losses รวมกับ Copper losses ในขดแรงต่ำ ($I_o^2 \times R_{low}$) และ ความสูญเสียในฉนวนของหม้อแปลง แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 2 ค่าหลังนั้นมีค่าน้อยมาก เราจึงละทิ้งไปได้

ดังนั้น ค่า P_o ที่วัดได้ก็คือ ค่า Core losses นั้นเอง เมื่อได้ค่า Core losses แล้วเราก็จะไปหา ค่า R_c และ X_m ของวงจรสมมูลได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.15

$$\text{Turn ratio } a = \frac{V_1}{V_o}$$

$$I_c = \frac{P_o}{V_o} \quad [2.58]$$

$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_c^2} \quad [2.59]$$

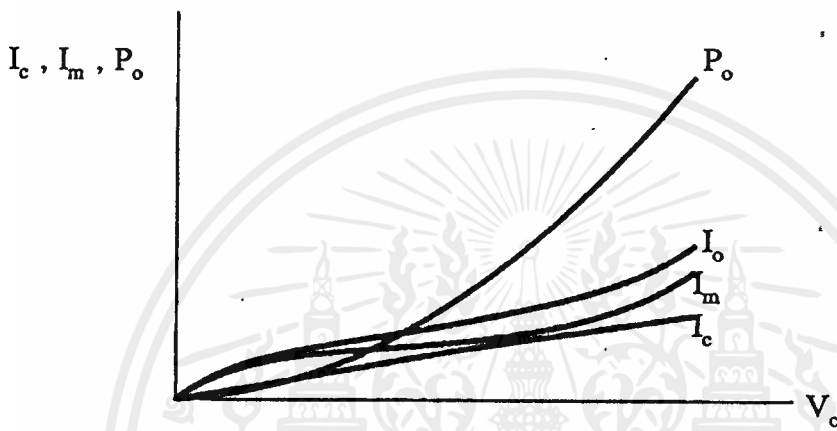
$$R_c = \frac{V_o}{I_c} \quad [2.60]$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_m} \quad [2.61]$$

หมายเหตุ ค่า R_c และ X_m ที่ได้นี้ เป็นค่าเทียบทางแรงดันต่ำของหม้อแปลง เราต้องเอา a^2 คูณเพื่อย้ายข้างไปทางด้านแรงสูง

ถ้าเรานำเอา P_o ที่บันทึกไว้มาเขียนกราฟเทียบกับ V_o ตามรูปที่ 2.16 จะได้ความสัมพันธ์ของ Core losses กับ แรงดัน จากกราฟซึ่งเป็นรูปพาราโบลาบอกได้ว่า $P_o \propto V_o^2$ และเนื่องจาก $V_o \propto B$

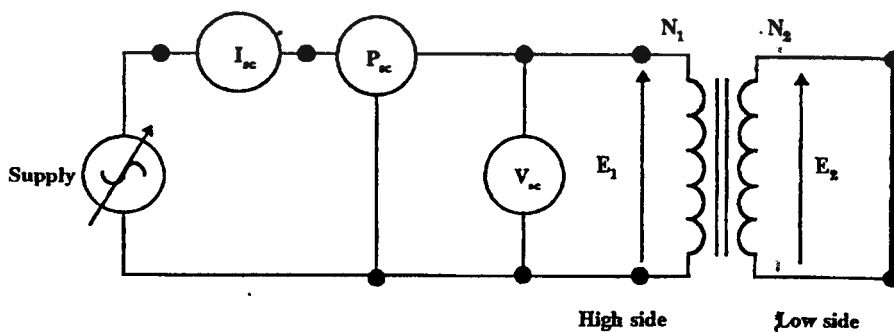
ดังนั้น $P_o \propto B^2$ ด้วย และถ้าเรากำหนด I_c, I_m ที่แต่ละชั้นตามสมการ 2.58, 2.59 แล้วเขียนกราฟเทียบกับ V_o ก็จะได้ตามที่เห็นในรูปที่ 2.26 เช่นกัน เราจะพบว่า $I_c = \frac{P_o}{V_o}$ ดังนั้น $I_c \propto V$ โดยประมาณ ซึ่งจากกราฟก็เป็นจริงดังกล่าว สำหรับ I_m นั้น ช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นเร็ว ต่อมาจะมีการเพิ่มไม่เร็วมากนัก และเมื่อแรงดันเกินพิกัดแล้ว I_m จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกเนื่องจากแกนเหล็กอิ่มตัวนั่นเอง



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Core loss P_o, I_c, I_m และ I_o กับ V_o

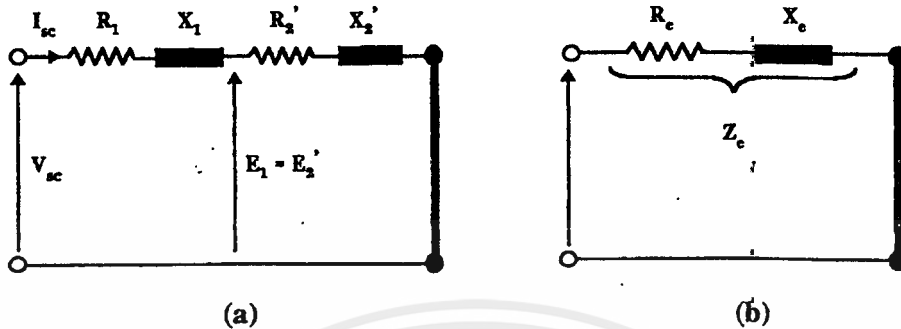
2.10.2 การทดสอบแบบลัดวงจร (Short circuit test) ^{[5][6]}

ในการทดสอบแบบลัดวงจร โดยทั่วไปแล้ว เราจะทำการลัดวงจรของหม้อแปลงทางด้านแรงต่ำ แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางด้านแรงสูง ซึ่งที่ทำเช่นนี้เพราะว่าถ้าเราลัดวงจรทางด้านแรงสูงแล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางขดแรงต่ำ เราจะต้องใช้กระแสสูงมาก และ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ก็จะมีค่าต่ำมากจนไม่สะดวกในการวัด วงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามรูปที่ 1.17



รูปที่ 2.17 แสดงการต่อวงจรของหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบแบบลัดวงจรทางด้านแรงต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลโดยประมาณของหม้อแปลงที่เทียบกับด้านแรงสูง เมื่อลัดวงจรแรงต่ำ เมื่อต่อวงจรตามรูปแล้วทำการเพิ่มแรงดันที่ป้อนเข้าไปเริ่มตั้งแต่ 0 จนกระทั่งถึงกระแสที่กักในขดลวดแรงสูงเป็นขั้นๆ แต่ระดับบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า I_{sc} ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{sc} และค่ากำลังไฟฟ้า P_{sc} ไว้ เนื่องจากเราลัดวงจรเอาไว้จึงไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปจากหม้อแปลง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาทั้งหมดก็กลายเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในหม้อแปลงซึ่งก็คือ Copper losses ในขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ รวมกับ Core losses แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เราป้อนไปนี้มีค่าน้อยมาก ค่า Core losses จึงมีค่าน้อยมากด้วย (Core losses $\propto V^2$) ดังนั้นเราจึงตัด Core losses ทิ้งไปได้ก็จะได้ว่า

$$P_{sc} = \text{Copper losses} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_{sc}^2 R_c$$

$$R_c = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad [2.62]$$

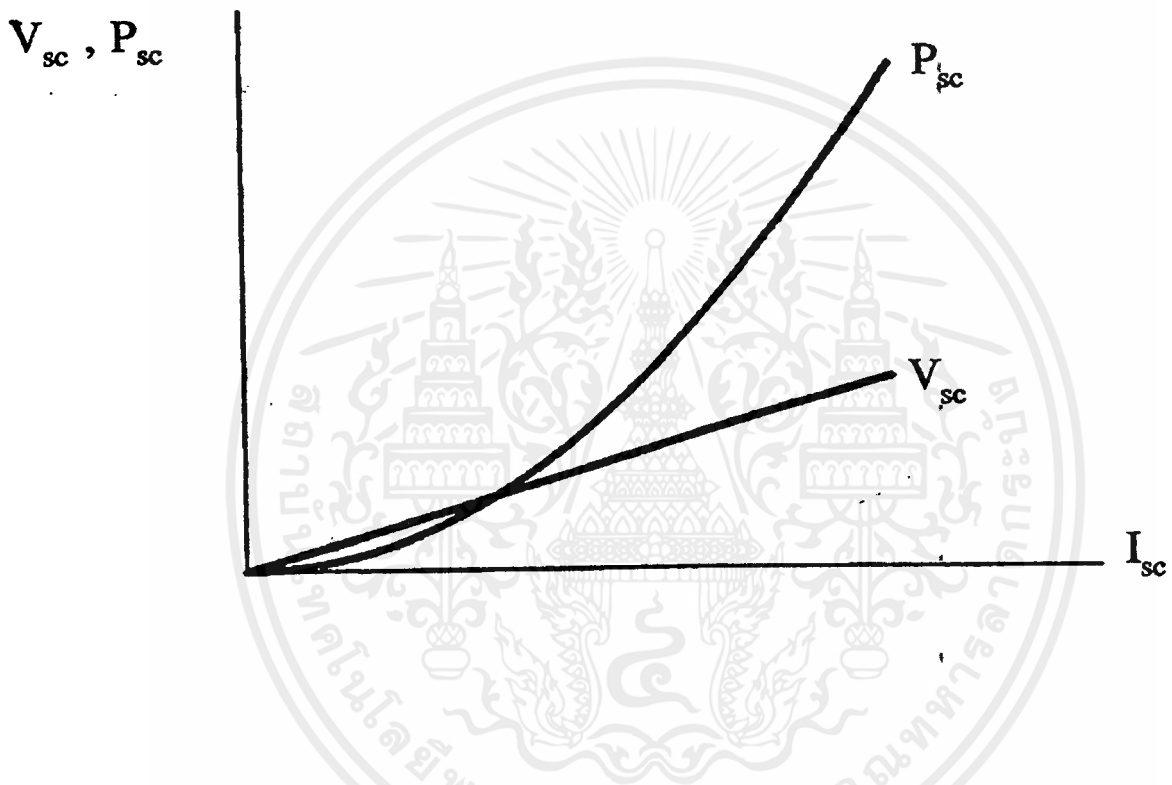
$$Z_c = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}$$

$$X_c = \sqrt{Z_c^2 - R_c^2} \quad [2.63]$$

จะเห็นว่าเราวัดค่าออกมาเป็นค่า R_c และ X_c เทียบกับด้านแรงสูงของหม้อแปลง ไม่ได้แยกเป็นค่า R_1, R_2 และ X_1, X_2 ถ้าเราจะย้ายข้าง R_c กับ X_c มาเทียบกับด้านแรงต่ำ เราก็เอา a^2 ไปหารเท่านั้นเอง ถ้าเราต้องการแยก R_c ออกมาเป็น R_1 กับ R_2 เราก็ทำได้โดยเราวัดค่า R_1 ที่ขดแรงสูงก่อน แล้วหา $R_2' = R_c - R_1$ สำหรับค่า X_1 และ X_2' นั้น เราก็จะถือว่ามันมีค่าเท่ากันทั้งสองขด ดังนั้นจะได้

$$X_1 = X_2' = \frac{X_c}{2}$$

สำหรับกราฟของ V_{sc}, P_{sc} เทียบกับ I_{sc} จะเป็นไปตามรูปที่ 1.19 ซึ่งจะเห็นว่า $P_{sc} \propto I^2$ และ $V_{sc} \propto I$



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Copper losses, แรงดัน กับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีการต่อหม้อแปลงแบบ Open-delta และ Scott, T-T

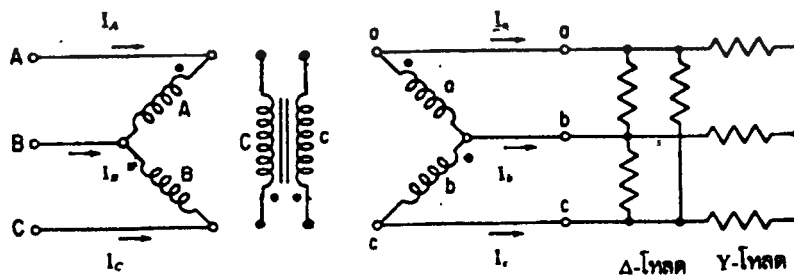
3.1 การต่อแบบ Open - delta หรือ V^{[4][5],[10],[12]}

การต่อแบบวิกี้คือแบบ Delta - Delta ที่หม้อแปลงหนึ่งตัวถูกนำออกไป หรือบกร่องก็จะกลายเป็นแบบวี โดยที่หม้อแปลง 2 ตัวที่เหลือยังสามารถจ่ายโหลดได้ทั้ง 3 เฟส การต่อแบบวีไม่เพียงแต่ในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น ยังสามารถติดตั้งในพื้นที่ ที่คาดว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของโหลด กล่าวคือ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นถึงจุดๆหนึ่ง เราก็จะเพิ่มหม้อแปลงอีก 1 ตัวให้เป็นแบบเดลต้า-เดลต้า เพื่อรับโหลดได้มากขึ้น ถึงแม้ว่าแรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งจะหายไปดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะทำให้แรงดันไม่สมมาตร แต่แรงดันสาย (V_{L-L}) ทางทุติยภูมิค่อนข้างจะสมดุลย์ ถ้าทางปฐมภูมิได้รับแรงดันที่สมดุลย์ทั้งสามเฟส เนื่องจากการเกิดจากผลรวมของเวกเตอร์ของแรงดันสายทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันทางทุติยภูมิ เมื่อไว้ภาระจะค่อนข้างเป็นเชิงเส้นและอินเฟสกับแรงดันทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งจะทำกับ

$$V_{\text{sec}} = \frac{\text{Primary voltage}}{a}$$

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการต่อที่ไม่สมมาตร กับทั้งสามของความต้านทานสมมูลของไฟฟ้ากระแสกลับ แรงดันตกคร่อมในหม้อแปลง จะทำให้เกิด Slight unbalanced ในแรงดันทุติยภูมิ เนื่องจากแบบวีใช้หม้อแปลงเพียง 2 ตัวจะได้

$$\text{Utilization factor} = \frac{\sqrt{3} V_2 I_2}{2 V_2 I_2} = 0.866 \quad [3.1]$$



รูปที่ 3.1 การต่อแบบโอเพ่นเดลต้า หรือ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อแบบวี เมื่อ full - load ขณะจ่ายโหลด สามเฟสสมมาตรจะจ่ายได้แค่ 86.6% ของผลรวม kVA ของหม้อแปลงที่ติดตั้ง จึงจำเป็นที่จะต้องติดตั้งหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่าในแบบวี ก็คือแบบวีจะมีพิกัด kVA มากกว่าแบบเดลต้า - เดลต้า ในขณะที่จ่ายโหลดสามเฟสเท่ากัน ดังนั้นการต่อหม้อแปลงสองตัว เป็นแบบโอเพ่นเดลต้าจะมีพิกัด kVA ดังนี้ คือ $V_{ab} = V\angle 0^\circ$ และ $V_{bc} = V\angle -120^\circ$ จะได้

$$\begin{aligned} V_{ca} &= -V_{ab} - V_{bc} \\ &= -V\angle 0^\circ - V\angle -120^\circ \\ &= -0.5V + j0.866V \\ &= V\angle 120^\circ \\ \therefore &= \frac{V_\phi I_\phi \cos(150^\circ - 120^\circ) + V_\phi I_\phi \cos(30^\circ - 60^\circ)}{3V_\phi I_\phi \cos 0^\circ} \\ kVA_{3\phi} &= \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \quad [3.2] \end{aligned}$$

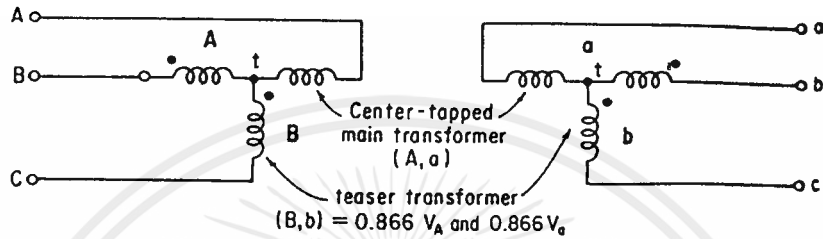
นั่นคือ กำลังไฟฟ้าจากหม้อแปลงระบบ V/V จ่ายแก่โหลดจะเป็นเพียง 57.7 % ของระบบ Δ/Δ หรืออีกความหมายหนึ่ง ถ้ามีหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ V/V จ่ายกำลังไฟฟ้าแก่โหลดที่ค่าพิกัดหนึ่ง หากมีหม้อแปลงอีกชุดหนึ่งมาเพิ่มเข้ากับระบบ V/V (ทำให้เปลี่ยนเป็นระบบ Δ/Δ) จะทำให้พิกัดของระบบเพิ่มขึ้น 173.2 % (หรือเป็น $\sqrt{3}$ เท่า) ซึ่งการทำเช่นนี้ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 50 % แต่ทำให้พิกัดของระบบเพิ่มขึ้น 73.2 % ด้วยเหตุนี้ในบริเวณที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าไม่มาก และอัตราความต้องการเพิ่มขึ้นช้าจึงมีการใช้ระบบ V/V ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นระบบ Δ/Δ ได้ในภายหลังเมื่อความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

3.2 การต่อหม้อแปลงแบบ T-T connection ^{[2][6]}

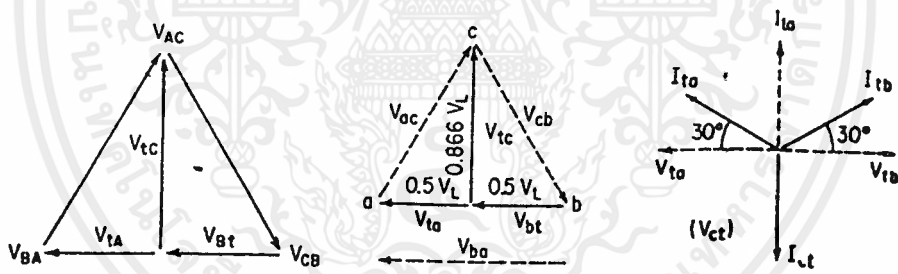
ในการต่อหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส เพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เราสามารถต่อได้หลายวิธี คือ การต่อแบบ Star (Y connection) การต่อแบบ Delta (Δ connection) การต่อหม้อแปลงแบบ Open - delta (V-V connection) การต่อหม้อแปลงแบบ T (T-T connection) เป็นต้นซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการต่อหม้อแปลงแบบ T-T connection เท่านั้น

การต่อหม้อแปลงแบบ T-T connection จะใช้หม้อแปลง 1 เฟส เพียง 2 ตัวเท่านั้น แต่หม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัวนี้จะมี Specification ที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ไม่เหมือนการต่อหม้อแปลงแบบ V-V connection ซึ่งจะใช้หม้อแปลงที่ Specification เหมือนกันทั้ง 2 ตัว หม้อแปลงที่ใช้ในการต่อแบบ T-T connection จะมีชื่อว่า Teaser และ Main ซึ่งหม้อแปลง Teaser (B,b ในรูปที่ 3.2 ก) จะมีพิกัดแรงดันทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ (Rated primary and secondary voltage) เป็น 0.866

หรือ 86.6% ของหม้อแปลง Main (A,a ในรูปที่ 3.2ก) หม้อแปลง Main จะถูกออกแบบให้มี tap ตรงกลาง ทั้ง 2 ด้าน (ด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ) ซึ่งมีพิกัดแรงดันปฐมภูมิและพิกัดแรงดันทางด้านทุติยภูมิ เป็น 1 หรือ 100 % (เมื่อขดลวด Main ต่ออนุกรมกัน)



รูปที่ 3.2 ก T-T transformer connections



(ข) Applied 3 phase voltage (ค) induced secondary voltage (ง) secondary current

รูปที่ 3.2 การต่อหม้อแปลงแบบ T-T และความสัมพันธ์ทาง phasor

เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เข้าไปในด้านปฐมภูมิของ T connection คือ V_{AC} , V_{CB} และ V_{BA} เราสามารถแยกออกมาเป็น V_{Bt} , V_{tA} และ V_{tC} ดังรูปที่ 3.2 ข โดยที่ t เป็นจุดต่อระหว่างหม้อแปลง Teaser และ tap ตรงกลางของหม้อแปลง Main แรงดันทางด้านทุติยภูมิจะ in phase กับแรงดันที่ป้อนเข้าขดปฐมภูมิ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 ค จากรูปจะเห็นว่าแรงดัน line \vec{V}_{cb} จะเกิดจากผลรวมทาง phasor ของ \vec{V}_{tA} กับ \vec{V}_{tC} โดย $V_{tA} = 0.5V_L$ และ $V_{tC} = 0.866V_L$ เมื่อ V_L คือ แรงดัน line ทางด้านทุติยภูมิ, V_{tC} คือ แรงดัน rated ทางทุติยภูมิของหม้อแปลง Teaser ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{V}_{cb} = \vec{V}_{tb} + \vec{V}_{ct} \quad [3.3]$$

$$= 0.5V_L \angle 0^\circ + 0.866V_L \angle -90^\circ$$

$$= V_L \angle -60^\circ, \text{ แรงดัน line ทางด้านทุติยภูมิ}$$

$$\vec{V}_{ac} = \vec{V}_{at} + \vec{V}_{tc} \quad [3.4]$$

$$= 0.5V_L \angle 0^\circ + 0.866V_L \angle 90^\circ$$

$$= V_L \angle 60^\circ, \text{ แรงดัน line ทางด้านทุติยภูมิ}$$

$$\vec{V}_{ba} = \vec{V}_{bt} + \vec{V}_{ta} \quad [3.5]$$

$$= 0.5V_L \angle 180^\circ + 0.866V_L \angle 180^\circ$$

$$= V_L \angle 180^\circ, \text{ แรงดัน line ทางด้านทุติยภูมิ}$$

จะเห็นว่าขนาดของแรงดัน line ทางทุติยภูมิทั้ง 3 เฟส จะเท่ากัน คือ V_L และจะ in phase กับแรงดันทางด้านปฐมภูมิ ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันสำหรับหม้อแปลง Main และหม้อแปลง Teaser เมื่อนำหม้อแปลงที่ต่อแบบ T ในรูปที่ 3.2 ก มาทำการต่อโหลดแบบ Star ที่มี Impedance เท่ากับ Z ซึ่งถือว่าเป็น Pure Resistive Load จะแสดงในรูปที่ 3.2 ง ซึ่งขนาดของกระแสในแต่ละ line เมื่อเราถือว่า Impedance ของหม้อแปลงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ Z ของโหลด จะมีค่าเท่ากับ $\frac{V_L}{\sqrt{3}Z}$ ต่อไปเรามาวิเคราะห์ถึงกำลังไฟฟ้า (VA) ที่หม้อแปลงแต่ละตัวจ่ายได้ ซึ่งจะวิเคราะห์จากโหลดที่เป็น Pure Resistive Load นั้นหมายความว่า กำลังไฟฟ้าจริง (Effective power = P(watt)) มีค่าเท่ากับ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power = S(VA)) ซึ่งมี phasor ของกระแส และแรงดัน ดังรูปที่ 3.2 ง ดังนั้น

กำลังไฟฟ้า (VA) ของหม้อแปลง Main ที่จ่ายโหลด 3 เฟส คือ

$$\begin{aligned} VA_{\text{main}} &= P_{\text{main}} = V_{tb} I_{tb} \cos 30^\circ + V_{cb} I_{cb} \cos 30^\circ \\ &= 0.5V_L I_L \cos 30^\circ + 0.5V_L I_L \cos 30^\circ \\ &= V_L I_L \cos 30^\circ \quad (V_L \text{ และ } I_L \text{ เป็นแรงดัน line และกระแส line ด้านทุติยภูมิ}) \\ &= 0.866 V_L I_L \end{aligned} \quad [3.6]$$

กำลังไฟฟ้า (VA) ของหม้อแปลง Teaser ที่จ่ายโหลด 3 เฟส คือ

$$\begin{aligned} VA_{\text{teaser}} &= P_{\text{teaser}} = V_{ct} I_{ct} = (0.866 V_L) I_L \\ &= 0.866 V_L I_L \end{aligned} \quad [3.7]$$

ดังนั้นพิกัดกำลังไฟฟ้า (VA) 3 เฟส เมื่อต่อหม้อแปลงแบบ T ที่จ่ายโหลดได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 V_{T-T \text{ connection}} &= VA_{\text{main}} + VA_{\text{teaser}} \\
 &= V_L(0.866 I_L) + (0.866 V_L) I_L \\
 &= \sqrt{3} V_L I_L
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 3.6 และ 3.7 จะแสดงให้เห็นว่าการต่อหม้อแปลงแบบ T สามารถจ่ายโหลด 3 เฟส ได้เช่นเดียวกับในกรณีที่ใช้หม้อแปลง 2 ตัวต่อแบบ V-V โดยหม้อแปลงทั้งสอง (หม้อแปลง Main กับ Teaser) จะแบ่งกันจ่ายกำลังไฟฟ้า (VA) ให้แก่โหลด ตัวละครึ่งหนึ่ง แต่นั่นก็ไม่ได้หมายความว่าหม้อแปลง 3 เฟส ที่ออกแบบจะสามารถจ่ายโหลด เท่ากับผลรวมของพิกัดกำลังไฟฟ้า (VA) ของหม้อแปลงแต่ละตัว ซึ่งจะเห็นได้จากสมการที่ 3.6 เกิดจากหม้อแปลง Main ที่ออกแบบให้สามารถทนต่อแรงดัน (V_L) และกระแส (I_L) ได้ แต่กระแส line ที่ต้องการจ่ายกำลังไฟฟ้า (VA) ให้กับโหลดมีค่า 86.66 % ของ I_L เท่านั้น ดังนั้นพิกัดกำลังไฟฟ้า (VA) ของทั้งหม้อแปลง Main และ Teaser ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้คือ

$$\begin{aligned}
 V_{\text{main+teaser}} &= VA_{\text{main}} + VA_{\text{teaser}} \\
 &= V_L I_L + (0.866 V_L) I_L \\
 &= (1 + 0.866) V_L I_L \\
 &= 1.866 V_L I_L
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

แต่พิกัดกำลังไฟฟ้า (VA) ของหม้อแปลง 3 เฟสที่ต่อแบบ T-T connection คือ $\sqrt{3} V_L I_L$ ดังนั้นถ้าให้ค่า Utilization factor เท่ากับอัตราส่วนของพิกัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ที่การต่อหม้อแปลงแบบ T จ่ายได้ กับผลรวมของพิกัดกำลังไฟฟ้าที่หม้อแปลง Main และ Teaser จ่ายได้ เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\text{Utilization factor} = \frac{\sqrt{3} V_L I_L}{1.866 V_L I_L} = 0.928 \tag{3.10}$$

ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกให้เราเห็นว่า หม้อแปลง 3 เฟส ที่เกิดขึ้นจากการต่อแบบ T-T connection จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียง 92.8 % ของกำลังไฟฟ้ายรวมที่หม้อแปลง Main และ Teaser สามารถจ่ายได้ ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลง Main จึงต้องออกแบบให้สามารถทนต่อแรงดัน V_L และ I_L ได้ ซึ่งจากความสัมพันธ์ ต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น จะพบว่า การต่อหม้อแปลงแบบ T-T connection ไม่ได้มีข้อดีที่มากกว่า การต่อหม้อแปลงแบบ V-V เลย เพราะการต่อหม้อแปลงแบบ T-T จะต้องใช้หม้อแปลงพิเศษถึง 2 ตัว ทำให้สิ้นเปลืองเงินในการสร้างมากกว่า และ ไม่สามารถนำหม้อแปลงอีก 1 ตัวมาต่อเพิ่มเข้าไปให้เกิดเป็น $\Delta - \Delta$ ได้เหมือนกับแบบ V-V ได้เลย เพราะหม้อแปลง Teaser มีพิกัดแรงดันเพียง $0.866 V_L$ แต่อย่างไรก็ตาม หม้อแปลงที่นำมาต่อแบบ T-T connection ก็มีประโยชน์อยู่เหมือนกัน เมื่อเราต้องการสร้างไฟ 2 เฟส และ ไฟ 4 เฟส โดยการนำหม้อแปลง Main และ หม้อแปลง Teaser มาต่อแบบ Scott connection

เอเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการขนานหม้อแปลง หม้อแปลงแบบ T-T connection สามารถนำมาทำการขนานหม้อแปลงได้เหมือนกับแบบ V-V, Y-Y, Δ - Δ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงการนำหม้อแปลง T-T มาต่อขนานกับหม้อแปลงแบบ V-V, Y-Y, Δ - Δ แต่ไม่สามารถนำมาต่อขนานกับหม้อแปลงแบบ Y- Δ หรือแบบ Δ -Y ได้ เพราะต่าง phase กัน 30° ดังนั้นเราไม่สามารถสรุปได้ว่า หม้อแปลงที่อยู่ใน Column A สามารถนำมาต่อขนานกับหม้อแปลงที่อยู่ใน Column A และ หม้อแปลงที่อยู่ใน Column B ก็จะขนานกับหม้อแปลงที่อยู่ใน Column B

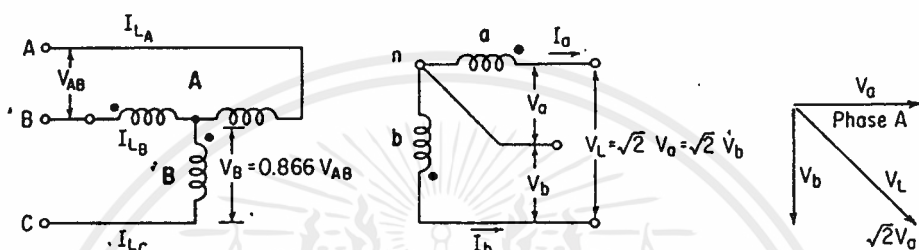
ตารางที่ 3.1 ชนิดของหม้อแปลง 3 เฟสที่อาจนำมาต่อขนานได้

ชนิดของหม้อแปลง 3 เฟสที่อาจนำมาต่อขนานได้	
Column A (0° Phase shift)	Column B (30° Phase shift)
Y-Y	Δ -Y
Δ - Δ	Y- Δ
T-T	
V-V	

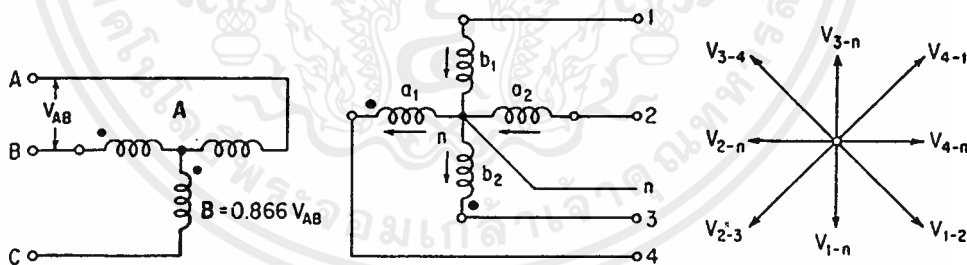
3.3 การต่อหม้อแปลงแบบ Scott connection ^[6]

ในระบบไฟฟ้าทั้งหลายที่มีอยู่เราสามารถที่จะเปลี่ยนเป็น ระบบไฟฟ้าที่มีจำนวนเฟสต่างๆได้ เช่น ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เราสามารถเปลี่ยนเป็นระบบไฟฟ้าจาก 2 เฟส ถึง 24 เฟส ซึ่งการเปลี่ยนระบบไฟฟ้าที่กล่าวมานี้สามารถทำได้โดยใช้หม้อแปลงจาก phasor diagram ในรูปที่ 3.2 ค แรงดัน phase ที่เหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดขั้วของหม้อแปลงแบบ T-T connection จะมี phasor ของแรงดันตั้งฉากซึ่งกันและกัน ความสัมพันธ์นี้จะพบในระบบไฟฟ้า 2 เฟส และ 4 เฟส ซึ่งสามารถทำได้โดยการต่อหม้อแปลงแบบ Scott connection เช่นเดียวกับการต่อหม้อแปลงแบบ T-T connection เราต้องการหม้อแปลงชนิดพิเศษที่แตกต่างจากหม้อแปลงทั่วไปจำนวน 2 ตัวคือ หม้อแปลง Main ที่มี tap ตรงจุดกึ่งกลางของขดปฐมภูมิ และ หม้อแปลง Teaser ซึ่งมีแรงดันพิกัดเป็น 0.866 เท่าของแรงดันของหม้อแปลง Main ตามรูปที่ 3.3 ก ส่วนขดปฐมภูมิของหม้อแปลงทั้งสองจะถูกออกแบบ

ให้มีแรงดันพิกัดเท่ากัน และ อาจจะมี tap ตรงจุดกึ่งกลางของขดลวดปฐมภูมิก็ได้ (สำหรับระบบไฟฟ้า 4 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ข)



(ก) Three - phase to 2 - phase (3 - wire) transformation



(ข) Quarter - phase or 4 - phase (5 - wire) transformation

รูปที่ 3.3 การต่อหม้อแปลงแบบ Scott connection สำหรับระบบไฟฟ้า 2 เฟส และ 4 เฟส

ดังนั้นระบบไฟฟ้า 2 เฟส 3 สาย (2-phase , 3-wire system) เกิดจากปลายทั้งสองของหม้อแปลงและจุดต่อร่วมระหว่างหม้อแปลงเป็นจุด neutral ดังรูปที่ 3.3 ข ถ้าปลายทั้ง 4 ของหม้อแปลงทั้งสองถูกถูกนำออกมาใช้งาน โดยไม่นำจุดต่อร่วมออกมาใช้ด้วย เราจะได้ระบบไฟฟ้าแบบ 2 เฟส 4 สาย (2 phase , 4 wire system) รูปที่ 3.3 ก ได้แสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน phase และ แรงดัน line ของระบบไฟฟ้า 2 เฟส ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_L = \sqrt{2}V_p = \sqrt{2}V_a = \sqrt{2}V_b \quad [3.11]$$

เมื่อ V_p คือ แรงดัน phase หรือแรงดันที่เหนี่ยวนำขึ้นมาในขดลวดทุกขดของหม้อแปลงทั้ง 2 (V_a และ V_b)

สำหรับระบบไฟฟ้า 2 เฟส 5 สาย (2 phase, 5 wire system) จะเหมือนกับระบบ 4 สายเพียงแต่เพิ่มจุดต่อร่วมของหม้อแปลงทางด้านขดขมมิตเป็นสาย neutral ตามรูปที่ 3.3 ข ในระบบนี้บางครั้งจะถูกเรียกว่า Quarter-phase หรือ 4 เฟส ซึ่งแสดงตาม phasor diagram ได้ว่า ประกอบด้วยแรงดัน line 4 ค่า และ แรงดัน phase 4 ค่า (เมื่อวัดระหว่าง line กับ neutral) โดยแรงดัน line ทั้ง 4 จะมีมุมต่างเฟสที่ต่างกัน 90° ซึ่งแรงดัน phase ก็เช่นกัน ดังนั้น แรงดัน line จึงได้จากผลบวกทาง phasor ของแรงดัน phase 2 ค่า ตามความสัมพันธ์ที่ให้ไว้ในสมการที่ [3.11] คือ $V_L = \sqrt{2}V_p$

ความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของหม้อแปลงแบบ Scott connection สามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้

กำหนดให้

I_a, I_b คือ กระแส line ในระบบไฟฟ้า 2 เฟส

I_L คือ ส่วนของแรงดันทางด้านปฐมภูมิต่อแรงดันทางด้านทุติยภูมิ

β คือ อัตราส่วนของแรงดันทางด้านปฐมภูมิต่อแรงดันทางด้านทุติยภูมิ

η คือ ประสิทธิภาพของการพันหม้อแปลง

ถ้าประสิทธิภาพและอัตราส่วนของแรงดัน มีค่าเป็น 1 (Unity efficiency and Unity transformer ratio) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ก เราสามารถใช้กำลังไฟฟ้าหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{The output 2 phase kVA} = \text{The input 3 phase kVA}$$

$$2 V_a I_a = \sqrt{3} V_L I_L$$

$$\text{จาก Unity transformer } \frac{V_L}{V_a} = 1$$

$$2 I_a = \sqrt{3} I_L$$

$$I_a = I_b = \frac{\sqrt{3}}{2} I_L$$

ถ้าประสิทธิภาพและอัตราส่วนของแรงดัน มีค่าไม่เป็น 1 (efficiency and transformation ratio $\neq 1$) เราสามารถใช้กำลังไฟฟ้าหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

พิจารณา 3 phase to 2 phase transformation :

$$\text{จาก } \eta = \frac{\text{Power output}}{\text{Power input}} \text{ จะได้}$$

$$\text{The output 2 phase kVA} = \text{The input 3 phase kVA} \times \eta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2V_a I_a = \sqrt{3} V_L I_L \times \eta$$

$$I_a = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{V_L I_L}{V_a} \times \eta$$

จาก β = อัตราส่วนของแรงดันทางค้ำปรุหมิต่อแรงดันทางค้ำทุติยภูมิ = $\frac{V_L}{V_a}$

$$\therefore I_a = \frac{\sqrt{3}}{2} I_L \eta \beta = I_b \quad [3.12]$$

พิจารณา 2 phase to 3 phase transformation :

จาก $\eta = \frac{\text{Power output}}{\text{Power input}}$ จะได้

The output 3 phase kVA = The input 2 phase kVA $\times \eta$

$$\sqrt{3} V_L I_L = 2 V_a I_a \times \eta$$

$$I_a = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{V_L I_L}{V_a \times \eta}$$

จาก $\beta =$ อัตราส่วนของแรงดันทางค้ำปรุหมิต่อแรงดันทางค้ำทุติยภูมิ = $\frac{V_a}{V_L}$

$$\therefore I_a = \frac{\sqrt{3}}{2\beta\eta} I_L = I_b \quad [3.13]$$

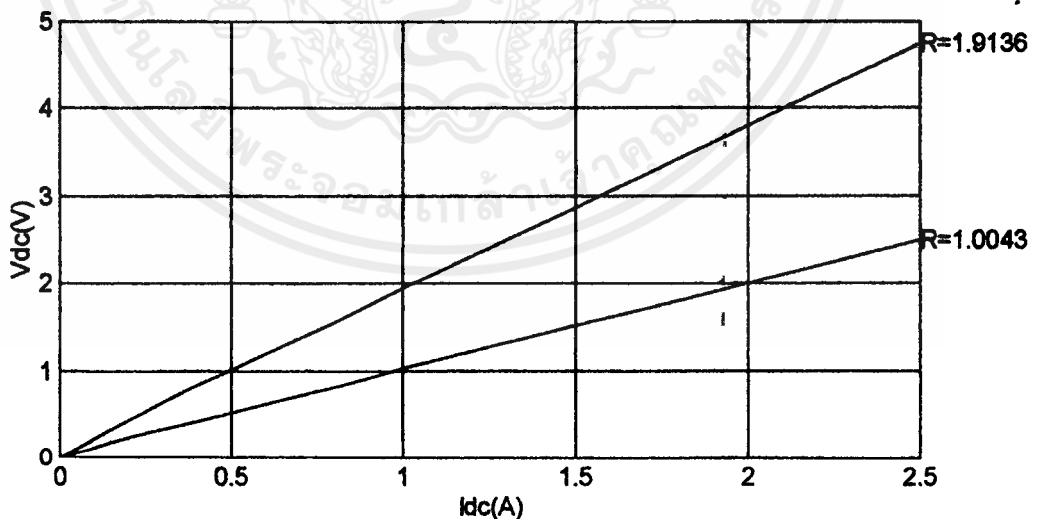
3.4 การทดสอบหม้อแปลง Main , Teaser และ หม้อแปลงสำหรับการค้ำแบบ V/V

จุดประสงค์ 1. เพื่อหาจรรยาบรรณของหม้อแปลง Main , Teaser และ หม้อแปลงสำหรับการค้ำแบบ V/V

- วิธีการทดลอง**
1. ทำการวัดความต้านทานของขดลวดปรุหมิต และ ทุติยภูมิ ของหม้อแปลง Main , Teaser และ หม้อแปลงสำหรับการค้ำแบบ V/V โดยวิธีการวี-ไอ (volt-amp method)
 2. ทำการทดสอบเปิดวงจร บันทึกราค่า แรงดัน , กระแส , วัตต์ ที่ป้อนเข้าทางขดปรุหมิตเป็นขั้นๆ จนถึงค่า 110% ของค่าแรงดันพิกัด ที่แต่ละชั้นวัดแรงดันที่เหนี่ยวนำขึ้นทางขดทุติยภูมิด้วย
 3. ทำการทดสอบลัดวงจร บันทึกราค่า แรงดัน , กระแส , วัตต์ ที่ป้อนเข้าทางขดปรุหมิตเป็นขั้นๆ จนถึงพิกัดของกระแส
 4. ทำการทดสอบการรับภาระ โดยใช้ตัวความต้านทานเป็นโหลด(คือ power factor = 1) บันทึกราค่า แรงดัน , กระแส , วัตต์ ที่ป้อนเข้าทางขดปรุหมิต และ บันทึกราค่าแรงดัน , กระแส ที่ได้ทางค้ำทุติยภูมิเป็นขั้นๆ จนถึงค่าพิกัดกระแส
- ในการทดสอบจะต้องปรับแรงดันทางค้ำปรุหมิตให้คงที่ตลอดเวลา

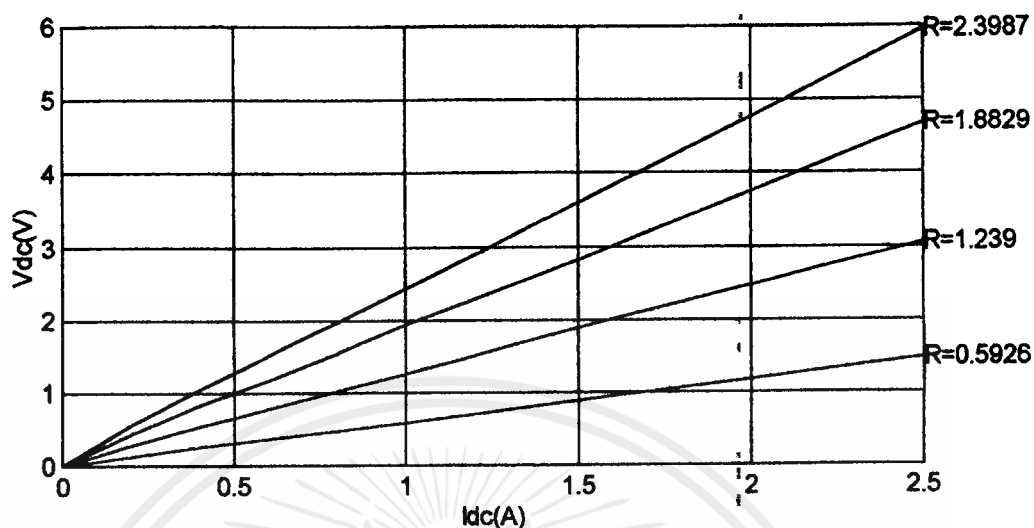
ตารางที่ 3.2 ตารางวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลง Main

Primary Side				Secondary Side							
Tap 190 V		Tap 380 V		Tap 80 V		Tap 190 V		Tap 300 V		Tap 380 V	
Vdc	Idc	Vdc	Idc	Vdc	Idc	Vdc	Idc	Vdc	Idc	Vdc	Idc
(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.227	0.2	0.431	0.2	0.135	0.2	0.283	0.2	0.437	0.2	0.559	0.2
0.424	0.4	0.826	0.4	0.253	0.4	0.532	0.4	0.813	0.4	1.042	0.4
0.621	0.6	1.189	0.6	0.368	0.6	0.771	0.6	1.171	0.6	1.511	0.6
0.820	0.8	1.561	0.8	0.481	0.8	1.018	0.8	1.546	0.8	1.976	0.8
1.022	1.0	1.951	1.0	0.595	1.0	1.267	1.0	1.921	1.0	2.430	1.0
1.515	1.5	2.870	1.5	0.888	1.5	1.887	1.5	2.820	1.5	3.600	1.5
2.000	2.0	3.810	2.0	1.179	2.0	2.460	2.0	3.750	2.0	4.770	2.0
2.490	2.5	4.750	2.5	1.477	2.5	3.060	2.5	4.670	2.5	5.950	2.5



รูปที่ 3.4 กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง Main

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง Main

วิเคราะห์ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลง Main

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิของหม้อแปลง Main เราสามารถทำได้โดยนำค่า V_{dc} และ I_{dc} ที่ได้จากการทดสอบมาเขียนกราฟแล้วหาความต้านทานของขดลวดโดยอ่าน ความชัน (Slope) ของกราฟ เพราะว่าความชันของกราฟระหว่างแรงดันกับกระแสก็คือ ความต้านทานของขดลวดนั่นเอง

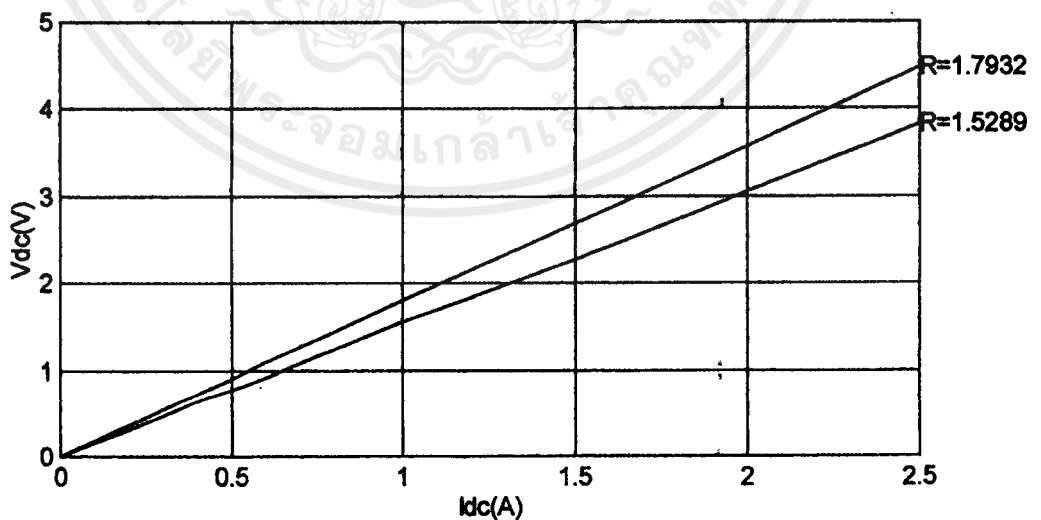
เนื่องจากกราฟของแรงดัน กับ กระแสเป็นเส้นตรง ดังนั้นเราจะใช้วิธีการของ Least square-error เพื่อหาค่าของความต้านทานของขดลวด ณ Tap ต่างๆ ของหม้อแปลงออกมา (การหา Least square error สามารถทำได้โดยใช้ Microsoft Excel) และผลที่ได้จากการทดสอบดังนี้

ทางด้านปฐมภูมิ:	ที่ Tap 190 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ	= 1.0043	Ohms
	ที่ Tap 380 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ	= 1.9136	Ohms
ทางด้านทุติยภูมิ:	ที่ Tap 80 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ	= 0.5926	Ohms
	ที่ Tap 190 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ	= 1.239	Ohms
	ที่ Tap 300 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ	= 1.8829	Ohms
	ที่ Tap 380 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ	= 2.3987	Ohms

จากการออกแบบหม้อแปลง Main เราคำนวณหาความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิที่ Tap 100% (380 โวลต์) มีค่าเท่ากับ 1.851 Ohms และความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ Tap 100% (380 โวลต์) มีค่าเท่ากับ 2.415 Ohms เมื่อนำค่าได้จากการออกแบบ และ ค่าที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า ค่าที่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

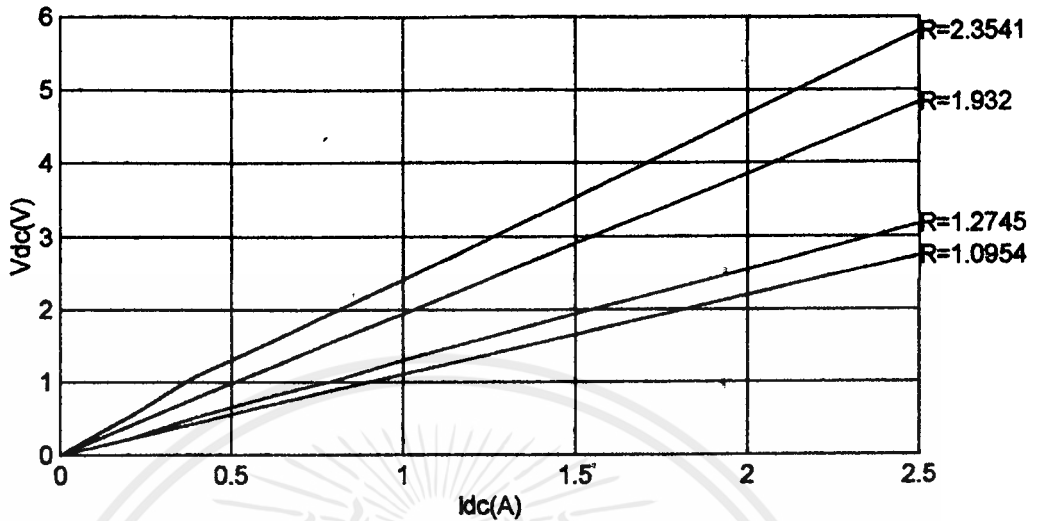
ตารางที่ 3.3 ผลการวัดความต้านทานของหม้อแปลง Teaser

Primary Side				Secondary Side							
Tap 330 V		Tap 380 V		Tap 190 V		Tap 220 V		Tap 330 V		Tap 380 V	
Vdc (V)	Idc (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Vdc (V)	Idc (A)	Vdc (V)	Idc (A)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.309	0.2	0.364	0.2	0.221	0.2	0.255	0.2	0.391	0.2	0.512	0.2
0.627	0.4	0.726	0.4	0.443	0.4	0.516	0.4	0.776	0.4	1.088	0.4
0.922	0.6	1.094	0.6	0.663	0.6	0.773	0.6	1.165	0.6	1.515	0.6
1.240	0.8	1.451	0.8	0.890	0.8	1.027	0.8	1.565	0.8	1.980	0.8
1.547	1.0	1.809	1.0	1.102	1.0	1.289	1.0	1.92	1.0	2.400	1.0
2.280	1.5	2.690	1.5	1.656	1.5	1.932	1.5	2.900	1.5	3.540	1.5
3.050	2.0	3.580	2.0	2.180	2.0	2.540	2.0	3.860	2.0	4.670	2.0
3.820	2.5	4.470	2.5	2.730	2.5	3.170	2.5	4.830	2.5	5.810	2.5



รูปที่ 3.6 กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง Teaser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง Teaser

วิเคราะห์ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลง Teaser

การวิเคราะห์ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลง Teaser จะทำการวิเคราะห์เหมือนหม้อแปลง Main ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบสามารถแสดงได้ดังนี้

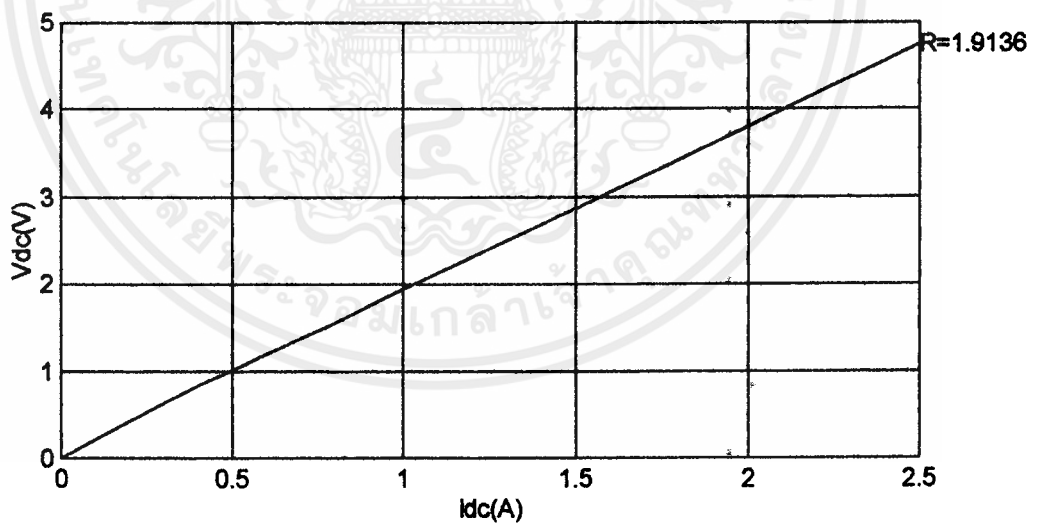
ทางด้านปฐมภูมิ:	ที่ Tap 330 โวลท์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 1.528	Ohms
	ที่ Tap 380 โวลท์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 1.7932	Ohms
ทางด้านทุติยภูมิ:	ที่ Tap 190 โวลท์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 1.0954	Ohms
	ที่ Tap 220 โวลท์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 1.2745	Ohms
	ที่ Tap 330 โวลท์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 1.9323	Ohms
	ที่ Tap 380 โวลท์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 2.3541	Ohms

จากการออกแบบหม้อแปลง Teaser เราคำนวณหาความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิที่ Tap 100% (380 โวลท์) มีค่าเท่ากับ 1.851 Ohms และความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ Tap 100% (380 โวลท์) มีค่าเท่ากับ 2.415 Ohms เมื่อนำค่าได้จากการออกแบบ และ ค่าที่ได้จากการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า ค่าที่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

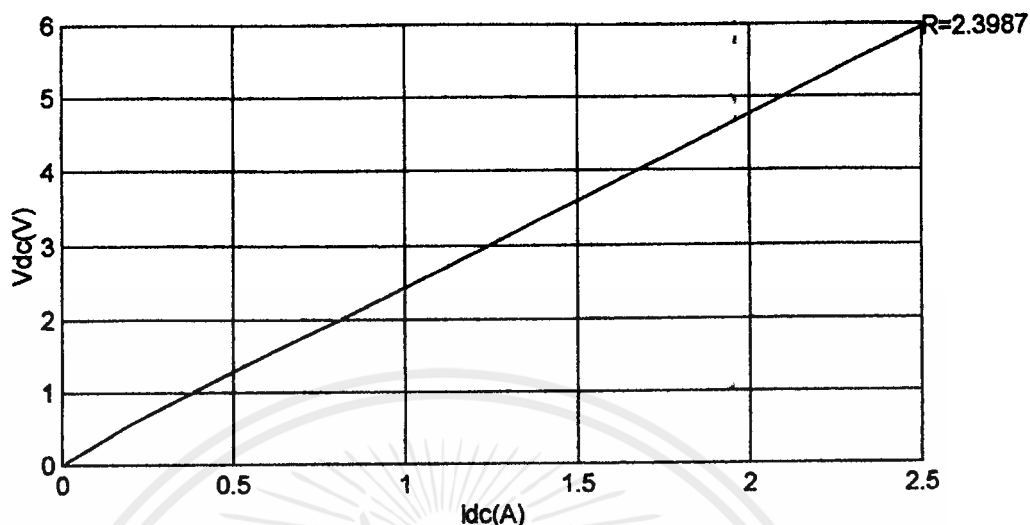
เมื่อเราทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของหม้อแปลง Main และ Teaser ที่ Tap 100% ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการพันขดลวด และขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลง Main และ Teaser เป็นคนละรุ่นกัน

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดความต้านทานของหม้อแปลง สำหรับการต่อแบบ V

Primary Side		Secondary Side	
Vdc (V)	I _{dc} (A)	Vdc (V)	I _{dc} (A)
0	0	0	0
0.362	0.2	0.510	0.2
0.724	0.4	1.086	0.4
1.092	0.6	1.513	0.6
1.449	0.8	1.978	0.8
1.807	1.0	2.398	1.0
2.688	1.5	3.538	1.5
3.578	2.0	4.668	2.0
4.468	2.5	5.808	2.5



รูปที่ 3.8 กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง สำหรับการต่อแบบ V



รูปที่ 3.9 กราฟผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง สำหรับการต่อแบบ V

วิเคราะห์ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V

การวิเคราะห์ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V จะทำการวิเคราะห์เหมือนหม้อแปลง Main ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบสามารถแสดงได้ดังนี้

ทางด้านปฐมภูมิ: ที่ 380 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 1.9136 Ohms

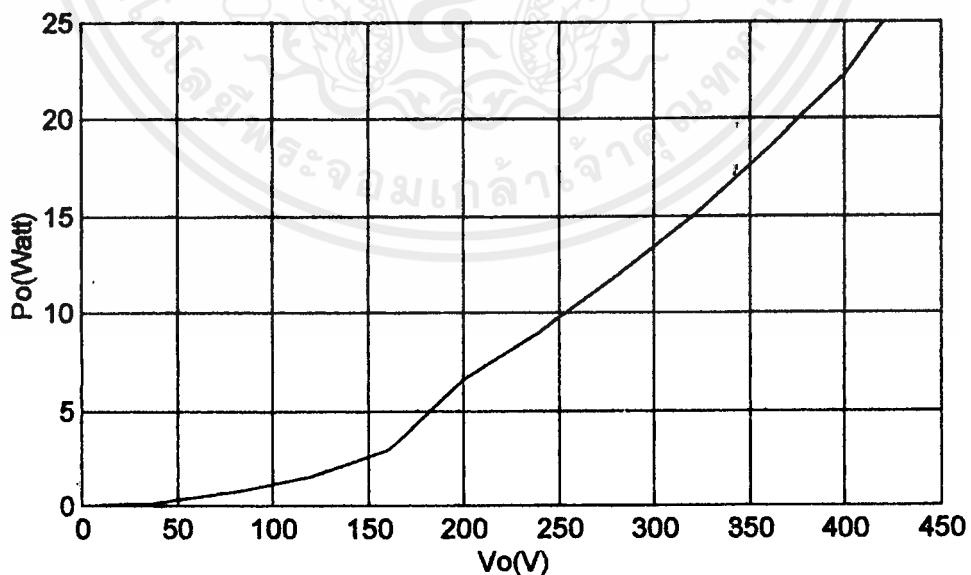
ทางด้านทุติยภูมิ: ที่ 380 โวลต์ มีความต้านทานของขดลวดเท่ากับ = 2.3987 Ohms

จากการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V เราคำนวณหาความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิที่ 380 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 1.851 Ohms และความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่ 380 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 2.415 Ohms เมื่อนำค่าได้จากการออกแบบ และ ค่าที่ได้จากการทดสอบจริง มาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า ค่าที่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

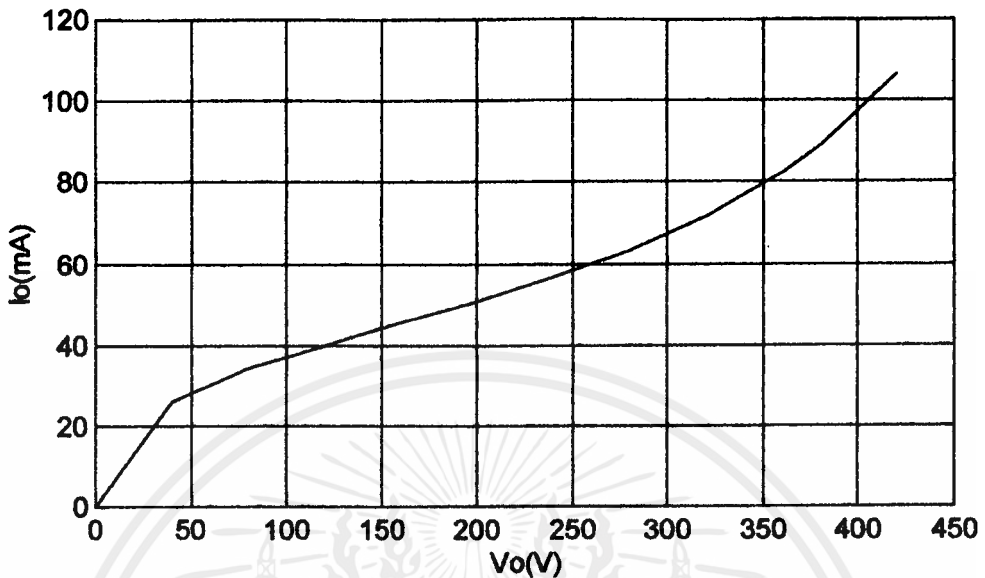
เมื่อเราทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของหม้อแปลง Main และ Teaser ที่ Tap 100%กับแบบ V ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการพันขดลวด และขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลง Main ,แบบ V และ Teaser เป็นคนละรุ่นกัน

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบหม้อแปลง Main แบบเปิดวงจร

V_o (V)	I_o (mA)	P_o (Watt)	V_2 (V)
0	0	0	0
40	26.1	0.175	41.9
80	34.1	0.7	84.2
120	39.8	1.5	126.1
160	47.7	2.9	168.2
200	53.0	6.6	210
240	56.6	9	252
280	63.2	11.875	295
320	71.4	15	337
360	82.1	18.5	379
380	89.1	20.5	400
400	97.3	22.5	421
420	106.4	25	442

รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_o กับ V_o ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_o กับ I_o ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร

วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลง Main แบบเปิดวงจร

เมื่อนำค่าจากการทดสอบมาทำการวาดกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้า ($P_o = \text{core loss}$) และ V_o จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลา ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า $P_o \propto B^2$ และ $V_o \propto B$ ดังนั้น $P_o \propto V_o^2$ ส่วนกราฟระหว่าง I_o กับ V_o จะเห็นว่า เมื่อแรงดันต่ำๆ I_o จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากกระแส Magnetizing (I_m) จากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆ I_o ก็จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันในลักษณะเชิงเส้นจนแรงดันเกินค่าพิกัด ถึงแก่ที่ว่า I_o จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีก ซึ่งเป็นผลมาจากแกนเหล็กอิ่มตัวจึงทำให้ I_m มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก จากผลการทดสอบเราสามารถนำค่าต่างๆ ไปหาค่า R_c และ X_m ของวงจรสมมูลเทียบทางด้านปฐมภูมิได้ดังนี้

$$\text{ที่แรงดันพิกัด } (V_o) = 380 \text{ volt}, I_o = 89.1 \text{ mA}, P_o = 20.5 \text{ watt}$$

$$\begin{aligned} \therefore I_c &= \frac{P_o}{V_o} \\ &= \frac{20.5}{380} \\ &= 53.94 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_m &= \sqrt{I_o^2 - I_c^2} \\ &= \sqrt{89.1^2 - 53.94^2} \\ &= 70.917 \text{ mA} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

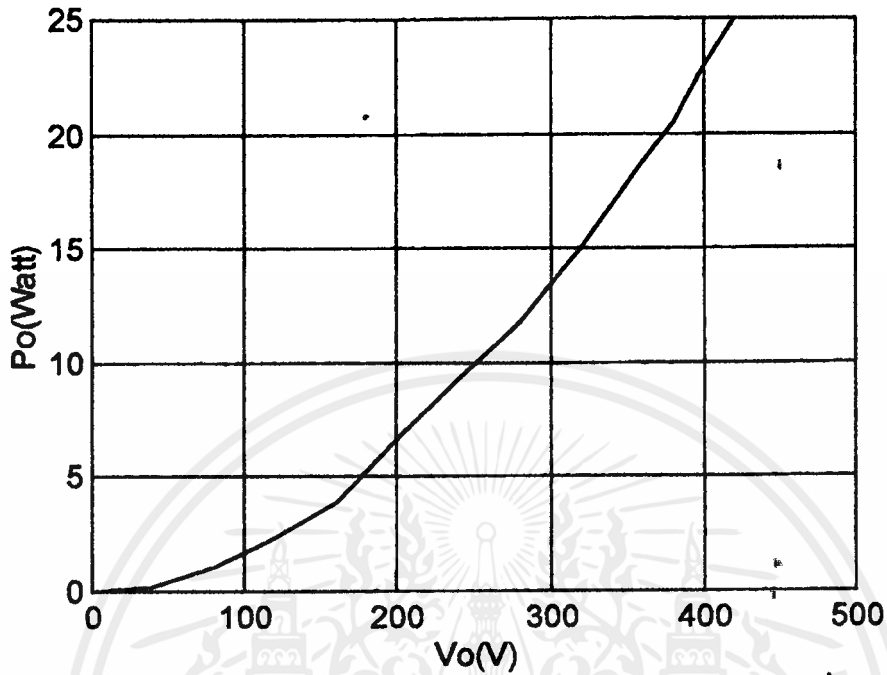
จะได้

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{V_o}{I_c} \\
 &= \frac{380}{53.948 \times 10^{-3}} \\
 &= 7044.864 \quad \Omega \\
 X_m &= \frac{V_o}{I_m} \\
 &= \frac{380}{70.917 \times 10^{-3}} \\
 &= 5358.376 \quad \Omega
 \end{aligned}$$

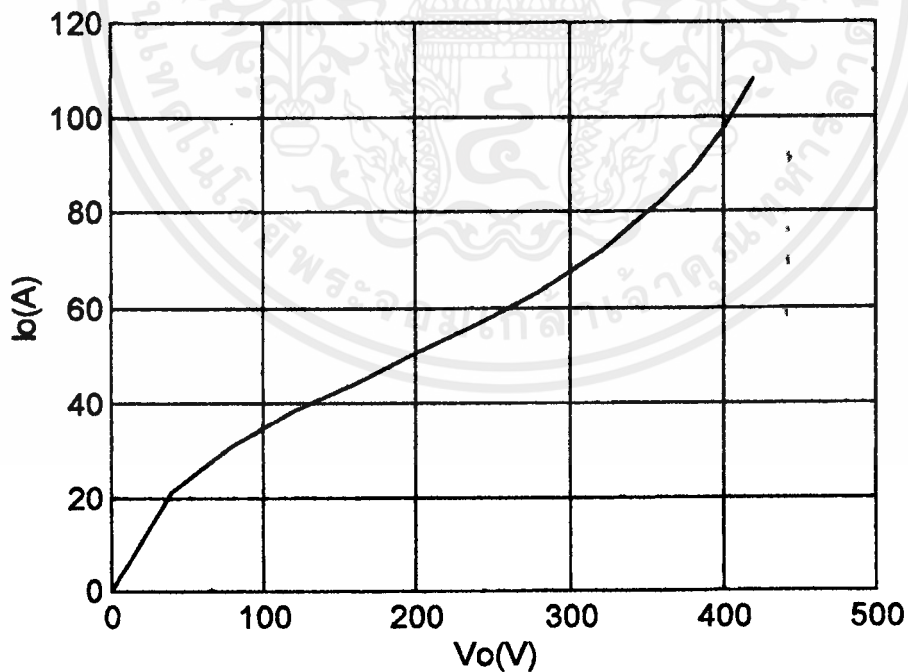
แต่ค่าที่ได้จากการออกแบบมีค่า $R_c = 6300.073 \quad \Omega$ และ $X_m = 4733.163 \quad \Omega$ ช่วงค่าที่แตกต่างกันนี้อาจจะเกิดจากน้ำหนักของแกนเหล็กจริง และ ค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ B_m กับ VA loss - per kilogram และ B_m กับ Watt per kilogram ซึ่งมีค่าไม่ตรงจากค่าที่ได้จากการออกแบบ

ตารางที่ 3.6 ผลทดสอบหม้อแปลง Teaser แบบเปิดวงจร

V_o (V)	I_o (mA)	P_o (Watt)	V_2 (V)
0	0	0	0
40	21.1	0.2	41.9
80	31	1.05	84.1
120	38	2.3	126.1
160	44.3	3.9	168.4
200	50.3	6.6	210
240	56.6	9.25	253
280	63.3	11.75	294
320	71.6	15	337
360	82.3	18.75	380
380	89.1	20.5	400
400	97.6	23	422
420	108.2	25	440



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_o กับ V_o ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_o กับ I_o ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร

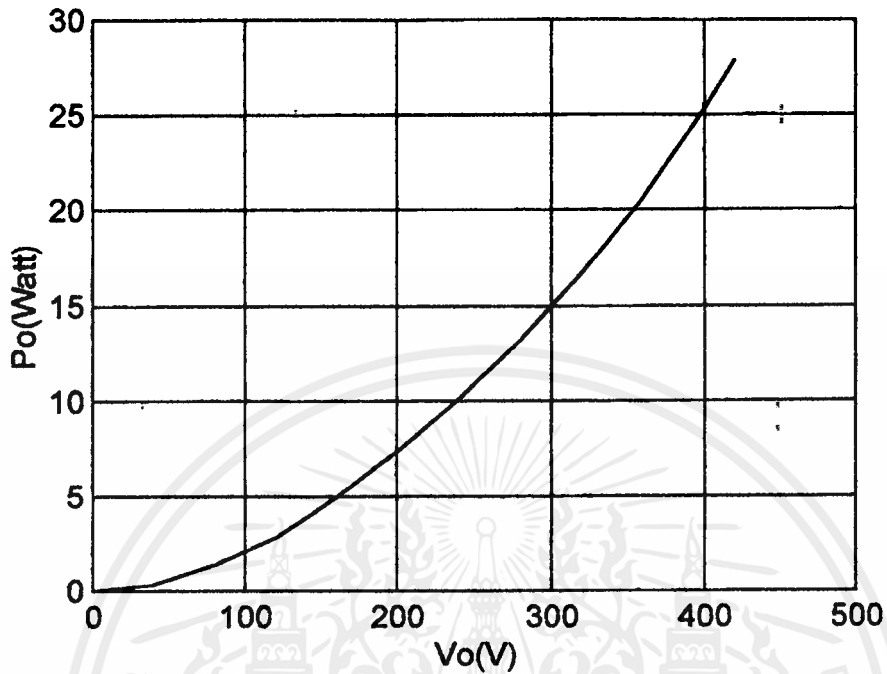
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลง Teaser แบบเปิดวงจร

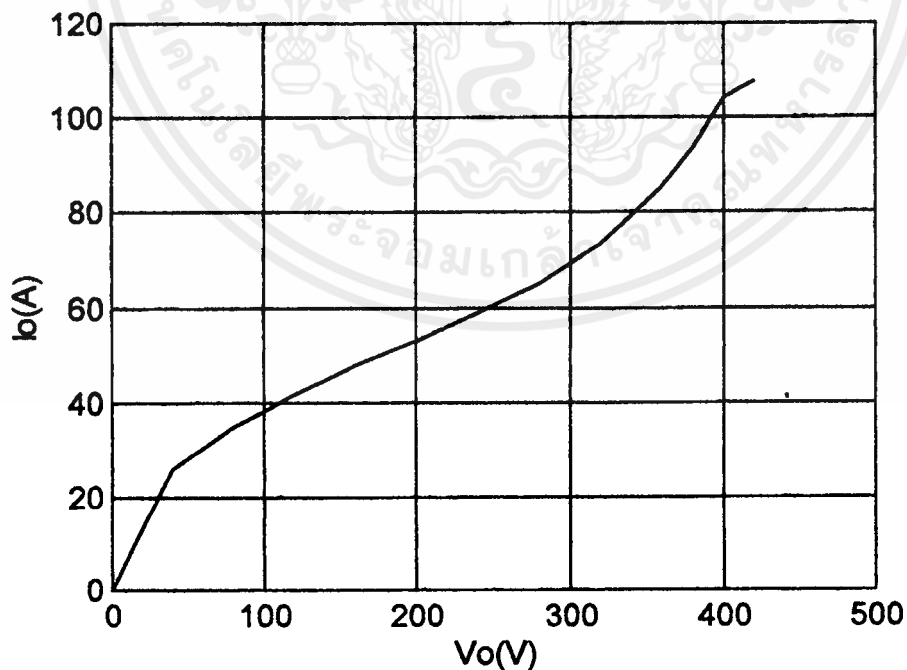
เนื่องจากหม้อแปลง Teaser มีรายละเอียดในการสร้างเหมือนกับหม้อแปลง Main ต่างกันที่ระยะ Tap ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับหม้อแปลง Main ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลได้ในลักษณะเดียวกัน และสามารถนำผลการทดสอบไปหาค่า R_c และ X_m ได้ จากตารางที่ 3.6 จะเห็นว่า ณ แรงดันพิกัด ค่าต่างๆจากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับหม้อแปลง Main (ตารางที่ 3.5) ดังนั้น หม้อแปลง Teaser จึงมีค่า R_c และ X_m เท่ากับหม้อแปลง Main คือ R_c เท่ากับ 7044.864 Ω และ X_m เท่ากับ 5358.376 Ω ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบได้เช่นเดียวกับหม้อแปลง Main

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V แบบเปิดวงจร

V_o (V)	I_o (mA)	P_o (Watt)	V_2 (V)
0	0	0	0
40	25.91	0.36	41
80	34.80	1.34	83
120	41.63	2.80	126
160	47.75	5.00	168
200	53.06	7.36	208
240	58.97	10.10	252
280	64.89	13.18	295
320	73.26	16.60	337
360	85.10	20.60	378
380	93.80	23.06	399
400	104.40	25.30	421
420	107.70	27.90	440



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_o กับ V_o ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_o กับ I_o ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดสอบหือแปลงสำหรับการค้อแบบ V/V

เมื่อนำค่าจากการทดสอบมาทำการวาดกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้า ($P_o = \text{core loss}$) และ V_o จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลา ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า $P_o \propto B^2$ และ $V_o \propto B$ ดังนั้น $P_o \propto V_o^2$ ส่วนกราฟระหว่าง I_o กับ V_o จะเห็นว่า เมื่อแรงดันต่ำๆ I_o จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากกระแส Magnetizing (I_m) จากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นไปเรื่อยๆ I_o ก็จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันในลักษณะเชิงเส้นจนแรงดันเกินค่าพิกัด ถึงเหตุว่า I_o จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีก ซึ่งเป็นผลมาจากแกนเหล็กอิ่มตัวจึงทำให้ I_m มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก จากผลการทดสอบเราสามารถนำค่าต่างๆ ไปหาค่า R_c และ X_m ของวงจรสมมูลเทียบทางด้านปฐมภูมิได้ดังนี้

ที่แรงดันพิกัด (V_o) = 380 volt , I_o = 93.8 mA , P_o = 23.06 watt

$$\begin{aligned} \therefore I_c &= \frac{P_o}{V_o} \\ &= \frac{23.06}{380} \\ &= 60.684 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_m &= \sqrt{I_o^2 - I_c^2} \\ &= \sqrt{93.8^2 - 60.684^2} \\ &= 71.525 \text{ mA} \end{aligned}$$

จะได้

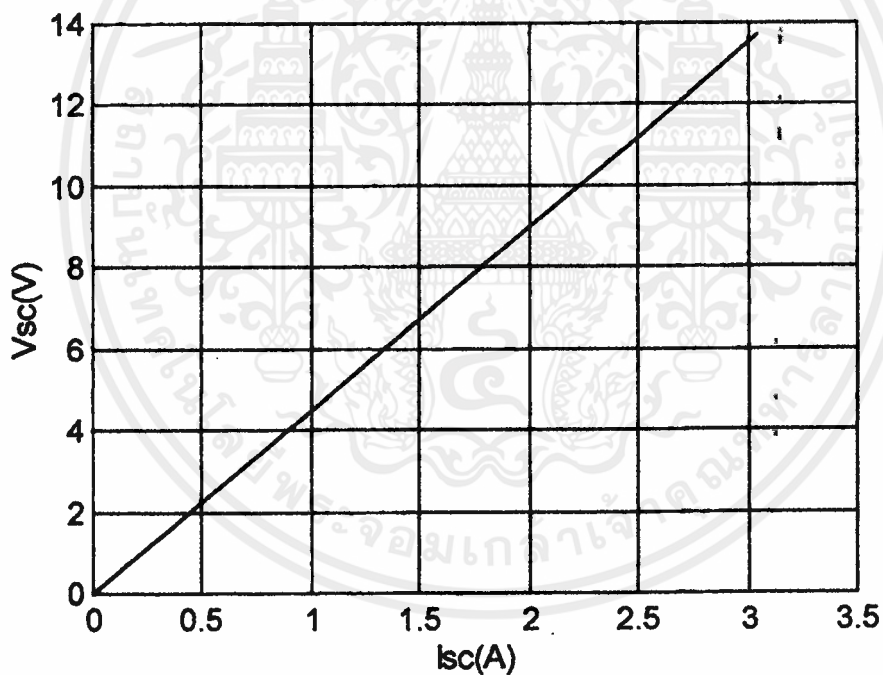
$$\begin{aligned} R_c &= \frac{V_o}{I_c} \\ &= \frac{380}{60.684 \times 10^{-3}} \\ &= 6261.9 \ \Omega \end{aligned}$$

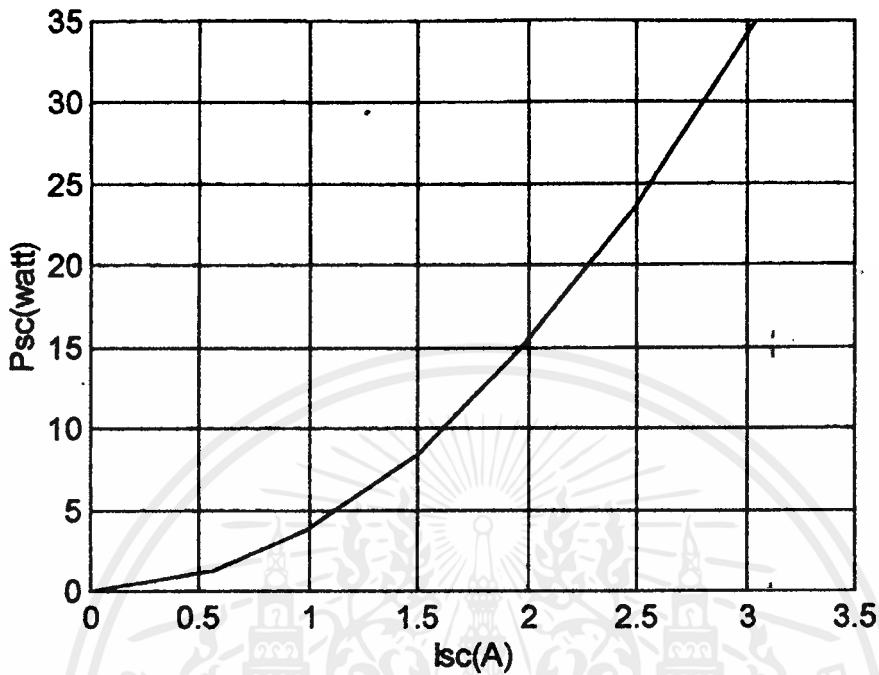
$$\begin{aligned} X_m &= \frac{V_o}{I_m} \\ &= \frac{380}{71.525 \times 10^{-3}} \\ &= 5312.827 \ \Omega \end{aligned}$$

แต่ค่าที่ได้จากการออกแบบมีค่า $R_c = 6300.073 \ \Omega$ และ $X_m = 4733.163 \ \Omega$ ช่วงค่าที่แตกต่างกันนี้อาจจะเกิดจากน้ำหนักของแกนเหล็กจริง และ ค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของ B_m กับ VA loss - per kilogram และ B_m กับ Watt per kilogram ซึ่งมีค่าไม่ตรงจากค่าที่ได้จากการออกแบบ

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบหม้อแปลง Main แบบถัดวงจร

V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (Watt)
0	0	0
2.50	0.56	1.2
4.38	0.98	3.7
6.72	1.5	8.4
8.86	1.97	15
11.12	2.49	23.5
13.71	3.04	35

รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบถัดวงจร



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Main ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร

วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลง Main แบบลัดวงจร

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาวาดกราฟระหว่าง V_{sc} กับ I_{sc} จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่มีความชันคงที่ ซึ่งความชันนี้จะแสดงถึงค่า อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของขดลวดทองแดงซึ่งมีค่าคงที่นั่นเอง ส่วนกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{sc} = Copper loss) กับ I_{sc} จะเห็นว่ากราฟเป็นรูปพาราโบลา หรือจะกล่าวได้ว่า $P_{sc} \propto I_{sc}^2$ ก็ได้ ซึ่งกำลังไฟฟ้าส่วนที่เกิดขึ้นนี้ จะเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งทางด้านปฐมภูมิ และ ทูติยภูมิ จากการทดสอบเราสามารถหาค่า R_c และ X_c ของวงจรสมมูลเทียบทางด้านปฐมภูมิได้ดังนี้ คือ

$$\text{ที่พิกัดกระแส (} I_{sc} \text{)} = 3.04 \text{ A, } V_{sc} = 13.71 \text{ volt, } P_{sc} = 35 \text{ watt}$$

$$\begin{aligned} \therefore R_c &= \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{35}{3.04^2} \\ &= 3.787 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_c &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{13.71}{3.04} \\ &= 4.509 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

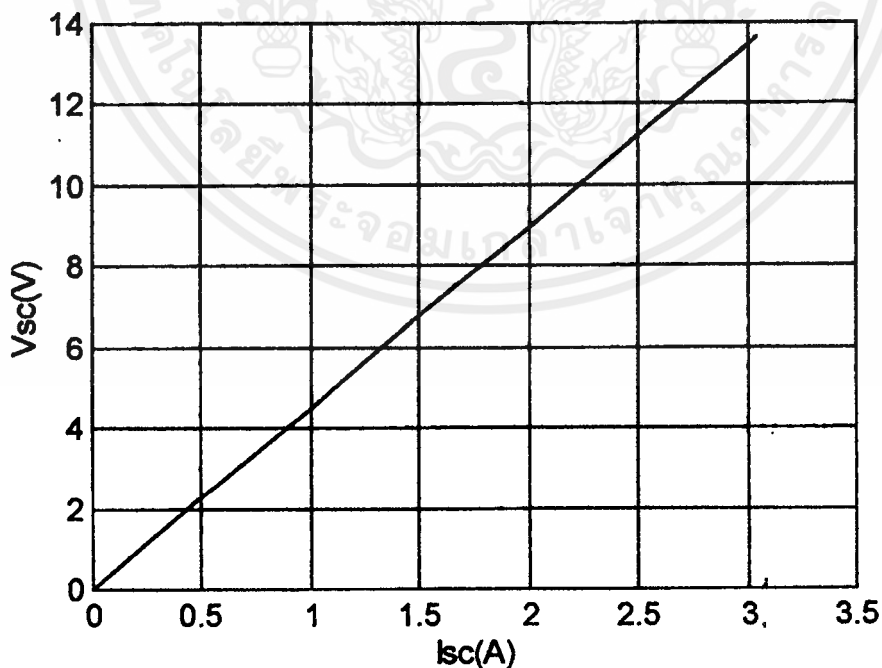
$$\begin{aligned} X_c &= \sqrt{Z_c^2 - R_c^2} = \sqrt{4.509^2 - 3.787^2} \\ &= 2.447 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบค่านี้กับค่าที่ได้จากออกแบบ คือ $R_1 = 1.851 \Omega$, $R_2 = 2.415 \times a^2$ ซึ่ง Turn ratio ของหม้อแปลงเท่ากับ $\frac{396}{417} = 0.949$ เพราะฉะนั้น $R_2' = 2.177 \Omega$ และได้ $R_e = R_1 + R_2' = 4.027 \Omega$ และค่า $X_e = X_1 + X_2' = 2.346 \Omega$ จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการออกแบบ

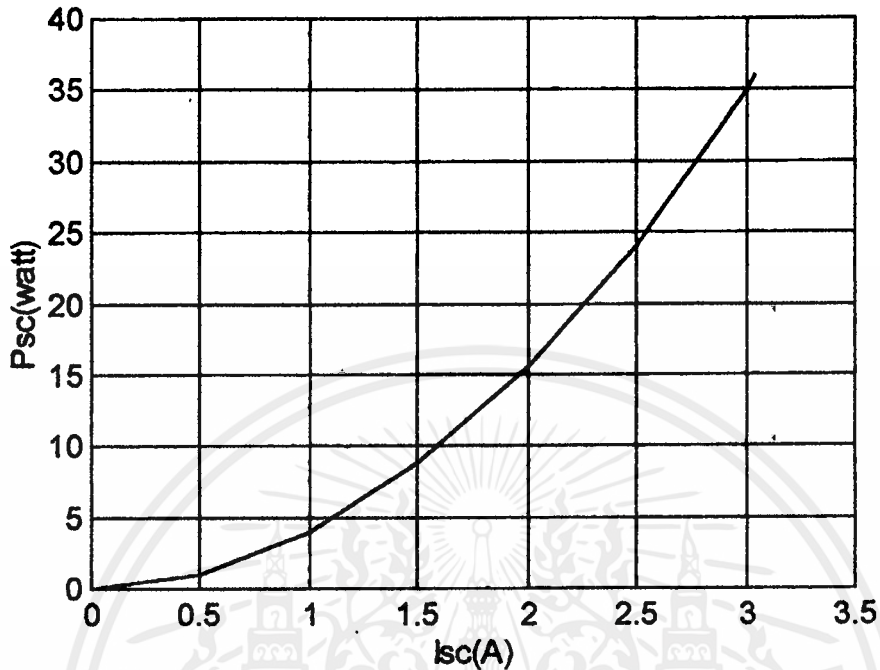
ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบหม้อแปลง Teaser แบบลัดวงจร

V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (Watt)
0	0	0
2.29	0.50	1.025
4.48	1.00	3.9
6.76	1.50	8.8
8.94	2.00	15.5
11.22	2.5	24
13.46	3	35
13.65	3.04	36



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารแบบลัดวงจร ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลง Teaser ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจร

วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลง Teaser แบบลัดวงจร

ผลจากการทดสอบนี้สามารถวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับ หม้อแปลง Main คือ $V_{sc} \propto I_{sc}$ และ $P_{sc} \propto I_{sc}^2$ ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถหาค่า R_e และ X_e ของวงจรสมมูลเทียบทางด้านปฐมภูมิได้ดังนี้คือ

ที่พี กัดกระแส (I_{sc}) = 3.04 A, V_{sc} = 13.65 volt, P_{sc} = 36 watt

$$\begin{aligned} \therefore R_e &= \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{36}{3.04^2} \\ &= 3.895 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{sc} &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{13.65}{3.04} \\ &= 4.49 \Omega \end{aligned}$$

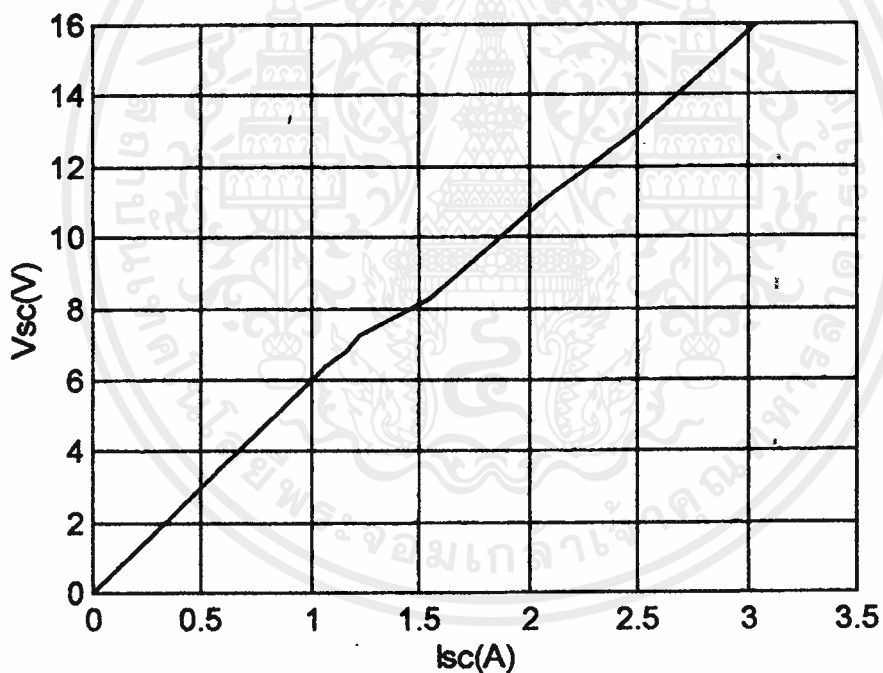
$$\begin{aligned} X_e &= \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = \sqrt{4.49^2 - 3.895^2} \\ &= 2.233 \Omega \end{aligned}$$

ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่า R_e และ X_e ที่ได้จากการออกแบบเช่นเดียวกับหม้อแปลง Main

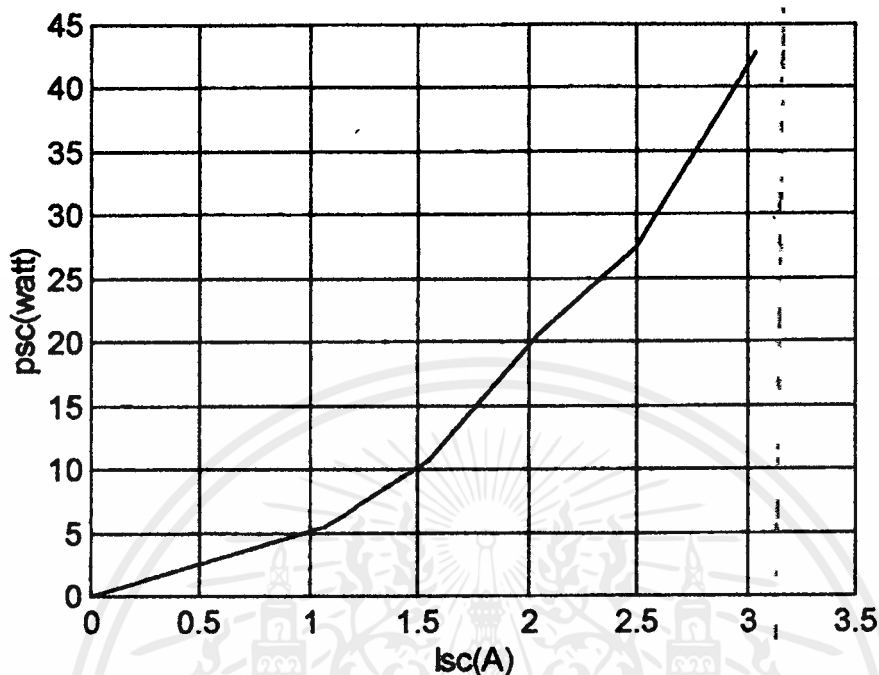
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V แบบถัดวงจร

V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (Watt)
0	0	0
6.37	1.07	5.44
7.24	1.22	7.09
8.28	1.54	10.60
10.90	2.04	20.50
13.0	2.50	27.5
16.0	3.04	42.8



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ V_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จากการทดสอบแบบถัดวงจร



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ P_{sc} กับ I_{sc} ของหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V ที่ได้จาก การทดสอบแบบลัดวงจร

วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V แบบลัดวงจร

ผลจากการทดสอบนี้สามารถวิเคราะห์ได้ในลักษณะเดียวกับหม้อแปลง Main และ Teaser คือ $V_{sc} \propto I_{sc}$ และ $P_{sc} \propto I_{sc}^2$ ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถหาค่า R_c และ X_c ของวงจรสมมูลเทียบทางด้านปฐมภูมิได้ดังนี้คือ

ที่พี กัดกระแส (I_{sc}) = 3.04 A, V_{sc} = 13.71 volt, P_{sc} = 44.2 watt

$$\begin{aligned} \therefore R_c &= \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{44.2}{3.04^2} \\ &= 4.7827 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{sc} &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{13.71}{3.04} \\ &= 4.51 \Omega \end{aligned}$$

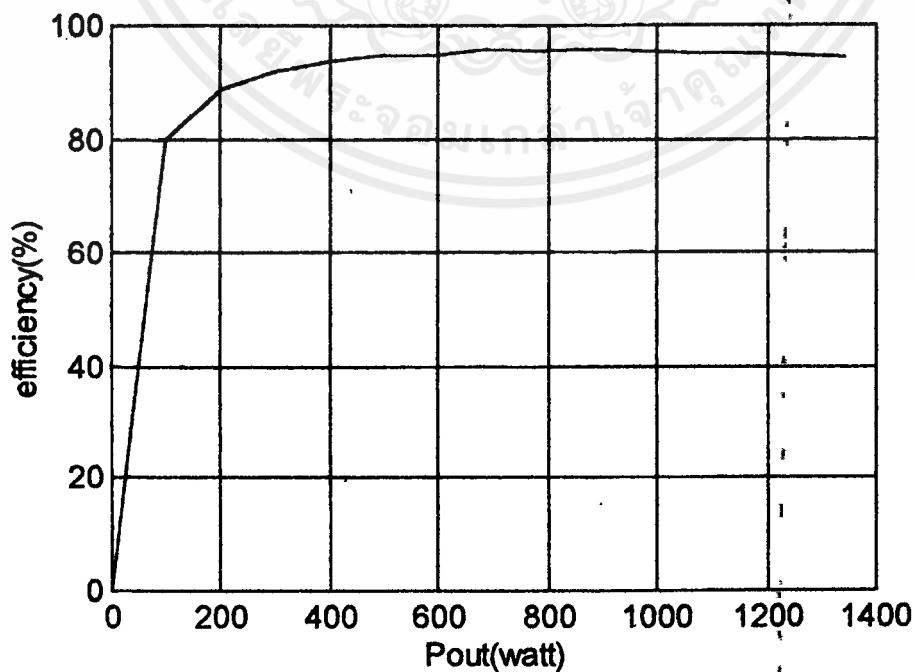
$$\begin{aligned} X_c &= \sqrt{Z_{sc}^2 - R_c^2} = \sqrt{4.51^2 - 4.7827^2} \\ &= 2.5661 \Omega \end{aligned}$$

ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่า R_c และ X_c ที่ได้จากการออกแบบเช่นเดียวกับหม้อแปลง Main และ Teaser ซึ่งค่าที่แตกต่างอาจเกิดจากการพันขดลวดแต่ละขดที่ใช้พันเป็นขดลวดคนละเบอร์กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Main

V_1 (V)	I_1 (A)	Pf_{in}	V_2 (V)	I_2 (A)	Pf_{load}	P_{in}	P_{out}	η (%)
380	0.08	0.82	400	0	-	24.928	0	0
380	0.34	0.965	399	0.25	0.999	124.678	99.650	79.926
380	0.60	0.983	398	0.5	0.999	224.124	198.801	88.701
380	0.86	0.990	397	0.75	0.999	323.532	297.452	91.939
380	1.12	0.992	396	1.0	0.999	422.195	395.604	93.701
380	1.38	0.993	395	1.25	0.999	520.729	493.256	94.724
380	1.62	0.994	394	1.5	0.999	623.263	590.409	94.732
380	1.90	0.994	393	1.75	0.999	717.668	687.062	95.735
380	2.17	0.995	392	2.0	0.999	820.477	783.216	95.458
380	2.43	0.995	391	2.25	0.999	918.783	878.870	95.655
380	2.69	0.995	388	2.5	0.999	1017.08	969.03	95.274
380	2.96	0.995	387	2.75	0.999	1119.17	1063.18	94.997
380	3.22	0.995	386	3.00	0.999	1217.48	1156.84	95.019
380	3.49	0.995	385	3.25	0.999	1319.56	1249.99	94.727
380	3.76	0.995	384	3.5	0.999	1421.65	1342.65	94.443



รูปที่ 3.22 กราฟผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Main

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Main

จากผลการทดสอบเมื่อนำค่าประสิทธิภาพ (η) มาเขียนกราฟเทียบกับเพาเวอร์เอาทพุทของหม้อแปลงจะเห็นว่า กราฟมีลักษณะที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามกระแสโหลดจนถึงจุดๆหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นจุดที่หม้อแปลงมีค่า Copper loss เท่ากับ Core loss จากนั้นกราฟจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆตามสภาวะกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้น ที่กระแสที่ค้ดของหม้อแปลงในการทดสอบคือ 3.00 แอมป์ ประสิทธิภาพที่ได้จากกราฟมีค่าเท่ากับ 95.019% โดยสูงกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบคือ 90% ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ค่าเพาเวอร์อินพุทที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่ออกแบบ ซึ่งถือเป็นการดีในการที่หม้อแปลงตัวนี้จะใช้พลังงานน้อยลงคือ 1217.482 วัตต์ (ค่าที่ออกแบบคือ 1284 วัตต์) แต่ให้เพาเวอร์เอาทพุทออกมาใกล้เคียงกันคือ 1156.842 วัตต์ (ค่าที่ได้จากการออกแบบคือ 1155 วัตต์) แรงดันที่ขั้วขณะจ่ายโหลดเต็มที่มีค่าเท่ากับ 386 โวลต์ มากกว่าที่ออกแบบเล็กน้อยคือ 1.57% (ค่าที่ออกแบบคือ 380 โวลต์) ค่าแรงดันเรกิวเลชัน (Voltage Regulation) ของหม้อแปลงจากการทดสอบหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{Reg}^n &= \frac{V_{\text{no load}} - V_{\text{full load}}}{V_{\text{full load}}} \times 100\% \\ &= \frac{400 - 386}{386} \times 100\% \\ &= 3.627 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้าจะสรุปผลการทดลองด้วยค่าประสิทธิภาพ และค่า Voltage Regulation ที่ได้ เราถือว่าหม้อแปลงที่สร้างขึ้นมานี้มี Specification ตามที่ผู้ออกแบบต้องการ

ตารางที่ 3.12 ผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Teaser

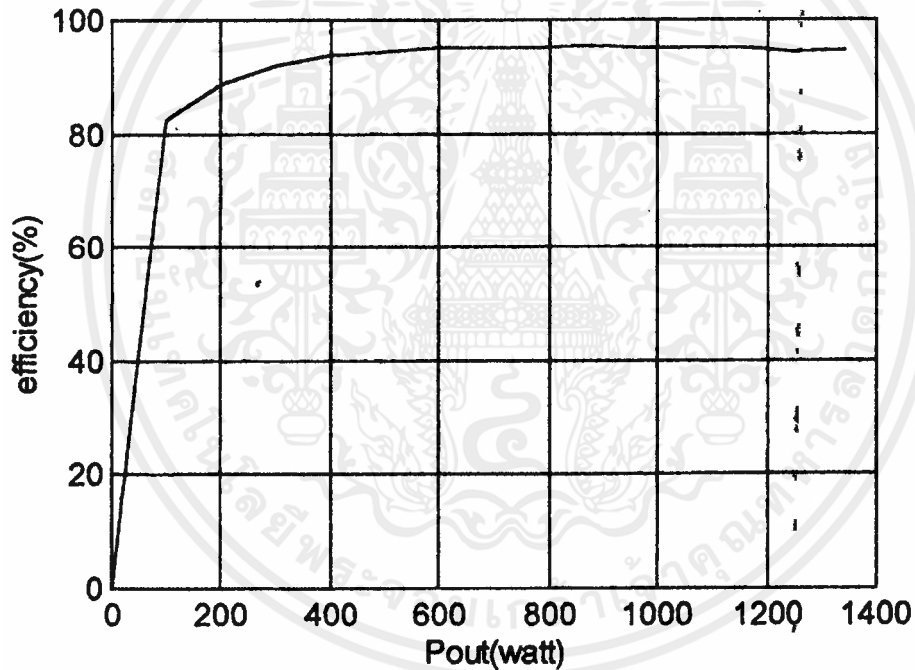
V_1 (V)	I_1 (A)	Pf_{in}	V_2 (V)	I_2 (A)	Pf_{load}	P_{in}	P_{out}	η (%)
380	0.08	0.820	400	0	-	24.92	0	0
380	0.33	0.995	399	0.25	0.999	121.01	99.65	82.348
380	0.60	0.993	398	0.50	0.999	224.12	198.80	88.701
380	0.86	0.990	396	0.75	0.999	323.53	296.70	91.707
380	1.12	0.990	395	1.00	0.999	421.34	394.60	93.653
380	1.38	0.993	394	1.25	0.999	520.72	492.00	94.484
380	1.64	0.993	393	1.50	0.999	618.83	588.90	95.164
380	1.91	0.994	392	1.75	0.999	721.44	685.31	94.992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.12 ผลทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Teaser (ต่อ)

380	2.17	0.995	391	2.00	0.999	820.47	781.21	95.215
380	2.43	0.995	390	2.25	0.999	918.78	876.62	95.411
380	2.70	0.995	389	2.50	0.999	1020.87	971.52	95.166
380	2.96	0.995	387	2.75	0.999	1119.17	1063.18	94.997
380	2.20	0.995	386	3.00	0.999	1217.48	1156.84	95.019
380	3.50	0.995	385	3.25	0.999	1323.35	1249.99	94.457
380	3.75	0.995	384	3.50	0.999	1417.87	1342.65	94.695



รูปที่ 3.23 กราฟผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Teaser

วิเคราะห์ผลการทดสอบการรับภาระของหม้อแปลง Teaser

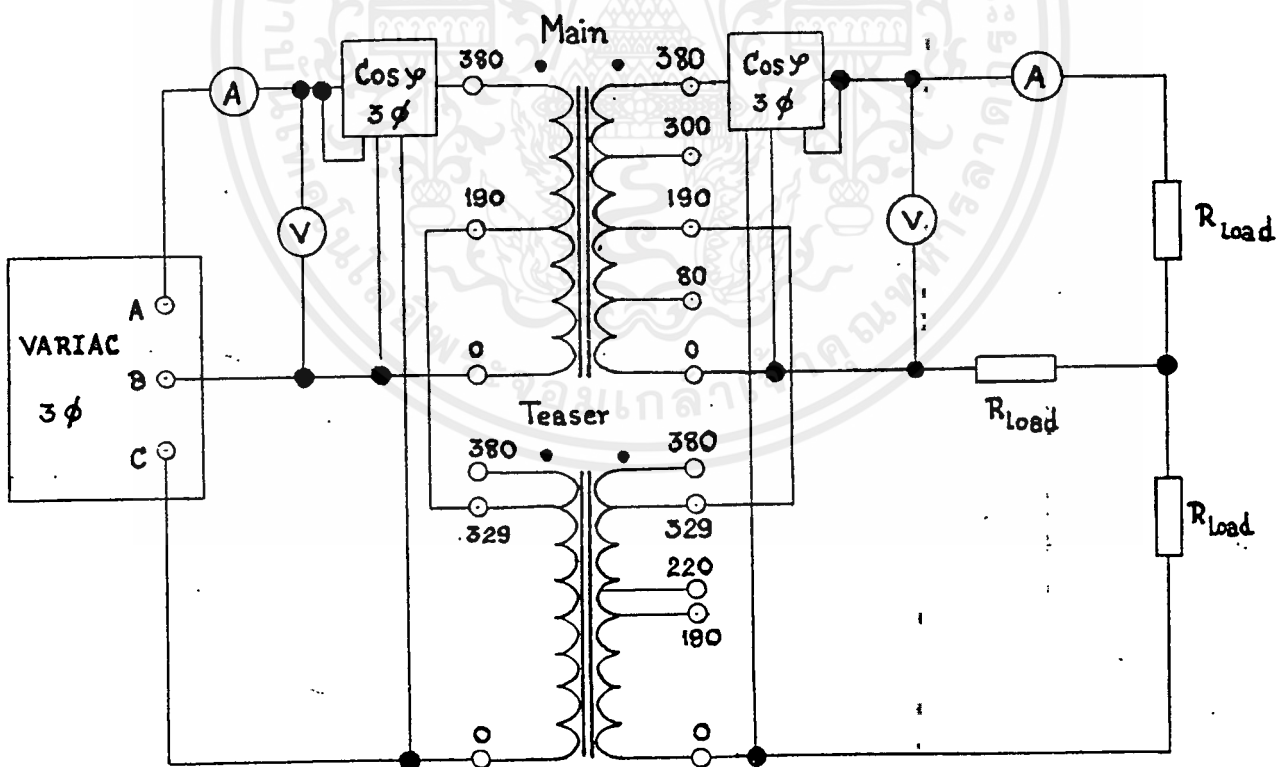
ในลักษณะเดียวกัน เราสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้เหมือนกับหม้อแปลง Main เมื่อเขียนกราฟระหว่าง ประสิทธิภาพเทียบกับเพาเวอร์เอาทพุท กราฟจะมีลักษณะคล้ายๆกันจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วจะลดลง ที่กระแสฟลักซ์ของหม้อแปลง Teaser แรงดันที่ขั้วมีค่าเท่ากับ 386 โวลต์มากกว่าที่ออกแบบ 1.57% , ประสิทธิภาพเท่ากับ 95.019% และมีแรงดันเรกิวเลชันเท่ากับ 3.627%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบ T-T, V/V และ Scott connection Transformer

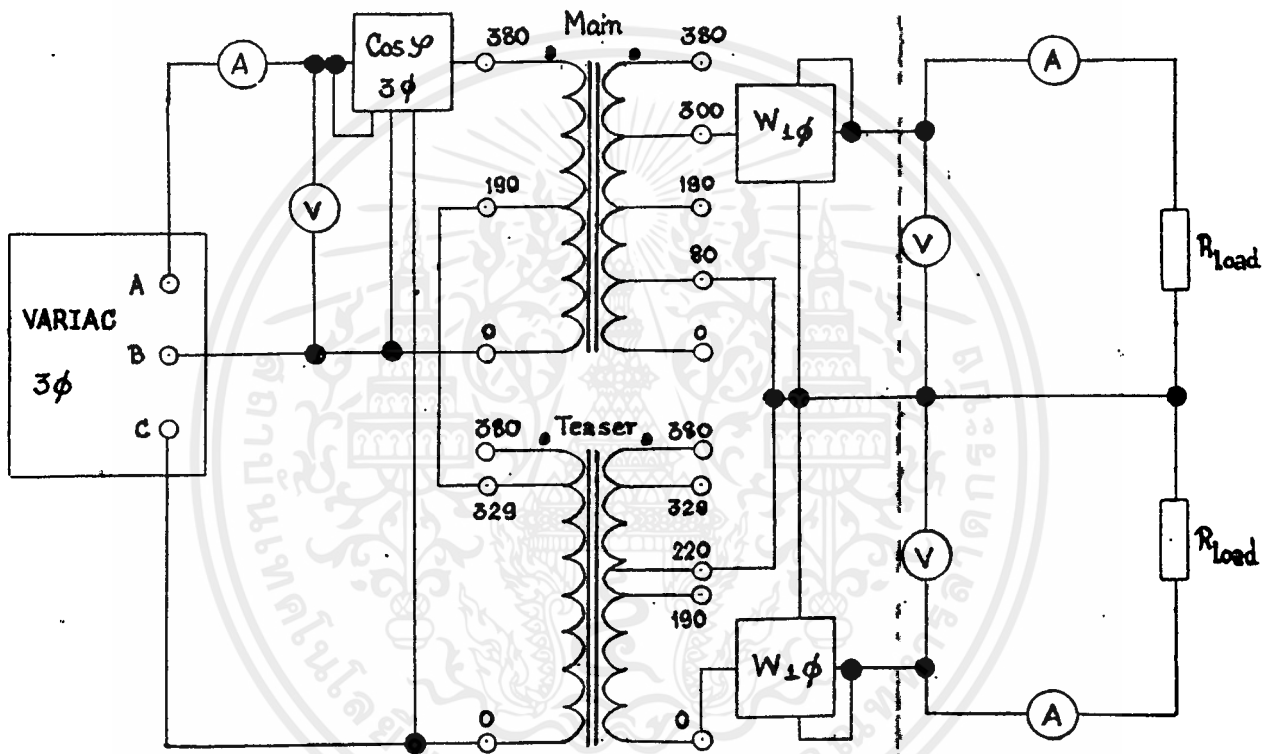
จุดประสงค์ 1. เพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงเมื่อนำหม้อแปลง Main และ Teaser มาต่อแบบ T-T และ Scott connection และ หม้อแปลงแบบ V/V

- วิธีการทดลอง**
1. ทำการทดสอบการรับภาระโหลด 3 เฟส โดยการนำหม้อแปลง Main และ Teaser มาต่อแบบ T-T, V/V และใช้ความต้านทานเป็นโหลด (คือ power factor = 1) ดังรูปที่ 3.24 ,3.26 ในการทดสอบนี้ต้องปรับแรงดันทางด้านปฐมภูมิให้คงที่ตลอดเวลา
 2. ทำการทดสอบการรับภาระโหลด 2 เฟส โดยการนำหม้อแปลง Main และ Teaser มาต่อแบบ Scott connection และใช้ความต้านทานเป็นโหลด (คือ power factor = 1) ดังรูปที่ 3.25 ในการทดสอบนี้ต้องปรับแรงดันทางด้านปฐมภูมิให้คงที่ตลอดเวลา



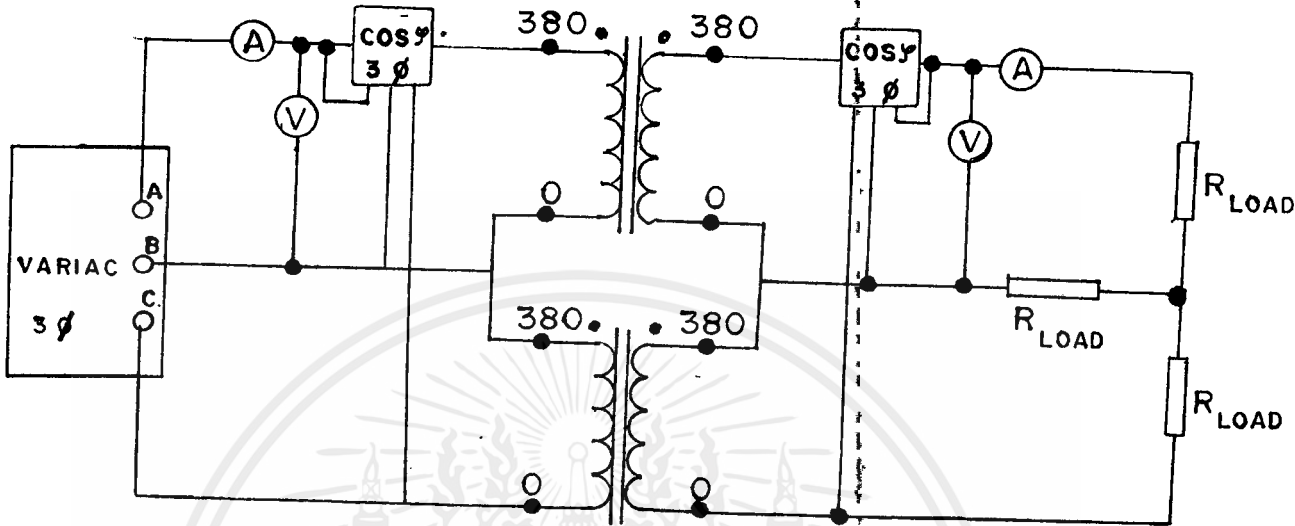
รูปที่ 3.24 แสดงการต่อหม้อแปลงแบบ T-T connection เพื่อทำทดสอบการรับภาระ โหลด 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แสดงการต่อหม้อแปลงแบบ Scott connection เพื่อทำการทดสอบการรับภาระโหลด 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 แสดงการต่อหม้อแปลงแบบ V/V connection เพื่อทำการทดสอบการรับภาระโหลด 3 เฟส

ตารางที่ 3.13 ผลการทดสอบ T-T connection Transformer

V_B (V)	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
V_C (V)	380	379	380	378	379	379	379	379	379	379	379	379
V_A (V)	379	379	380	379	379	379	379	379	379	376	378	379
I_A (A)	0.10	0.60	1.13	1.56	1.80	2.19	2.60	2.82	3.09	3.26	3.57	4.18
I_B (A)	0.09	0.60	1.15	1.60	1.80	2.20	2.63	2.83	3.10	3.28	3.73	4.17
I_C (A)	0.10	0.60	1.13	1.58	1.80	2.18	2.60	2.81	3.05	3.26	3.66	4.11
p.f. in	0.55	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
P_m (W)	32.6	392	753	1047	1178	1440	1722	1857	2034	2152	2447	2736
V_{ab} (V)	400	398	396	395	393	391	390	389	389	386	386	384

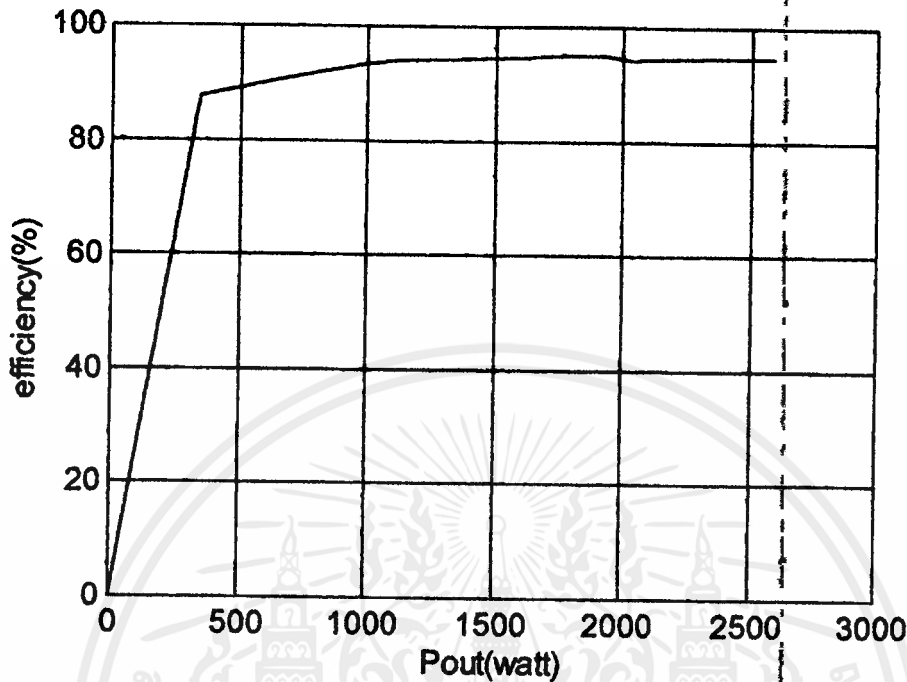
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.13 ผลการทดสอบ T-T connection Transformer (ต่อ)

V_{bc} (V)	399	397	394	391	390	389	386	385	384	382	380	379
V_{ca} (V)	399	398	390	391	389	388	385	383	383	379	380	377
I_a (A)	0	0.5	1.0	1.44	1.64	2.01	2.41	2.62	2.87	3.03	3.32	3.91
I_b (A)	0	0.5	1.0	1.43	1.63	2.01	2.42	2.62	2.87	3.04	3.47	3.90
I_c (A)	0	0.5	1.0	1.42	1.63	1.99	2.38	2.60	2.83	3.03	3.41	3.83
p. f load	0	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
P_{out} (W)	0	344	685	977	1108	1359	1633	1763	1931	2030	2317	2591
η (%)	0	87.6	90.9	93.2	94.0	94.3	94.8	94.9	94.9	94.3	94.6	94.6

- หมายเหตุ** - ค่าแรงดันสาย (Line) ที่ใช้ในการคำนวณค่า Power คือ V_{AB} และ V_{ab} เนื่องจากเราต้องการกำหนดค่าแรงดันคงที่ ที่ค่าหนึ่ง
- ค่ากระแสสาย ที่ใช้ในการคำนวณ Power จะใช้ค่ากระแสในสาย ที่มีค่าสูงสุดโดยการทดสอบ คือ I_B และ I_b
- $P_{in} = \sqrt{3} \times V_{AB} \times I_B \times p.f_{in}$
- $P_{out} = \sqrt{3} \times V_{ab} \times I_b \times p.f_{load}$



รูปที่ 3.27 กราฟแสดงการทดสอบการรับภาระโหลด 3 เฟส เมื่อค่อหม้อแปลงแบบ T-T connection

วิเคราะห์ผลการทดสอบ T-T connection

เมื่อนำหม้อแปลง Main และ Teaser มาค่อแบบ T-T connection ก็จะกลายเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แล้วทำการทดสอบการรับภาระโหลด จากนั้นนำผลการทดสอบมาเขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับเพาเวอร์เอาทพุท จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามกระแสโหลดจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถอธิบายได้ว่าหม้อแปลงมีค่าการสูญเสียในขดลวดเท่ากับการสูญเสียในแกนเหล็ก จากนั้นกราฟจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆตามสถานะกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้น ที่สถานะฟูลโหลดกระแสลดยมีค่าเท่ากับ 3.04 แอมป์ ซึ่งมีค่าตรงกับค่าที่ออกแบบ สามารถจ่ายเพาเวอร์เอาทพุทได้เท่ากับ 2030 วัตต์ (ค่าที่ออกแบบคือ 2000 วัตต์) ส่วนทางด้านปฐมภูมิ กระแสลดยมีค่าเท่ากับ 3.28 แอมป์ (ค่าที่ออกแบบคือ 3.38 แอมป์) ซึ่งค่ากระแสที่น้อยกว่านี้แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ตัวนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าการออกแบบ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 94.33 % (ค่าจากการออกแบบคือ 90 %) , แรงดันที่ขั้วมีค่าเท่ากับ 386 โวลท์ มากกว่าที่ออกแบบ 1.57 % (ค่าจากการออกแบบคือ 380 โวลท์) , แรงดันเรกิวเลชันจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 3.627 % ดังนั้นเราสามารถสรุปผลการทดสอบได้ว่าเมื่อนำหม้อแปลง Main และ Teaser มาค่อแบบ T-T connection สามารถจ่ายโหลดได้ตามที่เราต้องการ โดยที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและมีแรงดันเรกิวเลชันที่ดีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

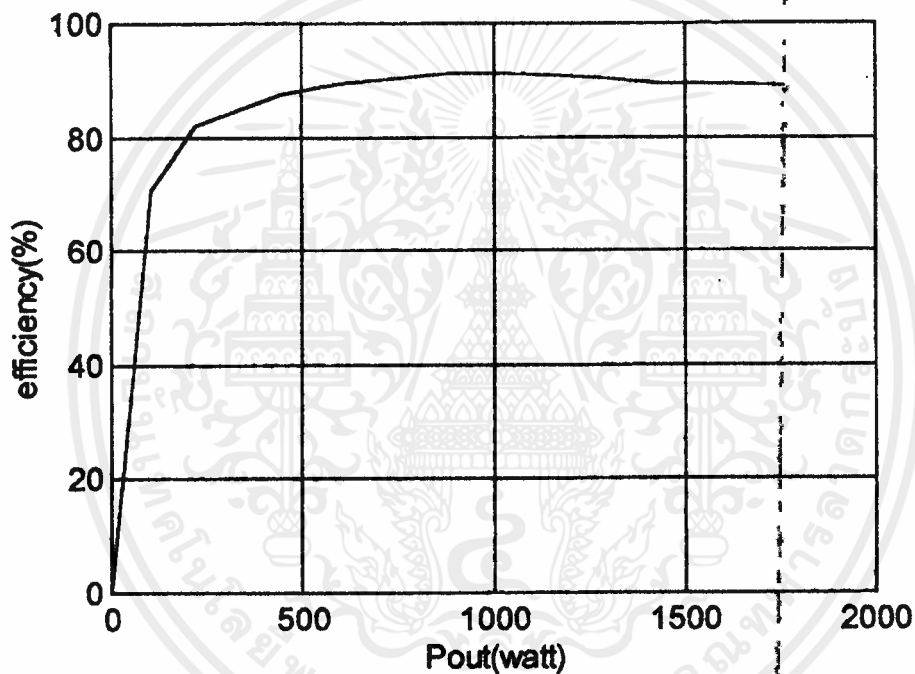
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.14 ผลการทดสอบ Scott connection Transformer

V_{AB} (V)	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
V_{BC} (V)	378	379	379	379	379	379	379	379	379	379	379
V_{CA} (V)	379	379	379	379	379	379	379	379	379	379	379
I_A (A)	0.09	0.24	0.41	0.76	1.00	1.45	1.74	2.15	2.44	2.67	3.05
I_B (A)	0.08	0.24	0.42	0.78	1.00	1.45	1.75	2.15	2.46	2.68	3.04
I_C (A)	0.09	0.25	0.42	0.78	1.01	1.47	1.75	2.16	2.45	2.66	3.01
p.f in	0.59	0.92	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
P_{in} (W)	34.9	152	271	509	661	963	1147	1415	1606	1743	1973
V_a (V)	230	230	229	228	227	226	225	224	223	222	221
V_b (V)	231	230	229	228	227	226	225	224	223	222	221
V_{ab} (V)	326	326	324	322	321	320	319	317	315	314	313
I_a (A)	0	0.24	0.5	1.01	1.34	2.00	2.39	2.98	3.89	3.70	4.18
I_b (A)	0	0.24	0.5	1.00	1.34	1.98	2.39	2.96	3.37	3.71	4.23
I_n (A)	0	0.33	0.70	1.40	1.90	2.80	3.37	4.17	4.70	5.20	5.93
P_a (W)	0	57.5	115	227	300	450	530	655	725	785	890
P_b (W)	0	50	107	220	292	430	515	625	712	775	870
P_{out} (W)	0	107	222	447	592	880	1045	1280	1437	1560	1760
η (%)	0	70.6	81.8	87.7	89.5	91.3	91.1	90.4	89.5	89.4	89.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเหตุ** - ค่าแรงดันสาย (Line) ที่ใช้ในการคำนวณค่า Power input คือ V_{AB} เนื่องจากเราต้องการกำหนดค่าแรงดันคงที่ ที่ค่าหนึ่ง
- ค่ากระแสสาย (Line) ที่ใช้ในการคำนวณ Power input จะใช้ค่ากระแสในสาย ที่มีค่าสูงสุด โดยการทดสอบ คือ I_c
 - $P_{in} = \sqrt{3} \times V_{AB} \times I_c \times p.f_{in}$
 - $P_{in} = P_a + P_b$



รูปที่ 3.28 กราฟแสดงการทดสอบการรับภาระโหลด 2 เฟส เมื่อต่อหม้อแปลงแบบ Scott connection

วิเคราะห์ผลการทดสอบ Scott connection Transformer

เมื่อนำหม้อแปลง Main และ Teaser มาต่อแบบ Scott connection เพื่อสร้างหม้อแปลงที่เปลี่ยนระบบไฟฟ้าจาก 3 เฟสเป็น 2 เฟส แล้วทำการทดสอบการรับภาระโหลด จากผลการทดสอบเราทำการเขียนกราฟระหว่าง ประสิทธิภาพ กับ เพาเวอร์เอาต์พุต ซึ่งจะได้ลักษณะกราฟเช่นเดียวกับการทดสอบที่ผ่านๆมา แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่สภาวะโหลดใกล้เคียงกัน โดยที่สภาวะใกล้เคียงกับโหลด กระแสเฟส (I_a) เท่ากับ 2.98 แอมป์ ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 90.4 % และมีกระแสทางด้านปฐมภูมิ(I_c)เท่ากับ 2.16 แอมป์ ซึ่งค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิสามารถเปรียบเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบค่าที่หาได้จากสูตรได้ ดังนี้ $\frac{2 \times I_a}{\sqrt{3} \times \eta \times \beta}$ โดยจากการออกแบบที่มี $\eta = 90\%$ และ $\beta = \frac{380}{220} = 1.727$ เพราะฉะนั้น $I_L = \frac{2 \times 2.98}{\sqrt{3} \times 0.9 \times 1.727} = 2.21$ แอมป์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบ ส่วนกระแส I_n ที่วัดได้จากการทดสอบก็คือ กระแสลอย นั้นเอง จากเฟสเซอร์ของแรงดันเมื่อเราต่อโหลดความต้านทานเราจะได้กระแสสาย (Line) = $I_L = \sqrt{2} \times I_p$ จากการทดสอบที่กระแส (I_a) = 2.98 แอมป์ เพราะฉะนั้นกระแสสายเท่ากับ $\sqrt{2} \times 2.98 = 4.21$ แอมป์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบคือ 4.17 แอมป์ ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกันมาก และ แรงดันสายก็สามารถวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับกระแสคือ $V_L = \sqrt{2} \times V_p$ โดยที่ $V_p = V_a = 224$ โวลต์ จะได้ $V_L = \sqrt{2} \times 224 = 316.78$ โวลต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบเช่นกันคือ 317 โวลต์

ตารางที่ 3.15 ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V/V

V_{AB} (V)	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
V_{BC} (V)	383	383	383	382	382	382	382	381	377	377	377
V_{CA} (V)	381	381	381	381	381	381	381	381	376	376	376
I_A (A)	0.08	0.23	0.25	0.28	0.33	0.41	0.56	1.07	2.79	3.09	3.58
I_B (A)	0.07	0.28	0.31	0.34	0.37	0.44	0.60	1.03	2.95	3.28	3.82
I_C (A)	0.08	0.18	0.20	0.23	0.27	0.35	0.52	0.98	2.8	3.13	3.65
p.f in	0.6	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1	1	1	1
P_{in} (W)	35.5	145	160	163	196	260	371	676	1941	2159	2360
V_{ab} (V)	401	401	399	398	398	398	398	395	387	383	379
V_{bc} (V)	405	405	404	404	403	402	402	401	401	393	390
V_{ca} (V)	404	403	403	403	403	401	400	396	378	374	379
I_a (A)	0	0.13	0.15	0.18	0.22	0.29	0.45	0.88	2.56	2.89	3.27
I_b (A)	0	0.14	0.16	0.19	0.23	0.30	0.45	0.87	2.67	3.04	3.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.15 ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V/V (ต่อ)

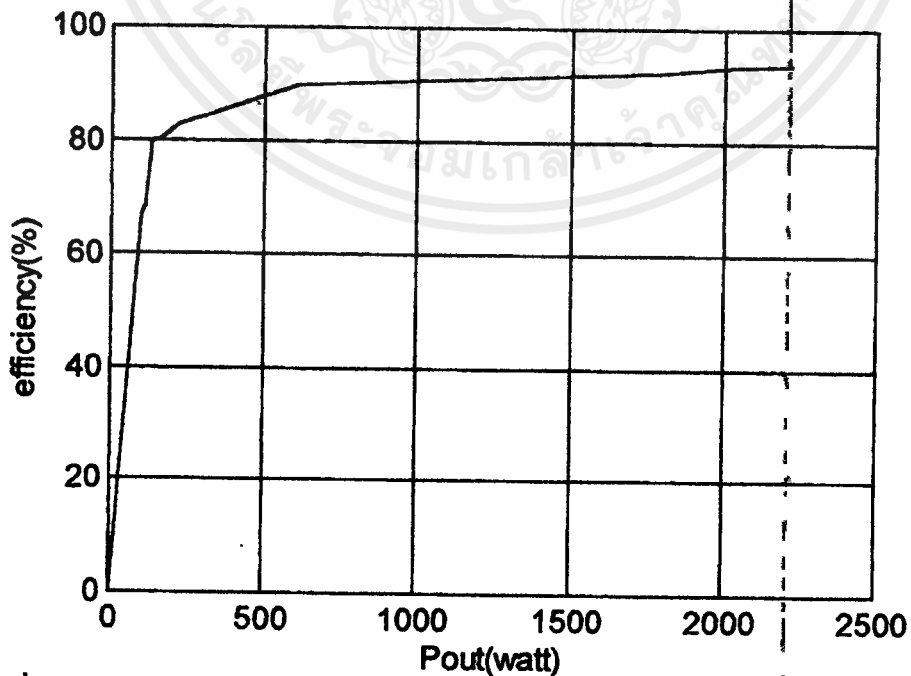
I_c (A)	0	0.13	0.15	0.18	0.22	0.30	0.46	0.91	2.62	2.97	3.40
p.f load	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P_{out} (W)	0	97	110	130	157	215	315	608	1793	2017	2215
η (%)	0	66.8	68.7	79.7	80.1	82.7	84.5	89.9	92.3	93.4	93.8

หมายเหตุ - ค่าแรงดันสาย (Line) ที่ใช้ในการคำนวณค่า Power คือ V_{AB} และ V_{ab} เนื่องจากเราต้องการกำหนดค่าแรงดันคงที่ ที่ค่าหนึ่ง

- ค่ากระแสสาย ที่ใช้ในการคำนวณ Power จะใช้ค่ากระแสในสาย ที่มีค่าสูงสุดโดยการทดสอบ คือ I_B และ I_b

$$- P_{in} = \sqrt{3} \times V_{AB} \times I_B \times p.f_{in}$$

$$- P_{out} = \sqrt{3} \times V_{ab} \times I_b \times p.f_{load}$$



รูปที่ 3.29 กราฟแสดงการทดสอบการรับภาระโหลด 3 เฟส เมื่อต่อหม้อแปลงแบบ V/V connection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดสอบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V/V

เมื่อนำหม้อแปลงมาต่อแบบ V/V ก็จะกลายเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แล้วทำการทดสอบการรับภาระโหลด จากนั้นนำผลการทดสอบมาเขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพ (η) กับเพาเวอร์เอทพวท จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามกระแสโหลดจนถึงจุดๆหนึ่ง ซึ่งเป็นจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถอธิบายได้ว่าหม้อแปลงมีค่า การสูญเสียในขดลวดเท่ากับการสูญเสียในแกนเหล็ก จากนั้นกราฟจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ตามสถานะกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้น ที่สถานะฟูลโหลดกระแสลดยามีค่าเท่ากับ 3.04 แอมป์ ซึ่งมีค่าตรงกับค่าที่ออกแบบสามารถจ่ายเพาเวอร์เอทพวทได้เท่ากับ 2017 วัตต์ (ค่าที่ออกแบบคือ 2000 วัตต์) ส่วนทางด้านปฐมภูมิ กระแสลดยามีค่าเท่ากับ 3.28 แอมป์ (ค่าที่ออกแบบคือ 3.38 แอมป์) ซึ่งค่ากระแสที่น้อยกว่านี้แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ตัวนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าการออกแบบ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 93.42 % (ค่าจากการออกแบบคือ 90 %) , แรงดันที่ขั้วมีค่าเท่ากับ 383 โวลต์ มากกว่าที่ออกแบบ 0.58 % (ค่าจากการออกแบบคือ 380 โวลต์) , แรงดันเรกิวเลชันจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 4.4386 % ดังนั้นเราสามารถสรุปผลการทดสอบได้ว่าเมื่อนำหม้อแปลงมาต่อแบบ V/V สามารถจ่ายโหลดได้ตามที่เราต้องการ โดยที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและมีแรงดันเรกิวเลชันที่ดี

บทที่ 4

บทสรุปปริญญานิพนธ์

ในส่วนแรกของปริญญานิพนธ์ แสดงถึงวิธีการ และ หลักการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงต่ำ จากนั้นก็ทำการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบ เพื่อออกแบบหม้อแปลงที่ต่อแบบ V, Scott และ T ตามรายละเอียดที่กำหนดไว้คือ 2000 VA ,380/380 V, $\eta = 90\%$ สำหรับการต่อหม้อแปลงแบบ V/V ,T และ 380/220 V , 3 phase ~ 2 phase สำหรับการต่อหม้อแปลงแบบ Scott และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้น เพื่อช่วยในการออกแบบหม้อแปลงดังกล่าว ซึ่งสามารถคำนวณและหาข้อมูลต่างๆที่จำเป็นในการสร้างหม้อแปลง และยังวิเคราะห์ผลการออกแบบในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงก่อนการสร้างอีกด้วย ดังนั้นจึงสรุปผล ในลักษณะที่เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลงที่สร้างขึ้น กับค่าที่ได้คำนวณไว้ก่อนแล้วในการออกแบบว่ามีค่าตรงกันหรือไม่ ดังนี้ สำหรับหม้อแปลง Main ค่าที่ได้จากการออกแบบคือ $R_1 = 1.85107 \Omega$, $R_2 = 2.4157 \Omega$, $X_1 = 1.198794 \Omega$, $X_2 = 1.3291 \Omega$, $R_c = 6300.073 \Omega$, $X_m = 4733.163 \Omega$, Core loss = 22.92 watt, Copper loss = 43.419 watt, $\eta = 90\%$ และ $\%Reg^n = 5.534355 \%$ ค่าที่ได้จากการทดสอบคือ $R_1 = 1.7932 \Omega$, $R_2 = 2.3541 \Omega$, $X_1 = 1.2235 \Omega$, $X_2 = 1.3585 \Omega$, $R_c = 7044.864 \Omega$, $X_m = 5358.376 \Omega$, Core loss = 20.5 watt, copper loss = 35 watt, $\eta = 95.019 \%$ และ $\%Reg^n = 3.627 \%$

สำหรับหม้อแปลงที่จะนำมาต่อแบบ V/V ค่าที่ได้จากการออกแบบคือ $R_1 = 1.85107 \Omega$, $R_2 = 2.4157 \Omega$, $X_1 = 1.198794 \Omega$, $X_2 = 1.3291 \Omega$, $R_c = 6300.073 \Omega$, $X_m = 4733.163 \Omega$, Core loss = 22.92 watt, Copper loss = 43.419 watt, $\eta = 90\%$ และ $\%Reg^n = 5.534355 \%$ ค่าที่ได้คือ $R_1 = 1.9136 \Omega$, $R_2 = 2.3987 \Omega$, $X_1 = 1.2135 \Omega$, $X_2 = 1.3485 \Omega$, $R_c = 6261.9 \Omega$, $X_m = 5312.376 \Omega$, Core loss = 23.6 watt, copper loss = 44.2 watt, $\eta = 93.42 \%$ และ $\%Reg^n = 4.4386 \%$

จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ส่วนหม้อแปลง Teaser จะได้ผลในลักษณะเดียวกับหม้อแปลง Main เนื่องจากมีรายละเอียดเหมือน จากนั้นนำหม้อแปลงมาต่อแบบ V/V, Scott และ T ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับรายละเอียดที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นต้น โดยมีผลจากการทดสอบดังนี้

เมื่อต่อแบบ T : $P_{out} = 2030.42 \text{ watt}$, $V_1 / V_2 = 380 / 386$, $I_2 = 3.04 \text{ A}$ และ $\eta = 94.33 \%$

เมื่อต่อแบบ Scott (3 เฟส เป็น 2 เฟส) : $V_1 / V_2 = 380 / 224 \text{ V}$ โดย $V_L = 317 \text{ V}$ และ $V_p = 224 \text{ V}$ ซึ่งตรงตามที่ทฤษฎีว่าไว้คือ $V_L = \sqrt{2} V_p$

เมื่อต่อแบบ V : $P_{out} = 2017 \text{ watt}$, $V_1 / V_2 = 380 / 383$, $I_2 = 3.04 \text{ A}$ และ $\eta = 93.42 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
WIRE GAUGES TABLE ^[7]

ตารางที่ ก.1 WIRE GAUGES

Gauge S.W.G.	diameter (mm.)	Sectional area (mm ²)
7/0	12.700	126.7
6/0	11.786	109.1
5/0	10.973	94.56
4/0	10.160	81.07
3/0	9.440	70.12
2/0	8.839	61.36
0	8.230	53.19
1	7.629	45.60
2	7.010	39.60
3	6.401	32.18
4	5.893	27.27
5	5.385	22.77
6	4.877	18.68
7	4.470	15.70
8	4.064	12.97
9	3.685	10.52
10	3.251	8.302
11	2.946	6.818
12	2.642	5.481
13	2.337	4.289
14	2.032	3.243
15	1.829	2.627
16	1.626	2.075
17	1.422	1.589

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

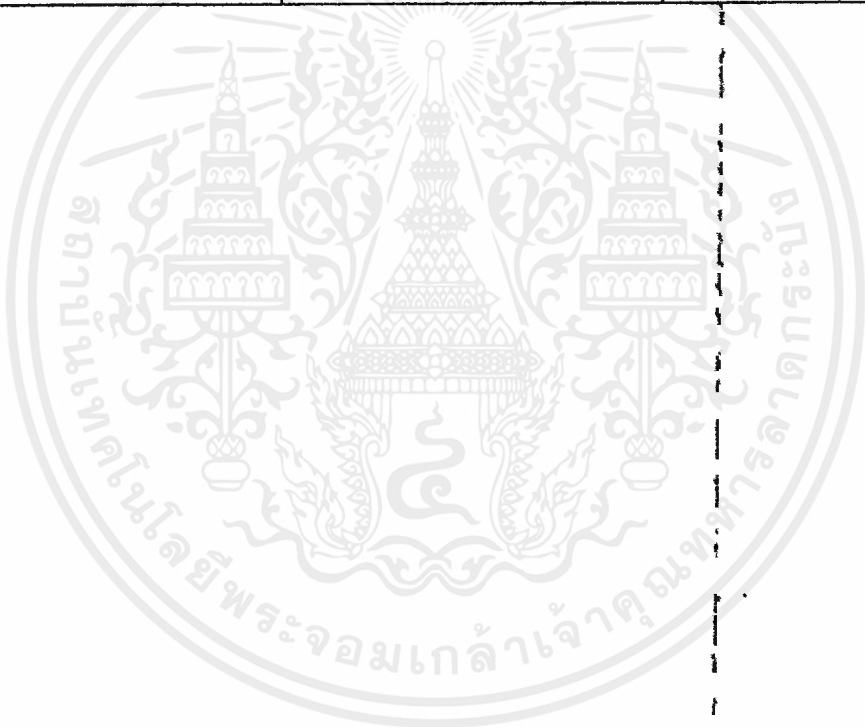
ตารางที่ ก1. WIRE GAUGES (ต่อ)

Gauge S.W.G.	diameter (mm.)	Sectional area (mm ²)
18	1.219	1.167
19	1.016	0.8107
20	0.9144	0.6576
21	0.8128	0.5189
22	0.7112	0.3973
23	0.6096	0.2919
24	0.5583	0.2452
25	0.5080	0.2027
26	0.4572	0.1642
27	0.4166	0.1363
28	0.3759	0.1110
29	0.3454	0.09372
30	0.3150	0.07791
31	0.2946	0.06818
32	0.2743	0.05913
33	0.2540	0.05067
34	0.2337	0.04289
35	0.2134	0.03575
36	0.1930	0.02927
37	0.1727	0.02343
38	0.1524	0.01824
39	0.1321	0.01370
40	0.1219	0.01167
41	0.118	0.009810
42	0.1016	0.008107
43	0.09114	0.006567
44	0.08138	0.005819

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก1. WIRE GAUGES (ต่อ)

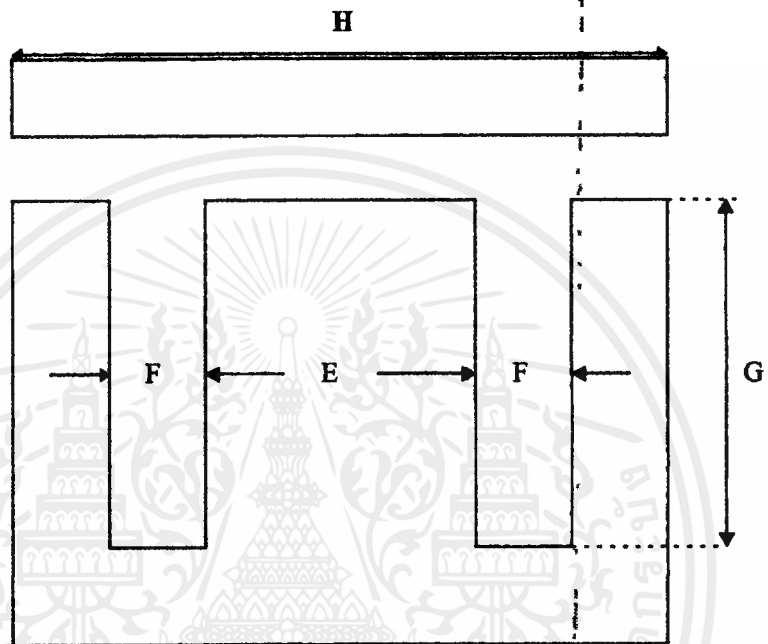
Gauge S.W.G.	diameter (mm.)	Sectional area (mm ²)
45	0.07113	0.003973
46	0.06096	0.002929
47	0.05080	0.002027
48	0.04064	0.001297
49	0.03048	0.0007297
50	0.02540	0.0005067



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

TABLE OF DIMENSION OF EI - CORE



ตารางที่ ข. 1 dimension of EI - core

EI number	F (mm)	E (mm)	G (mm)	H (mm)
14	3.5	3.5	10	14
16	4	4	10	16
19	4	5	10	19
24	6	6	12	24
28	6	8	17	28
35	7.2	9.6	19.5	35
40	7.45	12.7	20	40
41	8	13	21	41
48	8	16	24	48
54	9	18	27	54
57	9.5	19	28.5	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนิตยสารได้เฉพาะเพื่อลดราคาค่าพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 1 dimension of EI - core (ต่อ)

EI number	F (mm)	E (mm)	G (mm)	H (mm)
60	10	20	30	60
66	11	22	33	66
76.2	12.7	25.4	38.1	76.2
85.8	14.3	28.6	42.9	85.5
95	15	30	47	95
96	16	32	48	96
105	17.5	35	52.5	105
114	19	38	57	114
133.2	22.2	44.4	66.6	133.2
152	25.4	50.8	76.2	152.4
190	31.95	63.75	95.3	190.5
225	38.1	76	114.65	228.6
245	44.5	88.9	134.05	247.5
300	50.75	101.4	152.6	304.8

หมายเหตุ 1. ข้อมูลของ dimension ของแกนเหล็กต่างๆ ได้มาจาก

1.1 ร้านกรุงธนวิทยุ

955/6-7 ที่แยกบ้านแขก ถ. อิศรภาพ เขต ธนบุรี กรุงเทพฯ 10600

โทรศัพท์ 466-4173 , 465-2495 , 465-3350

โทรสาร 587-5432

1.2 THANONSAK TRADING CO;LTD.

98/14 ตรอกหมู่บ้านเขตขยายใหม่ หมู่ 3 ถ. ประชาชื่น แขวง บางซื่อ

เขต บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์ 585-6997

โทรสาร 585-5432

2. ราคาของแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 40 ถึง 43 บาท / กิโลกรัม (ยังไม่ได้รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%)

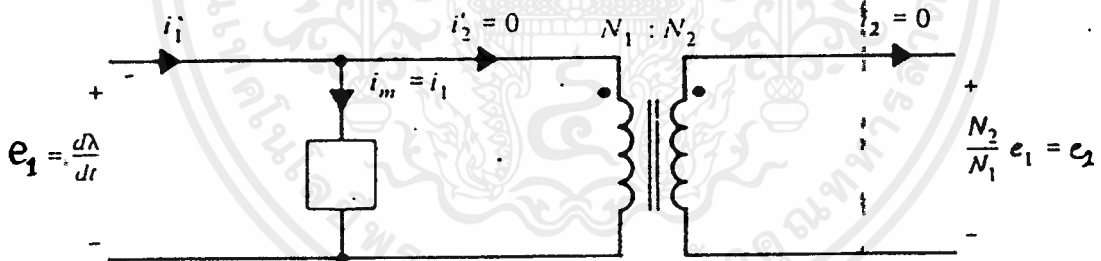
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การทดสอบแกนเหล็กโดยการใช้ B-H curve measurement circuit box

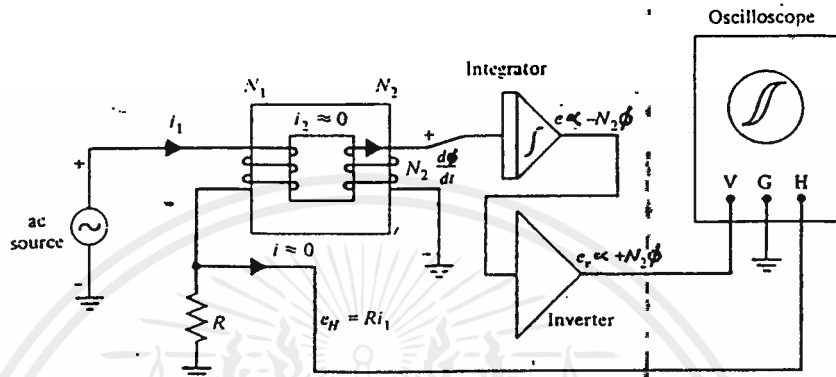
บทนำ [8]

เนื่องจากการอิมิตัวของแกนเหล็ก นำมาซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นของ B กับ H ซึ่งบ่อยครั้งที่ เราไม่สามารถที่จะตัดความไม่เป็นเชิงเส้นทิ้งได้ ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงกำลัง เราควรจะ รู้ว่าวัสดุที่เรานำมาทำเป็นแกนเหล็กของหม้อแปลง จะอิมิตัวที่ค่า B เท่าไร เพื่อที่จะได้ใช้ค่า B ที่ เหมาะสมในการออกแบบหม้อแปลงกำลัง ซึ่งเราสามารถหาค่าของ B นี้โดยอาศัย B-H curve ซึ่งถ้าเป็นแกนเหล็กที่เราสั่งซื้อจากต่างประเทศเราก็จะได้ B-H curve มาด้วย แต่เป็นแกนเหล็กที่ ทำในประเทศเราจะต้องนำแกนเหล็กมาทดสอบ B-H curve เอง



รูปที่ ก.1 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกำลัง เมื่อเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ และไม่คิด series impedance

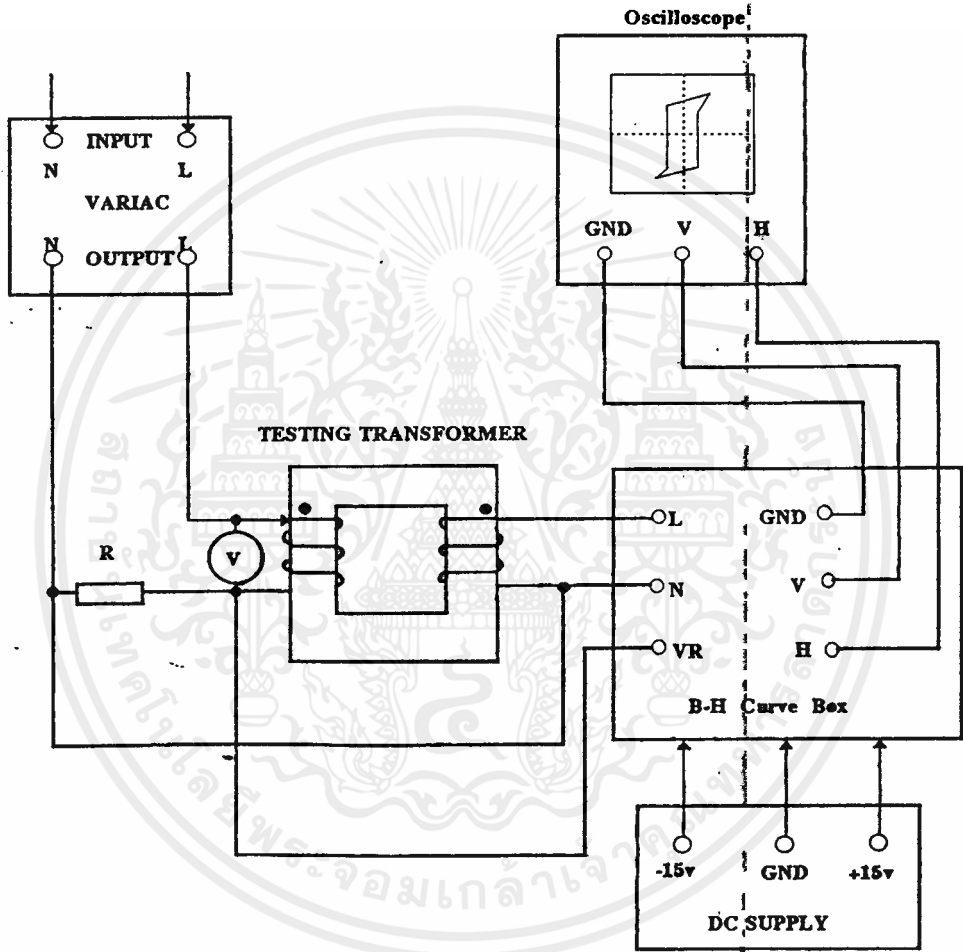
จากวงจรสมมูลรูปที่ ก.1 ค่าของ impedance ใน shunt branch จะมีค่าที่แตกต่างกันไป ตามวัสดุ ที่นำมาเป็นแกนเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดการอิมิตัวของแกนเหล็กปรากฏการณ์ hysteresis จะเกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของ B-H (หรือ สมมูลกับ λ กับ I) โดยที่ λ คือ flux linkages ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 2 วงจรการทดลองหา curve ของ λ กับ I สำหรับหม้อแปลง

จากรูปที่ ค. 2 เป็นวงจรที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหา B-H curve ของแกนเหล็ก ที่นำมาใช้ทำหม้อแปลง ซึ่งในการปฏิบัติจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเสียเวลาในการต่อวงจรแต่ละครั้ง เพื่อที่จะวัด B-H curve ซึ่งการต่อวงจรในแต่ละครั้งอาจจะเกิดการผิดพลาดและ การชำรุดเสียหายของ อุปกรณ์ได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกและความถูกต้อง ในการใช้งานมากขึ้นโดยใน B-H curve measurement circuit ได้ทำการต่อวงจร Integrator และ Inverter เอาไว้ ซึ่งในส่วน ของวงจร Integrator

เราได้อาจทำ selector switch ขึ้นมาเพื่อให้สามารถเลือก gain ของวงจร Integrator ได้ โดยเป็นแบบคงที่ หรือเป็นแบบปรับค่าได้ ที่ทำเช่นนี้เป็นเพราะว่าในบางครั้ง สัญญาณแรงดันที่วัด มีค่าต่ำเกินไป ซึ่งเราสามารถปรับ gain ของ Integrator ให้มีค่าสูงเพื่อให้เป็น B-H curve ที่จอ Oscilloscope ได้ดีขึ้น ดังนั้นเราสามารถเขียนวงจร B-H curve โดยใช้ B-H curve measurement circuit ได้ตามรูปที่ ค. 3



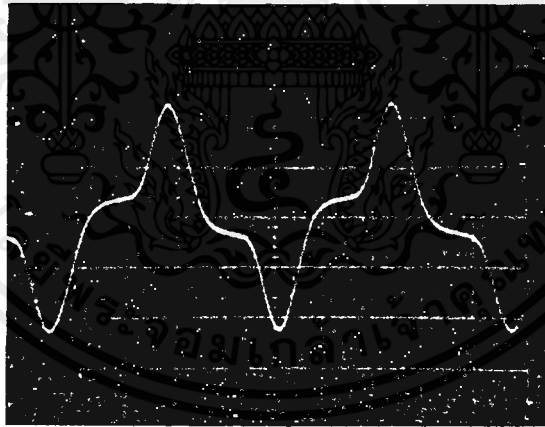
รูปที่ ค.3 วงจรวัด B-H curve โดยใช้ B-H curve measurement circuit

หมายเหตุ Resistor (R) ที่ใช้ในวงจรควรมีค่าความต้านทานต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ต้องเป็น R ที่มีกำลังวัตต์ค่อนข้างสูงด้วย เพราะเมื่อป้อนแรงดันที่ค่าพิกัด ค่ากระแส I_1 หรือ Exciting current จะมีค่าสูงมาก ดังนั้นเราขอแนะนำให้ใช้ R ที่มีค่าความต้านทานต่ำ แต่ทนกำลังวัตต์สูงหลายๆ ค่ามาต่อขนานกัน ซึ่งเป็นวิธีที่เราใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 การคำนวณหาค่าต่างๆจาก hysteresis loop บนจอ oscilloscope

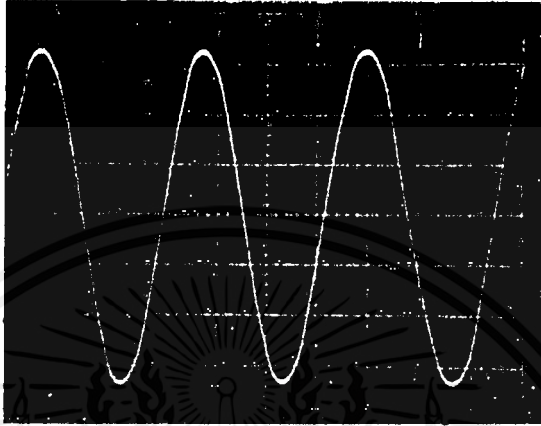
เมื่อเราทำการวัด B-H curve ของแกนเหล็ก โดยการต่อวงจรตามรูปที่ ค.3 แล้วทำการป้อนแรงดันให้กับหม้อแปลงทดสอบทีละขั้น (ขั้นละ 5 volts เป็นต้น) จากนั้นอ่านค่าแรงดันทางแกน X และแกน Y จาก Oscilloscope แล้วบันทึกผล ทำเช่นนี้แล้วปรับแรงดันทีละขั้นจนถึงแรงดันพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ หรือ อาจจะเกินแรงดันพิกัดไปเล็กน้อย (ประมาณ 10 %) ก็ได้ ซึ่งเราจะได้กราฟ hysteresis loop ออกมาที่จอ Oscilloscope ตามค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป แต่ค่าต่างๆที่เราวัดบนจอ Oscilloscope นั้นจะเป็นค่าของแรงดัน ดังนั้น เราจึงต้องแปลงค่าที่จุดยอดของ hysteresis loop ทั้งแกน X และ Y ให้เป็นค่า B และ H ที่ค่าแรงดันต่างๆเพื่อจะทำให้เราทราบว่าแกนเหล็กที่เราทดสอบนั้น จะอิ่มตัวที่ค่า B ประมาณเท่าไร และ ค่า H ของแกนเหล็กในขณะต่างๆมีค่าเป็นเท่าไรด้วย



รูปที่ ค.4 ภาพกระแสกระตุ้นของหม้อแปลง (Exciting current) ที่ได้จาก Oscilloscope

$$\text{Time} = 2 \frac{\text{milli sec}}{\text{division}} \quad , \quad \text{Volt} = 10 \frac{\text{volt}}{\text{division}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 ภาพของเส้นแรงแม่เหล็กของหม้อแปลงที่ได้จาก Oscilloscope

$$\text{Time} = 2 \frac{\text{milli sec}}{\text{division}}, \quad \text{Volt} = 20 \frac{\text{millivolt}}{\text{division}}$$



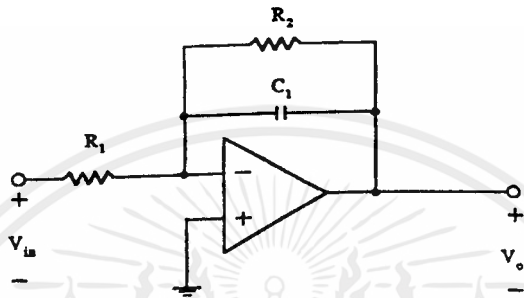
รูปที่ ค.6 ภาพของเส้นแรงแม่เหล็กในฟังก์ชันของกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงที่ได้จาก

$$\text{Oscilloscope} \quad V_x = 50 \frac{\text{millivolt}}{\text{division}}, \quad V_y = 2 \frac{\text{volt}}{\text{division}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรที่ใช้ในการวัด B-H curve จะประกอบด้วยวงจร Integrator และวงจร Inverter ซึ่งจะนำมา cascade กันเพื่อที่จะทำการวัดค่า B_m โดย gain การขยายรวม (Total gain) จะเกิดจากผลคูณของ gain ของวงจร Integrator และวงจร Inverter ซึ่ง Total gain ของวงจร ได้ดังนี้

วงจร Integrator



คิดโดยใช้ Transfer function ดังนี้

$$\frac{-V_{in}}{R_1} + \frac{-V_{o1}}{\left(\frac{R_2/sC_1}{R_2 + sC_1}\right)} = 0$$

$$\frac{-V_{in}}{R_1} + \frac{-V_{o1}}{\left(\frac{R_2}{1 + R_2sC_1}\right)} = 0$$

$$\frac{-V_{in}}{R_1} + \left(\frac{1 + R_2sC_1}{R_2}\right) V_{o1} = 0$$

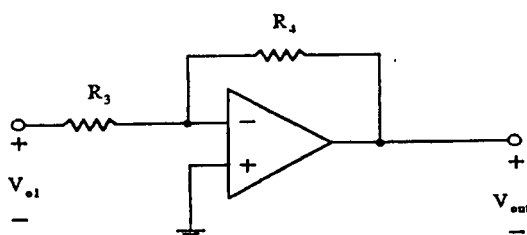
$$\frac{V_{o1}}{V_{in}} = \frac{-R_2}{R_1 + R_1R_2sC_1}$$

แต่ $s = j\omega = j2\pi f$ ดังนั้นเราจะ ได้ Gain ของวงจรเป็น

$$\text{Gain}_1 = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (R_1R_2\omega C_1)^2}}$$

$$\therefore \text{Gain} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (R_1R_2 2\pi f C_1)^2}} \text{ มี Phase shift} = 180^\circ$$

วงจร Inverter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดโดยใช้ Transfer function ดังนี้

$$\frac{V_{o1}}{R_3} - \frac{V_{out}}{R_4} = 0$$

$$\frac{V_{out}}{V_{o1}} = \frac{-R_4}{R_3}$$

$$\therefore \text{Gain} = \frac{R_4}{R_3} \quad \text{มี Phase shift} = 180^\circ$$

ดังนั้นจะได้ $\text{Total Gain} = \text{Gain}_1 \times \text{Gain}_2$

$$= \frac{R_2 R_4}{R_3 \sqrt{R_1^2 + (R_1 R_2 2\pi f C_1)^2}} \quad \text{มี Phase shift} = 180^\circ$$

ซึ่งจะได้ว่า $V_{out} = \text{Total Gain} \times V_{in}$

$$\therefore V_{out} = \frac{R_2 R_4}{R_3 \sqrt{R_1^2 + (R_1 R_2 2\pi f C_1)^2}} \times V_{in}$$

เมื่อ V_{out} = คือ แรงดันยอดที่วัดได้จาก Oscilloscope (V_y)

V_{in} = คือ แรงดันยอดทางด้าน Secondary ของหม้อแปลง (E_{2max})

ค.1.1 การคำนวณหาค่า Flux density (B)^[9]

จากวงจรวัด B-H ตามรูปที่ ค.2 เมื่อแรงดัน e_2 ของหม้อแปลงที่ทดสอบ ($e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$) ผ่านวงจร Integrator จะได้สมการแรงดันเป็น $e_2 = -N_2 \phi$ ซึ่งเครื่องหมายลบแสดงถึง phase shift เป็น 180° ดังนั้นจึงต้องผ่านวงจร Inverter เพื่อให้ได้ phase shift เป็น 0° ($e_2 = N_2 \phi$) ซึ่งอยู่ในรูปจะมี gain เป็น 1 และยังไม่สามารถ calibrate เพื่อให้อ่านค่าได้เป็น B_m ดังแสดงเราสามารถ Derive เพื่อหาสูตรที่จะ calibrate ค่าให้อ่านค่า B_m ได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{แต่} \quad e_2 = E_{2mx} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\therefore e_2 = E_{2mx} \sin(\omega t + \alpha) = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$E_{2mx} \sin(\omega t + \alpha) dt = N_2 d\phi$$

ทำการ Integrated ทั้งสองข้างจะได้

$$\frac{-E_{2mx}}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) + \phi_c = N_2 \phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{-E_{2\max}}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) + \phi_c = N_2 \phi$$

ในที่นี้เราพิจารณาให้ $\alpha = 0$ และ ϕ_c เป็นค่าคงที่ของการ Integrate ซึ่งเป็นทรานเซียนส์ฟลักซ์ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจาก Eddy current ซึ่งเราจะละทิ้งได้ ฉะนั้นจะได้

$$\frac{-E_{2\max}}{\omega} \cos(\omega t) = N_2 \phi$$

$$\phi = \frac{-E_{2\max}}{N_2 \omega} \cos(\omega t)$$

ซึ่งเครื่องหมายลบในที่นี้หมายถึง Phase shift ของ ϕ ซึ่งจะได้

$$\phi = \frac{-E_{2\max}}{N_2 \omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\therefore \phi = \frac{-E_{2\max}}{N_2 \omega}$$

แต่ $\phi_{\max} = B_{\max} \times A$

$$\therefore B_{\max} = \frac{\phi_{\max}}{A} = \frac{E_{2\max}}{N_2 A \omega}$$

แต่ค่าที่อ่านได้จาก Oscilloscope คือ V_y ซึ่งได้รวม Gain ของวงจรเข้าไปแล้วซึ่ง

$$V_y = \text{Total Gain} \times E_{2\max}$$

$$\therefore E_{2\max} = \frac{V_y}{\text{Total Gain}}$$

ดังนั้น

$$B_{\max} = \frac{V_y}{\text{Total Gain} \times N_2 A \omega}$$

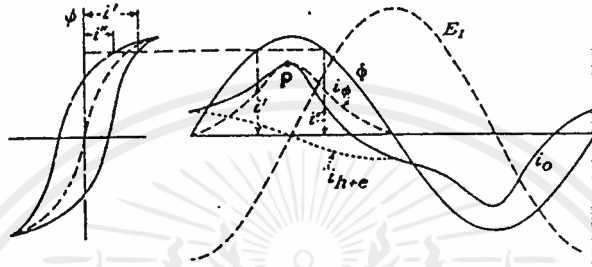
$$\therefore B_m = B_{\max} = \frac{V_y}{N_2 A \omega} \times \frac{R_3 \sqrt{R_1^2 + (R_1 R_2 2\pi f C_1)^2}}{R_2 R_4} \quad [\text{ค.1}]$$

ก. 1.2 การคำนวณหาค่า Magnetizing force (H) [s]

ก่อนที่เราจะคำนวณหาค่า H_{peak} ของแกนเหล็กจาก OSCILLOSCOPE เราต้องมาวิเคราะห์รายละเอียดของกระแส EXCITING ที่วัดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงดังรูปที่ ค. 7 กันก่อน จากรูปจะเห็นว่ากระแส EXCITING (I_o) จะเกิดผลรวมของกระแส MAGNETING (I_m หรือ I_m) และกระแสที่สร้าง CORE LOSS (I_{h+c} หรือ I_c) ซึ่งที่จุดยอดของกระแส EXCITING (จุด P) กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIZING มีค่าเท่ากับกระแส EXCITING พอดี ดังนั้นจากรูปจึงทำให้เราสรุปได้ว่า ค่ากระแสยอดที่อ่านได้จาก OSCILLOSCOPE คือ ค่ากระแส MAGNETIZING และเราสามารถจะนำมาใช้การคำนวณหาค่า $H (H_{peak})$ ได้โดยตรง



รูปที่ ๗ แสดงลักษณะของกระแส EXCITING , กระแส MAGNETIZING และ กระแสที่ทำให้เกิด CORE LOSS

จากวงจรรูปที่ ๓.๒ เนื่องจาก OSCILLOSCOPE ไม่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นเราจึงใช้การวัดแรงดันตกคร่อม RESISTOR แทนแล้วเราจึงนำ CALIBRATE เพื่อหา $H (H_{peak})$

$$\text{จาก } I_{m(max)} = I_{o(max)} = \frac{V}{R}$$

ซึ่ง v ในที่นี้ คือ v_x ที่อ่านได้จาก OSCILLOSCOPE

$$\text{จาก } H = \frac{N_1 I_{m(max)}}{RL}$$

โดยที่ $L = \text{MEAN MAGNETIC PATH LENGTH}$ ของแกนเหล็ก

$$\text{จะได้ } H_{peak} = \frac{N_1 V_x}{RL} \quad [\text{ ค. ๒ }]$$

ก. 1.3 การคำนวณหาค่า HYSTERESIS LOSS ของแกนเหล็ก ⁽³⁾

จากทฤษฎีที่กล่าวไว้ตอนต้น เราทราบว่าพื้นที่ใน HYSTERESIS LOOP แสดงถึงพลังงานส่วนหนึ่งที่สูญเสียไปในแกนเหล็ก หรือ ส่วนหนึ่งของ CORE LOSS นั้นเอง (CORE LOSS = HYSTERESIS + EDDY CURRENT LOSS) ดังนั้นเราเมื่อเราป้อนแรงดันเข้าไปในหม้อแปลงทดสอบจนถึงแรงดันพิกัดของหม้อแปลงแล้ววัด B - H CURVE เราจะได้ HYSTERESIS LOOP ที่แสดงถึง HYSTERESIS LOSS ของหม้อแปลงตัวนั้น ซึ่งเราสามารถวัดพื้นที่บริเวณหนึ่งที่เรียกว่า POLAR PLANIMETER แล้วนำพื้นที่ ที่วัดได้นี้มาทำการคำนวณหาค่า HYSTERESIS LOOP ของหม้อแปลงได้ดังนี้

จาก $W = \int e_1 I_m dt$

แต่ $e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$ และ $I_m = \frac{HL}{N_1}$

$$\therefore W = \int (N_1 \times \frac{HL}{N_1} \times \frac{d\phi}{dt}) dt$$

$$W = \int HL d\phi$$

แต่ $\phi = B \times A$

$$\therefore W = \int HLA dB$$

$$W = LA \int HdB$$

จาก $P = W \times f$

$$P = fLA \int HdB$$

แต่ $H = \frac{N_1 V_x}{RL}$ และ $dB = \frac{dV_y}{\text{Total Gain} \times N_2 A \omega}$

$$\therefore P = fLA \left(\frac{N_1}{RL} \right) \left(\frac{1}{\text{Total Gain} \times N_2 A \omega} \right) \int V_x dV_y$$

$$P = \frac{1}{\text{Total Gain} \times R \times \omega} \times \frac{N_1}{N_2} \times \int V_x dV_y$$

แต่ $\int V_x dV_y =$ พื้นที่ของ HYSTERESIS LOOP (หน่วย CM^2) \times SCALE ของ V_x (หน่วย $\frac{\text{Volt}}{\text{Division}}$) \times SCALE ของ V_y (หน่วย $\frac{\text{Volt}}{\text{Division}}$)

$$\therefore P = \text{พื้นที่ของ HYSTERESIS LOOP (หน่วย } CM^2 \text{)} \times \text{SCALE ของ } V_x \text{ (หน่วย } \frac{\text{Volt}}{\text{Division}} \text{)} \times \text{SCALE ของ } V_y \text{ (หน่วย } \frac{\text{Volt}}{\text{Division}} \text{)} \times \frac{1}{\text{Total Gain} \times R \times \omega} \times \frac{N_1}{N_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore P = \text{พื้นที่ของ HYSTERESIS LOOP (หน่วย CM}^2\text{)} \times \text{SCALE ของ } V_x \left(\text{หน่วย } \frac{\text{Volt}}{\text{Division}} \right) \times \text{SCALE ของ } V_y \left(\text{หน่วย } \frac{\text{Volt}}{\text{Division}} \right) \times \frac{1}{\text{Total Gain} \times R \times 2\pi} \times \frac{N_1}{N_2} \quad [\text{ก.3}]$$

ก. 1.4 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าของ B_m , H_{peak} และ Hysteresis loss ของแกนเหล็ก

ในการทดสอบแกนเหล็กเพื่อหาค่าของ B_m , H_{peak} และ Hysteresis loss ของแกนเหล็กนั้นเราสามารถทำได้โดยการทดลองออกแบบหม้อแปลงทดสอบ ขึ้นมาโดยออกแบบให้มีขนาดพอเหมาะ แรงดันทางด้านทุติยภูมิควรมีแรงดันไม่เกิน 15 Volt เพื่อที่จะได้ใช้กับ B - H curve measurement circuit ได้ (เพราะ Op - Amp อิมตัวที่แรงดัน 15 Volt) เราได้ทำการทดสอบแกนเหล็ก EI เบอร์ 225 สำหรับแกนเหล็ก EI เบอร์ 225 เราได้ทำการออกแบบหม้อแปลงทดสอบขนาด 75 VA 50/12 Volt $\eta = 90\%$ ซึ่งมี mean magnetic path length = 0.4579 m พื้นที่หน้าตัดจริงของแกนเหล็ก = 0.00456 m² น้ำหนักของแกนทั้งหมด = 15.875 kg จำนวนรอบทางขดปฐมภูมิ = 51 จำนวนรอบทางขดทุติยภูมิ = 13 รอบ เพื่อทดสอบหาค่า B_m , H_{peak} , Loss โดยใช้ B - H curve measurement circuit และ $R = 0.03 \text{ Ohms}$ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

Vin	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Vx	0.009	0.012	0.014	0.017	0.019	0.023	0.029	0.042	0.066	0.105	0.152
Vy	0.44	0.9	1.35	1.8	2.2	2.7	3.1	3.6	4	4.4	4.8

เราสามารถ calibrate หาค่าของ B_m และ H_{peak} ของแกนเหล็กได้โดยใช้สมการที่ ก. 1 และ ก. ดังนี้

$$B_m = \frac{V_y}{N_2 A \omega} \times \frac{R_3 \sqrt{R_1^2 + (R_1 R_2 2\pi f C_1)^2}}{R_2 R_4} \quad [\text{ก.1}]$$

$$H_{peak} = \frac{N_1 V_x}{RL} \quad [\text{ก.2}]$$

จาก B-H curve measurement circuit มีค่าของ $R_1 = 56 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ K}\Omega$

$R_4 = 2.2 \text{ K}\Omega$, $C_1 = 0.47 \mu$

$$\frac{1}{\text{Total Gain}} = \frac{R_3 \sqrt{R_1^2 + (R_1 R_2 2\pi f C_1)^2}}{R_2 R_4}$$

$$\frac{1}{\text{Total Gain}} = 3.767097 \text{ หรือ}$$

$$\text{Total Gain} = 0.26545$$

แต่เนื่องจากตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุมี % ความผิดพลาดของตัวเอง ดังนั้นเมื่อเราทดสอบ หา Total Gain ที่แท้จริง เราจะได้ Total Gain = 0.252 หรือ $\frac{1}{\text{Total Gain}} =$

= 3.96825 ดังนั้นเราคำนวณหาค่า B_m และ H_{peak} ได้ดังนี้

ที่

$$V_m = 50 \text{ Volt} : V_x = 0.105, V_y = 4.4$$

$$\therefore B_m = \frac{4.4}{13 \times 0.00456 \times 314} \times 3.96825$$

$$B_m = 0.938$$

Tesla

$$\therefore H_{\text{peak}} = \frac{51 \times 0.105}{0.03 \times 0.4579}$$

$$H_{\text{peak}} = 389.823$$

Ampere × Turn
Meter

ถ้าหาค่าของ hysteresis loss ที่ได้จาก hysteresis loop เราสามารถหาได้จากสมการที่ ค.3

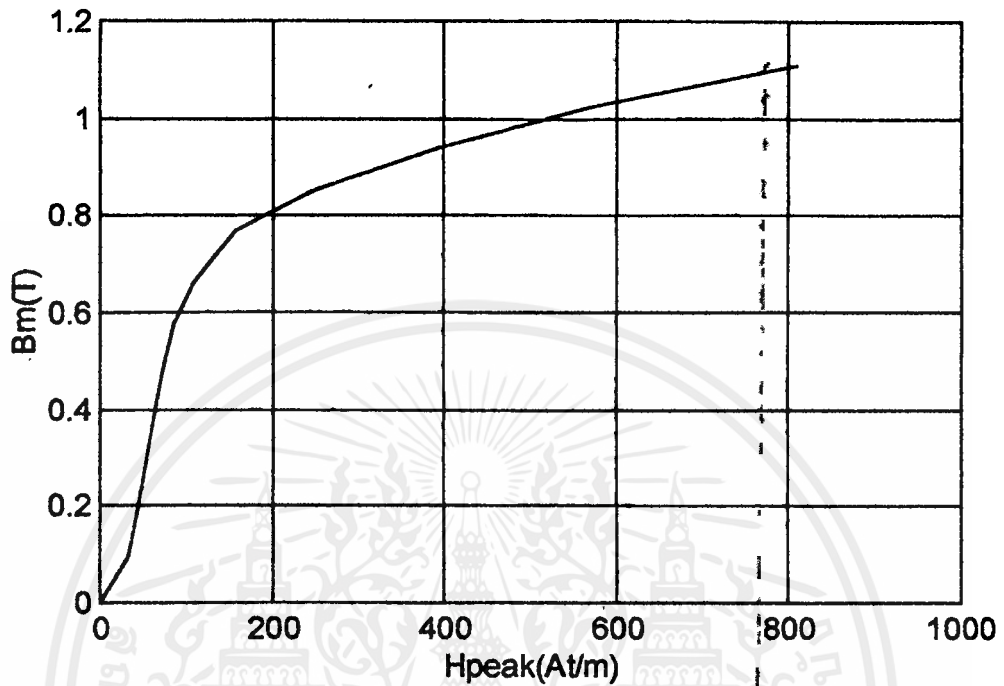
$$\therefore P = \text{พื้นที่ของ HYSTERESIS LOOP (หน่วย CM}^2\text{)} \times \text{SCALE ของ } V_x \left(\text{หน่วย } \frac{\text{Volt}}{\text{Division}} \right) \times \text{SCALE}$$

$$\text{ของ } V_y \left(\text{หน่วย } \frac{\text{Volt}}{\text{Division}} \right) \times \frac{1}{\text{Total Gain} \times R \times 2\pi} \times \frac{N_1}{N_2} \quad [\text{ค.3}]$$

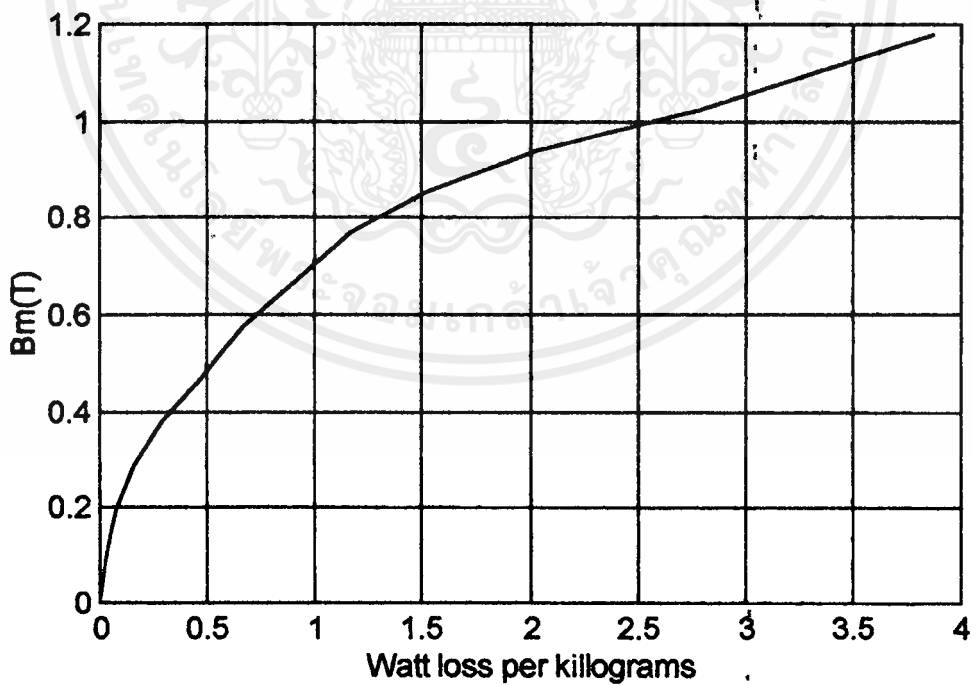
หมายเหตุ ค่าของ hysteresis loss ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัดดังกล่าว ดังนั้นจึงใช้ค่าจาก Wattmeter มีค่าเท่ากับ 32 Watt ซึ่งเป็นผลรวมของ hysteresis loop และ eddy current loop) ดังนั้น กราฟความสัมพันธ์ของ B_m กับ loss ได้จะใช้ข้อมูลที่ได้จาก Wattmeter แทนการวัดจาก hysteresis loop และ เรียกกราฟนี้ว่าเป็นกราฟแสดงความสำคัญที่จะใช้ในการคำนวณหาค่า R_c และ X_m ของวงจรสมมูลคือกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ B_m กับ VA loss per kilogram ซึ่ง VA loss per kilograms จะจะได้มาจากผลคูณของแรงดัน และกระแสขณะทำการทดสอบแบบเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ ณ ค่า B_m ต่างๆ หากด้วยน้ำหนักทั้งหมดของแกนเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

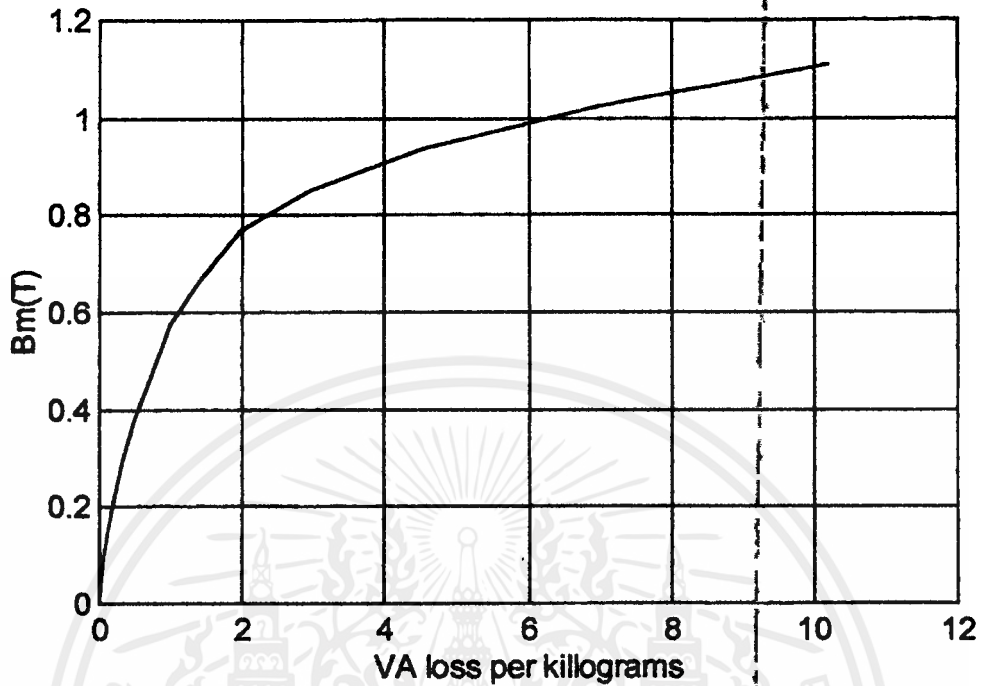
ก. 1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแกนเหล็ก EI ที่ได้จากการศึกษาทดสอบ



รูปที่ ก. 8 กราฟความสัมพันธ์ของ B_m (T) กับ H_{peak} (At / m) ของแกนเหล็ก EI-225



รูปที่ ก. 9 กราฟความสัมพันธ์ B_m (T) กับ Watt loss per kilograms ของแกนเหล็ก EI-225



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ของ B_m (T) กับ VA loss per kilograms ของแกนเหล็ก EI - 225

จากกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ของแกน EI ที่ได้จากการทดลองที่แสดงไว้ข้างต้น จะเห็นว่าแกนเหล็ก EI ที่เรานำมาทดสอบมีค่าของ B_m , H_{peak} , Watt loss per kilograms และ VA loss per kilograms แตกต่างกันในกรณีที่ไม่ใช่เบอร์เดียวกัน ทำให้เราไม่สามารถประมาณค่าได้ B_m , H_{peak} , Watt loss per kilograms และ VA loss per kilograms ของแกนเหล็ก EI เบอร์อื่นได้ ดังนั้นจึงส่งผลให้เราไม่สามารถทำการ กำหนดค่าต่าง ๆ ของวงจรสมมูลของหม้อแปลงที่จะสร้างได้ถ้าเราไปเลือกใช้แกนเหล็ก EI เบอร์อื่นที่ไม่ใช่แกนเหล็กเบอร์นี้

ค.2 การหาน้ำหนักจำเพาะของแกนเหล็ก และความหนาแน่นจำเพาะของฉนวนทองแดง

เนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้ในการสร้างหม้อแปลงเป็นโลหะผสม ดังนั้นน้ำหนักจำเพาะของแกนเหล็กจึงเป็นน้ำหนักจำเพาะของโลหะผสม ซึ่งถ้าเป็นแกนเหล็กที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ เราก็จะทราบว่ามีค่าเป็นเท่าไร แต่สำหรับแกนเหล็กที่ผลิตในประเทศไทยเป็นแกนเหล็กที่มีส่วนผสมที่ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงไม่สามารถรู้ได้ว่าแกนเหล็ก ที่ซื้อมามีน้ำหนักจำเพาะของแกนเหล็กเป็นเท่าไร แต่เราสามารถประมาณค่าน้ำหนักจำเพาะของแกนเหล็กได้โดยทำการทดสอบ และใช้สมมุติฐานที่

ว่า น้ำหนักจำเพาะของแกนเหล็ก แต่ละเบอร์มีค่าเท่ากัน ซึ่งการทดสอบทำได้โดยนำแกนเหล็กเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนหนึ่งไปข้างหน้าหนัก และใช้สมการที่ [2.30], [2.31] และ [2.32] คำนวณค่าน้ำหนักจำเพาะของแกนเหล็ก สำหรับการทดลองครั้งนี้จะนำเอาแกนเหล็ก EI เบอร์ 152 ที่มีความหนาแน่นแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.5 mm จำนวน 117 แผ่น (ความหนาแน่นของแผ่นเหล็กทั้งหมด = $D = 0.5 \times 117 = 58.5$ mm) ไปข้างหน้าหนัก จะได้น้ำหนักของแกนเหล็กทั้งหมดเป็น $W_t = 7.02$ kg จากนั้นคำนวณหา mean magnetic path length ของแกนเหล็ก EI เบอร์ 152 โดยใช้สมการ

$$L = 2G + 2F + 4B \quad \text{mm} \quad [2.32]$$

$$\therefore L = 2 \times 76.2 + 2 \times 25.4 + 4 \times 25.4 = 304.8 \text{ mm}$$

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่นำมาทดสอบจาก

$$a = D \times E = 58.5 \times 50.8 = 2971.8 \text{ mm}^2$$

คำนวณหาปริมาณของแกนเหล็กที่นำมาทดสอบจากสมการ

$$v = a \times L \times 10^{-9} \quad \text{m}^3 \quad [2.30]$$

$$\therefore v = 2971.8 \times 304.8 \times 10^{-9} = 9.058 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

คำนวณหาน้ำหนักจำเพาะของแกนเหล็กจากสมการ

$$W_t = v \times \gamma \quad \text{kg} \quad [2.31]$$

$$\therefore \gamma = \frac{W_t}{v} = \frac{7.02}{9.058 \times 10^{-4}} = 7750.0155 \text{ kg/m}^3$$

สำหรับลวดทองแดงที่มีขายในท้องตลาด บางบริษัทที่ทำการผลิตลวดทองแดงก็จะได้ข้อมูลของลวดทองแดงแต่ละเบอร์ ว่ามีน้ำหนักของลวดทองแดง ต่อความยาวเป็นเท่าไร แต่บางบริษัทก็ไม่ให้ข้อมูลมา ทำให้เราต้องทำการประมาณค่าของค่าเฉลี่ยความหนาแน่นจำเพาะของลวดทองแดงเอง โดยใช้สมมติฐาน ที่ว่าค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นจำเพาะของลวดทองแดงเบอร์ ต่าง ๆ มีค่าเท่ากัน สำหรับการทดลองครั้งนี้จะทำการหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่น จำเพาะของลวดทองแดงโดยใช้ข้อมูลของลวดทองแดง 17 (พื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดง = $A_c = 1.589 \text{ mm}^2$, น้ำหนักของลวดทองแดง / ความยาว = $W_c / L_c = 14.13 \text{ kg/km}$) ในตาราง WIRE GAUGES ของบริษัท THAI YAZAKI การคำนวณทำได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นจำเพาะของลวดทองแดง} &= \frac{W_c}{L_c \times A_c \times 10^{-3}} \quad \text{kg/m}^3 \\
 &= \frac{14.13}{1.589 \times 10^{-3}} \\
 &= 8892.385 \quad \text{kg/m}^3
 \end{aligned}$$

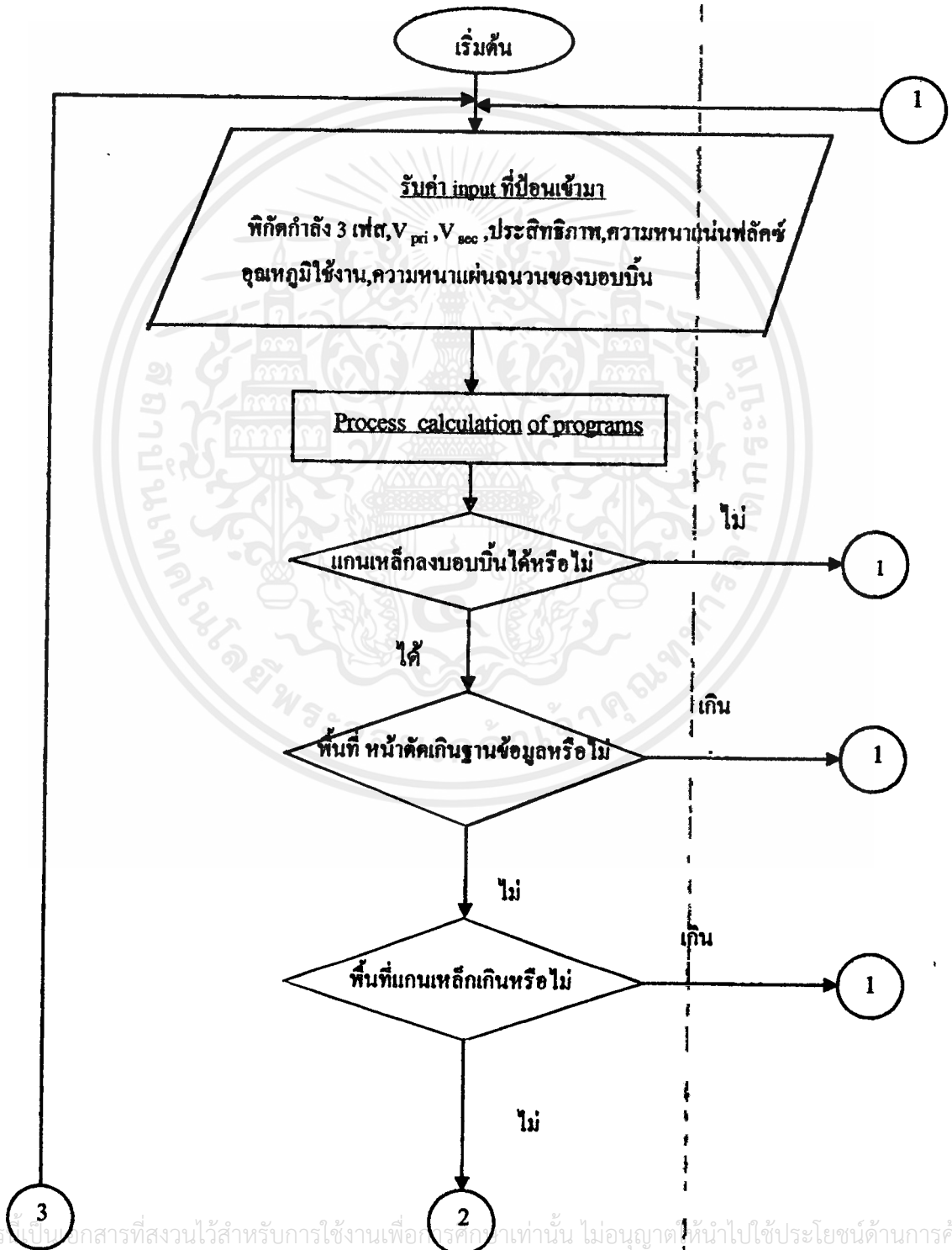
เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของลวดทองแดงได้แล้ว เราก็สามารถที่จะทำการคำนวณหาน้ำหนักของลวดทองแดงเบอร์ต่าง ๆ ที่เราใช้ในการออกแบบหม้อแปลงได้

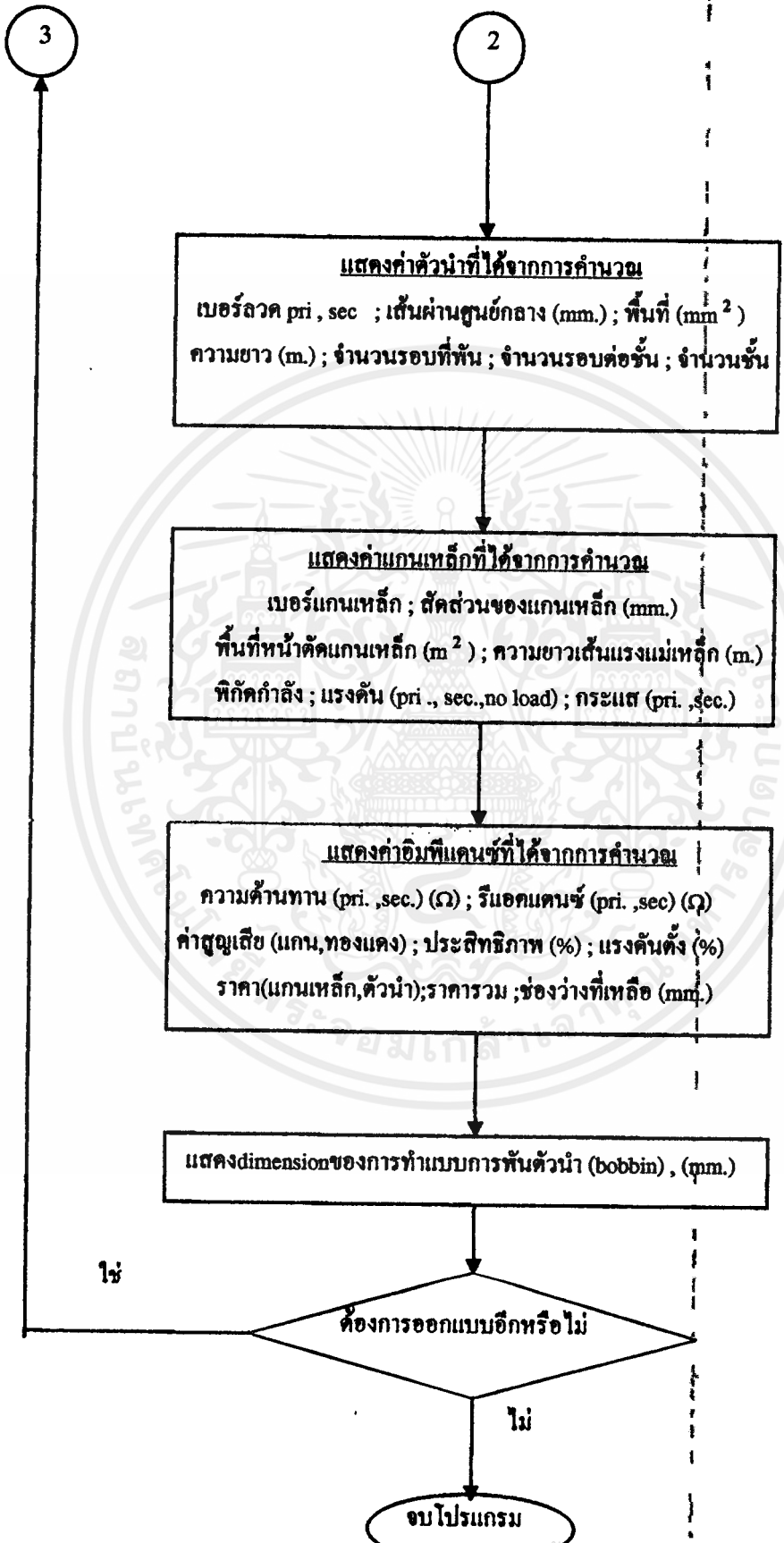
หมายเหตุ เนื่องจากทางร้านขายแกนเหล็กไม่สามารถที่จะนำข้อมูลแกนเหล็ก ที่ได้มาตรฐานจากบริษัทผู้ผลิตได้ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบค่า B-H curve ที่ทำการวัดได้กับ B-H curve ที่ได้มาตรฐานจากผู้ผลิต

ภาคผนวก ง.

โปรแกรมช่วยในการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V/V , Scott and T - T

ง.1 Flowchart ของโปรแกรมช่วยในการออกแบบหม้อแปลงสำหรับการต่อแบบ V/V , Scott and T (TR.design)





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการวัด B-H ของแกน EI- 225

B	H
0	0
0.0938	83.4134
0.1918	144.5512
0.2878	253.8327
0.3837	363.1142
0.469	470.5394
0.5756	585.3898
0.6608	707.6654
0.7674	835.9292
0.8527	974.0316
0.938	1119.8231
1.0233	1276.1716
1.1085	1447.4907

ตารางที่ ง.3 ผลการวัด VA ของแกน EI-225

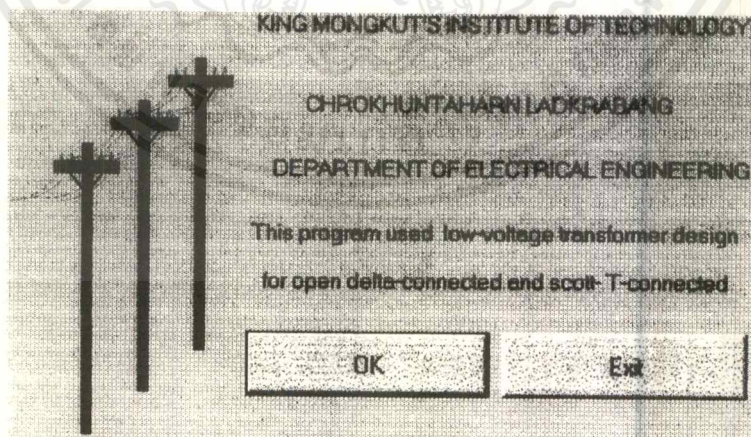
B	VA loss per kilograms
0.0938	0.05963
0.1918	0.17175
0.2878	0.31489
0.3837	0.49873
0.469	0.72335
0.5756	0.99527
0.6608	1.3816
0.7674	1.95527
0.8527	2.93853
0.938	4.5354
1.0233	6.9522
1.1085	10.2047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ผลการวัด Watt loss ของแกน EI-225

B	Watt loss per kilograms
0	0
0.0938	0.02435
0.1918	0.07559
0.2878	0.1574
0.3837	0.3
0.469	0.4724
0.5756	0.6614
0.6608	0.886
0.7674	1.1653
0.8527	1.5055
0.938	2.0199
1.0233	2.7821
1.1085	3.874



รูปที่ ง.2 แสดงโปรแกรมช่วยในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rate 3 phase va of transformer <input type="radio"/> VA <input checked="" type="radio"/> KVA Rate = <input type="text" value="2"/> kVA	Efficiency Percent = <input type="text" value="90"/> %	Thickness of bakelite mm = <input type="text" value="3"/>
Primary voltage Volt = <input type="text" value="380"/> V	Flux density Tesla = <input type="text" value="75"/> T	
Secondary voltage Volt = <input type="text" value="380"/> V	Working temperature Celsius = <input type="text" value="35"/> C	Calculation Open delta Calculation Scott-T Exit Print

รูปที่ ง.3 แสดง Input ของโปรแกรมช่วยในการออกแบบ

Primary winding			
SWG =#	<input type="text" value="17"/>	Number of turn(turn)=	<input type="text" value="396"/>
Diameter(mm) =	<input type="text" value="1.422"/>	Turn per layer of Pri. wdg (turn)=	<input type="text" value="58"/>
Area of wire(sq.mm)=	<input type="text" value="1.589"/>	No. of layer of Pri. wdg (layer)=	<input type="text" value="7"/>
Length of Pri. wdg (m)=	<input type="text" value="155.543"/>		
Secondary winding			
SWG =#	<input type="text" value="17"/>	Number of turn(turn) =	<input type="text" value="417"/>
Diameter(mm) =	<input type="text" value="1.422"/>	Turn per layre of Sec. wdg (turn) =	<input type="text" value="58"/>
Area of wire(sq.mm) =	<input type="text" value="1.589"/>	No. of layer of Sec. wdg (layer) =	<input type="text" value="8"/>
Length of Sec. wdg (m)	<input type="text" value="202.993"/>		
Results continus Return Exit Print			

รูปที่ ง.4 แสดงค่าการคำนวณของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

results of calculation

EI core number =	225	Cross section area of core (sq.m) =	005776
E(mm) =	76	Mean magnetic part length (m) =	4579
D(mm) =	76	Va of transformer =	1155
F(mm) =	38.1	Pr. Voltage (V) =	380
H(mm) =	228.6	Sec. Voltage(V) =	380
Sec. No load voltage(V) =	401.030		
Pr. Current (A) =	3.37631		
Sec. Current (A) =	3.03947		

Results continue

Exit Print

Return

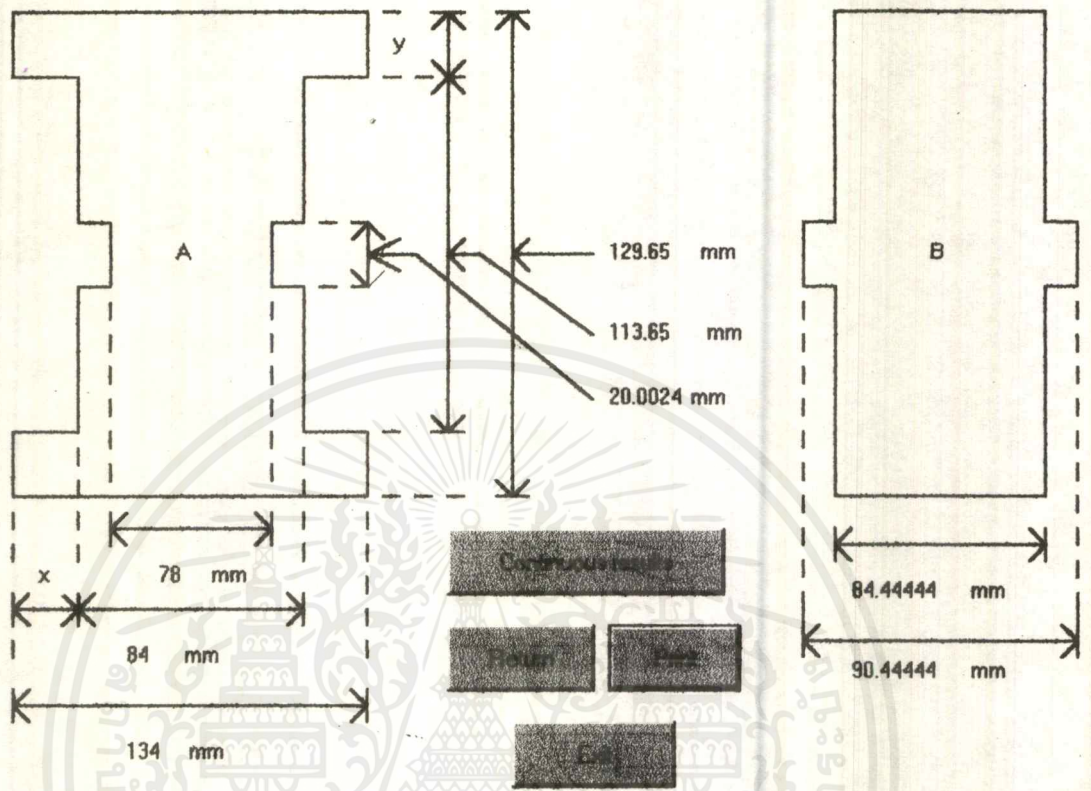
รูปที่ ง.5 แสดงขนาดของแกนเหล็กสำหรับหม้อแปลงที่ต่อแบบ V

Impedance of transformer

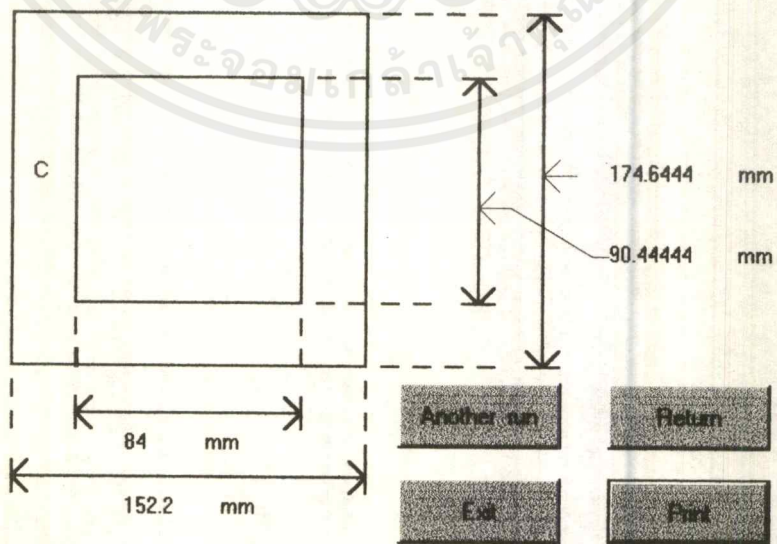
Resistance of Pr.wdg(Ohms) =	1.851072	Results continue	
Resistance of Sec.wdg(Ohms) =	2.41576	Return Print	
Leakage resistance of Pr.wdg(Ohms) =	1.198794	Exit	
Leakage resistance of Sec.wdg(Ohms) =	1.32931		
RC (Ohms) =	6300.07	X Voltage regulation =	5.53435
XM (Ohms) =	4733.16	Cost of core (baht) =	819.899
Copper loss(watt) =	43.4190	Cost of copper (baht) =	861.2421
Core loss(watt) =	22.9203	Total cost (baht) =	1681.141
Total loss (watt) =	66.3394	W4 (mm) =	4.16099
% Efficiency =	94.5683	Winding space factor =	295743

รูปที่ ง.6 แสดงค่า Impedance ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

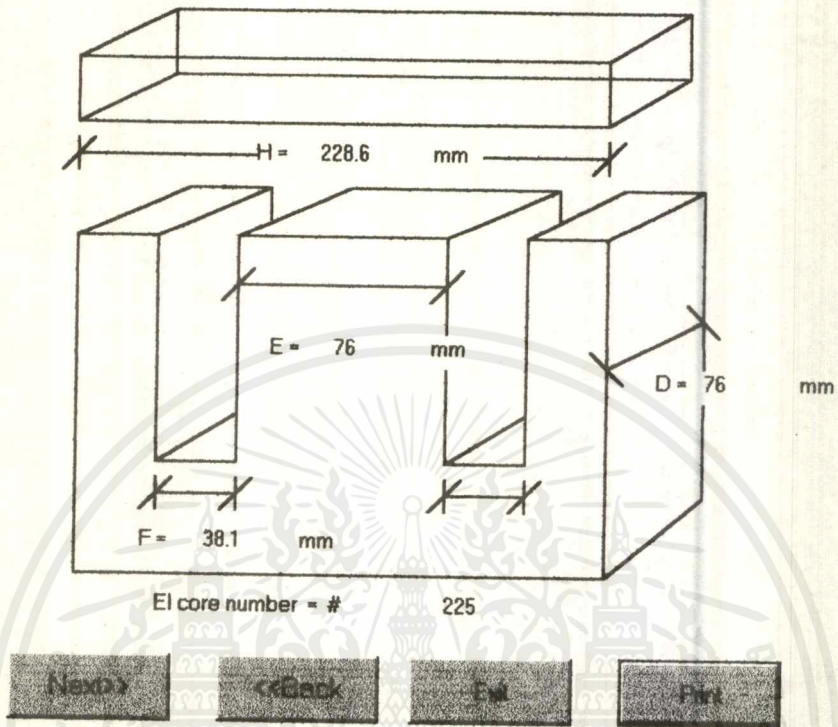


รูปที่ ง.7 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V



รูปที่ ง.8 แสดงขนาดของ bobbin ของหม้อแปลงที่ต่อแบบ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง Main

Results of design calculation	
Core length (mm) =	005776
Mean length per turn (mm) =	380
Number of turns =	4579
Winding length (mm) =	380
Volume of transformer =	1155
Weight of transformer =	3.376316
Core loss (W) =	401.03055019
Winding loss (W) =	3.039474

Results of paper winding			
Core - #	17	Number of turn at 100% voltage (turn) =	396
Diameter (mm) =	1.422	Number of turn at 50% voltage (turn) =	198
Area of wire (mm ²) =	1.589	Turn per layer of primary winding =	57
Length of wire (m) =	155.5435385	No. of layer of primary winding =	7

Navigation buttons: < BACK, NEXT >, Exit, Print

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 10 แสดงค่าการคำนวณของหม้อแปลง Main ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

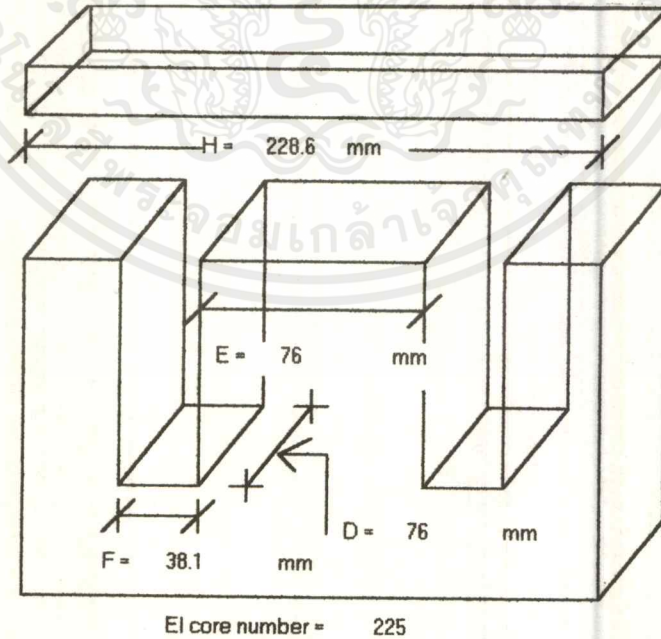
Results of secondary winding

SWG = #	17	Turn per layer of Sec.wdg.(turn) =	57
Diameter (mm) =	1.422	No.of turn at 100% voltage	417
Area of wire (sq.mm) =	1.589	No.of turn at 86.6% voltage (turn) =	361
No.of layer Sec.wdg (layer) =	8	No.of turn at 57.7% voltage (turn)	241
Length of Sec.wdg.(m) =	202.993587	No.of turn at 50% voltage (turn) =	208

Impedance of Teaser transformer

Resistance of Pri.wdg (Ohm) =	1.85107265	Total loss (watt) =	66.33945
Resistance of Sec.wdg (Ohm) =	2.41576012	% Efficiency =	94.56831
Leakage reactance of Pri.wdg (Ohm) =	1.198794	% Voltage regulation =	5.53435531
Leakage reactance of Sec.wdg (Ohm) =	1.32931	Cost of copper (Bahi) =	861.2421
RC (Ohm) =	6300.073	Cost of core (Bahi) =	819.899
RC (Ohm) =	4733.163	Total cost (Bahi) =	1681.141
Copper loss (watt) =	43.41908	Winding space factor =	2957436
Copper loss (watt) =	22.92037	W4 (mm) =	4.16099847

รูปที่ ง.11 แสดงค่า Impedance ของหม้อแปลง Main



รูปที่ ง.12 แสดงขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลง Teaser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

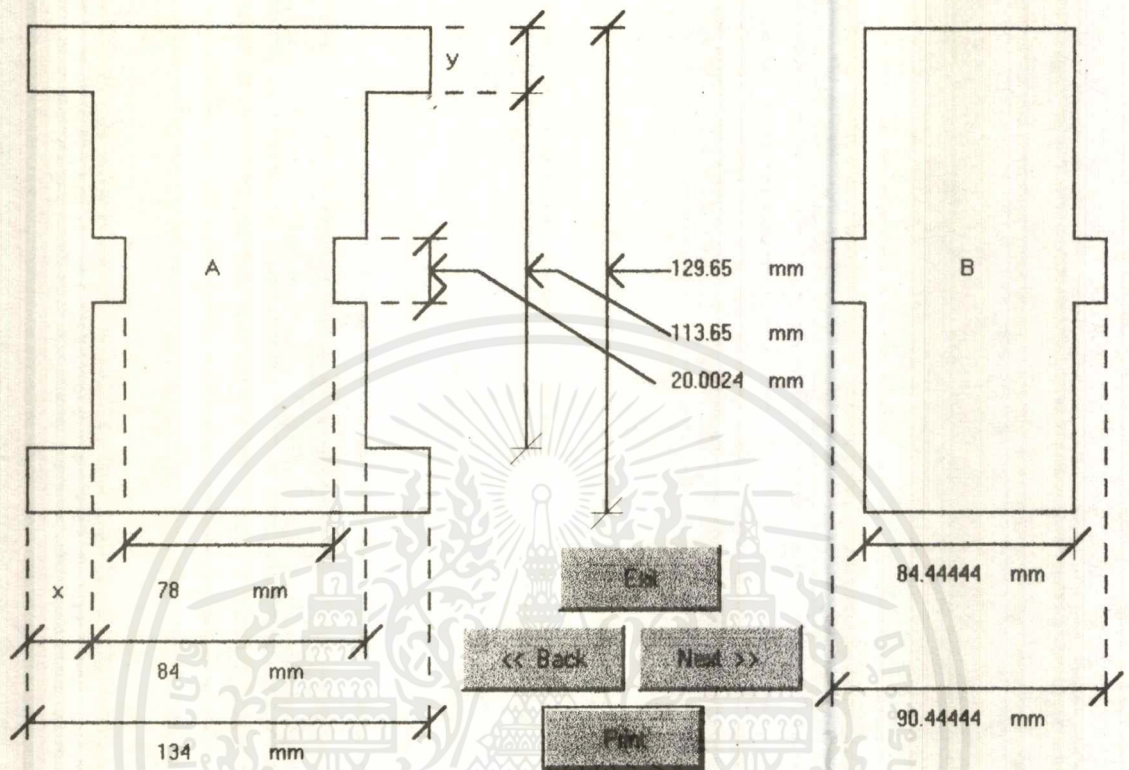
Teaser Transformer			
Cross section area of core (sq.mm)=	005776	Pri Voltage (V)=	380
Mean magnetic part length (m)=	4579	Sec Voltage (V)=	380
VA of Teaser Transformer for full line voltage =	1155	Pri Current (A)=	3.376316
Sec.No Load Voltage (V)=	401.030550	Sec Current (A)=	3.039474
Results of primary winding			
SWG = #	17	Number of turn at 100% voltage (turn) =	396
Diameter (mm) =	1.422	Number of turn at 86.6% voltage (turn) =	343
Area of wire (sq.mm) =	1.589	Turn per layer of pri-wdg (turn) =	57
Length of pri wdg (m) =	155.543538	No. of layer of pri wdg (layer) =	7
<< Back		Next >>	
Exit		Print	

รูปที่ ง.13 แสดงค่าการคำนวณของหม้อแปลง Teaser

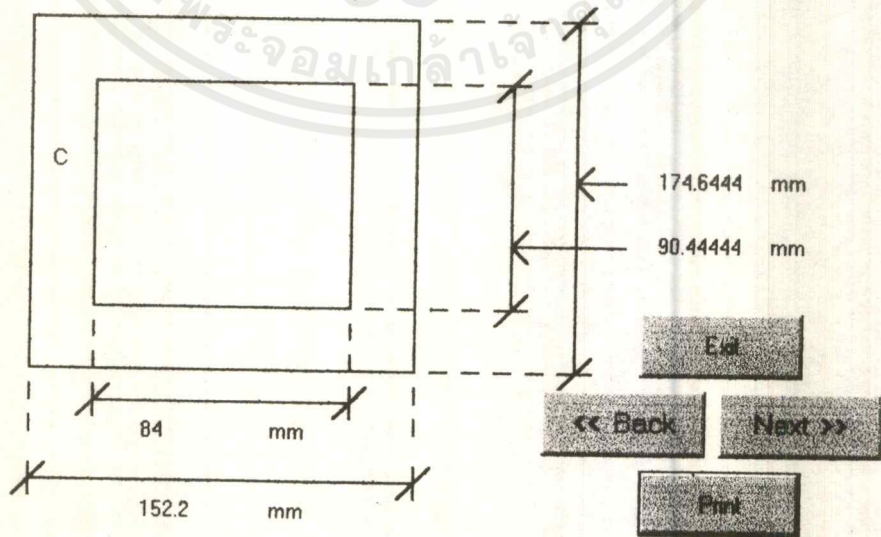
Results of secondary winding			
SWG = #	17	Turn per layer of Sec wdg (turn) =	57
Diameter (mm) =	1.422	No. of turn at 100% voltage (turn) =	417
Area of wire (sq.mm) =	1.589	No. of turn at 75% voltage (turn) =	329
Length of Sec wdg (m) =	202.993587348	No. of turn at 50% voltage (turn) =	208
No. of layer Sec wdg (layer) =	8	No. of turn at 25% voltage (turn) =	88
Impedance of Main transformer			
Resistance of Pri wdg (Ohm) =	1.85107265	Total loss (watt) =	66.33945
Resistance of Sec wdg (Ohm) =	2.41576012	% Efficiency =	94.56831
Leakage reactance of Pri wdg (Ohm) =	1.198794	% Voltage regulation =	5.53435531
Leakage reactance of Sec wdg (Ohm) =	1.32931	Cost of copper (Baht) =	861.2421
RC (Ohm) =	6300.073	Cost of core (Baht) =	819.899
XM (Ohm) =	4733.163	Total cost (Baht) =	1681.141
Copper loss (watt) =	43.41908	Winding space factor =	2957436
Core loss (watt) =	22.92037	W4 (mm) =	4.16099847
<< Back		>> Next	
Exit		Print	

รูปที่ ง.14 แสดงค่า Impedance ของหม้อแปลง Teaser

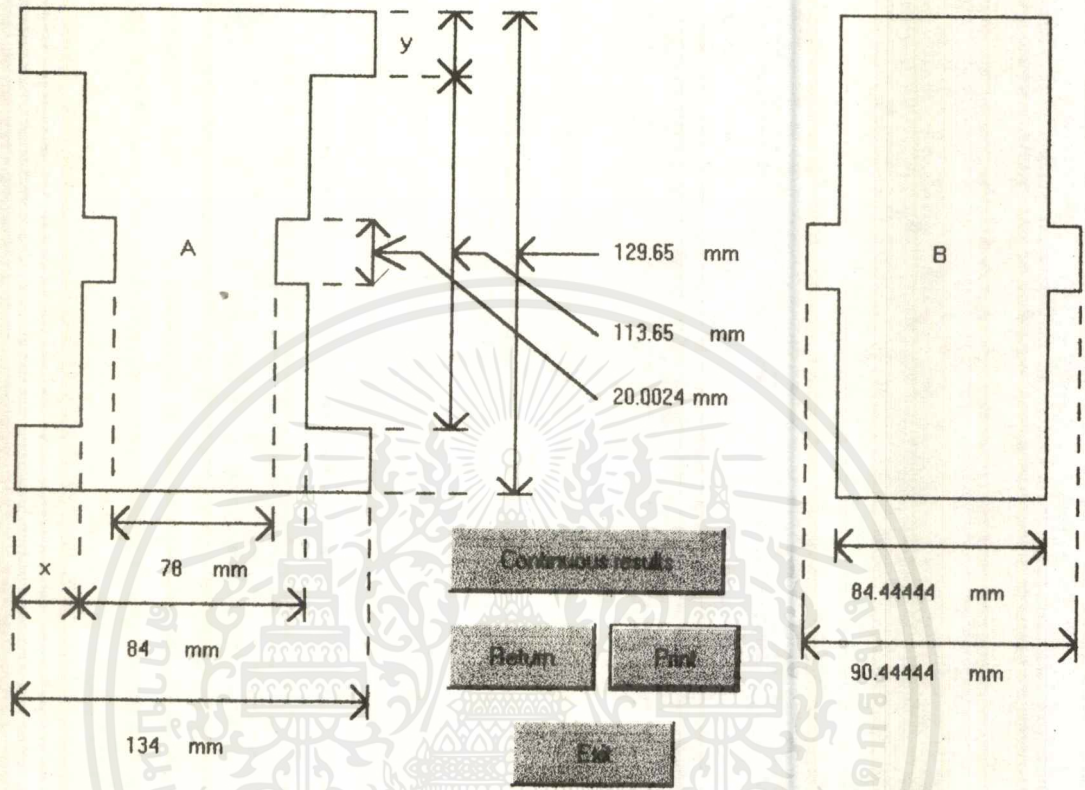
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



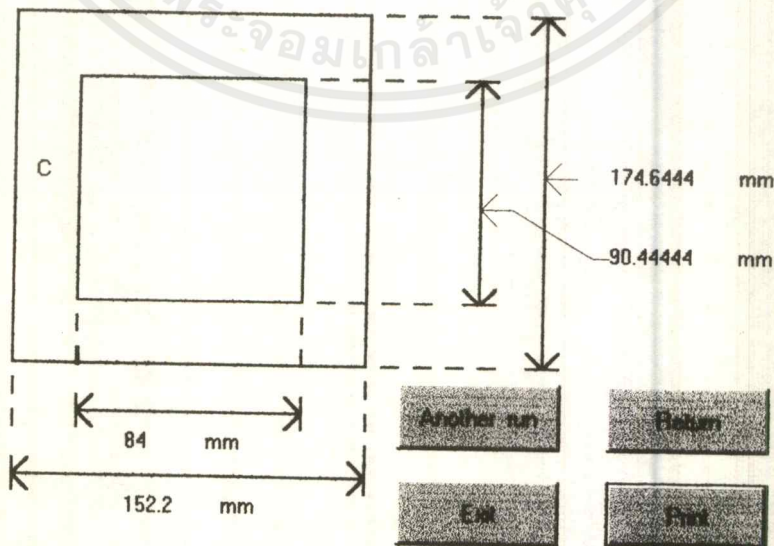
รูปที่ ง.15 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Teaser



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ ง.16 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Teaser นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

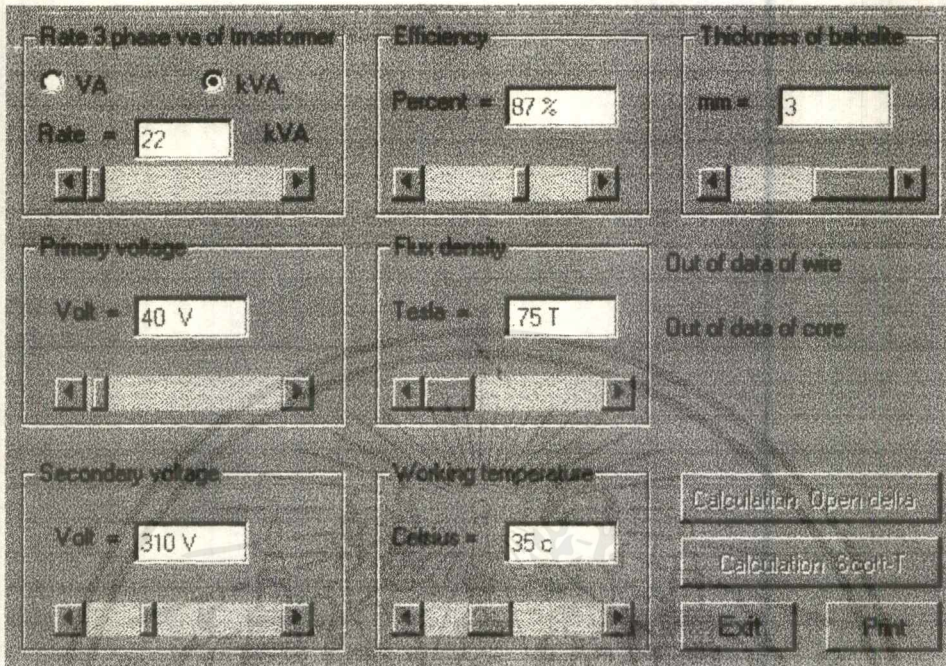


รูปที่ ๑.17 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Main

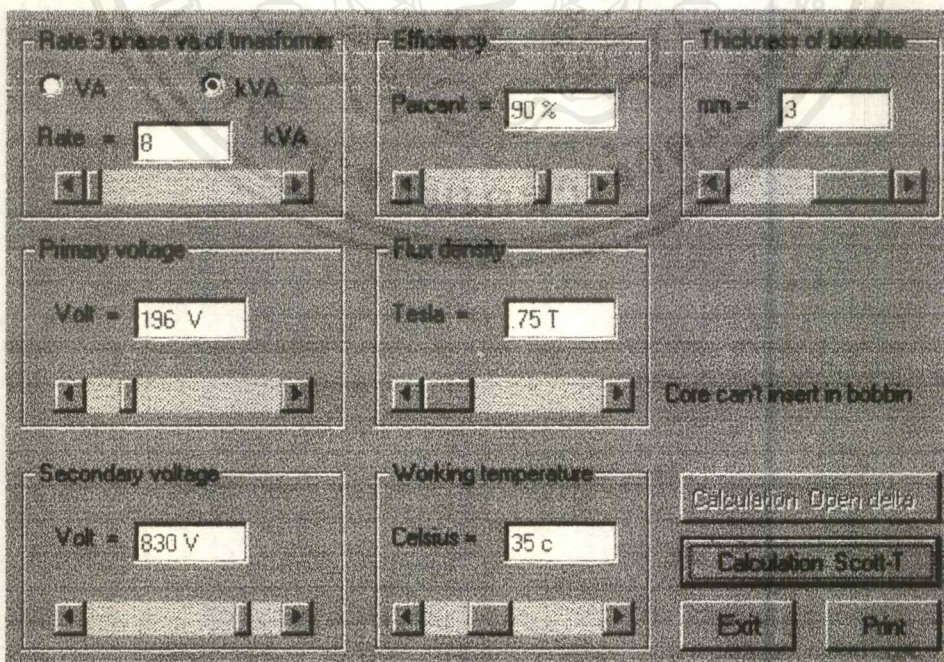


รูปที่ ๑.18 แสดงขนาด bobbin ของหม้อแปลง Main

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีเงื่อนไขการใช้งานอื่น ๆ ที่ปรากฏอยู่ หากท่านนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

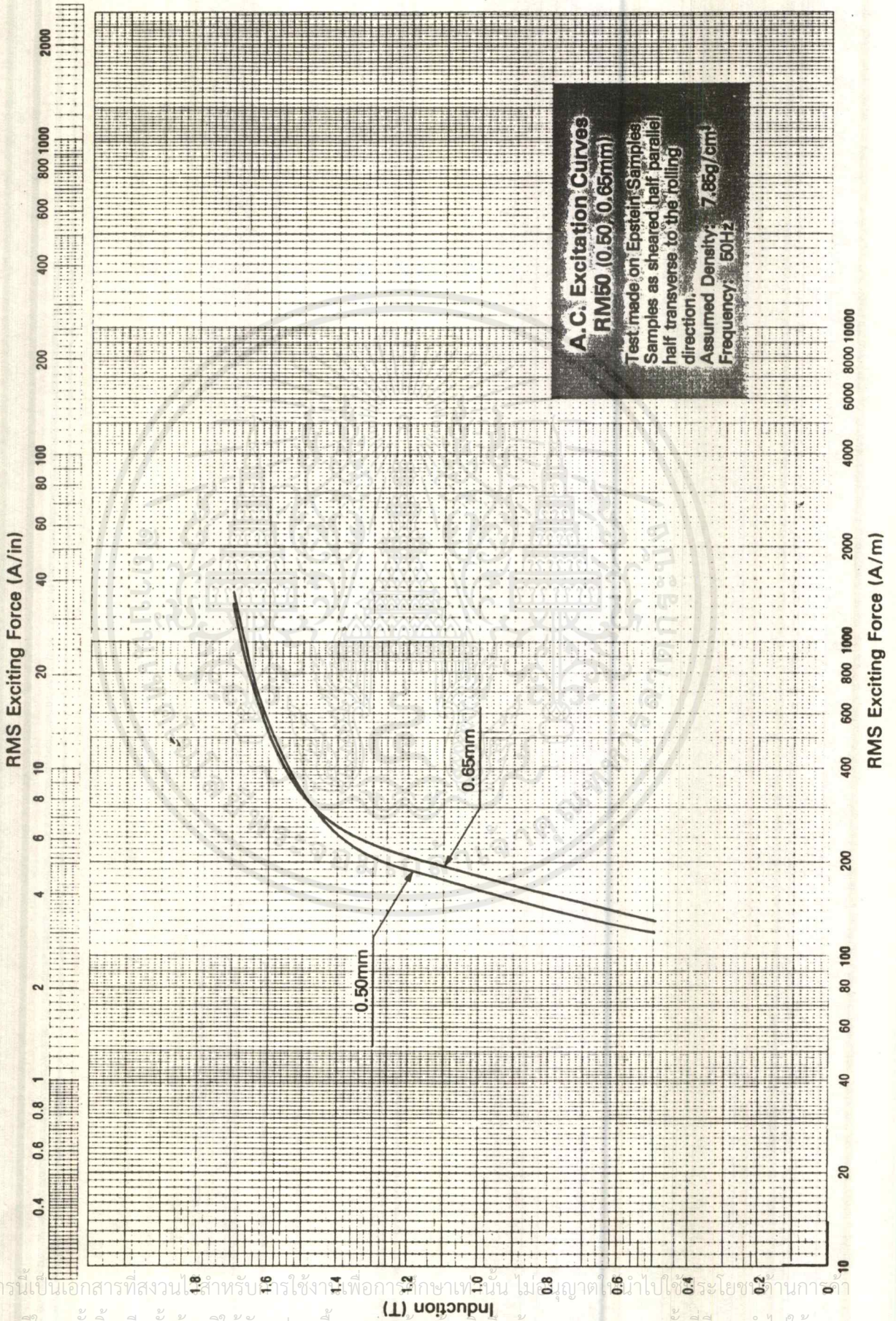


รูปที่ ง. 19 แสดงการป้อนค่าเกินพิกัดของขนาดแกน และ ขดลวด

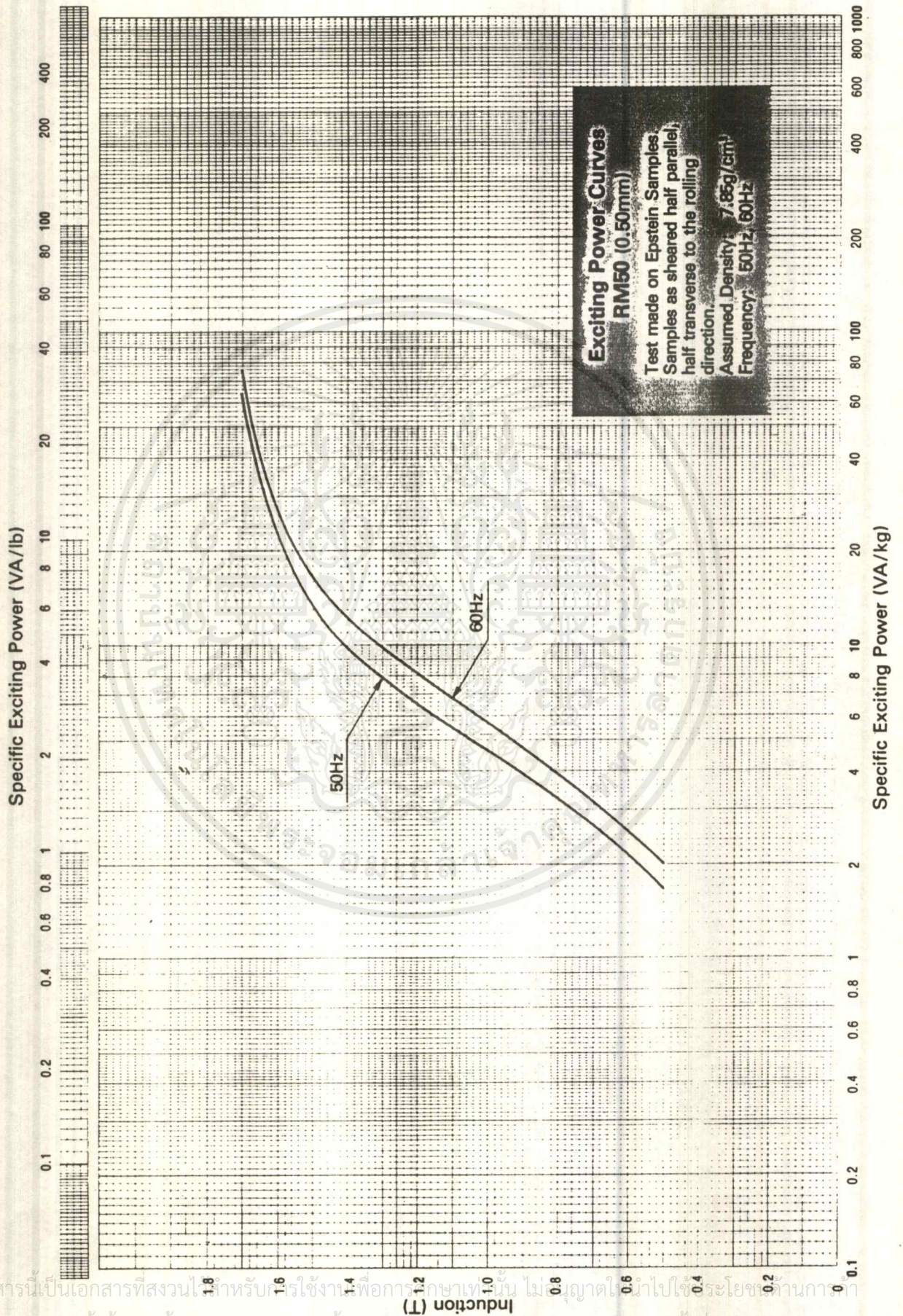


รูปที่ ง.20 แสดงการเลือกค่าที่ไม่สามารถใส่เกินเหล็กได้

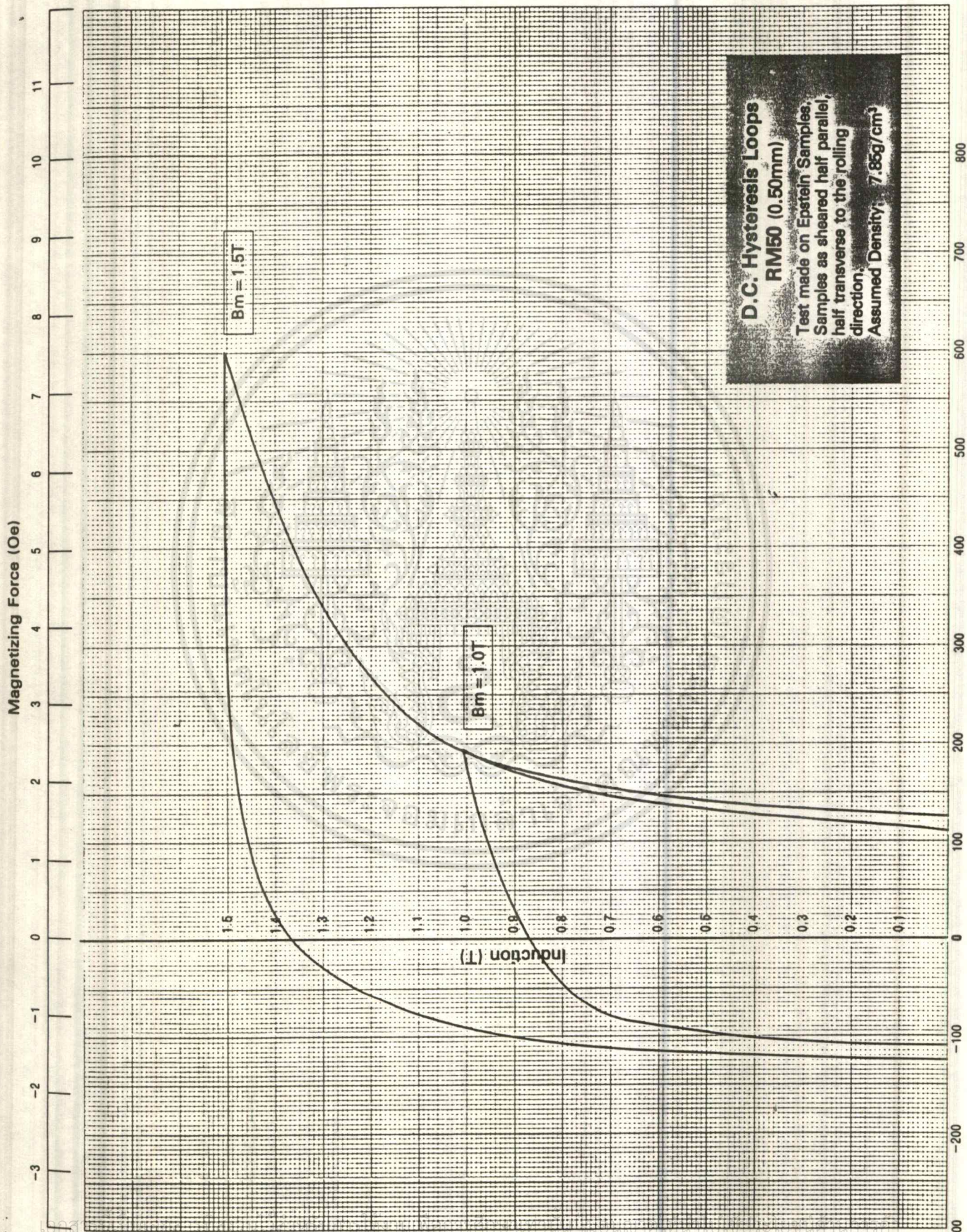
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



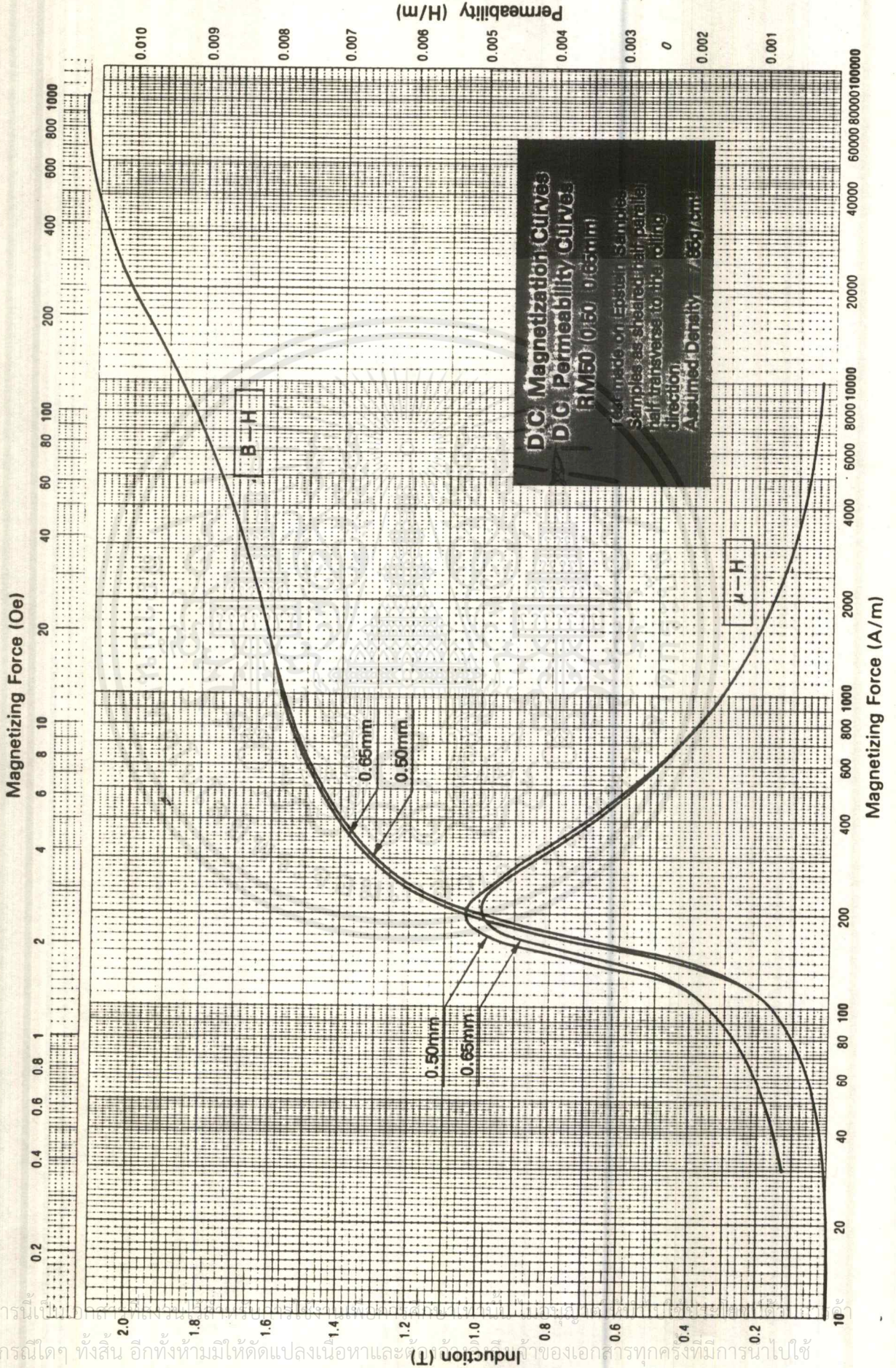
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

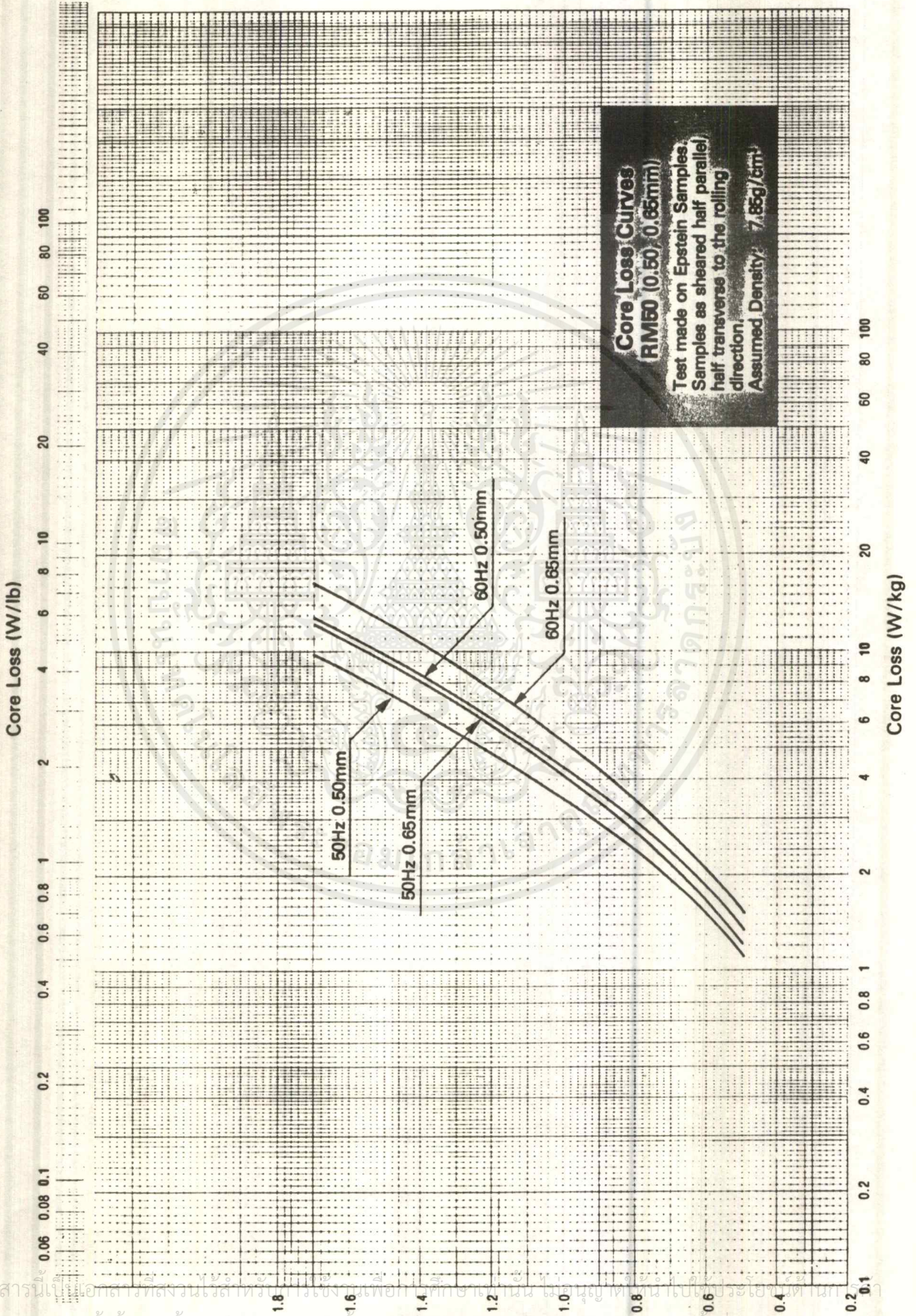


ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเชิงเทคนิคเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแล (L) Induction (T) เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญา
นิพนธ์ และ คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สุทธิ บรรจงจิตร
ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทำให้ปริญญาฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจน
คณาจารย์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ คุณ สุระภูมิ จิตรไพศาลสุข วิศวกร บริษัท ล็อกซ์เลย์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยว
กับโปรแกรมช่วยในการออกแบบหม้อแปลง ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เจ้าหน้าที่ Workshop ที่อำนวยความสะดวก
ความสะดวกในอุปกรณ์การทดสอบต่างๆ ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความสะดวกในการติดต่อ ขอขอบพระคุณ คุณ จันทร์จรรยา บุญศิริ ที่ให้ความสะดวก
ในการใช้ Computer และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และ มารดา ที่ให้ความสำคัญในเรื่องการศึกษา และ
ให้การสนับสนุนมาโดยตลอด

บรรณานุกรม

1. Eric Lowdon , **Practical Transformer Design Handbook** ; Howard W. Sams & Co.,Inc. ; first edition , 1980
2. Alexander S. Langsdorf , **Theory of Alternating - current machinery** ; Tata McGraw - Hill Publishing Company Ltd. , New delhi , second edition , 1955
3. Robert Strin and William T . Hunt , Jr. , **Electric Power system components Transformer and Rotating machines** ; Van Nostrand Reinhold Company , 1979
4. พิชิต ดำยอง , “ **เอกสารประกอบการสอน วิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1,2** ” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. ถัมพันธ์ หาญทะเล , “ **เครื่องกลไฟฟ้า 1** ” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณบุรี , พิมพ์ครั้งที่ 6 , พ.ศ. 2528
6. Kosow and Irving L , **Electric machinery and Transformer** ; Prentice - Hall , 1972
7. THAI YAZAKI , **Technical information and specification for electric wires and cables**; first edition , October 1991
8. David Brown and E.P. Hamilton III , **Electromechanical Energy Conversion** ; New York : Macmillan Publishing , 1984
9. George McPherson and Robert D. Liremore , **An introduction to Electrical machines and Transformer** ; John Wiley & Sons ; second edition , 1990
10. โกวิท มาศรัตน์ , “ **เครื่องจักรกลไฟฟ้า** ” ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร , พิมพ์ครั้งที่ 2 , พ.ศ. 2538
11. John Clark Craig , **Visual Basic 4.0 Developer's workshop** ; Microsoft , third edition , 1996
12. Member of the staff of department of electrical engineering , **Magnetic circuit and transformer** ; Massachsetts Institute of Technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้