



ปีการศึกษา 2539

หม้อแปลงแรงดัน
POTENTIAL TRANSFORMERS

โดย

นายทวีศักดิ์ อังคนาวรรณวิภา

นายศุภชัย สิงโ

นายอาณัติ ถึงสาคร

วัน เดือน ปี.....	30.ก.ย. 2541
เลขทะเบียน.....	038256
เลขเรียกหนังสือ.....	139275 ท 228 ต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หม้อแปลงแรงดัน

ผู้จัดทำ

- 
- 1.นายทวีศักดิ์ อังคนาวรรณวิภา
2.นายศุภชัย สิงโท
3.นายอาณัติ ถึงสาคร

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.จรัล บุญเส็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลงแรงดัน

นายทวีศักดิ์ อังคนาวรรณวิภา

นายสุภชัย สิงโ

นายอาณัติ ถึงสาคร

ผศ.จงรักษ์ บุญเลี้ยง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงโดยใช้หม้อแปลงเครื่องวัด (Instrument Transformers) เป็นการลดอันตรายที่อาจจะเกิดจากการวัดแรงดันสูงโดยตรง โดยอาศัยหลักการทั่วไปของหม้อแปลงนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์เครื่องวัด โดยการลดปริมาณแรงดันหรือกระแสให้ต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ ซึ่งเครื่องวัดชนิดที่แปลงแรงดันจะเรียกว่า หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformers (PT) or Voltage Transformers) โดยมีขนาดการใช้งานที่พิกัดกำลัง 25 VA และที่พิกัดแรงดัน 24000/110 V การออกแบบบสร้างได้ใช้มาตรฐาน IEC 186 ในการอ้างอิง และโครงสร้างของหม้อแปลงแรงดัน ได้ทำการศึกษาหาข้อมูลจากผู้ผลิตชั้นนำหลายบริษัท ซึ่งหลักการของหม้อแปลงแรงดันก็เหมือนกับหม้อแปลงโดยทั่วไป เพียงแต่มีคุณสมบัติที่สำคัญที่แตกต่างกัน คือ อัตราส่วนจำนวนรอบจะต้องถูกต้องแน่นอนเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด และแรงดันที่ตกคร่อมในขดลวดจะต้องมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้น การออกแบบหม้อแปลงจะต้องให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ โดยใช้ลวดตัวนำให้มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้ค่าผิดพลาดจากการวัดโดยใช้หม้อแปลงก็จะเกิดขึ้นน้อย

POTENTIAL TRANSFORMERS

Thaweesak Angkanawanwipha

Supachai Singho

Anut Thungsakon

Assc. Prof. Jongluk Bongseng Advisor

1996

ABSTRACT

High voltage electricity measurement using Instrument Transformers decreases the danger from direct high voltage measurement. The general basement of transformer is adapted to operate with measuring instrument by lowering the amount of voltage or current and measuring instrument with is called Potential Transformer (PT) or Voltage Transformer properly, rated power used at 25 VA and rated voltage at 24000/110 V. This design is referred to standard of IEC 186. In addition, structure data of Potential Transformer is studied from various well known manufacturers. In general, its principle is the same as transformers but its different property in ratio of turn will have to accurate for the least mistake. The voltage dropped over the coil of wire must have the lowest value. Thus, the design of this transformer consists of low impedance value by using the conductive wire that will get the least incorected value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

ABSTRACT

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

บทที่ 1

1

บทที่ 2 ทฤษฎีหม้อแปลงแรงดัน

4

2.1 อัตราส่วน

4

2.2 เบอร์เคน

5

2.3 การเปรียบเทียบหม้อแปลงแรงดันกับหม้อแปลงกำลัง

6

2.4 หม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ

6

2.5 หม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ

17

2.6 คุณสมบัติของหม้อแปลงแรงดัน

19

2.7 ข้อกำหนดของหม้อแปลงตามมาตรฐานของ IEC 186 (1987)

20

2.8 ข้อควรพิจารณาในการเลือกหม้อแปลงแรงดัน

26

บทที่ 3 การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดัน

28

3.1 ทฤษฎี

28

3.2 ขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

31

3.3 การออกแบบหม้อแปลงแรงดัน

43

3.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างหม้อแปลง

59

บทที่ 4 การทดสอบหม้อแปลงแรงดัน

62

4.1 การทดสอบหาขั้วหม้อแปลงแรงดัน

62

4.2 การทดสอบเบ็ดดวงจร

65

4.3 การทดสอบลัดวงจร

69

4.4 การทดสอบความผิดพลาดของอัตราส่วนหรือแรงดัน

72

4.5 การทดสอบด้วยวิธีโวลท์-แอมป์

74

4.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยความถี่ไฟฟ้ากำลัง

76

4.7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ

78

4.8 การทดสอบการวัดการเกิดคิสซารซ์บางส่วน

80

4.9 การทดสอบความคงทนของฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์

81

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

บรรณานุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงการวัดแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงแรงดัน	1
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ	7
รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ	7
รูปที่ 2.3 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ	8
รูปที่ 2.4 แสดงการวิเคราะห์เฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ	9
รูปที่ 2.5 แสดงการวัดแรงดันสูงโดยใช้หม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ	17
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ	17
รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ	18
รูปที่ 3.1 แสดงรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็ก	28
รูปที่ 3.2 แสดงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก	31
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดแกนเหล็กที่ต้องคำนวณ	34
รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของลวดตัวนำทั้งสองด้าน	39
รูปที่ 3.5 แสดงขนาดแกนเหล็กที่ใช้จริง	44
รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของบ๊อบบิน	47
รูปที่ 3.7 แสดงระยะการพันขดลวดทางด้านแรงต่ำและแรงสูงใน 1 ชั้น	48
รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งการวางบุชชิง	55
รูปที่ 3.9 แสดงขนาดและรูปร่างของตัวถังหม้อแปลง	56
รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะภายในตัวถังหม้อแปลง	57
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะโครงสร้างภายนอกของหม้อแปลง	58
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรการทดสอบหาข้อผิดพลาดของหม้อแปลง	62
รูปที่ 4.2 แสดงข้อผิดพลาดของหม้อแปลง	62
รูปที่ 4.3 แสดงข้อผิดพลาดของหม้อแปลงแรงดัน	64
รูปที่ 4.4 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะเปิดวงจร	66
รูปที่ 4.5 แสดงวงจรการทดสอบเปิดวงจรของหม้อแปลง	68
รูปที่ 4.6 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะลัดวงจร	69
รูปที่ 4.7 แสดงวงจรการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลง	70
รูปที่ 4.8 แสดงวงจรการค่อเพื่อทดสอบหาความแข็งแรงของฉนวน	76

รูปที่ 4.9 แสดงวงจรการทดสอบฉนวนใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 แสดงวงจรการทดสอบการคิซหารข้างส่วน	80
รูปที่ 4.11 ลักษณะสำคัญของช่วงเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์	82
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างฮอสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสที่แสดงถึงการเกิดความผิดปกติของ ของฉนวนจากการทดสอบBIL ของหม้อแปลงไฟฟ้า	85
รูปที่ 4.13 แสดงวงจรการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

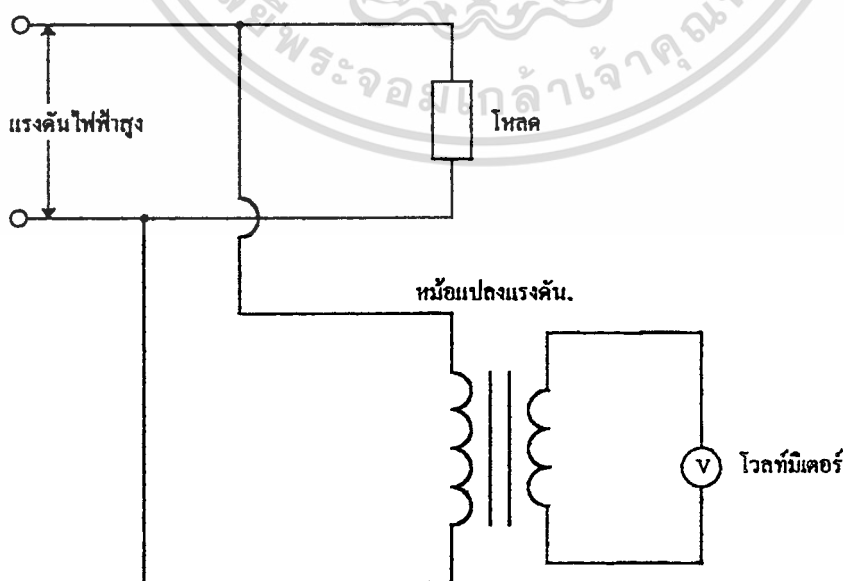
ตารางที่ 2.1 แสดงระดับความแม่นยำและความผิดพลาดของเฟสเซอร์ ของหม้อแปลงเครื่องวัด	21
ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานของแฟคเตอร์แรงดัน	22
ตารางที่ 2.3 ค่าจำกัดของอุณหภูมิที่สูงขึ้นของขดลวด	23
ตารางที่ 2.4 ระดับพิภักคณวน สำหรับ หม้อแปลง ขดลวดปฐมภูมิที่มีค่าแรงดันสูงสุด สำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดต่ำกว่า 300 kV	24
ตารางที่ 2.5 ระดับพิภักคณวน สำหรับ หม้อแปลง ขดลวดปฐมภูมิที่มีค่าแรงดันสูงสุด สำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดต่ำกว่า 52 kV	25
ตารางที่ 2.6 ระดับพิภักคณวน สำหรับ หม้อแปลง ขดลวดปฐมภูมิที่มีค่าแรงดันสูงสุด สำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดสูงกว่า 300 kV	25
ตารางที่ 2.7 พิกัดกำลัง(V-A)ของเครื่องวัดต่าง ๆ	26
ตารางที่ 2.8 แสดงการเลือกระดับความแม่นยำ	27
ตารางที่ 3.1 แสดงวัสดุที่นำมาเป็นแกนเหล็ก	30
ตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของขดลวดต่อพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ	37
ตารางที่ 3.3 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางและความต้านทานของลวดตัวนำ	42
ตารางที่ 3.4 แสดงแรงดันเบรคความถี่ของกระดาศนวน	60
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณการเปิดวงจร	68
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบการดีดวงจร	71
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความผิดพลาดของอัตราส่วน	72
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานขดลวดทางด้านแรงสูง	74
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานขดลวดทางด้านแรงต่ำ	74
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้าด้วยความถี่ไฟฟ้ากำลัง	77
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ	79

บทที่ 1 บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้านำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C.) สำหรับการจ่ายกระแส, แรงดัน, กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้หม้อแปลงไฟฟ้านั้นยังใช้กันอย่างกว้างขวางในการป้องกันวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับการทำงานที่แรงดันสูงเกินไปในขณะที่กระแสต่ำ และประเภทของรีเลย์(Relays) ต่าง ๆ

นอกจากการใช้งานดังกล่าวข้างต้นนั้นหม้อแปลงนั้นยังใช้เพื่อจุดประสงค์ในการวัด ซึ่งการวัดที่แท้จริงนั้นจะทำได้โดยการให้หม้อแปลงเครื่องวัดในการเป็นตัวเชื่อมกับเครื่องมือวัด เพื่อจุดประสงค์ในการวัดนั้นเรียกว่า “หม้อแปลงเครื่องวัด” (Instrument Transformers) หม้อแปลงที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าเรียกว่า “หม้อแปลงกระแส”(Current Transformers) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า “C.T.” หม้อแปลงสำหรับวัดแรงดันเรียกว่า “หม้อแปลงแรงดัน”(Voltage Transformers หรือ Potential Transformers) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า “P.T” แต่ในที่นี้จะขอยกเฉพาะรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงแรงดัน

เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีขนาดสูงมาก ดังนั้น การวัดโดยตรงนั้นเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าสูงเป็นปัญหาสำหรับขนาดของเครื่องวัดและราคาของเครื่องวัด การแก้ปัญหานี้ก็ขึ้นอยู่กับแปลงแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงให้ลดลงมาด้วยหม้อแปลงแรงดัน ก็เพื่อให้สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดที่สามารถหาได้ง่าย และมีขนาดพอประมาณ



รูปที่ 1.1 แสดงการวัดแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.1 แสดงการวัดแรงดันไฟฟ้าสูงโดยอาศัยหม้อแปลงแรงดัน ขดลวดทางด้านปฐมภูมิต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าสูงที่ต้องการวัด ส่วนขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะถูกต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) หม้อแปลงแรงดันจะแปลงแรงดันไฟฟ้าสูงให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับโวลต์มิเตอร์ อาจจะปรากฏให้เห็นว่าย่านของการวัดแรงดันอย่างกว้าง ๆ นั้นสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการใช้มัลติพลายเออร์(Multipliers)ที่อาศัยการต่อความต้านทานในการลดระดับแรงดันสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(D.C.) แต่วิธีนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เพราะยังมีข้อเสียของการใช้มัลติพลายเออร์อยู่

ข้อเสียของมัลติพลายเออร์

การใช้มัลติพลายเออร์สำหรับการวัดแรงดันนั้น ไม่ใช่เรื่องยากถ้าแรงดันที่ต่ำกว่า 1,000 V แต่ถ้าใช้เกินกว่านี้ก็จะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากเหตุผลต่อไปนี้

1. กำลังไฟฟ้าที่ใช้โดยมัลติพลายเออร์จะมีขนาดสูงขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่จำกัดสำหรับอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดที่มีอยู่
2. ต้องดูแลและระมัดระวังอย่างยิ่งในเรื่องของการรักษาให้กระแสที่เกิดการรั่วไหล เมื่อปริมาณแรงดันสูงให้ลดลงตามค่าที่กำหนด อย่างไรก็ตาม อนุพันธ์ของมัลติพลายเออร์จำเป็นจะต้องป้องกันกระแสที่รั่วไหล ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากมากถ้าหากแรงดันเกิน 2,000-3,000 โวลต์ โครงสร้างแบบพิเศษนั้นเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันผลกระทบข้างต้นที่ได้กล่าวมา ดังนั้น โครงสร้างของมัลติพลายเออร์ที่ใช้กับแรงดันสูงนั้นมีราคาสูง และมีโครงสร้างที่ยากซับซ้อนมากขึ้น
3. วงจรที่ทำการวัดนั้นไม่ได้แยกออกจากวงจรกำลัง

ข้อดีของหม้อแปลงแรงดัน

หม้อแปลงแรงดันนั้นใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการวัดค่าที่ละเอียด เช่นเดียวกับ การวัดที่ใช้เป็นประจำ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. เมื่อเครื่องมือวัดนำมาใช้ร่วมกับหม้อแปลงแรงดัน ค่าที่อ่านได้จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ (R,L,C) ที่อยู่ภายในเครื่องวัด เช่นเดียวกับ การใช้มัลติพลายเออร์ หม้อแปลงแรงดันนั้นให้ค่าการอ่านของเครื่องวัดเท่ากับค่าที่ต้องการอ่านโดยไม่นับค่าคงที่ของเครื่องวัดหรือจำนวนของเครื่องวัดที่นำมาต่อ

2. โดยส่วนมากหม้อแปลงแรงดันมีค่าแรงดันมาตรฐานทางด้านทุติยภูมิอยู่ระหว่าง 100-120 V ซึ่งอาจนับว่าเป็นอัตราการใช้ที่พอสมควร และเครื่องวัดสำหรับการวัดนั้นก็มิอัตราใกล้เคียงกันนี้ ดังนั้น โวลต์มิเตอร์ที่มีขนาด 100 V อาจจะวัดแรงดันสูงได้ถึง 66 kV ได้โดยใช้ หม้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานพลังงานแห่งชาติ หากมีการใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงแรงดันที่มีขนาด 66,000/110 V เป็นตัวช่วย ดังนั้น เครื่องวัดที่มีขนาดพอประมาณและราคาไม่แพงนัก ก็อาจจะนำมาใช้วัดแรงดันที่มีค่าสูงได้เช่นกัน

3. วงจรที่วัดนั้นถูกแยกออกจากวงจรกำลัง ในความเป็นจริงก็คือมิเตอร์ที่ต่อวงจรทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันจะถูกแยกในทางไฟฟ้าจากด้านปฐมภูมิ ซึ่งนับเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในระบบแรงดันไฟฟ้าสูง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Alternators)ขนาดใหญ่มักจะทำงานที่แรงดันระหว่าง 11,000-20,000 V หรือในสายส่งกำลังไฟฟ้าจะมีแรงดันที่สูงกว่า ซึ่งปัจจุบันค่าแรงดันสูงสุดถึง 500,000 V ดังนั้น เพื่อจุดประสงค์ในการวัดค่าและสำหรับการทำงานของรีเลย์ที่ใช้ป้องกันร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ มันเป็นเรื่องที่เป็นไปไม่ได้ที่จะต่อสายไฟฟ้าแรงสูงโดยตรงเข้ากับเครื่องวัดแม้แต่แรงดันที่มีแค่ไม่กี่พันโวลท์ก็ตาม

4. ใช้กำลังไฟฟ้าในวงจรของการวัดเพียงเล็กน้อย

6. เครื่องวัดหลาย ๆ เครื่องสามารถทำงานได้โดยคํอจากหม้อแปลงแรงดันเพียงตัวเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีหม้อแปลงแรงดัน

หม้อแปลงแรงดันจะถูกใช้งานร่วมกับโวลต์มิเตอร์, ขดลวดแรงดันของวัตต์มิเตอร์ (Potential coil of wattmeter) และขดลวดของรีเลย์ (Potential coil of relay) จากสายไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง ขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะถูกต่อคร่อมกับสายเส้นที่จ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งต้องการวัดแรงดันสูง ส่วนทางด้านทุติยภูมิจะถูกต่อกับอุปกรณ์เครื่องวัด ได้แก่ โวลต์มิเตอร์ ขดลวดของวัตต์มิเตอร์ และขดลวดของรีเลย์

การออกแบบหม้อแปลงแรงดันจะมีหลักการคล้ายกับหม้อแปลงกำลัง แต่โหลดของหม้อแปลงแรงดันปกติจะมีขนาดที่น้อยกว่าบางครั้งอาจใช้ต่ำสุดถึง 2-3 โวลต์-แอมแปร์ ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ จะถูกออกแบบให้มีแรงดันประมาณ 100-120 โวลต์ แล้วส่งต่อไปให้กับเครื่องวัด โดยทั่วไปจะมีการแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. หม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ (Inductive potential transformers)
2. หม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ (Capacitive potential transformers)

2.1 อัตราส่วน (Ratio)

อัตราส่วนจะมีค่าจำกัดความซึ่งจะต้องศึกษาดังนี้คือ

2.1.1 อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลง (Transformation Ratio) คือ อัตราส่วนของขนาดเฟสเซอร์ทางด้านปฐมภูมิ (Primary phasor) ต่อ ขนาดเฟสเซอร์ทางด้านทุติยภูมิ (Secondary phasor) โดยขนาดของเฟสเซอร์ทั้งสองด้านจะเป็นปริมาณทางด้านเวกเตอร์ (Vector) ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนที่แท้จริง (Actual ratio) ของหม้อแปลง

$$\text{อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลง} \quad R = \frac{|\text{เฟสเซอร์ทางด้านปฐมภูมิ}|}{|\text{เฟสเซอร์ทางด้านทุติยภูมิ}|} \quad \dots(2.1)$$

$$\text{สำหรับหม้อแปลงแรงดัน} \quad R = \frac{\text{แรงดันทางด้านปฐมภูมิ}}{\text{แรงดันทางด้านทุติยภูมิ}} \quad \dots(2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 อัตราส่วนที่พิกัด(Nominal ratio) คือ อัตราส่วนของแรงดันทางด้านปฐมภูมิที่พิกัดต่อ แรงดันทางด้านทุติยภูมิที่พิกัด

สำหรับหม้อแปลงแรงดัน
$$K_n = \frac{\text{แรงดันทางด้านปฐมภูมิที่พิกัด}}{\text{แรงดันทางด้านทุติยภูมิที่พิกัด}} \quad \text{.....(2.3)}$$

2.1.3 อัตราส่วนจำนวนรอบ(Turn ratio) คือ อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ ต่อ จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิในหม้อแปลงแรงดัน

สำหรับหม้อแปลงแรงดัน
$$n = \frac{\text{จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ}}{\text{จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ}} \quad \text{.....(2.4)}$$

2.1.4 แฟกเตอร์ที่ใช้แก้ไขอัตราส่วน(Ratio correction factor) คือ ค่าตัวประกอบที่ใช้คูณเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลง คือ อัตราส่วนที่พิกัด

อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลง = แฟกเตอร์ที่ใช้แก้ไขอัตราส่วน $\times$ อัตราส่วนที่พิกัด (2.5)

$$R = RCF \times K_n$$

2.2 เบอร์ดน (Burden)

เบอร์ดน คือ ค่าของโหลด(load)ทางไฟฟ้าที่จะนำมาต่อระหว่างขั้วทุติยภูมิทางด้านเอาต์พุต(Output) จะมีหน่วยเป็น โวลท์-แอมแปร์(Volt-Ampere) ซึ่งสามารถรับได้โดยไม่ทำให้เกิดค่าผิดพลาด(Errors) เกินที่กำหนด เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้อง

ผลรวมเบอร์ดนทางด้านทุติยภูมิ
$$= \frac{(\text{แรงดันเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิ})^2}{(\text{อิมพีแดนซ์ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ})} \quad \text{.....(2.6)}$$

เบอร์ดนทางด้านทุติยภูมิขณะต่อโหลด
$$= \frac{(\text{แรงดันที่ขั้วต่อทางด้านทุติยภูมิ})^2}{(\text{อิมพีแดนซ์ของโหลดทางด้านทุติยภูมิ})} \quad \text{.....(2.7)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเปรียบเทียบหม้อแปลงแรงดันกับหม้อแปลงกำลัง

การออกแบบและสร้างหม้อแปลงแรงดันจะมีพื้นฐานในการออกแบบเหมือนกับหม้อแปลงกำลัง แต่ยังมีจุดที่แตกต่างกัน ได้แก่

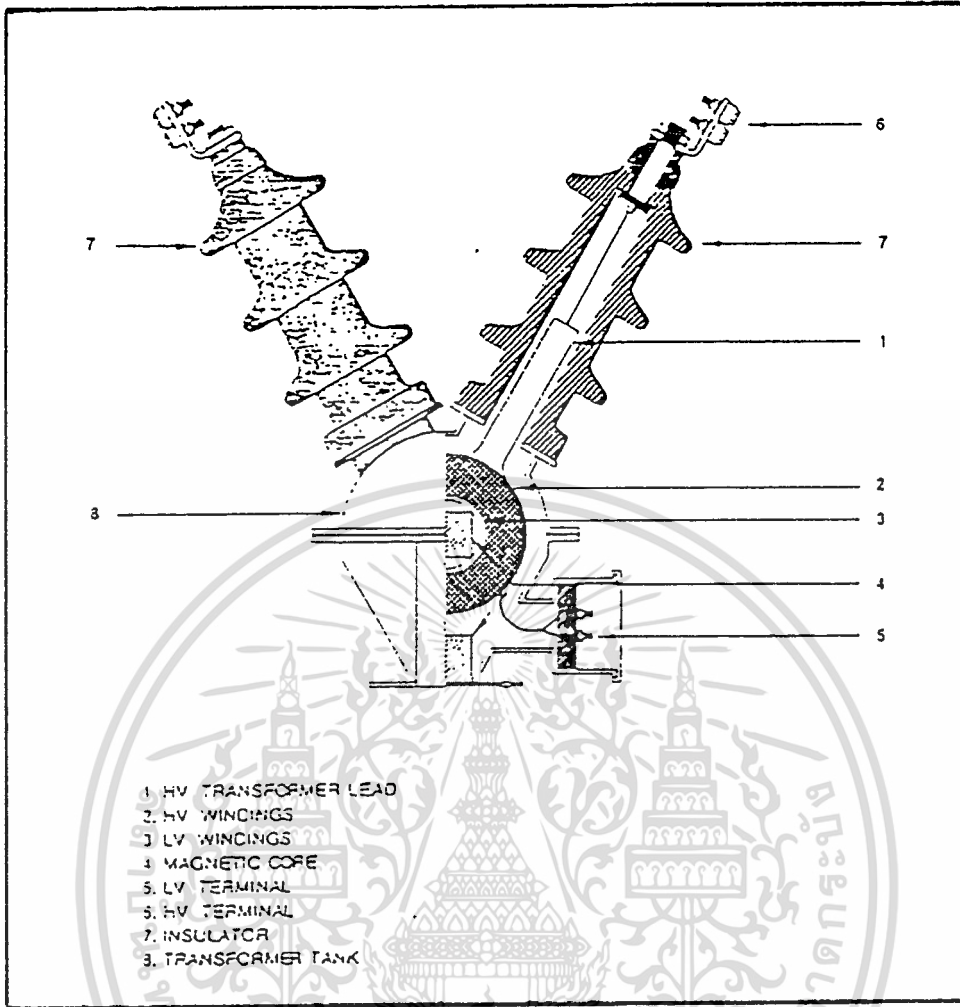
1. หม้อแปลงกำลังจะถูกออกแบบโดยจะคำนึงถึง ประสิทธิภาพ(Efficiency) , เรกกูเลชัน (Regulation) และต้นทุน(Cost) ต้นทุนสามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กที่ขนาดเล็กและขนาดตัวนำที่มีขนาดเล็ก ในการออกแบบหม้อแปลงแรงดันจะถูกออกแบบให้ได้ตามต้องการ คือ อัตราส่วนที่คงที่และมุมเฟสที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงกำลัง และหม้อแปลงแรงดันจะมีแกนเหล็กและขดลวดที่มีขนาดใหญ่กว่า การใช้หลักของเศรษฐศาสตร์เพื่อลดต้นทุนการผลิตจะทำให้อัตราส่วนที่ผิดพลาดและมุมเฟสมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการที่เกิดขึ้นภายหลัง

2. ทางด้านอาทิพหุของหม้อแปลงแรงดัน โดยส่วนมากจะจ่ายกำลังได้ต่ำ ๆ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น(Temperature rise) และปัญหาจากความร้อนเป็นสาเหตุที่เกิดจากการใช้โหลดเกิน ในความเป็นจริงโหลดของหม้อแปลงแรงดันจะถูกจำกัดโดยความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งในขณะที่หม้อแปลงกำลังจะถูกจำกัดด้วยความต้องการของโหลดเป็นสิ่งสำคัญ ในความเป็นจริงหม้อแปลงแรงดันสามารถจ่ายโหลดบนอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้นานที่พิกัดของโหลด โดยสามารถใช้ได้ 2-3 เท่า สำหรับหม้อแปลงแรงดันที่มีแรงดันต่ำ และสูงถึง 30 เท่าหรือมากกว่าสำหรับหม้อแปลงแรงดันที่มีแรงดันสูง

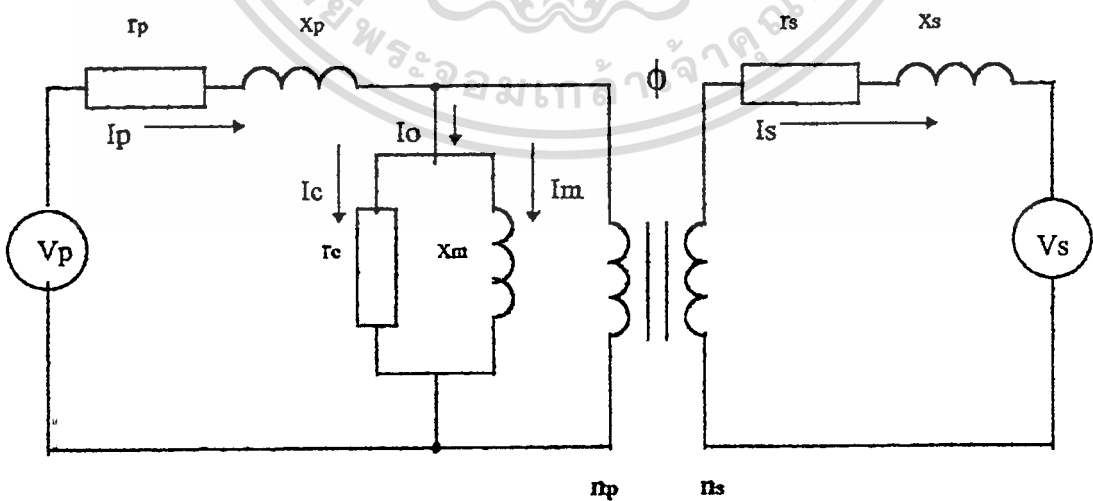
2.4 หม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ

2.4.1 ทฤษฎี

ทฤษฎีของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟจะมีโครงสร้างลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงกำลัง ส่วนสำคัญของความแตกต่าง คือ กำลังที่จ่ายโหลดของหม้อแปลงแรงดันจะน้อย กระแสที่กระตุ้นทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าเท่ากับกระแสทางด้านทุติยภูมิ ซึ่งต่างจากหม้อแปลงกำลัง กระแสกระตุ้นจะมีค่าน้อยซึ่งแปรตามกระแสโหลดทางด้านทุติยภูมิ

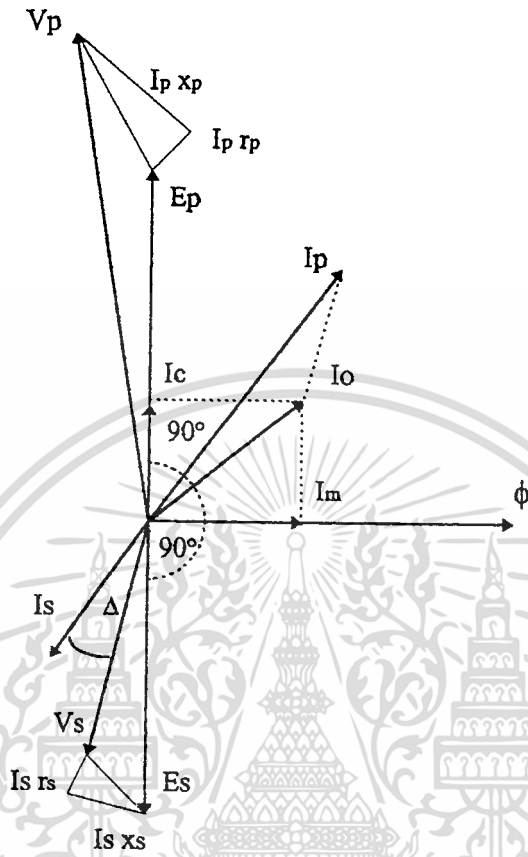


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก

I_m = กระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบของกระแสกระตุ้นขณะไม่มีโหลด

I_c = กระแสที่สูญเสียในแกนเหล็กซึ่งเป็นส่วนประกอบของกระแสกระตุ้นขณะไม่มีโหลด

I_o = กระแสกระตุ้นขณะไม่มีโหลด

E_s = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

V_s = แรงดันที่ขั้วต่อของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

T_p = จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

T_s = จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

I_s = กระแสในขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

r_s = รีซิสแตนซ์ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

x_s = รีแอกแตนซ์ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Δ = มุมเฟสของวงจรโหลดทางด้านทุติยภูมิ

$$= \tan^{-1}(X_s/R_s)$$

V_p = แรงดันที่ขั้วต่อของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

E_p = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

I_p = กระแสในขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

r_p = รีซิสแตนซ์ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

x_p = รีแอกแตนซ์ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

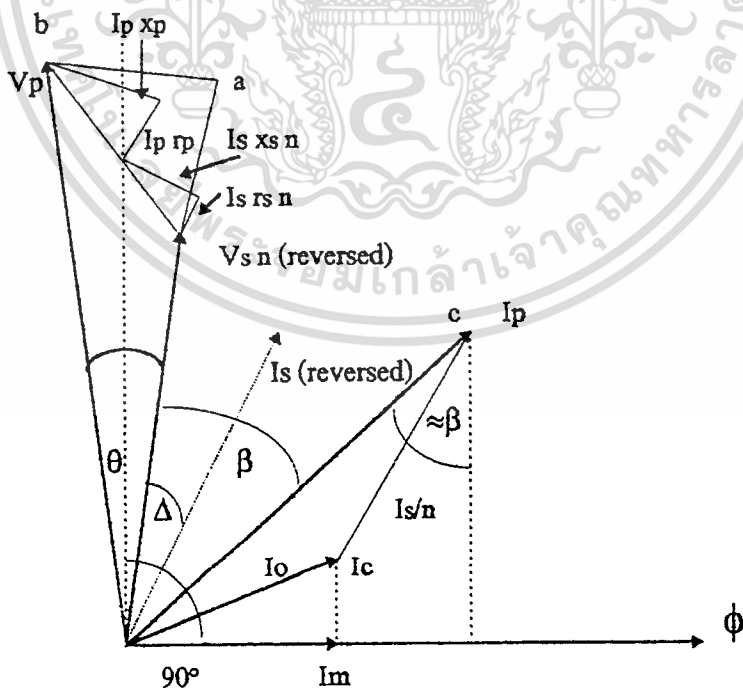
$$\text{อัตราส่วนจำนวนรอบ } n = \frac{\text{จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ}}{\text{จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ}} = \frac{E_p}{E_s}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

แรงดันทางด้านทุติยภูมิเมื่อถูกโอนย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ จะต้องคูณด้วย n

กระแสทางด้านทุติยภูมิเมื่อถูกโอนย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ จะต้องหารด้วย n

อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงจริง โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการวิเคราะห์เฟสเซอร์ไคอะแกรมของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ = มุมเฟสของหม้อแปลง

= มุมระหว่าง V_p กับ V_s ที่ถูกโอนย้าย

Δ = มุมเฟสของวงจรโหลดทางค้ำานทุติยภูมิ

β = มุมเฟสระหว่าง I_p กับ V_s ที่ถูกโอนย้าย

$$oa = V_p \cos \theta$$

$$da = nV_s + nI_s r_s \cos \Delta + nI_s x_s \sin \Delta + I_p r_p \cos \beta + I_p x_p \sin \beta$$

$$V_p \cos \theta = nV_s + nI_s r_s \cos \Delta + nI_s x_s \sin \Delta + I_p r_p \cos \beta + I_p x_p \sin \beta$$

$$= nV_s + nI_s (r_s \cos \Delta + x_s \sin \Delta) + I_p r_p \cos \beta + I_p x_p \sin \beta$$

...(2.8)

มุมเฟส θ เป็นขนาดเล็กมาก ทั้ง V_p และ V_s ที่ถูกโอนย้าย จะตั้งฉากกับ ϕ

$$\angle ocd = \beta \quad (\text{โดยประมาณ})$$

$$\angle ecd = \Delta \quad (\text{โดยประมาณ})$$

$$I_p \cos \theta = I_c + \frac{I_s}{n} \cos \Delta$$

$$I_p \sin \theta = I_m + \frac{I_s}{n} \sin \Delta$$

โดยที่ θ มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะน้อยกว่า 1° ดังนั้น $\cos \theta = 1$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_p \cos \theta = V_p$$

เมื่อนำไปแทนในสมการที่ 2.8 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 V_p &= nV_s + n I_s (r_s \cos \Delta + x_s \sin \Delta) + \left(I_c + \frac{I_s}{n} \cos \Delta \right) r_p \\
 &\quad + \left(I_m + \frac{I_s}{n} \sin \Delta \right) x_p \\
 &= nV_s + I_s \cos \Delta \left(n r_s + \frac{r_p}{n} \right) + I_s \sin \Delta \left(n x_s + \frac{x_p}{n} \right) + I_c r_p + I_m x_p
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

$$\begin{aligned}
 &= nV_s + \frac{I_s}{n} \cos \Delta (n^2 r_s + r_p) + \frac{I_s}{n} \sin \Delta (n^2 x_s + x_p) + I_c r_p + I_m x_p \\
 &= nV_s + \frac{I_s}{n} \cos \Delta R_p + \frac{I_s}{n} \sin \Delta X_p + I_c r_p + I_m x_p \\
 &= nV_s + \frac{I_s}{n} (\cos \Delta R_p + \sin \Delta X_p) + I_c r_p + I_m x_p
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

R_p = รีซิสแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงที่ถูกโอนย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ

X_p = รีแอกแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงที่ถูกโอนย้ายไปทางด้านปฐมภูมิ

อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริง

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{V_p}{V_s} \\
 &= n + \frac{\frac{I_s}{n} (R_p \cos \Delta + X_p \sin \Delta) + I_c r_p + I_m r_p}{V_s}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

จากสมการ (2.9) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
V_p &= n V_s + n I_s \cos \Delta \left(r_s + \frac{r_p}{n^2} \right) + I_c r_p + I_m X_p + n I_s \sin \Delta \left(x_s + \frac{x_p}{n^2} \right) \\
&\quad + I_c r_p + I_m X_p \\
&= n V_s + n I_s \cos \Delta R_s + n I_s \sin \Delta X_s + I_c r_p + I_m X_p \\
&= n V_s + n I_s (R_s \cos \Delta + X_s \sin \Delta) + I_c r_p + I_m X_p \quad \dots(2.12)
\end{aligned}$$

R_s = รีซิสแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงที่ถูกโอนย้ายไปทางด้านทุติยภูมิ

X_s = รีแอกแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลงที่ถูกโอนย้ายไปทางด้านทุติยภูมิ

$\therefore$ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริง

$$\begin{aligned}
'R &= \frac{V_p}{V_s} \\
&= n + \frac{n I_s (R_p \cos \Delta + X_p \sin \Delta) + I_c r_p + I_m X_p}{V_s} \quad \dots(2.13)
\end{aligned}$$

จากสมการ (2.10) และ (2.12) สามารถหาค่าความแตกต่างของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงกับอัตราส่วนจำนวนรอบ

$$R - n = \frac{\frac{I_s}{n} (R_p \cos \Delta + X_p \sin \Delta) + I_c r_p + I_m X_p}{V_s} \quad \dots(2.14)$$

$$= \frac{n I_s (R_p \cos \Delta + X_p \sin \Delta) + I_c r_p + I_m X_p}{V_s} \quad \dots(2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเฟส

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \frac{ab}{oa} \\ &= \frac{I_p x_p \cos \beta - I_p r_p \sin \beta - I_s x_s \cos \Delta - n I_s r_s \sin \Delta}{n V_s + n I_s r_s \cos \Delta + n I_s x_p \sin \Delta + I_p r_p \cos \beta + I_p x_p \sin \beta}\end{aligned}$$

ในเทอมที่เป็นตัวหารมีค่าของ I_p และ I_s ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของ $n V_s$ ดังนั้นสามารถที่จะละทิ้งได้โดยสามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\therefore \tan \theta &= \frac{I_p x_p \cos \beta - I_p r_p \sin \beta + n I_s x_s \cos \Delta - n I_s r_s \sin \Delta}{n V_s} \\ &= \frac{x_p \left(I_c + \frac{I_s}{n} \cos \Delta \right) - r_p \left(I_m + \frac{I_s}{n} \sin \Delta \right) + n I_s x_s \cos \Delta - n I_s r_s \sin \Delta}{n V_s} \\ &= \frac{I_s \cos \Delta \left(\frac{x_p}{n} + x_s \right) - I_s \sin \Delta \left(\frac{r_p}{n} + r_s \right) + I_c x_p - I_m r_p}{n V_s} \\ &= \frac{\frac{I_s \cos \Delta}{n} (x_p + n^2 x_s) - \frac{I_s \sin \Delta}{n} (r_p + n^2 r_s) + I_c x_p - I_m r_p}{n V_s} \\ &= \frac{\frac{I_s \cos \Delta}{n} X_p - \frac{I_s \sin \Delta}{n} R_p + I_c x_p - I_m r_p}{n V_s} \\ &= \frac{\frac{I_s}{n} (X_p \cos \Delta + R_p \sin \Delta) + I_c x_p - I_m r_s}{n V_s}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ θ มีค่าน้อยมาก ดังนั้น $\theta = \tan \theta$

$$\therefore \theta = \frac{\frac{I_s}{n} (X_p \cos \Delta - R_p \sin \Delta) + I_c X_p + I_m r_p}{n V_s} \text{ rad.} \quad \dots(2.16)$$

$$= \frac{I_s}{V_s} (X_s \cos \Delta - R_s \sin \Delta) + \frac{I_c X_p + I_m r_p}{n V_s} \text{ rad.} \quad \dots(2.17)$$

2.4.2 ความผิดพลาด

ผลของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลง(หรือค่าอัตราส่วนจริง) จะไม่เท่ากับค่าของอัตราส่วนจำนวนรอบ ซึ่งค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับค่าที่สร้างสนามแม่เหล็กและค่าที่เป็นกำลังสูญเสียในส่วนที่เป็นของกระแสกระตุ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในการวัดแรงดัน

เฟสเซอร์ของกระแสทุติยภูมิ (I_s) จะเลื่อนไปจากมุม 180 องศา เนื่องจากผลของกระแสกระตุ้น (I_o) ของกระแสทางคานปฐมภูมิ ต่างจากมุม 180 องศา เป็นมุม θ ด้วยเหตุนี้จึงต้องศึกษาความผิดพลาดระหว่างอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงจริงกับความแตกต่างไปจากค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ อย่างไร

อัตราส่วนที่ผิดพลาด(Ratio error)

ค่าอัตราส่วนที่ผิดพลาดสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้คือ

$$\% \text{ ความผิดพลาด} = \frac{\text{อัตราส่วนที่พิกัด} - \text{อัตราส่วนจริง}}{\text{อัตราส่วนจริง}} \times 100$$

$$= \frac{K_n - R}{R} \times 100 \quad \dots(2.18)$$

ความผิดพลาดที่เกิดจากมุมเฟส

ห้เมื่อแปลงแรงดันในอุดมคติไม่ควรมีความแตกต่างระหว่างเฟสเซอร์แรงดันทางด้านปฐมภูมิกับเฟสเซอร์แรงดันทางด้านทุติยภูมิที่ถูกโอนย้าย แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงค่าความแตกต่างระหว่างเฟสเซอร์แรงดันทางด้านปฐมภูมิ(V_p)กับเฟสเซอร์แรงดันทางด้านทุติยภูมิ(V_s)ที่ถูกโอนย้าย โดยมุมเฟส(θ) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.19) , (2.20)

$$\therefore \theta = \frac{\frac{I_s}{n} (X_p \cos \Delta - R_p \sin \Delta) + I_c X_p + I_m r_p}{n V_s} \text{ rad.} \quad \dots(2.19)$$

$$= \frac{I_s}{V_s} (X_s \cos \Delta - R_s \sin \Delta) + \frac{I_c X_p + I_m r_p}{n V_s} \text{ rad.} \quad \dots(2.20)$$

มุมเฟสที่เป็นความแตกต่างระหว่างเฟสเซอร์แรงดันทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิที่ถูกโอนย้าย จะแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 เมื่อมุมเฟสมีค่าเป็น บวก(+) เฟสเซอร์แรงดันทางด้านทุติยภูมิที่ถูกโอนย้ายจะนำหน้า(Leading)เฟสเซอร์แรงดันทางด้านปฐมภูมิ

กรณีที่ 2 เมื่อมุมเฟสมีค่าเป็น ลบ(-) เฟสเซอร์แรงดันทางด้านทุติยภูมิที่ถูกโอนย้ายจะล่าหลัง(Lagging)เฟสเซอร์แรงดันทางด้านปฐมภูมิ

ในการวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจะต้องคำนึงถึงอัตราส่วนที่ผิดพลาดเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งในขณะที่การวัดกำลัง ไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงอัตราที่ส่วนผิดพลาดและความผิดพลาดจากมุมเฟส

2.4.3 การลดค่าความผิดพลาด(Reduction of errors) การแก้ไขค่าความถูกต้อง ความแม่นยำของห้เมื่อแปลงแรงดัน ด้วยการค้นพบวัสดุใหม่โดยการปรับปรุงในการออกแบบซึ่งทำให้ผลรวมของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นน้อยกว่าเดิม

1.การลดความเป็นแม่เหล็กและกำลังสูญเสียจากสมการที่ (2.15) จะทำให้ทราบ ถึงผลความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนที่แท้จริง (actual ratio) และอัตราส่วนจำนวนรอบ(wmm ratio) ทำให้เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะขึ้นอยู่กับกระแสทางด้านทุติยภูมิ ส่วนที่สองจะประกอบด้วยกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กและกระแสที่เกิดการสูญเสียขณะไม่มีโหลด ซึ่งจะไม่สามารถเป็นไป

เอกสารได้เน้นกรณีของห้เมื่อแปลงกระแสและห้เมื่อแปลงกำลัง ค่าของกระแสทั้งสองส่วนนี้ขณะไม่มีโหลดการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถเทียบได้กับกระแสขณะมีโหลด ดังนั้น ในการพิจารณาในส่วนของการแก้ไขและชดเชยสามารถทำได้โดยการลดค่าของ I_m และ I_s โดยใช้แกนเหล็กที่มีคุณภาพที่ดี มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux) ต่ำ

2.ลดค่ารีซิสแตนซ์และค่ารีกเกอริแอกแตนซ์ ค่ารีซิสแตนซ์ของขดลวดสามารถทำให้ลดลงด้วยการใช้ตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดที่มีค่ามาก และความยาวของจำนวนรอบเฉลี่ยน้อยที่สุด ค่ารีกเกอริแอกแตนซ์ในขดลวดขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดทางด้านปฐภูมิและทฤษฎีภูมิ ดังนั้นเราควรที่จะทำให้ขดลวดทั้งสองใกล้เคียงกันที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และที่ว่างควรจะได้จำนวนตามความจำเป็น

ตามความเป็นจริง ควรจะทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก จะหมายถึงเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงในแกนเหล็กและทำให้ขดลวดมีจำนวนรอบที่น้อยลง จำนวนรอบของขดลวดที่น้อยลงเป็นเหตุให้ค่ารีกเกอริแอกแตนซ์ของสนามแม่เหล็กในขดลวดลดลง

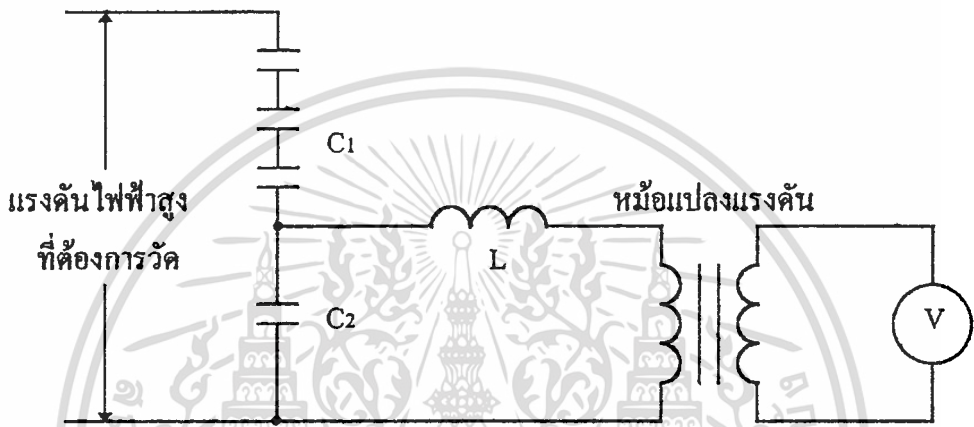
ซึ่งโดยทั่วไป ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $\approx 1.6-1.7 \text{ Wb/m}^2$ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ซึ่งต่างจากอดีตที่มีค่าสูง $\approx 1.2 \text{ Wb/m}^2$

3.การแก้ไขจำนวนรอบที่ขณะไม่มีโหลดค่าอัตราส่วนที่แท้จริงจะเกินค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{I_c r_p + I_m x_p}{V_s}$ ดูจากสมการ (2.11) ซึ่งโหลดที่เป็นรีซิสแตนซ์และรีแอกแตนซ์ หลังจากการเพิ่มของอัตราส่วน เพราะแรงดันตกคร่อมในรีซิสแตนซ์และรีกเกอริแอกแตนซ์ของขดลวดอัตราส่วนจำนวนรอบเท่ากับอัตราส่วนที่พิกัด แต่ถ้าอัตราส่วนที่แท้จริงต่างจากอัตราส่วนที่พิกัดจะทำให้เกิดค่าผิดพลาด

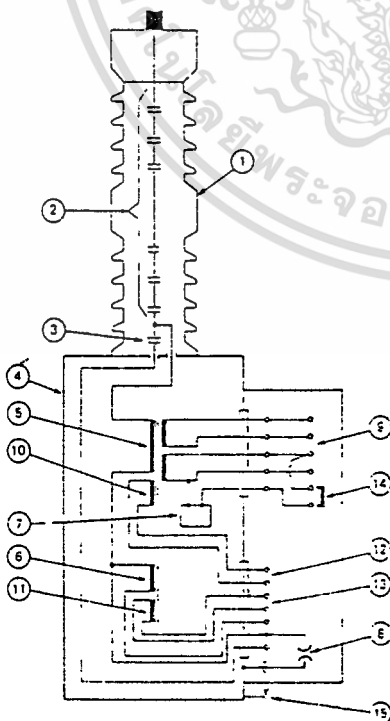
การแก้ปัญหาในการแก้อัตราส่วนจำนวนรอบให้น้อยกว่าอัตราส่วนที่พิกัดสามารถทำได้โดยการลดจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐภูมิ หรือเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทฤษฎีภูมิ ในที่นี้จะทำให้อัตราส่วนที่แท้จริงของหม้อแปลงเท่ากับอัตราส่วนที่พิกัด สำหรับค่าและชนิดของเบอร์เคน โดยเฉพาะ มุมเฟส θ ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบ โดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วนจำนวนรอบเล็กน้อย

2.5 หม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ

ขีดจำกัดสูงสุดของหม้อแปลงแรงดันแบบอินดักทีฟ ซึ่งใช้ชดเชยเฟสอย่างเฉื่อย จะใช้กับวัดแรงดันที่สูงได้ถึงประมาณ 300 kV แต่ถ้าต้องการวัดแรงดันที่สูงกว่านั้นจะต้องใช้การแบ่งแรงดันโดยอาศัยคาปาซิเตอร์และทำการต่ออินดักแตนซ์เพื่อที่จะลดค่าความผิดพลาดของคาปาซิแตนซ์ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการวัดแรงดันสูงโดยใช้หม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ

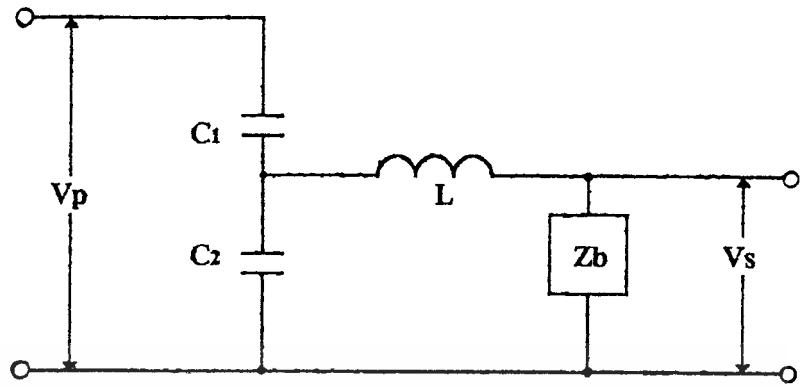


- ① Capacitor voltage divider (capacitor stack)
- ② High voltage capacitor
- ③ Intermediate voltage capacitor
- ④ Transformer unit
- ⑤ Transformer
- ⑥ Tuning reactor
- ⑦ Damping burden (ZD)
- ⑧ Protective gap for secondary short circuit
- ⑨ Secondary terminals
- ⑩ Tap coils of transformer
- ⑪ Tap coils of tuning reactor
- ⑫ Terminals for tap coils of transformer
- ⑬ Terminals for tap coils of tuning reactor
- ⑭ Joint for ZD
- ⑮ Low voltage terminal

NOTE:

The low voltage terminal must be earthed, when carrier equipment is not required.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้ภายใต้เงื่อนไขของกรมการไฟฟ้าใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันแบบคาปาซิทีฟ

จากรูปที่ 2.7 สามารถหาอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงได้ดังนี้

$$R = \frac{V_s}{V_p} \Rightarrow \frac{\frac{1}{Y}}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{Y}} \times \frac{Z_b}{j\omega L + Z_b} \quad \dots(2.21)$$

โดยที่

$$Y = j\omega C_2 + \frac{1}{j\omega L + Z_b}$$

ดังนั้น

$$R = \frac{C_1 + C_2}{C_1} + \frac{1 - \omega^2 L (C_1 + C_2)}{j\omega C_1 Z_b} \quad \dots(2.22)$$

เพื่อที่จะไม่ให้เกิดค่าผิดพลาดได้โดย $\omega^2 L (C_1 + C_2) = 1$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$R = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad \dots(2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) จะพบว่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงแบบคาปาซิทีฟจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ Z_b



2.6 คุณสมบัติของหม้อแปลงแรงดัน (Characteristic of potential transformer)

2.6.1 ผลกระทบเนื่องกระแสหรือโวลต(VA)ทางด้านทุติยภูมิ

ถ้าเราเพิ่มโวลตเบอร์เคนขึ้น จะทำให้กระแสทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น และจะส่งผลให้กระแสทางด้านปฐมภูมิเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้แรงดันตกคร่อมทั้งทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น และนอกจากนั้นยังทำให้แรงดันทาง V_p และ V_s ลดลง ดังนั้น เมื่ออัตราการเพิ่มภาระของโวลตเบอร์เคนเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้อัตราความผิดพลาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของภาระนั่นเอง ซึ่งหมายความว่าค่าผิดพลาดนี้จะแปรตามโวลตเบอร์เคน

เราจะต้องคำนึงถึงมุมเฟสระหว่างแรงดันทางด้านปฐมภูมิ(V_p)กับแรงดันทางด้านทุติยภูมิ(V_s) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันตกคร่อมรีซิสแตนซ์และรีแอคแตนซ์ภายในแล้ว ผลจากการเพิ่มภาระของโวลตทางทุติยภูมิยังมีผลทำให้มุมเฟสต่างกันมากขึ้นด้วย

2.6.2 ผลกระทบเนื่องจากเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโวลตเบอร์เคนทางด้านทุติยภูมิ

ถ้าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโวลตเบอร์เคนลดลง จะทำให้มุม(Δ)ซึ่งเป็นมุมเพาเวอร์แฟกเตอร์ของหม้อแปลงแรงดันมากขึ้น ส่งผลให้กระแสทางด้านปฐมภูมิ(I_p)ต่างเฟสกับกระแสทางด้านทุติยภูมิ(I_s) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งทำให้แรงดัน V_p และ V_s มีมุมใกล้เคียงกับแรงดัน E_p และ E_s ตามลำดับ ดังนั้นแรงดันตกคร่อมจึงเกือบจะคงที่ ผลของการเพิ่มขึ้นของ V_p จะสัมพันธ์กับ E_p แต่ V_p จะคงที่ ดังนั้น E_p จะลดลงและจะสัมพันธ์กับ V_p ส่วนแรงดัน V_s จะสัมพันธ์กับ E_s ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนจะเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าของเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโวลตเบอร์เคนทางด้านทุติยภูมิจะลดลง

2.6.3 ผลกระทบเนื่องจากความถี่

ถ้าแรงดันคงที่ เส้นแรงแม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ ถ้าความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง ดังนั้น I_m และ I_o จะลดลงทำให้อัตราส่วนของแรงดันลดลง การลดลงยังส่งผลให้ความถี่เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ค่ารีคเทจรีแอคแตนซ์เพิ่มขึ้น ดังนั้น ทำให้อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงแรงดันอันเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่ ค่าของ I_o และรีคเทจรีแอคแตนซ์เป็นผลให้เกิดความผิดพลาดที่มุมเฟส ผลจากการเพิ่มขึ้นของความถี่ และการเพิ่มของค่ารีคเทจรีแอคแตนซ์ทางด้านทุติยภูมิอย่างช้าๆจึงส่งผลให้มุมเฟสเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งความถี่ด้วย

2.6.4 ผลกระทบเนื่องจากแรงดันทางด้านปฐมภูมิ

ไม่มีผลมากนักกับการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายแรงดันที่มีผลต่อขดลวดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดัน ดังนั้น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนและค่าความผิดพลาดของมุมเฟสของแหล่งจ่ายจึงไม่ใช่สิ่งที่สำคัญ

2.7 ข้อกำหนดของหม้อแปลงแรงดันตามมาตรฐานของ IEC 186 (1987) จะมีข้อกำหนดทั่วไปดังนี้

2.7.1 ข้อกำหนดโดยทั่วไป หม้อแปลงชนิดนี้จะมีจุดประสงค์เพื่อการวัด แต่บางชนิดก็นำไปใช้โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อการป้องกัน

– ขอบเขต มาตรฐานนี้ได้นำไปใช้กับหม้อแปลงแรงดัน รุ่นใหม่เพื่อใช้กับเครื่องวัดไฟฟ้า และ อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังที่ความถี่ตั้งแต่ 15-100 Hz ข้อกำหนดโดยทั่วไปจะกล่าวครอบคลุมหม้อแปลงแรงดันทุกชนิด มาตรฐานนี้จะไม่ใช้กับหม้อแปลงในห้องปฏิบัติการ

– สภาวะการใช้งาน นอกจากรายละเอียดอย่างอื่นแล้ว มาตรฐานนี้ยังต้องกำหนดสภาวะการใช้งาน ผู้ผลิตจะแจ้งให้ทราบถึงสภาวะการใช้งานรวมถึง สภาวะที่ต่ำกว่าสภาวะการใช้งาน ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงมีลักษณะเปลี่ยนไป

– อุณหภูมิอากาศรอบข้าง

- ค่าสูงสุด 40°C
- ค่าเฉลี่ยประจำวัน ไม่เกิน 30°C
- ค่าต่ำสุด (สำหรับชนิดภายใน) -5°C
- ค่าต่ำสุด (สำหรับชนิดภายนอก) -25°C

– ระยะเวลาสูง ระยะเวลาสูงไม่เกิน 1000 เมตร (3300 ฟุต) เหนือระดับน้ำทะเล

– สภาพบรรยากาศ สภาพบรรยากาศจะต้องไม่อยู่ในสภาพที่เลวร้ายหนัก

2.7.2 ค่ามาตรฐานของพิกัดแรงดัน

พิกัดแรงดันทางด้านปฐมภูมิ

ค่ามาตรฐานของพิกัดแรงดันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 1 เฟส และ หม้อแปลง 3 เฟส เพื่อใช้กับระบบ 1 เฟส หรือระหว่างสายในระบบ 3 เฟส มาตรฐานค่าแรงดันพิกัดทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง 1 เฟส ถูกต่อระหว่างสายหนึ่งของระบบ 3 เฟส และ คอลงดินหรือระหว่างระบบจุดนิวตรอนและสายดินจะเป็น $1/\sqrt{3}$ เท่าของระบบแรงดัน

พิกัดแรงดันทางด้านทุติยภูมิ

พิกัดแรงดันทางด้านทุติยภูมิ จะเลือกตามพิกัดที่ใช้ใช้งาน โดยค่านั้นต้องต่ำกว่าค่ามาตรฐานสำหรับหม้อแปลง 1 เฟส ในระบบ 1 เฟส หรือค่อแบบไลน์ทูไลน์(line-to-line) ในระบบ 3 เฟส และสำหรับหม้อแปลง 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. พิกัดแรงดันในกลุ่มประเทศยุโรป

- 100 V, 110V

- 200 V สำหรับต่อวงจรทางด้านทุติยภูมิ

ข. พิกัดแรงดันในประเทศอเมริกา และ แคนาดา

- 120 V สำหรับระบบจำหน่าย

- 115 V สำหรับระบบส่งจ่าย

- 230 V สำหรับต่อวงจรทางด้านทุติยภูมิ

สำหรับหม้อแปลง เฟสเดียวถ้าใช้กับระบบเฟสทูเอิร์ธ (phase-to-earth) ในระบบ 3 เฟส ซึ่งพิกัดแรงดันด้านปฐมภูมิจะหารด้วย $\sqrt{3}$ ส่วนทางพิกัดแรงดันทางด้านทุติยภูมิ จะถูกหารด้วย $\sqrt{3}$ เช่นกัน ดังนั้นจึงยังรักษาค่าของพิกัด Transformation ratio ไว้ได้

2.7.3 ค่ามาตรฐานของพิกัดเอาต์พุต

เป็นค่าพิกัดเอาต์พุตที่เพนเวอร์แฟคเตอร์ 0.8 ด้านหลัง โดยอยู่ในรูปโวลต์-แอมแปร์ คือ 10,15,25,30,50,75,100,150,200,300,400,500 VA

ค่าที่ขีดเส้นใต้เป็นค่าที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ พิกัดเอาต์พุตของหม้อแปลง 3 เฟส โดยจะเป็นพิกัดเอาต์พุตต่อเฟส

2.7.4 ระดับความแม่นยำ(Accuracy class) คือ ค่าความเที่ยงตรงเป็นค่าที่กำหนดไว้ใน การออกแบบหม้อแปลงโดยเป็นค่าผิดพลาดซึ่งเกิดขึ้นภายในขอบเขตค่าจำกัดที่ระบุไว้ภายใต้ สภาพการใช้งานที่กำหนดไว้

ตารางที่ 2.1

แสดงระดับความแม่นยำและความผิดพลาดของเฟสเซอร์ของหม้อแปลงเครื่องวัด

Class	Percentage voltage (ratio) error $\pm$	Phase displacement $\pm$	
		Minutes	Centiradians
0.1	0.1	5	0.15
0.2	0.2	10	0.3
0.5	0.5	20	0.6
1.0	1.0	40	1.2
3.0	3.0	Not specified	Not specified

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 ค่ามาตรฐานของพิกัดของโวลเตจแฟคเตอร์ (Voltage factor)

โวลเตจแฟคเตอร์เป็นตัวที่ใช้หาแรงดันใช้งานสูงสุด ขึ้นอยู่กับระบบและสภาพการต่อลงดิน ค่ามาตรฐานของโวลเตจแฟคเตอร์ที่เหมาะสมตามสภาพความแตกต่างของสภาพต่อลงดิน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานของ แฟคเตอร์แรงดัน

Rated voltage factor	Rated time	Method of connecting the primary winding and system earthing conditions
1.2	Continuous	Between phases in any network Between transformer star-point and earth in any network
1.2	Continuous	Between phase and earth in an effectively earthed neutral system (Sub-clause 4.23 a))
1.5	30 s	
1.2	Continuous	Between phase and earth in a non-effectively earthed neutral system (Sub-clause 4.23 b)) with automatic earth fault tripping
1.9	30 s	
1.2	Continuous	Between phase and earth in an isolated neutral system without automatic earth fault tripping (Sub-clause 4.26) or in a resonant earthed system (Sub-clause 4.21) without automatic earth fault tripping
1.9	8 h	

2.7.6 ค่าจำกัดของอุณหภูมิที่สูงขึ้น

ค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นของขดลวดหม้อแปลง ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนของขดลวด หรือ ฉนวนห่อหุ้มขดลวดค่าสูงสุดของอุณหภูมิที่สูงขึ้นดูจาก ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าจำกัดของอุณหภูมิที่สูงขึ้นของขดลวด

Class of insulation (in accordance with IEC Publication 35*)	Maximum temperature rise (K)
All classes, immersed in oil	60
All classes, immersed in oil and hermetically sealed	65
All classes, immersed in bituminous compound	50
Classes not immersed in oil or bituminous compound:	
Y	45
A	60
E	75
B	85
F	110
H	135

Note. — For some materials (e.g. resin) the manufacturer should specify the relevant insulation class.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.7 ระดับพิกัดฉนวน ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ โดยดูได้จากตารางที่ 2.4 , 2.5 , 2.6

ตารางที่ 2.4

ระดับพิกัดฉนวน สำหรับ หม้อแปลง ขดลวดปฐมภูมิที่มีค่าแรงดันสูงสุด
สำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดต่ำกว่า 300 kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.)	Rated lightning-impulse withstand voltage (peak)	Rated power-frequency short-duration withstand (r.m.s.)
kV	kV	kV
0.72		3
1.2		6
3.6	20	10
	40	10
7.2	40	20
	60	20
12	60	28
	75	28
17.5	75	38
	95	38
24	95	50
	125	50
36	145	70
	170	70
52	250	95
72.5	325	140
	450	185
123	550	230
145	650	275
170	750	325
	850	360
245	950	395
	1050	460

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5

ระดับพิคคณวน สำหรับ หม้อแปลง ขดลวดปฐมภูมิที่มีค่าแรงดันสูงสุด
สำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดต่ำกว่า 52 kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s)	Rated lightning-impulse withstand voltage (peak)		Rated power-frequency short-duration withstand voltage (r.m.s)
	Power system		
	< 500 kVA	> 500 kVA	
kV	kV	kV	kV
4.40 13.20 13.97 14.52	60 95	75 110	19 34
26.4 36.5	150 200		50 70

ตารางที่ 2.6

ระดับพิคคณวน สำหรับ หม้อแปลง ขดลวดปฐมภูมิที่มีค่าแรงดันสูงสุด
สำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดสูงกว่า 300 kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s)		Rated switching-impulse withstand voltage (peak)	Rated lightning-impulse withstand voltage (peak)
kV		kV	kV
300		750	950
		850	1 050
362		850	1 050
		950	1 175
		950	1 175
420		1 050	1 300
		1 050	1 425
525		1 050	1 425
		1 175	1 550
		1 300	1 800
765		1 425	2 100
		1 550	2 400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ข้อควรพิจารณาในการเลือกหม้อแปลงแรงดัน

1. การเลือกพิกัดแรงดันทางด้านปฐมภูมิ โดยแรงดันที่ทำให้การวัดมีความแม่นยำจะอยู่ในช่วง 80-120 % ของแรงดันที่พิกัด
2. การเลือกพิกัดแรงดันทางด้านทุติยภูมิ โดยจะพิจารณาจากเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกัน แรงดันทางด้านทุติยภูมิตามมาตรฐานจะอยู่ในช่วง 100,110,120 V
3. การเลือกพิกัดกำลัง(VA) โดยเลือกได้ความต้องการของเครื่องวัดที่จะนำมาต่อ สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 พิกัดกำลัง (VA) ของเครื่องวัดต่าง ๆ

Voltmeter	Moving iron	3.5 to 7 VA
	Moving coil with rectifier	0.1 VA
	Recording Voltmeter	4.5 to 20 VA
Wattmeter		1 to 4 VA
	Recording Wattmeter	4 to 9 VA
Power Factor Meter	22-80 mV (for 12 A)	3.5 to 7 VA
	Recording Power Factor Meter	8 to 15 VA
Frequency Meter		1 to 5 VA
Synchroscope	Zero Voltmeter	2X10 to 2X20 VA
kWh meter		2 to 5 VA
Relay	Over current (voltage-control)	8 to 15 VA
	Neutral displacement	17 to 135 VA
	Over voltage	2 to 10 VA
	Under voltage	5 to 50 VA
	Distance relay	1/18 to 60 VA
	Earth fault	3 to 22 VA
	Revers power	14 to 50 VA
Tripping devices	Normally deenergised trip	75 to 120 VA
	Normally energised trip	50 to 70 VA
	Spring closing motor	140 to 500 VA
	Closing solenoid drive	400 to 1800 VA
Voltage regulators		50 to 100 VA
Leads between V.T. and fed instruments or relays.		
Voltage drop per 100 ft. 2 core copper conductors		
at 100 VA and $110/\sqrt{3}$ V with	2X0.01 sq in.	0.41% error
	2X0.02 sq in.	0.21%
	2X14 A.W.G.	1.27%
	2X12 A.W.G.	0.80%
	2X10 A.W.G.	0.50%
	2 X 8 A.W.G.	0.32%
at 100 VA and $110/\sqrt{3}$ V with	25 sq mm.	4.20%
	40 sq mm.	2.60%
	60 sq mm.	1.75%
	100 sq mm.	1.05%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การเลือกระดับความแม่นยำ โดยดูจากลักษณะและความจำเป็นในการใช้งาน สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงการเลือกระดับความแม่นยำ

ระดับความแม่นยำ	ลักษณะการใช้งาน
0.1	เมื่อใช้กับเครื่องมือวัดที่ต้องการค่าที่มีความเที่ยงตรงสูงส่วนมาก จะใช้ในห้องทดลอง
0.2	เมื่อใช้กับเครื่องมือวัดที่ต้องการค่าที่มีความเที่ยงตรง
0.5	เมื่อใช้กับเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม
1.0 , 3.0	เมื่อใช้ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดัน

ในการออกแบบหม้อแปลงแรงดัน นั้นจะมีขั้นตอนและวิธีในการออกแบบเช่นเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องคำนึงเสียก่อนว่ามีจุดประสงค์ในการใช้งานอย่างไร ใช้กับงานอะไร พิกัดกำลังของการใช้งานนั้นมีมากน้อยเพียงใด แล้วจึงพิจารณาขนาดของหม้อแปลงที่จะสร้าง โดยให้เหมาะสมกับขนาดของงานที่จะใช้ ซึ่งจะต้องอาศัยความรู้ทางทฤษฎีและความชำนาญมาประกอบกัน จึงจะสามารถออกแบบได้ในราคาที่ประหยัดและมีคุณภาพดี

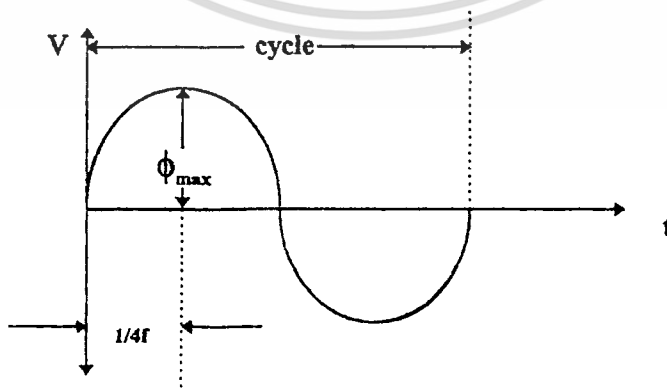
3.1 ทฤษฎี

3.1.1 สมการเบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลง

1. สมการการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า
2. สมการความสามารถของกำลังไฟฟ้า

สมการการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้สามารถได้จากคำจำกัดความของฟาราเดย์(Faraday) โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลาจากการพิจารณาจากรูปคลื่นไซน์(Sine wave) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจาก 0 ถึงค่าสูงสุดคือ ϕ_{max} ภายในเวลา $1/4f$ วินาที



รูปที่ 3.1 แสดงรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็ก(Flux wave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา $1/4f$ สำหรับตัวนำ 1 รอบ มีค่าเท่ากับ $\frac{\phi_{max}}{1/4f}$

$$\begin{aligned} \text{average e.m.f/turn} &= \frac{\phi_{max}}{1/4f} \\ &= 4f \phi_{max} \end{aligned} \quad \text{.....(3.1)}$$

สำหรับ Sine wave นั้นมีค่า form factor = 1.11

$$\text{form factor} = 1.11 = \frac{\text{R.M.S. value}}{\text{average value}}$$

$$\text{R.M.S. value of e.m.f. for N turn} = 4.44 Nf \phi_{max} \quad \text{.....(3.2)}$$

$$B = \frac{\phi_{max}}{A} \quad \text{.....(3.3)}$$

เมื่อ ϕ_{max} = เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด
 A = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
 หรือ $V = 4F fANB \times 10^8$ (3.4)

เมื่อ V : แรงเคลื่อนไฟฟ้าทางด้านการกำลังพิจารณาอยู่ มีหน่วยเป็น โวลท์
 F : ฟอรั่มแฟคเตอร์ (Form factor)
 f : ความถี่ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
 A : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
 N : จำนวนรอบของขดลวดที่กำลังพิจารณาอยู่
 B : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น maxwells ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย

สมการกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง

$$P : 0.707 \text{ } \eta WAB \times 10^8 \quad \text{.....(3.5)}$$

เมื่อ P : กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลท์-แอมป์
 J : ความหนาแน่นกระแสของหม้อแปลง มีหน่วยเป็น แอมป์ต่อ

ตารางขนาดเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- f : ความถี่ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)
W : พื้นที่ของหน้าตัดแกนเหล็กมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
A : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
B : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็น gauss
(Maxwells per square centimeter) หรือ $10,000 \text{ gauss} = 1 \text{ Wb/m}^2$

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$V = 4F f N A B \times 10^8$$

จะได้จำนวนรอบของขดลวดต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \frac{N}{V} &= \frac{10^8}{4F f A B} \\ &= \frac{10^8}{4.44 f A B} \\ \frac{N}{V} &= \frac{10^8}{4.44 \times 6.45 f A B} = \frac{10^8}{28.64 f A B} \end{aligned} \quad \dots(3.6)$$

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงวัสดุที่นำมาเป็นแกนเหล็ก

Density or Weight per Unit Volume

(Specific Weight) or Various Alloys

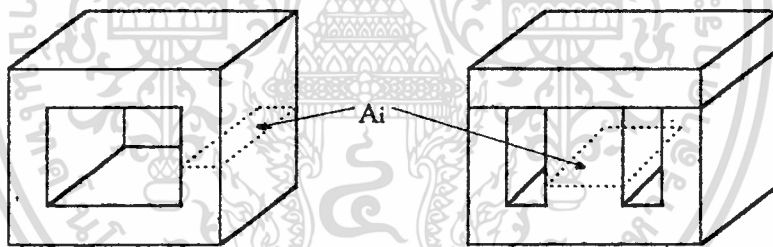
Alloy	Grams/cu cm	Pounds/cu in
Super Perm 8, Super Q80	8.74	0.316
Super Perm 49	8.25	0.298
Microsil , silicon	7.65	0.276
Super Flux	8.20	0.296
Hypertran	7.85	0.284

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

3.2.1 การกำหนดขนาดพิกัดกำลังของหม้อแปลง ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงก่อนอื่น ก็จะต้องกำหนดพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงเสียก่อน ทั้งนี้เพื่อให้สัมพันธ์กับงานที่ใช้

3.2.2 การหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ในการหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเพื่อให้ได้เหมาะสมกับพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงที่กำหนดในหัวข้อที่ 3.2.1 จะสามารถหาได้โดยใช้ สูตรซึ่งมีสำเนียงอยู่แล้ว โดยที่สูตรนี้จะเกี่ยวข้องกับค่า แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่กล่าวถึงนี้ ก็คือพื้นที่หน้าตัดส่วนที่ถูกพันด้วยขดลวดตัวนำของหม้อแปลง ถ้าเป็นแกนเหล็กแบบคอร์พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กก็คือความกว้างของขาในด้านใดด้านหนึ่งคูณกับความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) ถ้าเป็นแกนเหล็กแบบ เชลล์ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กส่วนที่พันขดลวดก็คือ ผลคูณของความกว้างของขากลางของแกนเหล็กตัว อี(E) กับความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) สูตรการหาพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กมีดังนี้



(ก) แกนเหล็กแบบคอร์

(ข) แกนเหล็กแบบเชลล์

รูปที่ 3.2 แสดงพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

3.2.2.1 ระบบอังกฤษ

$$\text{พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก } A_i = \frac{\sqrt{V-A}}{558} \quad (\text{นิ้ว})^2 \quad \dots(3.7)$$

3.2.2.2 ระบบเมตริก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก } A_i = 1.156\sqrt{V-A} \quad (\text{ซม.})^2 \quad \dots(3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.3 ระบบสากล

$$\text{พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก } A_i = 1.156 \times 10^{-4} \sqrt{V-A} \quad (\text{ม.})^2 \quad \dots (3.9)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } V-A &= \text{พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (โวลท์-แอมแปร์)} \\ A_i &= \text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (ตารางหน่วย)} \end{aligned}$$

3.2.3 การหาขนาดของแกนเหล็ก ในการหาขนาดของแกนเหล็กของหม้อแปลงนั้นจะต้องคำนึงถึงพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงเสมอ โดยที่ขนาดของแกนเหล็กจะต้องสัมพันธ์กันระหว่างพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กกับความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน ถ้าพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงมีค่ามาก ขนาดของแกนเหล็กก็จะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย และความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดก็จะหนาเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ขนาดของแกนเหล็ก(ความกว้างของขากลางของแกนเหล็กตัว อี เมื่อเป็นแกนเหล็กแบบเซลล์)จะต้องมีขนาดใกล้เคียงกับความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน มิฉะนั้นจะมีปัญหาการดันแกนของขดลวดที่พันทำให้ไม่สามารถประกอบแกนเหล็กในภายหลังได้

3.2.3.1 การหาขนาดความกว้างของแกนเหล็กแบบคอร์ จากสมการที่ (3.7), (3.8) และ (3.9) เราสามารถที่จะหาค่าของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กของหม้อแปลงได้แต่ก็ยังไม่เป็นข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการออกแบบสร้างหม้อแปลงค่าที่ต้องการทราบอีกคือ ความกว้างของขาของแกนเหล็ก และความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกันเพราะว่าในขณะนี้เพียงแต่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จากขนาดของพื้นที่หน้าตัดนี้ก็จะต้องนำไปหาค่าขนาดของแกนเหล็กที่เหมาะสมกับพิกัดของหม้อแปลง และความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน ทั้งนี้จะต้องพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กในอีกรูปแบบหนึ่งนอกจากใช้สูตรดังกล่าวมาแล้ว

จากรูปที่ 3.1 (ก) จะได้ว่า

$$\text{พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก } A_i = W T \quad (\text{นิ้ว})^2 \quad \dots (3.10)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } A_i &= \text{พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก} & (\text{ตารางหน่วย}) \\ W &= \text{ความกว้างของขากลางแกนเหล็ก} & (\text{นิ้ว}) \\ T &= \text{ความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดเข้าด้วยกัน} & (\text{นิ้ว}) \end{aligned}$$

ซึ่งค่าของ T นั้นจะกำหนดให้มีค่ามากกว่า W อยู่ประมาณ 1-1.5 เท่า ทั้งนี้เพื่อรักษาค่าทั้งสองไม่ให้ต่างกันมากจนเกินไปเพราะจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับขดลวดที่พันบนแกนออกมาดังได้กล่าวแล้ว กำหนดให้ m เป็นจำนวนเท่าที่ค่า T มากกว่า W ดังนั้น

$$T = mW \quad \text{นิ้ว} \quad \text{.....(3.11)}$$

จากสมการที่ (3.11) เมื่อนำค่า T ไปแทนค่าในสมการที่ (3.10) จะได้

$$A_i = mW^2 \quad \text{นิ้ว} \quad \text{.....(3.12)}$$

สมการที่ (3.7) = (3.12)

$$mW^2 = \frac{\sqrt{V-A}}{558}$$

$$W^2 = \frac{\sqrt{V-A}}{558m}$$

$$W = \sqrt{\frac{\sqrt{V-A}}{558m}}$$

$$W = 0.4233 \sqrt[4]{V-A} \times \sqrt{m} \quad \text{นิ้ว} \quad \text{.....(3.12)}$$

เมื่อหาค่า W ได้แล้วก็นำไปหาค่า T โดยแทนค่าในสมการที่ (3.10) ก็จะได้ค่า T หรือ อาจจะใช้ค่าที่ใกล้เคียงก็ได้

3.2.4 การห่าน้ำหนักของแกนเหล็ก เราสามารถห่าน้ำหนักของแกนเหล็กของหม้อแปลงโดยวิธีต่างดังนี้

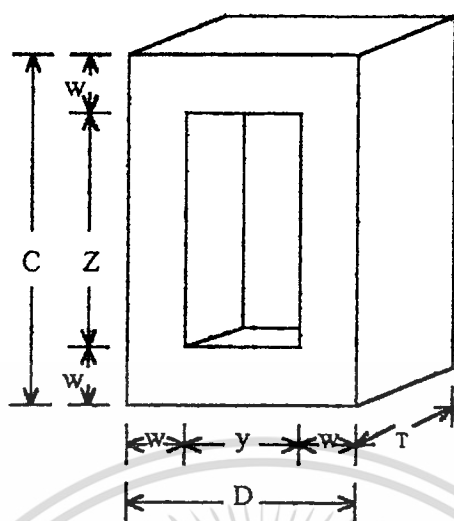
3.2.4.1 โดยการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า ของหม้อแปลงกับน้ำหนักของแกนเหล็ก โดยประมาณดังนี้

- สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป “กำหนดให้แกนเหล็กหนัก 0.625 กก. ต่อกำลังไฟฟ้า 100 โวลต์-แอมแปร์”

- สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เป็นเครื่องเชื่อมไฟฟ้า “กำหนดให้แกนเหล็กหนัก 0.455 กก. ต่อกำลังไฟฟ้า 100 โวลต์-แอมแปร์”

3.2.4.2 โดยการคำนวณ เราสามารถห่าน้ำหนักของแกนเหล็กหม้อแปลงได้เมื่อเราทราบขนาดของแกนเหล็กและความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดประกอบเข้าด้วยกันนั่นคือเราจะต้องทราบข้อมูลในหัวข้อที่ 3.2.3 ให้เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของแกนเหล็กที่ต้องคำนวณ

จากรูปที่ 3.3 จะต้องหาน้ำหนักของแกนเหล็กหม้อแปลง โดยใช้สูตร มวลของแกนเหล็กเท่ากับผลคูณของปริมาตรกับความหนาแน่นของแกนเหล็ก ($M = D V$) ซึ่ง จะต้องหาปริมาตรของแกนเหล็กทั้งหมดเสียก่อนโดยหักส่วนที่ว่างออกไป ส่วนค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กนั้นจะเป็นค่าคงที่ซึ่งเท่ากับ 0.00765 กก./ซม.³ (ดูจากตารางที่ 3.1)

จากรูปจะหาปริมาตรของแกนเหล็ก ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรแกนเหล็ก } V &= CDT - YZT && \text{ลบ.ซม.} \\ &= T(CD - YZ) && \text{ลบ.ซม.} \end{aligned}$$

เพราะว่า $M = DV$

และ $D = \text{ความหนาแน่นของแกนเหล็ก } 0.00765 \text{ กก.ลบ.ซม.}$

$V = \text{ปริมาตรแกนเหล็ก (ลบ.ซม.)}$

$$\text{ดังนั้น } M = 0.00765T(CD - YZ) \quad \text{กก.} \quad \text{.....(3.13)}$$

3.2.5 การหาจำนวนแผ่นของแกนเหล็กหม้อแปลง สามารถหาได้จากความหนาของแผ่นเหล็กที่อัดหารด้วยความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นซึ่งสรุปเป็นสูตร ได้ดังนี้

$$n = T/t_s \quad \text{.....(3.14)}$$

เมื่อ $n = \text{จำนวนแผ่นของแกนเหล็ก} \quad (\text{แผ่น})$

$T = \text{ความหนาของแผ่นเหล็กที่อัด} \quad (\text{ซม.})$

$t_s = \text{ความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น} \quad (0.035 \text{ ซม.})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำ สามารถหาได้โดยใช้สูตรความดั้มพันซ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะหาได้จากสมการพื้นฐานของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นั่นคือ

$$E = 4.44 f N B_m A_i \quad \text{โวลท์} \quad \text{.....(3.15)}$$

3.2.6.1 จำนวนรอบทางด้านแรงสูง

จากสมการที่ (3.15) จะได้

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44 f B_m A_i} \quad \text{.....(3.16)}$$

เมื่อ E_1 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านแรงสูง (โวลท์)

N_1 = จำนวนรอบขดลวดทางด้านแรงสูง (รอบ)

f = ความถี่กระแสไฟฟ้า (เฮิรตซ์)

B_m = ความเข้มของสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กที่ยังไม่อิ่มตัว
(ใช้ 1.2 เวเบอร์/ม.²)

A_i = พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กที่หาได้ (ตร.ม.)

3.2.6.2 จำนวนรอบทางด้านแรงต่ำ

จากสมการของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง (Transformation Ratio)

$$a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

จะได้

$$N_2 = \frac{E_2 N_1}{E_1} \quad \text{.....(3.17)}$$

เมื่อ E_1 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านแรงสูง (โวลท์)

E_2 = แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านแรงต่ำ (โวลท์)

N_1 = จำนวนรอบทางด้านแรงสูง (รอบ)

N_2 = จำนวนรอบทางด้านแรงต่ำ (รอบ)

3.2.7 การหาขนาดของขดลวดตัวนำที่ใช้พันหม้อแปลง

3.2.7.1 ข้อจำกัดทางด้านไฟฟ้า ขนาดของขดลวดตัวนำที่ใช้พันเป็นขดลวดของหม้อแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดซึ่งจะต้องไม่ให้ขดลวดร้อนจนเกินไปเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเต็มที่ กล่าวคือขดลวดจะต้องไม่รับกระแสไฟฟ้ามากเกินไป เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้กันมากจะอยู่ในระหว่าง 400-700 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์ (Circularmil/Ampere) ค่าตัวเลขดังกล่าวสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม กล่าวคือถ้าใช้ค่าตัวเลขน้อยเช่น 400 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์ ก็จะได้ขนาดของขดลวดตัวนำเล็กซึ่งจะมีผลเสียทางด้านแรงดันตก (Regulation) ถ้าใช้ตัวเลข 700 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์ จะได้ขนาดของขดลวดตัวนำโตกว่าซึ่งจะทำให้หม้อแปลงมีแรงดันตกดี แต่ราคาจะแพงกว่า ดังนั้นจะพิจารณาลักษณะการใช้งานที่เหมาะสมด้วย ซึ่งลักษณะดังกล่าว อาจแบ่งออกได้ดังนี้

3.2.7.1.1 หม้อแปลงที่ใช้งานชั่วคราว คือ การที่หม้อแปลงทำงานเป็นครั้งคราวไม่ต่อเนื่องก็ควรที่จะเลือก 400-500 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์

3.2.7.1.2 หม้อแปลงที่ใช้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน ในลักษณะการทำงานของหม้อแปลงแบบนี้จะทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานานหลายชั่วโมงและมีอากาศถ่ายเทพอสมควรก็ควรจะใช้ตัวเลขประมาณ 500-650 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์

3.2.7.1.3 หม้อแปลงที่ใช้งานต่อเนื่องหรือตลอดเวลา โดยที่การถ่ายเทของอากาศไม่ดีพอก็ควรที่จะเลือกค่าประมาณ 650-700 เซอคูลาร์มิล/แอมแปร์

3.2.7.2 ข้อจำกัดทางด้านขนาด หมายถึง ช่องหน้าต่างของแกนเหล็กที่ใช้พันขดลวดตัวนำว่า ขดลวดที่พันในช่องหน้าต่างนั้นเต็มหรือล้นแกนหรือไม่ เพราะถ้าใช้ขดลวดตัวนำที่มีขนาดโตมากเกินไปก็จะทำให้ขดลวดล้นช่องหน้าต่างออกมาทำให้ไม่สามารถประกอบแกนเหล็กได้ ดังนั้นจะต้องหาว่าช่องหน้าต่างนั้นถ้าจำนวนรอบพันเท่านี้ เบอร์ลวดเท่านี้จะสามารถพันลวดได้เต็มพอดีหรือไม่ ซึ่งที่ถูกต้องแล้วขดลวดที่พันควรจะมีช่องหน้าต่างพอดีหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งเราสามารถคำนวณหาช่องหน้าต่างซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่พันได้ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่คำนวณจำนวนรอบที่พัน แล้วนำไปเปิดตารางที่ 3.2 สามารถนำจำนวนรอบของขดลวดตัวนำที่พันไปเปรียบเทียบกับตารางว่าจำนวนรอบที่พันนั้นพอดีกับพื้นที่ช่องหน้าต่างของแกนเหล็กหรือไม่ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของขดลวดมากกว่าก็ต้องเปลี่ยนเบอร์ลวดให้เล็กลงหรือเปลี่ยนขนาดของแกนเหล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของช่องหน้าต่างให้ได้ตามที่ต้องการ ถ้าไม่คำนวณหาในขั้นตอนนี้อาจทำให้เกิดปัญหาประกอบแกนเหล็กไม่ได้

ตารางที่ 3.2

แสดงความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของขดลวดต่อพื้นที่หน้าตัด
และพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ

เบอร์ลวด AWG	จำนวนรอบขดลวด / พท.หน้าตัด 1 ตร.ซม	พท.หน้าตัด (CM)	เบอร์ลวด AWG	จำนวนรอบขดลวด/ พท.หน้าตัด 1 ตร.ซม	พท.หน้าตัด (CM)
10	13.96000	10384.0	25	407.6500	320.400
11	17.51500	8234.00	26	514.6010	254.100
12	21.85500	6530.00	27	642.4670	201.600
13	27.43500	5178.00	28	813.7520	159.800
14	34.25500	4106.00	29	1009.0520	126.800
15	42.93500	3257.00	30	1267.127	100.600
16	53.94000	2583.00	31	1581.003	79.7100
17	67.73500	2048.00	32	1960.754	63.000
18	84.94000	1624.00	33	2511.005	50.1300
19	105.5550	1288.00	34	3029.236	39.7500
20	132.0600	1021.00	35	3875.007	35.3000
21	165.0710	810.000	36	4913.500	25.0000
22	207.7000	642.600	37	6138.012	19.8300
23	258.0750	509.400	38	7610.515	15.7200
24	325.5000	404.000	39	9703.019	12.4700
			40	12028.02	9.89100

จากตารางที่ 3.2 เป็นตารางความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของขดลวดตัวนำกับพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำในพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าในพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเซนติเมตร จะมีขดลวดพันอยู่กี่รอบหรือมีจำนวนตัวนำกี่ตัวเมื่อหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องหน้าต่างของแกนเหล็กได้แล้วก็สามารถทราบได้ว่าลวดที่จะพันนั้นพอดีกับช่องหน้าต่างหรือไม่

เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างแกนเหล็กกับพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำที่พันแล้วขดลวดตัวนำจะมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าช่องว่างของแกนเหล็กแสดงว่าขดลวดสามารถพันลงในช่องว่างของช่องหน้าต่างของแกนเหล็กได้โดยที่ขดลวดไม่ดันแกนออกมาข้างนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7.2 ขั้นตอนการหาขนาดของขดลวดตัวนำ

3.2.7.2.1 หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ โดยใช้สูตร

$$I = \frac{V-A}{E} \quad \text{แอมแปร์} \quad \text{.....(3.18)}$$

3.2.7.2.2 หาขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำโดยเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้ากับพื้นที่หน้าตัดเป็นเซอร์คลาร์มิล (Circular Mills) ในตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 โดยคำนึงถึงข้อจำกัดทางด้านไฟฟ้าในหัวข้อที่ 3.2.7.1

3.2.7.2.3 หาขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำโดยใช้สูตร

$$A_{con.} = \frac{I}{di} \quad \text{ตร.มม.} \quad \text{.....(3.19)}$$

เมื่อ $A_{con.}$ = พ.ท.หน้าตัดของลวดตัวนำ (ตร.มม.)

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ (แอมแปร์)

di = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตร.มม.)

เลือกใช้ค่า 2.5-5.0

3.2.7.2.4 นำขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับคู่มือของลวดตัวนำจากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 ตามมาตรฐาน AWG หรือ SWG

3.2.8 การหาความยาวของลวดตัวนำ ขั้นตอนในการคำนวณหาความยาวของลวดตัวนำมีดังนี้

3.2.8.1 ข้อมูลที่จะต้องทราบก่อนการคำนวณ

3.2.8.1.1 ขนาดของลวดตัวนำ

3.2.8.1.2 จำนวนรอบการพันของขดลวดตัวนำ

3.2.8.1.3 ความกว้าง ความยาว และความสูง ของช่องใส่แกนเหล็กของกล่อง

บ๊อบบิน

3.2.8.2 หาคความสูงของชั้นของขดลวดที่พัน จากสูตร

$$h = Sd \quad \text{ซม.} \quad \text{.....(3.20)}$$

เมื่อ S = จำนวนชั้นของขดลวดที่พัน (ชั้น)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำที่หุ้มฉนวน (ซม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8.2.1 หาจำนวนชั้นจากสูตร

$$S = \frac{N}{N_s} \quad \text{ชั้น} \quad \dots\dots(3.21)$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวดตัวนำ (รอบ)

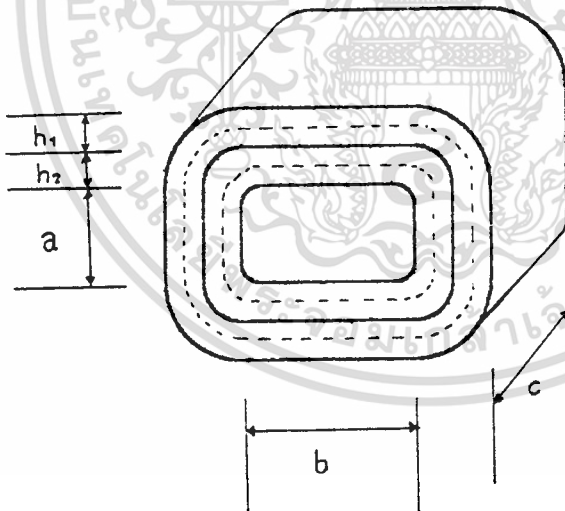
N_s = จำนวนรอบขดลวดต่อชั้น (รอบ)

3.2.8.2.2 หาจำนวนรอบต่อชั้นจากสูตร

$$N_s = \frac{l}{d} \quad \text{รอบ} \quad \dots\dots(3.22)$$

เมื่อ l = ความยาวของชั้นของขดลวด (ซม.)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลวดตัวนำหุ้มฉนวน (ซม.)



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของขดลวดตัวนำทั้งสองด้าน

3.2.8.3 หาความยาวของหลอดตัวนำด้านใน(แรงต่ำ) จากสูตร

$$L_{Li} = L_{Lav} N_2 \quad \text{ชม.} \quad \text{.....(3.23)}$$

เมื่อ L_{Li} = ความยาวทั้งหมดของหลอดตัวนำ (ชม.)
 L_{Lav} = ความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (ชม.)
 N_2 = จำนวนรอบขดหลอดด้านแรงต่ำ (รอบ)

3.2.8.3.1 หาความยาวเฉลี่ยต่อรอบของขดหลอดด้านใน (แรงต่ำ) จากสูตร

$$L_{Lav} = 2(a+b+2h_2) \quad \text{ชม.} \quad \text{.....(3.24)}$$

เมื่อ a = ความกว้างของบ๊อบบิน (ชม.)
 b = ความยาวของบ๊อบบิน (ชม.)
 h_2 = ความสูงของชั้นของขดหลอดด้านใน (ชม.)

3.2.8.3.2 หาความยาวทั้งหมดของขดหลอดตัวนำด้านใน(แรงต่ำ) จากสูตร

$$L_{Li} = 2(a+b+2h_2) N_2 \quad \text{ชม.} \quad \text{.....(3.25)}$$

3.2.8.4 หาความยาวของหลอดตัวนำด้านนอก (แรงสูง) จากสูตร

$$L_{Hi} = L_{Hav} N_1 \quad \text{ชม.} \quad \text{.....(3.26)}$$

เมื่อ L_{Hav} = ความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (ชม.)
 N_1 = จำนวนรอบขดหลอดด้านแรงสูง (ชม.)
 L_{Hi} = ความยาวของหลอดตัวนำทั้งหมด (ชม.)

3.2.8.4.1 หาความยาวเฉลี่ยของขดหลอดด้านนอก(แรงสูง) จากสูตร

$$L_{Hav} = 2(a+b+4h_2+2h_1) \quad (\text{ชม.}) \quad \text{.....(3.27)}$$

เมื่อ L_{Hav} = ความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (ชม.)
 h_1 = ความสูงของชั้นของขดหลอดด้านนอก (ชม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8.4.2 หาความยาวทั้งหมดของขดลวดตัวนำด้านนอก (แรงสูง) จากสูตร

$$L_{\text{H}} = 2(a+b+4h_2+2h_1) N_1 \quad (\text{ชม.}) \quad \dots(3.28)$$

เมื่อ $L_{\text{H}} =$ ความยาวทั้งหมดของลวดตัวนำ (ชม.)
 $N_1 =$ จำนวนรอบทั้งหมดของขดลวดตัวนำด้านแรงสูง (ชม.)

3.2.9 การหาน้ำหนักของขดลวดตัวนำ การหาน้ำหนักของขดลวดตัวนำจะได้จากการหาความยาวให้ได้เสียก่อน เมื่อได้ค่าความยาวของขดลวดตัวนำแล้วก็นำไปเปรียบเทียบกับน้ำหนักจากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 ซึ่งจะบอกให้ทราบว่าลวดเบอร์ไหน ตามมาตรฐานใด จะมีน้ำหนักเป็นเท่าใดเมื่อมีความยาวในหน่วยที่กำหนดให้ หาได้จากสูตร

$$W_w = W_k L \text{ กก. หรือปอนด์} \quad \dots(3.29)$$

เมื่อ $W_w =$ น้ำหนักของขดลวด (กก.หรือปอนด์)
 $W_k =$ น้ำหนักของลวดต่อหน่วยความยาว (กก./กม. หรือ ปอนด์/ฟุต)
 $L =$ ความยาวของลวดตัวนำที่พัน (กม.หรือฟุต)

ตารางที่ 3.3 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางและความต้านทานลวดตัวนำ

เบอร์ลวด AWG	เส้นผ่านศูนย์กลางลวด หุ้มฉนวน (มม.)(d)	จำนวนรอบ/ซม. (รอบ)(K)	คดท./1000 ฟุต ที่ 25 ช. (โอห์ม)
08	3.3422	2.9920	0.6405
09	2.9533	3.3860	0.8077
10	2.6462	3.7790	1.0180
11	2.3736	4.2130	1.2840
12	2.1168	4.7240	1.6190
13	1.8813	5.3150	2.0420
14	1.6932	5.9060	2.5750
15	1.5119	6.6140	3.2470
16	1.3439	7.4410	4.0940
17	1.1982	8.3460	5.1630
18	1.0763	9.2910	6.5100
19	0.9621	10.394	8.2100
20	0.8639	11.575	10.350
21	0.7674	13.031	13.050
22	0.6855	14.567	16.460
23	0.6150	16.260	20.760
24	0.5486	18.228	26.760
25	0.4913	20.354	33.000
26	0.4379	22.835	41.620
27	0.3914	25.551	52.480
28	0.3494	28.622	66.170
29	0.3113	32.126	83.440
30	0.2807	35.630	105.20
31	0.2515	39.764	132.70
32	0.2248	44.488	167.30
33	0.2000	50.000	211.00
34	0.1776	56.299	266.00
35	0.1608	62.205	335.00
36	0.1451	68.898	423.00
37	0.1283	77.953	533.00
38	0.1134	88.189	673.00
39	0.1024	97.638	848.00
40	0.0901	111.02	1070.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformers Designed)

หม้อแปลงแรงดันที่สร้างขึ้นถูกกำหนดให้มีคุณสมบัติดังนี้

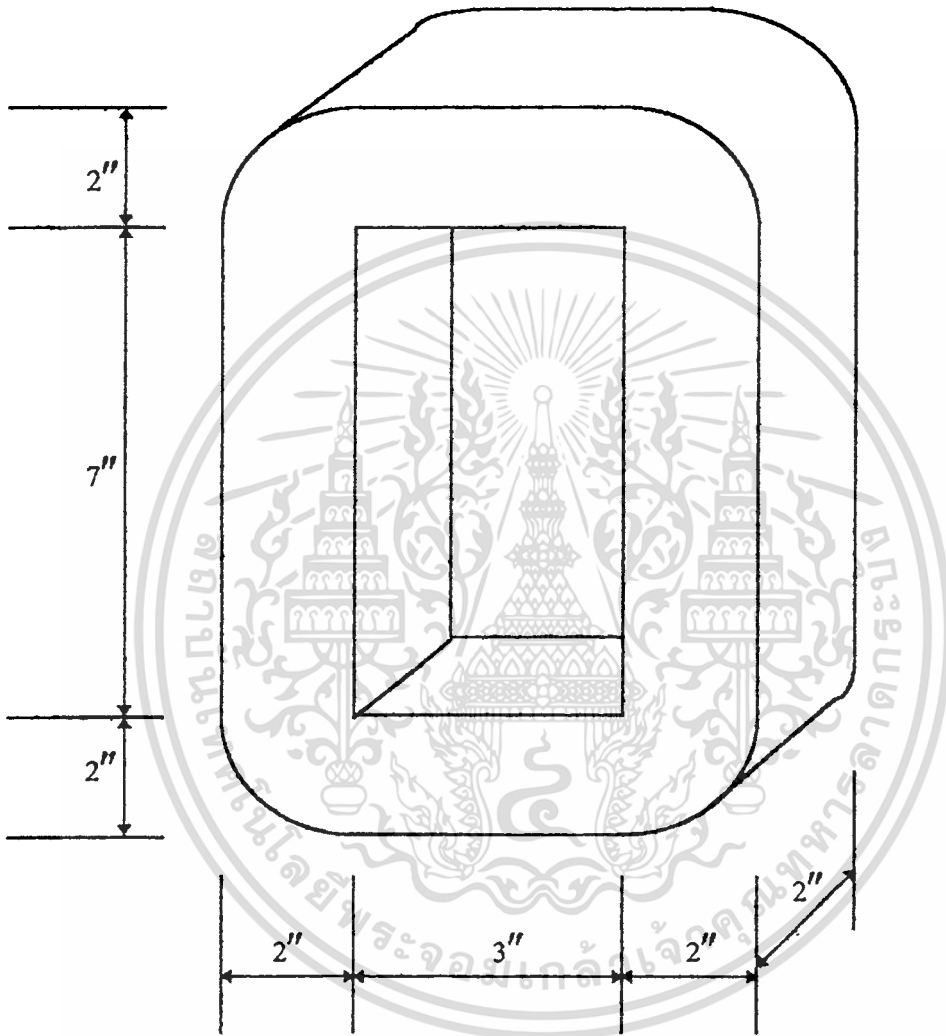
- แรงดันทางด้านแรงดันสูง (High voltage) 24 กิโลโวลต์ (kV)
- แรงดันทางด้านแรงดันต่ำ (Low voltage) 110 โวลต์ (V)
- ค่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็ก (flux density, B) ที่จุดใช้งานปกติ 1.2 เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m^2)
- พิกัดกำลังไฟฟ้า 25 โวลต์ - แอมป์ (VA) ขนาด 1 เฟส
- ความถี่ใช้งาน 50 Hz
- ลักษณะการใช้งานของหม้อแปลง : นำไปใช้กับเครื่องมือวัดต่าง ๆ

3.3.1 การออกแบบและคำนวณแกนเหล็ก

จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก } A_i &= \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \\
 &= \frac{\sqrt{25}}{5.58} \\
 &= 0.896 \quad \text{ตารางนิ้ว}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้เป็นแบบคอร์ (Core type) และเพื่อต้องการลดจำนวนรอบให้น้อยลงจึงต้องการแกนเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ขึ้น โดยเลือกใช้ขนาดพื้นที่หน้าตัด 4 ตารางนิ้ว ซึ่งมีขนาดดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดแกนหลักที่ใช้จริง

หมายเหตุ ค่าการเปลี่ยนหน่วยต่าง ๆ ดูได้จากตารางที่ 2 ในภาคผนวกที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาน้ำหนักแกนเหล็ก

เราสามารถทำการคำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็กได้จากสูตร

มวลของแกนเหล็ก = ผลคูณของปริมาตรกับความหนาแน่นของแกนเหล็ก

$$M = D V$$

เมื่อ M = มวลของแกนเหล็ก (ก.ก.)

V = ปริมาตรของแกนเหล็ก (ซม.)³

D = ความหนาแน่นของแกนเหล็ก (กก./ซม.)³

จากตารางที่ 3.1 จะได้ $D = 0.00765$ กก./ซม.³

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (3.13) จะได้ } M &= 0.00765 T (C D - Y Z) \\ &= 0.00765 \times (2 \times 2.54) \times [(1 \times 2.54)(7 \times 2.54) - (3 \times 2.54)(7 \times 2.54)] \\ &= 14.04 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

3.3.2 การคำนวณและกำหนดขนาดของขดลวดของหม้อแปลงแรงดัน

3.3.2.1 หาจำนวนรอบของขดลวดแต่ละด้าน

— จำนวนรอบของขดลวดทางด้านแรงดันสูง

จากสมการที่ (3.16) จะได้

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{E_1}{4.44 f B_m A_i} \\ &= \frac{24 \times 10^3}{4.44 \times 50 \times 1.2 \times (4 \times 6.451 \times 10^{-4})} \\ &= 34913.22 \text{ รอบ} \\ &= 34914 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

— จำนวนรอบของขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ

จากสมการที่ (3.17) จะได้

$$\begin{aligned} N_2 &= \frac{E_2 N_1}{E_1} \\ &= \frac{110 \times 34914}{24 \times 10^3} \\ &= 160.02 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการตรวจสอบอัตราส่วน ระหว่างจำนวนรอบของขดลวดทั้งสองกับแรงดันทั้งสองด้าน จะมีค่าต่างกันเล็กน้อย ดังนั้น เพื่อความเที่ยงตรงของหม้อแปลงจึงได้ทำการลดรอบของขดลวดทางด้านแรงสูงลงเพื่อให้อัตราส่วนระหว่าง $\frac{N_1}{N_2}$ และ $\frac{E_1}{E_2}$ นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดจึงลดรอบทางแรงดันสูง (N1) ลงเหลือ 34,910 รอบ

4.3.2.2 หาขนาดของลวดตัวนำ

— ด้านแรงดันสูง

$$\text{จาก } I_1 = \frac{VA}{E_1}$$

เมื่อ V-A = พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (โวลท์ - แอมป์)

I_1 = กระแสทางด้านแรงดันสูง (แอมแปร์)

E_1 = แรงดันทางด้านแรงดันสูง (โวลท์)

$$I_1 = \frac{25}{24 \times 10^3}$$

$$= 1.042 \times 10^{-3} \text{ แอมแปร์ หรือ } 1.042 \text{ มิลลิแอมแปร์}$$

จากหัวข้อ 4.3.7.2.2 และ 4.2.7.1 จะเลือกค่าความหนาแน่นของกระแสที่ค่า 600 เซอคูลาร์มิลต่อแอมแปร์ จะได้พื้นที่หน้าตัดขดลวดเท่ากับ $1.042 \times 10^{-3} \times 600 = 0.6252$ เซอคูลาร์มิล

เมื่อนำไปเทียบในตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 ซึ่งเป็นตารางแสดงเบอร์ขดลวด จะเห็นว่าสามารถใช้กับขดลวดที่เบอร์เล็กสุดได้ แต่เพื่อลดค่าความต้านทานของขดลวด จึงเลือกลวดตัวนำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะต้องไม่ให้ขนาดใหญ่เกินไป ซึ่งราคาของขดลวดจะมีราคาแพงขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้นรวมถึงเมื่อทำการพันขดลวดบนแกนเหล็กแล้วขดลวดที่พันอาจจะดันออกนอกแกนเหล็กได้ ในที่นี้เราเลือกใช้ลวดเบอร์ 33 SWG. ซึ่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2540 มิลลิเมตร

— ด้านแรงดันต่ำ

$$\text{จาก } I_2 = \frac{VA}{E_2}$$

เมื่อ VA = พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (โวลท์ - แอมป์)

I_2 = กระแสทางด้านแรงดันต่ำ (แอมแปร์)

E_2 = แรงดันทางด้านแรงดันต่ำ (โวลท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_2 = \frac{25}{110}$$

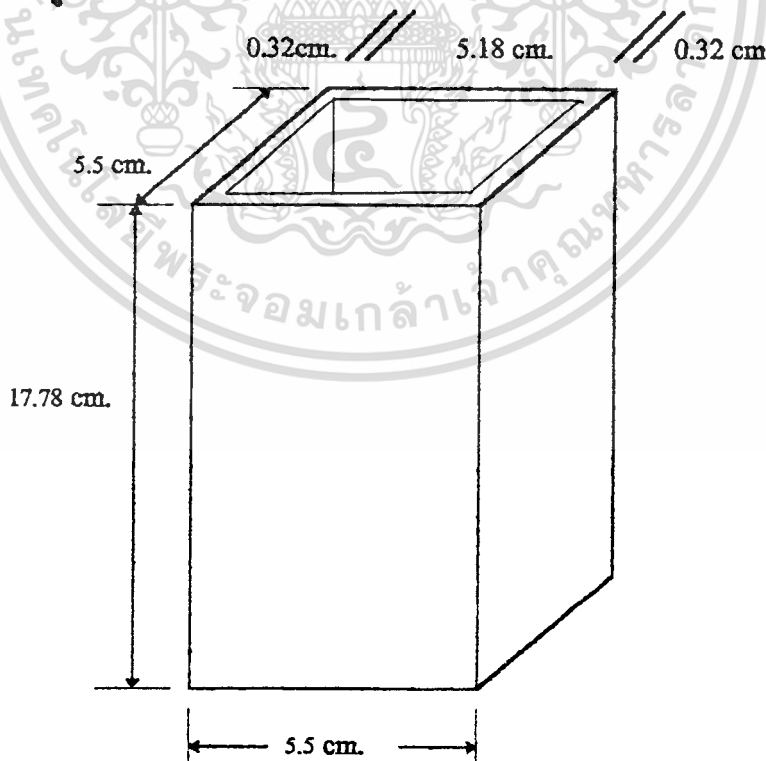
$$= 0.227 \text{ แอมแปร์}$$

เลือกค่าความหนาแน่นกระแสที่ 600 เซอคูลาร์มิลต่อแอมแปร์ จะได้พื้นที่หน้าตัดขดลวดเท่ากับ $600 \times 0.227 = 136.2$ เซอคูลาร์มิล จากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 เพื่อเลือกเบอร์ของลวดตัวนำ โดยจะใช้หลักการเลือกแบบเคียวกับการเลือกเบอร์ขดลวดทางด้านแรงดันสูง คือจะเลือกใช้เบอร์ 18 SWG ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.219 มิลลิเมตร

3.3.2.3 หาขนาดของบ๊อบบิน (Bobin)

จากพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีขนาด 2×2 ตารางนิ้ว หรือ 5.08×5.08 ตารางเซนติเมตร และความยาวของหน้าด่างแกนเหล็กเท่ากับ 7 นิ้ว หรือ 17.78 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5

วัสดุที่ใช้ในการทำบ๊อบบินซึ่งจะเป็นฉนวนกันระหว่างขดลวดกับแกนเหล็ก จะใช้กระดาษอัดแรงชนิดหนา 1.6 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่นประกบกัน ประกอบเป็นบ๊อบบินเพื่อให้สามารถมีความทนต่อแรงดันเบรคดาวน์(Break down)ได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ซึ่งจะกล่าวไว้ภายหลัง โดยบ๊อบบินจะมีขนาดดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของบ๊อบบิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.4 หาความยาวของลวดตัวนำ

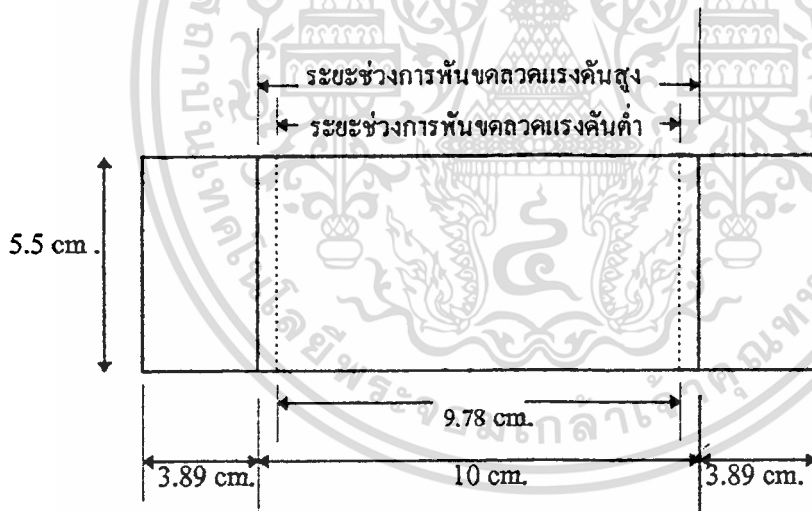
3.3.2.4.1 ด้านแรงดันต่ำ

— หาจำนวนรอบต่อชั้นของขดลวด

จากสมการที่ (3.22) จะได้

$$\begin{aligned}
 N_s &= \frac{l}{d} && (\text{กำหนดให้ } l = 9.78 \text{ cm}) \\
 &= \frac{9.78}{1.29/10} \\
 &= 80.23 \\
 &\approx 80 \quad \text{รอบต่อชั้น}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ในขดลวดด้านแรงดันต่ำจะพันขดลวดได้ 2 ชั้น ชั้นละ 80 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงระยะการพันขดลวดทางด้านแรงดันต่ำและแรงสูง ใน 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในแต่ละชั้นของขดลวดทางด้านแรงต่ำจะใช้กระดษณวนคั่นระหว่างชั้นขดลวด ซึ่งเป็นกระดษณกราฟท์ที่มีความหนา 0.13 มิลลิเมตร โดยจะพันเป็นจำนวนหนึ่งรอบในแต่ละชั้นของขดลวด

- หาความสูงของชั้นขดลวด
จากสมการที่ (3.20) จะได้

$$\begin{aligned} h_2 &= S d \\ &= 2 \times 0.1219 \\ &= 0.244 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

เมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนเข้าไปจะเป็น $= 0.244 + \frac{0.13}{10} + 0.32 = 0.577$ เซนติเมตร

- หาความยาวของขดลวด
จากสมการที่ (3.25) จะได้

$$\begin{aligned} L_{Li} &= 2(a+b+2h_2)N_2 \\ &= 2 \times [5.5+5.5+2(0.377)] \times 160 \\ &= 3889.28 \text{ เซนติเมตร} \\ &= 0.0389 \text{ กิโลเมตร} \end{aligned}$$

3.3.2.4.2 ด้านแรงดันสูง

- หาจำนวนรอบต่อชั้นของขดลวด
จากสมการที่ (3.22) จะได้

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{1}{d} \quad (\text{กำหนดให้ } 1 = 10 \text{ เซนติเมตร}) \\ &= \frac{10}{0.245/10} \\ &= 393.7 \\ &\approx 393 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

ดังนั้นในขดลวดด้านแรงสูงจะพันขดลวดได้ $\frac{34910}{393} = 88.8 \approx 89$ ชั้น ชั้นละ 393 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หาความสูงของชั้นขดลวด
จากสมการที่ (3.20) จะได้

$$\begin{aligned} h_2 &= S d \\ &= 89 \times 0.0254 \\ &= 2.26 \quad \text{เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ก่อนการพันขดลวดแรงสูงนั้น จะต้องมีการฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับแรงสูงเสียก่อน ซึ่งต้องหนาพอสมควร โดยจะใช้กระดาษฉนวนหนา 0.13 มิลลิเมตรเป็นจำนวน 9 รอบ และฉนวนคั่นระหว่างชั้นของขดลวดแต่ละชั้นในขดลวดแรงสูง จะเป็นกระดาษฉนวนหนา 0.13 มิลลิเมตรเช่นกัน แต่จะพัน 2 รอบในแต่ละชั้น และต้องทำการหุ้มฉนวนคั่นนอกของขดลวดแรงสูงด้วยกระดาษฉนวนหนา 0.13 มิลลิเมตร จำนวน 9 ชั้น

เมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนเข้าไปความสูงทั้งหมดของขดลวดในด้านแรงสูงจะเป็น

$$\begin{aligned} &= 2.26 + \left(\frac{0.13}{10} \times 9 \times 2\right) + \left(\frac{0.13}{10} \times 2 \times 88\right) \\ &= 4.782 \quad \text{เซนติเมตร} \end{aligned}$$

- หาความยาวของขดลวด
จากสมการที่ (3.28) จะได้

$$\begin{aligned} L_{HT} &= 2(a+b+4h_2+2h_1)N_1 \\ &= 2[5.5+5.5+4(0.577)+2(4.782)] \times 34910 \\ &= 1596923.04 \quad \text{เซนติเมตร} \\ &= 15.969 \quad \text{กิโลเมตร} \end{aligned}$$

- หาความสูงของขดลวดทั้งหมด

$$\begin{aligned} h &= h_1 + h_2 \\ &= 0.577 + 4.782 \\ &= 5.36 \quad \text{เซนติเมตร} \end{aligned}$$

3.3.2.5 หาคความต้านทานและน้ำหนักของลวดตัวนำ

3.3.2.5.1 ความต้านทานของลวดตัวนำ

— ด้านแรงดันต่ำ

หาได้จากตารางที่ 3.3 ซึ่งเบอร์ขดลวดที่ใช้ในการพันเป็นเบอร์ 18 SWG. เมื่อนำไปเทียบเบอร์ในหน่วย AWG. ในตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 จะได้ขดลวดเบอร์ 16 AWG ซึ่งในตารางที่ 3.3 ที่ลวดเบอร์ 16 AWG จะได้ค่าความต้านทานต่อ 1,000 ฟุต เป็น 4.094 โอห์ม

จากที่คำนวณความยาวของขดลวดในด้านแรงต่ำ เท่ากับ 0.0389 กิโลเมตร ซึ่งเท่ากับ 127.592 ฟุต

$$\begin{aligned} \text{จะได้ค่าความต้านทานขดลวดแรงต่ำ}(R_2) &= \frac{4.094 \times 127.592}{1000} \\ &= 0.522 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

— ด้านแรงดันสูง

จากเบอร์ขดลวดเบอร์ 33 SWG เมื่อนำไปเทียบเป็นหน่วย AWG จะเป็นเบอร์ 30 AWG จากตารางที่ 3.3 จะได้ค่าความต้านทานต่อ 1,000 ฟุตเป็น 105.2 โอห์ม

จากที่คำนวณความยาวของขดลวดในด้านแรงสูง เท่ากับ 15.969 กิโลเมตร ซึ่งเท่ากับ 52378.32 ฟุต

$$\begin{aligned} \text{จะได้ค่าความต้านทานขดลวดแรงสูง}(R_1) &= \frac{105.2 \times 52378.32}{1000} \\ &= 5.51 \text{ กิโลโอห์ม} \end{aligned}$$

3.3.2.5.2 น้ำหนักขดลวด

— ด้านแรงดันต่ำ

จากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 ที่เบอร์ขดลวด 18 SWG จะมีน้ำหนัก 10.38 กิโลกรัมต่อ กิโลเมตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ขดลวดด้านแรงต่ำจะมีน้ำหนัก} &= 10.38 \times 0.0389 \\ &= 0.403 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

— ด้านแรงดันสูง

จากตารางที่ 1 ในภาคผนวกที่ 1 ขดลวดเบอร์ 33 SWG จะมีน้ำหนัก 0.4505 กิโลกรัม ต่อกิโลเมตร

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น ขดลวดด้านแรงสูงจะมีน้ำหนัก} &= 0.4505 \times 15.969 \\ &= 7.2 \text{ กิโลกรัม}\end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำหนักรวมของขดลวดทั้ง 2 ขด $= 7.2 + 0.403 = 7.603$ กิโลกรัม เมื่อรวม น้ำหนักของฉนวนด้วยขดลวดทั้งหมดจะมีน้ำหนักประมาณ 8 กิโลกรัม

3.3.2.6 หาประสิทธิภาพของหม้อแปลง

3.3.2.6.1 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม

— ด้านแรงดันสูง

$$\begin{aligned}V_{d_1} &= I_1 \times R_1 \\ &= 1.042 \times 10^{-3} \times 5.51 \times 10^3 \\ &= 5.74 \text{ โวลท์}\end{aligned}$$

— ด้านแรงดันต่ำ

$$\begin{aligned}V_{d_2} &= I_2 \times R_2 \\ &= 0.227 \times 0.522 \\ &= 0.118 \text{ โวลท์}\end{aligned}$$

3.3.2.6.2 ค่าสูญเสียในทองแดง

$$\begin{aligned}W_1 &= I_1^2 \times R_1 \\ &= (1.042 \times 10^{-3})^2 \times 5.51 \times 10^3 \\ &= 0.00598 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_2 &= I_2^2 \times R_2 \\ &= (0.227)^2 \times 0.522 \\ &= 0.04 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าสูญเสียในทองแดงทั้งหมดจะเท่ากับ } W_1 + W_2 &= 0.00598 + 0.04 \\ &= 0.04598 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.6.3 แรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำ (V_o)

$$\begin{aligned}
 V_o &= \frac{N_1(E_1 - V_{d1}) - V_{d2}}{N_2} \\
 &= \frac{160 \times (24 \times 10^3 - 5.74) - 0.118}{34910} \\
 &= 109.85 \text{ โวลต์}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากในหม้อแปลงเครื่องวัดนี้เราต้องการให้แรงดันเอาต์พุตออกมาที่ตรงที่สุด ซึ่งเราต้องการแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่ 110 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องทำการลวดรอบทางด้านขดลวดแรงดันสูงลงไป เพื่อให้ได้แรงดันทางแรงต่ำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 110 โวลต์พอดี

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{(E_1 - V_{d1})N_2}{(V_o + V_{d2})} \\
 &= \frac{(24 \times 10^3 - 5.54) \times 160}{(110 + 0.118)} \\
 &= 34863.34 \text{ รอบ} \\
 &\approx 34864 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

จะได้แรงดันเอาต์พุตที่จ่ายออกมาขณะ ไม่มีโหลด (No load) เท่ากับ

$$\begin{aligned}
 V_o &= \frac{N_2 E_1}{N_1} \\
 &= \frac{160 \times 24 \times 10^3}{34864} \\
 &= 110.14 \text{ โวลต์}
 \end{aligned}$$

3.3.2.6.4 ส่วนที่สูญเสียในแกนเหล็ก

จากแกนเหล็กหนัก 14 kg และค่าสูญเสียในแกนเหล็กที่ค่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.2 เวเบอร์ต่อตารางเมตร จากกราฟ Core loss curves ที่ 50 Hz ในภาคผนวกที่ 2 เท่ากับ 0.42 วัตต์ต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นค่าสูญเสียในแกนเหล็ก} &= 0.42 \times 14 \\
 &= 5.88 \text{ วัตต์}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.6.5 ค่าสูญเสียทั้งหมดในหม้อแปลง

$$\begin{aligned}\text{ค่าสูญเสียทั้งหมดในหม้อแปลง} &= \text{ส่วนที่สูญเสียในทองแดง} \\ &+ \text{ส่วนที่สูญเสียในแกนเหล็ก} \\ &= 0.04598 + 5.88 \\ &= 5.926 \text{ วัตต์}\end{aligned}$$

3.3.2.6.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงและเปอร์เซ็นต์เรกกูเลชัน

$$\begin{aligned}\text{- ประสิทธิภาพของหม้อแปลง} &= \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมา}}{\text{กำลังไฟฟ้าที่เข้าหม้อแปลง}} \times 100 \\ &= \frac{25 \times 100}{25 + 5.926} \\ &= 80.8\% \\ \text{- เปอร์เซ็นต์เรกกูเลชัน} &= \frac{V_{\text{no-load}} - V_{\text{full load}}}{V_{\text{full load}}} \times 100 \\ &= \frac{(110.14 - 110)}{110} \times 100 \\ &= 0.127\%\end{aligned}$$

3.3.3 ทำการออกแบบตัวถังหม้อแปลง

ความยาวของตัวถังหม้อแปลงจะพิจารณาจากความยาวของแกนเหล็ก ซึ่งแกนเหล็กจะมีความยาวเท่ากับ 24 cm. เมื่อเผื่อด้านละ 2.5 cm. เพื่อที่จะให้แกนเหล็กลงได้สะดวกและเผื่อช่องน้ำมันกับฉนวนจะได้ความยาวของตัวถังเท่ากับ 29 cm. (ค่าความคงทนแรงดันไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันดูได้จากหัวข้อ 3.4 เรื่องน้ำมันหม้อแปลง)

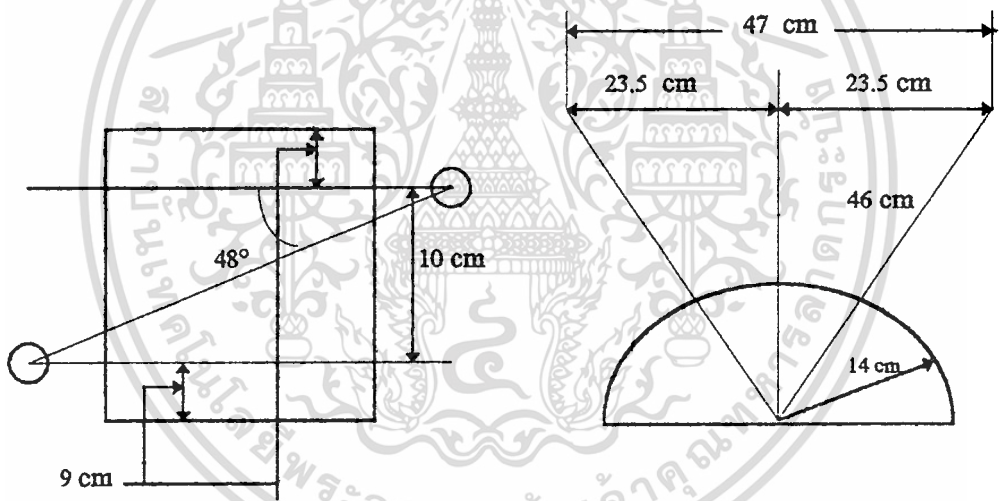
ความกว้างของตัวถังหม้อแปลงจะพิจารณาจากขนาดของขดลวดเมื่อพันเต็มช่องหน้าต่างของแกนเหล็ก เมื่อช่องหน้าต่างของแกนเหล็กเท่ากับ 7.62 cm. จะได้ความกว้างของตัวถังหม้อแปลงเท่ากับ $(2 \times 7.62) + 5.08 = 20.23$ cm. ทำการเผื่อช่องน้ำมันและการฉนวนให้กับสายเข้าขดลวดได้ขนาดความกว้างเท่ากับ 28 cm.

ความสูงของตัวถังหม้อแปลงจะพิจารณาจากความสูงของแกนเหล็ก โดยที่ความสูงของแกนเหล็กมีความสูงเท่ากับ 18 cm. รวมกับขนาดความหนาของขดลวด 7.62 cm. จะได้ความสูงของตัวถัง และเมื่อเผื่อระยะห่างระหว่างขดลวดกับตัวถังและช่องว่างของน้ำมันฉนวนแล้วจะได้ความสูง 30 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดรูที่จะนำบุชซึ่งมาใส่เข้ากับตัวถังหม้อแปลง โดยวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางบุชซึ่งที่จะนำมาใส่ตัวถังหม้อแปลงจะได้เท่ากับ 5 cm. ซึ่งจะได้ขนาดรูเท่ากับ 8 cm. และให้ปลอกที่ขึ้นขึ้นมารับบุชซึ่งและทำหน้าที่แปลนยึดบุชซึ่งมีความยาวเท่ากับ 6.5 cm. โดยส่วนบุชซึ่งที่ใส่เข้าไปมีความยาว 7.5 cm.

ระยะห่างของหัวบุชซึ่งแรงสูง กำหนดให้ห่างกัน 47 cm. ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า ตัวบุชซึ่งมีความยาวเท่ากับ 32 cm. ตามมาตรฐาน DIN 42351 เพื่อความยาวของตัวถังหม้อแปลงยาว 29 cm. และฝาถึงด้านบนทำเป็นรูปโค้งครึ่งวงกลมมีรัศมี 14 cm. การออกแบบจะให้ตัวบุชซึ่งเอียงออกไปจากฝาถึงในทิศทางตรงข้ามกัน และจุดศูนย์กลางของรูที่จะใส่บุชซึ่ง ห่างจากขอบตัวถังตามความยาวเท่ากับ 9 cm. ทั้งสองข้างจะได้ระยะห่างของรูที่จะใส่บุชซึ่งตามแนวกว้างเท่ากับ 11 cm. ดังนั้นสามารถหาลักษณะการติดตั้งบุชซึ่งได้ดังรูปที่ 3.8



(ก) มองจากทางด้านบน

(ข) มองจากทางด้านข้าง

รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งการวางบุชซึ่ง

ดังนั้นจะได้ระยะห่างของหัวบุชซึ่งเมื่อมองตามความยาวของตัวถัง $= \sqrt{48^2 - 10^2} = 47 \text{ cm.}$

ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวถังหม้อแปลงถึงหัวบุชซึ่ง $= 32 + 14 = 46 \text{ cm.}$

จะได้ความสูงจากจากหัวบุชซึ่งถึงจุดคั่นระหว่างฝาถึงกับตัวถัง $= \sqrt{46^2 - 23.5^2} = 39.5 \text{ cm}$

บุชซึ่งจะต้องเอียงทำมุมกับแนวราบเท่ากับ $\cos^{-1}(23.5/46) = 60^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

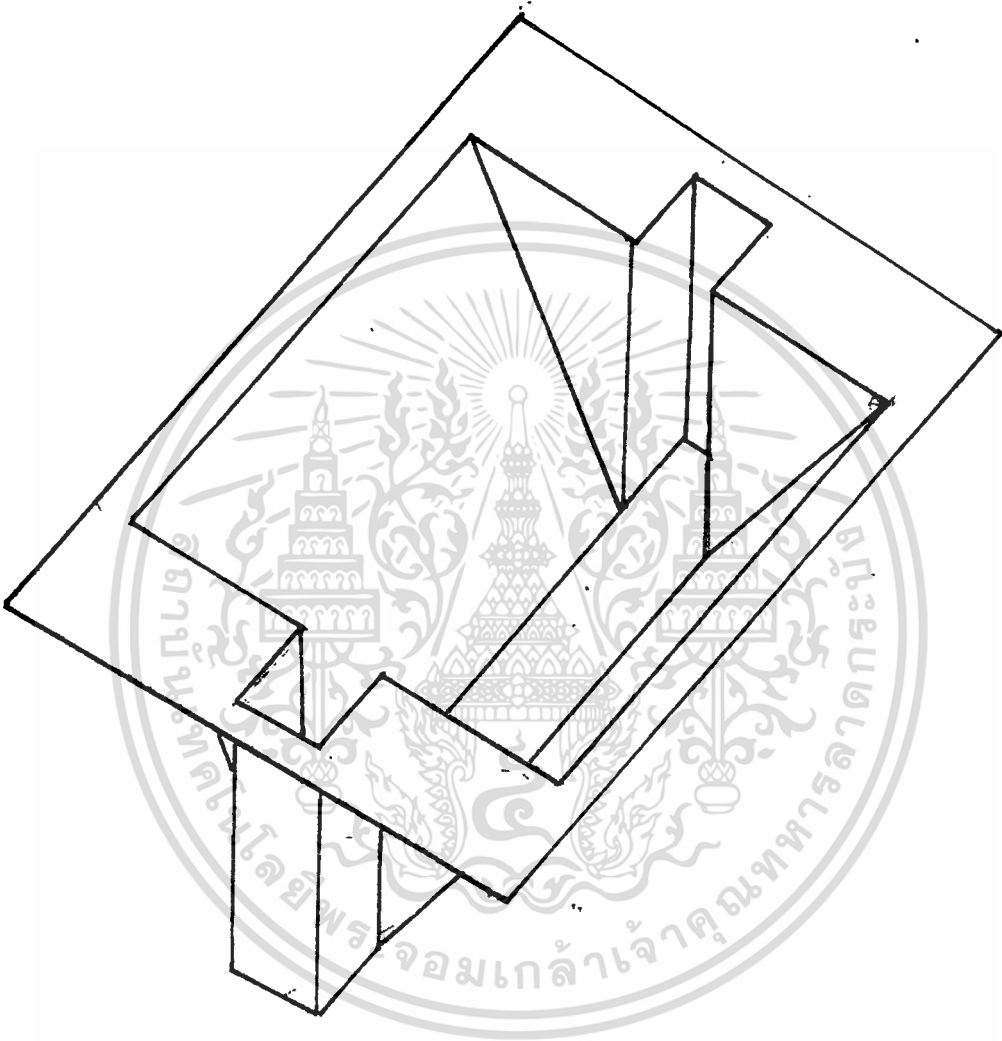
จากข้อมูลดังกล่าวสามารถเขียนเป็นลักษณะของโครงสร้างของตัวถังหม้อแปลงดังนี้



(หน่วยเป็น cm.)

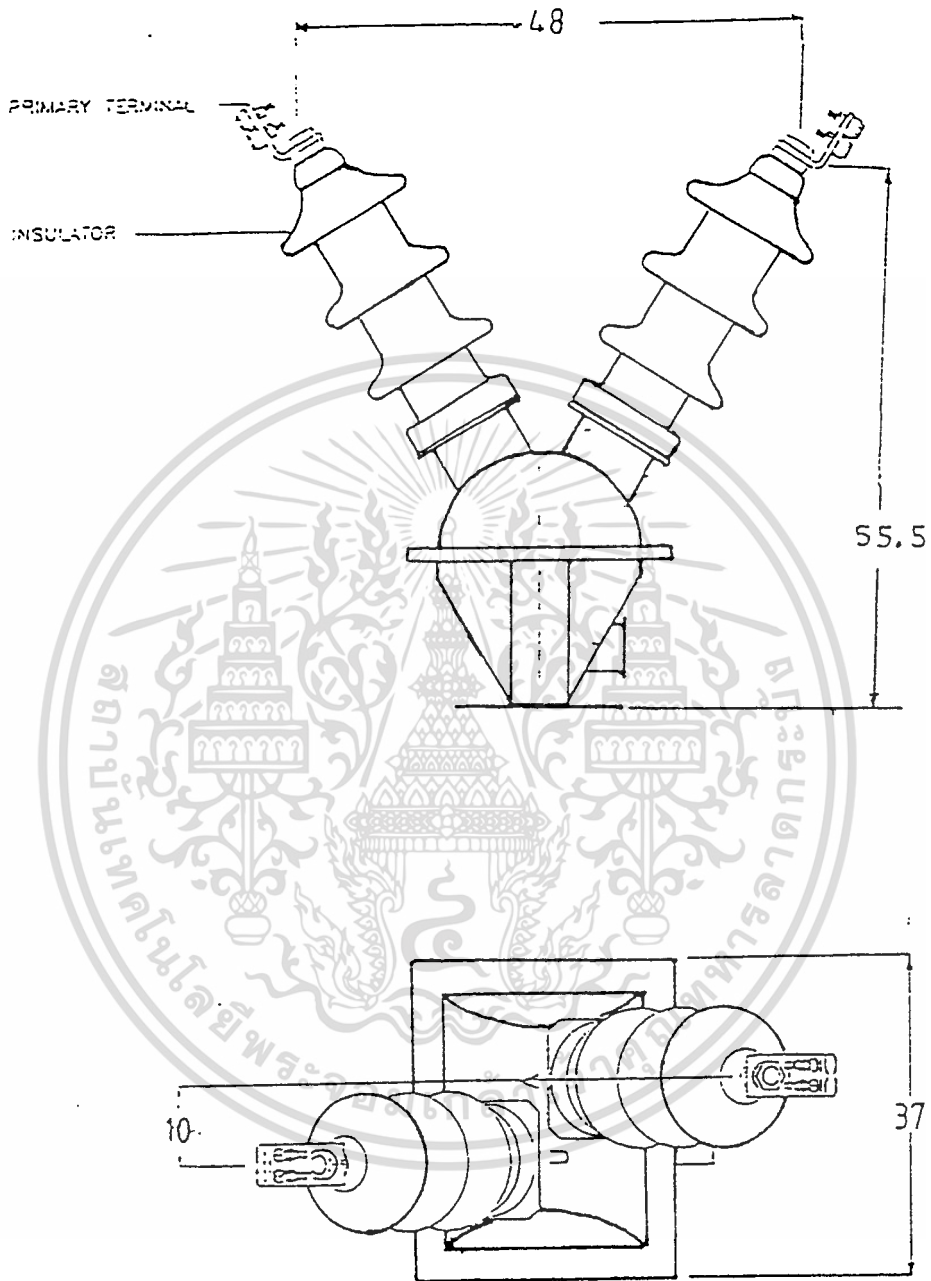
รูปที่ 3.9 แสดงขนาดและรูปร่างของตัวถังหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะภายในตัวถังหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(หน่วยเป็น cm.)

รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะโครงสร้างภายนอกของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.3.4 ทำการประกอบหม้อแปลงแล้วนำไปอบเพื่อไล่ความชื้น
- 3.3.5 นำไปเติมน้ำมันหม้อแปลงเนื่องจากหม้อแปลงที่ออกแบบเป็นชนิดน้ำมัน
- 3.3.6 นำไปทดสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด
ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

3.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างหม้อแปลง

3.4.1 เส้นลวดอาบนํ้ายาฉนวน

หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดใช้กระดาษฉนวนระหว่างขดลวดและน้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึมตามมาตรฐาน IEC 76 กำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 105°C ฉนวนที่ใช้เคลือบขดลวดจะเป็นฉนวน class A ซึ่งทนต่อน้ำมันได้ดีเยี่ยม ฉนวนที่ใช้เคลือบเป็นโพลีไวนิลฟอर्मอลเรซิน (Polyvinyl formal resin) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า PVF คุณสมบัติเด่นของขดลวด PVF มีดังนี้

- มีความเหนียว ชิดหุ้มเป็นพิเศษทนทานต่อการขูด ขูด
- ทนทานต่อน้ำมัน ได้ดีเยี่ยม
- ทนต่อการช็อคด้วยความร้อนได้ดี
- ด้านทานความชื้น ได้สูง

ความหนาของฉนวนที่เคลือบมี 3 ระดับด้วยกัน คือ

ฉนวนเคลือบบาง	เรียกว่าชั้น 2 (class 2 หรือ No. 2)
ฉนวนเคลือบหนา	เรียกว่าชั้น 1 (class 1 หรือ No. 1)
ฉนวนเคลือบหนาพิเศษ	เรียกว่าชั้น 0 (class 0 หรือ No. 0)

3.4.2 แกนเหล็ก

แกนหลักในหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เหล็กผสมซิลิกอน เพื่อเพิ่มความต้านทานจำเพาะทำให้การสูญเสียเนื่องจาก กระแสไหลวน (eddy current) ลดลง เหล็กที่ผสมซิลิกอนสูงจะทำให้ฮิสเทอรีซิสลูป (hysteresis loop) แคบลง การสูญเสียฮิสเทอรีซิสจะลดลงด้วย เหล็กซิลิกอนจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง ทำให้ใช้กระแสกระตุ้นในวงจรแม่เหล็กลดลง เหล็กที่ใช้อาจเป็นเหล็กรีดร้อนหรือรีดเย็น เหล็กรีดร้อนจะให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด 1.45 Wb/m^2 ส่วนเหล็กรีดเย็นจะให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงมากกว่า 1.8 Wb/m^2 ปัจจุบันโรงงานไฟฟ้าจะใช้เหล็กรีดเย็นประกอบแกนเหล็กแม้ว่าจะราคาแพงกว่าแต่สามารถลดน้ำหนักแกนเหล็กลงได้มาก

เหล็กชิลิกอนที่ใช้ในปัจจุบันมีหลากหลายเกรดด้วยกัน ที่นิยมใช้อยู่ปัจจุบันเป็นเกรด 23 ZH 100 (12) ซึ่งอยู่เป็นกลุ่ม โอเรียนท์คอร์ ไฮ-บี (ORIENTCORE HI-B) พัฒนามาจากกลุ่ม โอเรียนท์คอร์ มีคุณสมบัติเด่นเพิ่มขึ้นคือให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงถึง 1.7 Wb/m^2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง จนวนที่ฉาบผิวทนต่อความร้อนและการกัดกร่อนได้ดี แผ่นเหล็กมีความหนาเพียง 0.3 มม. แฟกเตอร์เนื้อเหล็กสูงถึง 0.97

3.4.3 กระดาษฉนวน

กระดาษฉนวนใช้เป็นฉนวนระหว่างชั้นขดลวด ระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ และระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กเนื่องจากกระดาษมีรูปทรงแปดเหลี่ยม จึงต้องอบแห้งและแช่น้ำมันหม้อแปลง กระดาษฉนวนที่ใช้กันทั่วไปคือ

1. กระดาษคราฟท์ (Kraft paper) มีความหนาตั้งแต่ 0.045 มม. ถึง 0.380 มม. ซึ่งมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3.4

2. กระดาษอัดแรง (Press paper) เป็นกระดาษแข็งและหนากว่ากระดาษคราฟท์ คือหนาตั้งแต่ 0.8 มม. ถึง 3.2 มม. ซึ่งมีความทนต่อแรงไฟฟ้าสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงแรงดันเบรคดาวน์ของกระดาษฉนวน

จำนวนแผ่น	แรงดันเบรคดาวน์ของกระดาษฉนวนเป็น kV			
	กระดาษคราฟท์ชนิดหนา (มม.)		กระดาษอัดแรงชนิดหนา (มม.)	
	0.08	0.13	0.8	1.6
1	1.8	1.8	9.3	2.0
2	3.8	4.8	17.0	36.6
3	7.5	8.4	24.3	53.4
4	9.9	10.9	30.6	57.0
5	12.3	13.0	-	-

3.4.4 น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงเป็นการฉนวนภายใน ทำหน้าที่เป็นฉนวนแทรกซึมและช่วยระบายความร้อนจะต้องมีคุณสมบัติทั้งทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 156(8) ได้กำหนดคุณสมบัติดังกล่าวไว้คือ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

1. ความหนืด น้ำมันหม้อแปลงจะต้องมีความหนืดต่ำเพื่อให้การระบายความร้อนได้ดี ตามมาตรฐานกำหนดความหนืดที่ 20°C ต้องน้อยกว่า 40 cs (centistoke)
2. จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำมันติดไฟขึ้นเองได้ตามข้อกำหนดจุดวาบไฟไม่ต่ำกว่า 160°C
3. จุดติดไฟ คือ อุณหภูมิที่น้ำมันจะเผาไหม้ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 200°C
4. ความหนาแน่น น้ำมันใช้เป็นตัวระบายความร้อนจึงต้องมีจุดแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ ตามข้อกำหนดที่ 20°C น้ำมันจะมีความหนาแน่น 0.895 กรัม/ลบ.ซม
5. จุดเท เป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังไหลได้ ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ -30°C

คุณสมบัติทางเคมี

1. ค่ามุลค่าน้ำมัน เป็นผลจากน้ำมันทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดสารที่มีลักษณะเป็นเมือก เมื่อเกาะตามผิวจะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนลดลง มาตรฐานกำหนดให้มีได้สูงสุด 0.1% โดยน้ำหนัก
2. ความเป็นกรด มาตรฐานกำหนดให้มี KOH ได้ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำมัน 1 กรัม และจะต้องไม่มีส่วนผสมของสารกำมะถัน เพราะการที่มีสารกำมะถันจะผสมอยู่ทำให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุในหม้อแปลง
3. ปริมาณน้ำเจือปน ตามมาตรฐานกำหนดให้น้ำมันเจือปนได้ไม่เกิน 35 ppm

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

น้ำมันทำหน้าที่เป็นฉนวน จึงต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มาตรฐานกำหนดค่านี้ไว้ต่ำกว่า 30 kV (ที่ระยะเก็บ 2.5 มม.)

บทที่ 4 การทดสอบหม้อแปลงแรงดัน

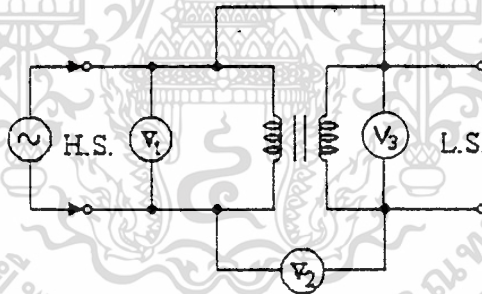
4.1 การทดสอบหาขั้วหม้อแปลง (Polarity test)

วัตถุประสงค์

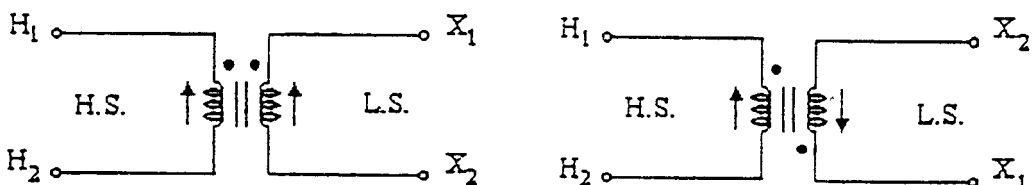
เพื่อการหาตำแหน่งและกำหนดขั้วของหม้อแปลง

ทฤษฎี

ก่อนที่จะนำหม้อแปลงแรงดันที่มีขดลวดแบบสองขดแยกอิสระ (Two winding) มาทำการต่อใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการวัดหรือการป้องกันระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจจะต้องใช้งานร่วมกับหม้อแปลงตัวอื่น จำเป็นจะต้องรู้จุดตำแหน่งขั้ว (Dot polarity) ที่แสดงทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะนั้นๆ ของหม้อแปลงโดยทั่วไปแล้วมักจะแทนอักษร H_1, H_2 ทางด้านขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) หรือทางด้านไฟฟ้าแรงสูง (High voltage side) และแทนอักษร X_1, X_2 ทางด้านขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) หรือทางด้านไฟฟ้าแรงต่ำ (Low voltage side)



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรการทดสอบหาขั้วของหม้อแปลง



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 แสดงขั้วของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนละห้องเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเพื่อหาจุดตำแหน่งขั้วของหม้อแปลง ซึ่งจะแสดงผลของทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะนั้นของทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ วิธีการที่สะดวกและเป็นที่ยอมรับใช้คือการใช้โวลท์มิเตอร์ โดยการต่อขั้วทางด้านปฐมภูมิขั้วหนึ่งกับขั้วทางด้านทุติยภูมิขั้วหนึ่งเข้าด้วยกัน แล้วใช้โวลท์มิเตอร์ทำการวัดแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ผลจากการต่อและอ่านค่าได้จากโวลท์มิเตอร์ จะแสดงผลได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข) โดยจากผลการทดสอบจะได้ว่า

รูปที่ 4.2 (ก) เมื่อ $V_1 > V_2$ เรียกว่า ชั้วลบหักล้าง (Subtractive) ถ้ากำหนดขั้วขดลวดชุดแรกเป็น H_1 และ H_2 แล้วจะได้ขั้วของขดลวดที่สองเป็น X_1 กับ X_2 ดังไว้ในรูป โดยขั้วของขดลวดชุดแรก H_1 จะต่ออยู่กับขั้ว X_1 ของขดลวดชุดที่สองขณะทดสอบ และอาจจะแสดงได้โดยจุดคำ (Dot mark) ที่กำหนดทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 4.2 (ก)

รูปที่ 4.2 (ข) เมื่อ $V_1 < V_2$ เรียกว่า แอดดิทีฟ (Additive) ถ้ากำหนดขั้วขดลวดชุดแรกเป็น H_1 และ H_2 แล้วจะได้ขั้วของขดลวดที่สองเป็น X_2 กับ X_1 ดังไว้ในรูป โดยขั้วของขดลวดชุดแรก H_1 จะต่ออยู่กับขั้ว X_2 ของขดลวดชุดที่สองขณะทดสอบ และอาจจะแสดง “จุดคำ” ที่กำหนดทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 4.2 (ข)

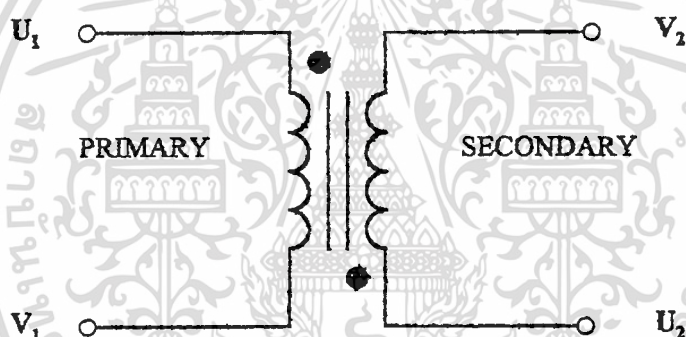
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 โดยสมมุติว่า จุดคำของขั้วหม้อแปลงอยู่ที่ U_1 และ U_2 ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ
2. ทำการต่อปลายสาย V_1 และ V_2 เข้าด้วยกัน
3. ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยให้มีขนาดแรงดันและความถี่เท่ากับที่พิกัดของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ
4. ทำการวัดและบันทึกค่าแรงดันที่ได้ระหว่าง V_1, V_2 และ V_3 และนำมาวิเคราะห์

ผลการทดสอบ

ป้อนแรงดันทางด้านปฐมภูมิ (H.S.)	$V_1 = 900$ โวลต์
วัดแรงดันระหว่าง U กับ X_1	$V_2 = 904$ โวลต์
วัดแรงดันทางด้านทุติยภูมิ (L.S.)	$V_3 = 4.13$ โวลต์

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า โวลต์มิเตอร์ (V_2) ที่วัดระหว่างขั้ว U และขั้ว X_1 จะมีค่าเท่ากับแรงดันทางด้านปฐมภูมิบวกกับแรงดันทางด้านทุติยภูมิ เมื่อกำหนดให้ U เป็นจุดค่าและให้เป็น U_1 ก็จะได้ขั้วของหม้อแปลงเป็นแบบ “แอคคิตีฟ” โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงขั้วของหม้อแปลงแรงดัน

หมายเหตุ

การทดสอบไม่สามารถจ่ายแรงดันที่พิกัดได้ เพราะจะทำให้แรงดันทางด้านขดลวดปฐมภูมิมีค่าสูงมาก ซึ่งเป็นการลำบากที่จะหาเครื่องวัดที่สามารถวัดแรงดันที่สูงและไม่เกิดอันตรายขณะทำการทดสอบ

4.2 การทดสอบเปิดวงจร (Open circuit test)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาในการหาค่าการสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No load loss) หรือที่เรียกว่า การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss หรือ Iron loss) ของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดยวิธีการทดสอบเปิดวงจร

ทฤษฎี

การสูญเสียขณะไม่มีโหลดหรือการสูญเสียในแกนเหล็ก สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส
2. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

1. การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส คือ พลังงานที่ใส่เข้าไป เพื่อให้โมเลกุลของเหล็ก กลายเป็นแม่เหล็ก เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นกระแสสลับ ดังนั้นโมเลกุลของเหล็กจึงถูกเหนี่ยวนำให้กลับขั้วไปมา การทำเช่นนี้เป็นการใช้พลังงานซึ่งถูกแปรไปเป็นความร้อนเนื่องจากการเสียดทานของโมเลกุลในแกนเหล็ก ค่าพลังงานสูญเสียนี้เรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (P_h) โดยมีสมการดังนี้

$$P_h = K_h B^{1.6} f v \quad W \quad \text{.....(4.1)}$$

โดยที่ K_h = ค่าคงที่

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก $Wb/m^2, T$

f = ความถี่ Hz

v = ปริมาตรของแกนเหล็ก m^3

2. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นและทำให้มีกระแสไหลวนในแกนเหล็ก ซึ่งจะแปรไปเป็นพลังงานความร้อนโดยถือว่าเป็นการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (P_e) โดยมีสมการดังนี้

$$P_e = K_e t^2 B^2 f^2 v \quad W \quad \text{.....(4.2)}$$

โดยที่ K_e = ค่าคงที่

t = ความหนาของแกนเหล็ก cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

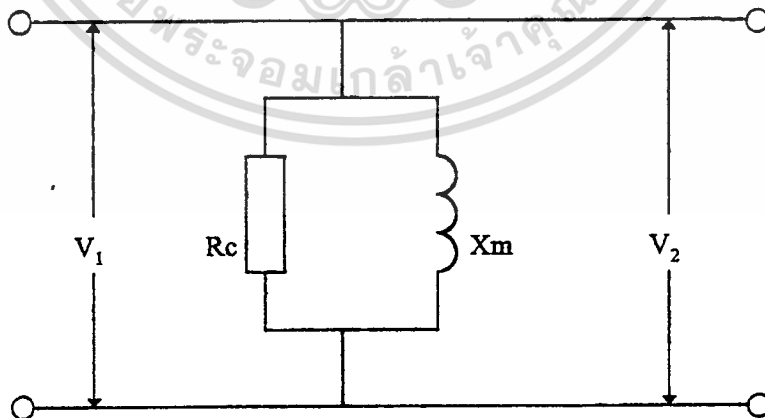
เนื่องจาก

การสูญเสียในแกนเหล็ก = การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส + การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

$$\text{ดังนั้น} \quad P_c = P_h + P_e \quad \text{.....(4.3)}$$

จากสมการ $E = 4.44 f N \phi_m = 4.44 f N B_m A$ จะเห็นได้ว่า แรงดัน (E) คงที่ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ก็คงที่ด้วย ฉะนั้นการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (P_h) จากสมการ (4.1) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (P_e) จากสมการ (4.2) ก็คงที่ และเมื่อรวมกันเป็นการสูญเสียในแกนเหล็กก็จะมีค่าคงที่ด้วยโดยทำการป้อนแรงดันให้หม้อแปลงมีค่าคงที่ตลอดเวลา เมื่อแรงดัน (E) เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส จากสมการ (4.1) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน จากสมการ (4.2) ก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อรวมกันเป็นการสูญเสียในแกนเหล็กก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น

ในการทดสอบเปิดวงจรโดยทั่วไปจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าทางด้านขดลวดแรงดันต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการวัดแรงดันที่สูง เมื่อทำการทดสอบขณะที่ไม่มีโหลดต่ออยู่ ค่ากำลังไฟฟ้า (P_o) ที่วัดได้ ก็คือผลรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดและกำลังสูญเสียในฉนวนหม้อแปลง ซึ่งสองค่าหลังนี้มีค่าน้อยมากสามารถละทิ้งได้ ฉะนั้นค่ากำลังไฟฟ้า (P_{test}) ที่วัดได้ก็คือกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c) นั่นเอง



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะเปิดวงจร

จากวงจรสมมูลย์ดังรูปที่ 4.4 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ เทาเวอร์แฟคเตอร์ขณะไม่มีโหลด (No load power factor ($\cos\phi$)), ความต้านทาน (R_c), รีแอกแตนซ์รั่วไหล (X_m) ได้ดังนี้

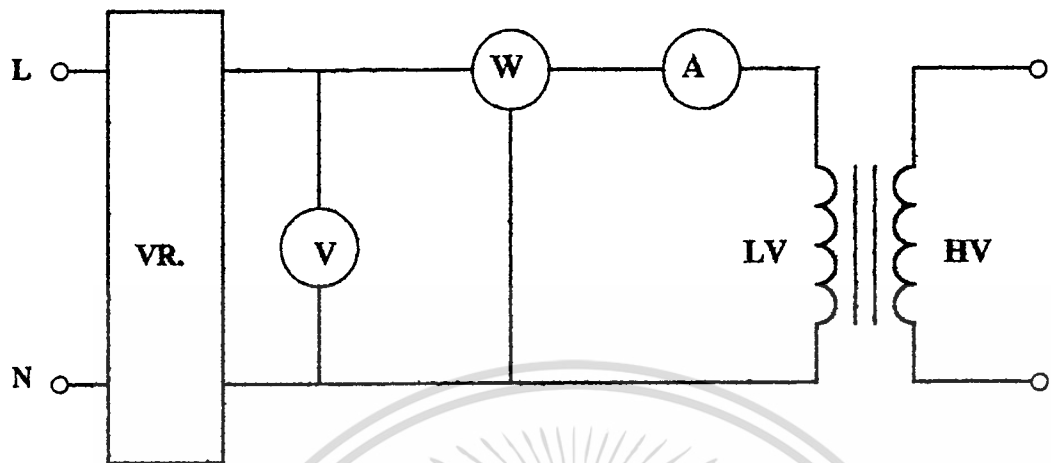
$$\cos\phi = \frac{P_{test}}{V_{test} I_{test}} \quad \dots(4.4)$$

$$R_c = \frac{V_{test}}{I_{test} \cos\phi} \quad \dots(4.5)$$

$$X_m = \frac{V_{test}}{I_{test} \sin\phi} \quad \dots(4.6)$$

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.4 โดยเลือกใช้เครื่องมือวัดที่มีพิกัดเหมาะสม
2. ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ทำการปรับค่าแรงดันขณะที่เปิดวงจร (V_o) ตั้งแต่ 10 - 110 V โดยทำการเพิ่มขึ้นทีละ 10 V จากนั้นทำการบันทึกค่ากระแสขณะที่เปิดวงจร (I_o) และกำลังไฟฟ้าขณะที่เปิดวงจร (P_o)
3. คำนวณหาค่าเทาเวอร์แฟคเตอร์ขณะไม่มีโหลด($\cos\phi$)
4. คำนวณหาค่า R_c และ X_m ที่พิกัดแรงดัน 110 V



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรการทดสอบเปิดวงจรของหม้อแปลง

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณการเปิดวงจร

แรงดันที่ป้อน Vo (V)	กระแสที่ได้ Io (A)	กำลังที่ได้ Po (W)	cos ϕ	Rc (Ω)	Xm (Ω)
10	0	0	-	-	-
20	0	0	-	-	-
30	0	0	-	-	-
40	0	0	-	-	-
50	0	0	-	-	-
60	0	0	-	-	-
70	0	0	-	-	-
80	0	0	-	-	-
90	0.003	0.2	0.74	40540	44602
100	0.005	0.4	0.8	25000	33341
110	0.005	0.5	0.91	24176	48228

4.3 การทดสอบลัดวงจร (Short circuit test)

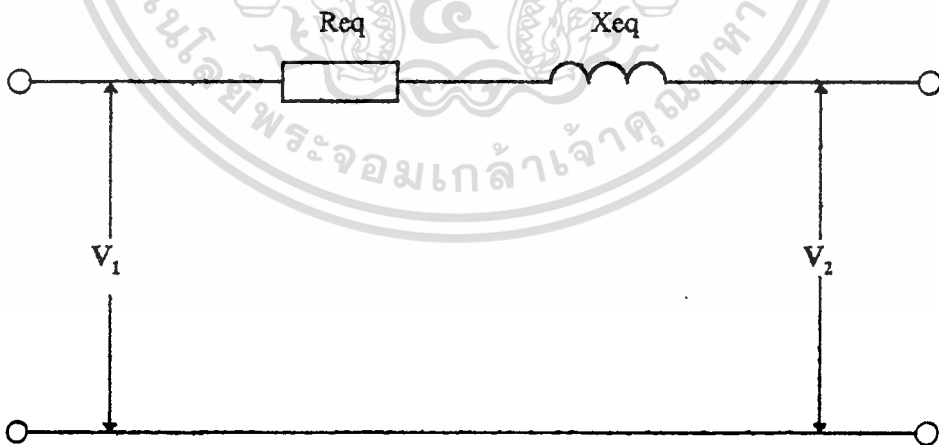
วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการหาการสูญเสียในขดลวด (Copper loss) , อิมพีแดนซ์ (Impedance) , ประสิทธิภาพ (Efficiency) ของหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส โดยวิธีการลัดวงจร

ทฤษฎี

การทดสอบแบบลัดวงจร โดยทั่วไปจะทำการต่อให้ขั้วขดลวดแรงดันต่ำลัดวงจรถึงกัน แล้วทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางขั้วขดลวดแรงดันสูง เพราะถ้าทำการลัดวงจรทางขั้วขดลวดแรงดันสูง แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้าทางขั้วขดลวดแรงดันต่ำ จะทำให้เกิดกระแสสูงมากซึ่งทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้เครื่องวัดในการวัดกระแสที่สูงมาก

เนื่องจากทางขั้วหนึ่งขั้วของหม้อแปลงจะถูกต่อลัดวงจรไว้ ดังนั้น จึงไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากหม้อแปลง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ทั้งหมด คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง ซึ่งจะได้แก่ กำลังสูญเสียในขดลวด และกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก แต่เนื่องจากแรงดันที่ป้อนเข้ามีค่าน้อยมาก จึงทำให้กำลังสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ดังนั้น กำลังสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงจึงสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงขณะลัดวงจร

จากจรรยาบรรณรูปที่ 4.6 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ อิมพีแดนซ์ (Z_{eq}) , ความต้านทาน (R_{eq}) , รีแอกแตนซ์รั่วไหล (X_{eq}) ของหม้อแปลงได้ดังนี้

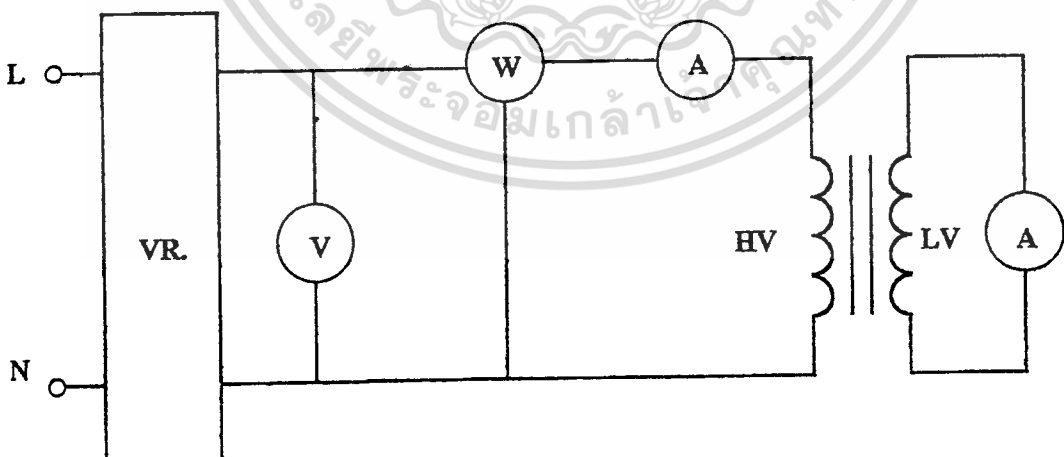
$$P_{test} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad \text{.....(4.7)}$$

$$R_{eq} = \frac{P_{test}}{I_{test}^2} \quad \text{.....(4.8)}$$

$$\cos\phi = \frac{P_{test}}{V_{test} I_{test}} \quad \text{.....(4.9)}$$

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.7 โดยเลือกใช้เครื่องมือวัดที่มีพิกัดเหมาะสม
2. ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ทำการปรับค่าแรงดันขณะที่ลัดวงจร (V_{sc}) ให้ได้กระแสขณะที่ลัดวงจร (I_{sc}) มีค่าที่พิกัด จากนั้นทำการบันทึกค่าแรงดันขณะที่ลัดวงจร (V_{sc}) และกำลังไฟฟ้าขณะที่ลัดวงจร (P_{sc})
3. คำนวณหาค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ขณะ ไม่มีโหลด ($\cos\phi$)
4. คำนวณหาค่า R_c และ X_m ที่พิกัดแรงดัน 110 V



รูปที่ 4.7 แสดงวงจรการทดสอบลัดวงจรของหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบการลัดวงจร

แรงดันที่ป้อน (V)	กระแสที่ได้ทางด้าน แรงดันต่ำ (A)	กำลังที่ได้ (W)	กระแสที่ได้ทางด้าน แรงดันสูง (A)
73	0.3	0.1	0.001375
123	0.4	0.2	0.001833

จะได้

แรงดันเฉลี่ย = 98 V

กระแสเฉลี่ย = 0.001604 A

กำลังเฉลี่ย = 0.15 W

 $Z_{eq\ HV} = 61097.26\ \Omega$ $R_{eq\ HV} = 58301.87\ \Omega$ $X_{eq\ HV} = 18269.29\ \Omega$ หมายเหตุ

พิกัดกระแสทางด้านแรงดันต่ำ คือ 0.227 A แต่ทำการทดสอบที่ 0.3 A และ 0.4 A เพราะว้
 วัดคีมเตอร์อ่านค่าได้ลำบาก แต่ได้ทำการเพื่อพิกัดกระแสที่ขดลวดจะทนได้ไว้แล้ว ดังนั้นจึงไม่
 เป็นอันตรายต่อขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบความผิดพลาดของอัตราส่วนหรือแรงดัน (Voltage or ratio error)

การทดสอบหาความคลาดเคลื่อนของแรงดันหรืออัตราส่วนมีจุดประสงค์ เพื่อต้องการทราบว่าหม้อแปลงที่ได้สร้างขึ้นมานั้นควรมีค่าความแม่นยำในการวัดอยู่ในเกณฑ์เท่าไร ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบสามารถนำมาหาค่าความผิดพลาดได้จาก

$$\% \text{ ความผิดพลาด} = \frac{\text{อัตราส่วนที่พิกัด} - \text{อัตราส่วนที่แท้จริง}}{\text{อัตราส่วนที่แท้จริง}} \times 100$$

จากการออกแบบหม้อแปลงจะได้อัตราส่วนที่พิกัดของหม้อแปลง คือ $24000/110 = 218.18182$

การทดสอบที่พิกัดแรงดันจะทดสอบใน 2 กรณี คือ

1. ทดสอบขณะเบอร์เดนมีค่าเป็นศูนย์
2. ทดสอบขณะเบอร์เดน 25 VA PF.=1

ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบความผิดพลาดของอัตราส่วน

Vp (จ)	Vs (จ)	Is (A)	Error voltage(%)
120	0.554	-	+0.004
200	0.92	-	+0.004
240.4	1.10	-	-0.002
275.2	1.25	-	-0.001
1000	4.60	-	+0.02
1200	5.52	-	+0.01
2400	11.02	-	+0.02
4000	18.34	-	+0.01
4800	22.02	-	+0.02
6000	27.52	-	+0.02
7200	33.02	-	+0.04
8400	38.54	-	+0.04
10,000	55.04	-	+0.04
12,000	73.40	-	+0.17
16,000	55.04	-	+0.12
20,000	91.74	-	+0.08
24,000	110.08	-	+0.08
24,000	109.48	0.22	-0.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดพลาดแรงดันขณะเบอร์ดนเป็นศูนย์

$$\begin{aligned}\% \text{ ผิดพลาดความ} &= \frac{[(24000/110) - (24000/110.08)]}{(24000/110.08)} \times 100 \\ &= +0.073 \%\end{aligned}$$

ความผิดพลาดแรงดันขณะเบอร์ดน 25 VA PF=1

$$\begin{aligned}\% \text{ ความผิดพลาด} &= \frac{[(24000/110) - (24000/109.48)]}{(24000/109.48)} \times 100 \\ &= -0.472 \%\end{aligned}$$

จากผลการทดสอบและการคำนวณจะได้ว่าหม้อแปลงเครื่องวัดจะมีค่าผิดพลาดแรงดันหรืออัตราส่วนที่แรงดันพิกัดอยู่ในช่วง +0.073 % และจากค่าที่กำหนดความแม่นยำของหม้อแปลงเครื่องวัดตามมาตรฐาน IEC-186(1987) ที่ระดับความแม่นยำที่ 0.5 ซึ่งยอมให้ค่าผิดพลาดได้ ± 0.5 % ดังนั้น จะได้ว่าหม้อแปลงเครื่องมือวัดที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมานี้จัดอยู่ในระดับความแม่นยำที่ 0.5

4.5 การทดสอบด้วยวิธีโวลท์-แอมป์(V-I method)

เป็นการทดสอบหาค่าความต้านทานของขดลวดแต่ละด้าน เพื่อที่จะได้ทราบค่าความต้านทานจริงของแต่ละขดลวด การทดสอบจะใช้แรงดันดีซีในการทดสอบโดยแปลงจากแรงดันเอซี 3 เฟสผ่านเรกติไฟเออร์

ผลการทดสอบด้านแรงสูง

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานขดลวดทางด้านแรงสูง

Vdc (V)	IDC (mA)	R (Ω)
100.7	23	4378.26
200.0	45.7	4376.36
250.4	57.2	4377.61
300.2	68.5	4382.48

จะได้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานของขดลวดด้านแรงสูงเฉลี่ย} &= (4378.26+4376.36+4377.61+4382.48)/4 \\ &= 4378.68 \quad \Omega \end{aligned}$$

ผลการทดสอบด้านแรงต่ำ

ตารางที่ 4.5-แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานขดลวดทางด้านแรงต่ำ

Vdc (V)	IDC (mA)	R (Ω)
1.3	1.63	0.8
2.9	3.95	0.73

จะได้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานเฉลี่ยของขดลวดด้านแรงต่ำ} &= (0.8+0.73)/2 \\ &= 0.77 \quad \Omega \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าผิดพลาดมุมเฟส

จากสมการที่ (2.19)

$$\therefore \theta = \frac{\frac{I_s}{n} (X_p \cos \Delta - R_p \sin \Delta) + I_c x_p + I_m r_p}{n V_s} \quad \text{rad.}$$

$$X_p = x_p + x_s n^2$$

เมื่อค่า L ขึ้นอยู่กับค่าจำนวนรอบขดลวดทั้งสองจะได้

$$X_p = x_p + [(x_s n^2)/n^2]$$

$$= 2 x_p$$

$$x_p = X_p/2$$

$$= \frac{18269.29}{2}$$

$$= 9134.645 \quad \Omega$$

$$r_p = 4378.68 \quad \Omega$$

$$\begin{aligned} \therefore \theta &= \frac{\frac{0.227}{218.1818} (18269.29 \cos 0 - 58301.87 \sin 0) + \left[\frac{(0.0455 \times 9134.645) + (0.00228 \times 4378.68)}{218.1818} \right]}{218.1818 \times 110} \\ &= 0.00084 \quad \text{rad.} \\ &= 0.045^\circ \end{aligned}$$

เมื่อมุมระหว่าง I_s กับ $V_s = 36.87^\circ$ (โดยให้โหลดมีค่า PF = 0.8)

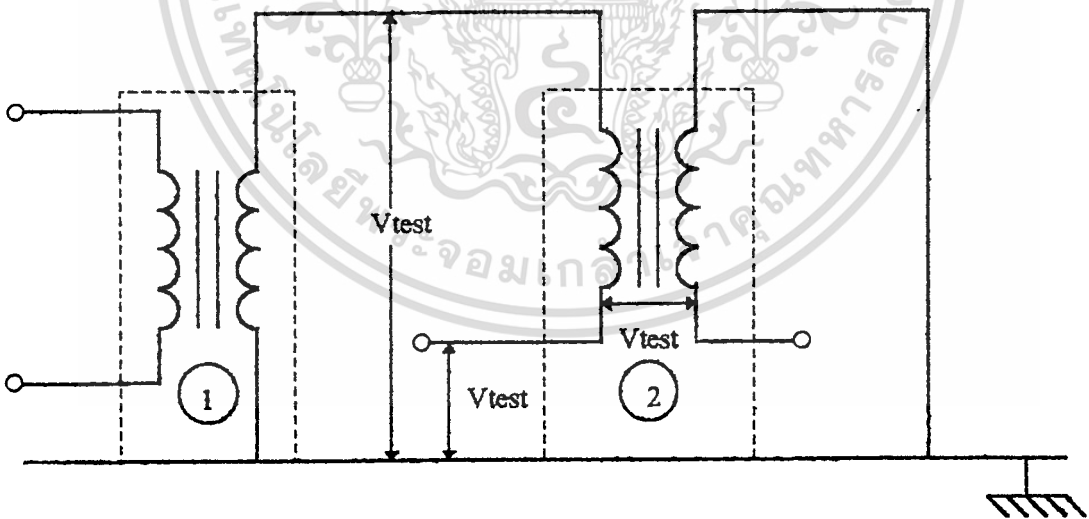
$$\begin{aligned} \therefore \theta &= \frac{0.00104 \times (14615.432 - 34981.122) + \frac{51}{218.1818}}{24000} \\ &= 0.00087 \quad \text{rad.} \\ &= -0.05^\circ \end{aligned}$$

จากมุมที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 186 (1987) จะมีระดับความแม่นยำอยู่ในระดับ 0.5
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยความถี่ไฟฟ้ากำลัง (Power - frequency voltage withstand test)

การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยความถี่ไฟฟ้ากำลัง คือ การทดสอบความทนของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำ การทดสอบในหัวข้อนี้ บางมาตรฐานก็มีชื่อเรียกต่างกันเช่น มาตรฐาน IEC 76-3 และมาตรฐาน BS 171 เรียกว่าการทดสอบความทนต่อแรงดันที่แหล่งจ่ายแยกจากกัน (Separate source voltage withstand test) ส่วนมาตรฐาน ANSI/IEEE C57 เรียกว่า การทดสอบแรงดันที่ใช้งาน (Applied voltage test) และ มอก. 384-2525 เรียกว่า การทดสอบความทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบบนี้ก็เพื่อเป็นการยืนยันว่า ฉนวนของขดลวดจะสามารถทนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขดลวดที่ถูกทดสอบกับ earth กับขดลวดชุดอื่นได้จริง ลักษณะวงจรการต่อเพื่อทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 โดยมี V_{test} เป็นแรงดันที่ใส่เข้าไปในหม้อแปลงไฟฟ้าตามตารางที่ 4.6 โดยจะทำการทดสอบใช้เวลานาน 1 นาที โดยที่ฉนวนต้องไม่เกิดการพังหรือเสียหายไป



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรการต่อเพื่อทดสอบหาความแข็งแรงของฉนวน

- ① คือ หม้อแปลงทดสอบขนาด 100 kV
- ② คือ หม้อแปลงแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยความถี่ไฟฟ้ากำลัง

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยความถี่ไฟฟ้ากำลัง

แรงดันที่ป้อน (kV)	ความถี่ (Hz)	กระแสที่ได้ (A)	เวลาที่ทดสอบ (Sec.)	การสังเกต
10	50	0	1	-
20	50	0	1	-
30	50	0	1	-
40	50	0.5	10	กระแสไหลคงที่
45	50	0.2	10	กระแสไหลคงที่
50	50	0.8	60	กระแสไหลคงที่ ตลอดเวลา

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า การเกิดฉนวนบางส่วนเริ่มที่แรงดัน 40 kV จนถึง 50 kV แต่ไม่เกิดการเบรคความถี่ เพราะกระแสยังไหลคงที่ตลอดระยะเวลา 1 นาที ที่ 50 kV จึงสรุปได้ว่าระหว่างขดลวดกับดั่งถึงหม้อแปลงสามารถทนแรงดันเบรคความถี่ 50 kV ได้

4.7 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ (Induced over voltage withstand test)

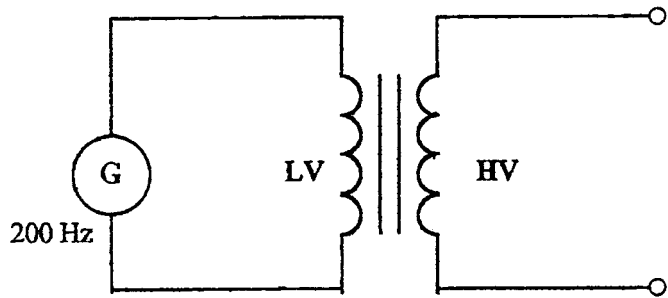
การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ คือ การทดสอบความคงทนของฉนวนในขดลวดชุดเดียวกัน แต่แรงดันที่ใช้ทดสอบจะมีความถี่สูงกว่าปกติมาก ประมาณ 100-400 Hz เข้าทางแรงดันต่ำขนาด 2 เท่าของแรงดันที่กำหนด เพื่อลดการอึดตัวของแกนเหล็กและจำกัดกระแสหรือขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวที่ทดสอบ หากใช้ความถี่ 50-60 Hz จะทำให้กระแสกระตุ้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าได้รับความถี่สูงไปกว่านี้จะทำให้กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss) เพิ่มขึ้นจนอาจเกิดอันตรายได้โดยจะป้อนตามเวลาเป็นช่วงๆ (Voltage cycle diagrams) และความเค้น (stresses) จะเกิดขึ้นระหว่างรอบ (Turns) ของขดลวดและจุดอื่นๆ

การทดสอบด้วยวิธีนี้แม้ว่าจะเป็นการป้อนแรงดันสูงเกินปกติ เช่นเดียวกับการทดสอบแบบการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยความถี่ไฟฟ้ากำลัง แต่ขนาดแรงดันและเวลาที่ใช้ไม่เหมือนกัน (หากแรงดันที่ทดสอบมีความถี่เป็น 6000 cycle จะใช้เวลานาน 24 นาที และถ้าใช้ความถี่อื่น เวลาที่ใช้จะต้องไม่ต่ำกว่า 15 วินาที)

เวลาที่ใช้ในการทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{เวลาที่ใช้ในการทดสอบ} = \frac{120 \times \text{ความถี่ตามปกติของหม้อแปลง}}{\text{ความถี่ของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ}} \dots\dots(4.10)$$

การป้อนแรงดันทดสอบให้กับวงจรโดยอ่านค่าจากโวลท์มิเตอร์ วัดค่าออกซึ่งบนหน้าปัทม์จะแสดงค่าสูงสุดคูณด้วย $\sqrt{2}$ และการป้อนแรงดันจะต้องทำตามลำดับเวลา โดยให้ป้อนด้วยแรงดันขนาดไม่เกิน $1/3$ ของค่าที่จะใช้ทดสอบจริง แล้วรอดูอาการของหม้อแปลง และสังเกตว่ามี การผิดปกติเกิดภายในตัวถังหม้อแปลงเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้าไม่มีให้เพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นอย่างรวดเร็วเท่าที่เครื่องมือจะสามารถทำได้จนถึงค่าแรงดันทดสอบแล้วเริ่มจับเวลาทันที เมื่อครบกำหนดเวลาให้รีดแรงดันลงให้เหลือน้อยกว่า $1/3$ อย่างรวดเร็วอีกครั้งแล้วจึงปลดวงจรออกจากแหล่งจ่ายได้



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรการทดสอบฉนวน

ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ

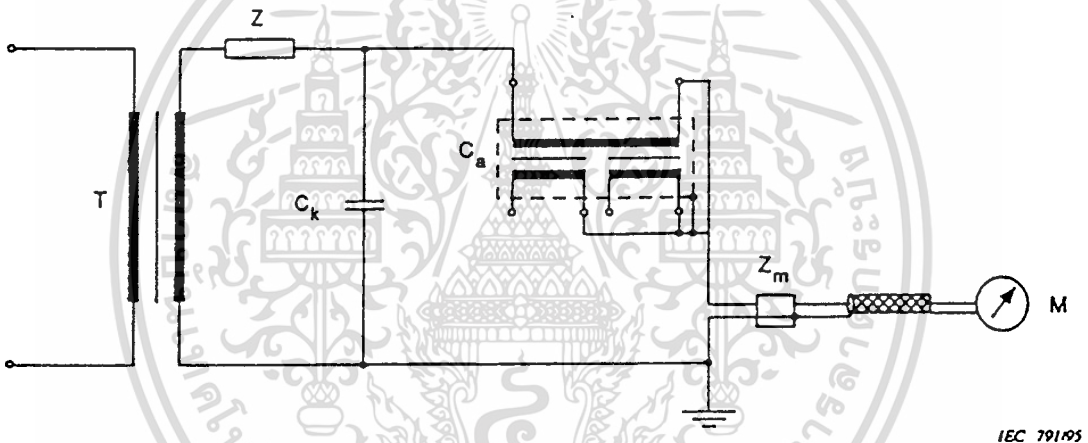
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำ

V _{LV} (V)	V _{HV} (V)	f (Hz)	เวลา (Sec.)	I (A)	การสังเกต
120	26181	150	5	0	-
140	30545	200	2	0	-
160	34908	200	5	0.8	-
220	4800	200	60	1.2	กระแสไหลลงที่ ตลอด

เมื่อทำการป้อนแรงดันเป็นสองเท่าของของแรงดันต่ำเป็นค่าสูงสุดที่ความถี่ 200 Hz โดยใช้เวลา 30 วินาที ตามสมการที่ (4.10) และจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่แรงดัน 160 V ทางด้านแรงต่ำ เริ่มเกิดการคายประจุบางส่วน และที่แรงดัน 220 V ก็มีกระแสไหลเพิ่มขึ้น แต่กระแสที่ไหลไม่ได้เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากการทดสอบใช้เวลานาน 30 วินาที แต่กระแสก็ไม่เพิ่มขึ้น แสดงว่าฉนวนทนแรงดันเบรคดาวน์ที่ 220 V 200 Hz ที่เวลา 30 วินาทีได้

4.8 การทดสอบการวัดการเกิดคิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge measurement)

เป็นการวัดเพื่อตรวจสอบสภาพและความสมบูรณ์ของการเป็นฉนวน ถ้าคุณภาพของเนื้อฉนวนไม่ดีเช่น แตกร้าว หรือเป็นโพรง เมื่อป้อนด้วยแรงดันทดสอบ (วงจรและขนาดของแรงดันเดียวกันเพื่อทดสอบด้วยแรงดันเหนี่ยวนำสูงเกิน) ก็จะเกิดการคิสชาร์จเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นจุดอ่อนของฉนวน แล้วก็ใช้เครื่องมือชนิดพิเศษเรียกว่าพาเรียลดิสชาร์จดีเทคเตอร์ (Partial discharge detector) เป็นตัวตรวจจับประจุของฉนวนว่ามีขนาดกี่คูลอมบ์ สำหรับหม้อแปลงแรงดันนี้ตามมาตรฐาน IEC 186 (1987) ยอมให้มีได้ไม่เกิน 10 nC. หากค่าเกินไปกว่านี้จะไม่สามารถยอมรับได้



- T is the test transformer
- C_a is the instrument transformer to be tested
- C_k is the coupling capacitor
- M is the PD measuring instrument
- Z_m is the measuring impedance
- Z is the filter

รูปที่ 4.10 แสดงวงจรการทดสอบการคิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ทดสอบความคงทนของฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์

ในปัจจุบัน หม้อแปลงเครื่องวัดมีโอกาสดำเนินการพบจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า ซึ่งก็อาจทำให้ฉนวนของหม้อแปลงเครื่องวัดเกิดการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนไปโดยฉับพลัน การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ทำให้ทราบว่าความเค้น ที่เกิดขึ้นกับขดลวดหม้อแปลง เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์นั้นจะมีความแตกต่างกันมากกับเมื่อขดลวดได้รับแรงดันจากการทดสอบด้วยแรงดันความถี่ต่ำ กล่าวคือ แรงดันที่ได้รับจากการทดสอบด้วยความถี่ต่ำจะกระจายผ่านขดลวดด้วยจำนวน โวลต์ต่อรอบ(volts/turn) อย่างสม่ำเสมอ(uniform) แต่เมื่อขดลวดได้รับแรงดันอิมพัลส์ แรงดันแรกเริ่มจะมีคุณสมบัติแบบคาปาซิแตนซ์และจะเกิดขึ้นภายใน ทำให้แรงดันที่เทียบกับกราวด์(voltage to ground) ที่เกิดขึ้นมีขนาดเป็นสองเท่าของแรงดันที่ป้อนให้

AIEE - EEI NEMA Committee on Insulation coordination แห่งสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดมาตรฐานในการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1937 โดยเรียกการทดสอบดังกล่าวว่าการทดสอบความคงทนของฉนวน หรือระดับการฉนวนอิมพัลส์มาตรฐาน (Basic impulse insulation Level : BIL) หรือเขียนย่อ ๆ ว่าการทดสอบ BIL

วัตถุประสงค์ของการทดสอบแบบนี้ก็เพื่อเป็นการยืนยันว่า ฉนวนของขดลวดจะสามารถทนต่อแรงดันกระแทกได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์จะกระทำโดยใช้แรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ทดสอบไฟฟ้าแรงสูงเลียนแบบแรงดันที่มีรูปคลื่นเหมือนฟ้าผ่าตามธรรมชาติ จากการรวบรวมข้อมูลของสมาคม AIEE - EEI NEMA ทำให้เราทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ของรูปคลื่นฟ้าผ่าที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นจะประกอบไปด้วยรูปคลื่นพื้นฐานสามแบบคือ

1. คลื่นเต็ม (full wave)
2. คลื่นตัด (chopped wave)
3. หน้าคลื่น (front - of - wave)

รูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์ ที่สร้างขึ้นในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งนิยมเรียกกันว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (lightning impulse voltage) จะแบ่งออกเป็นสามแบบด้วยกัน คือ

1. รูปคลื่นเต็ม
2. รูปคลื่นตัด
 - รูปคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น
 - รูปคลื่นตัดช่วงหลังคลื่น

3. รูปคลื่นสวิตชิง

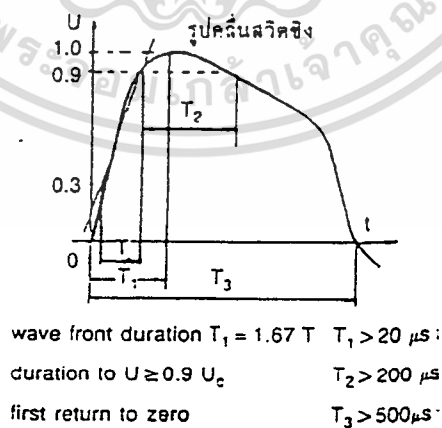
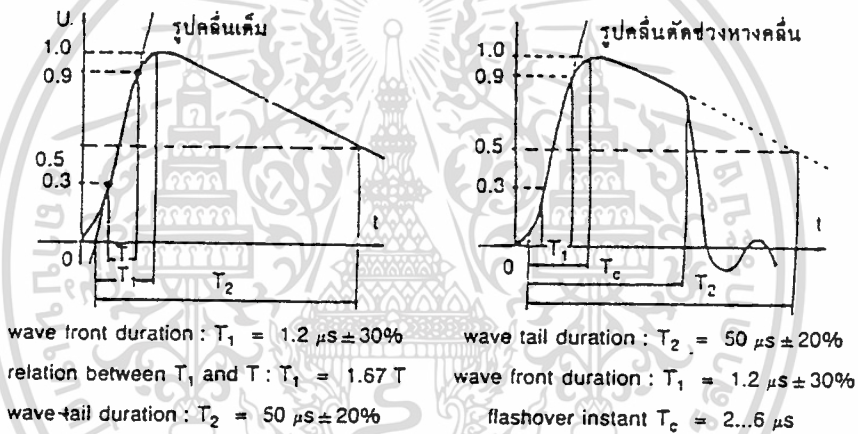
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์อาจกำหนดด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ขนาดของแรงดัน (amplitude) ซึ่งวัดจากค่ายอดของแรงดัน (peak voltage) ในกรณีคลื่นมีการกระเพื่อม เกิดออสซิลเลชัน(Oscillation)หรือโอเวอร์ชูต(Overshoot) ซึ่งยอมให้เกิดขึ้นได้ $\pm 5\%$ โดยให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดของแรงดัน

2. เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 และเวลาช่วงหลังคลื่น T_2 โดย T_1 คือช่วงเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด และ T_2 คือ ช่วงเวลานับตั้งแต่แรงดันเพิ่มขึ้น จากศูนย์ผ่านค่ายอดจนกระทั่งขนาดของแรงดันลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของค่ายอด (time to half - valve)

3. ขั้วของแรงดันจะเป็นขั้วแบบบวกหรือลบก็ได้ เมื่อเทียบกับกราวด์อ้างอิง(Reference earth) (นิยมใช้แรงดันแบบลบ)



รูปที่ 4.11 ลักษณะสำคัญของช่วงเวลาของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันอิมพัลส์ชนิดรูปคลื่นตัดอาจเกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันรูปคลื่นเต็มให้กับหม้อแปลงหรืออุปกรณ์อื่นที่ถูกนำมาทดสอบ แล้วฉนวนของวัตถุที่นำมาทดสอบทนไม่ได้ หรือเกิดการวาวไฟตามผิว (flash over) ของบุซึ่งหรือเกิดการขีดข่วนผ่านจากส่วนที่มีศักดาไฟฟ้าสูง ๆ ไปทางส่วนที่มีศักดาค่ากว่า เช่น จากบุซึ่งของหม้อแปลงไปยังกราวด์ หรือไปยังจุดที่มีระยะห่างทางไฟฟ้าไม่พอ ในห้องปฏิบัติการทดสอบสามารถจำลองหรือเลียนแบบให้เกิดปรากฏการณ์ ดังกล่าวได้โดยการใช้เก็บคัตคลื่นซึ่งอาจจะเป็นแบบรีด(Rod)หรือช่องว่างทรงกลม(Sphere gap) ก็ได้

การทดสอบความคงทนของฉนวนหม้อแปลงด้วยรูปคลื่นตัดนี้จะเกิดความเค้นขึ้นกับฉนวนภายในเป็นอย่างมาก ลักษณะที่เป็นอันตรายของรูปคลื่นชนิดนี้ก็คือ ความชันของรูปคลื่น ซึ่งมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน และขนาดของแรงดันค่ายอดมีค่าสูงกว่ารูปคลื่นเต็มอีกกว่าเท่าตัว

วิธีการทดสอบ

เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดที่ถูกต้อง จะต้องมีการตรวจสอบระบบการวัดก่อนทุกครั้งหากตรวจพบว่ามีผลคลาดเกินเกณฑ์มาตรฐานต้องทำการปรับเทียบ(calibrated) ให้ถูกต้องด้วย โดยทั่วไปนิยมปรับเทียบกับระบบการวัดแรงดันด้วยช่องว่างทรงกลม (sphere gap)

การปรับให้ขนาดของแรงดัน ช่วงเวลาน้ำคลื่นและหลังคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ตามรูปคลื่นมาตรฐานคือ $1.2 \times 50 \text{ us}$ เป็นเรื่องที่ทำให้ยากพอสมควรดังนั้นมาตรฐาน ต่าง ๆ จึงยอมให้มีค่าความคลาดเคลื่อน (% tolerance) ได้ตามหลักเกณฑ์ดังนี้

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าและรูปคลื่นตัด เวลาระหว่างน้ำคลื่น $T_1 = 1.2 \text{ us} \pm 30\%$ เวลาระหว่างหลังคลื่น $T_2 = 50 \text{ us} \pm 20\%$ ค่ายอดของแรงดัน $U_m = \pm 3\%$

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิง เวลาระหว่างน้ำคลื่น $T > 20 \text{ us}$ เวลาระหว่างหลังคลื่น $T_s > 200 \text{ us}$ เวลาดั้งแต่เริ่มต้นจนลดลงเหลือศูนย์ $T_3 > 500 \text{ us}$

การวิเคราะห์ผลการทดสอบความคงทนของฉนวนของหม้อแปลงหรือ BIL เมื่อวินิจฉัยว่าฉนวนของหม้อแปลงมีคุณภาพดีตามเกณฑ์ มาตรฐานหรือไม่จะอาศัยการพิจารณาจากออสซิลโลแกรมของรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เกิดจากการป้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์โดยการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสดระหว่างรูปคลื่นที่ได้จากการป้อนด้วยแรงดันลดระดับ (RFWV นิยมทำที่ค่า 60%) กับรูปคลื่นที่เกิดจากการป้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ 100% (FWV) หรือเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นที่ระดับแรงดันที่กำหนดหลายครั้งต่อเนื่องกัน คือ เปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นแรงดันกับรูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นแรงดันของการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องเหมือนกันทุกประการ ไม่มี

การคิดเพี้ยนแม้แต่จุดเล็กจุดน้อย หากนำรูปคลื่นมาซ้อนกันจะต้องทับกันได้สนิท หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด

ในกรณีที่มีความแตกต่างของรูปคลื่น ผู้วินิจฉัยจะต้องมีทักษะและประสบการณ์สูงเป็นพิเศษ เพราะสิ่งที่ทำให้รูปคลื่นเกิดความแตกต่างอาจไม่ใช่เกิดจากจนวนภายในหม้อแปลงชำรุดบ่อยครั้งที่มีการตรวจพบที่เกิดจากความผิดพลาดในการคำนวณจนวนอื่นที่เป็นโลหะค้ำค้ำอยู่บนหลังหม้อแปลง, จุดต่อลงดินไม่มีหรือไม่นั่นพอ ฯลฯ ซึ่งจะต้องตรวจสอบให้แน่ชัดเสียก่อน หากพบว่าวงจรการทดสอบเป็นต้นเหตุจะต้องหาวิธีการแก้ไขให้หมดไปแล้วทำการทดสอบใหม่อีกครั้งซึ่งค่อยสรุปผล

การเปรียบบออสซิลโลแกรมรูปคลื่นแรงดัน

เนื่องจากบออสซิลโลแกรมของรูปคลื่น แรงดันทดสอบมักจะไม่วัดความไวต่อการตรวจความผิดปกติ(Fault) ฉะนั้น การวินิจฉัยโดยดูจากรูปคลื่นแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปจะใช้ได้สำหรับกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับจนวนที่สำคัญ ๆ และเกิดขึ้นค่อนข้างมาก เช่น

— เกิดผิดปกติลงดินในจนวนที่สำคัญ ณ ตำแหน่งที่ใกล้กับขั้วขดลวดที่ถูกป้อนแรงดัน เป็นผลให้เกิดการหักของกระแสหรือคลื่นค้ำอย่างกะทันหัน ดังรูปที่ 4.12 (ข) เกิดการเบรคความถี่ที่บุขซึ่งลงดิน

— เกิดการวาวไฟตามขั้วขดลวด หรือเกิดคิสรข้างบางส่วน จะทำให้อิมพีแดนซ์ของขดลวดลดลงมาก เป็นผลให้ระยะเวลาหลังคลื่นต้นลงและกระแสที่ไหลผ่านชั้นที่จะมีจำนวนมาก ดังเช่นรูปที่ 4.12 (ข)

การเปรียบเทียบบออสซิลโลแกรมรูปคลื่นกระแส

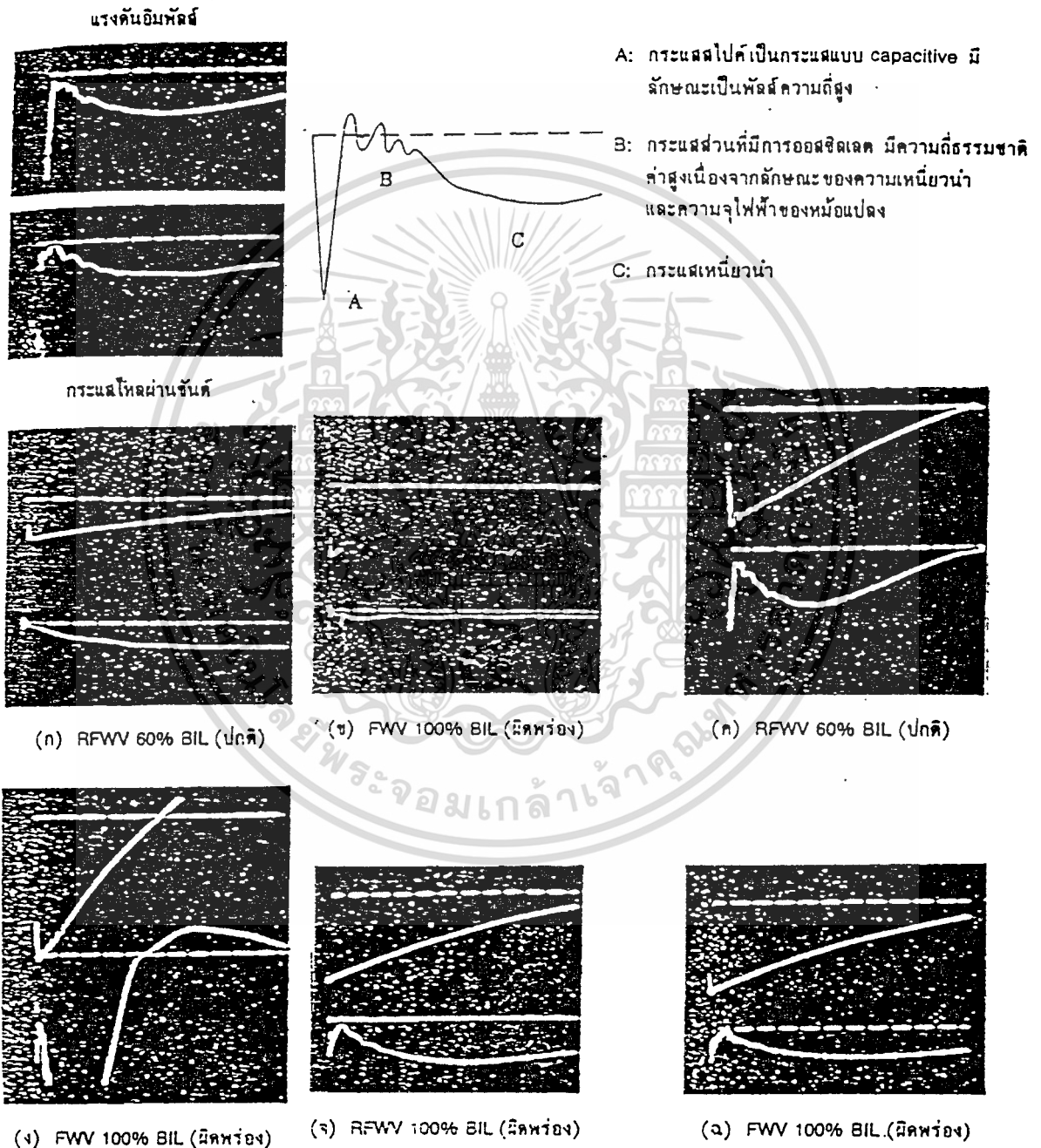
บออสซิลโลแกรมรูปคลื่นกระแสจะมีความไวมากที่สุดต่อการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามความไวนี้ก็วัดต่อสิ่งรบกวนภายนอกด้วย ดังนั้นการวินิจฉัยรูปคลื่นจึงต้องทำอย่างละเอียดค้ำด้วยการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากของรูปคลื่นกระแสเป็นสิ่งที่บอเหตุถึงการเกิดเบรคความถี่ในเนื้อจนวนหรือไหลลงดิน การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสจะบอให้ทราบถึงชนิดและตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติได้เช่น

— กระแสหายไป และเกิดแรงดันคลื่นค้ำบนส่วนใกล้ค้ำยอคมแสดงว่าเกิดการเบรคความถี่ขึ้นที่บุขซึ่ง เช่น รูปที่ 4.11 (ง)

— กระแสเพิ่มขึ้นในจุดนิวตรอน แสดงว่าเกิดผิดปกติขดลวดที่ถูกทดสอบแต่ถ้ากระแสลดลงแสดงว่าเกิดผิดปกติขดลวดทดสอบไปทางขดลวดของค้ำที่ใกล้เคียงหรือ ไหลลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

— เกิดจุดเป็นระยะ ๆ ตามแนวรูปคลื่นกระแส เช่น รูปที่ 4.11 (จ) แสดงว่าเกิดการคืบซาร์จบางส่วนในฉนวนระหว่างรอบขดลวดหรือระหว่างขดลวดถ้ามีลักษณะเป็นเส้นก้างปลาช่วงแคบ ๆ ขนาด 2-3 us อาจมีสาเหตุจากการเกิดคืบซาร์จที่รุนแรงขึ้น ลักษณะรูปคลื่นเช่นนี้จะไม่สามารถสังเกตหรือพบความเปลี่ยนแปลงในรูปคลื่นแรงดันเลย



รูปที่ 4.12

ตัวอย่างออสซิลโทแกรมแรงดันและกระแสที่แสดงถึงการเกิดความผิดปกติของฉนวนจากผลการ

ทดสอบ BIL ของหม้อแปลงไฟฟ้า (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

หม้อแปลงเครื่องวัดมีอยู่ 2 ชนิด คือ หม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดัน แต่ในโครงการนี้ได้เสนอแต่การออกแบบสร้างและทดสอบเฉพาะหม้อแปลงแรงดันเพียงอย่างเดียว โดยในการออกแบบสร้างและทำการทดสอบหม้อแปลงแรงดัน ได้ยึดหลักตามมาตรฐาน IEC 186 (1987) เป็นข้อกำหนดในการอ้างอิง ซึ่งผลการออกแบบสร้างและทดสอบของหม้อแปลงแรงดันนี้ มีข้อมูลทางเทคนิคดังนี้

- ขนาดแรงดัน

แรงดันทางด้านปฐมภูมิ	24 kV
แรงดันทางด้านทุติยภูมิ	110 V

- ขนาดกระแส

กระแสทางด้านปฐมภูมิ	0.001 A
กระแสทางด้านทุติยภูมิ	0.227 A

- เบอร์เคาน์หรือพิกัดกำลังทางด้านเอาต์พุต 25 VA
- ความถี่ 50 Hz
- อัตราส่วนแรงดัน 218.18 : 1
- ระดับความแม่นยำ 0.5 %
- ลักษณะของขั้ว แบบ แอดคิตีฟ
- ฉนวนของขดลวดเป็น คลาส A
- ลักษณะการต่อใช้งาน โลว์-ทง-ไฮ
- น้ำหนักรวม 60 kg.
- การทดสอบฉนวนในเวลา 1 นาที ทางด้านแรงดันสูง 50 kV ที่พิกัดความถี่ 50 Hz
- การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำเกินในเวลา 30 วินาที ทางด้านแรงดันต่ำ 220 V ที่ความถี่ 200 Hz
- การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ 125 kV
- แกนเหล็ก
 - แผ่นเหล็กซิลิกอน M4 ที่มีความหนา 0.27 mm.
 - พื้นที่หน้าตัดขวาง 0.002 m^2
 - ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก 1.2 Wb/m^2
 - น้ำหนัก 14.04 kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขดลวด

- ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ No. 33 SWG 34864 รอบ
- ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ No. 18 SWG 160 รอบ

- ตัวถังหม้อแปลง

- ฝาครอบส่วนบนใช้เหล็กที่มีความหนา 3 mm.
- ฝาครอบส่วนล่างใช้เหล็กที่มีความหนา 5 mm.
- น้ำหนักรวม 24 kg.

- ฉนวนน้ำมัน

- ปริมาณ 10 ลิตร

- บุชชิงแรงสูง

- แบบกระเบื้องตามมาตรฐาน DIN 42531 ขนาด 24 kV
- คลาส 20 N มีความยาว 370 mm.

ในการทดสอบไม่ได้ทำการทดสอบการเกิดคิสซาร์บางส่วนและการทดสอบความผิดปกติที่เกิดจากมุมเฟส เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ แต่ก็นำค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบเบ็ดเสร็จและปีดวงจร มาแทนค่าในสูตรสามารถหาค่ามุมเฟสที่คลาดเคลื่อนโดยประมาณได้

การทดสอบหม้อแปลงเครื่องวัดจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้อุปกรณ์ในการทดสอบที่มีค่าความถูกต้องแม่นยำสูง เพราะจะทำให้ทราบค่าความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือของหม้อแปลงเครื่องวัด เพื่อให้ได้ประโยชน์ในการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาคผนวกที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงขนาดและเบอร์ลวดตัวนำตามมาตรฐานต่างๆ

TABLE - Copper Wire—Wire Gages, Diameter, Area, Weight

Gage name						Diameter at 20 C (68 F)		Area at 20 C (68 F)			Weight at 20 C (68 F) bare copper wire		
American (B & S) wire gage, AWG	Steel wire gage, Std. wg	Birmingham (Stubbs' iron) wire gage, BWG	Old English (London) wire gage	(British) standard wire gage, SWG	Metric wire gage	Mils	Mm	Sq mils	Cir mils	Sq mm	Lb per 1,000 ft	Lb per mile	Kg per km
Gage No.													
...	7/0	...	...	7/0	...	500	12.70	196,300	250,000	126.7	756.7	3996	1126
...	...	...	...	...	...	490.0	12.45	188,600	240,100	121.7	726.8	3837	1082
...	6/0	...	...	6/0	...	464	11.79	169,100	215,000	109.1	651.7	3441	969.8
...	...	...	...	...	...	461.5	11.72	167,300	213,000	107.9	644.7	3404	959.4
4/0	...	...	...	...	...	480.0	11.65	166,200	211,600	107.2	640.5	3382	953.2
...	...	4/0	4/0	...	...	454	11.53	161,900	206,100	104.4	623.9	3294	923.5
...	...	...	...	5/0	...	432	10.97	146,600	186,600	94.56	564.9	2983	840.7
...	3/0	3/0	3/0	...	...	430.5	10.93	145,600	185,300	93.91	561.0	2962	834.8
...	...	...	...	...	...	425	10.80	141,900	180,600	91.52	546.3	2887	813.7
3/0	...	...	...	...	...	409.6	10.40	131,800	167,500	85.01	507.3	2681	755.7
...	...	...	...	4/0	...	400	10.16	125,700	160,000	81.07	484.3	2557	720.8
...	4/0	...	...	...	...	393.8	10.00	121,300	155,100	78.58	469.4	2479	698.6
...	...	...	...	...	100	393.7	10.00	121,700	155,000	78.54	469.2	2477	698.2
...	...	2/0	2/0	...	...	380	9.652	113,400	144,400	73.17	437.1	2308	650.5
...	...	...	...	3/0	...	372	9.449	108,700	138,400	70.12	418.9	2212	623.4
...	2/0	...	...	...	...	364.8	9.266	104,500	133,100	67.43	402.8	2127	599.5
...	3/0	...	...	...	...	362.5	9.203	103,200	131,400	66.58	397.8	2100	591.9
...	...	...	...	2/0	...	354.3	9.0	98,589	125,500	63.62	380.0	2007	565.6
...	...	1/0	1/0	...	...	348	8.839	95,115	121,100	61.36	366.6	1936	545.5
...	...	...	...	...	...	340	8.636	90,790	115,600	58.53	349.9	1848	520.7
...	2/0	...	...	...	...	331.0	8.407	86,050	109,600	55.52	331.6	1751	493.5
1/0	...	...	...	...	...	324.9	8.252	82,891	105,600	53.49	319.5	1687	477.6
...	...	...	...	1/0	...	324	8.230	82,450	105,000	53.19	317.8	1678	472.0
...	...	...	...	...	80	314.96	8.0	77,931	99,200	50.27	300.3	1585	446.9
...	1/0	...	...	...	...	306.5	7.785	73,780	93,940	47.60	284.4	1501	423.2
...	...	1	1	...	...	300	7.620	70,690	90,000	45.60	272.4	1438	405.4
...	...	...	...	...	...	289.3	7.343	65,730	83,690	42.41	253.3	1338	377.0
...	...	2	2	...	...	284	7.214	63,350	80,660	40.87	244.4	1289	363.3
...	...	...	...	...	...	283.0	7.185	62,900	80,090	40.58	242.4	1280	360.8
...	...	...	...	2	...	276	7.010	59,830	76,150	38.60	230.6	1217	343.1
...	...	...	...	...	70	275.59	7.0	59,650	75,950	38.49	229.9	1214	342.1
...	...	...	...	...	...	262.5	6.668	54,120	68,910	34.92	208.6	1101	310.4
...	...	3	3	...	...	259	6.579	52,690	67,090	33.99	203.1	1072	302.2
2	...	...	...	...	...	257.6	6.543	52,120	66,360	33.62	200.9	1061	298.9
...	...	...	...	...	...	252	6.401	49,830	63,500	32.18	192.2	1015	286.1
...	...	...	...	...	...	243.7	6.190	46,840	59,300	30.09	179.8	949.2	267.5
...	...	4	4	...	...	238	6.045	44,490	56,640	28.70	171.5	905.3	255.2
...	...	...	...	...	60	238.2	6.000	43,830	55,800	28.27	168.9	891.8	251.4
...	...	...	...	...	...	232	5.893	42,270	53,320	27.27	162.9	860.3	242.5
3	...	...	...	...	...	229.4	5.827	41,330	52,620	26.67	159.3	841.1	237.1
...	...	...	...	...	...	225.3	5.723	39,870	50,760	25.72	153.7	811.3	228.7
...	...	5	5	...	...	220	5.588	38,010	48,400	24.52	146.5	773.6	218.0
...	...	...	...	...	...	212	5.385	35,300	44,940	22.77	136.0	718.3	202.5
...	...	...	...	...	...	207.0	5.258	33,605	42,850	21.71	129.7	684.9	193.0
4	...	...	...	...	...	204.3	5.189	32,780	41,740	21.15	126.3	667.1	188.0
...	...	...	...	...	...	203	5.156	32,370	41,210	20.88	124.7	658.6	185.6
...	...	6	6	...	...	196.8	5.0	30,430	38,750	19.63	117.3	619.3	174.6
...	...	...	...	...	50	192.0	4.877	29,950	36,360	18.63	111.6	589.2	168.1
...	...	...	...	...	...	181.9	4.620	25,990	33,090	16.77	100.2	528.8	149.0
5	...	...	...	...	...	180	4.572	25,450	32,400	16.42	98.07	517.8	146.0
...	...	...	...	...	...	177.2	4.500	24,650	31,390	15.90	95.01	501.7	141.4
...	...	...	...	...	...	177.0	4.496	24,610	31,330	15.87	94.83	500.7	141.1
...	...	...	...	...	...	176	4.470	24,330	30,980	15.70	93.76	495.1	139.5
...	...	8	8	...	...	165	4.191	21,350	27,220	13.80	82.41	435.1	122.6
6	...	...	...	...	...	162.0	4.115	20,610	26,240	13.30	70.44	419.4	118.2
...	...	...	...	...	...	160	4.064	20,110	25,600	12.97	77.49	409.2	115.3
...	...	...	...	...	...	157.5	4.000	19,480	24,800	12.57	75.09	396.4	111.7
...	...	...	...	...	...	148.3	3.767	17,270	21,990	11.14	66.57	351.5	99.07
...	...	9	9	...	...	148	3.759	17,200	21,900	11.10	66.30	350.1	98.67
7	...	...	...	...	...	144.3	3.665	16,350	20,320	10.55	63.03	332.8	93.80
...	...	...	...	...	...	144	3.658	16,290	20,740	10.51	62.77	331.4	93.41
...	...	...	...	...	...	137.8	3.5	14,910	18,990	9.822	57.47	303.5	85.53
...	...	...	...	...	...	135.0	3.429	14,310	18,220	9.235	55.17	291.3	82.10
...	...	10	10	...	...	134	3.404	14,100	17,960	9.098	54.35	287.0	80.89
8	...	...	...	...	...	128.5	3.264	12,970	16,510	8.367	49.98	265.9	74.38
...	...	...	...	...	...	128	3.251	12,870	16,380	8.302	49.59	261.9	73.80
...	...	...	...	...	...	120.5	3.081	11,400	14,520	7.358	43.95	232.1	65.41
...	...	...	...	...	...	120	3.048	11,310	14,400	7.297	43.50	230.2	64.37
...	...	...	...	...	...	118.1	3.0	10,960	13,950	7.068	42.22	222.9	62.83
...	...	...	...	...	...	116	2.946	10,570	13,460	6.818	40.73	215.1	60.61
...	...	...	...	...	...	114.4	2.906	10,280	13,090	6.631	39.61	209.2	58.95
...	...	12	12	...	...	109	2.769	9,331	11,880	6.020	35.96	180.9	53.52
...	...	...	...	...	...	105.5	2.680	8,742	11,130	5.640	33.69	177.9	50.14
...	...	...	...	...	...	104	2.642	8,495	10,820	5.481	32.74	172.9	48.72
10	...	...	...	...	...	101.9	2.588	8,155	10,380	5.281	31.43	166.0	46.77
...	...	...	...	...	...	98.42	2.5	7,609	9,687	4.908	29.32	154.8	43.63
...	...	...	...	...	...	95	2.413	7,088	9,025	4.573	27.32	144.2	40.65
...	...	...	...	...	...	92	2.337	6,848	8,464	4.259	25.62	135.3	38.13
...	...	...	...	...	...	91.5	2.324	6,576	8,372	4.242	25.34	133.8	37.71
11	...	...	...	...	...	90	2.304	6,460	8,270	4.17	24.90	131.1	37.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้าหรือการพิมพ์ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงขนาดและเบอร์ลวดคัตว้ตามมาตรฐานต่างๆ (ต่อ)

TABLE Copper Wire—Wire Gages, Diameter, Area, Weight (Continued)

Gage name						Diameter at 20 C (68 F)		Area at 20 C (68 F)			Weight at 20 C (68 F) bare copper wire		
American (S & S) wire gage, A.W.G.	Steel wire gage, Std. wg.	Birmingham (Swab's Iron) wire gage, B.W.G.	Old English (London) wire gage	(British) standard wire gage, S.W.G.	Metric wire gage	Mils	Mm	Sq mils	Cir mils	Sq mm	Lb per 1,000 ft	Lb per mille	Kg per km
Gage No.													
...	...	14	14	...	...	83	2.103	5,411	6,889	3,491	20.85	110.1	31.03
12	...	...	...	...	...	80	2.05	5,130	6,530	3,310	19.8	104	29.4
...	14	...	...	14	...	80.0	2.032	5,029	6,400	3,243	19.37	102.3	28.53
...	...	...	...	...	...	78.74	2.0	4,869	6,200	3,142	18.77	99.09	27.93
...	15	15	15	15	...	72.0	1.829	4,072	5,184	2,627	15.69	82.85	23.35
...	...	...	...	...	...	72.0	1.83	4,070	5,180	2,63	15.7	82.9	23.4
13	...	...	...	...	18	70.87	1.8	3,944	5,022	2,545	15.20	80.27	22.82
...	...	16	16	...	...	65	1.631	3,318	4,225	2,141	12.79	67.53	19.03
14	...	...	...	...	...	64.1	1.63	3,230	4,110	2,08	12.4	65.7	18.5
...	...	...	...	16	...	64	1.626	3,217	4,096	2,075	12.40	65.46	18.43
...	...	...	...	...	...	62.99	1.6	3,116	3,963	2,011	12.01	63.41	17.87
...	16	...	...	...	...	62.5	1.558	3,068	3,906	1,979	11.82	62.43	17.60
...	...	17	17	...	...	58	1.473	2,642	3,364	1,705	10.18	53.77	15.15
15	...	...	...	...	...	57.1	1.45	2,560	3,260	1,650	9.87	52.1	14.7
...	...	...	...	17	...	56	1.422	2,463	3,136	1,589	9.493	50.12	14.13
...	...	...	...	...	...	55.12	1.4	2,386	3,038	1,539	9.196	48.56	13.69
16	17	...	...	...	...	54.0	1.372	2,290	2,918	1,478	8.827	46.60	13.14
...	...	...	...	...	...	50.8	1.29	2,030	2,580	1,31	7.81	41.2	11.6
...	...	18	18	...	...	49	1.245	1,886	2,401	1,217	7.268	38.37	10.32
...	...	...	...	18	...	48	1.219	1,810	2,304	1,167	6.974	36.82	10.38
...	18	...	...	...	...	47.5	1.207	1,773	2,256	1,143	6.830	36.06	10.16
...	...	...	...	...	...	47.24	1.200	1,753	2,232	1,131	6.756	35.67	10.05
17	...	...	...	...	...	45.3	1.150	1,610	2,050	1,040	6.21	32.8	9.24
...	...	19	19	...	...	42	1.067	1,385	1,764	0.9938	5.340	28.19	7.948
...	19	...	...	...	...	41.0	1.041	1,320	1,681	0.9518	5.098	26.87	7.572
...	...	...	...	...	...	40.3	1.02	1,280	1,620	0.923	4.92	26.0	7.32
18	...	...	...	19	...	40	1.016	1,257	1,600	0.9107	4.843	25.57	7.207
...	...	...	...	...	...	39.37	1	1,217	1,550	0.8754	4.692	24.77	6.982
...	...	...	...	20	10	36	0.9144	1,018	1,296	0.8567	3.923	20.71	5.838
19	...	...	...	...	...	35.9	0.912	1,010	1,290	0.853	3.90	20.6	5.81
...	...	20	20	...	9	35.43	0.90	986.1	1,255	0.8262	3.800	20.07	5.656
...	20	...	...	...	...	35	0.8890	962.1	1,225	0.8207	3.703	19.58	5.520
...	...	21	...	...	...	34.8	0.8839	951.1	1,211	0.8136	3.666	19.36	5.455
...	...	...	...	21	...	32	0.8129	804.2	1,024	0.5189	3.100	16.37	4.613
20	...	...	...	...	...	32.0	0.813	804.0	1,020	0.519	3.10	16.4	4.61
...	...	...	...	...	...	31.7	0.8052	789.2	1,005	0.5092	3.042	16.06	4.527
...	21	...	...	...	8	31.5	0.80	779.1	992	0.5027	3.003	15.85	4.482
...	...	...	...	...	...	29.50	0.7493	683.3	870	0.4410	2.634	13.91	3.929
...	22	...	...	...	...	28.6	0.7264	642.4	818.0	0.4145	2.476	13.07	3.685
21	...	...	...	...	...	28.5	0.724	638.0	812.0	0.412	2.46	13.0	3.66
...	...	22	...	...	...	28	0.7112	615.8	784.0	0.3973	2.373	12.53	3.532
...	...	...	...	22	7	27.56	0.70	596.5	759.5	0.3848	2.299	12.14	3.421
...	...	23	...	...	...	27.00	0.6858	572.6	729.0	0.3694	2.207	11.65	3.284
...	23	...	...	...	...	25.8	0.6553	522.8	665.6	0.3373	2.015	10.64	2.998
22	...	...	...	...	...	25.3	0.643	503.0	640.0	0.324	1.94	10.2	2.88
...	...	23	...	...	...	25	0.6350	490.9	625.0	0.3167	1.892	9.989	2.815
...	...	...	23	...	...	24	0.6096	452.4	576.0	0.2919	1.744	9.206	2.595
...	...	...	...	6	...	23.62	0.60	438.3	558.0	0.2927	1.699	8.919	2.514
...	24	...	...	...	...	23.0	0.5942	415.5	529.0	0.2680	1.601	8.455	2.383
23	...	25	...	...	...	22.6	0.574	401.0	511.0	0.259	1.55	8.16	2.30
...	...	24	...	...	...	22	0.5588	380.1	484.0	0.2452	1.465	7.736	2.180
...	...	...	...	...	...	20.5	0.5207	330.1	420.3	0.2129	1.272	6.717	1.893
...	25	...	...	...	...	20.4	0.5182	326.9	416.2	0.2109	1.260	6.651	1.875
24	...	...	26	...	...	20.1	0.511	317.0	404.0	0.205	1.22	6.46	1.82
...	...	25	...	...	...	20	0.5080	314.2	400.0	0.2027	1.211	6.393	1.802
...	...	...	...	...	...	19.68	0.50	304.3	387.5	0.1963	1.173	6.193	1.746
...	...	...	...	...	...	18.75	0.4763	276.1	351.6	0.1781	1.064	5.610	1.524
...	...	...	...	...	...	18.1	0.4597	257.3	327.6	0.1660	0.9916	5.236	1.476
...	...	26	...	...	...	18	0.4572	254.5	324.0	0.1642	0.9807	5.178	1.460
25	...	...	...	25	...	17.9	0.453	252.0	320.0	0.162	0.970	5.12	1.44
...	...	...	...	...	...	17.72	0.45	246.5	313.9	0.1590	0.9501	5.016	1.414
...	27	...	...	...	...	17.3	0.4394	235.1	299.3	0.1517	0.9059	4.783	1.348
...	...	...	...	...	...	16.50	0.4191	213.8	272.3	0.1380	0.8241	4.351	1.226
...	...	...	...	27	...	16.4	0.4166	211.2	260.0	0.1363	0.8141	4.299	1.212
...	28	...	...	...	...	16.2	0.4115	206.1	262.4	0.1330	0.7944	4.194	1.192
...	...	...	...	...	...	16	0.4064	201.1	256.0	0.1297	0.7749	4.092	1.153
...	...	...	...	...	...	15.9	0.404	199.0	253.0	0.129	0.765	4.04	1.14
...	...	...	...	...	...	15.75	0.40	194.8	248.0	0.1257	0.7507	3.964	1.117
...	...	...	...	...	...	15.50	0.3937	188.7	254.1	0.1217	0.7272	3.840	1.082
26	...	...	...	...	...	15.0	0.3810	176.7	225.0	0.1140	0.6811	3.596	1.014
...	...	...	...	...	...	14.8	0.3759	172.0	219.0	0.1110	0.6630	3.501	0.9867
...	...	...	...	...	...	14.2	0.361	158.0	202.0	0.102	0.610	3.22	0.904
...	...	...	...	...	...	14.0	0.3556	153.9	196.0	0.09932	0.5933	3.133	0.8829
...	30	...	...	...	...	13.78	0.35	149.1	189.9	0.09621	0.5747	3.035	0.8553
...	...	...	...	...	...	13.75	0.3493	148.5	189.1	0.09580	0.5723	3.022	0.8517

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงขนาดและเบอร์ลวดตัวนำตามมาตรฐานต่างๆ (ต่อ)

TABLE - Copper Wire—Wire Gages, Diameter, Area, Weight (Continued)

Gage name						Diameter at 20 C (68 F)		Area at 20 C (68 F)			Weight at 20 C (68 F) bare copper wire		
American (B & S) wire gage, A.W.G.	Steel wire gage, S.W.G.	Birmingham (Stub's) iron wire gage, B.W.G.	Old English (London) wire gage	British standard wire gage, S.W.G.	Metric wire gage	Mils	Mm	Sq mils	Cir mils	Sq mm	Lb per 1,000 ft	Lb per mile	Kg per km
Gage No.													
...	...	...	...	29	...	13.6	0.3454	145.3	135.0	0.09372	0.5399	2.956	0.8332
...	31	...	...	...	...	13.2	0.3353	136.8	127.2	0.08829	0.5274	2.785	0.7849
...	...	29	...	...	...	12.8	0.3251	128.7	119.0	0.08302	0.5116	2.701	0.7613
28	...	...	...	...	...	12.6	0.320	125	115.0	0.0804	0.4959	2.619	0.7390
...	...	...	...	...	...	12.4	0.3150	120.8	110.8	0.07791	0.4854	2.457	0.6926
...	...	...	31	...	...	12.25	0.3112	117.9	107.9	0.07604	0.4542	2.398	0.6760
...	...	30	...	...	...	12	0.3048	113.1	103.1	0.07297	0.4359	2.301	0.6487
...	...	...	...	...	3	11.81	0.30	109.6	99.6	0.07069	0.4223	2.239	0.6284
...	33	...	...	...	...	11.8	0.2997	109.4	99.4	0.07055	0.4215	2.225	0.6272
...	...	...	...	31	...	11.6	0.2946	105.7	95.7	0.06818	0.4073	2.131	0.6061
29	...	...	...	...	...	11.3	0.287	100.0	90.0	0.0647	0.3877	2.04	0.575
...	...	...	32	...	...	11.25	0.2858	99.40	89.40	0.06413	0.3831	2.023	0.5701
...	...	...	...	32	...	10.8	0.2743	91.61	81.61	0.05910	0.3531	1.864	0.5254
...	34	...	...	...	...	10.4	0.2642	84.95	74.95	0.05481	0.3274	1.729	0.4872
...	...	...	...	...	...	10.25	0.2604	82.52	72.52	0.05324	0.3180	1.679	0.4733
30	...	...	...	...	...	10.0	0.254	78.50	68.50	0.0507	0.302	1.60	0.450
...	...	31	...	...	...	10.0	0.2540	78.54	68.54	0.05067	0.3027	1.598	0.4505
...	...	...	...	...	2.5	9.842	0.25	76.09	66.09	0.04909	0.2932	1.548	0.4364
...	35	...	...	...	...	9.5	0.2413	70.88	60.88	0.04573	0.2732	1.442	0.4065
...	...	...	...	34	...	9.2	0.2337	66.48	56.48	0.04289	0.2562	1.353	0.3813
...	36	32	...	...	...	9.0	0.2286	63.62	53.62	0.04104	0.2452	1.295	0.3649
31	...	...	...	...	...	8.9	0.226	62.20	52.20	0.0401	0.240	1.27	0.357
...	37	...	...	...	...	8.5	0.2159	56.75	46.75	0.03661	0.2187	1.155	0.3255
...	...	...	...	35	...	8.4	0.2134	55.42	45.42	0.03573	0.2139	1.128	0.3178
...	...	33	...	...	...	8.0	0.2032	50.27	40.27	0.03243	0.1937	1.023	0.2833
32	...	...	...	...	...	8.0	0.203	50.30	40.30	0.0324	0.194	1.02	0.288
...	...	...	...	...	2	7.874	0.20	48.69	38.69	0.03142	0.1877	0.9909	0.2793
...	...	...	36	...	...	7.6	0.1930	45.36	35.36	0.02927	0.1748	0.9231	0.2602
...	39	...	...	...	...	7.5	0.1905	44.18	34.18	0.02930	0.1703	0.8990	0.2534
...	...	...	...	...	1.8	7.087	0.1800	39.44	29.44	0.02545	0.1520	0.8026	0.2262
33	...	...	...	...	...	7.1	0.180	39.60	29.60	0.0255	0.153	0.806	0.227
...	40	34	...	...	...	7.0	0.1778	38.48	28.48	0.02483	0.1483	0.7831	0.2207
...	...	...	...	...	...	6.8	0.1727	36.32	26.32	0.02343	0.1400	0.7390	0.2083
...	41	...	...	...	...	6.8	0.1678	34.21	24.21	0.02207	0.1319	0.6962	0.1962
...	...	...	...	...	...	6.50	0.1651	33.18	23.18	0.02141	0.1279	0.6753	0.1903
34	...	...	...	...	...	6.3	0.160	31.20	21.20	0.0201	0.120	0.634	0.179
...	...	...	...	...	1.6	6.299	0.16	31.16	21.16	0.02011	0.1201	0.6342	0.1787
...	42	...	...	...	...	6.2	0.1575	30.19	20.19	0.01948	0.1184	0.6144	0.1732
...	43	...	...	...	...	6.0	0.1524	28.27	18.27	0.01824	0.1090	0.5754	0.1622
...	...	...	...	...	1.5	5.908	0.15	27.39	17.39	0.01767	0.1056	0.5575	0.1571
...	44	...	...	...	...	5.8	0.1473	26.42	16.42	0.01705	0.1018	0.5377	0.1515
...	...	...	...	...	...	5.75	0.1461	25.97	15.97	0.01675	0.1001	0.5284	0.1489
35	...	...	...	...	...	5.6	0.142	24.60	14.60	0.0159	0.0949	0.501	0.141
...	...	...	...	...	1.4	5.512	0.14	23.86	13.86	0.01539	0.09196	0.4855	0.1369
...	45	...	...	...	...	5.3	0.1397	23.76	13.76	0.01533	0.09157	0.4835	0.1363
...	46	...	...	...	...	5.2	0.1321	21.24	11.24	0.01370	0.08185	0.4322	0.1218
36	...	35	...	...	...	5.0	0.127	19.80	9.80	0.0127	0.0757	0.400	0.113
...	47	...	...	...	...	4.8	0.1219	18.10	8.10	0.01167	0.06974	0.3682	0.1038
...	48	...	...	...	...	4.724	0.12	17.53	7.53	0.01131	0.06756	0.3567	0.1005
...	...	...	...	...	...	4.6	0.1168	16.82	6.82	0.01072	0.06405	0.3382	0.09532
...	...	...	...	...	...	4.50	0.1143	15.90	5.90	0.01026	0.06130	0.3236	0.09122
37	...	...	...	...	...	4.50	0.114	15.90	5.90	0.0103	0.0613	0.324	0.0912
...	...	...	...	...	...	4.4	0.1118	15.21	5.21	0.009810	0.05860	0.3094	0.08721
...	50	36	...	...	...	4.0	0.1016	12.57	4.57	0.009107	0.04843	0.2557	0.07207
...	...	...	...	...	...	4.0	0.102	12.60	4.60	0.00811	0.0484	0.256	0.0721
38	...	...	...	...	...	3.937	0.10	12.17	4.17	0.007854	0.04692	0.2477	0.06982
...	...	...	...	...	...	3.6	0.09144	10.18	3.18	0.006567	0.03923	0.2071	0.05833
39	...	...	...	...	...	3.5	0.0889	9.62	2.62	0.00621	0.0371	0.196	0.0552
...	...	...	...	...	...	3.2	0.08128	8.042	2.042	0.005189	0.0310	0.1637	0.04613
...	...	...	...	...	...	3.1	0.0787	7.55	1.55	0.00487	0.0291	0.154	0.0433
40	...	...	...	...	...	2.8	0.0711	6.16	1.16	0.00397	0.0237	0.125	0.0353
41	...	...	...	...	...	2.8	0.07112	6.158	1.158	0.003973	0.02373	0.1253	0.03532
...	...	...	...	...	...	2.5	0.0635	4.91	0.91	0.00317	0.0180	0.0999	0.0282
42	...	...	...	...	...	2.4	0.06096	4.524	0.524	0.002919	0.01744	0.09206	0.02595
...	...	...	...	...	...	2.2	0.0559	3.80	0.80	0.00245	0.0147	0.0774	0.0218
43	...	...	...	...	...	2.0	0.05080	3.142	0.142	0.002027	0.01211	0.06393	0.01802
44	...	...	...	...	...	2.0	0.0508	3.14	0.14	0.00203	0.0121	0.0639	0.0180
...	...	...	...	...	0.5	1.969	0.05	3.043	0.043	0.001963	0.01173	0.06193	0.01716
45	...	...	...	...	...	1.8	0.0457	2.54	0.54	0.00164	0.00981	0.0519	0.0146
...	...	...	...	...	...	1.6	0.04064	2.011	0.011	0.001297	0.007749	0.04092	0.01153
46	...	...	...	...	...	1.6	0.0406	2.01	0.01	0.00130	0.00775	0.0409	0.0115
...	...	...	...	...	...	1.4	0.0356	1.54	0.54	0.000993	0.00593	0.0313	0.00883
47	...	...	...	...	...	1.2	0.0305	1.13	0.13	0.000730	0.00436	0.0230	0.00649
48	...	...	...	...	...	1.2	0.03048	1.131	0.131	0.0007297	0.004359	0.02301	0.006487
...	...	...	...	...	...	1.1	0.0279	0.950	0.950	0.000613	0.00386	0.0193	0.00545
49	...	...	...	...	...	1.0	0.02540	0.7354	0.7354	0.0005067	0.003027	0.01593	0.004505
50	...	...	...	...	...	1.0	0.0254	0.735	0.735	0.000507	0.00303	0.0160	0.00450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยในระบบต่าง ๆ

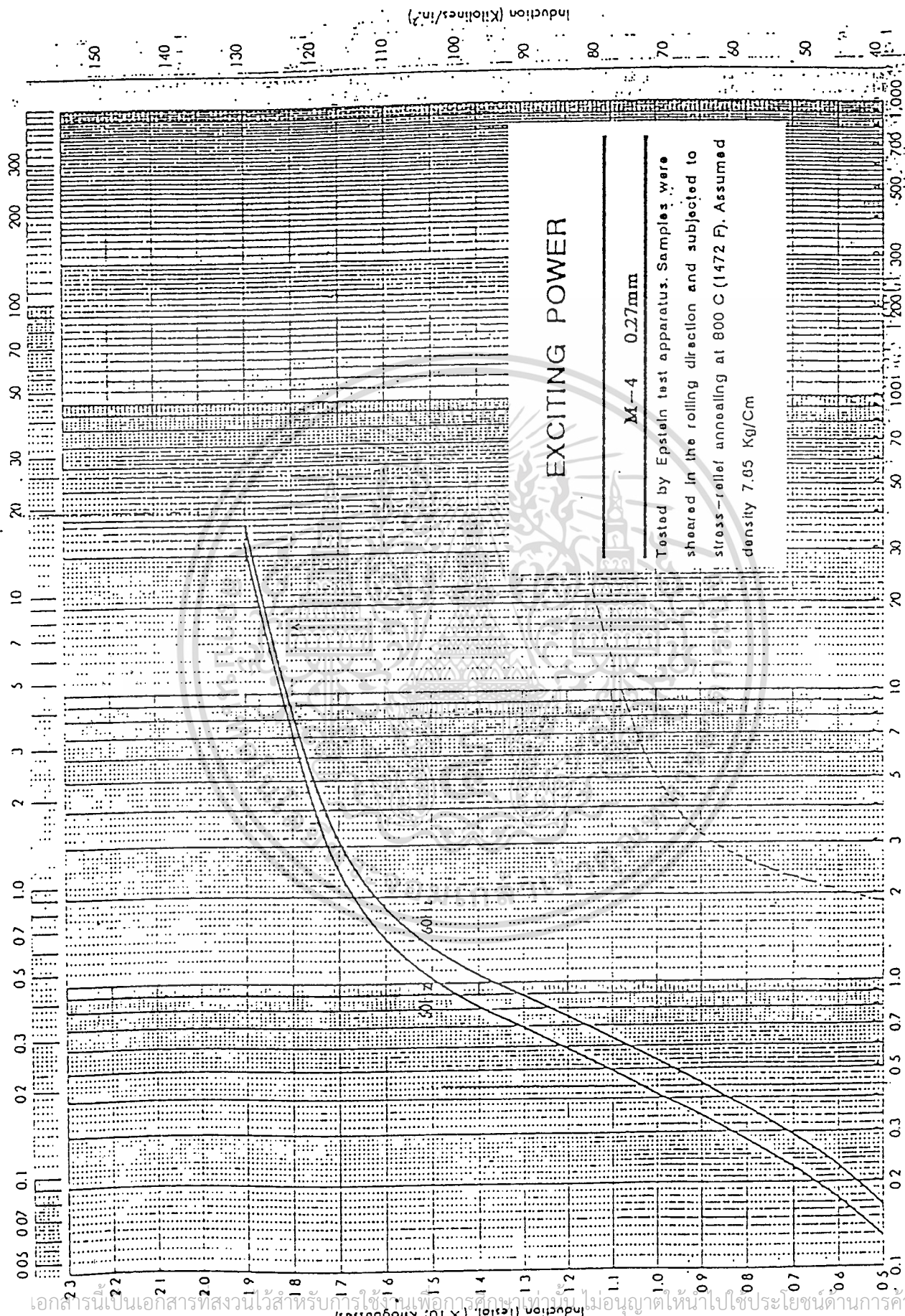
Length	mil	in	ft	yd	mm	cm	m
mil	1	0.001			0.0254		
inch.	1000	1	0.083	0.0278	25.4	2.54	
foot		12	1	0.33	304.8	30.48	0.305
yard		36	3	1	914.4	91.44	0.914
millimeter	39.37	0.03937			1	0.1	0.001
centimeter		0.3937	0.0328		10	1	0.01
meter		39.37	3.28	1.094	1000	100	1
Area	cir mil.	sq mil	sq in	sq ft	sq yd	sq cm	sq m
circular mil	1	0.7854					
square mil	1.274	1	10 ⁻⁶				
square inch	1274000	10 ⁶	1	0.00694		6.451	
square foot			144	1	0.1111	929.03	0.0929
square millimeter	1973	1550	0.00155				
square centimeter	197300		0.155	0.00108			
Volume	Weight						
	cu in	cu cm		ounce	lb		gram
cubic inch	1	16.39		1	0.0625		28.35
cubic centimeter	0.061	1		pound	16	1	453.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Exciting Power (VA/lb.)

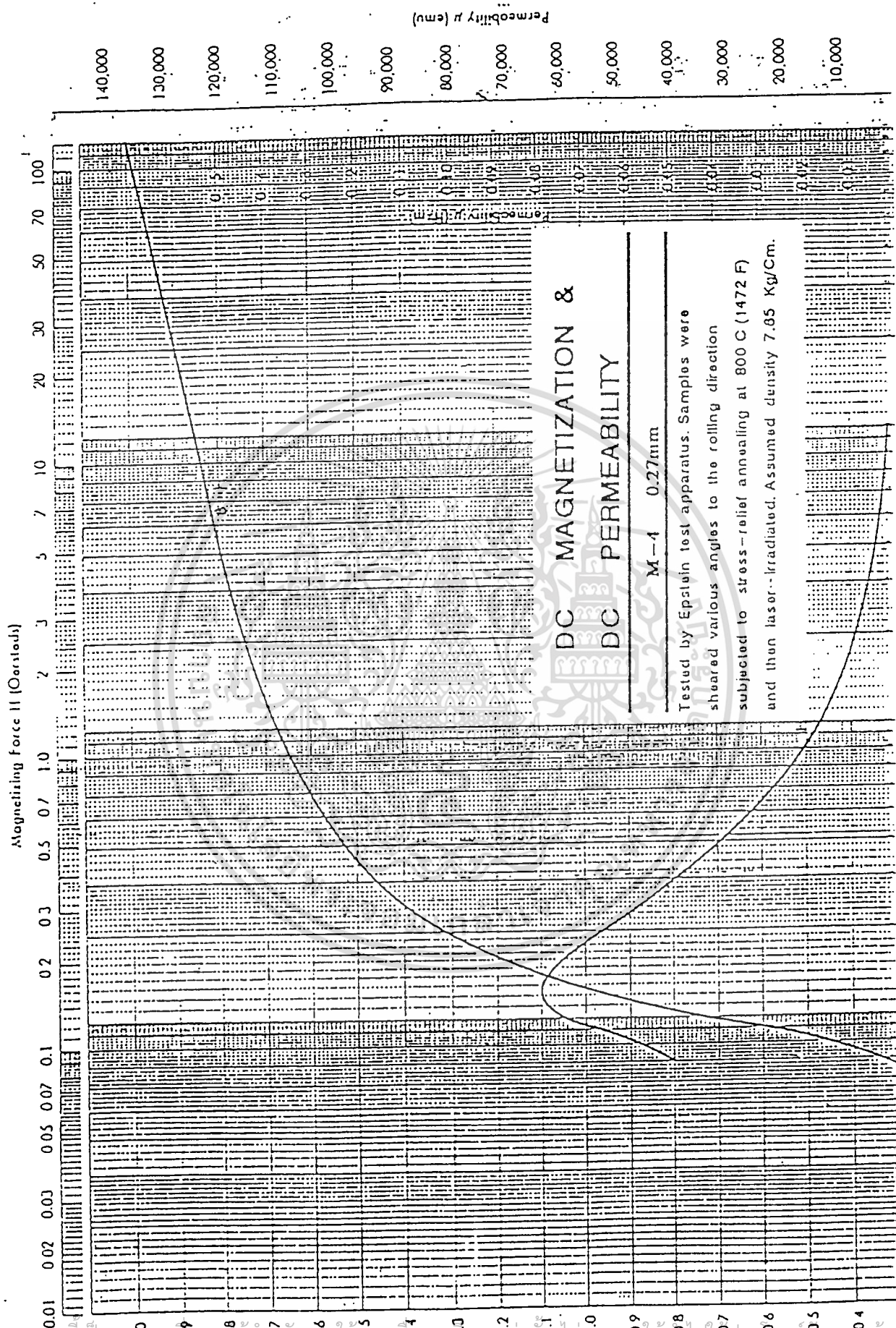


EXCITING POWER

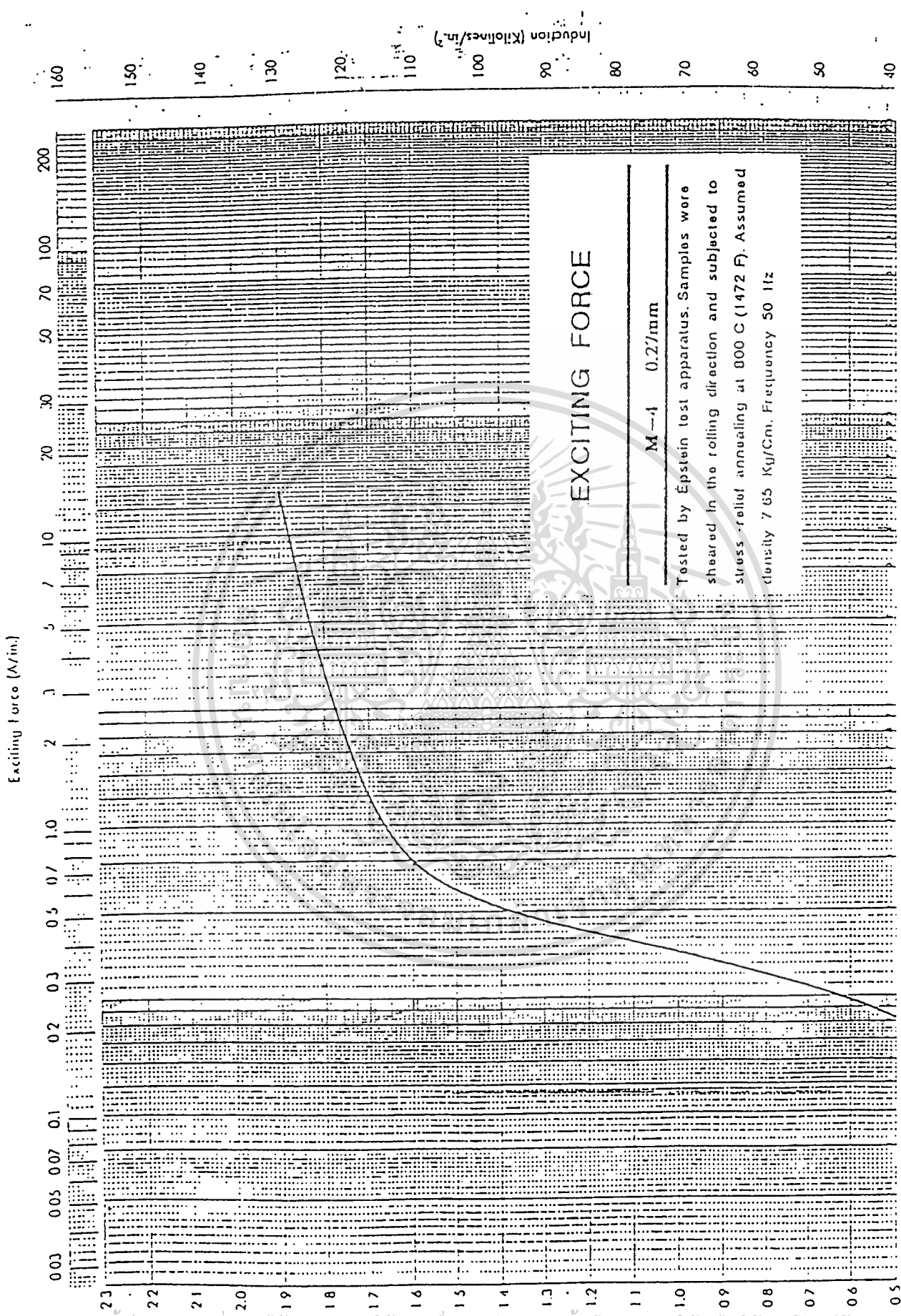
M-4 0.27mm

Tested by Epstein test apparatus. Samples were sheared in the rolling direction and subjected to stress-relief annealing at 800 C (1472 F). Assumed density 7.65 Kg/Cm

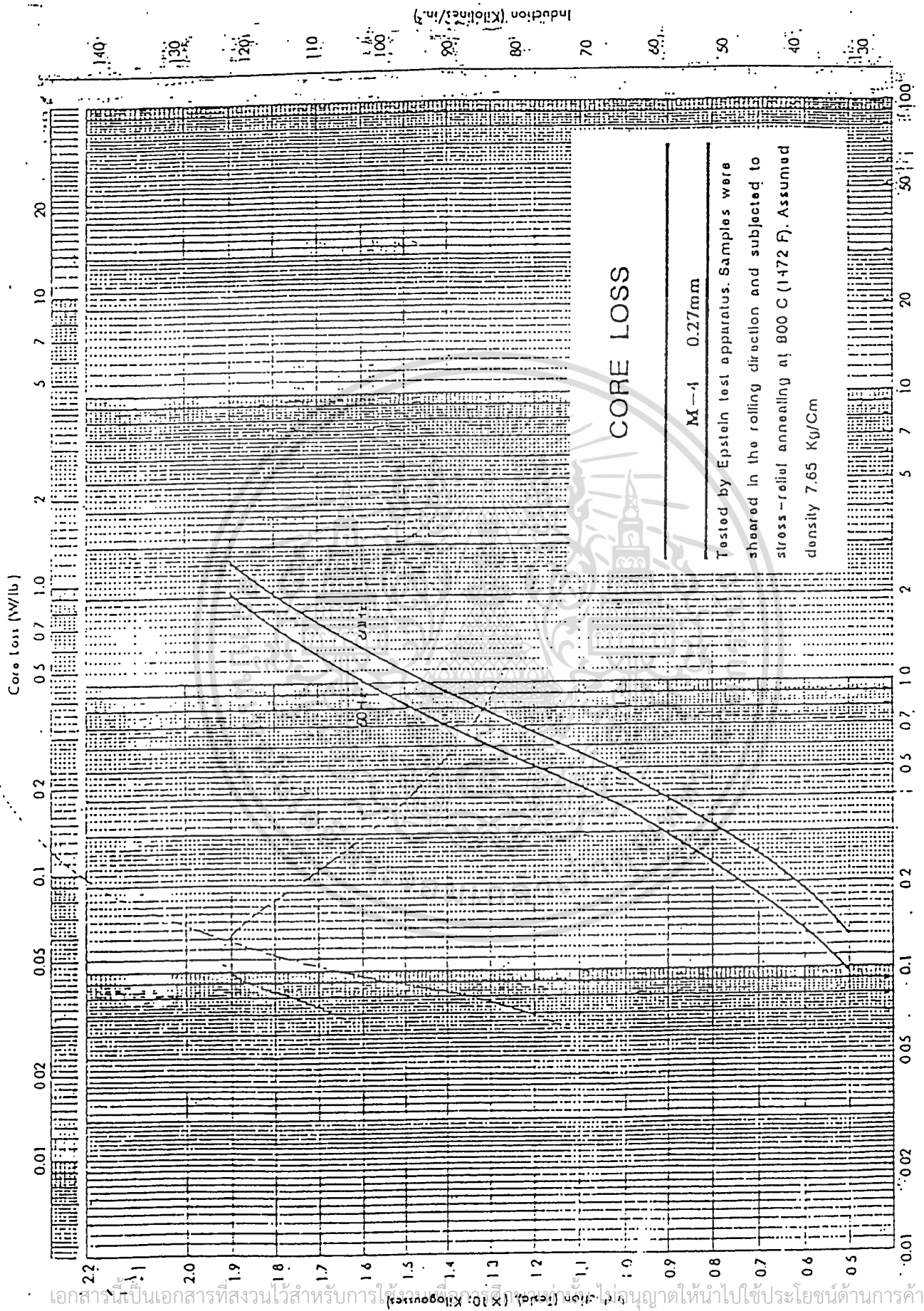
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในองค์กรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

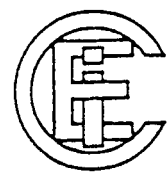


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NORME INTERNATIONALE INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
186

Deuxième édition
Second edition
1987



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

Transformateurs de tension

Voltage transformers



© CEI 1987 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, 3, rue de Varembe, Genève, Suisse

Code prix 44
Price code

For price, see current catalogue
For price, see current catalogue

CONTENTS

	Page
FOREWORD	9
PREFACE	9
CHAPTER I: GENERAL REQUIREMENTS APPLICABLE TO ALL VOLTAGE TRANSFORMERS	
SECTION ONE — GENERAL	
1. Scope	11
2. General requirements	11
3. Service conditions	11
4. Definitions	13
SECTION TWO — RATING AND PERFORMANCE REQUIREMENTS APPLICABLE TO ALL VOLTAGE TRANSFORMERS	
5. Standard values of rated voltages	19
6. Standard values of rated output	19
7. Standard values of rated voltage factor	21
8. Limits of temperature rise	21
9. Insulation requirements	25
9 a. Short-circuit withstand capability	33
SECTION THREE — TESTS — GENERAL	
10. Classification of tests	33
SECTION FOUR — TYPE TESTS	
11. Temperature-rise test	35
12. Short-circuit withstand capability test	37
13. Impulse tests on primary winding	37
14. Wet test for outdoor type transformers	41
SECTION FIVE — ROUTINE TESTS	
15. Verification of terminal markings	41
16. Power-frequency tests on primary windings and measurement of partial discharges	41
17. Power-frequency tests between sections and on secondary windings	45
SECTION SIX — SPECIAL TESTS	
18. Chopped lightning-impulse test on primary windings	45
SECTION SEVEN — MARKING	
19. Rating plate markings	47
SECTION EIGHT — TERMINAL MARKINGS	
20. General	47
21. Markings	47
CHAPTER II: ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR SINGLE-PHASE MEASURING VOLTAGE TRANSFORMERS	
SECTION NINE — GENERAL	
22. Scope	51
23. Definitions	51
SECTION TEN — ACCURACY REQUIREMENTS	
24. Accuracy class designation	51
25. Limits of voltage error and phase displacement	51
SECTION ELEVEN — TESTS FOR ACCURACY	
26. Type tests	53
26 a. Routine tests	53
SECTION TWELVE — MARKING	
27. Marking of the rating plate of a measuring voltage transformer	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER III: ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR SINGLE-PHASE PROTECTIVE VOLTAGE TRANSFORMERS

SECTION THIRTEEN — GENERAL

Page

28. Scope	55
29. Definitions	55

SECTION FOURTEEN — ACCURACY REQUIREMENTS

30. Accuracy class designation	55
31. Limits of voltage error and phase displacement	57

SECTION FIFTEEN — REQUIREMENTS FOR SECONDARY WINDINGS INTENDED TO PRODUCE A RESIDUAL VOLTAGE

32. Rated secondary voltages	57
33. Rated output	59
34. Accuracy class	59

SECTION SIXTEEN — TESTS FOR ACCURACY

35. Type tests	59
36. Routine tests	59

SECTION SEVENTEEN — MARKING

37. Marking of the rating plate of a protective voltage transformer	59
---	----

CHAPTER IV: ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR CAPACITOR VOLTAGE TRANSFORMERS

SECTION EIGHTEEN — GENERAL

38. Scope	61
39. General requirements	61
40. Definitions	61

SECTION NINETEEN — RATING AND PERFORMANCE REQUIREMENTS

41. Standard reference range of frequency	65
42. Standard values of rated output	65

SECTION TWENTY — ACCURACY REQUIREMENTS

43. Standard accuracy classes	65
44. Limits of voltage error and phase displacement	65

SECTION TWENTY-ONE — EFFECTS OF TRANSIENTS

45. Ferro-resonance	65
46. Transient response	67

SECTION TWENTY-TWO — COUPLING DEVICE

47. Carrier-frequency coupling device	67
---	----

SECTION TWENTY-THREE — TESTS

48. General	67
-----------------------	----

SECTION TWENTY-FOUR — TYPE TESTS

49. Temperature-rise test	69
50. Impulse test	69
51. Ferro-resonance tests	69
52. Transient response test	69
53. Tests for accuracy	71

SECTION TWENTY-FIVE — ROUTINE TESTS

54. Power-frequency tests	73
55. Tests for accuracy	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECTION TWENTY-SIX — MARKING

	Page
56. Marking of the rating plate of a capacitor voltage transformer	75
FIGURES	76
APPENDIX A — Typical and equivalent diagrams for a capacitor voltage transformer	80
APPENDIX B — Main condition allowing tests on the equivalent circuit	83
APPENDIX C — Burdens for the transient response test	85
APPENDIX D — Use of the equivalent circuit for the routine tests for accuracy	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

VOLTAGE TRANSFORMERS

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.
- 4) The IEC has not laid down any procedure concerning marking as an indication of approval and has no responsibility when an item of equipment is declared to comply with one of its recommendations.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 38: Instrument Transformers.

This second edition replaces the first edition of IEC Publication 186(1969) as well as Supplements A (1970) and B (1981) and Amendments No. 1 (1978) and No. 2 (1980).

The text of this standard is based also on the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting	Two Months' Procedure	Report on Voting
38(CO)69	38(CO)71	38(CO)73	38(CO)76

Further information can be found in the relevant Reports on Voting indicated in the table above.

The following IEC publications are quoted in this standard:

Publications Nos. 28 (1925): International Standard of Resistance for Copper.

38 (1983): IEC Standard Voltages.

44-4 (1980): Instruments Transformers, Part 4: Measurement of Partial Discharges.

50(321) (1986): International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 321: Instrument Transformers.

60: High-Voltage Test Techniques.

60-1 (1973): High-Voltage Test Techniques, Part 1: General Definitions and Test Requirements.

71: Insulation Co-ordination.

85 (1984): Thermal Evaluation and Classification of Electrical Insulation.

358 (1971): Coupling Capacitors and Capacitor Dividers.

507 (1975): Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on A.C. Systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VOLTAGE TRANSFORMERS

CHAPTER 1: GENERAL REQUIREMENTS APPLICABLE TO ALL VOLTAGE TRANSFORMERS

SECTION ONE — GENERAL

1. Scope

This standard applies to new voltage transformers for use with electrical measuring instruments and electrical protective devices at frequencies from 15 Hz to 100 Hz.

The general requirements of this chapter apply to all voltage transformers, but, for certain types, for example capacitor voltage transformers, the requirements are subject to the modifications stated in the appropriate chapter.

Although the requirements relate basically to transformers with separate windings, they are also applicable, where appropriate, to auto-transformers. The standard does not apply to transformers for use in laboratories.

Note. — Requirements specific to three-phase voltage transformers are not included in this standard but, so far as they are relevant, the requirements in Chapter I apply to these transformers and a few references to them are included in Chapter I (e.g. see Sub-clauses 4.4 and 5.1, Clause 6 and Section Eight).

2. General requirements

All the transformers shall be suitable for measuring purposes, but, in addition, certain types may be suitable for protection purposes. Transformers for the dual purpose of measurement and protection shall comply with Chapters I, II, III and IV of this standard.

3. Service conditions

Unless otherwise specified, this standard is valid for the following service conditions.

Note. — The manufacturers should be informed if the conditions, including the conditions under which transformers are to be transported, differ from those specified.

3.1 Ambient air temperature

— Maximum	40 °C
— Daily mean, not exceeding	30 °C
— Minimum, for indoor type transformers	−5 °C
— Minimum, for outdoor type transformers	−25 °C

3.2 Altitude

Up to 1 000 m (3 300 ft) above sea level.

3.3 Atmospheric conditions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Atmospheres which are not heavily polluted.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 System earthing

- 1) Isolated neutral system (see Sub-clause 4.20).
- 2) Resonant earthed system (see Sub-clause 4.21).
- 3) Earthed neutral system (see Sub-clause 4.23):
 - a) effectively earthed neutral system;
 - b) non-effectively earthed neutral system.

4. Definitions

For the purpose of this standard, the following definitions shall apply. Some of the definitions agree with or are similar to those of IEC Publication 50(321): International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 321: Instrument Transformers. These are indicated by the relevant IEV reference number in brackets.

4.1 Instrument transformer

A transformer intended to supply measuring instruments, meters, relays and other similar apparatus (321-01-01 modified).

4.2 Voltage transformer

An instrument transformer in which the secondary voltage, in normal conditions of use, is substantially proportional to the primary voltage and differs in phase from it by an angle which is approximately zero for an appropriate direction of the connections (321-03-01).

4.3 Unearthed voltage transformer

A voltage transformer which has all parts of its primary winding, including terminals, insulated from earth to a level corresponding to its rated insulation level.

4.4 Earthed voltage transformer

A single-phase voltage transformer which is intended to have one end of its primary winding directly earthed or a three-phase voltage transformer which is intended to have the star-point of its primary winding directly earthed.

4.5 Primary winding

The winding to which the voltage to be transformed is applied.

4.6 Secondary winding

The winding which supplies the voltage circuits of measuring instruments, meters, relays or similar apparatus.

4.7 Secondary circuit

The external circuit supplied by the secondary winding of a transformer.

4.8 Rated primary voltage

The value of the primary voltage which appears in the designation of the transformer and on which its performance is based (321-01-12 modified).

4.9 Rated secondary voltage

The value of the secondary voltage which appears in the designation of the transformer and on which its performance is based (321-01-16 modified).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 Actual transformation ratio

The ratio of the actual primary voltage to the actual secondary voltage (321-01-18 modified).

4.11 Rated transformation ratio

The ratio of the rated primary voltage to the rated secondary voltage (321-01-20 modified).

4.12 Voltage error (ratio error)

The error which a transformer introduces into the measurement of a voltage and which arises when the actual transformation ratio is not equal to the rated transformation ratio (321-01-22 modified).

The voltage error, expressed in per cent, is given by the formula:

$$\text{voltage error \%} = \frac{k_n U_s - U_p}{U_p} \times 100$$

where:

k_n is the rated transformation ratio

U_p is the actual primary voltage

U_s is the actual secondary voltage when U_p is applied under the conditions of measurement

4.13 Phase displacement

The difference in phase between the primary voltage and the secondary voltage vectors, the direction of the vectors being so chosen that the angle is zero for a perfect transformer (321-01-23 modified).

The phase displacement is said to be positive when the secondary voltage vector leads the primary voltage vector. It is usually expressed in minutes or centiradians.

Note. — This definition is strictly correct for sinusoidal voltages only.

4.14 Accuracy class

A designation assigned to a voltage transformer, the errors of which remain within specified limits under prescribed conditions of use.

4.15 Burden

The admittance of the secondary circuit expressed in siemens and power factor (lagging or leading).

Note. — The burden is usually expressed as the apparent power in voltamperes, absorbed at a specified power factor and at the rated secondary voltage.

4.16 Rated burden

The value of the burden on which the accuracy requirements of this specification are based.

4.17 Rated output

The value of the apparent power (in voltamperes at a specified power factor) which the transformer is intended to supply to the secondary circuit at the rated secondary voltage and with rated burden connected to it (321-01-27 modified).

4.18 Highest voltage for equipment

The highest r.m.s. phase-to-phase voltage for which a transformer is designed in respect of its insulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19 *Rated insulation level*

The combination of voltage values which characterizes the insulation of a transformer with regard to its capability to withstand dielectric stresses.

4.20 *Isolated neutral system*

A system which has no intentional connection to earth except through indicating, measuring or protective devices of very high impedance.

4.21 *A resonant earthed system (a system earthed through an arc-suppression coil)*

A system earthed through a reactor, the reactance being of such value that, during a single phase-to-earth fault, the power-frequency inductive current passed by this reactor substantially neutralizes the power-frequency capacitance component of the earth-fault current.

Note. — With resonant earthing of a system, the residual current in the fault is limited to such an extent that an arcing fault in air is self-extinguishing.

4.22 *Factor of earthing*

The factor of earthing at a selected location of a three-phase system (generally, the point of installation of equipment), for a given system layout, is the ratio, expressed as a percentage, of the highest r.m.s. line-to-earth power-frequency voltage on a fault-free phase at the selected location during a fault to earth (affecting one or more phases at any point) to the line-to-line r.m.s. power-frequency voltage which would be obtained at the selected location with the fault removed.

4.23 *An earthed neutral system*

A system in which the neutral is connected to earth either solidly or through a resistance or reactance of low enough value to reduce transient oscillations and to give a current sufficient for selective earth fault protection.

- a) A three-phase system with effectively earthed neutral at a given location is a system characterized by a factor of earthing at this point which does not exceed 80%.

Note. — This condition is obtained approximately when, for all system configurations, the ratio of zero-sequence reactance to the positive-sequence reactance is less than 3 and the ratio of zero-sequence resistance to positive-sequence reactance is less than 1.

- b) A three-phase system with non-effectively earthed neutral at a given location is a system characterized by a factor of earthing at this point that may exceed 80%.

4.24 *Exposed installation*

An installation in which the apparatus is subject to overvoltages of atmospheric origin.

Note. — Such installations are usually connected to overhead transmission lines either directly or through a short length of cable.

4.25 *Non-exposed installation*

An installation in which the apparatus is not subject to overvoltages of atmospheric origin.

Note. — Such installations are usually connected to underground cable networks.

4.26 *Rated frequency*

The value of the frequency on which the requirements of this standard are based.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.27 Rated voltage factor

The multiplying factor to be applied to the rated primary voltage to determine the maximum voltage at which a transformer must comply with the relevant thermal requirements for a specified time and with the relevant accuracy requirements.

SECTION TWO — RATING AND PERFORMANCE REQUIREMENTS APPLICABLE TO ALL VOLTAGE TRANSFORMERS

5. Standard values of rated voltages

5.1 Rated primary voltages

The standard values of rated primary voltage of three-phase transformers and of single-phase transformers for use in a single-phase system or between lines in a three-phase system shall be one of the values of nominal system voltage designated as being usual values in IEC Publication 38: IEC Standard Voltages. The standard values of rated primary voltage of a single-phase transformer connected between one line of a three-phase system and earth or between a system neutral point and earth shall be $1/\sqrt{3}$ times one of the values of nominal system voltage.

Note. — The performance of a voltage transformer as a measuring or protection transformer is based on the rated primary voltage, whereas the rated insulation level is based on one of the highest voltages for equipment of IEC Publication 38.

5.2 Rated secondary voltages

The rated secondary voltage shall be chosen according to the practice at the location where the transformer is to be used. The values given below are considered standard values for single-phase transformers in single-phase systems or connected line-to-line in three-phase systems and for three-phase transformers:

a) *Based on the current practice of a group of European countries:*

100 V and 110 V;

200 V for extended secondary circuits.

b) *Based on the current practice in the United States and Canada:*

120 V for distribution systems;

115 V for transmission systems;

230 V for extended secondary circuits.

For single-phase transformers intended to be used phase-to-earth in three-phase systems where the rated primary voltage is a number divided by $\sqrt{3}$, the rated secondary voltage shall be one of the fore-mentioned values divided by $\sqrt{3}$, thus retaining the value of the rated transformation ratio.

Notes 1. — The rated secondary voltage for windings intended to produce a residual secondary voltage is under consideration.

2. — Whenever possible, the rated transformation ratio should be of a simple value. If one of the following values: 10 - 12 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 80 and their decimal multiples is used for the rated transformation ratio together with one of the rated secondary voltages of this sub-clause, the majority of the standard values of nominal system voltage of IEC Publication 38 will be covered.

6. Standard values of rated output

The standard values of rated output at a power factor of 0.8 lagging, expressed in volt-amperes, are:

10, 15, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500 VA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The values underlined are preferred values. The rated output of a three-phase transformer shall be the rated output per phase.

Note. — For a given transformer, provided one of the values of rated output is standard and associated with a standard accuracy class, the declaration of other rated outputs, which may be non-standard values but associated with other standard accuracy classes, is not precluded.

7. Standard values of rated voltage factor

The voltage factor is determined by the maximum operating voltage which, in turn, is dependent on the system and the voltage transformer primary winding earthing conditions.

The standard voltage factors appropriate to the different earthing conditions are given in Table I below, together with the permissible duration of maximum operating voltage (i.e. rated time).

TABLE I
Standard values of rated voltage factors

Rated voltage factor	Rated time	Method of connecting the primary winding and system earthing conditions
1.2	Continuous	Between phases in any network Between transformer star-point and earth in any network
1.2	Continuous	Between phase and earth in an effectively earthed neutral system (Sub-clause 4.23 a))
1.5	30 s	
1.2	Continuous	Between phase and earth in a non-effectively earthed neutral system (Sub-clause 4.23 b)) with automatic earth fault tripping
1.9	30 s	
1.2	Continuous	Between phase and earth in an isolated neutral system without automatic earth fault tripping (Sub-clause 4.20) or in a resonant earthed system (Sub-clause 4.21) without automatic earth fault tripping
1.9	8 h	
Note. — Reduced rated times are permissible by agreement between manufacturer and user.		

8. Limits of temperature rise

Unless otherwise specified below, the temperature rise of a voltage transformer at the specified voltage, at rated frequency and at rated burden, or at the highest rated burden if there are several rated burdens, at any power factor between 0.8 lagging and unity, shall not exceed the appropriate value given in Table II.

The voltage to be applied to the transformer shall be in accordance with Item a), b) or c) below, as appropriate:

- a) All voltage transformers irrespective of voltage factor and time rating shall be tested at 1.2 times the rated primary voltage. The test shall be continued until the temperature of the transformer has reached a steady state.
- b) Transformers having a voltage factor of 1.5 for 30 s or 1.9 for 30 s shall be tested at their respective voltage factor for 30 s starting after the application of 1.2 times rated voltage for a time sufficient to reach stable thermal conditions; the temperature rise shall not exceed by more than 10 K the value specified in Table II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alternatively, such transformers may be tested at their respective voltage factor for 30 s starting from the cold condition; the winding temperature rise shall not exceed 10 K.

Note. — This test may be omitted if it can be shown by other means that the transformer is satisfactory under these conditions.

- c) *Transformers having a voltage factor of 1.9 for 8 h* shall be tested at 1.9 times the rated voltage for 8 h starting after the application of 1.2 times rated voltage for a time sufficient to reach stable thermal conditions; the temperature rise shall not exceed by more than 10 K the values specified in Table II.

The values in Table II are based on the service conditions given in Clause 3.

If ambient temperatures in excess of the values given in Sub-clause 3.1 are specified, the permissible temperature rise in Table II shall be reduced by an amount equal to the excess ambient temperature.

If a transformer is specified for service at an altitude in excess of 1 000 m and tested at an altitude below 1 000 m, the limits of temperature rise given in Table II shall be reduced by the following amounts for each 100 m that the altitude at the operating site exceeds 1 000 m:

- a) oil-immersed transformers 0.4%;
- b) dry-type transformers 0.5%.

The temperature rise of the windings is limited by the lowest class of insulation either of the winding itself or of the surrounding medium in which it is embedded. The maximum temperature rises of the insulation classes are as given in Table II.

TABLE II.
Limits of temperature rise of windings

Class of insulation (in accordance with IEC Publication 85*)	Maximum temperature rise (K)
All classes, immersed in oil	60
All classes, immersed in oil and hermetically sealed	65
All classes, immersed in bituminous compound	50
Classes not immersed in oil or bituminous compound:	
Y	45
A	60
E	75
B	85
F	110
H	135

Note. — For some materials (e.g. resin) the manufacturer should specify the relevant insulation class.

When the transformer is fitted with a conservator tank or has an inert gas above the oil, or is hermetically sealed, the temperature rise of the oil at the top of the tank or housing shall not exceed 55 K.

When the transformer is not so fitted or arranged, the temperature rise of the oil at the top of the tank or housing shall not exceed 50 K.

The temperature rise measured on the external surface of the core and other metallic parts where in contact with, or adjacent to, insulation shall not exceed the appropriate value in Table II.

9. Insulation requirements

9.1 Rated insulation levels, primary windings

The choice of the insulation level for transformers having highest voltage for equipment equal to or above 3.6 kV shall be made in accordance with IEC Publication 71: Insulation Co-ordination. For transformers having highest voltage for equipment below 3.6 kV the insulation level is determined by the rated power-frequency short-duration withstand voltage.

9.1.1 For windings having highest voltage for equipment in the range $3.6 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$, the rated insulation level, defined by the rated lightning-impulse and power-frequency short-duration withstand voltages, shall be one of those given in Tables IIIA or IIIB.

9.1.2 For windings having highest voltage for equipment $U_m \geq 300 \text{ kV}$, the rated insulation level, defined by the rated switching and lightning-impulse withstand voltages, shall be one of those given in Table IIIC.

Note. — In this voltage range, it is considered that switching impulse should have priority in the selection of insulation level.

9.2 Other requirements for primary winding insulation

9.2.1 Power-frequency withstand voltage

Windings having highest voltage for equipment $U_m \geq 300 \text{ kV}$ shall also be capable of withstanding the specified power-frequency test. There are two alternative methods specified in this standard for windings in this category. These methods are based on different requirements regarding the test voltages and the test procedures.

Method I: the winding shall withstand the power-frequency short-duration withstand voltage corresponding to the selected rated lightning-impulse voltage as given in Table IIID.

Method II: the winding shall withstand a power-frequency test of longer duration at a voltage level lower than the short-duration test combined with a partial discharge test requirement. The test voltages, depending on the highest voltage for equipment U_m , are given in Table IIIE.

Method I shall be used unless otherwise specified.

The adoption of Method II requires special agreement between manufacturer and purchaser.

Note. — Method II test may be preceded by a lightning-impulse test in order to complete the dielectric routine tests of the primary winding.

If Method I is adopted, the lightning-impulse test should be considered a type test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE IIIA

Rated insulation levels for transformer primary windings having highest voltage for equipment below 300 kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.)	Rated lightning-impulse withstand voltage (peak)	Rated power-frequency short-duration withstand (r.m.s.)
kV	kV	kV
0.72		3
1.2		6
3.6	20	10
	40	10
7.2	40	20
	60	20
12	60	28
	75	28
17.5	75	38
	95	38
24	95	50
	125	50
36	145	70
	170	70
52	250	95
72.5	325	140
	450	185
123	550	230
145	650	275
170	750	325
	850	360
245	950	395
	1 050	460

TABLE IIIB

Rated insulation levels for transformer primary windings having highest voltage for equipment below 52 kV

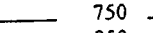
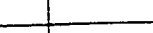
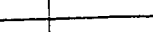
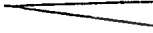
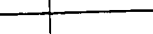
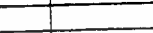
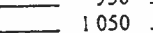
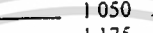
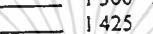
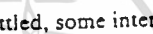
Based on practice in the United States of America and some other countries

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s)	Rated lightning-impulse withstand voltage (peak)		Rated power-frequency short-duration withstand voltage (r.m.s)
	Power system		
	≤ 500 kVA	> 500 kVA	
kV	kV	kV	kV
4.40	60	75	19
13.20	95	110	34
13.97			
14.52			
26.4	150		50
36.5	200		70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE IIIC

Rated insulation levels for transformer primary windings having highest voltage for equipment greater than or equal to 300 kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s)		Rated switching-impulse withstand voltage (peak)		Rated lightning-impulse withstand voltage (peak)	
kV		kV		kV	
300		750		950	
		850		1 050	
362		850		1 050	
		950		1 175	
420		950		1 175	
		1 050		1 300	
525		1 050		1 425	
		1 050		1 425	
765		1 175		1 550	
		1 300		1 800	
		1 425		2 100	
		1 550		2 400	

Note. *— As the test voltage for $U_m = 765$ kV has not as yet been finally settled, some interchange between switching and lightning-impulse test levels may become necessary.

TABLE IIID

Method I: Power-frequency withstand voltages for transformer primary windings having highest voltage for equipment greater than or equal to 300 kV.

Rated lightning impulse withstand voltage (peak)	Power-frequency short-duration withstand voltage (r.m.s.)
kV	kV
950	395
1 050	460
1 175	510
1 300	570
1 425	630
1 550	680
1 800	790
2 100	880
2 400	975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE IIIE

Method II: Power-frequency test voltages for transformer primary windings having highest voltage for equipment greater than or equal to 300 kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s)	Power-frequency pre-stress voltage, 10 s (r.m.s)	Partial discharge test voltage 5 min (r.m.s)
kV	kV	kV
300	395	225
362	460	270
420	510	315
525	630	395
765	790/880*	575

* To be determined by the rated lightning-impulse withstand voltage (see Table IIID).

Note. — The specified values of the voltages are provisional and may be changed in the light of experience and of revision of IEC Publication 44-4: Instrument Transformers, Part 4: Measurement of Partial Discharges. Other voltage levels may be used due to network conditions and require special agreement between manufacturer and purchaser.

9.2.2 Power-frequency withstand voltage for earthed terminal

The terminal of the primary winding intended to be earthed shall, when insulated from the case or frame, be capable of withstanding a rated power-frequency short-duration withstand voltage of 3 kV r.m.s. for 1 min.

9.2.3 Partial discharges

The permissible magnitude of partial discharges and the requirements for their measurement are given in IEC Publication 44-4. That standard is applicable to all voltage transformers except transformers having $U_m \geq 300$ kV and requiring adoption of Method II (see Sub-clause 16.3).

9.2.4 Chopped lightning-impulse

If additionally specified, the primary windings shall also be capable of withstanding chopped lightning-impulse voltages having the same peak value as the full lightning-impulse voltage.

9.3 Between-section insulation requirements

For secondary windings divided into two or more sections, the between-section insulation shall be capable of withstanding a rated power-frequency short-duration withstand voltage of 3 kV r.m.s. for 1 min.

9.4 Insulation requirements for secondary windings

The secondary winding insulation shall be capable of withstanding a rated power-frequency short-duration withstand voltage of 3 kV r.m.s. for 1 min.

9.5 Creepage distance

For outdoor insulation susceptible to contamination, the required minimum creepage distance measured on the insulation surface is given in Table IV. In addition the ratio between the total minimum creepage distance and the arcing distance should generally not exceed 3.5:1.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE IV

Pollution level	Minimum nominal specific creepage distance between phase and ground (mm / phase-to-phase kV)
I Light	16
II Medium	20
III Heavy	25
IV Very heavy	31

Notes 1. — The definition of the various pollution classes is still under consideration.

It is recognized that the performance of surface insulation is greatly affected by insulator shape.

2. — Artificial pollution tests, described in IEC Publication 507 (report): Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on A.C. Systems, are not included in this standard. More experience is needed before a test requirement based on this report can be issued.

9.6 Altitude

The disruptive discharge of external insulation depends on the prevailing atmospheric conditions. In order to ensure that the withstand voltages of the external insulation of a voltage transformer, intended for operation at altitudes exceeding 1 000 m above sea level, are sufficient, the arcing distance normally has to be increased.

For general guidance, the rated withstand voltage on which the arcing distance is based should be increased by 1 % for each 100 m in excess of 1 000 m above sea level.

9bis. Short-circuit withstand capability

The voltage transformer shall be designed and constructed to withstand without damage, when energized at rated voltage, the mechanical and thermal effects of an external short-circuit for the duration of 1 s.

SECTION THREE — TESTS — GENERAL

10. Classification of tests

The tests specified in this standard are classified as type tests, routine tests and special tests.

Type test

A test made on a transformer of each type to demonstrate that all transformers made to the same specification comply with the requirements not covered by routine tests.

Note. — A type test may also be considered valid if it is made on a transformer which has minor deviations. Such deviations should be subject to agreement between manufacturer and purchaser.

Routine test

A test to which each individual transformer is subjected.

Special test

A test other than a type test or a routine test, agreed on by manufacturer and purchaser.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.1 *Type tests*

The following tests are type tests. For details, reference should be made to the relevant clauses:

- a) Temperature-rise test (Clause 11)
- b) Lightning-impulse test (Clause 13)
- c) Switching-impulse test (Clause 13)
- d) Wet test for outdoor type transformers (Clause 14)
- e) Determination of errors (Clauses 26 and 35)
- f) Short-circuit withstand capability test (Clause 12)

The dielectric type tests shall all be carried out on the same transformer, unless otherwise specified.

After transformers have been subjected to the dielectric type tests of Sub-clause 10.1, they shall be subjected to all routine tests of Sub-clause 10.2.

10.2 *Routine tests*

The following tests are routine tests. For details, reference should be made to the relevant clauses:

- a) Verification of terminal markings (Clause 15).
- b) Power-frequency withstand test on secondary winding (Clause 17).
- c) Power-frequency withstand test between sections (Clause 17).
- d) Power-frequency withstand test on primary windings (Clause 16).
- e) Partial discharge measurement (Clause 16).
- f) Determination of errors (Clauses 26.1 and 36).

Apart from the fact that determination of errors *f)* shall be performed after the tests of Items *b)*, *c)* and *d)*, the order or possible combination of the other tests is not standardized.

Repeated power-frequency tests on primary windings shall be performed at 80% of the specified test voltage, except when Method II has been adopted.

10.3 *Special tests*

The following test is a special test. For details, reference should be made to the relevant clause:

- a) Chopped lightning-impulse test (Clause 18)

SECTION FOUR — TYPE TESTS

11. *Temperature-rise test*

A test shall be made to prove compliance considered with Clause 8. For the purpose of this test, voltage transformers shall be considered to have attained a steady-state temperature when the rate of temperature rise does not exceed 1 K per hour. The test site ambient temperature shall be between 10°C and 30°C.

When there is more than one secondary winding, the test shall be made with the appropriate rated burden connected to each secondary winding, unless otherwise agreed between manufacturer and purchaser.

For this test, the transformer shall be mounted in a manner representative of the mounting in service.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The temperature rise of the windings shall be measured by the increase in resistance method.

The temperature rise of parts other than windings may be measured by thermometers or thermocouples.

12. Short-circuit withstand capability test

This test shall be made to prove compliance with Sub-clause 9.7.

For this test, the transformer shall initially be at a temperature between 10°C and 30°C.

The voltage transformer shall be energized from the primary side and the short-circuit applied between the secondary terminals.

One short-circuit shall be applied for the duration of 1 s.

Note. — This requirement applies also where fuses are an integral part of the transformer.

During the short-circuit, the r.m.s. value of the applied voltage at the transformer terminals shall be not less than the rated voltage.

In the case of transformers provided with more than one secondary winding, or section, or with tapplings, the test connection shall be agreed between manufacturer and purchaser.

Note. — For inductive type transformers, the test may be carried out by energizing the secondary winding and applying the short-circuit between the primary terminals.

The transformer shall be deemed to have passed this test if, after cooling to ambient temperature, it satisfies the following requirements:

- a) it is not visibly damaged;
- b) its errors do not differ from those recorded before the tests by more than half the limits of error in its accuracy class;
- c) it withstands the dielectric tests specified in Clauses 16 and 17, but with the test voltage reduced to 90% of those given;
- d) on examination, the insulation next to the surface of both the primary and the secondary windings does not show significant deterioration (e.g. carbonization).

The examination d) is not required if the current density in the winding does not exceed 160 A/mm² where the winding is of copper of conductivity not less than 97% of the value given in IEC Publication 28: International Standard of Resistance for Copper. The current density is to be based on the measured symmetrical r.m.s. short-circuit current in the secondary winding (divided by the rated transformation ratio in the case of the primary).

13. Impulse tests on primary winding

13.1 General

The impulse tests shall be performed in accordance with IEC Publication 60: High-Voltage Test Techniques.

The impulse tests generally consist of voltage applications at reference and rated voltage levels. The reference impulse voltage shall be between 50% and 75% of the rated impulse withstand voltage. The peak value and the wave-shape of the impulse voltages shall be recorded.

Evidence of insulation failure in the test may be given by variation in the recorded quantity(ies) at both reference and rated withstand voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.2 Lightning-impulse test

The test voltage shall have the appropriate values given in Tables IIIA, IIIB or IIIC, depending on the highest voltage for equipment and the specified insulation level. The test voltage shall be applied between each line terminal of the primary winding and earth. The earthed terminal of the primary winding or the non-tested line terminal in the case of an unearthed voltage transformer, the frame, case (if any) and core (if intended to be earthed) shall be earthed during the test.

In order to improve the failure detection, an additional quantity shall be recorded.

At the manufacturer's discretion, the earth connection may be made through a suitable current recording device. The secondary terminals may be connected together and earthed or may be connected to a suitable device for recording the voltage wave appearing across the secondary winding(s) during the test.

13.2.1 Windings having $U_m < 300 \text{ kV}$

The test shall be performed with both positive and negative polarities. Fifteen consecutive impulses of each polarity, not corrected for atmospheric conditions, shall be applied. The transformer has passed the test if for each polarity:

- no disruptive discharge occurs in the non self-restoring internal insulation,
- no flashovers occur along the non self-restoring external insulation,
- no more than two flashovers occur across the self-restoring external insulation,
- no other evidence of insulation failure is detected (i.e. variations in the wave-shape of the recorded quantities).

For unearthed voltage transformers, approximately half the number of impulses shall be applied to each line terminal in turn with the other line terminal connected to earth.

Note. — The application of 15 positive and 15 negative impulses is specified for testing the external insulation. If other tests are agreed between manufacturer and purchaser to check the external insulation, the number of lightning impulses should be reduced to three of each polarity, not corrected for atmospheric conditions.

13.2.2 Windings having $U_m \geq 300 \text{ kV}$

The test shall be performed with both positive and negative polarities. Three consecutive impulses of each polarity, not corrected for atmospheric conditions, shall be applied.

The transformer has passed the test if:

- no disruptive discharge occurs,
- no other evidence of insulation failure is detected (i.e. variations in the wave-shape of the recorded quantities).

13.3 Switching-impulse test

The test voltages shall have the appropriate values given in Table IIIC, depending on the highest voltage for equipment and the specified insulation level. The test voltage shall be applied between the line terminal of the primary winding and earth. The earth terminal of the primary winding, one terminal of the secondary winding(s), the frame, case (if any) and core (if intended to be earthed) shall be connected to earth.

At the manufacturer's discretion, the earth connection may be made through a suitable current recording device. The non-earthed secondary terminals may be left open or connected

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to a high impedance device for recording the voltage wave appearing across the secondary windings(s) during the test.

The test shall be performed with both positive and negative polarities. Fifteen consecutive impulses of each polarity, corrected for atmospheric conditions, shall be applied.

Note. — To counteract the effect of core saturation, it is permissible, between consecutive impulses, to modify the magnetic status of the core by a suitable procedure.

Outdoor type transformers shall be subjected to wet tests. Dry tests are not required.

The transformer has passed the test if for each polarity:

- no disruptive discharge occurs in the non-selfrestoring internal insulation,
- no flashovers occur along the non-selfrestoring external insulation,
- no more than two flashovers occur across the self-restoring external insulation,
- no other evidence of insulation failure is detected (i.e. variations in the wave-shape of the recorded quantities).

14. Wet test for outdoor type transformers

In order to verify the performance of the external insulation, outdoor type transformers shall be subjected to wet tests.

The wetting procedure shall be in accordance with Sub-clause 8.1 of IEC Publication 60-1: High-Voltage Test Techniques, Part 1: General Definitions and Test Requirements.

14.1 Windings having $U_m < 300 \text{ kV}$

The test shall be performed in accordance with Sub-clauses 16.1 and 16.2 with power-frequency voltage corrected for atmospheric conditions.

14.2 Windings having $U_m \geq 300 \text{ kV}$

The test shall be performed with switching-impulse voltage in accordance with Sub-clause 13.3.

SECTION FIVE — ROUTINE TESTS

15. Verification of terminal markings

It shall be verified that the terminal markings are correct (see Clause 21).

16. Power-frequency tests on primary windings and measurement of partial discharges

16.1 General

The power-frequency test shall be performed in accordance with IEC Publication 60.

For separate source withstand tests, the duration shall be 1 min.

For induced overvoltage withstand tests, the frequency of the test voltage may be increased above the rated value to prevent saturation of the core. The duration of the test shall be 1 min.

If, however, the test frequency exceeds twice the rated frequency, the duration may be reduced from 1 min as below:

$$\text{duration of test (in seconds)} = \frac{\text{twice the rated frequency}}{\text{test frequency}}$$

with a minimum of 15 s.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When Method II has been adopted, see Sub-clause 16.3.2.

The measurement of partial discharges shall be performed in accordance with IEC Publication 44-4. The minimum measurable magnitude due to disturbances or the measuring sensitivity of the adopted circuit shall in general be lower than half the permissible magnitude specified.

16.2 Windings having $U_m < 300 \text{ kV}$

The test voltages for windings having $U_m < 300 \text{ kV}$ shall have the appropriate values given in Tables IIIA or IIIB, depending on the highest voltage for equipment.

When there is a considerable difference between the specified highest voltage for equipment U_m and the specified rated primary voltage, the induced voltage shall be limited to five times the rated primary voltage.

16.2.1 Unearthed voltage transformers

Unearthed voltage transformers shall be submitted to the following tests:

a) Separate source withstand voltage test

The test voltage shall be applied for 1 min between earth and all the terminals of the primary winding(s) connected together. The frame, case (if any), core (if intended to be earthed) and all terminals of the secondary winding(s) shall be connected together and to earth.

b) Induced overvoltage withstand test

At the manufacturer's discretion, the test shall be made by exciting the secondary winding with a voltage of sufficient magnitude to induce the specified test voltage in the primary winding, or by exciting the primary winding directly at the specified test voltage.

The test voltage shall be measured at the high voltage side in each case. The frame, case (if any), core (if intended to be earthed), one terminal of each secondary winding and one terminal of the primary winding shall be connected together and to earth.

Note. — The test may be performed by test voltage applications to each line terminal for half the required time with a minimum of 15 s for each terminal.

16.2.2 Earthed voltage transformers

Earthed voltage transformers shall be submitted to the following tests:

a) Separate source withstand voltage test, when applicable

The test voltage shall have the appropriate value given in Sub-clause 9.2.2 and shall be applied for 1 min between the terminal of the primary winding intended to be earthed and earth. The frame, case (if any), core (if intended to be earthed) and all terminals of the secondary winding(s) shall be connected together and to earth.

b) Induced overvoltage withstand test

The test shall be performed as specified in Sub-clause 16.2.1. The terminal of the primary winding(s) intended to be earthed in service shall be earthed during the test.

16.3 Windings having $U_m \geq 300 \text{ kV}$

The transformer shall be submitted to the following tests:

a) Separate source withstand voltage test, when applicable

The test voltages shall have the appropriate values given in Sub-clause 9.2.2 and the test shall be performed as specified in Sub-clause 16.2.2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b) *Induced overvoltage withstand test*

The induced overvoltage withstand test for windings having $U_m \geq 300$ kV shall be carried out in accordance with one of the methods indicated as Method I and Method II in the following paragraphs. The transformer under test shall be connected and the voltage measured as specified in Sub-clause 16.2.2. Method I should be used unless otherwise specified. The use of Method II shall be subject to agreement between manufacturer and purchaser.

16.3.1 *Method I*

The test voltages shall have the appropriate values given in Table IIID, depending on the rated lightning-impulse withstand voltage. The duration of the test shall be in accordance with Sub-clause 16.1.

16.3.2 *Method II*

The test voltages shall have the appropriate values given in Table IIIE, depending on the highest voltage for equipment. Independent of the test frequency, the Method II test procedure shall consist of a short-time application of 10 s at the power-frequency pre-stress voltage. This pre-stress voltage is then reduced to the partial discharge test voltage, without interruption, and maintained at this level for 5 min.

The maximum permissible partial discharge magnitude measured during the final minute at the specified partial discharge test voltage shall be 10 pC.

17. *Power-frequency tests between sections and on secondary windings*

The test voltage shall have the appropriate values given in Sub-clauses 9.3 and 9.4 respectively. The test voltage shall be applied for 1 min in turn between the terminals of each secondary winding or section and earth. The frame, case (if any), core (if intended to be earthed) and the terminals of all other windings or sections shall be connected together and to earth.

SECTION SIX — SPECIAL TESTS

18. *Chopped lightning-impulse test on primary windings*

The test shall be carried out with negative polarity only and combined with the negative polarity full lightning-impulse test in the manner described below.

The standard lightning impulse shall be chopped after 2 to 5 microseconds. The chopping circuit shall be so arranged that the amount of overswing to opposite polarity of the recorded impulse shall be limited to the order of 30% of the chopped impulse. The sequence of the impulse applications shall be as follows:

a) Windings having $U_m < 300$ kV

- one 100% full impulse
- two 100% chopped impulses
- fourteen 100% full impulses

b) Windings having $U_m \geq 300$ kV

- one 100% full impulse
- two 100% chopped impulses
- two 100% full impulses

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Differences in impulse shape of full wave applications before and after the chopped impulses are an indication of internal fault.

Flashovers during chopped impulses along self-restoring external insulation should be disregarded in the evaluation of the behaviour of external insulation.

SECTION SEVEN — MARKING

19. Rating plate markings

All voltage transformers shall carry at least the following markings:

- a) the manufacturer's name or other mark by which he may be readily identified;
- b) a serial number or a type designation, preferably both;
- c) the rated primary and secondary voltage (e.g. 66/0.11 kV);
- d) rated frequency (e.g. 50 Hz);
- e) rated output and the corresponding accuracy class (e.g. 50 VA, Class 1.0);

Note. — When two separate secondary windings are provided, the marking should indicate the output range of each secondary winding in VA, the corresponding accuracy class and the rated voltage of each winding.

- f) highest system voltage (e.g. 72.5 kV);
- g) rated insulation level (e.g. 140/325 kV).

Note. — The two items f) and g) may be combined into one marking (e.g. 72.5/140/325 kV).

All information shall be marked in an indelible manner on the voltage transformer itself or on a rating plate securely attached to the transformer.

In addition, the following information should be marked whenever space is available:

- h) rated voltage factor and corresponding rated time;
- i) class of insulation if different from Class A;

Note. — If several classes of insulating material are used, the one which limits the temperature rise of the windings should be indicated.

- j) on transformers with more than one secondary winding, the use of each winding and its corresponding terminals.

SECTION EIGHT — TERMINAL MARKINGS

20. General

These markings are applicable to single-phase voltage transformers, and also to sets of single-phase voltage transformers assembled as one unit and connected as a three-phase voltage transformer, or to a three-phase voltage transformer having a common core for the three phases.

21. Markings

21.1 Terminal markings

Markings shall be in accordance with Figures 1 to 10, pages 76 to 78 as appropriate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Capital letters A, B, C and N denote the primary-winding terminals and the lower-case letters a, b, c and n denote the corresponding secondary-winding terminals.

The letters A, B and C denote fully insulated terminals and the letter N denotes a terminal intended to be earthed and the insulation of which is less than that of the other terminal(s).

Letters da and dn denote the terminals of windings intended to supply a residual voltage.

21.2 *Relative polarity*

Terminals having corresponding capital and lower-case markings shall have the same polarity at the same instant.



CHAPTER II: ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR SINGLE-PHASE MEASURING VOLTAGE TRANSFORMERS

SECTION NINE — GENERAL

22. Scope

Chapter II contains requirements and tests, in addition to those in Chapter I, that are necessary for single-phase measuring voltage transformers.

23. Definitions

23.1 *Measuring voltage transformer*

A voltage transformer intended to supply indicating instruments, integrating meters and similar apparatus.

SECTION TEN — ACCURACY REQUIREMENTS

24. Accuracy class designation

For measuring voltage transformers, the accuracy class is designated by the highest permissible percentage voltage error at rated voltage and with rated burden, prescribed for the accuracy class concerned.

24.1 *Standard accuracy classes*

The standard accuracy classes for single-phase measuring voltage transformers are:

0.1 — 0.2 — 0.5 — 1.0 — 3.0

25. Limits of voltage error and phase displacement

The voltage error and phase displacement at rated frequency shall not exceed the values given in Table IV at any voltage between 80% and 120% of rated voltage and with burdens of between 25% and 100% of rated burden at a power factor of 0.8 lagging.

The errors shall be determined at the terminals of the transformer and shall include the effects of any fuses or resistors as an integral part of the transformer.

TABLE V

Limits of voltage error and phase displacement

Class	Percentage voltage (ratio) error ±	Phase displacement ±	
		Minutes	Centiradians
0.1	0.1	5	0.15
0.2	0.2	10	0.3
0.5	0.5	20	0.6
1.0	1.0	40	1.2
3.0	3.0	Not specified	Not specified

Note. — When ordering transformers having two separate secondary windings, because of their interdependence, the user should specify two output ranges, one for each winding, the upper limit of each output range corresponding to a standard rated output value. Each winding should fulfil its respective accuracy requirements within its output range, whilst at the same time the other winding has an output of any value from zero up to 100% of the upper limit of the output range specified for the other winding. In proving compliance with this requirement, it is sufficient to test at extreme values only. If no specification of output ranges is supplied, these ranges are deemed to be from 25% to 100% of the rated output for each winding.

If one of the windings is loaded only occasionally for short periods, its effect upon the other winding may be neglected.

SECTION ELEVEN — TESTS FOR ACCURACY

26. Type tests

To prove compliance with Clause 25, type tests shall be made at 80%, 100% and 120% of rated voltage, at rated frequency and at 25% and 100% of rated burden.

26a. Routine tests

The routine tests for accuracy are in principle the same as the type tests in Clause 26, but routine tests at a reduced number of voltages and/or burdens are permissible, provided it has been shown by type tests on a similar transformer that such a reduced number of tests is sufficient to prove compliance with Clause 25.

SECTION TWELVE — MARKING

27. Marking of the rating plate of a measuring voltage transformer

The rating plate shall carry the appropriate information in accordance with Clause 19.

The accuracy class shall be indicated following the indications of the corresponding rated output (e.g. 100 VA, Class 0.5).

Note. — The rating-plate may contain information concerning several combinations of output and accuracy class that the transformer can satisfy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER III: ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR SINGLE-PHASE PROTECTIVE VOLTAGE TRANSFORMERS

SECTION THIRTEEN — GENERAL

28. Scope

Chapter III covers the requirements and tests, in addition to those in Chapters I and II, that are necessary for single-phase protective voltage transformers.

The requirements of Chapter III apply particularly to transformers which are required to have sufficient accuracy to operate protective systems at voltages that occur under fault conditions.

29. Definitions

29.1 *Protective voltage transformer*

A voltage transformer intended to provide a supply to electrical protective relays.

29.2 *Residual voltage winding*

The winding of a single-phase voltage transformer intended, in a set of three single-phase transformers, for connection in broken delta for the purpose of producing a residual voltage under earth-fault conditions.

SECTION FOURTEEN — ACCURACY REQUIREMENTS

30. Accuracy class designation

All voltage transformers intended for protective purposes, with the exception of residual voltage windings, shall be assigned a measuring accuracy class in accordance with Clauses 24 and 25. In addition, they shall be assigned one of the accuracy classes specified in Sub-clause 30.1.

The accuracy class for a protective voltage transformer is designated by the highest permissible percentage voltage error prescribed for the accuracy class concerned, from 5% of rated voltage to a voltage corresponding to the rated voltage factor (see Sub-clause 4.27). This expression is followed by the letter "P".

30.1 *Standard accuracy classes*

The standard accuracy classes for protective voltage transformers are "3P" and "6P", and the same limits of voltage error and phase displacement will normally apply at both 5% of rated voltage and at the voltage corresponding to the rated voltage factor. At 2% of rated voltage, the error limits will be twice as high as those at 5% of rated voltage.

Where transformers have different error limits at 5% of rated voltage and at the upper voltage limit (i.e. the voltage corresponding to rated voltage factor 1.2, 1.5 or 1.9), agreement should be made between manufacturer and user.

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของ IEC หรือการใช้นี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31. Limits of voltage error and phase displacement

The voltage error and phase displacement at rated frequency shall not exceed the values in Table VI at 5% rated voltage and at rated voltage multiplied by the rated voltage factor (1.2, 1.5 or 1.9) with burdens of between 25% and 100% of rated burden at a power factor of 0.8 lagging.

At 2% of rated voltage, the limits of error and phase displacement with burdens of between 25% and 100% of rated burden at a power factor of 0.8 lagging will be twice as high as those given in Table VI.

TABLE VI
Limits of voltage error and phase displacement

Class	Percentage voltage (ratio) error + or -	Phase displacement + or -	
		Minutes	Centiradians
3 P	3.0	120	3.5
6 P	6.0	240	7.0

Note. — When ordering transformers having two separate secondary windings, because of their interdependence, the user should specify two output ranges, one for each winding, the upper limit of each output range corresponding to a standard rated output value. Each winding should fulfil its respective accuracy requirements within its output range, whilst at the same time the other winding has an output of any value from zero up to 100% of the upper limit of its output range. In proving compliance with this requirement, it is sufficient to test at extreme values only. If no specification of output ranges is supplied, these ranges are deemed to be from 25% to 100% of the rated output for each winding.

SECTION FIFTEEN — REQUIREMENTS FOR SECONDARY WINDINGS INTENDED TO PRODUCE A RESIDUAL VOLTAGE

32. Rated secondary voltages

Rated secondary voltages of windings intended to be connected in broken delta with similar windings to produce a residual voltage are given in Table VII.

TABLE VII
Rated secondary voltages

Preferred values		Alternative (non-preferred) values
V		V
100	110	200
$\frac{100}{\sqrt{3}}$	$\frac{110}{\sqrt{3}}$	$\frac{200}{\sqrt{3}}$
$\frac{100}{3}$	$\frac{110}{3}$	$\frac{200}{3}$

Note. — Where system conditions are such that the preferred values of rated secondary voltages would produce a residual voltage that is too low, the non-preferred values may be used, but attention is drawn to the need to take precautions for purposes of safety.

33. Rated output

The rated output of windings intended to be connected in broken delta with similar windings to produce a residual voltage shall be specified in voltamperes and the value shall be chosen from the values specified in Clause 6.

Note. — For a given admittance of the secondary circuit, the power delivered by this winding under the conditions specified in this clause will normally differ from the power that it may deliver in the event of a fault when associated with two other similar windings in a three-phase system.

34. Accuracy class

The accuracy class for a residual voltage winding shall be as defined in Sub-clause 30.1 and in Clause 31.

SECTION SIXTEEN — TESTS FOR ACCURACY

35. Type tests

To prove compliance with Clause 31, type tests shall be made at 2%, 5% and at 100% of rated voltage and at rated voltage multiplied by the rated voltage factor, at 25% and at 100% of rated burden at a power-factor of 0.8 lagging.

36. Routine tests

The routine tests for accuracy are in principle the same as the type tests in Clause 35, but routine tests at a reduced number of voltages and/or burdens are permissible, provided it has been shown by type tests on a similar transformer that such a reduced number of tests is sufficient to prove compliance with Clause 31.

SECTION SEVENTEEN — MARKING

37. Marking of the rating plate of a protective voltage transformer

The rating plate shall carry the appropriate information in accordance with Clause 19. The accuracy class shall be indicated after the corresponding rated output.

An example of a typical rating plate is given in Figure 11, page 79.

CHAPTER IV: ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR CAPACITOR VOLTAGE TRANSFORMERS

SECTION EIGHTEEN — GENERAL

38. Scope

Chapter IV covers the requirements and tests, in addition to those in Chapters I, II and III, that are necessary for capacitor voltage transformers intended to be connected between line and earth, comprising essentially a capacitor divider and an electromagnetic unit interconnected as shown diagrammatically in Figure A1 of Appendix A.

Chapter IV does not apply to capacitor voltage transformers in which the capacitance of the high-voltage capacitor is such that outputs of 10 VA cannot be obtained, although some of the clauses may apply to such devices.

39. General requirements

Unless otherwise stated in this chapter, all capacitor voltage transformers shall comply with the relevant requirements in Chapters I, II and III. In addition, the capacitor(s) shall comply with the requirements of the IEC Publication 358: Coupling Capacitors and Capacitor Dividers.

40. Definitions

For the purpose of this chapter, the following definitions apply:

40.1 Capacitor voltage transformer

A voltage transformer comprising a capacitor divider unit and an electromagnetic unit so designed and interconnected that the secondary voltage of the electromagnetic unit is substantially proportional to and in phase with the primary voltage applied to the capacitor divider unit.

40.2 Voltage divider

A device comprising resistors, capacitors or inductors by means of which it is possible to obtain between two points a voltage proportional to the voltage to be measured (20-30-160).

40.2.1 Capacitor (voltage) divider

A voltage divider comprising only capacitors.

40.2.2 High-voltage (or line) terminal

Terminal to be connected to the power line.

40.2.3 Low-voltage terminal

Terminal to be connected to the carrier-frequency transmission circuit or to the earth terminal.

Note. — The high-voltage and low-voltage terminals are the primary terminals.

40.2.4 Intermediate (voltage) terminal

Terminal to be connected to an intermediate circuit, such as the electromagnetic unit of a capacitor voltage transformer.

40.3 High-voltage capacitor (C_1)

Capacitor connected between the high-voltage and intermediate voltage terminals.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ และหากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40.4 *Intermediate-voltage capacitor (C_2)*

Capacitor connected between the intermediate-voltage terminal and the low-voltage or the earth terminal.

40.5 *Electromagnetic unit*

The component of a capacitor voltage transformer, connected between the intermediate terminal and the earth terminal of the capacitor divider (or possibly directly connected to earth when a carrier-frequency coupling device is used) which supplies the secondary voltage.

Note. — An electromagnetic unit essentially comprises a transformer to reduce the intermediate voltage to the required value of secondary voltage, and an inductive reactance, approximately equal, at rated frequency to the capacitive reactance of the two parts of the divider connected in parallel ($C_1 + C_2$). The inductive reactance may be incorporated wholly or partially in the transformer.

40.6 *Intermediate voltage*

The voltage to earth at the intermediate voltage terminal of the capacitor divider unit when primary voltage is applied between the primary and earth terminals.

40.7 *Voltage ratio (of a capacitor divider)*

Ratio between the sum of the capacitances of the high-voltage and intermediate voltage capacitors and the capacitance of the high-voltage capacitor:

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Notes 1. — C_1 and C_2 include the stray capacitances, which are generally negligible.

2. — This ratio corresponds also to the ratio of the primary voltage to the open-circuit intermediate voltage.

40.8 *Open-circuit intermediate voltage*

Voltage across the intermediate voltage capacitor when a voltage is applied between the high-voltage and low-voltage terminals, no impedance being connected in parallel with the intermediate voltage capacitor.

Note. — This voltage is equal to the applied voltage (primary voltage) divided by the voltage ratio.

40.9 *Rated open-circuit intermediate voltage*

Voltage across the intermediate voltage capacitor when the rated voltage is applied between the high-voltage and low-voltage terminals and both the high-voltage and the intermediate-voltage capacitors have the capacitance values for which they have been designed.

40.10 *Reference range of frequency*

The range of frequency values within which a capacitor voltage transformer complies with the relevant accuracy requirements.

40.11 *Reference range of temperature*

The range of ambient temperature values within which a capacitor voltage transformer complies with the relevant accuracy requirements (see Note 2 of Clause 44).

40.12 *Protective device*

A device incorporated in a capacitor voltage transformer for the purpose of limiting over-voltages which may appear across one or more of its components and/or to prevent sustained ferro-resonance.

Note. — The device may include a spark gap and may be located in several different ways according to its nature.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40.13 *Carrier-frequency coupling device*

A circuit element intended to permit the injection of carrier frequency and which is connected between the earth terminal of a capacitor divider unit and earth, having an impedance which is insignificant at power frequency, but appreciable at the carrier frequency.

SECTION NINETEEN — RATING AND PERFORMANCE REQUIREMENTS

41. Standard reference range of frequency

The standard reference range of frequency shall be from 99% to 101% of the rated frequency for accuracy classes for measurement, and from 96% to 102% for accuracy classes for protection.

42. Standard values of rated output

The standard values of rated output are those specified in Clause 6.

Note. — Attention is drawn to the fact that the load taken by a resistor or reactor permanently connected to the secondary terminals and forming an integral part of the electromagnetic unit is not considered to be part of the rated output.

SECTION TWENTY — ACCURACY REQUIREMENTS

43. Standard accuracy classes

The standard accuracy classes for capacitor voltage transformers are:

- for measurement: 0.2; 0.5; 1.0; 3.0;
- for protection: 3P and 6P.

(See also Chapters II and III.)

44. Limits of voltage error and phase displacement

The voltage error and phase displacement shall not exceed the values given in Clauses 25 and 31 for the appropriate accuracy class, under the conditions specified therein, and also for any value of temperature and frequency within the reference ranges (see Sub-clause 3.1 and Clause 41 above).

Notes 1. — For capacitor voltage transformers with electromagnetic units having two separate secondary windings, reference should be made to the note to Clause 25 or Clause 31.

- 2. — Whatever the ambient temperature may be within its reference range, it is necessary for the test to be carried out in steady temperature conditions.

SECTION TWENTY-ONE — EFFECTS OF TRANSIENTS

45. Ferro-resonance

- a) When a capacitor voltage transformer, supplied at 120% of rated voltage and with a substantially zero burden, has its secondary terminals short-circuited and the short circuit suddenly removed, the peak of the secondary voltage shall revert to a value which does not differ from its normal value by more than 10% after ten cycles of rated frequency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- b) When a capacitor voltage transformer, supplied at a voltage corresponding to its rated voltage factor and with a substantially zero burden, has its secondary terminals short-circuited and the short circuit suddenly removed, ferro-resonance shall not be sustained for more than 2 s.

46. Transient response

Following a short circuit of the supply between the high-voltage terminal and the low-voltage terminal connected to earth, the secondary output voltage of a capacitor voltage transformer shall decay, within one cycle of rated frequency, to a value of less than 10% of the peak value before short circuit.

Note. — The influence of the transient response on the behaviour of the network protection is a very complex matter and it is not possible to give values valid for all cases. The influence on the relay is not only dependent on the amplitude, but also on the frequency of the transient. The given value permits correct behaviour of the usual, electromechanical protection relay for usual line length and short-circuit currents. For high speed relay (e.g. solid state relay) or very short lines, or low short-circuit current, the transient response should be part of an agreement between user and manufacturer of the network protection relay and the capacitor voltage transformer.

SECTION TWENTY-TWO — COUPLING DEVICE

47. Carrier-frequency coupling device

When a carrier-frequency coupling device is connected by the manufacturer into the earth lead of the intermediate-voltage capacitor, the accuracy of the capacitor voltage transformer shall remain within the specified class.

SECTION TWENTY-THREE — TESTS

48. General

The type and routine tests on capacitor voltage transformers are essentially the same as those specified in Chapters I, II and III, with the exceptions given below. Type tests shall be made in accordance with Clauses 49, 50, 51, 52 and 53, and routine tests in accordance with Clauses 54 and 55.

The tests specified in Clauses 51, 52, 53 and 55 are direct tests on the capacitor voltage transformer (Figure A1, Appendix A) or tests on the equivalent circuit (Figure A2, Appendix A) as specified under the various clauses.

The main condition allowing tests on the equivalent circuit is given in Appendix B.

All tests shall be performed with the actual electromagnetic unit and not with a model. On the contrary, a specially made equivalent capacitance with the capacitance value of $C_1 \div C_2$ may be used in the place of the capacitor divider.

The circuit used for each test shall be indicated on the test report.

Note. — The capacitors should be tested in accordance with IEC Publication 358, as far as possible, taking into account any other duty that the capacitors may have to perform in addition to their operation as the voltage divider of the capacitor voltage transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ IEC ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECTION TWENTY-FOUR — TYPE TESTS

49. Temperature-rise test

A temperature-rise test shall be made in accordance with Clause 11 and may be performed on the electromagnetic unit alone.

50. Impulse test

An impulse test shall be performed, preferably on a complete capacitor voltage transformer, in accordance with Clause 13 but using a 1.2 to 5/40 to 60 μ s impulse, or the capacitor voltage divider may be tested in accordance with IEC Publication 358, and the electromagnetic unit given a separate impulse test, in accordance with the specification of Clause 13, deviating only by the value of test voltage which shall be reduced in accordance with the voltage ratio of the capacitor divider unit.

Note. — If a protective gap across the electromagnetic unit is incorporated, it should be prevented from functioning during the tests. Any protective gap across the carrier-current coupling device should be short-circuited during the tests.

51. Ferro-resonance tests

The following tests shall be made on a complete capacitor voltage transformer — or on the equivalent circuit, provided that the relation given in Appendix B are fulfilled — to prove compliance with Clause 45.

The tests shall be made by short-circuiting the secondary terminals for at least 0.1 s, the short circuit being opened by a protective device (e.g. fuse, circuit-breaker, etc.) chosen for this purpose by agreement between manufacturer and user. If no agreement has been made, the choice is left to the manufacturer. The burden of the capacitor voltage transformer after the short circuit has cleared shall be only that imposed by the recording equipment and shall not exceed 5 VA. The voltage of the power source (at the high-voltage terminal), the secondary voltage and the short-circuit current during the test shall be recorded. Oscillograms shall be part of the test report.

During the short circuit, the voltage of the power source shall not differ by more than 10% from the voltage before short circuit and it shall remain substantially sinusoidal. The voltage drop over the short-circuit loop (contact resistance of the closed contactor included), measured directly at the secondary terminals of the capacitor voltage transformer, shall be less than 10% of the voltage at the same terminals before the short circuit.

a) The test shall be made a minimum of thirty times at 120% of rated primary voltage.

b) The test shall be repeated ten times at a primary voltage corresponding to the appropriate voltage factor.

Notes 1. — If it is known that a saturable burden will be used in service, agreement should be made between user and manufacturer regarding the tests to be made at or near that burden.

2. — In order to ensure that the voltage of the power source does not differ, during the short circuit, by more than 10% from the voltage before short circuit, the short-circuit impedance of the supply circuit should be low. If the test is performed on a complete capacitor voltage transformer, this condition is generally fulfilled because of the relatively high current of the capacitor divider. On the contrary, should the equivalent circuit be employed, a much lower impedance source than that which would be suitable for accuracy measurement only is necessary.

52. Transient response test

The test to prove compliance with Clause 46 shall be made on a complete capacitor voltage transformer — or on the equivalent circuit, provided that the relation given in Appendix B are fulfilled — by short-circuiting the high-voltage and earthed low-voltage terminals while the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

capacitor voltage transformer is operating at rated primary voltage at 25% and 100% of rated burden. The burden shall be one of the two following possibilities:

- a) series burden composed of a pure resistance and an inductive reactance connected in series;
- b) series-parallel burden composed of two impedances connected in parallel, one impedance being a pure resistance and the other one having a power factor of 0.5.

The circuit diagrams and the values of the components of both burdens are given in Appendix C.

If no agreement has been made, the choice between the burdens of Item a) or b) is left to the manufacturer.

The collapse of the secondary voltage shall be recorded on an oscillograph. Oscillograms shall be part of the test report.

The test shall be made either ten times at random, or twice at the peak of the primary voltage and twice at the zero passage of primary voltage. In the last case, the phase angle of the primary voltage shall not differ from more than $\pm 20^\circ$ of the peak and zero passage.

53. Tests for accuracy

The tests shall be made at rated frequency, at room temperature and at both extreme temperatures on a complete capacitor voltage transformer or on the equivalent circuit for class 1 and above. For classes 0.5 and 0.2, the use of the equivalent circuit, or a calculation of the influence of temperature shall be agreed upon between user and manufacturer.

Note. — Tests at extreme temperatures on a complete capacitor voltage transformer are more severe than tests on the equivalent circuit or than a calculation of the temperature influence, but are very difficult to perform and expensive. Tests on a complete capacitor voltage transformer also give the best possible indication concerning the measuring errors which may appear in service because of the changes in ambient temperature.

If the equivalent circuit is used, two measurements under identical conditions of voltage, burden, frequency and temperature — within the standard reference range — have to be carried out once on the complete apparatus and once with the equivalent circuit.

The difference between the results of these two measurements must not exceed 50% of the accuracy class (for instance 0.25% and 10 min for accuracy class 0.5) and must, of course, be taken into account in determining the errors of the complete capacitor voltage transformer at the limits of temperature and frequency.

Provided the temperature characteristics of the capacitor divider are known over the reference range of temperature, the errors at extreme values of temperature may be determined by calculations based on the measured results at one temperature and the temperature coefficient of the capacitor divider. Alternatively, a measurement at room temperature only may be performed on the equivalent circuit if the equivalent capacitance — e.g. a capacitor made especially for this purpose — is adapted to the capacitance values corresponding to the temperature extreme values, taking into account the temperature coefficient of the actual capacitor divider.

Tests at a constant value of temperature shall be made at the extreme values of frequency.

The actual values of test frequency and test temperature shall be part of the test report.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ IEC ไม่สามารถทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต เว้นแต่จะได้รับการอนุญาตจาก IEC
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Notes 1. — Measurement of the capacitance and of the temperature coefficient of the capacitors is part of the requirements of IEC Publication 358.

2. — The tests show the influence of burden, voltage and frequency as well as of temperature on the equivalent capacitance $C_1 + C_2$. Attention should be paid to the fact that the temperature effect on the inductive reactance and on the winding resistances of the electromagnetic unit can be determined only if the actual electromagnetic unit is subjected to the extreme temperatures. As a supplementary indication concerning changes in the capacitor divider ratio caused by temperature, it is recommended to measure the voltage errors and phase displacements before and immediately after — or during — the temperature-rise test of Clause 49 performed as a direct test on the capacitor voltage transformer. In this case, the measurement as well as the temperature-rise test cannot be performed on the equivalent circuit or on the electromagnetic unit alone.
3. — Present-day service experience has shown that capacitor voltage transformers may be used satisfactorily in the accuracy class 0.5. Unfortunately it is at present not possible to recommend tests resulting in satisfactory conclusions concerning the amount of influence of sudden changes in temperature, of particular weather conditions, of stray capacitances and of leakage currents on the voltage errors and phase displacements. These influences can be evaluated only by theoretical considerations.

SECTION TWENTY-FIVE — ROUTINE TESTS

54. Power-frequency tests

54.1 Capacitor voltage divider

Tests on the capacitor voltage divider shall be made in accordance with IEC Publication 358.

54.2 Low-voltage terminal of the capacitor voltage divider

Capacitor dividers with a low-voltage terminal shall be subjected for 1 min to a test voltage between the low-voltage and earth terminals.

The test voltage shall be an a.c. voltage of 10 kV (r.m.s. value).

If the low-voltage terminal is not exposed to the weather or if a carrier-frequency coupling device with overvoltage protection is part of the capacitor voltage transformer, a lower value of test voltage (e.g. 4 kV) may be agreed upon between manufacturer and user.

54.3 Electromagnetic unit

For this test, the electromagnetic unit may be disconnected from the capacitor divider.

The test voltage may be either applied between the intermediate-voltage terminal and earth or, alternatively, induced from the secondary winding. In either case, it shall have a value equal to the test voltage for the whole of the capacitor voltage divider, divided by its voltage ratio.

The frequency may be increased to prevent excessive magnetizing current and the test shall be applied for a time in accordance with Sub-clause 16.1.

Note. — If a protective gap across the electromagnetic unit is incorporated, it should be prevented from functioning during the tests. Any protective gap across the carrier current coupling device should be short-circuited during the tests.

55. Tests for accuracy

Tests for accuracy shall be made on the complete capacitor voltage transformer or on the equivalent circuit at one value of frequency within the standard reference range of frequency and at one value of temperature within the standard reference range of temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The actual values of test frequency and test temperature shall be part of the test report.

Note. — Tests on the equivalent circuit are generally less accurate than tests on the complete circuit.

Routine tests at a reduced number of voltages and/or burdens are permissible provided it has been shown by type test on a similar capacitor voltage transformer that such a reduced number of tests is sufficient to prove compliance with the accuracy requirements.

Tests on the equivalent circuit can be performed if:

- a) the type test according to Clause 53 has shown that the difference between the measured values on the complete circuit and the equivalent circuit is smaller than 20% of the accuracy class, for example smaller than 0.2% and 8 min for accuracy class 1;
- b) the inaccuracy in the determination of the capacitor divider ratio, for example by measurement of each capacitance separately (capacitances of each unit and of the intermediate-voltage capacitor C_2 , is smaller than 20% of the accuracy class, for example smaller than 0.2% for accuracy class 1;
- c) the type test according to Clause 53 has shown that the limits of error of the accuracy class will not be surpassed as a combined effect of the burden, frequency, temperature and inaccuracy mentioned under Items a) and b).

For more details concerning the use of the equivalent circuit, see Appendix D.

SECTION TWENTY-SIX — MARKING

56. Marking of the rating plate of a capacitor voltage transformer

The capacitor voltage transformer (or the electromagnetic unit, if separate) shall carry the following additional information on the rating plate:

- a) the words "capacitor voltage transformer" or a similar reference;
- b) rated capacitance between high-voltage and low-voltage terminals;
- c) identification numbers of the capacitor units belonging to the capacitor voltage transformer (in the case where the capacitor stack is composed of more than one unit);
- d) only in the cases where an intermediate terminal is still accessible when the capacitor voltage transformer is completely assembled:

$$C_N = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

- rated open-circuit intermediate voltage, in volts or kilovolts;
- the measured voltage ratio.

An example of a typical rating plate is given in Figure 11, page 79.

The capacitor divider unit shall carry markings in accordance with IEC Publication 358.

Note. — The above-mentioned information may be indicated on two rating plates, one for the magnetic part and one for the capacitive part.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

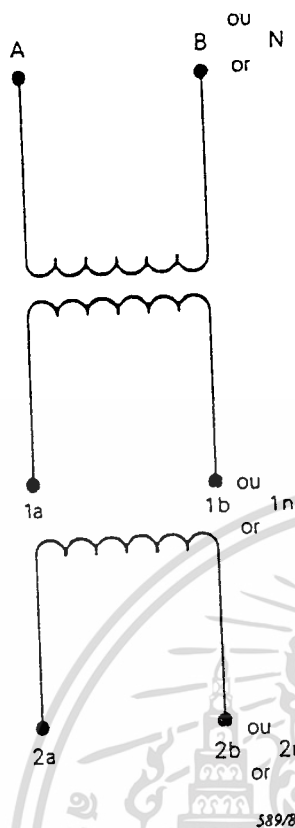


FIG. 4. — Transformateur monophasé avec deux circuits secondaires.
Single-phase transformer with two secondaries.

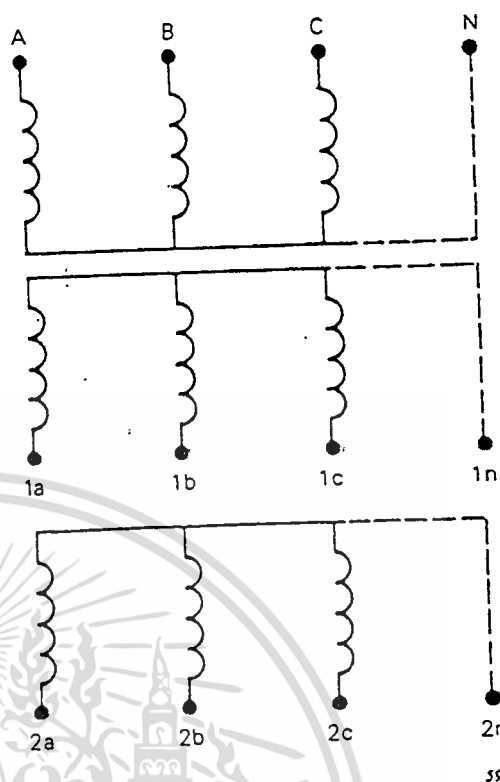


FIG. 5. — Ensemble triphasé avec deux circuits secondaires.
Three-phase assembly with two secondaries.

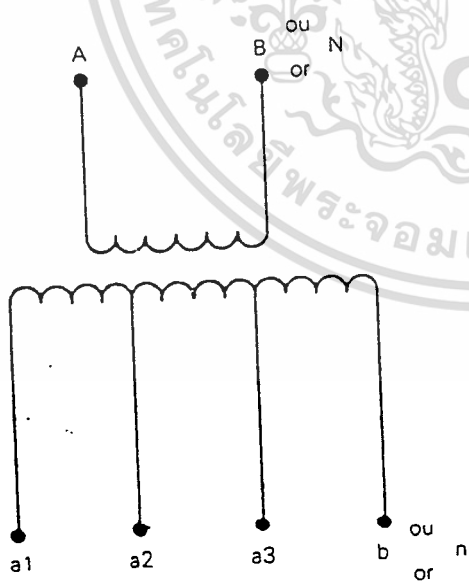


FIG. 6. — Transformateur monophasé avec un circuit secondaire à prises multiples.
Single-phase transformer with one multi-tap secondary.

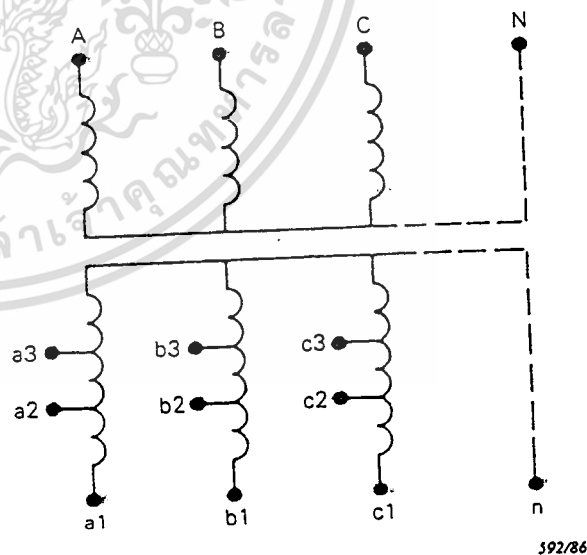


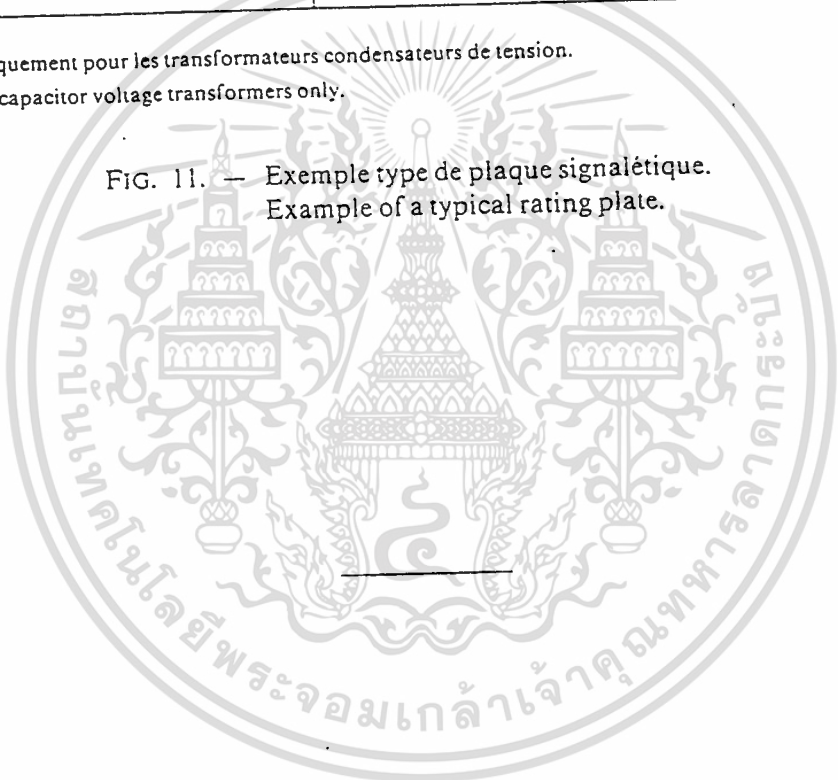
FIG. 7. — Ensemble triphasé avec un circuit secondaire à prises multiples.
Three-phase assembly with one multi-tap secondary.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transformateur de tension ou transformateur condensateur de tension Voltage transformer or capacitor voltage transformer		A — N 220 000 : $\sqrt{3}$ V			
Constructeur Manufacturer		1a — 1n		(2a — 2n)	da — dn
N°/No. 67/		110 : $\sqrt{3}$			110 : 3
Type	50 Hz	VA : 25	50		25
245/460/1 050 kV	1,9 U _n 30 s	CI : 0,5	3P		6P
* C ₁ μ F N° de série: Serial No.:		* C ₂ μ F N° de série: Serial No.:			

* Uniquement pour les transformateurs condensateurs de tension.
For capacitor voltage transformers only.

FIG. 11. — Exemple type de plaque signalétique.
Example of a typical rating plate.



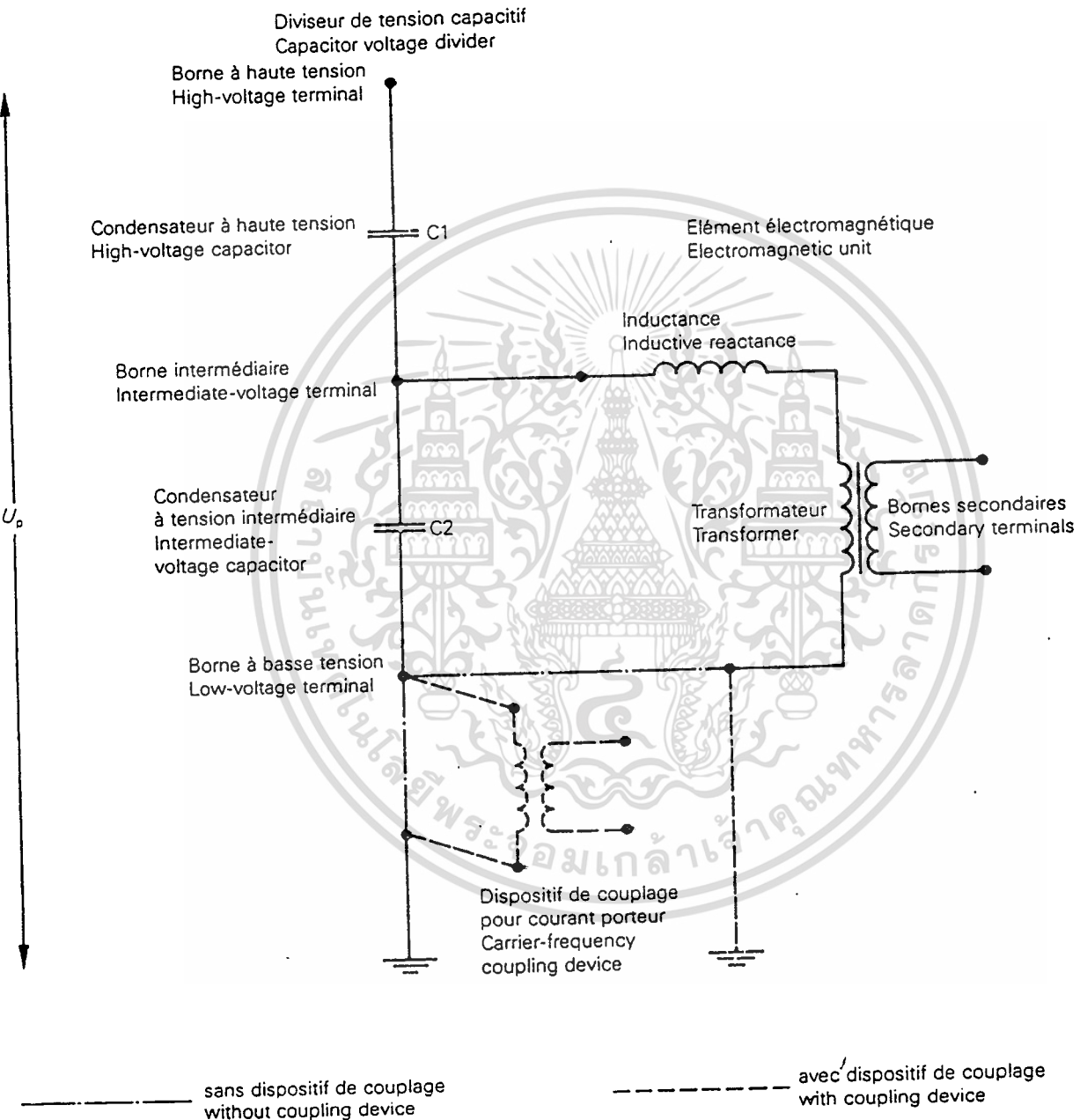
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANNEXE A

APPENDIX A

SCHÉMA TYPE ET SCHÉMA
DU CIRCUIT ÉQUIVALENT
D'UN TRANSFORMATEUR
CONDENSATEUR DE TENSION

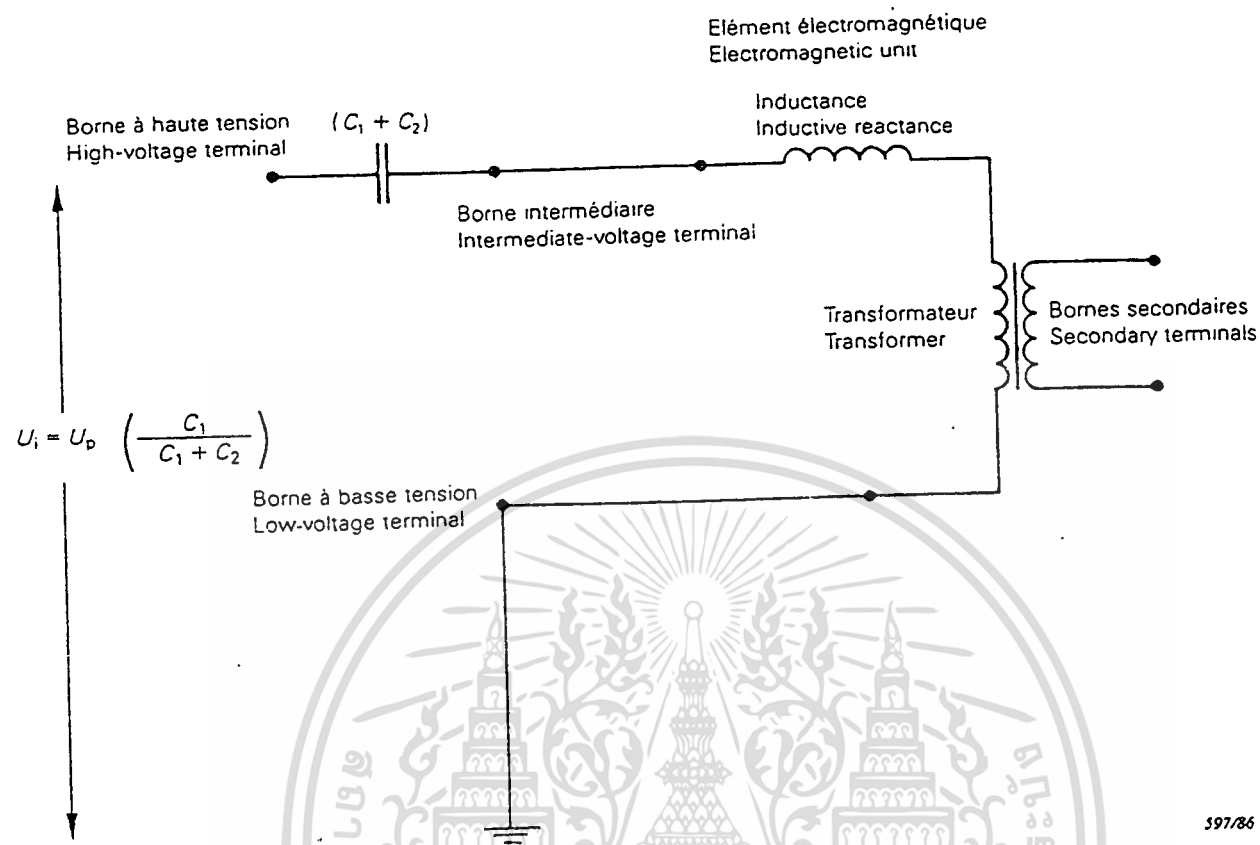
TYPICAL AND EQUIVALENT
DIAGRAMS
FOR A CAPACITOR VOLTAGE
TRANSFORMER



596/86

FIG. A1. — Schéma type d'un transformateur condensateur de tension.
Typical diagram for a capacitor voltage transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



597/86

FIG. A2. — Schéma du circuit équivalent d'un transformateur condensateur de tension.
Diagram of equivalent circuit for a capacitor voltage transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX B

MAIN CONDITION ALLOWING TESTS ON THE EQUIVALENT CIRCUIT

The main condition allowing tests on the equivalent circuit according to Figure A2, Appendix A, is that the relations:

$$L_1 \times C_1 = L_2 \times C_2$$

and

$$R_1 \times C_1 = R_2 \times C_2$$

are fulfilled for the capacitor dividers.

In these relations, C_1 , L_1 and R_1 are, respectively, the capacitance, the series inductance and the series loss resistance of the high-voltage capacitor C_1 . C_2 , L_2 and R_2 are the corresponding values of the intermediate voltage capacitor C_2 .

These relations involve the necessity that the capacitors C_1 and C_2 of the divider are of the same construction and have values of the dielectric dissipation factor which do not differ from each other by more than $3 \cdot 10^{-4}$.

The relations regarding the series inductances has no practical influence on most capacitor dividers having a natural frequency of 100 kHz or more.

If an additional resistance is connected in series with one of the capacitors C_1 or C_2 , tests on the equivalent circuit do not give results truly representative of direct tests and, in this case, the equivalent circuit should be used with precaution.

APPENDIX C

BURDENS FOR THE TRANSIENT RESPONSE TEST

The circuit diagrams of the two possible burdens are given in Figure C1 and the corresponding values of their components in Table C1.

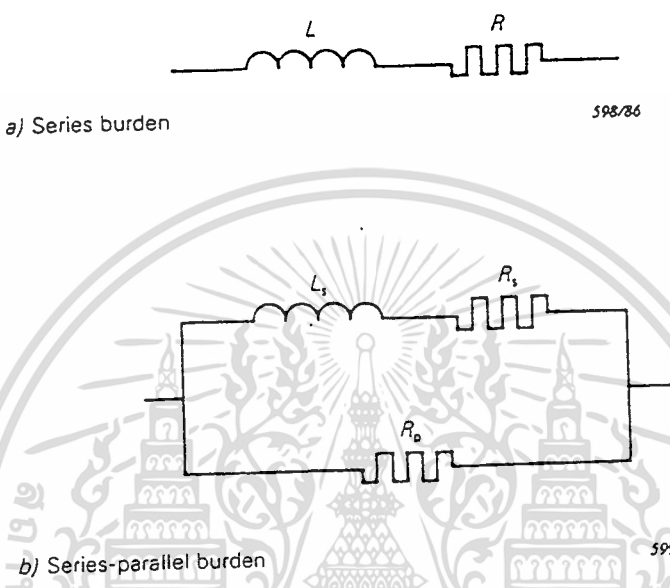


FIG. C1. — Circuit diagram of the burden for the transient response test.

TABLE C1

Impedance values of the pure series and of the series-parallel burden for the transient response test

	Burden a) (pure series)		Burden b) (series-parallel)		
	R	ωL	R_p	R_s	ωL_s
100% of S_n	0.8 $ Z_n $	0.6 $ Z_n $	2.2 $ Z_n $	0.72 $ Z_n $	1.25 $ Z_n $
25% of S_n	3.2 $ Z_n $	2.4 $ Z_n $	8.8 $ Z_n $	2.88 $ Z_n $	5 $ Z_n $

where:
 S_n = rated burden in voltamperes
 U_n = secondary voltage in volts, such that

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n}, \quad |Z_n| \text{ in ohms}$$

- Notes 1. — The total burden given by these values has a power factor of 0.8.
2. — The inductive reactance should be a linear one, e.g. air-core type. The series resistance is composed of the equivalent series resistance of the inductive reactance (resistance of the winding plus equivalent series resistance of the iron losses) and of a separate resistance.
3. — The error of the burden should be less than $\pm 5\%$ for Z_n and smaller than ± 0.03 for the power factor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX D

USE OF THE EQUIVALENT CIRCUIT FOR THE ROUTINE TESTS
FOR ACCURACY

In the present state of technology, the equivalent circuit may be used for the routine tests for accuracy without difficulties up to class 1. For higher accuracy classes, the equivalent circuit may be used after agreement between manufacturer and user.

The error introduced by the equivalent circuit test is a cumulative effect of the following factors:

- a) Determination of the capacitor divider ratio (main cause of error), the errors being particularly caused by:

- inaccuracy of the measurement, for example of each capacitance separately;
- influence of stray capacitances.

Note. — This influence may be reduced provided that capacitance values of C_1 and C_2 are measured on an erected capacitor divider and not on each capacitor unit separately.

- b) Determination of the equivalent capacitance, as the sum of the measured capacitance of C_1 and C_2 and of the specially made equivalent capacitance, if used.

Notes 1. — Present-day technology for capacitance measurement gives such accuracy for the equivalent capacitance that it will add only small errors (about 1 min).

2. — The use of an actual capacitor divider in the equivalent circuit may introduce errors due to the stray capacitance because of the supplementary connexions.

- c) Differences between the tangent of the loss angles of the capacitances C_1 and C_2 and the specially made equivalent capacitance, if used.

Note. — A difference of the tangent of the loss angles of the capacitances C_1 and C_2 of less than $3 \cdot 10^{-4}$ has negligible influence.

- d) Variation of the capacitances and of the dielectric dissipation factors in C_1 and C_2 due to voltage changes, especially because the voltage across the equivalent capacitance is much smaller than the normal voltages across C_2 and especially C_1 .

Note. — A specially made equivalent capacitance connected in the equivalent circuit operates within a small voltage range and has only small variations of capacitance and losses due to the applied voltage. These variations have therefore negligible influence on the measured errors of the capacitor voltage transformer. The equivalent capacitance should always be exactly adjusted to the measured value of C_1 and C_2 in order to avoid the introduction of new errors according to item b) above.

Publications de la CIEI préparées
par le Comité d'Etudes n° 38

IEC publications prepared
by Technical Committee No. 38

44: — Transformateurs de mesure

- 44-3 (1980) Troisième partie: Transformateurs combinés.
44-4 (1980) Quatrième partie: Mesure des décharges partielles.
44-6 (1992) Partie 6: Prescriptions concernant les transformateurs de courant pour protection pour la réponse en régime transitoire.
185 (1987) Transformateurs de courant.
Modification n° 1 (1990).
Amendement 2 (1995).
186 (1987) Transformateurs de tension.
Modification n° 1 (1988).
Amendement 2 (1995).

44: — Instrument transformers

- 44-3 (1980) Part 3: Combined transformers.
44-4 (1980) Part 4: Measurement of partial discharges.
44-6 (1992) Requirements for protective current transformers for transient performance.
185 (1987) Current transformers.
Amendment No. 1 (1990).
Amendment 2 (1995).
186 (1987) Voltage transformers.
Amendment No. 1 (1988).
Amendment 2 (1995).



Reserve

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Modification

n° 1

Décembre 1988
à la

Publication 186
1987

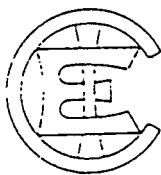
Amendment

No. 1

December 1988
to

Transformateurs de tension

Voltage transformers



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสำนักงานมาตรฐานทางเทคนิคแห่งชาติ
Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
3, rue de Varembé
Genève, Suisse

PREFACE

This amendment has been prepared by IEC Technical Committee No. 38: Instrument transformers.

The text of this amendment is based on the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting
38(C0)77	38(C0)79

Full information on the voting for the approval of this amendment can be found in the Voting Report indicated in the above table.

Page 13

4. Definitions

On page 15, replace the existing text of Sub-clause 4.17 by the following:

4.17 Output

4.17.1 Rated output

The value of the apparent power (in voltamperes at a specified power factor) which the transformer is intended to supply to the secondary circuit at the rated secondary voltage and with rated burden connected to it (321-01-27 modified).

4.17.2 Thermal limiting output

The value of the apparent power referred to rated voltage which can be taken from a secondary winding, at rated primary voltage applied, without exceeding the limits of temperature rise of Clause 8.

Notes 1.- In this condition the limits of error may be exceeded.

2.- In the case of more than one secondary winding, the thermal limiting output is to be given separately.

3.- The simultaneous use of more than one secondary winding is not admitted unless there is an agreement between manufacturer and purchaser.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Page 21

8. Limits of temperature rise

After the first paragraph of Item a), add the following:

If a thermal limiting output is specified, the transformer shall be tested at rated primary voltage, at a burden corresponding to the thermal limiting output at a unity power factor without loading the residual voltage winding.

If a thermal limiting output is specified for one or more secondary windings, the transformer shall be tested separately with each of these windings connected, one at a time, to a burden corresponding to the relevant thermal limiting output at a unity power factor.

Page 35

11. Temperature-rise test

Add the following sentence to the second paragraph:

The residual voltage winding shall be loaded in accordance with Sub-clause 35.1 or Clause 8.

Page 51

25. Limits of voltage error and phase displacement

On page 53, replace the last sentence of the note by the following:

If one of the windings is loaded only occasionally for short periods or only used as a residual voltage winding, its effect upon other windings may be neglected.

Page 55

29. Definitions

Replace the existing text of Sub-clause 29.2 by the following:

29.2 Residual voltage winding

The winding of a single-phase voltage transformer intended, in a set of three single-phase transformers, for connection in broken delta for the purpose of:

- a) producing a residual voltage under earth-fault conditions;
- b) damping of relaxation oscillations (ferro-resonances).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Page 59

33. Rated output

Replace the existing text of this clause by the following:

33. Output

33.1 Rated output

The rated output of windings intended to be connected in broken delta with similar windings to produce a residual voltage shall be specified in voltamperes and the value shall be chosen from the values specified in Clause 6.

33.2 Rated thermal limiting output

The rated thermal limiting output of the residual voltage winding shall be specified in voltamperes; the value shall be 15, 25, 50, 75, 100 VA and their decimal multiples, related to the rated secondary voltage with unity power factor. The values underlined should be preferred.

Note.- Since the residual voltage windings are connected in a broken delta, these windings are only loaded under fault conditions.

Deviating from the definition in Sub-clause 4.17.2, the rated thermal output of the residual voltage winding should be referred to a duration of 8 h.

34. Accuracy class

Replace the existing text of this clause by the following:

The accuracy class for a residual voltage winding shall be 6P as defined in Sub-clause 30.1 and Clause 31.

Notes 1.- If a residual voltage winding is used for special purposes, another standard accuracy class in accordance with Sub-clauses 24.1 and 30.1 and Clauses 25 and 31 can be agreed between manufacturer and purchaser.

2.- If the residual voltage winding is used only for damping purposes, an accuracy class designation is not mandatory.

SECTION SIXTEEN - TEXTS FOR ACCURACY

Replace the existing section by the following:

SECTION SIXTEEN - ADDITIONAL TESTS FOR SINGLE-PHASE PROTECTIVE VOLTAGE TRANSFORMERS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35. Type tests

35.1 *Temperature rise test*

If one of the secondary windings is used as a residual voltage winding, a test shall be made in accordance with Clause 11, starting with the test in accordance with Clause 8a) at 1.2 times the rated primary voltage and directly followed by the test in accordance with Clause 8c).

During the preconditioning test with 1.2 times the rated primary voltage, the residual voltage winding is unloaded. During the test, at 1.9 times the rated primary voltage for 8 h, the residual voltage winding shall be loaded with the burden corresponding to the rated thermal limiting output (see Sub-clause 33.2), while the other windings are loaded with the rated burden.

If for other secondary windings a thermal limiting output is specified, an additional test shall be made in accordance with Item a) of Clause 8 at rated primary voltage without loading the residual voltage winding.

Note. - The voltage measurement has to be performed on the primary winding, as the actual secondary voltage may be appreciably smaller than the rated secondary voltage multiplied by the voltage factor.

35.2 *Tests for accuracy*

To prove compliance with Clause 31, type tests shall be made at 2%, 5% and 100% rated voltage and at rated voltage multiplied by the rated voltage factor: at 25% and 100% of rated burden at a power factor of 0.8 lagging.

When the transformer has several secondary windings, they are to be loaded as stated in the note to Clause 31.

A residual voltage winding is unloaded during the tests with voltages up to 100% rated voltage and loaded with rated burden during the test with a voltage equal to rated voltage multiplied by the rated voltage factor.

36. Routine tests

36.1 *Tests for accuracy*

The routine tests for accuracy are in principle the same as the type tests in Clause 35, but routine tests at a reduced number of voltages and/or burdens are permissible, provided it has been shown by type tests on a similar transformer that such a reduced number of tests is sufficient to prove compliance with Clause 31.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CEI
IEC
186

AMENDMENT 2
AMENDMENT 2

Amendement 2

Transformateurs de tension

Amendment 2

Voltage transformers

© CEI 1995 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Comimission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRX
PRICE CODE S

For price, see current catalogue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
 ...
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FOREWORD

This amendment has been prepared by IEC technical committee 38: Instrument transformers.

The text of this amendment is based on the following documents:

DIS	Report on voting
38/148/DIS	38/157/RVD

Full information on the voting for the approval of this amendment can be found in the report on voting indicated in the above table.

Page 3

CONTENTS

Replace the titles of clauses 16, 17 and 18 by the following new titles:

- 16 Power frequency withstand tests on primary windings and partial discharge measurement
- 17 Power frequency withstand tests between sections and on secondary windings
- 18 Chopped impulse test on primary winding

Add the titles of new clauses 9 ter, 18 bis and 18 ter as follows:

- 9 ter Mechanical requirements
- 18 bis Measurement of capacitance and dielectric dissipation factor
- 18 ter Mechanical tests

Page 9

Insert, in the existing list of IEC publications the titles of the following standards:

- IEC 71-1: 1993, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules
- IEC 270: 1981, Partial discharge measurements (second edition)
- IEC 815: 1986, Guide for the selectic of insulators in respect of polluted conditions

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9 Insulation requirements

Replace existing subclauses 9.1 to 9.5 by the following:

These requirements apply to all types of inductive voltage transformers. For gas insulated voltage transformers supplementary requirements may be necessary (under consideration).

9.1 Rated insulation levels for primary windings

The rated insulation level of a primary winding of an inductive voltage transformer shall be based on its highest voltage for equipment U_m .

9.1.1 For windings having $U_m = 0,72$ or $1,2$ kV, the rated insulation level is determined by the rated power-frequency withstand voltage, according to table 3A.

9.1.2 For windings having $U_m = 3,6$ kV and greater but less than 300 kV, the rated insulation level is determined by the rated lightning impulse and power-frequency withstand voltages and shall be chosen in accordance with table 3A.

For the choice between the alternative levels for the same values of U_m , see IEC 71.

9.1.3 For windings having $U_m \geq 300$ kV, the rated insulation level is determined by the rated switching and lightning impulse withstand voltages and shall be chosen in accordance with table 3B.

For the choice between the alternative levels for the same values of U_m , see IEC 71.

Table 3A – Rated insulation levels for transformer primary windings having highest voltage for equipment $U_m < 300$ kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.) kV	Rated power frequency withstand voltage (r.m.s.) kV	Rated lightning-impulse withstand voltage (peak) kV
0,72	3	-
1,2	6	-
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75
17,5	38	75 95
24	50	95 125
36	70	145 170
52	95	250
72,5	140	325
100	185	450
123	185 230	450 550
145	230 275	550 650
170	275 325	650 750
245	395 460	950 1 050
NOTE – For exposed installations, it is recommended to choose the highest insulation levels.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3B – Rated insulation levels for transformer primary windings having highest voltage for equipment $U_m \geq 300$ kV

Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.) kV	Rated switching impulse withstand voltage (peak) kV	Rated lightning impulse withstand voltage (peak) kV
300	750	950
	850	1 050
362	850	1 050
	950	1 175
420	1 050	1 300
	1 050	1 425
525	1 050	1 425
	1 175	1 550
765	1 425	1 950
	1 550	2 100
NOTES 1 For exposed installation it is recommended to choose the highest insulation levels. 2 As the test voltage levels for $U_m = 765$ kV have not as yet been finally settled, some interchange between switching and lightning impulse test levels may become necessary.		

Table 3C – Power frequency withstand voltages for transformer primary windings having highest voltage for equipment $U_m \geq 300$ kV

Rated lightning impulse withstand voltage (peak) kV	Rated power frequency withstand voltage (r.m.s.) kV
950	395
1 050	460
1 175	510
1 300	570
1 425	630
1 550	680
1 950	880
2 100	975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 Other requirements for primary winding insulation

9.2.1 Power frequency withstand voltage

Windings having highest voltage for equipment $U_m \geq 300$ kV shall withstand the power frequency withstand voltage corresponding to the selected lightning impulse withstand voltage according to table 3C.

9.2.2 Power frequency withstand voltage for the earthed terminal

The terminal of the primary winding intended to be earthed shall, when insulated from the case or frame, be capable of withstanding the rated power frequency short-duration withstand voltage of 3 kV (r.m.s.).

9.2.3 Partial discharges

Partial discharges requirements are applicable to inductive voltage transformers having U_m greater than or equal to 7.2 kV.

The partial discharge level shall not exceed the limits specified in table 3D, at the partial discharge test voltage specified in the same table, after a prestressing performed according to the procedures of 16.4.

9.2.4 Chopped lightning impulse

If additionally specified, the primary winding shall also be capable of withstanding a chopped lightning impulse voltage having a peak value of 115 % of the full lightning impulse voltage.

NOTE – Lower values of test voltage may be agreed between manufacturer and purchaser

Table 3D – Partial discharge test voltages and permissible levels

Type of earthing of the system	Connections of the primary winding	PD test voltage (r.m.s.) kV	Permissible PD level pC	
			Type of insulation	
			Immersed in liquid	Solid
Earthed neutral system (earthing factor $\leq 1,5$)	Phase-to-earth	U_m	10	50
		$1,2 U_m/\sqrt{3}$	5	20
	Phase-to-phase	$1,2 U_m$	5	20
Isolated or non-effectively earthed neutral system (earthing factor $> 1,5$)	Phase-to-earth	$1,2 U_m$	10	50
		$1,2 U_m/\sqrt{3}$	5	20
	Phase-to-phase	$1,2 U_m$	5	20
NOTES 1 If the neutral system is not defined, the values given for isolated or non-effectively earthed systems are valid. 2 The permissible PD level is also valid for frequencies different from rated frequency. 3 When the rated voltage of a voltage transformer is considerably lower than its declared highest system voltage U_m , lower prestress voltages and measuring voltages may be agreed between manufacturer and purchaser.				

9.2.5 Capacitance and dielectric dissipation factor

These requirements apply only to transformers with liquid immersed primary winding insulation having $U_m \geq 72,5$ kV.

The values of capacitance and dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) shall be referred at the rated frequency and at a voltage level in the range from 10 kV to $U_m/\sqrt{3}$.

NOTES

- 1 The purpose is to check the uniformity of production. Limits for the permissible variations may be the subject of an agreement between manufacturer and purchaser.
- 2 The dielectric dissipation factor is dependent on the insulation design and on both voltage and temperature. Its value at $U_m/\sqrt{3}$ and ambient temperature normally does not exceed 0,005.
- 3 For some types of voltage transformer designs the interpretation of the results may be difficult to assess.

9.3 Between-section insulation requirements

For secondary windings divided into two or more sections, the rated power frequency withstand voltage of the insulation between sections shall be 3 kV (r.m.s.).

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.4 Insulation requirements for secondary windings

The rated power frequency withstand voltage for secondary winding insulation shall be 3 kV (r.m.s.).

9.5 Requirements for the external insulation

9.5.1 Pollution

For outdoor inductive voltage transformers, with ceramic insulator, susceptible to contamination, the creepage distances for given pollution levels are given in table 4.

Table 4 – Creepage distances for given pollution levels

Pollution level		Minimum nominal specific creepage distance mm/kV ^{1) 2)}	Creepage distance Arcing distance
I	Light	16	≤ 3,5
II	Medium	20	
III	Heavy	25	≤ 4,0
IV	Very heavy	31	

1) Ratio of the leakage distance between phase and earth over the r.m.s. phase-to-phase value of the highest voltage for the equipment (see IEC 71-1).

2) For other information and manufacturing tolerances on the creepage distance see IEC 815.

NOTES

1 It is recognized that the performance of surface insulation is greatly affected by insulator shape.

2 In very lightly polluted areas, specific nominal creepage distances lower than 16 mm/kV can be used depending on service experience: 12 mm/kV seems to be a lower limit.

3 In case of exceptional pollution severity, a specific nominal creepage distance of 31 mm/kV may not be adequate. Depending on service experience and/or on laboratory test results, a higher value of specific creepage distance can be used, but in some cases the practicability of washing may have to be considered.

Add the following new clause after 9 bis:

9 ter Mechanical requirements

These requirements apply only to inductive voltage transformers having a highest voltage for equipment of 72,5 kV and above.

In table 8 guidance is given on the static loads that inductive voltage transformers shall be capable withstanding. The figures include loads due to wind and ice.

The specified test loads are intended to be applied in any direction to the primary terminals.

Table 8 – Static withstand test loads

Highest voltage for equipment U_m kV	Static withstand test load F_R N		
	Voltage transformers with:		
	voltage terminals	through current terminals	
		Load class I	Load class II
72,5 to 100	500	1 250	2 500
123 to 170	1 000	2 000	3 000
245 to 362	1 250	2 500	4 000
≥ 420	1 500	4 000	5 000
NOTES 1 The sum of the loads acting in routinely operating conditions should not exceed 50 % of the specified withstand test load. 2 In some applications voltage transformers with through current terminals should withstand rarely occurring extreme dynamic loads (e.g. short-circuits) not exceeding 1,4 times the static withstand test load. 3 For some applications it may be necessary to establish the resistance to rotation of the primary terminals. The moment to be applied during test shall be agreed between manufacturer and purchaser.			

Page 33

10 Classification of tests

Replace, on page 35, the texts of subclauses 10.1, 10.2 and 10.3 by the following:

10.1 Type tests

The following tests are type tests; for details reference should be made to the relevant clauses:

- | | |
|--|-------------------|
| a) Temperature rise test | clause 11 |
| b) Lightning impulse test | 13.2 |
| c) Switching impulse test | 13.3 |
| d) Wet test for outdoor type transformers | clause 14 |
| e) Determination of errors | clauses 26 and 35 |
| f) Short-circuit withstand capability test | clause 12 |

All the dielectric type tests shall be carried out on the same transformer, unless otherwise specified.

After transformers have been subjected to the dielectric type tests of 10.1, they shall be subjected to all routine tests of 10.2.

10.2 Routine tests

The following tests apply to each individual transformer:

- | | |
|--|--------------------|
| a) Verification of terminal markings | clause 15 |
| b) Power frequency withstand test on secondary winding | clause 17 |
| c) Power frequency withstand test between sections | clause 17 |
| d) Power frequency withstand test on primary windings | clause 16 |
| e) Partial discharge measurement | 16.4 |
| f) Determination of errors | 26.1 and clause 36 |

The order of the tests is not standardized but determination of errors shall be performed after the other tests.

Repeated power frequency tests on primary windings shall be performed at 80 % of the specified test voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.3 Special tests

The following tests shall be performed upon agreement between manufacturer and purchaser:

- | | |
|---|---------------|
| a) Chopped impulse test on primary winding | clause 18 |
| b) Measurement of capacitance and dielectric dissipation factor | clause 18 bis |
| c) Mechanical tests | clause 18 ter |

Page 37

13 Impulse test on primary winding

Replace the text of this clause by the following:

13.1 General

The impulse test shall be performed in accordance with IEC 60-1.

The test voltage shall be applied between each line terminal of the primary winding and earth. The earthed terminal of the primary winding or the non-tested line terminal in the case of an unearthed voltage transformer, at least one terminal of each secondary winding, the frame, case (if any) and core (if intended to be earthed) shall be earthed during the test.

The impulse tests generally consist of voltage application at reference and rated voltage levels. The reference impulse voltage shall be between 50 % and 75 % of the rated impulse withstand voltage. The peak value and the waveshape of the impulse shall be recorded.

Evidence of insulation failure due to the test may be given by variation in the waveshape at both reference and rated withstand voltage.

For failure detection the record of current(s) to earth or of voltages appearing across the secondary winding(s), shall be performed in addition to the voltage record.

NOTE - The earth connections may be made through suitable current recording devices.

13.2 Lightning impulse test

The test voltage shall have the appropriate value, given in tables 3A or 3B depending on the highest voltage for equipment and the specified insulation level.

13.2.1 Windings having $U_m < 300 \text{ kV}$

The test shall be performed with both positive and negative polarities. Fifteen consecutive impulses of each polarity, not corrected for atmospheric conditions, shall be applied.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The transformer passes the test if for each polarity:

- no disruptive discharge occurs in the non-self-restoring internal insulation;
- no flashovers occur along the non-self-restoring external insulation;
- no more than two flashovers occur across the self-restoring external insulation;
- no other evidence of insulation failure is detected (e.g., variations in the waveshape of the recorded quantities).

For unearthed voltage transformers, approximately half the number of impulses shall be applied to each line terminal in turn with the other line terminal connected to earth.

NOTE – The application of 15 positive and 15 negative impulses is specified for testing the external insulation. If other tests are agreed between manufacturer and purchaser to check the external insulation, the number of lightning impulses may be reduced to three of each polarity, not corrected for atmospheric conditions.

13.2.2 Windings having $U_m \geq 300$ kV

The test shall be performed with both positive and negative polarities. Three consecutive impulses of each polarity, not corrected for atmospheric conditions, shall be applied.

The transformer passes the test if:

- no disruptive discharge occurs;
- no other evidence of insulation failure is detected (e.g., variations in the waveshape of the recorded quantities).

13.3 Switching impulse test

The test voltage shall have the appropriate value, given in table 3B, depending on the highest voltage for equipment and the specified insulation level.

The test shall be performed with positive polarity. Fifteen consecutive impulses, corrected for atmospheric conditions, shall be applied.

For outdoor-type transformers the test shall be performed under wet conditions (see clause 14).

NOTE – To counteract the effect of core saturation, it is permitted, between consecutive impulses, to modify the magnetic conditions of the core by a suitable procedure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The transformer passes the test if:

- no disruptive discharge occurs in the non-self-restoring internal insulation;
- no flashovers occur along the non-self-restoring external insulation;
- no more than two flashovers occur across the self-restoring external insulation;
- no other evidence of insulation failure is detected (e.g. variations in the waveshape of the recorded quantities).

NOTE — Impulses with flashover to the walls or ceilings of the laboratory should be disregarded.

Page 41

14 Wet test for outdoor type transformers

Replace the text of this clause by the following:

The wetting procedure shall be in accordance with IEC 60-1.

For windings having $U_m < 300$ kV, the test shall be performed with power frequency voltage of the appropriate value given in table 3A depending on the highest voltage for equipment applying corrections for atmospheric conditions.

For windings having $U_m \geq 300$ kV, the test shall be performed with switching impulse voltage of positive polarity, of the appropriate value given in table 3B, depending on the highest voltage for equipment and the rated insulation level.

16 Power frequency tests on primary windings and measurement of partial discharges

Replace the title and text of this clause by the following:

16 Power frequency withstand tests on primary windings and partial discharge measurement

16.1 General

The power frequency withstand test shall be performed in accordance with IEC 60-1.

For separate source withstand tests the duration shall be 60 s.

For the induced voltage withstand test, the frequency of the test voltage may be increased above the rated value to prevent saturation of the core. The duration of the test shall be 60 s. If, however, the test frequency exceeds twice the rated frequency, the duration of the test may be reduced from 60 s as below:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในงานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\text{duration of test (in s)} = \frac{\text{twice the rated frequency}}{\text{test frequency}} \times 60$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

with a minimum of 15 s.

16.2 Windings having $U_m < 300$ kV

The test voltages for windings having $U_m < 300$ kV shall have the appropriate values given in table 3A depending on the highest voltage for equipment.

When there is a considerable difference between the specified highest voltage for equipment (U_m) and the specified rated primary voltage, the induced voltage shall be limited to five times the rated primary voltage.

16.2.1 Unearthed voltage transformers

Unearthed voltage transformers shall be submitted to the following tests:

a) Separate source withstand voltage test

The test voltage shall be applied between earth and all primary winding terminals connected together. The frame, case (if any), core (if there is a special earth terminal) and all secondary winding terminals shall be connected together and to earth.

b) Induced voltage withstand test

At the manufacturer's discretion, the test shall be made by exciting the secondary winding with a voltage of sufficient magnitude to induce the specified test voltage in the primary winding, or by exciting the primary winding directly at the specified test voltage.

The test voltage shall be measured at the high voltage side in each case. The frame, case (if any), core (if intended to be earthed) and one terminal of each secondary winding and the other terminal of the primary winding shall be connected together and to earth.

The test should be performed by test voltage applications to each line terminal for half the required time, with a minimum of 15 s for each terminal.

16.2.2 Earthed voltage transformers

Earthed voltage transformers shall be submitted to the following tests:

a) Separate source withstand voltage test, when applicable

The test voltage shall have the appropriate value given in 9.2.2 between the primary voltage terminal intended to be earthed and earth.

The frame, case (if any), core (if intended to be earthed) and all secondary voltage terminals shall be connected together and to earth.

b) Induced voltage withstand test

The test shall be performed as specified in 16.2.1. The primary voltage terminal intended to be earthed in service shall be earthed during the test.

16.3 Windings having $U_m \geq 300$ kV

The transformers shall be submitted to the following tests:

a) *Separate source withstand voltage test, when applicable*

The test voltage shall have the appropriate value given in 9.2.2 and the test shall be performed as specified in 16.2.2.

b) *Induced voltage withstand test*

The test voltage shall have the appropriate value given in table 3C, depending on the rated lightning impulse withstand voltage. The test shall be performed as specified in 16.2.2.

16.4 Partial discharge measurement

16.4.1 Test circuit and instrumentation

The test circuit and the instrumentation used shall be in accordance with IEC 270. Some examples of test circuits are shown in figures 12 to 14.

The instrument used shall measure the apparent charge q expressed in picocoulomb (pC). Its calibration shall be performed in the test circuit (see an example in figure 15).

A wide-band instrument shall have a bandwidth of at least 100 kHz, with an upper cut-off frequency not exceeding 1,2 MHz.

Narrow-band instruments shall have their resonance frequency in the range 0,15 MHz to 2 MHz. Preferred values should be in the range from 0,5 MHz and 2 MHz but, if feasible, the measurement should be performed at the frequency which gives the highest sensitivity.

The sensitivity shall allow to detect a partial discharge level of 5 pC.

NOTES

- 1 The noise will be sufficiently lower than the sensitivity. Pulses that are known to be caused by external disturbances can be disregarded.
- 2 For the suppression of external noise, the balanced test circuit is appropriate (figure 14). The use of a coupling capacitor to balance the circuit may be inadequate for the elimination of external interference.
- 3 When electronic signal processing and recovery are used to reduce the background noise, this will be demonstrated by varying its parameters such that it allows the detection of repeatedly occurring pulses.

16.4.2 Test procedure for earthed voltage transformers

After a prestressing performed according to procedure A or B, the partial discharge test voltages specified in table 3D are reached and the corresponding partial discharge level is measured in a time within 30 s.

The measured partial discharge levels shall not exceed the limits specified in table 3D.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Procedure A

The partial discharge test voltages are reached while decreasing the voltage after the induced voltage withstand test.

Procedure B

The partial discharge test is performed after the induced voltage withstand test. The applied voltage is raised to 80 % of the induced withstand voltage, maintained for not less than 60 s, then reduced without interruption to the specified partial discharge test voltages.

If not otherwise specified, the choice of procedure is left to the manufacturer. The test method used shall be indicated in the test report.

16.4.3 *Test procedure for unearthed voltage transformers*

The test circuit for unearthed voltage transformers shall be the same as for earthed voltage transformers but two tests shall be performed by applying the voltages alternately to each of the high voltage terminals with the other high voltage terminal connected to a low voltage terminal, frame and case (if any) (see figures 12 to 14).

Page 45

17 Power frequency tests between sections and on secondary windings

Replace the title and text of this clause by the following:

17 Power frequency withstand tests between sections and on secondary windings

The test voltage, with the appropriate value given in 9.3 and 9.4 respectively, shall be applied for 60 s in turn between the short-circuited terminals of each winding section or each secondary winding and earth.

The frame, case (if any), core (intended to be earthed) and the terminals of all the other windings or sections shall be connected together and to earth.

18 Chopped lightning-impulse test on primary windings

Replace the title and text of this clause by the following:

18 Chopped Impulse test on primary winding

The test shall be carried out with negative polarity only and combined with the negative polarity lightning impulse test in the manner described below.

The voltage shall be a standard lightning impulse as defined in IEC 60-1, chopped between 2 μ s and 5 μ s. The chopping circuit shall be so arranged that the amount of overswing of opposite polarity of the recorded impulse shall be limited to approximately 30 % of the peak value.

The test voltage of the full impulses shall have the appropriate value, given in tables 3A or 3B depending on the highest voltage for equipment and the specified insulation level.

The chopped impulse test voltage shall be in accordance with 9.2.4.

The sequence of impulse applications shall be as following:

a) *for windings having $U_m < 300$ kV:*

- one full impulse;
- two chopped impulses;
- fourteen full impulses.

For unearthed voltage transformers, two chopped impulses and approximately half the number of full impulses shall be applied to each terminal.

b) *for windings having $U_m \geq 300$ kV:*

- one full impulse;
- two chopped impulses;
- two full impulses.

Differences in wave shape of full wave applications before and after the chopped impulses are an indication of an internal fault.

Flashovers during chopped impulses along self-restoring external insulation shall be disregarded in the evaluation of the behaviour of the insulation.

Page 47

Add the following new clauses 18 bis and 18 ter:

18 bis Measurement of capacitance and dielectric dissipation factor

The test shall be carried out in accordance with 9.2.5, after the power frequency withstand test on the primary windings.

The test circuit shall be agreed between manufacturer and purchaser, the bridge method being preferred.

The test shall be performed with the voltage transformer at ambient temperature whose value shall be recorded.

18 ter Mechanical tests

The tests are carried out to demonstrate that an inductive voltage transformer is capable of complying with the requirements specified in clause 9 ter.

The voltage transformer shall be completely assembled, installed in vertical position with the frame rigidly fixed.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Liquid-immersed voltage transformers shall be filled with the specified insulation medium and submitted to the operating pressure.

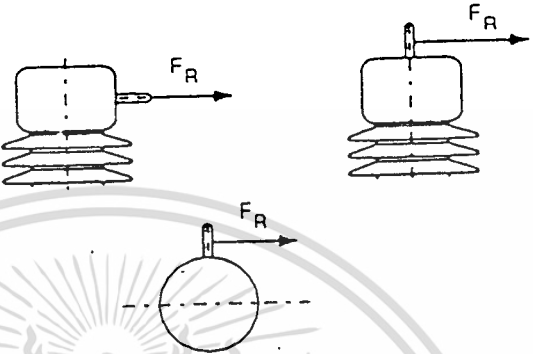
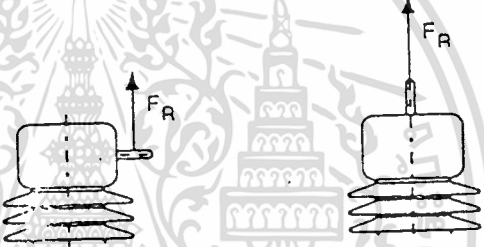
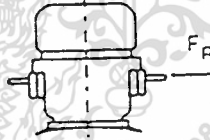
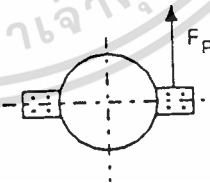
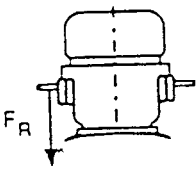
The test loads shall be applied for 60 s for each of the conditions indicated in table 9.

The voltage transformer shall be considered to have passed the test if there is no evidence of damage (deformation, rupture or leakage).

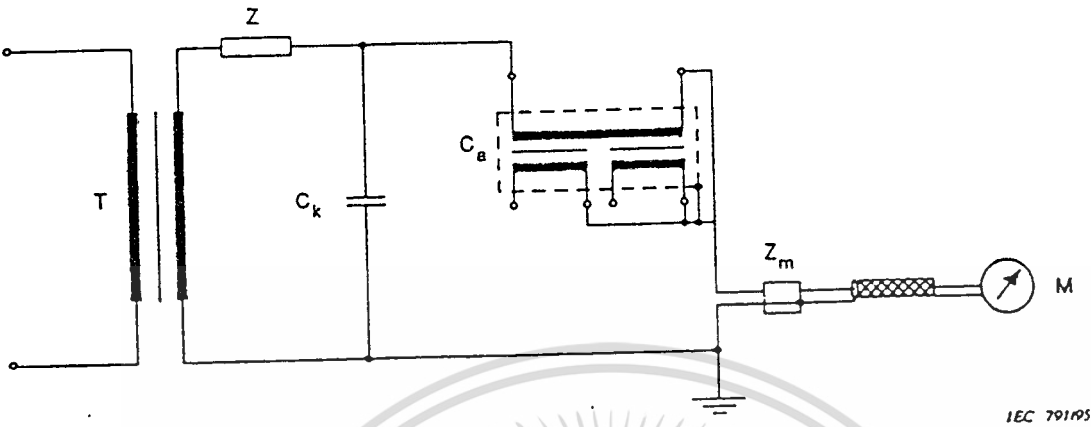


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 9 – Modalities of application of the test loads to be applied to the line primary terminals

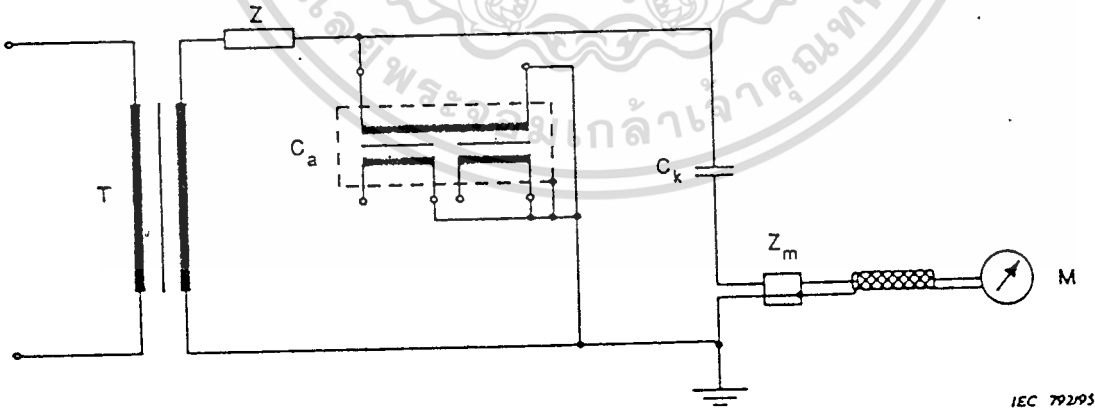
Type of voltage transformer	Modality of application	
With voltage terminal	Horizontal	
	Vertical	
With through current terminals	Horizontal to each terminal	
		
	Vertical to each terminal	
NOTE – The test load shall be applied to the centre of the terminal.		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- T is the test transformer
- Ca is the instrument transformer to be tested
- Ck is the coupling capacitor
- M is the PD measuring instrument
- Zm is the measuring impedance
- Z is the filter

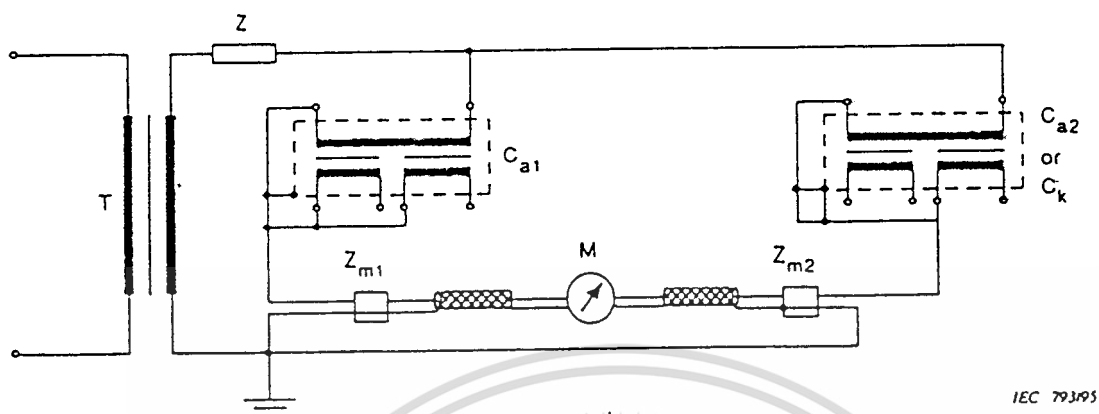
Figure 12 – Test circuit for partial discharge measurement



- Symbols as in figure 12
- Z is the filter (not present if Ck is the capacitance of the test transformer)

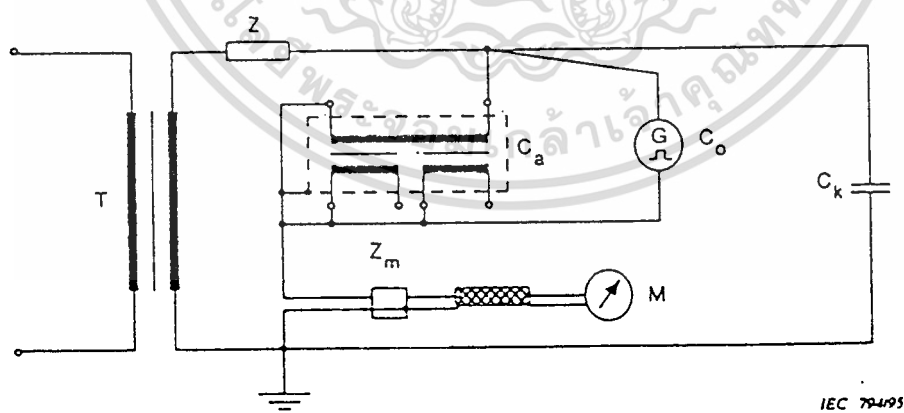
Figure 13 – Alternative test circuit for partial discharge measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



T is the test transformer
 C_{a1} is the instrument transformer under test
 C_{a2} is the auxiliary PD free object (or C_k = coupling capacitor)
M is the PD measuring instrument
 Z_{m1} and Z_{m2} are the measuring impedances
Z is the filter

Figure 14 – Example of balanced test circuit for partial discharge measurement



Symbols as in figure 12
G is the impulse generator with capacitance C_0

Figure 15 – Example of callbration circuit for partial discharge measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 186 B

1981

Deuxième complément à la Publication 186 (1969)

Transformateurs de tension
Comportement aux courts-circuits

Second supplement to Publication 186 (1969)

Voltage transformers
Short-circuit behaviour

Mots clés: transformateurs de tension;
mise en court-circuit;
essais

Key words: voltage transformers;
short-circuiting;
testing



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Prix Fr s 11.-
Price

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

Second supplement to Publication 186 (1969) VOLTAGE TRANSFORMERS Short-circuit behaviour

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard was prepared by IEC Technical Committee No. 38: Instrument Transformers.

It forms the second supplement to Publication 186 (1969).

A first draft was discussed at the meeting held in Baden-Baden in 1978. As a result of this meeting, a draft, Document 38(Central Office)51, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in June 1979.

Amendments, Document 38(Central Office)64, were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in October 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia
Austria
Belgium
Brazil
Bulgaria
Canada
China
Denmark
Egypt
Finland
France
Germany
Hungary

Italy
Japan
Netherlands
New Zealand
Poland
Romania
South Africa (Republic of)
Spain
Sweden
Switzerland
Turkey
United Kingdom
United States of America

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Second supplement to Publication 186 (1969)

VOLTAGE TRANSFORMERS

Short-circuit behaviour

Note. – The page numbers quoted in this Supplement B refer to the consolidated reprint, containing Supplement A (1970) of Publication 186 (1969).

Page 19

SECTION TWO – RATING AND PERFORMANCE REQUIREMENTS APPLICABLE TO ALL VOLTAGE TRANSFORMERS

After Clause 9 (page 29), add the following new Clause 9 bis:

9 bis. Short-circuit withstand capability

The voltage transformer shall be designed and constructed to withstand without damage, when energized at rated voltage, the mechanical and thermal effects of an external short-circuit for the duration of 1 s.

Page 29

SECTION THREE – TESTS – GENERAL

In Sub-clause 10.2 (page 31), add, after Item b), the following new item:

- c) Short-circuit withstand capability test (see Clause 14 bis).

Page 33

SECTION FIVE – TYPE TESTS

After Clause 14 (page 35), add the following new Clause 14 bis:

14 bis. Short-circuit withstand capability test

This test shall be made to prove compliance with Clause 9 bis.

For this test the transformer shall initially be at a temperature between 10 °C and 30 °C.

The voltage transformer shall be energized from the primary side and the short-circuit applied between the secondary terminals.

One short-circuit shall be applied for the duration of 1 s.

Note. – This requirement applies also where fuses are an integral part of the transformer.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

During the short-circuit, the r.m.s. value of the applied voltage at the transformer terminals shall be not less than the rated voltage.

In the case of transformers provided with more than one secondary winding, or section, or with tappings, the test connection shall be agreed between manufacturer and purchaser.

Note. – For inductive type transformers, the test may be carried out by energizing the secondary winding and applying the short-circuit between the primary terminals.

The transformer shall be deemed to have passed this test if, after cooling to ambient temperature, it satisfies the following requirements:

- a) it is not visibly damaged;
- b) its errors do not differ from those recorded before the tests by more than half the limits of error to its accuracy class;
- c) it withstands the dielectric tests specified in Clauses 12 and 13 but with the test voltage reduced to 90% of those given;
- d) on examination, the insulation next to the surface of both the primary and the secondary windings does not show significant deterioration (e.g. carbonization).

The examination *d)* is not required if the current density in the winding does not exceed 160 A/mm^2 where the winding is of copper of conductivity not less than 97% of the value given in IEC Publication 28: International Standard of Resistance of Copper. The current density is to be based on the measured symmetrical r.m.s. short-circuit current in the secondary winding (divided by the rated transformation ratio in the case of the primary).

กิตติกรรมประกาศ

- ขอขอบคุณ คุณประคิษฐ์ ปิถันรณคิลก ผู้จัดการฝ่ายขาย บริษัท บางกอกแปซิฟิคสตeel จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเหล็ก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลงรวมทั้งคุณสมบัติและรายละเอียดที่เอื้ออำนวยในการสนับสนุนการทำงาน
- ขอขอบคุณ บริษัท ALLIED SIGNAL INC. ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเหล็ก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง รวมทั้งคุณสมบัติและรายละเอียดที่เอื้ออำนวยในการสนับสนุนการทำงาน
- ขอขอบคุณ บริษัท PRECISE INTERNATIONAL CORPORATION LTD. ที่ให้ความอนุเคราะห์บริจาคอุปกรณ์และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา
- ขอขอบคุณบริษัท พงษ์พัฒนาโลหะกิจ จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำตัวถังหม้อแปลงจนเสร็จสมบูรณ์
- ขอขอบคุณ คุณวิจิตร เสงมาเพชร ฝ่ายจัดซื้อและพัสดุ การไฟฟ้านครหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและรายละเอียดที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา
- ขอขอบคุณ บริษัท ไทยพัฒน์กิจ หม้อแปลงไฟฟ้า จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการสร้างและการทดสอบในบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานที่ทำ
- ขอขอบคุณ ผศ.จงรักษ์ บุญถึง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือจนโครงการสำเร็จได้ด้วยดี

ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ จนโครงการนี้สำเร็จได้ หากไม่มีท่านเหล่านี้โครงการนี้คงไม่สามารถสำเร็จและสมบูรณ์ได้



บรรณานุกรม

- [1] ตำราวิชิต สัจจะหา, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [2] เอก ไชยสวัสดิ์, “เครื่องวัดไฟฟ้า”, สสท.
- [3] อาภรณ์ เก่งผล, โอชามุ นิธิโนะ, “เครื่องมือและการวัดทางไฟฟ้า”.
- [4] วีระศักดิ์ พิรักษา, “การทดสอบความคงทนของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยแรงดันอิมพัลส์”, เทคนิค ฉบับที่ 104 หน้าที่ 120-130 ธันวาคม 2536.
- [5] วีระศักดิ์ พิรักษา, “การทดสอบความคงทนของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า”, เทคนิคฉบับที่ 106 หน้าที่ 97-104 ธันวาคม 2536.
- [6] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, “หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอก.284-2524”, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [7] E.W GOLDING, MEASUREMENTS AND MEASURING INSTRUMENTS.
- [8] A. K. SAWHNEY, A COURSE IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC MEASUREMENTS AND INSTRUMENTATION
- [9] IEC Standard Publication 186 1987 : Voltage transformers