

การทดสอบหม้อแปลงกระแส CURRENT TRANSFORMER TEST



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปี พ.ศ. 2536
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

033150

ปีการศึกษา 2536
CURRENT TRANSFORMER TEST

โดย

นาย กิตติพร ปราชญ์ชลชาญ

นาย สติ เวียนศิริ

นาย สันต์ชัย ภาระเกตุ

นาย เอนก ไวก้านวม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2536.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง CURRENT TRANSFORMER TEST

ผู้จัดทำ :

1. นายกิตติพร ปราชญ์ชัชชาญ
2. นายสติ เวียนศิริ
3. นายสันต์ชัย การะเกตุ
4. นายเอก ไวกำนวน



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มณฑล สีลาจินดา ไกรฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบหม้อแปลงกระแส
CURRENT TRANSFORMER TEST

โดย: 1. นายกิตติพร ปราชญ์ชัชวาล
2. นายสติ เวียนศิริ
3. นายสันต์ชัย การะเกตุ
4. นายเอนก ไวก้านวม

อาจารย์ที่ปรึกษา: พศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

บทคัดย่อ : หม้อแปลงกระแสเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการวัดค่าทางไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่แปลงกระแสในการใช้งานที่สูงให้ต่ำลงเพื่อจ่ายให้กับเครื่องมือวัด เช่น แอมป์มิเตอร์, กิโลวัตต์มิเตอร์ให้อ่านค่าได้ หรือใช้ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกัน ความเที่ยงตรงในการวัดค่ากระแสของหม้อแปลงกระแสถูกแบ่งออกเป็นหลายระดับ การทดสอบหาความเที่ยงตรงของหม้อแปลงกระแสมีวิธีทดสอบได้หลายวิธี ในโครงการนี้ได้สร้างชุดทดสอบหม้อแปลงกระแสด้วยวิธี Direct deflection Method เป็นวิธีทดสอบที่แสดงค่าด้วยวัตต์มิเตอร์แบบ อิเล็กโตรไดนามิกส์ และเป็นวิธีที่มีความสะดวกสูง

ABSTRACT : Current transformer is a specifically device for Electrical measurement, this transfer high current in circuit to low current for measurement device. such as Amp-meter, KWH-meter or component of protection device. In the accuracy of current transformer is distribute to many level and current transformer tested to find error, this have many method, But in the project we reference to the Direct deflection method and measurement by Electrodynamic wattmeter and convenient. ส่วนนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1	บทนิยามและสัญลักษณ์	1
บทที่ 2	หม้อแปลงกระแส	4
บทที่ 3	โครงสร้างของหม้อแปลงกระแส	18
บทที่ 4	การทดสอบหม้อแปลงกระแส	30
บทที่ 5	หม้อแปลงกระแสในงานป้องกันระบบ	40
บทที่ 6	ชุดทดสอบหม้อแปลงกระแสแบบ Direct Deflection.	56
บทที่ 7	การออกแบบและทดสอบหม้อแปลงกระแส	64
วิเคราะห์ผลการทดสอบ		83
สรุปผลและวิจารณ์		84
ภาคผนวก 1		87
ภาคผนวก 2		90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนิยามและสัญลักษณ์

1.1 บทนิยาม

CT.	หมายถึง	หม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่แปลงกระแสในระบบ ให้มีขนาดเหมาะสมสำหรับวงจรวัด และวงจรถูกกัน
ขดลวด	หมายถึง	ส่วนที่ใช้เป็นวงจรถัดแปลงค่ากระแสให้ได้อัตราส่วน ของกระแสที่กำหนด แบ่งออกเป็นขดลวดด้านกระแสสูง (PRIMARY WINDING) และขดลวดด้านกระแสต่ำ (SECONDARY WINDING)
อัตราส่วนของขดลวด	หมายถึง	อัตราส่วนระหว่างกระแสที่กำหนดของขดลวดหนึ่ง กับอีกขดลวดหนึ่งที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากัน
แรงดัน	หมายถึง	แรงดันไฟฟ้า
กระแส	หมายถึง	กระแสไฟฟ้า
วงจรถูก	หมายถึง	วงจรถูกไฟฟ้า
ระบบ	หมายถึง	ระบบไฟฟ้า
ค่าแรงดันและกระแส	หมายถึง	ค่า RMS นอกจากระบุเป็นอย่างอื่น

1. Transformation Ratio (R) คืออัตราส่วนที่ได้มาจากขนาดของเฟสเซอร์ทางปฐมภูมิ กับเฟสเซอร์ทางทุติยภูมิ

$$R = \frac{\text{เฟสเซอร์ทางปฐมภูมิ}}{\text{เฟสเซอร์ทางทุติยภูมิ}} = \frac{\text{กระแสทางปฐมภูมิ (I}_1\text{)}}{\text{กระแสทางทุติยภูมิ (I}_2\text{)}} \dots\dots (1)$$

2. Nominal Ratio (K_n) คืออัตราส่วนระหว่างกระแสฟลักซ์ทางปฐมภูมิกับกระแสฟลักซ์ทางด้านทุติยภูมิ หรือค่าอัตราส่วนที่แสดงไว้ที่ตัวหม้อแปลง

เอกสารนี้เป็น K_n สารที่สงวนไว้ กระแสฟลักซ์ทางปฐมภูมิ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำ (2) ้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง กระแสฟลักซ์ทางทุติยภูมิ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Turn Ratio (n) คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิกับจำนวนของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ

$$N = \frac{\text{จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ}}{\text{จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ}} \dots\dots (3)$$

4. Ratio Correction Factor (RCF) คือผลของ Transformation Ratio (R) ทหารด้วย Nominal Ratio (K_n)

$$K_n = RCF \times K_n \dots\dots (4)$$

5. Burden (เบอร์เดน) หมายถึงภาวะของโวลต์ทางด้านทุติยภูมิ เป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ (apparent power) มีหน่วยเป็น โวลต์-แอมป์ (VA) ที่พิกัดกระแสหรือแรงดันทางด้านทุติยภูมิ

1.2 สัญลักษณ์

- r_p = ค่า resistance ของขดลวดทุติยภูมิ
- x_p = ค่า reactance ของขดลวดทุติยภูมิ
- r_s = ค่า resistance ของเบอร์เดนที่นำมาต่อทางด้านทุติยภูมิ
- x_s = ค่า reactance ของเบอร์เดนที่นำมาต่อทางด้านทุติยภูมิ
- E_p = ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ
- E_s = ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ
- T_p = จำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ
- T_s = จำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ
- V_p = ศักดาไฟฟ้าที่ขั้วทางด้านทุติยภูมิ
- I_p = กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดทุติยภูมิ
- I_s = กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ เส้นริ้วแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ = มุมระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางทุติยภูมิกับกระแสทางทุติยภูมิ
 $= \tan^{-1}(x_s + x_r) / (r_s + r_r)$

Δ = มุมเฟส (phase angle) ของโหลดเบอร์เตนทางด้านทุติยภูมิ
 $= \tan^{-1} x_r / r_r$

I_o = กระแสกระตุ้น (exciting current)

I_m = กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (magnetising current) ของกระแสกระตุ้น
 (exciting current)

I_w = กระแสสูญเสีย (loss component) ของกระแสกระตุ้น (exciting current)

α = มุมระหว่างกระแสกระตุ้น (exciting current) กับเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ



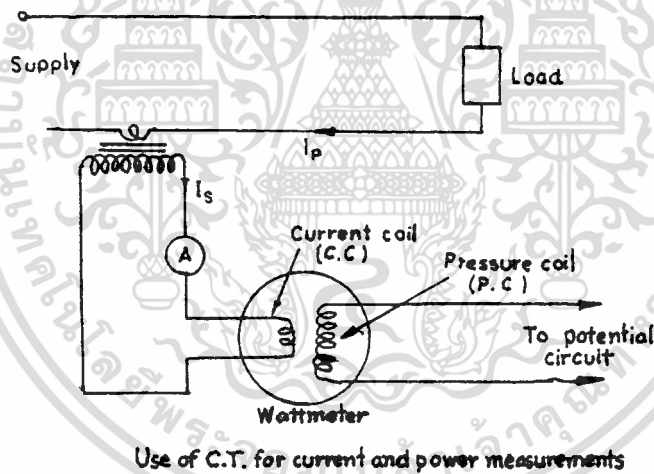
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หม้อแปลงกระแส (Current Transformer; CT.)

หน้าที่หลักของ CT. คือลดค่าระดับค่ากระแสสูงๆในระบบไฟฟ้าให้มีค่าต่ำลง สามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์วัด (Measuring instrument) หรืออุปกรณ์ป้องกัน(Protective device) โดยมีความแตกต่างระหว่างมุมทางด้านปฐมภูมิและทางด้านทุติยภูมิน้อยที่สุด

CT. ใช้วัดกระแสในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ขดลวดปฐมภูมิจะถูกต่ออนุกรมในระบบที่ต้องการวัดและทางด้านทุติยภูมิจะถูกต่อด้วยอุปกรณ์วัดซึ่งอาจจะได้แก่ แอมป์มิเตอร์หรืออุปกรณ์วัดอื่นๆ เช่น วัดคีมิตเตอร์ และวัดดี-เฮ้าท์มิเตอร์ ลักษณะการต่อแสดงดังรูปที่ 2.1 จากรูปขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดด้านทุติยภูมิ ขดลวดทั้งสองด้านพันอยู่ที่แกนเหล็กเดียวกันเมื่อให้ค่าฟลักซ์รั่วไหลระหว่างขดลวดมีค่าต่ำ



รูปที่ 2.1 การใช้ CT. กับอุปกรณ์

การทำงานของ CT. จะต้องอยู่ในลักษณะสำคัญ 2 ประการคือ

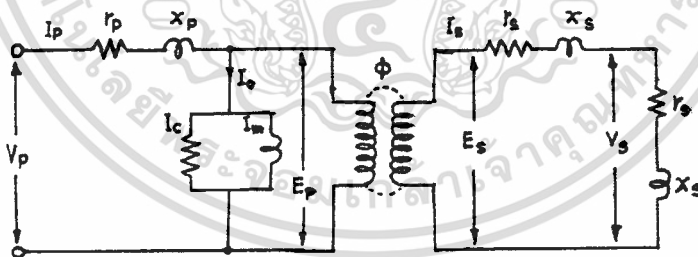
1. ทางด้านทุติยภูมิจะต้องอยู่ในสภาวะของการลัดวงจร (Short Circuit) เสมอ
2. กระแสทางด้านปฐมภูมิไม่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ จะต้องมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบ ซึ่งผลก็คือ CT. สามารถแปลงกระแสสูงๆ

จากระบบไฟมาทางด้านทุติยภูมิได้ถูกต้องงาน แม้ว่าด้านทุติยภูมิจะมีโหลดต่ออยู่มากหรือน้อยเท่าใดก็ตาม การคำนวณค่าต่างๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ต้องพึงระวังก็คือ การเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิในขณะที่ยังมีกระแสปฐมภูมิไหลอยู่จะทำให้ไม่มีกระแสไหลทางทุติยภูมิ และกระแสทั้งหมดทางด้านปฐมภูมิจะทำหน้าที่เป็นกระแสกระตุ้น (exciting current) ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในแกนเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างผิดปกติ ทำให้แกนเหล็กร้อนเกินไป หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางทุติยภูมิอาจเพิ่มสูงจนทำให้ฉนวนเสื่อมสลาย (break down) ได้ ดังนั้นจึงห้ามเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิของ CT. ในขณะที่มีกระแสทางปฐมภูมิไหลอยู่ในขณะเปลี่ยนอุปกรณ์วัดทางทุติยภูมิจึงจำเป็นต้องลัดวงจรทุติยภูมิไว้ก่อนเสมอ

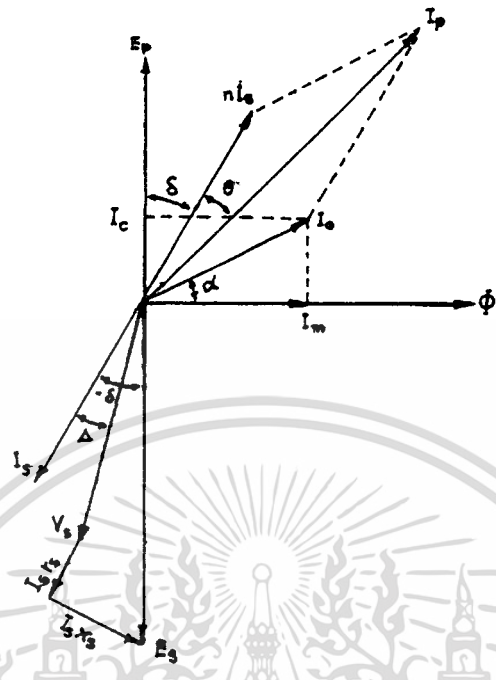
✓ 2.1 ทฤษฎี

จากรูปที่ 2.1 แสดง Equivalent circuit ได้ดังรูปที่ 2.2 และในรูปที่ 2.3 แสดง Phasor diagram ของ CT.

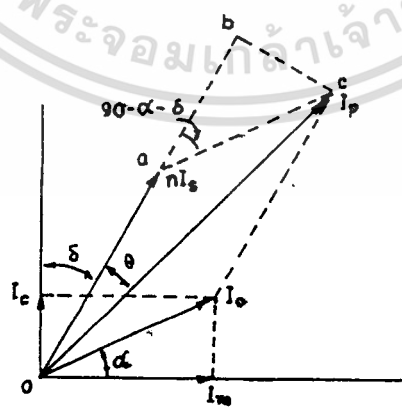


รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของ CT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เฟสเซอร์ของ CT.



รูปที่ 2.4 เฟสเซอร์ของ CT. บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 Transformation ratio

พิจารณาจากเฟสเซอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.4

เมื่อ. มุม $bac = 90 - \delta - \alpha$

$$ac = I_o, \quad oa = nI_s \quad \text{และ} \quad oc = I_o$$

$$bc = I_o \sin(90 - \delta - \alpha) = I_o \cos(\delta + \alpha)$$

$$ab = I_o \cos(90 - \delta - \alpha) = I_o \sin(\delta + \alpha)$$

จาก $(oc)^2 = (oa+ab)^2 + (bc)^2$

จะได้ $I_o^2 = [nI_s + I_o \sin(\delta + \alpha)]^2 + [I_o \cos(\delta + \alpha)]^2$

$$= n^2 I_s^2 + I_o^2 \sin^2(\delta + \alpha) + 2nI_s I_o \sin(\delta + \alpha) + I_o^2 \cos^2(\delta + \alpha)$$

$$= n^2 I_s^2 + 2nI_s I_o \sin(\delta + \alpha) + I_o^2$$

หรือ $I_o = [n^2 I_s^2 + 2nI_s I_o \sin(\delta + \alpha) + I_o^2]^{1/2} \dots\dots (5)$

ดังนั้นอัตราส่วน Transformation Ratio จะเท่ากับ

$$R = \frac{I_o}{I_s} = \frac{[n^2 I_s^2 + 2nI_s I_o \sin(\delta + \alpha) + I_o^2]^{1/2}}{I_s} \dots\dots (6)$$

CT. ในอุดมคติ จะมีอัตราส่วนของกระแสปฐมภูมิต่อกระแสทุติยภูมิคงที่ และเฟสเซอร์ของกระแสเฟสกัน 180 องศา ส่วนหม้อแปลงกระแสในทางปฏิบัตินั้น CT. จะมีค่าสูญเสียที่เกิดจากกระแส I_o เป็นองค์ประกอบของกระแส I_s ดังนั้นการออกแบบที่ดีนั้น CT. ควรจะมีค่า $I_o < nI_s$ โดย I_o มีค่าน้อยกว่า 1 % ของ I_s ซึ่งจะทำให้ I_s จะมีค่าเกือบจะเท่ากับ nI_s

จากสมการที่ (6) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$R = \frac{[n^2 I_s^2 + 2nI_s I_o \sin(\delta + \alpha) + I_o^2 \sin^2(\delta + \alpha)]^{1/2}}{I_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{nI_p + I_s \sin(\delta + \alpha)}{I_s} \\
 &= \frac{n + I_s \sin(\delta + \alpha)}{I_s} \dots\dots(7)
 \end{aligned}$$

ค่าโดยประมาณจากสมการที่ (7) มีความถูกต้องและเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ปฏิบัติงานได้ ทฤษฎีที่ประยุกต์มานี้ คือกรณีที่ว่าของ Secondary burden มีค่า power factor เป็นค่า lagging โดยเป็นกรณีปกติทั่วไป

และจากสมการที่ (7) สามารถแสดงสมการได้อีกคือ

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{n + I_s (\sin\delta \cos\alpha + \cos\delta \sin\alpha)}{I_s} \\
 &= \frac{n + I_s \sin\delta + I_s \cos\delta}{I_s} \dots\dots(8)
 \end{aligned}$$

เมื่อ

$$I_m = I_s \cos \alpha$$

$$I_e = I_s \sin \alpha$$

2.1.2 Phase Angle

เฟสเซอร์ของกระแสทางด้านทุติยภูมิ จะตรงข้ามกับเฟสเซอร์ของกระแสทางด้านปฐมภูมิ.

- มุมจะเป็น (+) ถ้ากระแสทางด้านทุติยภูมิ (nI_s) ตามหลังกระแสทางด้านปฐมภูมิ (I_p)
- มุมจะเป็น (-) ถ้ากระแสทางด้านทุติยภูมิ (nI_s) นำหน้ากระแสทางด้านปฐมภูมิ (I_p)

มุมระหว่าง nI_s กับ I_p คือมุม θ มุม θ เป็นมุมเฟส (phase angle) จากเฟสเซอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลซึ่งงานนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด ob ปลงเนื้อ oa+ab ออกจากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$= \frac{I_o \cos (\delta + \alpha)}{nI_u + I_o \sin (\delta + \alpha)}$$

เมื่อ α มีขนาดเล็กๆ เราสามารถเขียน

$$\theta = \frac{I_o \cos (\delta + \alpha)}{nI_u + I_o \sin (\delta + \alpha)} \text{ rad} \dots\dots(9)$$

เมื่อ I_o มีขนาดเล็กมากๆ ค่าที่มีจึงเทียบได้กับ nI_u ดังนั้นเราสามารถละการพิจารณา
ค่า $I_o \sin (\delta + \alpha)$ ได้

ดังนั้น

$$\theta = \frac{I_o \cos (\delta + \alpha)}{nI_u} \text{ rad} \dots\dots(10)$$

$$= \frac{I_o \cos \alpha \cos \delta - I_o \sin \alpha \sin \delta}{nI_u}$$

$$= \frac{I_u \cos \delta - I_c \sin \delta}{nI_u} \text{ rad} \dots\dots(11)$$

$$= \frac{180}{\pi} \times \frac{(I_u \cos \delta - I_c \sin \delta)}{nI_u} \text{ degree} \dots\dots(12)$$

✓ 2.2 ความคลาดเคลื่อนของ CT. (Error)

จากสมการที่ (8) ผลของ Transformation ratio (หรือ actual ratio) จะไม่เท่ากับค่าของ Turn ratio ซึ่งค่า Transformation ratio นี้ไม่คงที่ แต่ขึ้นอยู่กับค่า magnetizing และค่า loss components ของกระแสกระตุ้น (exciting current) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน (Error) ขึ้นในการวัดกระแส

เฟสเซอร์ของกระแสคิตยภูมิ (I_c) จะเคลื่อนไปจากมุม 180 องศา เนื่องจากผลของกระแสกระตุ้น (I_o) ของกระแสปรุมภูมิ ต่างจากมุม 180 องศา เป็นมุม θ ด้วยเหตุนี้จึงต้อง

ศึกษาความคลื่อนระหว่าง actual transformation ratio ว่าต่างไปจากค่า Turn ratio อย่างไร

2.2.1 อัตราส่วนความคลาดเคลื่อน (Ratio Error)

ค่าอัตราส่วนความคลาดสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \% \text{ ความคลาดเคลื่อน} &= \frac{\text{nominal ratio} - \text{actual ratio}}{\text{actual ratio}} \times 100 \\ &= \frac{K_n - R}{R} \times 100 \quad \dots\dots(13) \end{aligned}$$

2.2.2 ความคลาดเคลื่อนมุมเฟส (Phase angle error)

$$\text{phase angle } (\theta) = \frac{180}{\pi} \times \left(\frac{I_m \cos \phi - I_c \sin \phi}{nI_s} \right) \text{ degree}$$

2.2.3 สูตรค่าความคลาดเคลื่อนโดยประมาณ (Approximate formula for error)

อุปกรณ์วัดส่วนใหญ่ค่าเบอร์เดน (burden) ส่วนใหญ่จะเป็นค่าอินดักแตนซ์ ดังนั้นมุมจะเป็นมุมบวก และโดยปกติจะมีขนาดเล็กๆ

$$\text{เมื่อมุม } \sin = 0 \quad \text{และ} \quad \cos = 1$$

ดังนั้นจากสมการที่ (8) และสมการที่ (12) จะสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$R = \frac{n + \frac{I_c}{I_s}}{1} \quad \dots\dots(14)$$

$$\text{และ} \quad \theta = \frac{180}{\pi} \times \left(\frac{I_m}{I_s} \right) \text{ degree} \quad \dots\dots(15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อ $I_p = nI_s$ และเมื่อสมการที่ (14) และสมการที่ (15) สามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$R = n + \frac{nI_c}{I_p} = n \left(1 + \frac{I_c}{I_p}\right) \quad \dots\dots(16)$$

และ $\theta = \frac{180}{\pi} \times \frac{I_c}{I_p} \text{ degree} \quad \dots\dots(17)$

2.3 คุณสมบัติของ CT. (Characteristics of current transformer)

2.3.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเพาเวอร์แฟคเตอร์ของเบอร์เดนด้านทุติยภูมิ

- อัตราส่วนความคลาดเคลื่อน (Ratio Error)

สำหรับเบอร์เดนที่เป็นอินดักแตนซ์กระแสทุติยภูมิ (I_p) จะล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_p) มุม จะเป็นมุมบวกผลที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าของ Actual transformer ratio มีค่าสูงกว่า Turn ratio (สังเกตจากสมการ 13) และสำหรับเบอร์เดนที่เป็นคาปาซิแตนซ์กระแสทุติยภูมิ (I_p) จะนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_p) มุม จะเป็นมุมลบ ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่า Actual transformer ratio มีค่าต่ำกว่า Turn ratio สำหรับมุมที่เข้าใกล้มุม -90 องศา

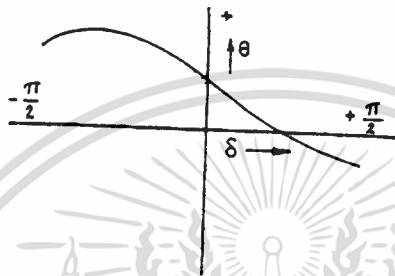
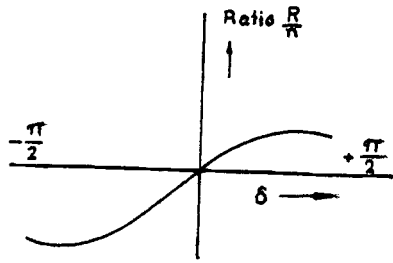
- มุมเฟส (Phase angle)

จากในสมการที่ 10 สำหรับเบอร์เดนที่เป็นอินดักแตนซ์ จะพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

1. มุมเฟส (Phase angle) จะเป็นบวกเมื่อมุม ϕ มีค่าน้อย ๆ (หรือกล่าวได้ว่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านทุติยภูมิมีค่าสูง)
2. ถ้าเบอร์เดนที่เป็นอินดักแตนซ์มีค่าสูง มุมเข้าใกล้มุม 90 องศา ค่ามุมเฟส θ จะมีค่าเป็นลบ และสำหรับเบอร์เดนที่เป็นคาปาซิแตนซ์ มุม ϕ จะเป็นลบมุม θ จะได้เป็นผลบวกเสมอ

การลดทอนค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลังทางทุติยภูมิ จะต้องเพิ่มมุม ϕ ส่งผลทำให้เฟสเซอร์ของ nI_p เข้าใกล้ I_p ดังนั้นเมื่อ I_p และ nI_p เข้าใกล้กันมากขึ้น มุมเฟส θ จะมีค่าลดลง

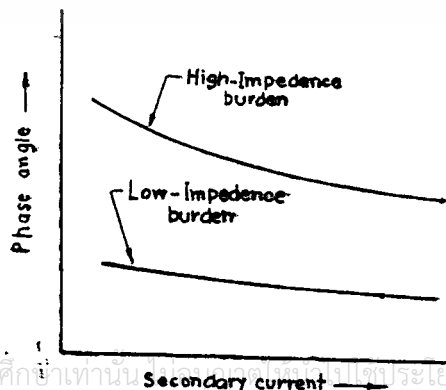
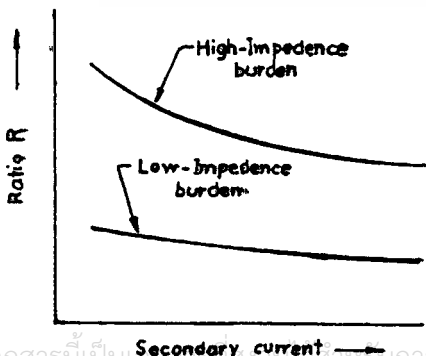
การเปลี่ยนแปลงของ Transformation ratio (R) และมุมเฟส θ ด้วยมุม ϕ ทางด้านทุติยภูมิดังแสดงในรูป 5 จะเห็นว่าอัตราส่วนและมุมเฟสจะขึ้นอยู่กับกระแสการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) และกระแสสูญเสียในแกนเหล็ก (I_c) ซึ่งคือ กระแสกระตุ้น (I_0) นั้นเอง จาก Curver นี้จะประยุกต์มาจากอินพีแดนซ์คงที่ค่าหนึ่ง การศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ transformation Ratio และ Phase angle กับ p.f. ทางวงจรถัดๆ

2.3.2 ผลของการเปลี่ยนกระแสปฐมภูมิ

เมื่อกระแสปฐมภูมิเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้กระแสทุติยภูมิเปลี่ยนแปลงตามด้วย ที่ปริมาณกระแส I_p ต่ำ (หรือ I_p) กระแส I_s และ I_c เป็นเทียบเป็นสัดส่วนกับ I_p จะทำให้เกิดอัตราส่วนค่าความคลาดเคลื่อนมาก เมื่อ I_p มีค่าเพิ่มมากขึ้น ปริมาณกระแส I_s จะเพิ่มขึ้น ผลก็คือ อัตราส่วนความคลาดเคลื่อนและมุมเฟสจะลดลง สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 16 และ 17 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความคลาดเคลื่อนและมุมเฟส อันเนื่องมาจากกระแสทุติยภูมิ แสดงได้ดังรูป 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลง R ratio ต่อ

รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลง Phase angle

กระแสทางทุติยภูมิ

ต่อกระแสทางทุติยภูมิ

2.3.3 ผลจากการเปลี่ยนเบอร์เค้นทางด้านทุติยภูมิ

การเพิ่มเบอร์เค้นของทุติยภูมิ เป็นผลทำให้ค่าของโวลต์-แอมป์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางทุติยภูมิมากขึ้น (E_2) ซึ่งจะทำให้การเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นของเส้นแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า Transformation ratio และมุมเฟสระหว่างกระแสปฐมภูมิและกระแสทุติยภูมิ เลื่อนมากขึ้นไปทางด้านบวก ดังรูป 2.6 และ 2.7

2.3.4 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความถี่

การเพิ่มความถี่จะเป็นผลทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลงโดยทั่วไปผลจากการเพิ่มความถี่จะคล้ายคลึงกับการลดค่าเบอร์เค้นของทุติยภูมิ โดยปกติแล้วหม้อแปลงกระแสจะใช้กับความถี่ที่ไม่ต่างไปจากการออกแบบมากนัก และดังนั้นผลจากความถี่จึงไม่มีความจำเป็นมากในการพิจารณา

2.4 การลดค่าความคลาดเคลื่อน (Eduction of errors)

พิจารณาจากสมการที่ (16) และสมการที่ (17) ความแตกต่างระหว่างค่า actual transformation ratio กับค่า turn ratio อยู่ที่กระแสสูญเสียในแกนเหล็ก (I_{Fe}) และมุมเฟสของหม้อแปลงกระแส (transformer phase angle) ซึ่งอยู่ที่กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) จะเห็นได้ชัดเจกว่าถ้า actual transformation ratio ค่าเข้าใกล้ turn ratio ค่า phase angle จะมีค่าน้อย ๆ รวมทั้งกระแส I_{Fe} และ I_m จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแส I_p

สิ่งเหล่านี้เป็นลักษณะการออกแบบ เพื่อช่วยทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง และจะอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 ลักษณะการออกแบบ (Design Feature)

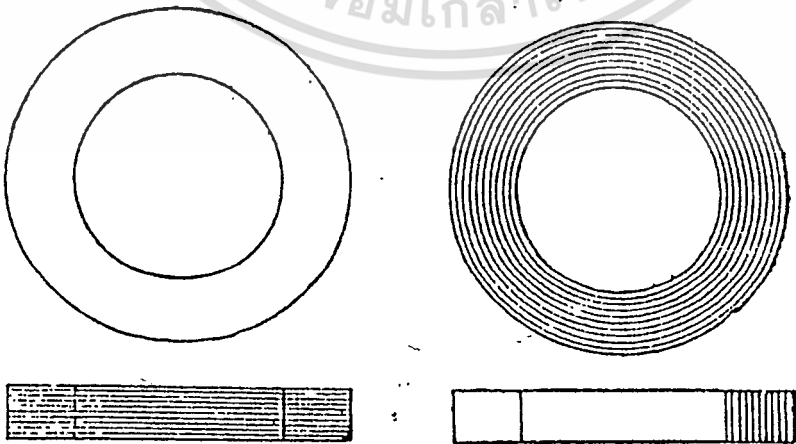
1. แกนเหล็ก (core)

การที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ค่าของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) และกระแสสูญเสีย (I_{Fe}) จะต้องมีปริมาณน้อย ๆ ดังนั้นแกนเหล็กนั้นจะต้องมีค่า reluctance และ core loss ต่ำ การลดทอนค่า reluctance สำหรับทางเดินแม่เหล็กจะทำได้โดยการใช่วัสดุที่มีค่าความขีบข่าสูง , ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กสั้น , พื้นที่หน้าตัดของแกนกว้าง ๆ , ปริมาณความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำ ๆ โดยปกติแล้ว CT. จะถูกออกแบบให้มีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำกว่าหม้อแปลงกำลัง (power transformer) อย่างไรก็ตามอีกอย่างหนึ่งคือการสร้างแกนเหล็กจะต้องมีรอยต่อของแกนเหล็กน้อยเพราะเป็นสาเหตุ

ที่ทำให้เกิดช่อง air gap ขึ้นที่แกนเหล็ก ซึ่งจะทำให้มีค่าของ reluctance สูงค่าของแรงดันแม่เหล็ก (mmf) จะหมดเปลืองไปกับเหตุผลส่วนนี้ เราสามารถที่จะลดความสูญเสียจากสาเหตุนี้ได้ โดยการวางแกนแม่เหล็กให้เกยกัน หรืออัดให้แน่น การลดค่า core loss กระทำได้โดยการเลือกวัสดุที่มีค่า hysteresis และ eddy current ต่ำรวมทั้งการทำให้แกนมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กต่ำด้วย

ในทางปฏิบัตินั้นแกนเหล็กของ CT. ที่มีลักษณะเป็นวงแหวนจะทำจากแผ่นเหล็กมีขนาดรูปที่ (8) จะทำทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กมีช่อง air gap น้อยทำให้มีค่า reluctance น้อยหรืออาจทำเป็นรูปร่างอื่น ๆ ก็ได้

แกนที่ใช้ Nickel iron ที่มีค่าความซึมซาบสูงมักใช้กับ CT. ที่ต้องการความถูกต้องสูง, แกน Mumetal (76% Ni) จะมีค่าความซึมซาบสูง, ค่า loss ต่ำและการบำรุงรักษาน้อยในการใช้งานโดยมีค่าความซึมซาบ (มีค่าเท่ากับ 90,000) ที่เกิดจากความหนาแน่นของเส้นแรงที่ค่าปริมาณ 0.35 Wb/m^2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความซึมซาบสูงสุดของแกนเหล็กที่เป็นแกน silicon steel (4500) ที่เกิดจากความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ค่าประมาณ 0.5 Wb/m^2 แกน Mumetal จะอึดตัวที่ความหนาแน่นของเส้นแรงต่ำจึงไม่เหมาะสำหรับงานประเภท protective แต่จะเหมาะกับ overload relay อีกทั้ง Mumetal (รวมทั้ง Nickel iron Alloys) มีราคาแพง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.8 a. แบบวงแหวน b. แบบเหล็กมีฉนวน

2. Leakage Reactance

ผลของ leakage reactance จะทำให้ค่าอัตราส่วนความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดค่าของ leakage reactance โดยการพันขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิใกล้ๆ กัน จะทำให้ค่าของ leakage reactance ทางทุติยภูมิลดลง และการใช้แกนแบบบางแหวนจะช่วยให้ค่าของ leakage reactance ลดลงได้ ซึ่งจะให้ความคลาดเคลื่อนลดลง

3. การปรับแต่งจำนวนรอบ (Turns Compensation)

ความเที่ยงตรงของหม้อแปลงกระแสจะถูกปรับแต่ง โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของขดลวดปกติอัตราส่วนของ T/T_p แปรผันกับอัตราส่วนของกระแส การเปลี่ยนแปลงจำนวนรอบจะเปลี่ยนทางด้านทุติยภูมิ การเปลี่ยนทางด้านปฐมภูมินั้นไม่ควรทำเพราะการเปลี่ยนเพียงหนึ่งรอบ จะมีต่อกระแสมาก จากสมการที่ (14) ค่าของ actual transformation ratio คือ

$$R = n + \frac{I_c}{I_p} \dots \dots (14)$$

ถ้ากำหนดให้ค่า nominal ratio (K_n) เท่ากับค่า turn ratio (n) ค่าของ actual transformation ratio (R) จะมีค่ามากกว่า nominal ratio

ดังนั้นถ้าเราลด turns ratio หรือ nominal ratio ค่า actual transformation ratio จะถูกลดลงมาด้วยในการทำให้ค่า actual transformation ratio มีค่าเข้าใกล้ nominal ratio สามารถพิจารณาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้

CT. 1000/5 A มีค่า loss component (I_c) เท่ากับ 0.6 % ของกระแสการกระตุ้น (exciting current)

$$\text{nominal ratio } K_n = \frac{1000}{5} = 200$$

$$\text{Loaa component } I_c = \frac{0.6}{100} \times 1000 = 6 \text{ A.}$$

$$\text{จำนวนรอบทางด้านปฐมภูมิ } T_p = 1$$

ถ้าค่าของ turn ratio เท่ากับ nominal ratio เราจะได้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิ } T_u = nT_p = 200 \times 1 = 200$$

$$\text{ค่า Actual ratio } R = \frac{n+1}{l} = \frac{200+6}{5} = 201.2$$

ถ้าสมมติว่าไม่ใช่จำนวนรอบ 200 รอบทางด้านทุติยภูมิ จะใช้จำนวนรอบเป็น 199 รอบ ดังนั้นค่า actual transformation ratio ที่แก้ไขจำนวนรอบจะได้เท่ากับ

$$R = \frac{n+1}{l} = \frac{199+6}{5} = 200.2$$

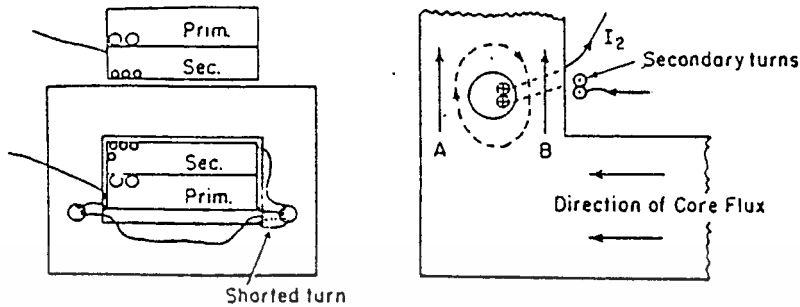
ฉะนั้นเราพบว่าการลดจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิเล็กน้อยจะทำให้ค่า actual transformation ratio จะมีค่าใกล้เคียง nominal ratio

การลดจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิลงหนึ่งหรือสองรอบจะทำให้ actual transformation ratio มีขนาดเกือบจะเท่ากับ nominal ratio ของ CT. แต่การลดจำนวนรอบจะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความคลาดเคลื่อนของมุมเฟส (phase angle error) สำหรับ CT.

การลดจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ สิ่งที่เกิดขึ้นคือกระแสและเบอร์เตนของ CT. จะเปลี่ยนไป วิธีการนี้ใน CT. จะเรียกว่า "Compensated"

4. วิธีการของ Wilson (Wilson compensation Method)

วิธีนี้มีต้นกำเนิดจาก M.S. Wilson แห่ง General Electric Company การลดขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะทำให้อัตราส่วนความคลาดเคลื่อน (Ratio Error) ลดลงแต่มันไม่ได้ลดค่าของความคลาดเคลื่อนมุมเฟส (phase angle errors). และวิธีการในลักษณะนั้นเป็นการเปลี่ยน Ratio อย่างหยาบ ๆ มีวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้ขดลวดออกซิเลียร์ของขดทุติยภูมิ (Auxiliary secondary turns) ทางด้านทุติยภูมิสอดผ่านรูของแกนเหล็กและต่ออนุกรมกับขดลวดทุติยภูมิและจะมีขดลวดอย่างหนึ่งจะถูกลัดวงจร (short circuit) เพื่อใช้ในการปรับปรุง phase angle



รูปที่ 2.9 Wilson method of coimpensating a current transformer.

(a) Diagram of the transformer. (b) Detail of one corner, showing relative this dirirtions.

ขอลวดออกขีลเลอร์ที่จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในรอบๆช่องว่างที่แสดงไว้ในรูป (9.8) จะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นสองส่วนคือเส้นแรงแม่เหล็กเสริม A และเส้นแรงแม่เหล็กหักล้าง B ที่ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กค่าสูงมากชั้น (l_1 หรือ l_2 มีค่ามาก) ในส่วนของ A เส้นแรงแม่เหล็กจะสูงขึ้น จนทำให้บริเวณ A ถึงจุดอิ่มตัวเส้นแรงแม่เหล็กในส่วน A จะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นสัดส่วนต่อการเพิ่มของกระแส (nonlinear) การเพิ่มของเส้นแรงแม่เหล็กจะน้อยกว่าการเพิ่มของกระแส ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กก็ผ่านมายังบริเวณของ B แทน และจะตัดผ่านขดลวดออกขีลเลอร์ทางทุติยภูมิ ซึ่งเหมือนกับว่าจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิสูงขึ้นจึงทำให้กระแส I_2 ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ CT. ในภาวะไม่ได้มีขดลวดชดเชยและทำให้อัตราส่วนของ R เพิ่มขึ้น การกระทำดังกล่าวนี้เพื่อต้องการให้ Curve ของ ratio และ phase angle เรียบขึ้น (รูปที่ 2.6, 2.7) และมีความคลาดเคลื่อนในทางปฏิบัติที่คงที่และในแนวคิดนี้จะทำให้ทราบขนาดของกระแสทุติยภูมิที่ทำให้ที่มีความคลาดเคลื่อนมากออกไป ประโยชน์จากหลักการนี้ทำให้สามารถปรับ Curve ให้เพิ่มขึ้น หรือลดลงด้วยการปรับแต่งจำนวนรอบขดลวดออกขีลเลอร์ทางทุติยภูมิ

การลัดวงจรรอบบริเวณแกนเหล็ก จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กกล้าหลังกับเส้นแรงแม่เหล็กหลักการทำในลักษณะนี้จะเหมือนเป็นการ Shading bandการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กกล้าหลังนี้จะส่งผลทำให้กระแสทุติยภูมิ เข้าใกล้กับกระแสปฐมภูมิและทำให้อัตราส่วนความคลาดเคลื่อนมุมเฟส (phase angle error) มีค่าลดลง

บทที่ 3

โครงสร้างของหม้อแปลงกระแส

3.1 ลักษณะโครงสร้างของ CT. สำหรับงาน High Voltage

ประกอบด้วย primary winding ซึ่งลักษณะเป็นแผ่นเหล็กยาวโค้งจาก High Voltage ลงมาด้านล่างแล้วไปออกที่ High Voltage อีกด้านหนึ่ง Secondary Winding จะอยู่ในโครงสร้างส่วนล่างลักษณะการพันอาจจะพันตามนอนหรือตามขวางกับ primary winding ดังรูป 3.1, 3.2 จาก Secondary Winding จะถูกดึงออกมาเป็น Terminal ต่างๆอาจจะมีตั้งแต่ 1-4 Cores จำนวน Terminal ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับ Ratio ของ CT. ที่ต่ออยู่ ส่วน Winding ทั้งหมดจะแช่อยู่ใน Insulation Oil โดย Porcelain Shell หุ้มภายนอกอีกทีหนึ่ง

3.1.1 การใช้งานของ CT. สำหรับงาน High voltage

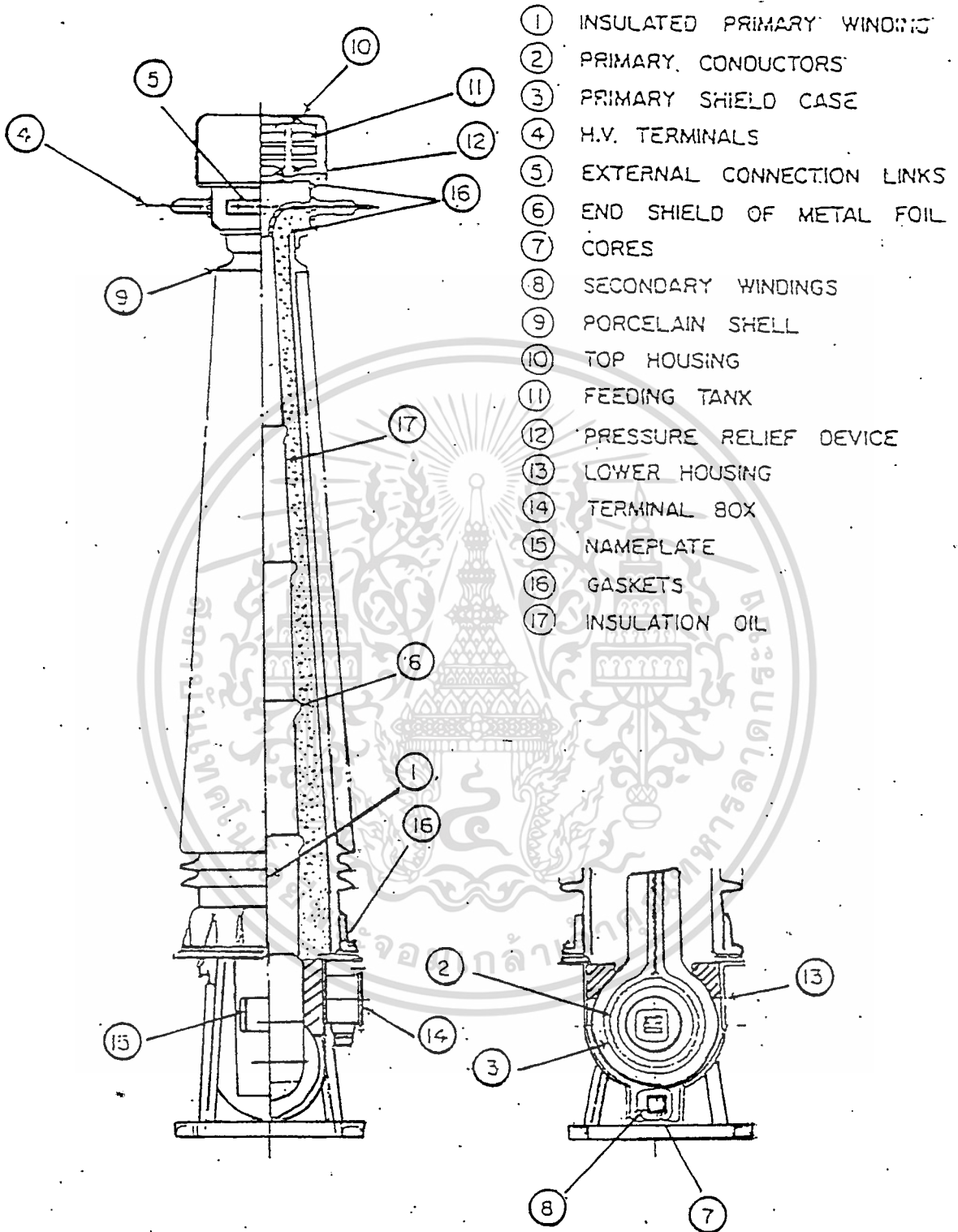
จาก Secondary Winding จะแยกออกมาเป็น Core โดยแบ่งเป็น Ratio ของ CT. ซึ่งอาจจะปรับกระแสได้ตั้งแต่ 50 - 5000 Amps. โดยกระแสทางด้าน Secondary เป็น 1 Amp หรือ 5 Amps. แล้วแต่นิตและยี่ห้อ CT. ชนิดนั้น ๆ ดังตัวอย่างของ ratio ของ CT.

- BBC TYPE AOT 245 KA -

100/200/300/400/500/600/800/900/1000/1200 : 5// 5// 5// 5 A.

จากตัวอย่างจะเห็นว่า CT. สามารถปรับกระแสให้ใช้ได้ 10 Ratio ตั้งแต่ 100-200 Amps. กระแสทางด้าน Secondary ออก 5 Amps. โดยมี 4 Cores ให้เลือกใช้งาน การใช้งานขดลวด Primary จะต่อเข้ากับสายส่ง โดยออกแบบให้กระแสไหลในด้าน Secondary ได้ไม่เกินขีดจำกัด ในขณะที่มีกระแสไหลด้าน Primary เต็มที่ ผู้ปฏิบัติควรรู้ค่า CT.-Ratio ในขณะที่ใช้งานอยู่ เพื่อจะได้ทราบว่า C.T. จะเต็ม เมื่อไหร่จะได้เตรียมการแก้ไขได้ทันที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

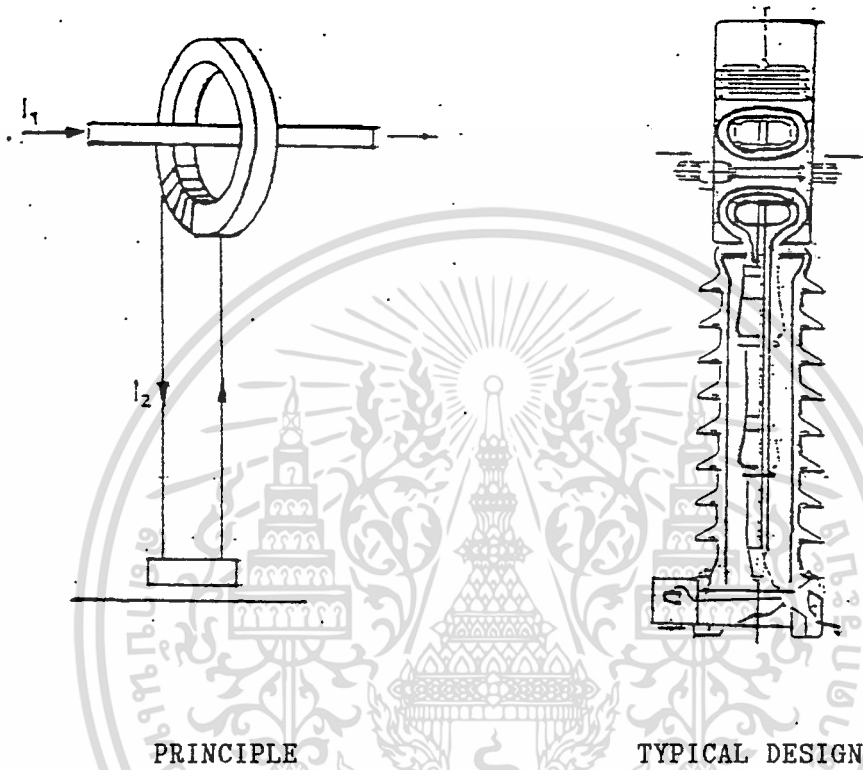


รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของ CT. ยี่ห้อ NISSIN

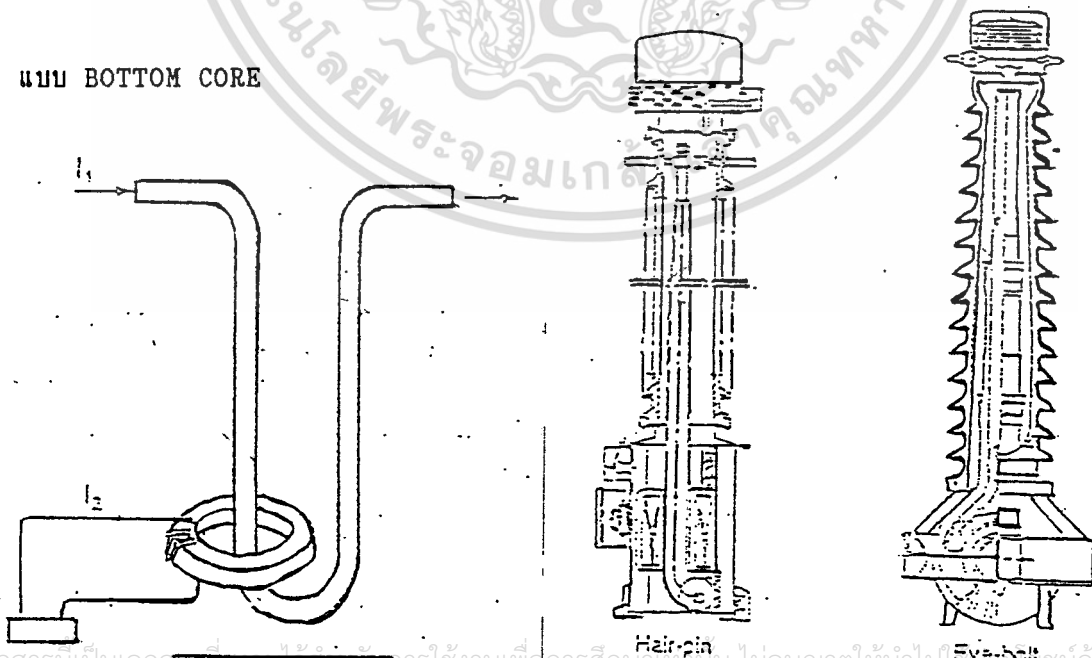
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 หลักการและตัวอย่างโครงสร้างของ CT. โดยทั่วไป

- แบบ TOP CORE



- แบบ BOTTOM CORE



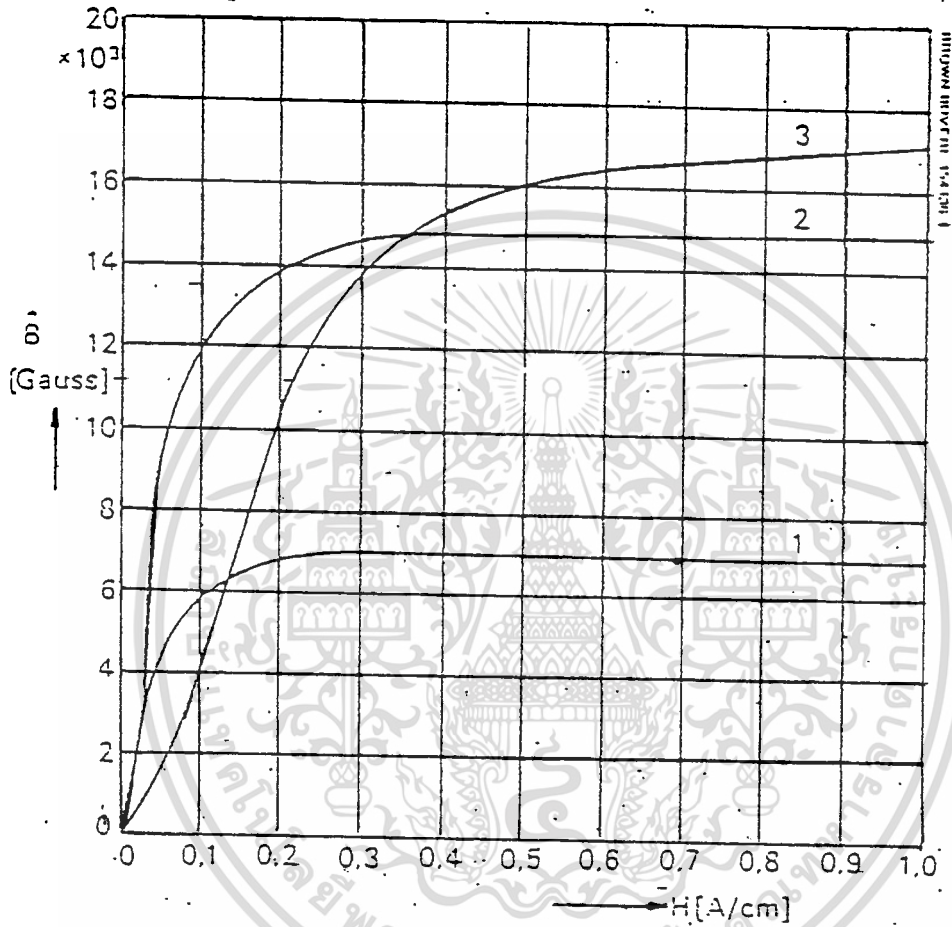
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น **PRINCIPLE** ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิง **TYPICAL DESIGN** ครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบระหว่าง CT. แบบ TOP CORE และ BOTTOM CORE

Application for comparision	Top core	Bottom core
1. Primari current	เหมาะสมกับ > 1000 A	เหมาะสมกับ < 1000 A
2. Electromechanical fore due to short circuit current	Low	High
3. Partial discharge	Sensitive	not Sensitive
4. Uniform distribution of magnetic fields in core	Symmetrical design and low flux leakage	Local saturation in the core me be occurred (not good)
5. Oil circulation	Difficult to cool	Better
6. Thermal loss	Short length for primary conductor	Long primary conductor (High)
7. Number of cores	Limit (ไม่ควรมีเกิน 4 cores)	No limit
8. น้ำหนัก	เบากว่า	หนักกว่า
9. Seismic condition	High CG. (not good)	Low CG. (good)
10. Effect of explosion	รุนแรงน้อยกว่า	รุนแรงมากกว่า
11. ราคา	> 1000 A : Low	> 1000 A : High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ตัวอย่างลักษณะ MAGNETIZATION CURVE ตามชนิดของวัสดุที่ใช้ประกอบเป็น CORE



H = Field strength [A/cm]

B = Peak value of induction [Gause]

1 = Nickel-iron with about 75% Ni

2 = Nickel-iron with about 50% Ni

3 = Cold-rolled silicon-iron with rolled profile

For precision metering cores, core material 1 and for

protection cores, preferably core material 3 are used. ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 Symbols and Accuracy class 1B4 CT.

3.2.1 CT. SYMBOLS (ANSI/IEEE C57.13-1978)

SYMBOL	SIGNIFICANCE
: (colon)	Ratio between primary and secondary amperes Example : Current transformer with single primary winding and secondary winding. Current ratio 100 : 5 A
% (Lower case)	Current ratings of transformer with 3 winding in two or more coils for series or multiple connection. Example : Current transformer with primary winding in two coils for series or multiple connection for two ratios. Current ratio 100 % 200 : 5 A
// (double slant line or double virgule)	Ampere rating of separate secondary windings each having an impedance core. Example : Current transformer with two separate secondary winding and two cores. Current ratio 100 : 5 // 5 A
& (ampersand)	Ampere ratings of separate primary winding on one core. (a) Transformer with two or more primary winding used individually. Example : Current transformer with two primary windings. Current ratio 100 & 500 : 5 A (b) Totalizing transformer with two or more primary winding all used simultaneously and connected in different circuits. Example : Totalizing current transformer with three primary winding. Current ratio 5&5&5 : 5 A (e) Transformer for 3-wire single phase circuit with two separate primary windings. Example : Current transformer for 3 wire single phase circuit. Current ratio 100&100 : 5 A
/ (single slant line or virgule)	Different primary current ratings obtained by taps in the secondary winding. Example : Current transformer with taps in secondary winding for additional ratios. Current ratio 300/400/600 : 5 A

3.2.2 ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบในการจัดแบ่ง ACCURACY CLASS ของ CT. ระหว่าง
มาตรฐานต่างๆ

Application	Europe (*) IEC 185	Country and Standard		
		USA ANSI C57.13	Canada CAN3-C13-M83	Australia AS 1675
Precision metering	0.2	0.3	0.3	0.5
Commercial metering	0.5	0.6	0.6	1.0
Industrial metering	1.0	1.2	1.2	2.0
Instruments				2.0
Instruments	3.0			5.0
Instruments	5.0			
Protection	5PX			
Protection	10PX			10P
Protection	5P20		2.5L (2.5%)	10P
Protection	10P20	C (10%)	10L (10%)	10P

NOTE : (*) IEC classes are valid with minor modification for most European countries.

X = Accuracy limit factor to be given.

For ANSI and CSA it is 20, so also for AS 1675 if not specified

The above comparison is only approximative and is for practical use only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 CT. ACCURACY LIMIT FOR METERING

- IEC 185 (1987)

Accuracy class	+/- % Current (ratio) error at % of rated current shown below					+/- Phase displacement at % of rate current shown below							
						Minutes				Centiradians			
	5	20	50	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0.4	0.2	—	0.1	0.1	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	—	0.2	0.2	30	15	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3
0.5	1.5	0.75	—	0.5	0.5	90	45	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9
1.0	3.0	1.5	—	1.0	1.0	180	90	60	60	5.4	2.7	1.8	1.8
3	—	—	3	—	3	not specified							
5	—	—	5	—	5	not specified							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 CT. ACCURACY LIMITS FOR PROTECTION

- ANSI/IEEE C57.13-1978

Accuracy class	Error limits		Secondary terminal voltage
	Times rated current	Ratio error %	
C100 (*) T100	20	10	100
C200 T200	20	10	200
C300 T300	20	10	300
C400 T400	20	10	400

NOTE : (*) C = Calculated, for cores with evenly distributed winding, i.e. when leakage flux is negligible.
T = Tested, for cores with undistributed winding, i.e. when leakage flux is appreciable.

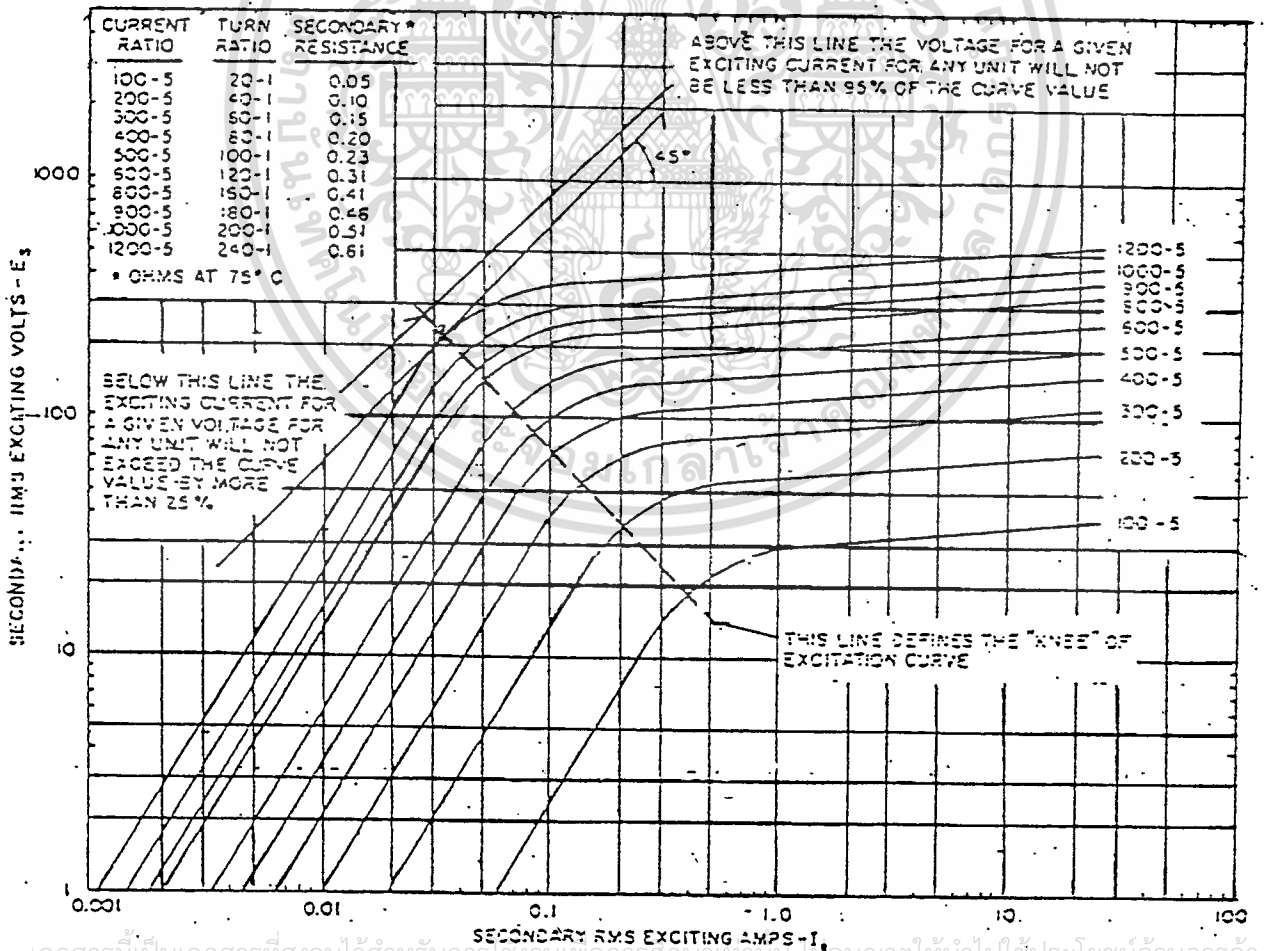
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- IEC 185 (1987)

Accuracy class	+/- % current error at rated primary current	+/- Phase displacement at rated primary current		% Composite error at rated accuracy limit primary current
		Minutes	Centiradians	
5P	1	60	1.8	5
10P	3	-	-	10

3.2.5 TYPICAL EXCITATION CURVE FOR C CLASS MULTIRATIO CT.

- ANSI/IEEE C57.13-1978



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 STANDARD BURDEN FOR CT.WITH 5 A SECONDARIES (ANSI/IEEE

C57.13-1978)

TABLE 4-1

STANDARD BURDENS FOR CURRENT
TRANSFORMERS WITH 5 A SECONDARIES⁽¹⁾

Burden Designation (**)	Resistance (ohm)	Inductance (mH)	Impedance (ohm)	Volt Amperse (at 5 A)	Power factor
Metering Burdens					
B-0.1	0.09	0.116	0.1	2.5	0.9
B-0.2	0.18	0.232	0.2	5.0	0.9
B-0.5	0.45	0.580	0.5	12.5	0.9
B-0.9	0.81	1.04	0.9	22.5	0.9
B-1.8	1.62	2.08	1.8	45.0	0.9
Relaying Burdens					
B-1	0.5	2.3	1.0	25	0.5
B-2	1.0	4.6	2.0	50	0.5
B-4	2.0	9.2	4.0	100	0.5
B-8	4.0	18.4	8.0	200	0.5

NOTE: (1) if a current transformer is rated at other 5 A, ohmic burdens for specification and rating may be derived by multiplying the resistance and inductance of the table by $[5/(\text{ampere rating})]^2$, the VA at rated current and the power factor remaining the same.

(2) These standard burden designations have no significance at frequencies other than 60 Hz. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลิขสิทธิ์หรือการเป็นลิขสิทธิ์ในเอกสารนี้โดยผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 SECONDARY TERMINAL VOLTAGE RATING AND THEIR ASSOCIATED
BURDENS (ANSI/IEEE C5.13-1978)

TABLE 4-2

**Secondary terminal voltage rating
and their Associated burden**

Secondary Terminal (Voltage)	Standard Burden
10	B-0.1
20	B-0.2
50	B-0.5
100	B-1
200	B-2
400	B-4
800	B-8

NOTE : Secondary terminal voltage ratings are based secondary current of five A (100 A at 20 times rated) and standard burdens.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบหม้อแปลงกระแส

เป็นการทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงของอัตราส่วน และมุมเฟสของ CT. ที่สภาวะทำงาน ค่าความเที่ยงตรงดังกล่าวจะมีส่วนสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ เช่น อัตราส่วนจำนวนรอบ กระแสกระตุ้น ค่าความสูญเสียจากขดลวดและค่าลี้เกจวีแอกแตนซ์ เป็นต้น ซึ่งการออกแบบจะต้องจำกัดพารามิเตอร์ดังกล่าวให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการได้

วิธีการทดสอบแบบพื้นฐานแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1. การหาค่าความคลาดเคลื่อนทางตรง (Direct method)

เป็นวิธีที่หาค่าความคลาดเคลื่อนโดยเปรียบเทียบเวกเตอร์ด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิที่ทราบค่าจากการวัดจากหม้อแปลงทดสอบ

2. การหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยการเปรียบเทียบ (Comparative method)

เป็นวิธีหาค่าความคลาดเคลื่อน โดยการเปรียบเทียบค่า ที่วัดได้ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมาตรฐานที่นำมาอ้างอิงกับหม้อแปลงทดสอบภายใต้สภาวะการทำงานที่กระแสปฐมภูมิค่าเดียวกัน จากการทดสอบจะได้รับความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทั้งสอง ซึ่งจะสามารถนำมาหาค่าความคลาดเคลื่อนอัตราส่วนและมุมเฟสได้ โดยการคำนวณอ้างอิงกับความสัมพันธ์ ระหว่างเวกเตอร์ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมาตรฐาน

จากที่กล่าวมาข้างต้น เป็นวิธีพื้นฐานที่จะประยุกต์เข้าสู่วิธีทดสอบดังนี้

1. วิธีดีฟเลคชั่น (Deflection method)

จะใช้การแสดงผลของเครื่องวัดที่เหมาะสม เช่น วัดมิลิแอมป์แบบอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับวัดเวกเตอร์ที่จะพิจารณาการหาค่าความคลาดเคลื่อนอัตราส่วนและมุมเฟส จะคำนวณจากขนาดของการแสดงผลที่อ่านได้วิธีนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นวิธีการที่เรียกว่า "Direct Reading"

2. วิธีนูล (Null Method)

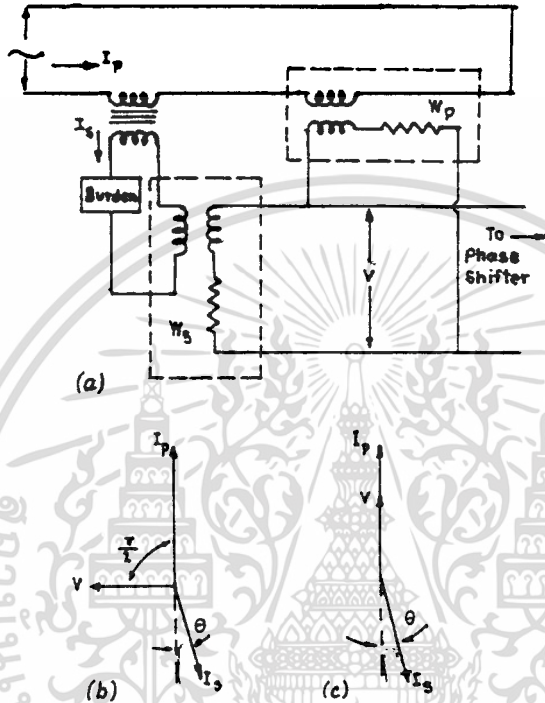
จะทดสอบโดยใช้ลักษณะที่ทำให้เกิดสมดุลย์ หรือใช้การชดเชย การทำให้เกิดสมดุลย์และการชดเชยจะแสดงได้โดยตัวชี้ค่าของนูล (Null Indicator) ซึ่งการหาค่าความคลาดเคลื่อนอัตราส่วนและมุมเฟส จะคำนวณจากอุปกรณ์ในวงจรที่ใช้ทดลอง หรืออาจจะเป็นแบบ

Direct Reading ในเทอมของการปรับตั้งอุปกรณ์ภายในวงจร ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 Direct Deflection Method

เป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนอัตราส่วนและมุมเฟส ของ CT. ใน
 ทอมการอ่าน วัดคัมมิเตอร์ แบบอิเล็กทรอนิกส์สองตัวแสดงดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Direct Deflection

จากรูปขดลวดกระแสของวัดคัมมิเตอร์ W_p จะต่ออนุกรมกับขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลงทดสอบ เพื่อเป็นส่วนผ่านกระแสปฐมภูมิ I_p ส่วนขดลวดกระแสของวัดคัมมิเตอร์ W_s จะต่ออยู่ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบ เพื่อเป็นส่วนผ่านกระแสทุติยภูมิ I_s แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดแรงดันของวัดคัมมิเตอร์ทั้งสองจะได้จาก Phase Shifter Transformer ซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง และค่าเบอรเดนจะต้องรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดกระแสของวัดคัมมิเตอร์ W_s ด้วย

ขั้นตอนการทดสอบจะกระทำดังนี้วัดคัมมิเตอร์ W_p เป็นวัดคัมมิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงสภาวะของแรงดันไฟฟ้า V ว่าอยู่ในลักษณะดังฉากหรืออินเฟสกับกระแสปฐมภูมิ ส่วนวัดคัมมิเตอร์ W_s เป็นวัดคัมมิเตอร์ที่ต้องนำค่าที่แสดงมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน การทดสอบจะเริ่มต้นจาก ปรับ Phase Shifter Transformer ให้จ่ายแรงดันไฟฟ้า V แล้วอ่านวัดคัมมิเตอร์ W_p ได้เท่ากับ

ศูนย์ แล้วอ่านวัตต์มิเตอร์ W_{s1} ได้เท่ากับ W_{s1}

$$W_{s1} = VI_s \cos \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) = -VI_s \sin \theta$$

และทำการปรับ Phase Shifter Transformer ให้แรงดันไฟฟ้า V ชีฟเฟสไปอีก $\pi/2$ ซึ่งในขณะนั้นจะต้องอ่านวัตต์มิเตอร์ W_{s2} ได้เป็นค่าสูงสุดและอ่านวัตต์มิเตอร์ W_{s1} ให้เท่ากับ W_{s2}

$$W_{s2} = VI_s \cos (\pi + \theta) = -VI_s \cos \theta$$

และขณะเดียวกันอ่านวัตต์มิเตอร์ W_p ให้เท่ากับ W_{s2} ซึ่งเป็นค่าสูงสุด

$$W_{p2} = VI_p$$

จากค่า W_{s1} , W_{s2} และ W_{p2} มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\frac{W_{p2}}{\sqrt{W_{s1}^2 + W_{s2}^2}} = \frac{VI_p}{\sqrt{VI_s^2 \sin^2 \theta + VI_s^2 \cos^2 \theta}} = \frac{VI_p}{VI_s}$$

= $\left| \frac{I_p}{I_s} \right|$ เป็นอัตราส่วนของหม้อแปลง

และถ้า $W_{s2} \gg W_{s1}$ จะมีค่าประมาณของอัตราส่วนหม้อแปลง

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{W_{p2}}{W_{s2}}$$

$$\text{และ } \frac{W_{s1}}{W_{s2}} = \frac{VI_s \sin \theta}{VI_s \cos \theta} = \tan \theta$$

เมื่อ θ มีค่าเล็ก ๆ

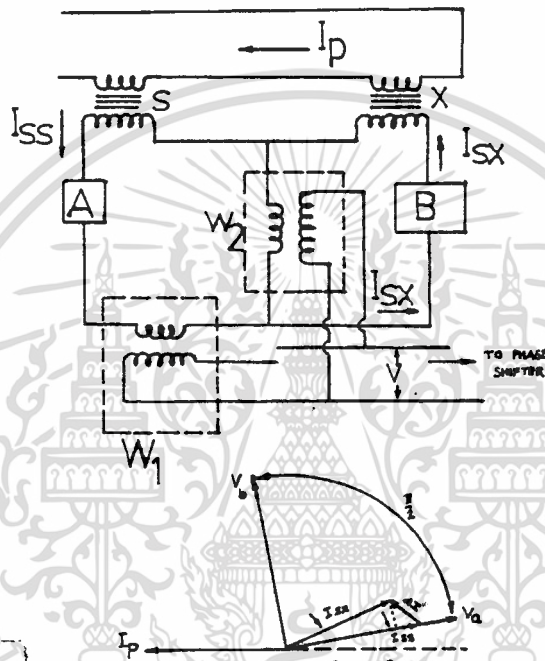
$$\theta \approx \frac{W_{s1}}{W_{s2}} \quad \angle = \text{ค่ามุมเฟส Phase angle}$$

จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนและมุมเฟสของหม้อแปลง จะหาจากเทอมของการอ่านวัตต์มิเตอร์การ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทดสอบโดยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและตรงกับทฤษฎี แต่ความเที่ยงตรงไม่สูงนัก (0.2-0.5% แล้ว
เมื่อก่อนเคยใช้วิธีนี้มาเห็นแต่เห็นแต่ตรงๆ ไม่ค่อยเจอใครใช้

แต่คุณภาพของวัตต์มิเตอร์) และที่สำคัญเบอร์เด่นชดลวดกระแสวัตต์มิเตอร์จะต้องมีค่า 5 VA หรือมากกว่านี้

4.2 Compative Deflection Method

การทดสอบวิธีนี้อาจเรียกว่า Sillsbee Deflection Method เป็นวิธีที่หาค่าความคลาดเคลื่อนอัตราส่วนและมุมเฟสโดยการอ่านจากเครื่องวัดไฟฟ้า และนำมาคำนวณโดยมีหม้อแปลงมาตรฐานเป็นเกณฑ์ในการอ้างอิง ตัวอย่างแสดงดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการต่อวงจรทดสอบแบบ Compative Deflection

จากรูปจะหาอัตราส่วนและมุมเฟสของหม้อแปลง X เป็นหม้อแปลงที่ไม่ทราบค่า และหม้อแปลง S เป็นหม้อแปลงมาตรฐาน ซึ่งหม้อแปลงทั้งสองมี Nominal Ratio และกระแสปฐมภูมิเหมือนกัน วัตต์มิเตอร์ W_1 เป็นตัวแสดงสภาวะว่าแรงดันไฟฟ้า V (มีค่าคงที่) จาก Phase Shifter Transformer จะตั้งฉากหรืออินเฟสกับกระแสทุติยภูมิ I_{s2} และชดลวดกระแสของวัตต์มิเตอร์ W_1 จะต้องทนกระแสทุติยภูมิ I_{s2} ได้ ส่วนวัตต์มิเตอร์ W_2 ที่ชดลวดกระแสจะวัดค่ากระแสทุติยภูมิที่แตกต่างกัน I ของหม้อแปลงทั้งสอง

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากปรับแรงดันไฟฟ้า V จาก Phase Shifter Transformer ให้ตั้งฉากกับกระแส I_{s2} โดยอ่านจากวัตต์มิเตอร์ W_1 มีค่าเท่ากับศูนย์ อ่าน W_2 ได้เท่ากับ W_{21} ปรากฏใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} W_{e1} &= VI_{sx} \cos [\pi/2 - (\theta_x - \theta_s)] \\ &= VI_{sx} \sin (\theta_x - \theta_s) \end{aligned}$$

และเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้า V ไปอีก $\pi/2$ วัตต์มิเตอร์ W_1 จะอ่านค่าได้สูงสุด และอ่าน W_2 ได้เท่ากับ W_{e2}

$$W_{e2} = VI_{sx} - VI_{sx} \cos (\theta_x - \theta_s)$$

และ $W_{12} = VI_{ss} \Rightarrow I_{ss} = \frac{W_{12}}{V}$

อัตราส่วนกระแสของหม้อแปลงทดสอบ

$$R_x = \frac{I_p}{I_{sx}}$$

และอัตราส่วนกระแสของหม้อแปลงมาตรฐาน จะได้

$$R_s = \frac{I_p}{I_{ss}}$$

$$\begin{aligned} \frac{R_x}{R_s} &= \frac{I_{ss}}{I_{sx}} = \frac{VI_{ss}}{VI_{sx}} \approx \frac{VI_{ss}}{VI_{ss} - W_{e2}} \\ &\approx \frac{1}{1 - \frac{W_{e2}}{VI_{ss}}} \approx 1 + \frac{W_{e2}}{VI_{ss}} \end{aligned}$$

หรือ $R_x \approx R_s \left(1 + \frac{W_{e2}}{VI_{ss}} \right)$

และ $\tan(\theta_x - \theta_s) \approx \theta_x - \theta_s$

$$\approx \frac{W_{e1}}{VI_{ss} - W_{e2}} \approx \frac{W_{e1}}{VI_{ss}} \quad \text{เมื่อ } W_{e2} < V \Delta I \ll VI_{ss}$$

จะได้ $\theta_x \approx \theta_s + \frac{W_{e1}}{VI_{ss}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าอัตราส่วนและมุมเฟสของหม้อแปลงทดสอบ จะอยู่ในเทอมของหม้อแปลงมาตรฐาน และค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ ข้อสังเกตก็คือ วัตต์มิเตอร์ W_1 นำกระแสทุกติสภูมิ 5 แอมป์ ส่วนวัตต์มิเตอร์ W_2 นำกระแสทุกติสภูมิที่แตกต่างกัน จะมีพิกัดขดลวดกระแสต่างๆ

ให้ Z_x เป็นอิมพีแดนซ์ขดลวดกระแสของวัตต์มิเตอร์ W_2 รวมกับขดลวดกระแสของหม้อแปลงทดสอบ

Z_c เป็นเบอร์เดนทางทุติสภูมิ

Z_w เป็นอิมพีแดนซ์ของขดลวดกระแสของวัตต์มิเตอร์ W_2

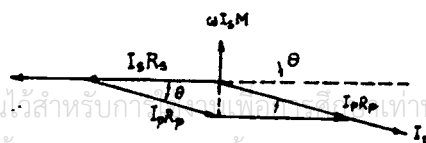
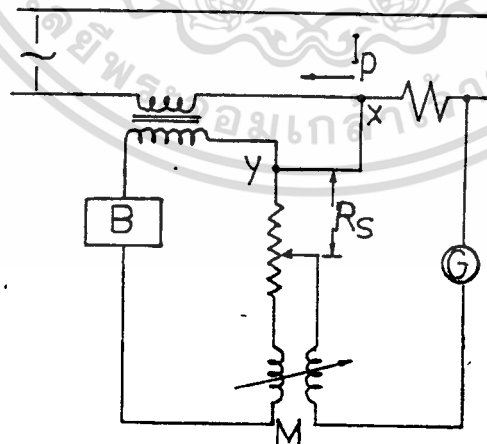
$$Z_c I_{sx} + Z_w \Delta I = Z_x I_{sx}$$

$$Z_c = Z_x - \frac{\Delta I}{I_{sx}} \times Z_w$$

ปกติค่าเบอร์เดนที่ใช้จะต้องมีค่าน้อยกว่า Z_x แต่เมื่อเปรียบเทียบ Z_x กับ $\Delta I / I_{sx}$ จะเห็นว่า $(\Delta I / I_{sx}) \times Z_w$ มีค่าน้อยมาก ๆ อาจตัดทิ้งไปได้

4.3 Direct Null Method (Mutual Inductance Method)

วิธีนี้ใช้วงจร Potentiometer Network เป็นตัววัดแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_p ในวงจรปฐมภูมิ และแรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_s ในวงจรทุติสภูมิซึ่งแรงดันทั้งสองจะมีทิศทางตรงข้ามกันแต่จะมีการต่างเฟสกันด้วยมุมเฟส θ ซึ่งมุมต่างเฟสนี้จะชดเชยโดยใช้คาปาซิแตนซ์หรืออินดักแตนซ์การใช้วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ให้ความถูกต้องสูง มีความยืดหยุ่นและใช้เวลาไม่มากนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงการต่อวงจรทดสอบ Direct Null

จะเป็นการง่ายถ้าจะสมมติให้แรงดันตกคร่อมด้านปฐมภูมิ และแรงดันตกคร่อมด้านทุติยภูมิ จะอยู่ในเฟสเดียวกับกระแสปฐมภูมิ จากรูปที่ 12 จะได้ว่า

$$\text{อัตราส่วนกระแส } \frac{I_p}{I_s} = \frac{R_s}{R_p \cos \theta}$$

$$\text{และ } \tan \theta = \frac{WMI_s}{R_s I_s} = \frac{WM}{R_s}$$

$$\cos \theta = \frac{R_s I_p}{R_p I_p}$$

$$\text{มุมเฟส } \theta \approx \frac{WM}{R_s}$$

ถ้ามุมเฟสด้านปฐมภูมิ θ_p และมุมเฟสด้านทุติยภูมิ θ_s มีความต่างเฟสกันอยู่ด้วยมุม $\theta_p - \theta_s$

$$\theta \approx \frac{WM}{R_s} + (\theta_p - \theta_s)$$

ในการใช้อินดักทีฟคัปปลิง (Inductive Coupling) ที่ปรับค่าในวงจรในทางปฏิบัติ จะต้องหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้สายตัวนำโคแอคเซียล ต่อในวงจร ทุติยภูมิ หรือถ้าไม่มีสายโคแอคเซียลก็ใช้ตัวนำทั่ว ๆ ไป (สายต่อวงจรธรรมดา) แต่ใช้เป็น ส่วนเส้นคู่แทน หรืออาจใช้สายตัวนำเป็น Potential lead (สายตัวนำศักดาไฟฟ้าจากจุด X ไป จุดอื่น ๆ) ที่ต่อจากจุด X และ Y ดังรูป 12

การทดสอบด้วยวิธีนี้มีค่าความเที่ยงตรงสูง อัตราส่วนประมาณ 0.01 % และมุมเฟส 0.3 องศา

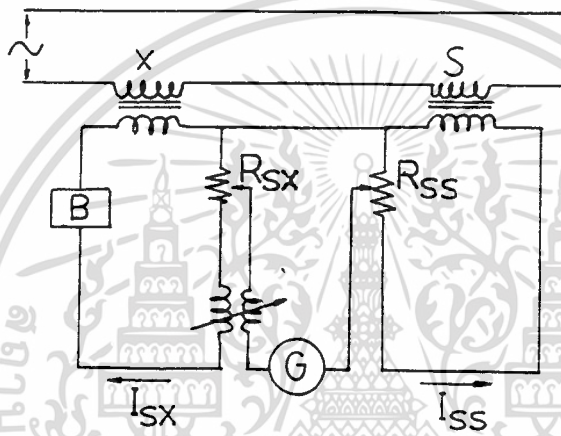
4.4 Comparative Null Method

สำหรับหม้อแปลงกระแสขนาด 2500/5, 12000/5 หม้อแปลงมาตรฐานจะต้องมีลักษณะ เป็น laminated ring core ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิพันอยู่ในแกนเหล็กกระจายอย่าง สม่ำเสมอและจากการที่หม้อแปลงมีอัตราส่วนสูงๆจะต้องทำการประจุกต์โดยการต่อขดลวดอนุกรม หรือขนานก็ได้

เอกสารนี้ เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
ไปใช้การวิจัย ทั้งสิ้น สิทธิทั้งหม้อแปลงหม้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสทั้งสองมี Mutual Inductance ต่อรวมอยู่ด้วย ฉะนั้นจะ

ถือว่าอัตราส่วนของ Flux Linkage ที่เกิดกับขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิคงที่ และ CT. มีการพันขดลวดแบบกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทำให้อิมพีแดนซ์ต่อรอบของขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิทนต่อกระแสได้ (ปกติการทดสอบหาค่าอัตราส่วนและมุมเฟส จะไม่เกิน 0.02 % และ 1 องศาตามลำดับ)

- N_s เป็นอัตราส่วนของหม้อแปลงมาตรฐาน S
- θ_s เป็นมุมเฟสของหม้อแปลงมาตรฐาน S



รูปที่ 4.4 แสดงการต่อวงจรทดสอบแบบ Compative Null

จะได้ว่า

$$I_{ss} = \frac{I_{sx}}{N_s} (\cos \theta_s + j \sin \theta_s)$$

$$\frac{I_{sx}}{N_s} (1 + j \theta_s) \quad \text{เมื่อ } \theta_s \text{ มีค่าน้อยๆ}$$

ความต้านทานที่ต่อขนานวงจรทุติยภูมิของหม้อแปลงมาตรฐาน S คือ R_{ss} และมีมุมเฟส θ_{ss} ส่วนความต้านทานที่ต่อขนานวงจรทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบ X คือ R_{sx} และมีมุมเฟส θ_{sx}

$$E_{ss} = I_{ss} R_{ss} (1 + j \theta_{ss})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ N_s แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันตกคร่อม R_{sx} : $E_{sx} = I_{sx} R_{sx} (1 + j \theta_{sx})$

แรงดันตกคร่อม M : $E_m = j \omega M I_{sx}$

$$E_{ss} = E_{sx} - E_m$$

$$\frac{I_p}{N_s} R_{ss} [1 + j (\theta_{ss} + \theta_s)] = I_{sx} R_{sx} [1 + j (\theta_{sx} - \frac{\omega M}{R_{sx}})]$$

$$\frac{I_p}{I_{sx}} \frac{R_{ss}}{R_{sx}} - N_s [1 + j (\theta_{sx} - \frac{\omega M}{R_{sx}}) - \theta_{ss} - \theta_s]$$

มุมเฟสของหม้อแปลงทดสอบ

$$\theta_s = \left| \frac{\omega M}{R_{sx}} + \theta_s + \theta_{ss} - \theta_{sx} \right|$$

จากสมการที่กล่าวมา

$$\frac{I_p}{I_{sx}} \frac{R_{ss}}{R_{sx}} - N_s [1 - j \tan \theta_x]$$

$$\frac{R_{ss}}{R_{sx}} - N_s \frac{[\cos \theta_x + j \sin \theta_x]}{\cos \theta_x}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของหม้อแปลงทดสอบจะเท่ากับ

$$N_s = \left| \frac{I_p}{I_{sx}} \right| = \frac{R_{ss}}{R_{sx}} \times N_s \times \frac{1}{\cos \theta_x}$$

มุมเฟสของหม้อแปลงทดสอบ

$$\theta_x = \left| \frac{\omega M}{R_{sx}} + \theta_s + \theta_{ss} - \theta_{sx} \right|$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่กล่าวมา

$$\begin{aligned} \frac{I_p}{I_{s,x}} &= \frac{R_{s,x}}{R_{s,s}} N_s [1 - j \tan \theta_x] \\ &= \frac{R_{s,x}}{R_{s,s}} N_s \frac{[\cos \theta_x - j \sin \theta_x]}{\cos \theta_x} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของหม้อแปลงทดสอบจะเท่ากับ

$$N_x = \left| \frac{I_p}{I_{s,x}} \right| = \frac{R_{s,x}}{R_{s,s}} N_s \frac{I}{\cos \theta_x}$$

เมื่อ

- θ_x มุมเฟสของหม้อแปลงทดสอบ
- θ_s มุมเฟสของหม้อแปลงมาตรฐาน
- $\theta_{s,s}$ มุมเฟสของ $R_{s,s} = 0$
- $\theta_{s,x}$ มุมเฟสของ $R_{s,x} = 0$
- N_x อัตราส่วนของหม้อแปลงทดสอบ
- N_s อัตราส่วนของหม้อแปลงมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

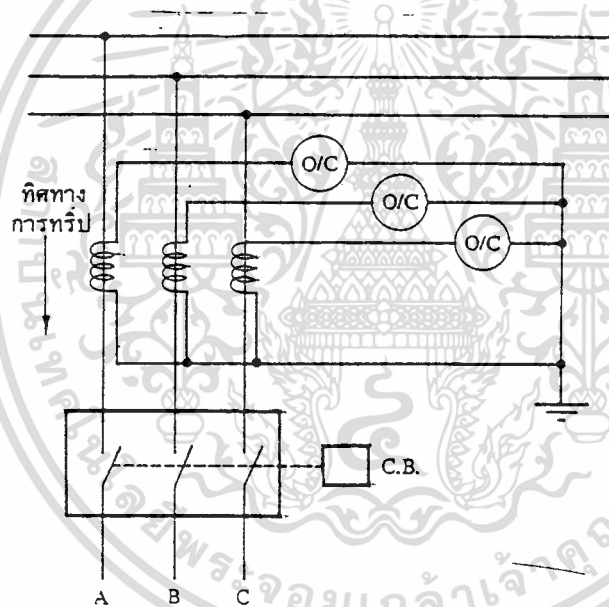
บทที่ 5

หม้อแปลงกระแสในงานป้องกันระบบ

การป้องกันระบบจะใช้อุปกรณ์อยู่หลายๆ ชนิดประกอบกันในการป้องกันซึ่งรวมทั้ง CT. ด้วย ซึ่งสามารถแสดงการใช้ CT. ร่วมกับอุปกรณ์อื่นได้ดังนี้

5.1 การใช้ CT. ร่วมกับรีเลย์กระแสเกินในระบบ สามารถแบ่งออกเป็นได้ 3 แบบด้วยกันคือ

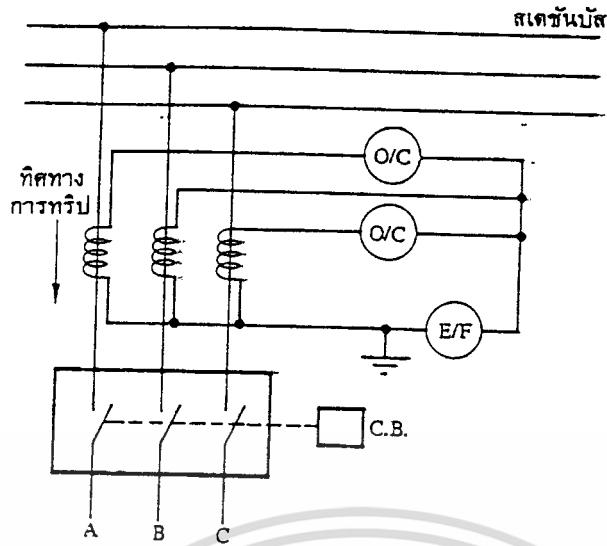
ก) แบบที่ 1 จะใช้เฟสโอเวอร์เคอร์เรนต์รีเลย์ 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการต่อรีเลย์กระแสเกินแบบที่ 1

ข) แบบที่ 2 แบบนี้จะใช้เฟสโอเวอร์เคอร์เรนต์รีเลย์ 2 ชุดและรีเลย์ฟอลต์ดักอินหรือกราวด์โอเวอร์เคอร์เรนต์รีเลย์ 1 ชุด ดังรูปที่ 5.2

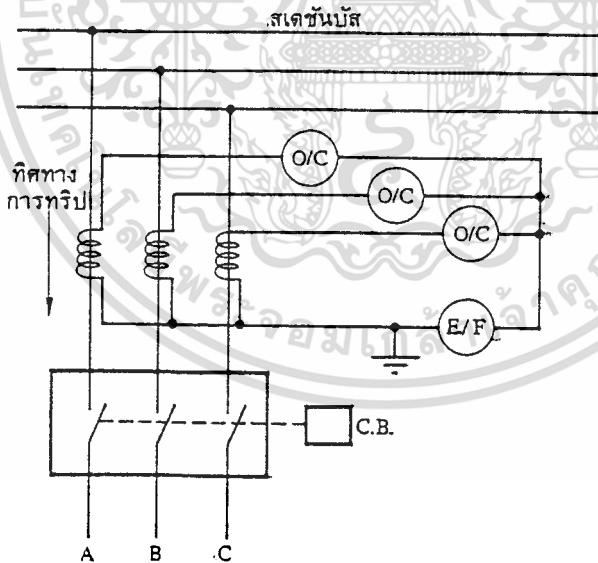
เมื่อผู้ดูแลเห็นข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงการต่อรีเลย์กระแสเกินแบบที่ 2

ควมแบบที่ 3 แบบนี้จะใช้เฟสโอเวอร์เคอร์เรนต์รีเลย์ 3 ชุดและรีเลย์ฟอสต์ลวงดิน 1 ชุด

ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงการต่อรีเลย์กระแสเกินแบบที่ 3

การต่อรีเลย์กระแสเกินแบบที่ 3 จะทำให้ระบบป้องกันกระแสเกินผิดปกติได้อย่างสมบูรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้า แบบที่สาม ทั้งนี้เนื่องจากเฟสโอเวอร์เคอร์เรนต์รีเลย์ส่วนใหญ่จะออกแบบให้ตั้งค่าปลั๊กเซ็ทตั้ง

เคอร์เรนซ์ได้ตั้งแต่ 50-200 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัดขนาด CT. จึงเหมาะ ที่จะใช้ป้องกันกระแสเกินพิกัดอื่นเนื่องจากกระแสไหลล หรือกระแสฟอลต์ที่เกิดจากเฟสกับเฟส ส่วนรีเลย์ฟอลต์ลงดิน ส่วนใหญ่จะออกแบบให้ตั้งค่าปลั๊กเซ็ตตั้งเคอร์เรนซ์ได้ตั้งแต่ 10-40เปอร์เซ็นต์ หรือ 20-80 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดขนาด CT. ดังนั้นจึงเหมาะ ที่จะใช้สำหรับป้องกันกระแสเกินพิกัด เนื่องจากการลัดวงจรดินของสายเฟสต่างๆ ทั้งนี้เพราะในระบบไฟฟ้าถ้าเป็นแบบ 3 เฟส 4 สายในสภาพการจ่ายโหลดปกติ ผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟสทางเวกเตอร์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แต่ถ้าความสมดุลของกระแสไหลลในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ก็จะมีกระแสไหลลกลับทางสายนิวทรัลหรือทางดินผ่านรีเลย์ฟอลต์ลงดิน ทำให้รีเลย์เริ่มทำงานได้ถ้ากระแสที่ไหลกลับนั้นมีค่ามากกว่าพิกัดกระแสผิดปกติของรีเลย์

จากรูปที่ 5.1 จนถึงรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าในบางครั้งมีการติดตั้งเฟสโอเวอร์เคอร์เรนซ์รีเลย์ 2 ชุด เพราะในกรณีที่ตั้งรีเลย์กระแสเกินสำหรับเฟส 3 ตัวหน้าที่หลักของรีเลย์ชนิดนี้คือตรวจจับการลัดวงจรระหว่างเฟส เมื่อเกิดการลัดวงจรชนิดนี้ขึ้นจะมีรีเลย์อย่างน้อยที่สุด 2 ตัวทำงาน ฉะนั้นเพื่อเป็นการประหยัดจึงใช้รีเลย์เพียง 2 ตัวแทน แต่ความปลอดภัยอาจจะลดลงเนื่องจาก

1. รีเลย์กระแสเกินสำหรับเฟส หรือเฟสโอเวอร์เคอร์เรนซ์รีเลย์ นี้เป็นรีเลย์สำรอง (back up) สำหรับรีเลย์ฟอลต์ลงดิน หากมีบางเฟสที่ไม่มีรีเลย์กระแสเกินสำหรับเฟสอยู่จะทำให้การป้องกันสำรองของการลัดวงจรลงดินในเฟสนั้นขาดไป

2. กรณีเกิดฟอลต์ที่ทำให้รีเลย์ 2 ตัวทำงาน ถ้ารีเลย์ตัวหนึ่งเกิดเสียก็ยังมีรีเลย์อีกตัวทำหน้าที่แทนได้ อันหมายถึงมีการป้องกันสำรอง

3. กรณีเป็นรีเลย์กระแสเกินที่อยู่ทางด้านแรงสูงของหม้อแปลง D/Y หากเกิดฟอลต์แบบเฟสทุเฟสทางด้านแรงต่ำ จะเกิดกระแสฟอลต์ทางด้านแรงสูงทั้งสามเฟสเป็นอัตรา 1:1:2 นั่นคือการไม่มีรีเลย์กระแสเกินในบางเฟส จะทำให้การป้องกันสำรองของฟอลต์ทางด้านทุติยภูมิลดการทำงานลง

จึงอาจกล่าวได้ว่าควรติดตั้งรีเลย์กระแสเกินสำหรับเฟสไว้ 3 ตัว ซึ่งโดยปกติขณะจ่ายโหลดอยู่จะมีกระแสไหลเข้าไปในรีเลย์ตลอดเวลา ขนาดของกระแสจะขึ้นอยู่กับขนาดของโหลด ซึ่งจะต้องไม่เกินค่าพิกัดของ CT. ดังนั้นการตั้งกระแสของรีเลย์แบบนี้จึงต้องตั้งให้มากกว่ากระแส

ปกติของโหลด เช่น 5 แอมแปร์ (CT. ที่มีเอาต์พุต 5 แอมแปร์) แต่ในบางกรณีอาจตั้งให้หน้อยหรือมากกว่านี้ ทั้งนี้แต่ต้องคำนึงถึงเรื่องที่ว่า เมื่อกรณีกระแสปกติไหลผ่าน เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีเลย์ รีเลย์จะต้องไม่ทำงาน

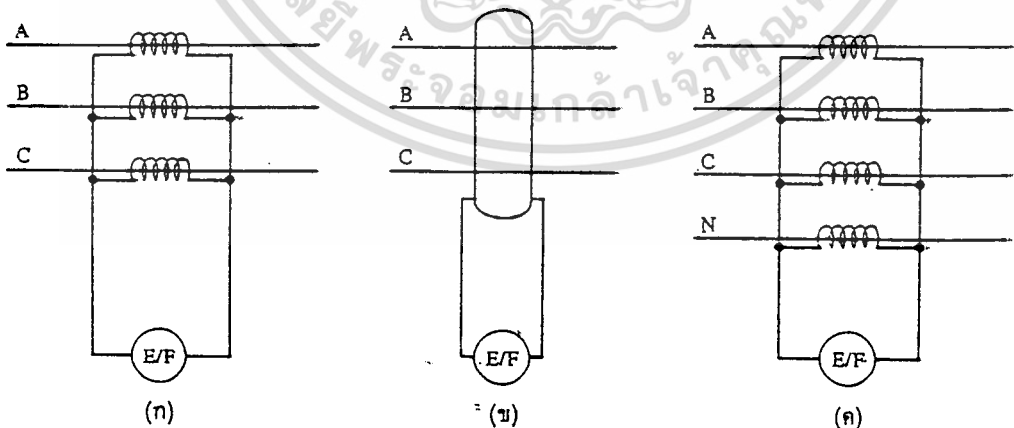
ง) การใช้ CT. ร่วมกับรีเลย์ฟอลต์ลงดินหรือรีเลย์กระแสเกินฟอลต์ลงดินเพียงอย่างเดียวในระบบ

วัตถุประสงค์ที่ใช้รีเลย์ตัวนี้ เพื่อตรวจจับกระแสลัดวงจรลงดินลักษณะ ของรีเลย์ตัวนี้จะเหมือนกันกับรีเลย์กระแสเกินสำหรับเฟสทุกประการยกเว้นการตั้งของกระแสจะ ต่ำกว่า ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 1-4 แอมแปร์ แต่รีเลย์กระแสเกินสำหรับเฟสจะอยู่ในช่วง 2.5-10 แอมแปร์ ในระบบที่มีการต่อลงดิน เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินจะมีกระแสลำดับศูนย์ (Zero sequence current) เกิดขึ้นรีเลย์ฟอลต์ลงดินจะต่ออยู่ในลักษณะที่ต้องสามารถตรวจจับกระแสลำดับศูนย์ได้ ซึ่งวิธีการต่อจะมีอยู่ 1 แบบคือ

1. ใช้ CT. 3 ตัว อัตราส่วนเท่ากันต่ออยู่ในแต่ละเฟสด้านทุติยภูมิของ CT. ทุกตัว ต่อเข้าด้วยกันเป็นวงจรเรขาคณิต ดังรูปที่ 5.4 (ก)

2. ใช้ CT. 1 ตัว ซึ่งนิยม เรียกว่าหม้อแปลงลำดับศูนย์ (Zero sequence transformer) คล้องสายตัวนำทั้ง 3 เฟสไว้ ส่วนด้านทุติยภูมิต่อโดยตรงเข้ากับรีเลย์ ดังรูปที่ 5.4 (ข)

ในกรณีที่ระบบเป็นแบบ 3 เฟส 4 สาย จะต้องมี CT. ตัวที่ 4 (อัตราส่วนเท่ากับ 3 ตัวแรก) ต่อในสายตัวนำ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.4 (ค)



รูปที่ 5.4 แสดงการต่อ CT. และรีเลย์ฟอลต์ลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบ 3 เฟส ในทางปฏิบัติแล้วค่าโวลต์ไม่สมดุล จะมีกระแสไหลผ่านในตัวรีเลย์ซึ่งกระแสที่รีเลย์วัดได้จะเป็นกระแสลำดับศูนย์อาจจะมีค่าเป็นมิลลิแอมป์ (mA) อันอาจเกิดเนื่องมาจากค่าผิดพลาดของ CT. ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงควรคำนึงถึงข้อผิดพลาดของ CT. ด้วย

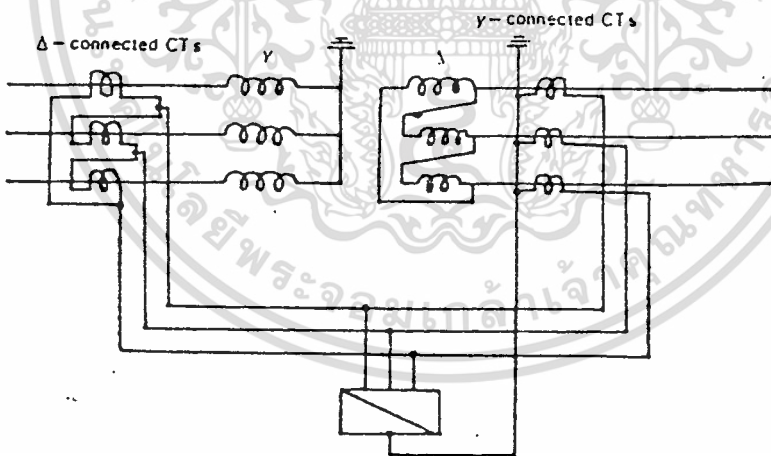
5.2 การใช้ CT. ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันในการป้องกันส่วนอื่น ๆ

การใช้ CT. ร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันนอกจากจะป้องกันระบบไฟฟ้าแล้วยังสามารถใช้ในการป้องกันส่วนนั้น เช่น หม้อแปลง , เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, มอเตอร์ไฟฟ้า

โดยการใช้ CT. เป็นอุปกรณ์จับสัญญาณ Fault ต่างๆดังนี้

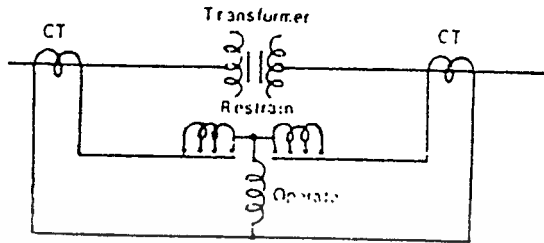
- การป้องกันหม้อแปลงแบบคิฟเฟอร์เรนเช็ล

โดยต่อ CT เป็นแบบสตาร์ เมื่อขดลวดของหม้อแปลงเป็นแบบเดลต้าและ CT. ต่อแบบเดลต้าเมื่อขดลวดหม้อแปลงต่อแบบสตาร์ดังรูป 5.5 โดยจะใช้กับหม้อแปลงที่พิกัดตั้งแต่ 5 MVA ขึ้นไป เป็นการป้องกัน phase to phase faults และ phase to earth faults



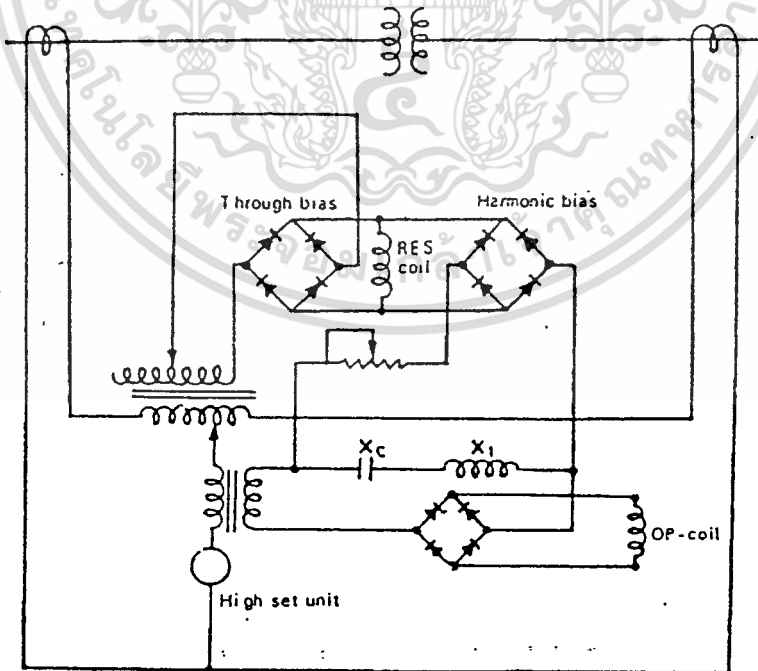
รูป 5.5 Differential protection for a Y-D power transformer

- การป้องกันหม้อแปลงแบบ Percentage หรือ Biased differential โดยมี
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. เมื่อผู้ยูได้เห็นเว็บไซต์ประเศนี้ด้านการค้า
ลักษณะการต่อวงจรดังรูป 5.6



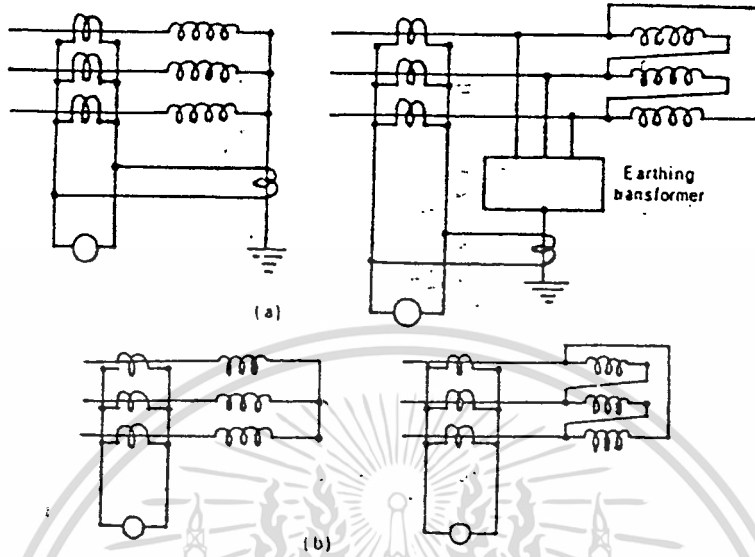
รูปที่ 5.6 Biased differentiation protection for a transformer

- การป้องกันหม้อแปลงโดยจำกัดสาร์โมนิค ของ Inrush current

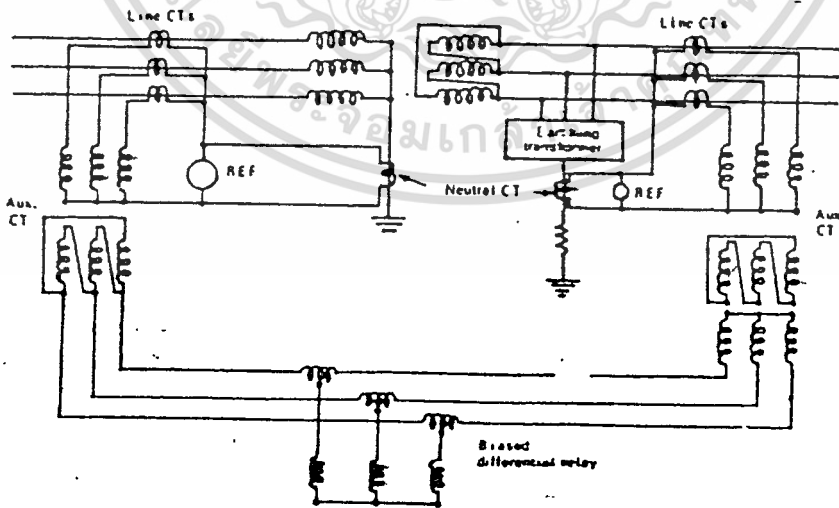


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 5.7 Basic circuit of harmonic restraint relay ทุกครั้งที่มีมีการนำไปใช้

- การป้องกันหม้อแปลงโดยจำกัดฟอลต์ลงดิน



รูปที่ 5.8 Restrictor earth-fault protection (a) neutral earthed within the protected zone ;(b) neutral not earthed within the protected zone



รูปที่ 5.9 Differential and restricted earth-fault protection of a star/delta

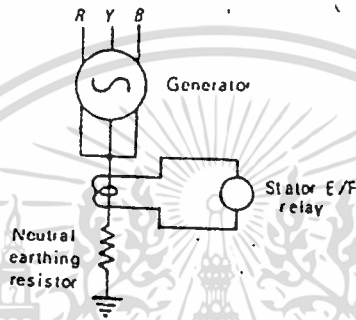
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรหัส... ปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

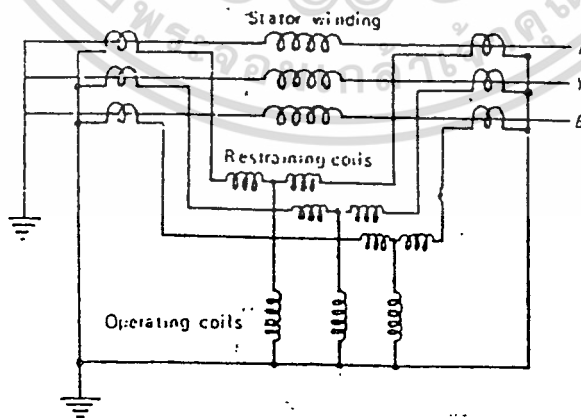
ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรและจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูป

- การป้องกันสแตเตอร์ เช่นการจำกัดกระแสฟลด์ลงดินโดยผ่านความต้านทาน

(ดังรูป 5.10, 5.11)

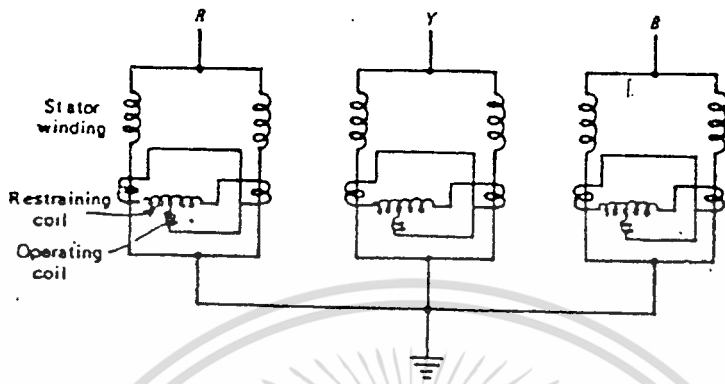


รูปที่ 5.10 Location of E/F relay in a resistance earthed genertor

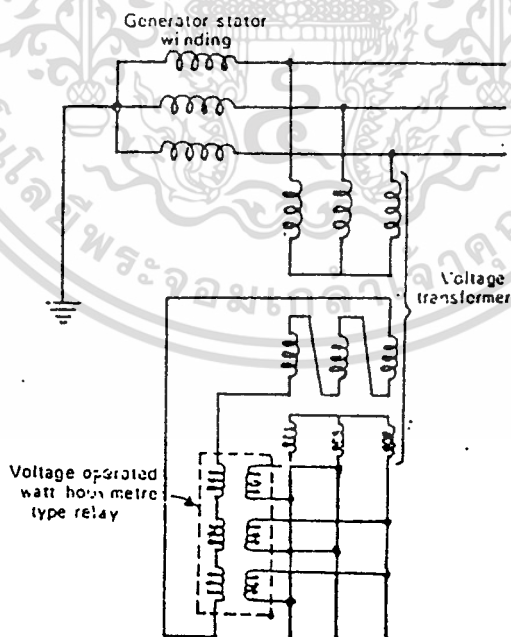


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 5.11 Percentage biased differential relay

หรือป้องกันเกิด fault ระหว่างรอบในขดลวดชุดเดียวกัน (short tran)



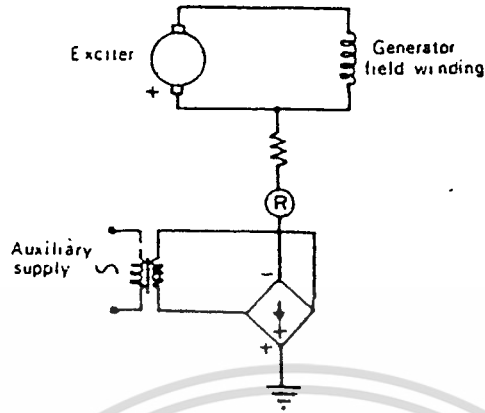
รูปที่ 5.12 Biased transverse differential protection for inter-turn fault protection for parallel wound stator



รูปที่ 5.13 Interturn fault detection

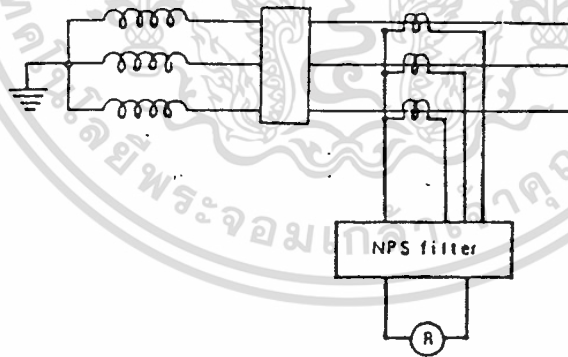
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การป้องกันโรเตอร์ เช่นการป้องกัน Fault ลงดิน



รูปที่ 5.14 Rotor earth-fault detection

- การป้องกันการสูญเสียสามกระตุ่น

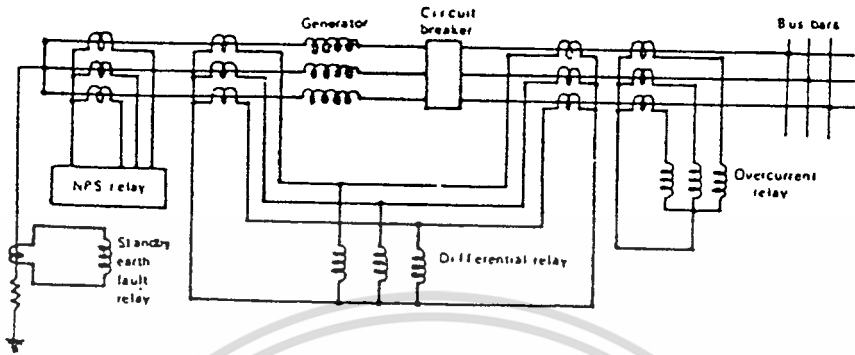


รูปที่ 5.15 Protection against unbalanced load using degative sequence filter NPS-negative phase sequence;

R-overcurrent IDMT relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

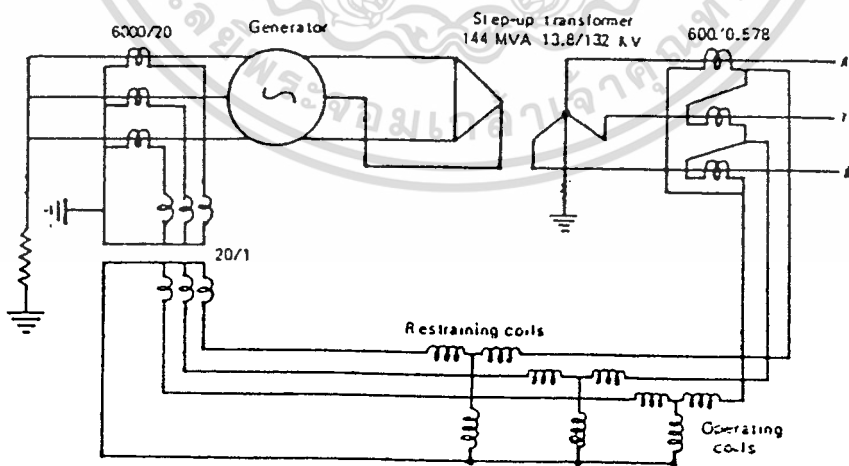
- การป้องกันแรงดันเกิน



รูปที่ 5.16 Typical protective scheme for a 30 MW direct connected generator

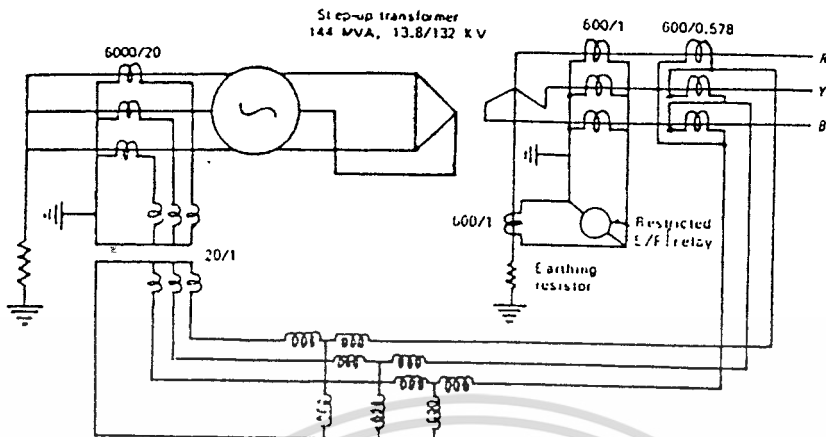
5.2.3 การป้องกันหม้อแปลงซึ่งล่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

มีลักษณะวงจรการป้องกันดังแสดงในรูป 5.17, 5.18



รูปที่ 5.17 generator-transformer overall biased

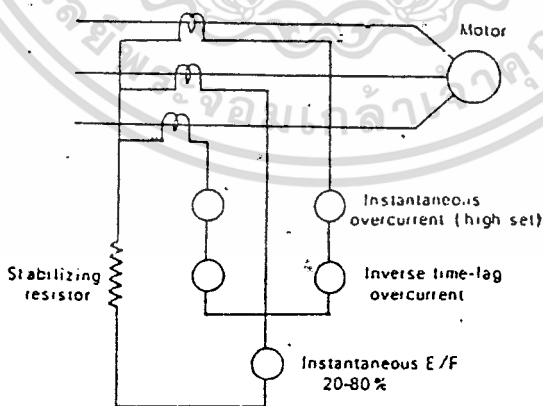
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง differential protection อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 HV restricted earth-fault protection on generator-transformer units

5.2.4 การป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้า

ลักษณะของวงจรป้องกันแสดงดังรูป 5.19

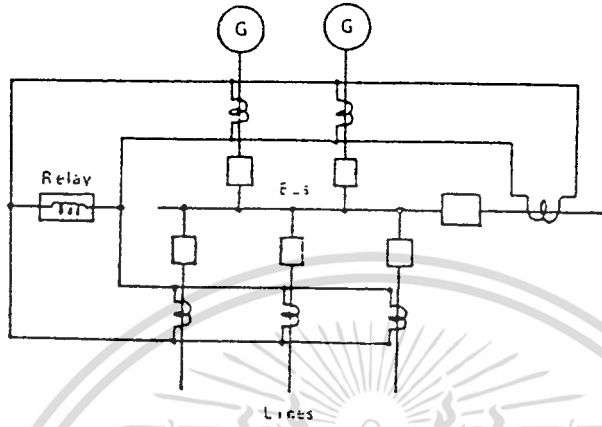


รูปที่ 5.19 Induction motor-protection relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

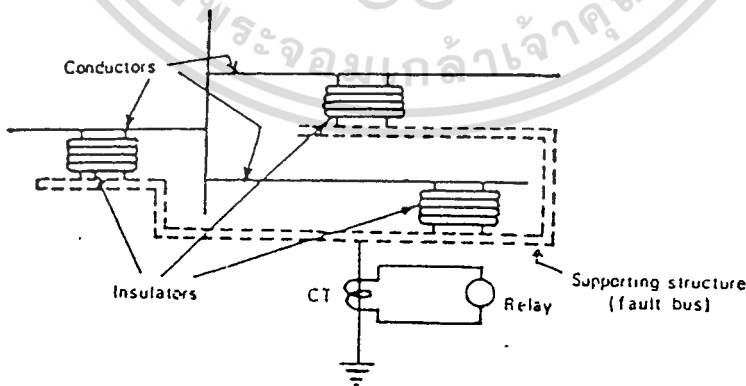
5.2.5 การป้องกันบัสโซน

- การป้องกันโดยใช้นิยม Differential



รูปที่ 5.20 Differential protection of a bus section

- การป้องกันการรั่วไหลลงดิน (frame leakage protection)



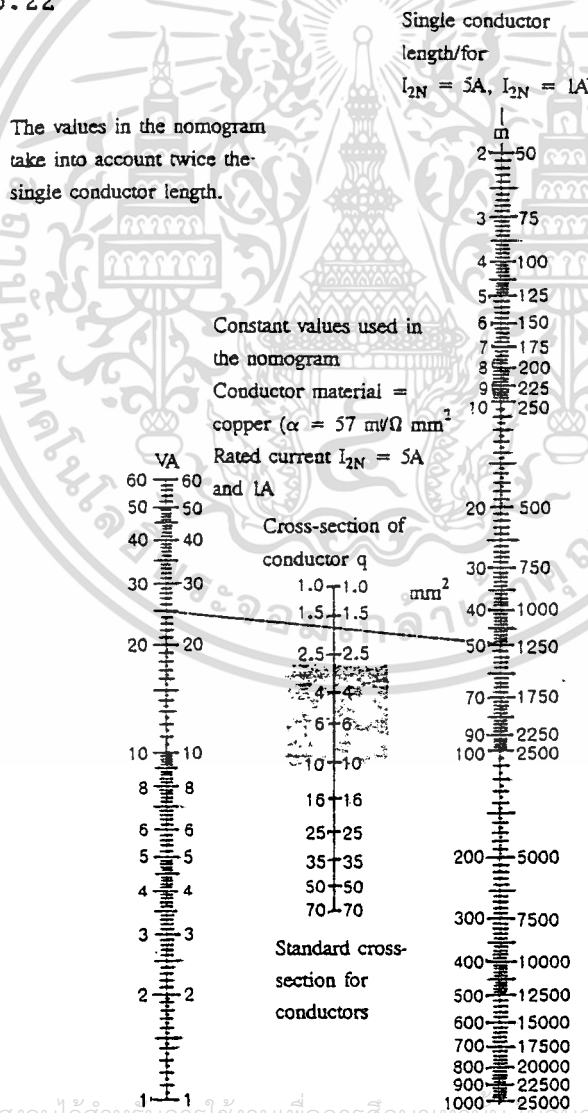
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น **รูปที่ 5.21 Frame leakage protection** อดเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 จะเห็นได้ว่า CT. จะถูกนำไปในงานอย่างกว้างขวาง ในงานป้องกันกาไฟฟ้า ซึ่งจะถูกต่อรวมอยู่กับอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งาน ในงานป้องกันทางไฟฟ้านั้นนอกจากจะมีอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ที่ดีแล้วนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากคือ การเลือกใช้ CT. ที่มีขนาดเหมาะสมต่ออุปกรณ์ป้องกันที่มาต่อรวม อีกทั้งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คือ การพิจารณาหาพื้นที่หน้าตัดของสายทางทุกขุมมิของ CT. ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อ 5.3 ต่อไป

5.3 การพิจารณาหาพื้นที่หน้าตัดของสายทางด้านขุมมิของหม้อแปลง

สำหรับ CT. จะพิจารณาผลของค่ากำลังงานสูญเสีย (I^2R) ของตัว

การพิจารณาหาค่าพื้นที่หน้าตัดของสายทางด้านขุมมิของ CT. นั้น จะพิจารณาได้จาก โนมแกรมดังรูปที่ 5.22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะในรูปแบบที่ 5.22 แสดงโนมแกรมการหาพื้นที่หน้าตัดของสายทางด้านขุมมิทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางครั้งการคำนวณหาขนาดของสายจะทำให้มีขนาดของสายต่างๆ กันออกไปเมื่อเป็นเช่นนี้จะนิยมใช้สายที่มีขนาดเดียวกันหมด โดยจะเลือกใช้สายที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (ตัวอย่างเช่นในแผงสวิทช์บอร์ดจะนิยมใช้สายขนาด 4 ตารางมิลลิเมตร และหรือ 6 ตารางมิลลิเมตรสำหรับเครื่องมือวัดที่อยู่ระยะไกล)

จากโนโมแกรมในรูปที่ 1.5 จะเห็นได้ว่าค่าโหลดของอุปกรณ์เครื่องมือวัดและอุปกรณ์อื่นๆ ที่นำมาต่อกับหม้อแปลงจะต้องนำมาพิจารณาด้วยดังนั้นในตารางจะเป็นการแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ป้องกัน

ตารางที่ 5.1 ค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์เครื่องมือวัด	ค่ากำลังไฟฟ้า	
	สำหรับแต่ละวงจร กระแส (VA)	สำหรับแต่ละวงจร แรงดัน (VA)
แอมป์มิเตอร์และโวลต์มิเตอร์	1	1 - 5
วัตต์มิเตอร์แยกที่ฟ หรือรีแอกทีฟมิเตอร์	2.5	1
เครื่องวัดค่าประกอบกำลังสำหรับ 3 เฟส สเกล 90°	5	2.5
เครื่องวัดค่าประกอบกำลังสำหรับ 3 เฟส สเกล 360°	15	5
มิเตอร์วัดความถี่ไฟฟ้า	—	2.5
ซิงโครสโคป	—	25
เครื่องมือสำหรับบันทึกกระแสและแรงดันที่เป็นแบบ ขดลวดเคลื่อนที่และเรกติไฟย (rectifier)	2	1
วัตต์มิเตอร์และเครื่องมือสำหรับบันทึก	6	3
มิเตอร์วัดตัวประกอบกำลัง	14	12
เครื่องมือบันทึกความถี่	—	13
เครื่องวัดวัตต์-ชั่วโมง	1-2	2-4
เครื่องวัดวัตต์-ชั่วโมง แบบ 3 เฟส	0.5-1.5	4

อุปกรณ์ป้องกัน	ค่ากำลังไฟฟ้า		
	สำหรับแต่ละวงจร กระแส (VA)	สำหรับแต่ละวงจร แรงดัน (VA)	CT ที่ใช้ต้องคำนึงถึงแพกเตอร์ กระแสเกิน
รีเลย์กระแสเกิน และการป้องกัน- กระแสเกินที่มีค่าการหน่วงเวลา	15	—	> 5
โหลดเกินและลัดวงจร	30	—	> 10
ป้องกันทั่ว ๆ ไป	60	—	> 5
รีเลย์ทิศทาง	8	10	< 5
รีเลย์ระยะทาง	30	—	> 10
รีเลย์แตกต่าง	15-30	—	> 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 5.1 CT. มีค่ากระแสด้านทุติยภูมิ (I_e) เท่ากับ 5 A. และพิกัดเอาต์พุต (S_n) เท่ากับ 30 VA นำหม้อแปลงมาทำการต่อกับเครื่องวัดดังนี้

แอมป์มิเตอร์ 1 ตัว	1 VA
วัตต์มิเตอร์ 1 ตัว	2.5 VA
เครื่องวัดวัตต์-ชั่วโมง 1 ตัว	1.5 VA
รวมทั้งหมด	5 VA

วงจรทางด้านทุติยภูมิเป็นตัวนำเดี่ยว(single conductor)ที่มีความยาว 50 m จงหาพื้นที่หน้าตัด (q) ของสายที่จะใช้กับ CT. นี้ทางด้านทุติยภูมิ

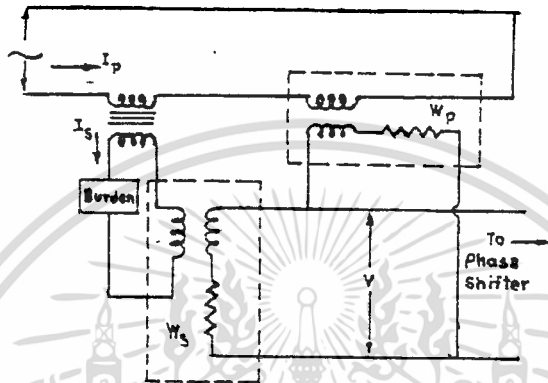
วิธีทำ CT. มีพิกัดเอาต์พุต	30 VA
ค่ากำลังไฟฟ้าเครื่องมือวัด	<u>-5 VA</u>
ค่าเอาต์พุตของหม้อแปลงกระแสจริง	25 VA
จากโนโอมแกรมจะได้ q	1.8 mm ²
เลือกพื้นที่หน้าตัด	<u>2.5 mm²</u>
พื้นที่หน้าตัด q เท่ากับ 2.5 mm ²	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ชุดทดสอบ CT. แบบ Direct deflection

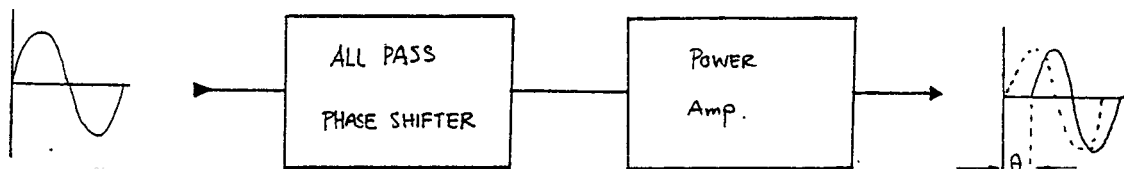
ใช้ทดสอบแบบ Direct deflection เป็นวิธีที่มีความสะดวกสูง โดยอาศัยการแสดงผลค่าของวัตต์มิเตอร์แบบอิมัลชันโครมาลิสสองตัวดังรูป



รูปที่ 6.1

วัตต์มิเตอร์ของ W_p จะถูกให้แสดงค่าที่ภาวะแรงดันตั้งฉาก หรืออินเฟสกับกระแสปฐมภูมิ (แสดงภาวะเป็นศูนย์และค่าสูงสุด) ส่วนวัตต์มิเตอร์ W_s จะเป็นส่วนแสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบจะเริ่มต้นโดยการปรับ phase shifter ซึ่งค่าแรงดันจาก phase shifter จะมีค่าคงที่ แต่สามารถเปลี่ยนเป็นมุมใด ๆ ได้เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันทางอินพุต โดยขั้นตอนการทดสอบจะเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.1 ในบทที่ 4

สำหรับส่วน phase shifter สำหรับโครงการนี้ได้ถูกออกแบบโดยประยุกต์ใช้วงจร ALL PASS PHASE SHIFTING CIRCUITS. การทำการขยายสัญญาณด้วย Amplifier ดังแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมข้างล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.2 ส่วน phase shifter

วงจรของ ALL-pass phase shifter แสดงในรูปที่ 6.3.(ค) จากวงจรเมื่อ terminal 2 เปรียบเทียบเป็น ground และ V_i ป้อนให้กับ terminal 1

$$V_{o2} = - \frac{R_2}{R_1} \times V_i$$

เมื่อ $R_1 = R_2$; $V_{o2} = - V_i$

เมื่อ Terminal 1 เทียบเป็น ground และ V_i ป้อนให้กับ terminal 2

$$V_{o2} = \frac{R_2 + R_2}{R_1} \times V_{c1}$$

เมื่อ $R_1 = R_2$;

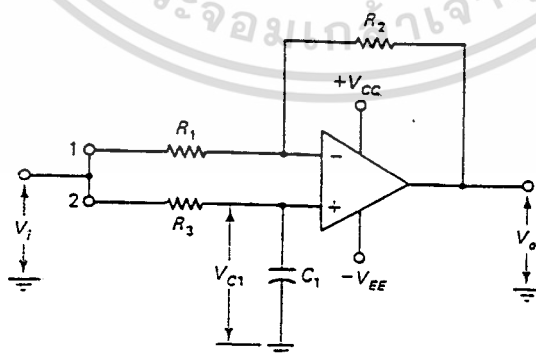
$$V_{o2} = 2V_{c1}$$

$$V_{c1} = \frac{-j(1/\omega C_1)}{R_3 - j(1/\omega C_1)} \times V_i$$

$$= \frac{V_i}{1 + j\omega C_1 R_3}$$

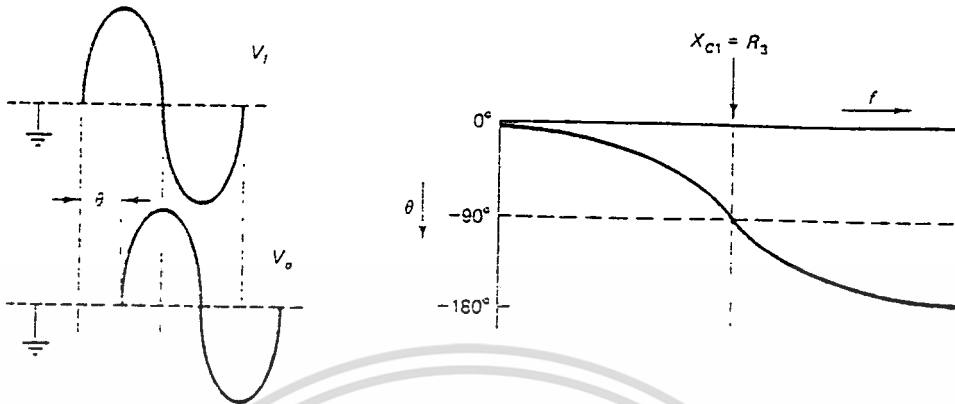
หรือ

$$V_{o2} = \frac{2V_i}{1 + j\omega C_1 R_3}$$



(a) All-pass phase lag circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) Input and output waveform, and graph of phase lag versus frequency

รูปที่ 6.3 Allpass circuit which passes a signal without attenuation while introducing a phase lag dependent on the signal frequency. A 90° phase lag occurs when $X_{C1} = R_3$

และ

$$\begin{aligned}
 V_o &= V_{o1} + V_{o2} \\
 &= -V_i + \frac{2V_i}{1+j\omega C_1 R_3} \\
 &= V_i \times \frac{1-j\omega C_1 R_3}{1+j\omega C_1 R_3}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$V_o = V_i / -2\arctan(\omega C_1 R_3) \dots\dots\dots (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของแรงดัน output จะส่งขนาดเท่ากับ input โดยแรงดัน output จะ lag
แรงดัน input เป็นมุม

$$\theta = -2 \arctan (\omega C_1 R_3)$$

หรือ

$$\theta = -2 \arctan (R_3 / X_{C_1})$$

เมื่อ

$$X_{C_1} = R_3, \theta = -90^\circ$$

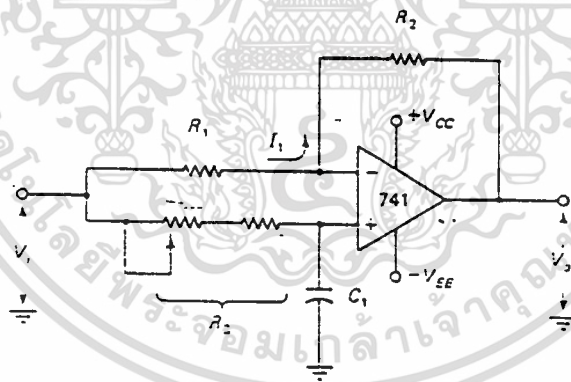
ที่ความถี่สูง

$$X_{C_1} \ll R_3, \theta = -180^\circ$$

ที่ความถี่ต่ำ

$$X_{C_1} \gg R_3, \theta = 0^\circ$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2 เมื่อ C_1 และความถี่คงที่ ค่า X_{C_1} จะคงที่ในทาง
ปฏิบัติเราสามารถเปลี่ยนมุม θ ใดๆ ได้ โดยการปรับเปลี่ยน R_3 ดังแสดงในรูปที่ 6.4



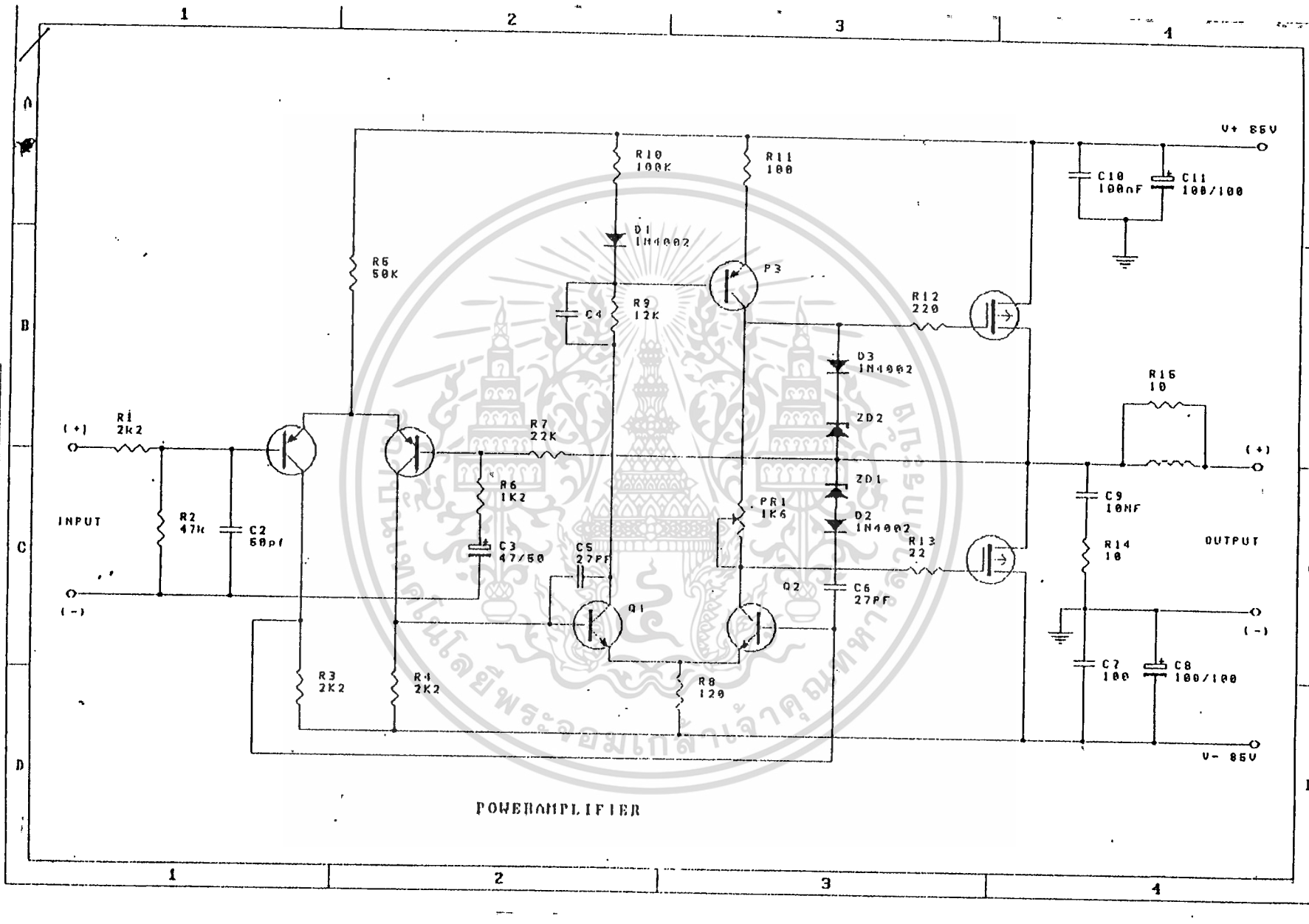
รูปที่ 6.3

สำหรับชุด phase shifter สำหรับโครงการนี้ แสดงตามวงจรในรูปที่ 6.4,

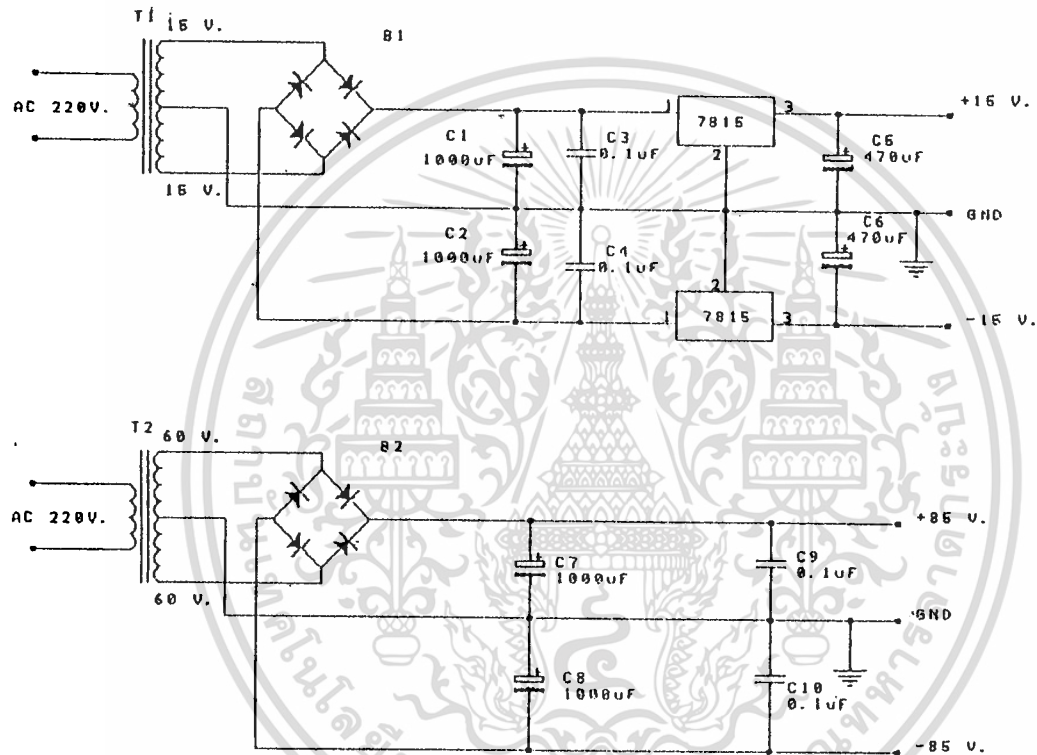
6.5, 6.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 6.4



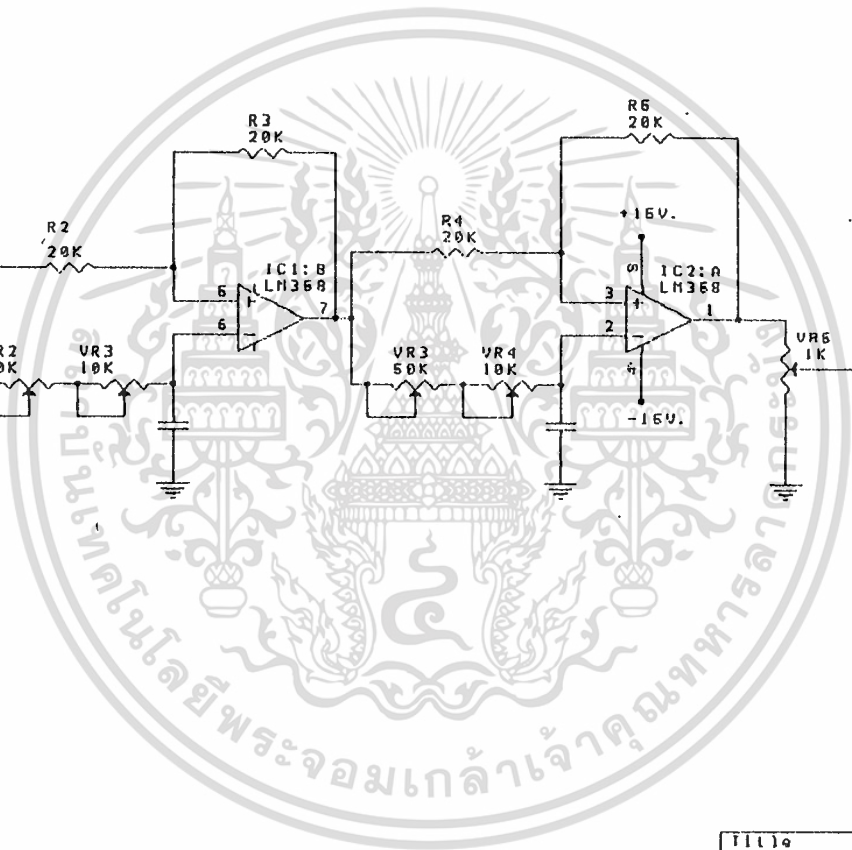
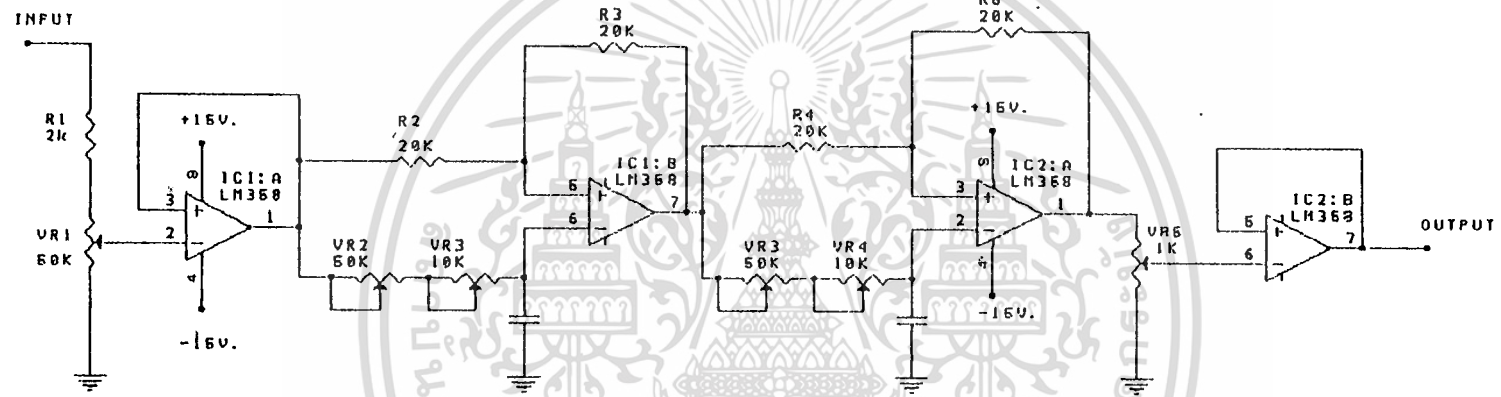
รูปที่ 6.5



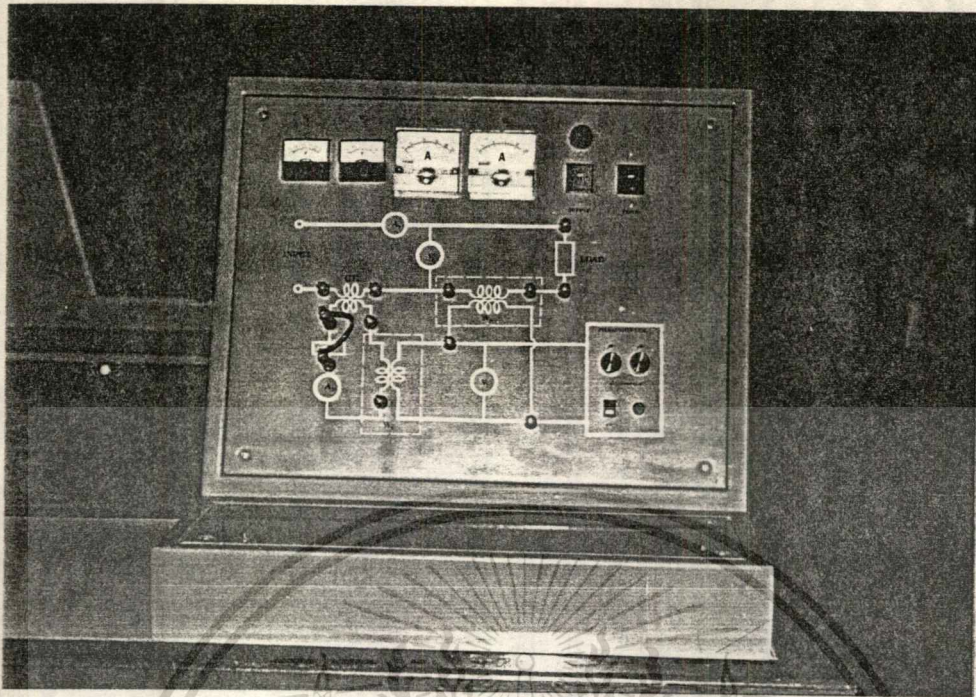
POWER SUPPLY

Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date: 7-FEB 1994	Sheet of	
File: A3/1	Drawn By:	

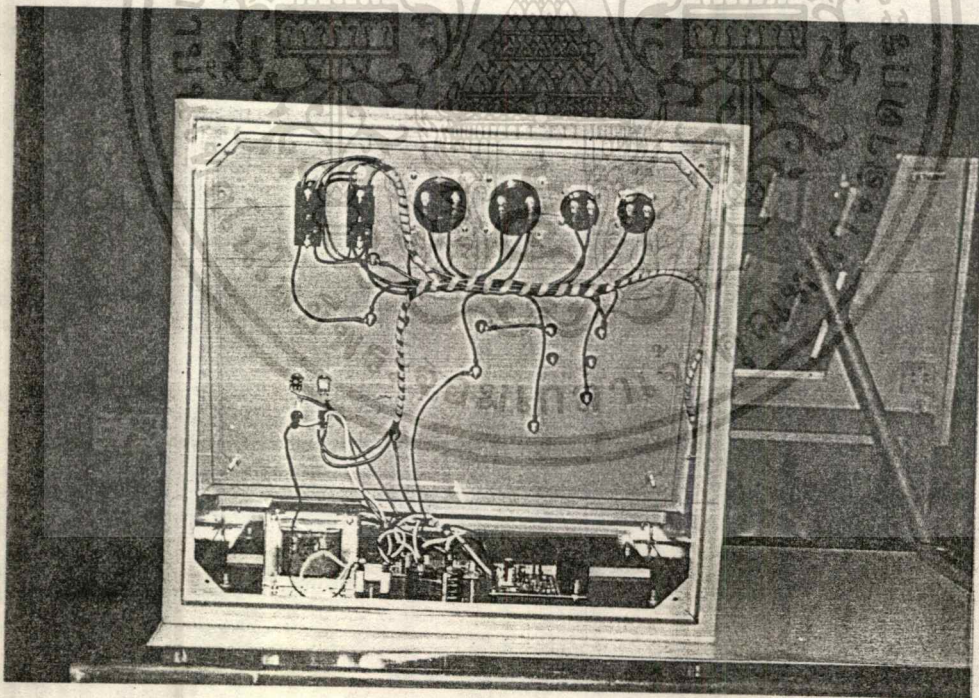
รูป 6.6



Title		
Size	Number	Revision
n4		
Date: 7-FEB-1994	Sheet of	
File: A2/1	Drawn By:	



รูปที่ 6.7



รูปที่ 6.8

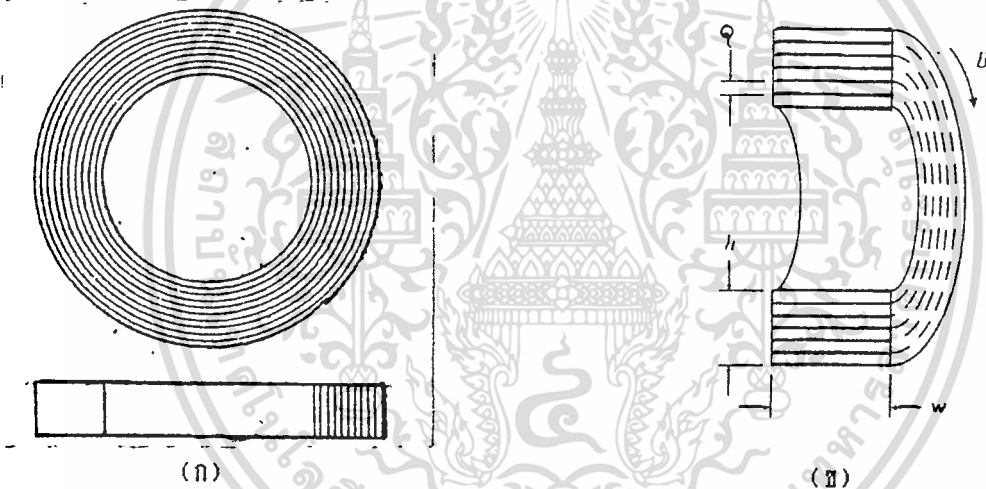
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การออกแบบและทดสอบ CT

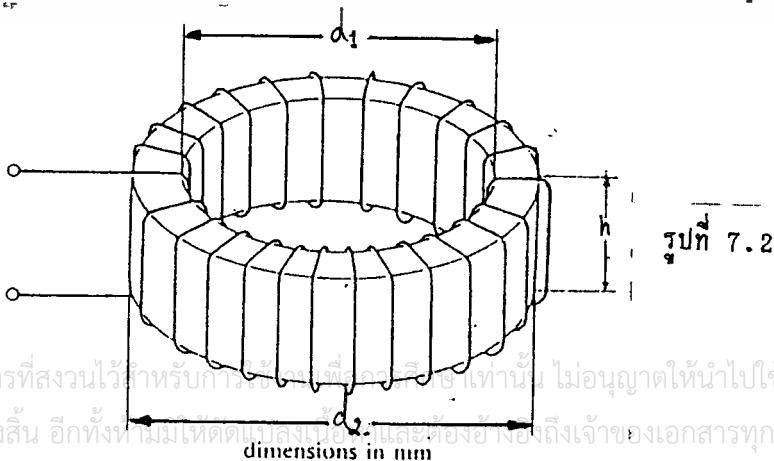
โดยหลักการแล้ว CT. ก็มีหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงกำลังเพียงข้อสำคัญที่ต้องคำนึงถึงไม่ใช่เรื่องกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งสำคัญระดับแรก คือ ความคลาดเคลื่อนดังนั้นลักษณะการออกแบบสำหรับ CT. สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบครั้งแรกคือ

1. แกนเหล็ก เมื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) และกระแสสูญเสียในแกนเหล็ก (I_c) จะต้องมีค่าต่ำ โดยการทำให้แกนเหล็กมีค่า reluctance และ core loss ต่ำ โดยการใช้แกนเหล็กที่มีความซึมซาบสูง และทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กสั้นมีรอยต่อของแกนเหล็กน้อย ลักษณะของแกน CT. สำหรับการออกแบบนี้ ได้ออกแบบให้เป็นลักษณะเหล็กฉนวนดังแสดงในรูป 7.1 (ก.), (ข)



รูปที่ 7.1

2. ผลของ leakage reactance ซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น เพื่อลดผลของ leakage reactance จะออกแบบการพันขดลวดของ CT. ดังแสดงในรูป 7.2



รูปที่ 7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกและต้องยื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
dimensions in mm

ในการออกแบบสร้าง CT. ในโครงการนี้ ได้ใช้เหล็กซิลิคอน ชนิด M.4 ความหนา (Q) 0.27 mm และ 0.18 mm สำหรับทำแกนของ CT. โดยทำเป็นลักษณะเหล็กม้วนดัดที่กล่าวแต่ต้น โดยกำหนดความกว้างของแกนเหล็ก (w) มีความกว้าง $3.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

อาศัยกฎของ Lene ในการออกแบบ ดังสมการ 7.1 และ 7.2

$$E = 4.44 fNBA \quad \dots\dots(7.1)$$

หรือ

$$A = \frac{E}{4.44 fNB} \quad \dots\dots(7.2)$$

เมื่อค่าที่กำหนดในการออกแบบ $B = 1$ เทสลา

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$N = \frac{I_p}{I_s} \text{ (หรือ nominal ratio } (K_n) \text{ ของ CT)}$$

$$I_s$$

$$E = \text{Volt} - \text{ampere (Burden)}$$

การออกแบบครั้งที่ 1

ทำการออกแบบ CT. ชนิด 100/5 และ 60/5 Amp 5 VA

- ออกแบบ CT. ชนิด 100/5 Amp 5 VA เมื่อแพลตฟอร์มการพันของแกนเหล็กเท่ากับ 1

จาก

$$E = \frac{VA}{I_s}$$

$$I_s$$

$$= \frac{5 \text{ VA}}{5 \text{ A}} = 1 \text{ V}$$

$$5 \text{ A}$$

และ

$$N = \frac{I_p}{I_s} = \frac{100}{5} = 20$$

$$I_s \quad 5$$

จากสมการ (7.2)

$$A = \frac{E}{4.44 fNB}$$

$$= \frac{1}{4.44 \times 50 \times 20 \times 1}$$

$$= 2.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$4.44 \times 50 \times 20 \times 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงนิตยสารหรือเผยแพร่ต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $A = W \times H$; $W = 3.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

ดังนั้น $H = \frac{A}{W} = \frac{2.25 \times 10^{-4}}{3.6 \times 10^{-2}}$
 $= 0.625 \cdot \text{cm}$

สำหรับเหล็ก M.4 ความหนา 0.27 mm จำนวนรอบของพื้นแกนเหล็กที่พันเป็นแบบเหล็ก

ม้วน

$$= \frac{0.625 \text{ cm}}{0.027 \text{ cm}}$$

$$= 23.2 \text{ รอบ}$$

$$= 24 \text{ รอบ}$$

$$= 24 \text{ รอบ}$$

สำหรับเหล็ก M.4 ความหนา 1.18 mm จำนวนรอบการพันแกนเหล็กที่พันเป็นแบบเหล็ก

ม้วน

$$= \frac{0.625 \text{ cm}}{0.018 \text{ cm}}$$

$$= 34.7 \text{ รอบ}$$

$$= 35 \text{ รอบ}$$

$$= 35 \text{ รอบ}$$

-ออกแบบ CT. ชนิด 60/5 Amp 5 VA เมื่อเฟลคเตอร์ของการออกแบบเท่ากับ 1

จาก

$$E = \frac{VA}{I_p}$$

$$I_p$$

$$= \frac{5 \text{ VA}}{5 \text{ A}} = 1 \text{ V}$$

$$5 \text{ A}$$

$$N = \frac{I_p}{I_s} = \frac{60}{5} = 12$$

$$I_s = 5$$

จากสมการ (7.2)

$$A = \frac{E}{fNB}$$

$$4.44 \text{ fNB}$$

$$= \frac{1}{4.44 \times 50 \times 12 \times 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 3.754 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

จาก

$$A = W \times H ; W = 3.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$\text{ดังนั้น } H = \frac{A}{W} = \frac{3.754 \times 10^{-4}}{3.6 \times 10^{-2}}$$

$$= 1.043 \text{ cm}$$

สำหรับเหล็ก M4 ความหนา 0.27 mm จำนวนรอบการพันแกนเหล็กที่พันเป็นแบบเหล็ก

ม้วน

$$= \frac{1.043 \text{ cm}}{0.027 \text{ cm}}$$

$$= 38.6 \text{ รอบ}$$

$$= 39 \text{ รอบ}$$

สำหรับเหล็ก M4 ความหนา 0.18 mm จำนวนรอบการพันแกนเหล็กที่พันเป็นแบบเหล็ก

ม้วน

$$= \frac{1.043 \text{ cm}}{0.018 \text{ cm}}$$

$$= 57.4 \text{ รอบ}$$

$$= 58 \text{ รอบ}$$

เมื่อการออกแบบกำหนด รัศมีภายในของแกนเหล็กเท่ากับ 2.4 cm

- สำหรับ CT. ชนิด 100/5 Amp รัศมีภายนอกเท่ากับ

$$= 2.4 + 0.625 \text{ cm}$$

$$= 3.025 \text{ cm}$$

ดังนั้นรัศมีเฉลี่ยของแกนเหล็ก

$$= \frac{2.4 + 3.025}{2} = 2.7125 \text{ cm}$$

2

ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ย (l) = $2\pi r$

$$= 2\pi \times 2.7125$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$= 17.04 \text{ cm}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำหรับ CT. ชนิด 60/5 Amp รัศมีภายนอกเท่ากับ

$$= 2.4 + 1.043 \text{ cm}$$

$$= 3.443 \text{ cm}$$

ดังนั้นรัศมีเฉลี่ยของแกนเหล็ก

$$= \frac{2.4 + 3.443}{2}$$

2

$$= 2.9215 \text{ cm}$$

$$\text{ทางเดินแม่เหล็กเฉลี่ย (l)} = 2\pi r$$

$$= 2\pi \times 2.9215$$

$$= 18.35 \text{ cm}$$

นำข้อมูลที่คำนวณได้ไปสร้าง CT. ชนิด 100/5 Amp และ 60/5 Amp ขนาด 5 VA ตามลำดับ โดยมีลักษณะการพันแกนเหล็กดังแสดงในรูปที่ 7.1 และการพันขดลวดทางทุติยภูมิดังแสดงในรูปที่ 7.2 และทดสอบ CT. ที่ทำขึ้นด้วยวิธีทดสอบแบบ direct deflection method ข้อมูลจากการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 1-8

ตารางที่ 1

ชนิด : Ratio 100/5 NO1

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM.

ทรัพย์สิน	1	2	3	4	5
Ip	104	98.2	88.9	78.0	71.2
Is	4.4	4.2	3.8	3.4	3.0
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5500	5250	4800	4325	3875
Ws1	5	2.5	2.5	2.5	2.5
Ws2	237.5	225	200	175	162.5
R	23.15	23.33	24.00	24.71	23.84
% Error	-13.62	-14.28	-16.67	-19.07	-16.12
Tan θ	0.021	0.011	0.013	0.014	0.015
θ	1.21	0.64	0.72	0.82	0.88

ตารางที่ 2

ชนิด : Ratio 100/5 NO2

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM.

ครัทช์	1	2	3	4	5
Ip	102	97.9	88.4	79.8	70.9
Is	4.7	4.2	4.0	3.7	3.3
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5450	5200	4725	4250	3913
Ws1	5	5	2.5	2.5	2.5
Ws2	250	238	213	188	175
R	21.80	21.89	22.23	22.67	22.36
% Error	-8.24	-8.63	-10.04	-11.76	-10.55
Tan θ	0.020	0.021	0.012	0.013	0.014
θ	1.1	1.2	0.67	0.76	0.82

ตารางที่ 3

ชนิด : Ratio 100/5 NO.3

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.18 MM.

ครัทช์	1	2	3	4	5
Ip	102	97.1	88.2	79.6	70.1
Is	4.7	4.5	4.3	3.6	3.1
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5296	5106	4842	4260	3800
Ws1	5	5	2.5	2.5	2.5
Ws2	250	238	225	200	175
R	21.18	21.45	21.52	21.30	21.71
% Error	-5.57	-6.76	-7.06	-6.09	-7.89
Tan θ	0.020	0.021	0.011	0.0125	0.014
θ	1.15	1.206	0.637	0.716	0.818

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4

ชนิด : Ratio 100/5 NO.4

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.18 MM.

คว้งหนี	1	2	3	4	5
Ip	100	95.8	87.1	71.9	63.8
Is	4.9	4.7	4.2	3.8	3.4
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5425	5200	4625	4100	3650
Ws1	5	5	2.5	2.5	2.5
Ws2	263	250	225	200	175
R	20.66	20.80	20.82	20.50	20.86
% Error	-3.21	-3.83	-3.94	-4.43	-4.1
Tan θ	0.019	0.020	0.011	0.013	0.014
θ	1.1	1.2	0.6	0.7	0.8

ตารางที่ 5

ชนิด : Ratio 60/5 NO.1

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM.

คว้งหนี	1	2	3	4	5
Ip	56.9	51.7	41.4	31.3	20.8
Is	4.6	4.2	3.3	2.5	1.6
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	2892	2640	2197	1590	1098
Ws1	20	15	15	12.5	5
Ws2	238	213	175	125	87.5
R	12.13	12.40	12.51	12.66	12.53
% Error	-1.10	-3.17	-4.08	-5.19	-4.23
Tan θ	0.084	0.071	0.086	0.1	0.057
θ	4.8	4.1	4.9	5.7	3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6

ชนิด : Ratio 60/5 NO.2

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM.

ตัวชี้	1	2	3	4	5
Ip	56.6	51.8	41.4	31.2	20.8
Is	4.6	4.2	3.3	2.1	1.7
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	2090	2738	2130	1590	1110
Ws1	20	15	12.5	7.5	5
Ws2	238	221	175	125	87.5
R	12.18	12.36	12.14	12.70	12.66
% Error	-1.48	-2.91	-1.15	-5.49	-5.21
Tan θ	0.084	0.068	0.072	0.060	0.057
θ	4.8	3.9	4.1	3.43	3.26

ตารางที่ 7

ชนิด : Ratio 60/5 NO.3

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.18 MM.

ตัวชี้	1	2	3	4	5
Ip	56.5	51.8	41.6	31.2	21
Is	4.6	4.1	3.3	2.5	1.7
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	2910	2666	1986	1590	1080
Ws1	20	16	13.2	10	5
Ws2	238	213	160	125	87.5
R	12.21	12.48	12.37	12.68	12.32
% Error	-1.71	-3.85	-2.99	-5.36	-2.62
Tan θ	0.073	0.075	0.083	0.08	0.057
θ	4.2	4.3	4.7	4.6	3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8

ชนิด : Ratio 60/5 NO.4

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.18 MM.

ทวิชนี	1	2	3	4	5
Ip	57.2	51.5	42.2	31.1	20.8
Is	4.6	4.2	3.3	2.5	1.7
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	2910	2740	2112	1575	1080
Ws1	15	13	10	7.5	5
Ws2	238	221	175	125	87.5
R	12.23	12.38	12.10	12.57	12.38
% Error	-1.87	-3.07	-0.83	-4.53	-3.07
Tan θ	0.063	0.057	0.057	0.060	0.057
θ	3.6	3.3	3.3	3.4	3.3

การออกแบบครั้งที่ 2

ทำการออกแบบ CT. ชนิด 100/5 และ 60/5 Amp 5 VA โดยใช้แกนเหล็ก M4 ความหนา 0.27 mm สำหรับการสร้างและสมมติแผ่นเตอร้การพันของแกนเหล็กมีแผ่นเตอร้เท่ากับ 20% ดังนั้นทำการชดเชยการพันแกนเหล็กโดยคูณแผ่นเตอร้เท่ากับ 1.2 จำนวนรอบของแกนเหล็กเมื่อคำนึงถึงแผ่นเตอร้การพันจะได้ดังนี้

- สำหรับ CT. ชนิด 100/5 Amp

$$\text{เหล็ก M4 ความหนา 0.27 mm} = 24 \times 1.2 = 29 \text{ รอบ}$$

- สำหรับ CT. ชนิด 60/5 Amp

$$\text{เหล็ก M4 ความหนา 0.27 mm} = 39 \times 1.2 = 47 \text{ รอบ}$$

เมื่อถือว่าการพันจำนวนของแกนเหล็กเพิ่ม 20% ไม่มีผลต่อทางเดินแม่เหล็ก นำข้อมูลที่คำนวณได้ทำการสร้าง CT. และทดสอบผลด้วยวงจรร direct deflection method ข้อมูลจากงานการคำนวณการทดสอบแสดงในตารางที่ 9-12 ที่ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9

ชนิด : Ratio 100/5 NO.5

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. เพิ่ม พ.ท. 20%

ครั้งที่	1	2	3	4	5
Ip	100	95	87.1	78.3	70
Is	4.98	4.7	4.3	3.9	3.4
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5305	5102	4653	4114	3651
Ws1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Ws2	262.5	250	225	200	175
R	20.21	20.41	20.68	20.57	20.86
% Error	-1.04	-2.01	-3.29	-2.77	-4.12
Tan θ	0.009	0.010	0.011	0.013	0.014
θ	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8

ตารางที่ 10

ชนิด : Ratio 100/5 NO.6

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. เพิ่ม พ.ท. 20%

ครั้งที่	1	2	3	4	5
Ip	98.3	94.4	85	76.4	68.2
Is	4.8	4.6	4.2	3.7	3.3
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5025	4775	4350	3900	3672
Ws1	5	2.5	2.5	2.5	2.5
Ws2	250	238	213	188	175
R	20.09	20.10	20.47	20.79	20.98
% Error	-0.48	-0.52	-2.29	-3.84	-4.67
Tan θ	0.02	0.01	0.012	0.013	0.014
θ	1.1	0.6	0.6	0.8	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11

ชนิด : Ratio 60/5 NO.5

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. เพิ่ม พ.ท. 20%

ตัวชี้	1	2	3	4	5
Ip	59.5	57	52.2	47.2	42
Is	4.7	4.4	4.1	3.7	3.3
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	3210	3015	2745	2475	2205
Ws1	12.5	10	7.5	5	2.5
Ws2	250	237.5	225	200	175
R	12.82	12.68	12.19	12.37	12.59
% Error	-6.42	-5.38	-1.58	-2.99	-4.75
Tan θ	0.05	0.042	0.035	0.023	0.014
θ	2.86	2.41	1.89	1.43	0.82

ตารางที่ 12

ชนิด : Ratio 60/5 No.6

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M.4 ความหนา 0.27 mm. เพิ่ม พ.ท. 20 %

ตัวชี้	1	2	3	4	5
Ip	59	56.2	51.3	47.2	43
Is	4.7	4.3	4.1	3.6	3.3
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	3157	3010	2743	2550	2210
Ws1	12.5	10	7.5	5	2.5
Ws2	250	235	220	205	175
R	12.62	12.80	12.46	12.43	12.62
% Error	-4.91	-6.25	-3.69	-3.45	-4.91
Tan θ	0.05	0.042	0.034	0.024	0.014
θ	2.86	2.43	1.95	1.39	0.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารราชการในนามของกรมการศึกษานานาชาติ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบครั้งที่ 3

ทำการออกแบบโดยการลดรัศมีภายในลงจาก 2.4 เหลือ 1.65 cm โดยใช้เหล็ก M4 ความหนา 0.27 mm โดยยังคงใช้พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กตามการออกแบบครั้งที่ 1 โดย CT. ชนิด 100/5 Amp จะมีจำนวนรอบการพันแกนเหล็กเท่ากับ 24 รอบและสำหรับชนิด 60/5 Amp จำนวนการพันเท่ากับ 39 รอบ

เมื่อทำการลดรัศมีลงจะทำให้ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กสั้นลง ดังนี้

- สำหรับ CT. ชนิด 100/5 Amp รัศมีภายนอกเท่ากับ

$$= 1.65 + 0.625 \text{ cm}$$

$$= 2.275 \text{ cm}$$

$$= \frac{1.65 + 2.275}{2} = 1.9625 \text{ cm}$$

ดังนั้นรัศมีเฉลี่ย

ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ย (l) = $2\pi r$

$$= 2\pi \times 1.9625$$

$$= 12.33 \text{ cm}$$

- สำหรับ CT. ชนิด 60/5 Amp รัศมีภายนอกเท่ากับ

$$= 1.65 + 1.043 \text{ cm}$$

$$= 2.693 \text{ cm}$$

ดังนั้นรัศมีเฉลี่ย

$$= \frac{1.65 + 2.693}{2} = 2.1715 \text{ cm}$$

ทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กเฉลี่ย (l) = $2\pi r$

$$= 2\pi \times 2.1715$$

$$= 13.64 \text{ cm}$$

นำข้อมูลที่คำนวณได้สร้าง CT. และทดสอบผลด้วยวงจร direct deflection method ข้อมูลจากการทดสอบแสดงได้ในตารางที่ 13-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13

ชนิด : Ratio 100/5 NO.7

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. เพิ่ม พ.ท. 20%

คว้ง	1	2	3	4	5
Ip	98.3	90.3	81.8	73.2	64.8
Is	4.8	4.4	4.0	3.6	3.2
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5100	4675	4301	3800	3350
Ws1	8	6	5	5	5
Ws2	250	230	212.5	187.5	165
R	20.39	20.32	20.23	20.26	20.30
% Error	-1.92	-1.57	-1.14	-1.28	-1.45
Tan θ	0.032	0.026	0.024	0.027	0.030
θ	1.8	1.5	1.3	1.5	1.7

ตารางที่ 14

ชนิด : Ratio 100/5 NO.8

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. เพิ่ม พ.ท. 20%

คว้ง	1	2	3	4	5
Ip	99.6	95.8	87.1	78.7	70
Is	4.6	4.4	4.0	3.6	3.2
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	4958	4705	4467	3930	3432
Ws1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Ws2	238	225	213	188	163
R	20.83	20.91	20.97	20.92	21.05
% Error	-3.98	-4.35	-4.63	-4.4	-4.99
Tan θ	0.011	0.011	0.012	0.013	0.015
θ	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15

ชนิด : Ratio 60/5 NO.6

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. ลดทาสเตนแม่เหล็ก

ตัวชี้	1	2	3	4	5
Ip	57.1	52.1	41.6	31.3	20.8
Is	4.6	4.2	3.4	2.5	1.7
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	2880	2604	2095	1552	1036
Ws1	12	10	7.5	5	3
Ws2	238	213	170	125	82
R	12.09	12.21	12.31	12.41	12.63
% Error	-0.707	-1.72	-2.518	-3.304	-4.988
Tan θ	0.050	0.047	0.044	0.040	0.037
θ	2.9	2.7	2.5	2.3	2.1

ตารางที่ 16

ชนิด : Ratio 60/5 NO.7

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. ลดทาสเตนแม่เหล็ก

ตัวชี้	1	2	3	4	5
Ip	57.5	52.3	41.8	31.2	20.6
Is	4.6	4.2	3.4	2.5	1.7
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	3009	2745	2130	1590	1107
Ws1	12	10	5	5	2.5
Ws2	248	225	175	130	90
R	12.12	12.19	12.17	12.22	12.29
% Error	-0.99	-1.559	-1.364	-1.80	-2.36
Tan θ	0.048	0.044	0.029	0.038	0.028
θ	2.8	2.5	1.6	2.2	1.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบครั้งที่ 4

ทำการออกแบบ CT. โดยใช้ CT. จากการออกแบบครั้งที่ 1 และทำการตรวจสอบของ
 ขดลวดทางทุติยภูมิ 1 รอบ จาก CT. ชนิด 100/5 NO1, No2 และ ชนิด 60/5 No2, No3 ทำ
 การทดสอบผลด้วยวงจร direct deflection method ข้อมูลจากการทดสอบแสดงได้ในตาราง
 ที่ 17-20

ตารางที่ 17

ชนิด : Ratio 100/5 NO.9

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. ลดทาดินแม่เหล็ก

พารามิเตอร์	1	2	3	4	5
Ip	98.0	93.6	83.2	77.0	68.4
Is	4.7	4.5	4.0	3.7	3.3
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	4950	4725	4300	3900	3425
Ws1	10	7.5	5	2.5	2.5
Ws2	238	225	205	188	163
R	20.82	20.99	20.97	20.79	21.07
% Error	-3.94	-4.71	-4.62	-3.84	-5.09
Tan θ	0.042	0.033	0.024	0.013	0.015
θ	2.4	1.9	1.4	0.8	0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 18

ชนิด : Ratio 100/5 NO.10

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. สดทาสีเงินแม่เหล็ก

คว้งน้	1	2	3	4	5
Ip	98.1	94	85	76.7	68.5
Is	4.9	4.7	4.3	3.9	3.5
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	4925	4700	4215	3850	3413
Ws1	10	7.5	5	5	2.5
Ws2	250	237.5	212.5	200	175
R	19.68	19.78	19.83	19.24	19.50
% Error	1.61	1.71	0.86	3.93	2.56
Tan θ	0.04	0.032	0.024	0.025	0.014
θ	2.3	1.8	1.3	1.4	0.8

ตารางที่ 19

ชนิด : Ratio 60/5 NO.8

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. สดทาสีเงินแม่เหล็ก

คว้งน้	1	2	3	4	5
Ip	58.8	65.4	51.6	46.4	40.8
Is	5.2	5	4.6	4.1	3.6
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	2985	2850	2580	2340	2070
Ws1	20	20	17.5	12.5	10
Ws2	265	250	225	200	175
R	11.23	11.36	11.43	11.68	11.81
% Error	6.838	5.597	4.969	2.766	1.617
Tan θ	0.075	0.08	0.078	0.063	0.057
θ	4.3	4.6	4.4	3.6	3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 20

ชนิด : Ratio 60/5 NO.9

หมายเหตุ : เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 MM. สดหายเดินแม่เหล็ก

คว้งที่	1	2	3	4	5
Ip	55.9	56.5	51.5	46.3	41
Is	5.1	4.9	4.5	4.0	3.6
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	2979	2765	2543	2325	2041
Ws1	20	17.5	15	15	12.5
Ws2	245	225	205	187.5	162.5
R	12.12	12.25	12.37	12.36	12.52
% Error	-0.99	-2.04	-2.99	-2.92	-4.15
Tan θ	0.082	0.078	0.073	0.08	0.077
θ	4.7	4.4	4.2	4.6	4.4

ทำการทดสอบ CT จากท้องตลาด 100/5 5 VA class 1 และ class 3 และ 60/5 5 VA class 1 class 3 ด้วยวงจร direct deflection method ข้อมูลจากการทดสอบแสดงได้ในตารางที่ 21-24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 21

ชนิด : Ratio 60/5 CLASS 1

หมายเหตุ : C.T. ตลาด

ควัณฑ์	1	2	3	4	5
Ip	58	52.8	42.1	31.7	21
Is	4.7	4.3	3.4	2.6	1.7
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	3060	4790	2238	1680	896
Ws1	22.5	20	15	12.5	5
Ws2	250	225	180	137.5	69.4
R	12.19	12.35	12.39	12.17	12.87
% Error	-1.56	-2.84	-3.15	-1.38	-6.76
Tan θ	0.09	0.09	0.083	0.091	0.072
θ	5.1	5.1	4.7	5.12	4.1

ตารางที่ 22

ชนิด : Ratio 60/5 CLASS 3

หมายเหตุ : C.T. ตลาด

ควัณฑ์	1	2	3	4	5
Ip	58	52.8	42.1	31.7	21
Is	5.1	4.5	3.6	2.7	1.7
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	3120	2280	2280	1710	1140
Ws1	20	20	15	12.5	5
Ws2	275	250	200	150	100
R	11.32	11.48	11.37	11.36	11.39
% Error	6.05	4.50	5.56	5.63	5.39
Tan θ	0.073	0.08	0.075	0.083	0.05
θ	4.2	4.6	4.3	4.7	2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 23

ชนิด : Ratio 100/5 CLASS 1

หมายเหตุ : C.T. ตลาด

ครั้งที่	1	2	3	4	5
Ip	104	88	70.3	52.7	35.3
Is	4.8	3.9	3.2	2.4	1.6
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5650	4650	3750	2800	1900
Ws1	27.5	25	17.5	15	12.5
Ws2	262.5	212.5	175	125	87.5
R	21.52	21.88	21.42	22.4	21.7
% Error	-7.06	-8.59	-6.62	-10.79	-7.83
Tan θ	0.104	0.117	0.100	0.120	0.142
θ	5.93	6.67	5.7	6.84	8.08

ตารางที่ 24

ชนิด : Ratio 100/5 CLASS 3

หมายเหตุ : C.T. ตลาด

ครั้งที่	1	2	3	4	5
Ip	103.3	86.6	69.3	52.3	35
Is	5.5	4.6	3.7	2.7	1.8
Wp1	0	0	0	0	0
Wp2	5600	4700	3700	2800	1550
Ws1	37.5	25	15	15	12
Ws2	300	250	200	150	86
R	18.67	18.8	18.5	18.67	17.44
% Error	7.12	6.13	8.10	7.123	14.67
Tan θ	0.125	0.100	0.075	0.100	0.139
θ	7.12	5.7	4.28	5.7	7.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำออกไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

- จากตารางที่ 1, 2 และตารางที่ 3, 4 CT. ชนิด 100/5 A. เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 mm และความหนา 0.18 mm ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่สภาวะผลกระทบทางปฐมภูมิเต็มพิกัด พบว่าเมื่อเนื้อเหล็กมีความหนาน้อย ๆ (ความหนา 0.18 มม.) จะทำให้ค่า R (หรือ % ERROR) ลดลงและความคลาดเคลื่อนของมุมเฟส (ϕ) มีค่าใกล้เคียงกัน
- จากตารางที่ 5, 6 และตารางที่ 7, 8 ชนิด CT. 60/5 A. เนื้อเหล็กชนิด M4 ความหนา 0.27 มม. และความหนา 0.18 มม. ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่สภาวะผลของผลกระทบทางปฐมภูมิเต็มพิกัดพบค่า R (หรือ % Error) มีค่าใกล้เคียงกันและค่าความคลาดเคลื่อนของมุมเฟส (ϕ) ของ CT. ที่ทำมาจากแกนเหล็ก M4 ความหนา 0.18 มม. จะมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า CT. ที่ทำจากแกนเหล็ก M4 ความหนา 0.27 มม.
- จากการออกแบบครั้งที่ 2 เมื่อคำนึงถึงแฟคเตอร์ต่างๆ สำหรับการสร้าง CT. เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างตารางที่ 1, 2 กับตารางที่ 9, 10 ของ CT. ชนิด 100/5 A. และ ตารางที่ 5, 6 กับตารางที่ 11, 12 ของ CT. ชนิด 60/5 A. ตามลำดับ พบว่าค่า R (หรือ % Error) และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมเฟส (ϕ) ของ CT. ที่สร้างขึ้นโดยคำนึงถึงแฟคเตอร์ จะมีค่าลดลงจากเดิมเมื่อเปรียบเทียบการออกแบบครั้งที่ 1
- จากการออกแบบครั้งที่ 3 ทำการลดทางเดินของแม่เหล็ก (I) ของ CT. โดยยังคงพื้นที่หน้าตัดของ CT. เท่ากับ CT. ที่ทำการออกแบบครั้งที่ 1 จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาที่สภาวะของผลกระทบทางปฐมภูมิเต็มพิกัดโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบจากตารางที่ 1, 2 กับตารางที่ 13, 14 และตารางที่ 5, 6 กับตารางที่ 15, 16 พบว่า CT. ที่ทำการออกแบบโดยลดทางเดินแม่เหล็ก (I) ลง จากการออกแบบครั้งที่ 3 R. (หรือ % Error) จะมีค่าและค่าความคลาดเคลื่อนมุมเฟสต่ำกว่า CT. ที่ทำการออกแบบสร้างครั้งที่ 1 ที่มีทางเดินแม่เหล็กยาวกว่า
- จากการออกแบบครั้งที่ 4 ทำการลดรอบของขดลวดทุติยภูมิของ CT. ลงจำนวน 1 รอบ จากข้อมูลในตารางที่ 17, 18, 19 และ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 1, 2, 6 และ 7 ตามลำดับ พบว่าค่าผลกระทบทางทุติยภูมิ (I_{II}) ของ CT. ที่ทำการลดรอบของขดลวดทางทุติยภูมิ จะมีค่าสูงขึ้น และช่วยทำให้ค่า R (หรือ % Error) และความคลาดเคลื่อนมุมเฟสลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์

การทดสอบ CT. จากห้องตลาด Class 1 และชนิด 100/5 A. และ 60/5 A. ดังผลการทดสอบในตารางที่ 20, 22, 23 และ 24 หากสมมติว่า CT. จากห้องตลาดมีความถูกต้องตามมาตรฐานของ CT. ในแต่ละ Class แล้วนั้น ค่าที่แสดงในตารางที่ 21-24 ก็จะมีคลาดเคลื่อนจากความเป็จริงสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดในการทดสอบเองหรืออาจเกิดจากผลการบันทึกค่าผิดพลาดจากการอ่านของผู้ทดสอบ กล่าวได้ว่าชุดทดสอบที่ทำงานในโครงการนี้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนสูงอยู่มาก

และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่มามากขึ้นยังมีสาเหตุเนื่องมาจากการชดเชยรอบทางด้านปฐมภูมิขณะทำการทดสอบ CT. ทั้งนี้เพราะขณะทำการทดสอบ ที่มีพิกัดกระแสสูงเป็นขนาด 60-100 แอมป์นั้นจำเป็นต้องใช้โหลดที่มีจำนวนมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติขณะทำการทดสอบอาจจะสามารถใช้โหลดคิงกระแสได้สูงสุดเพียง 10 แอมป์ เป็นต้น หากต้องการทดสอบ CT. ชนิด 100/5 แอมป์ที่ภาวะทำงานเต็มพิกัด จึงจำเป็นต้องชดเชยรอบทางปฐมภูมิโดยการพันจำนวนรอบของ CT. เป็น 10 รอบซึ่งค่าที่อ่านได้ทางด้านปฐมภูมิ (พว) จะต้องคูณแฟกเตอร์เท่ากับ 10 ด้วย หากแอมป์มิเตอร์มีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อมีการคูณแฟกเตอร์การชดเชยรอบ ผลก็คือจะทำให้ความคลาดเคลื่อนยิ่งสูงขึ้นมาจากเดิม เป็นสาเหตุให้การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อนสูง

จากผลการทดสอบ CT. ที่ทำการออกแบบที่ผ่านมาพบว่าผลของทางเดินแม่เหล็ก , ความหนาของเนื้อเหล็ก, แฟกเตอร์เนื่องจากการสร้างแกนเหล็ก, ขนาดของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก, ความยาวของเส้นลวด, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด, ความหนาของเนื้อเหล็กสิ่งต่างๆเหล่านี้มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของ CT.

จากการทดสอบการใส่แกนเหล็กที่มีความหนาต่างๆ มาทำแกนเหล็กสำหรับ CT. นั้นจะช่วยทำให้ CT. มีความคลาดเคลื่อนลดต่ำลง ทั้งนี้เพราะแกนเหล็กบางๆ จะมีความต้านทานการไหลของกระแสไหลวน (eddy current) สูงจึงช่วยลดกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในแกน CT. และช่วยทำให้กระแส (I_o) มีขนาดลดลงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนใน CT. ลดลงด้วย

ในทางปฏิบัติแกนเหล็กจะมีรอยเกิดขึ้นที่ขอบของเนื้อเหล็ก (ตรงรอยตัด) ในการม้วนแกนเหล็กของ CT. การเรียงตัวของแผ่นเหล็กจึงไม่แนบสนิท เกิดช่องว่างระหว่างแกนเหล็กเป็นสาเหตุทำให้แรงดันแม่เหล็กสูงขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ต่างๆในส่วนนี้ด้วยด้านการค้าจากการทดสอบเมื่อมีการเพิ่มพื้นที่แกนเหล็กเพิ่มขึ้นจากที่คำนวณ โดยถือว่าทางเดินแม่เหล็กนั้นคงนำไปใช้

พบว่า CT. นั้นมีความคลาดเคลื่อนต่ำลง

การลดทางเดินแม่เหล็กใน CT. นั้นทำให้เกิดค่า Magnetic Reluctance (R) ต่ำลง ซึ่งเมื่อแก้ไขโดยการลดทางเดินแม่เหล็กเพียงอย่างเดียวโดยพื้นที่ (A) คงที่ เมื่อ A คงที่ Magnetic flux (ϕ) จะคงที่ ดังนั้นค่า R ต่ำลง ทำให้ค่า Magnetomotive force (mmf) ของวงจรแม่เหล็กลดลงซึ่งกล่าวได้ว่าแกน CT. นั้นจะใช้ mmf. ในการสร้าง ϕ ที่ค่าแรงแม่เหล็กต่ำซึ่งจะช่วยให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นใน CT. ลดลงได้

การถอยรอบของ CT. ทางด้านทุติยภูมิจะช่วยทำให้เกิดกระแสทางทุติยภูมิ (I_2) สูงขึ้น การถอยรอบลดนั้นในทางปฏิบัติเหมาะที่จะใช้กับ CT. ที่มีจำนวนอัตรารอบลดสูงๆ เพราะถ้ามีการถอยรอบลด 1 รอบใน CT. ที่มีจำนวนอัตรารอบลดต่ำๆ ผลก็คือ I_2 จะเกิดสูงขึ้นไปซึ่งจะทำให้ได้ I_2 ที่มีขนาดเกินจากที่ออกแบบไว้ พิจารณาการเพิ่มขึ้นของ I_2 ได้จาก

$$\text{mmf } 1 = \text{mmf } 2 \dots\dots\dots (7.1)$$

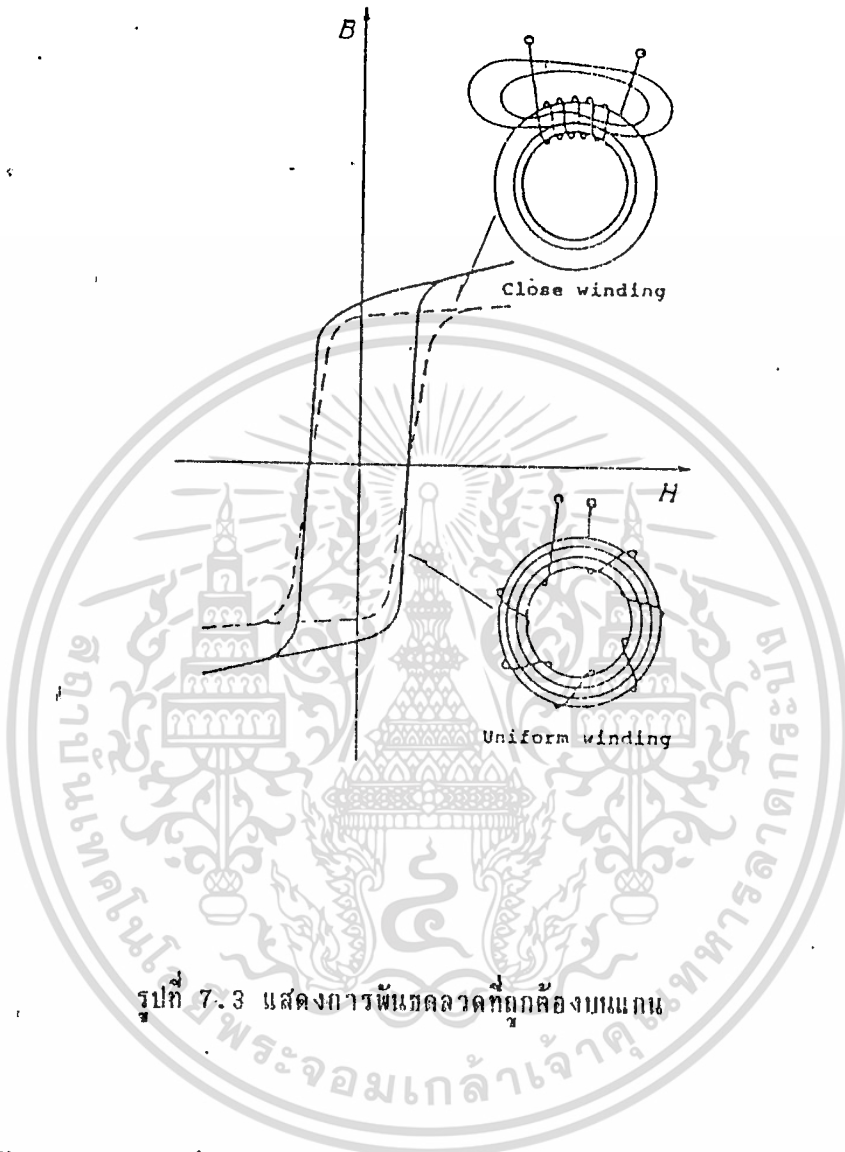
$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots (7.2)$$

จะได้
$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 \dots\dots\dots (7.3)$$

จากสมการ 7.3 การลดจำนวนรอบ N_2 จะทำให้ I_2 สูงขึ้น การจะแก้ไขเพื่อทำให้ CT. แสดงค่าให้ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ นั้นจะต้องเป็นไปตามคุณสมบัติสำหรับ CT. แต่ละตัว ซึ่งจะช่วยให้เกิดความมั่นใจว่า CT. ที่ทำการลดรอบลงนั้นมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดเพราะ CT. แต่ละตัวนั้นในทางปฏิบัติจะให้ผลของ I_2 ที่แตกต่างกัน

ลักษณะการพันขดลวดบนแกนเหล็กก็จะมีผลต่อ leakage reactance ลักษณะการพันที่ดีสำหรับ CT. ควรจะเป็นแบบ uniform winding เพราะจะช่วยลดผลของ leakage reactance ลงได้

การเลือกแกนเหล็กที่มีความซึมซาบสูงๆ นั้นจะช่วยทำให้ CT. มีคุณสมบัติดีขึ้น แต่เนื่องจากการหาวัสดุเพื่อที่จะมาใช้ในการทดสอบในโครงการนี้เป็นไปด้วยความลำบากเพราะแกนเหล็กสำหรับการผลิต CT. นั้นไม่ได้มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไปจึงทำให้ผลการทดสอบและข้อมูลต่างๆ ที่จะใช้เปรียบเทียบกับของลงไปอีกทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบในโครงการนี้ก็มีความคลาดเคลื่อนสูงมากทำให้ผลการทดสอบในบางข้อมูลที่แสดงไว้ อาจไม่เป็นไปตามทฤษฎี ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้านเนื้อหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 แสดงการพันขดลวดที่ถูกต้องบนแกน

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่ายังมีข้อมูลบางอย่างที่ซึ่งไม่ได้ทำการทดสอบคือการเปรียบเทียบค่ามูฟเฟส (๑) ที่ได้จากการคำนวณกับการวัดจากออสซิลอโคป และผลจากการป้อนโพลดที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งหากทำการทดสอบทั้งสองรายการเพิ่มเติมจะทำให้การทดสอบสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit)

$$F = NI = \text{mmf.} = \phi R = Hl$$

$$R = \frac{l}{\mu A}$$

$$\phi = BA$$

$$B = \mu H = 4\pi \times 10^{-7} \mu_r H$$

เมื่อ

F = แรงเคลื่อนแม่เหล็ก	หน่วย	AT
N = จำนวนรอบของขดลวด	"	Turn
I = จำนวนกระแสที่ไหลผ่านขดลวด	"	A
ϕ = เส้นแรงแม่เหล็ก	"	Wb
R = ความต้านทานเส้นแรงแม่เหล็ก	"	AT/Wb
H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก	"	AT/m
B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	"	Wb/m ²
μ = สภาพความซึมซาบทางสารแม่เหล็ก	"	H/m
l = ความยาวของวงจรแม่เหล็ก	"	m
A = พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็ก	"	m ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ตามกฎการเหนี่ยวนำ

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

เมื่อ $\phi = \phi_m \sin \omega t$

$$e = \omega N \phi_m \cos \omega t$$

และ $\omega = 2\pi f$

ที่จุด Max. ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ จะเป็น

$$E_{\text{max}} = 2\pi f N \phi_{\text{max}}$$

$$E_{\text{rms}} = 2\pi f N \phi_{\text{max}}$$

$$/2$$

$$= 4.44 f N \phi_m$$

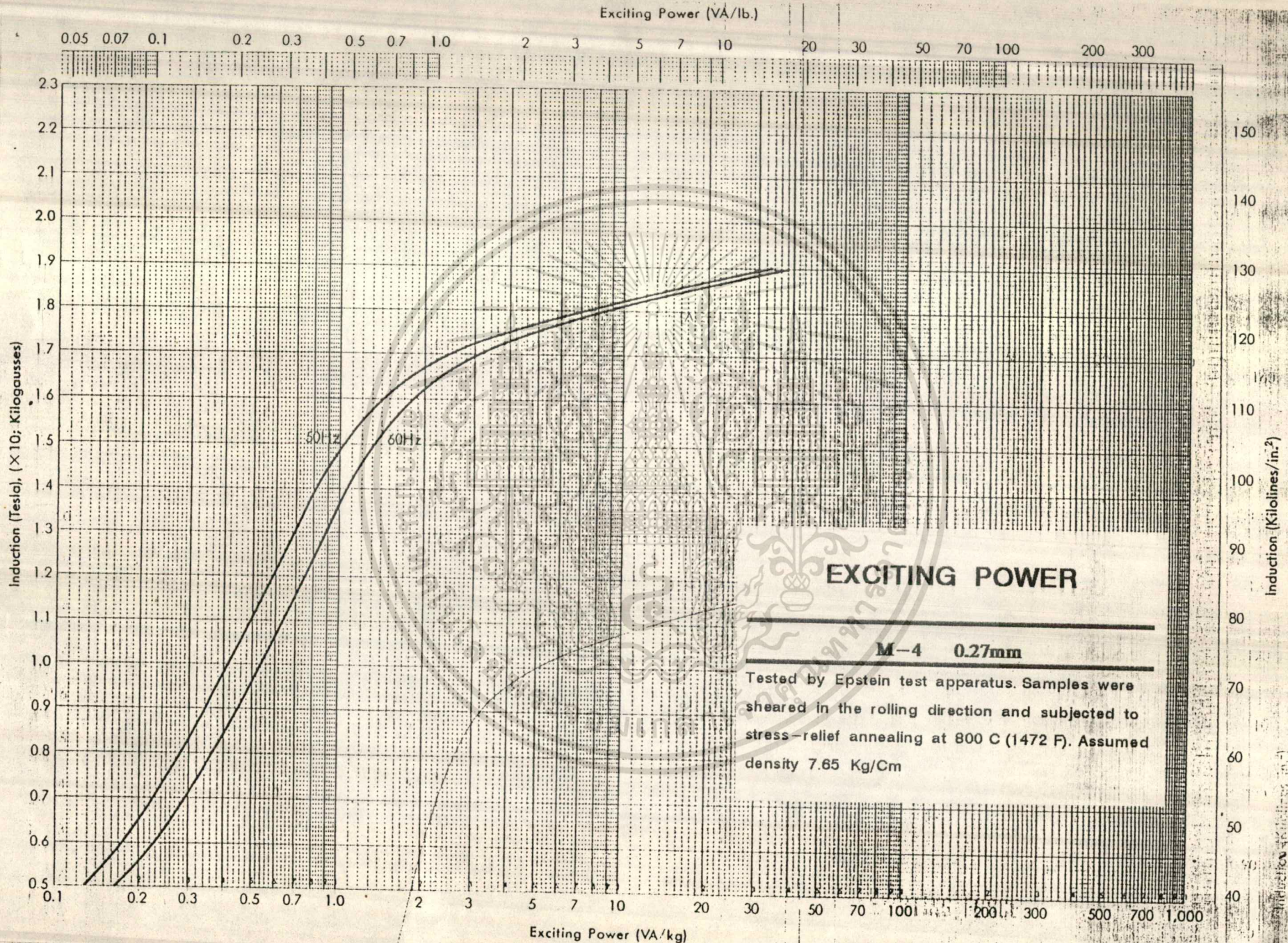
$$= 4.44 f N B A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

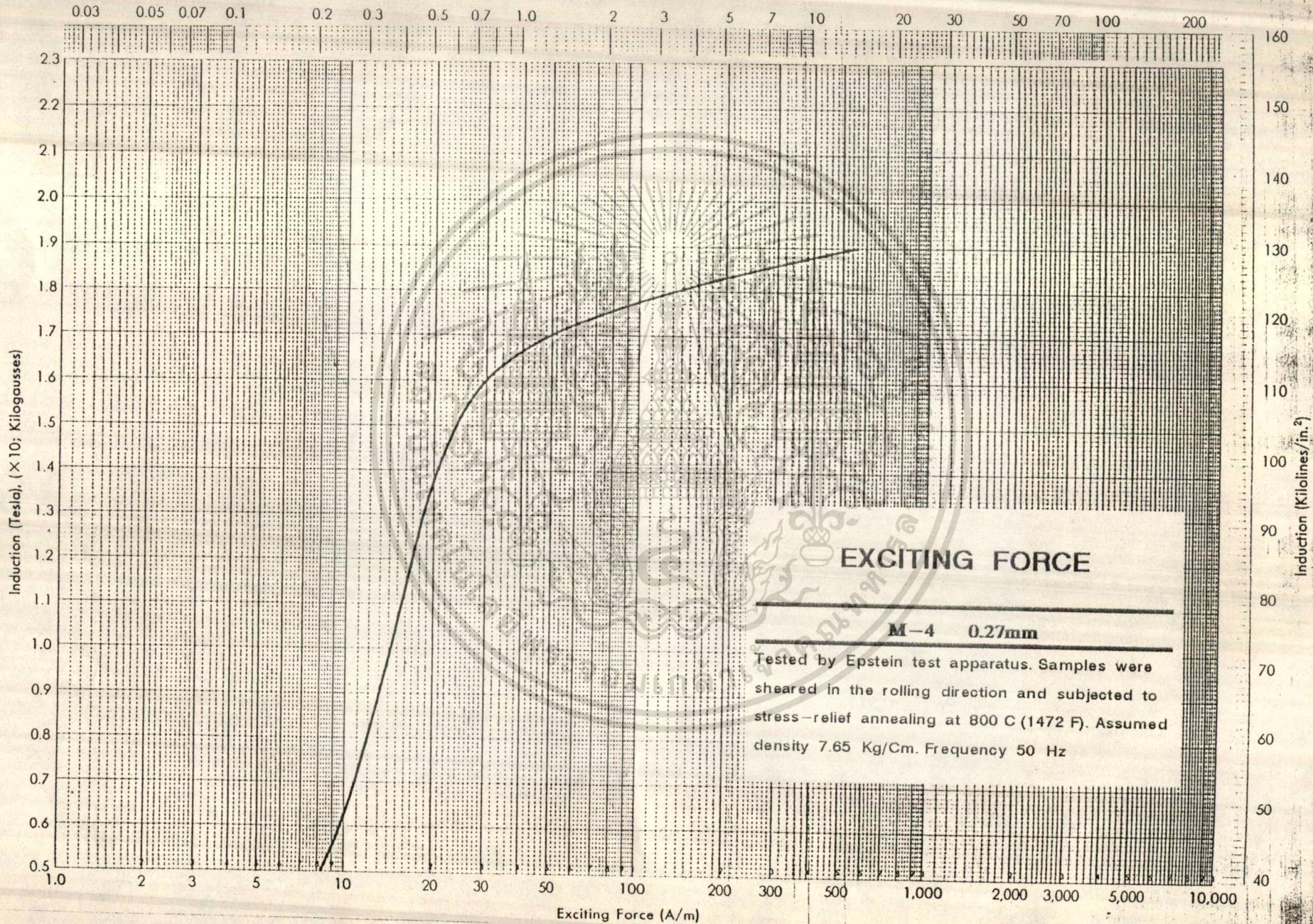
ภาคผนวก 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



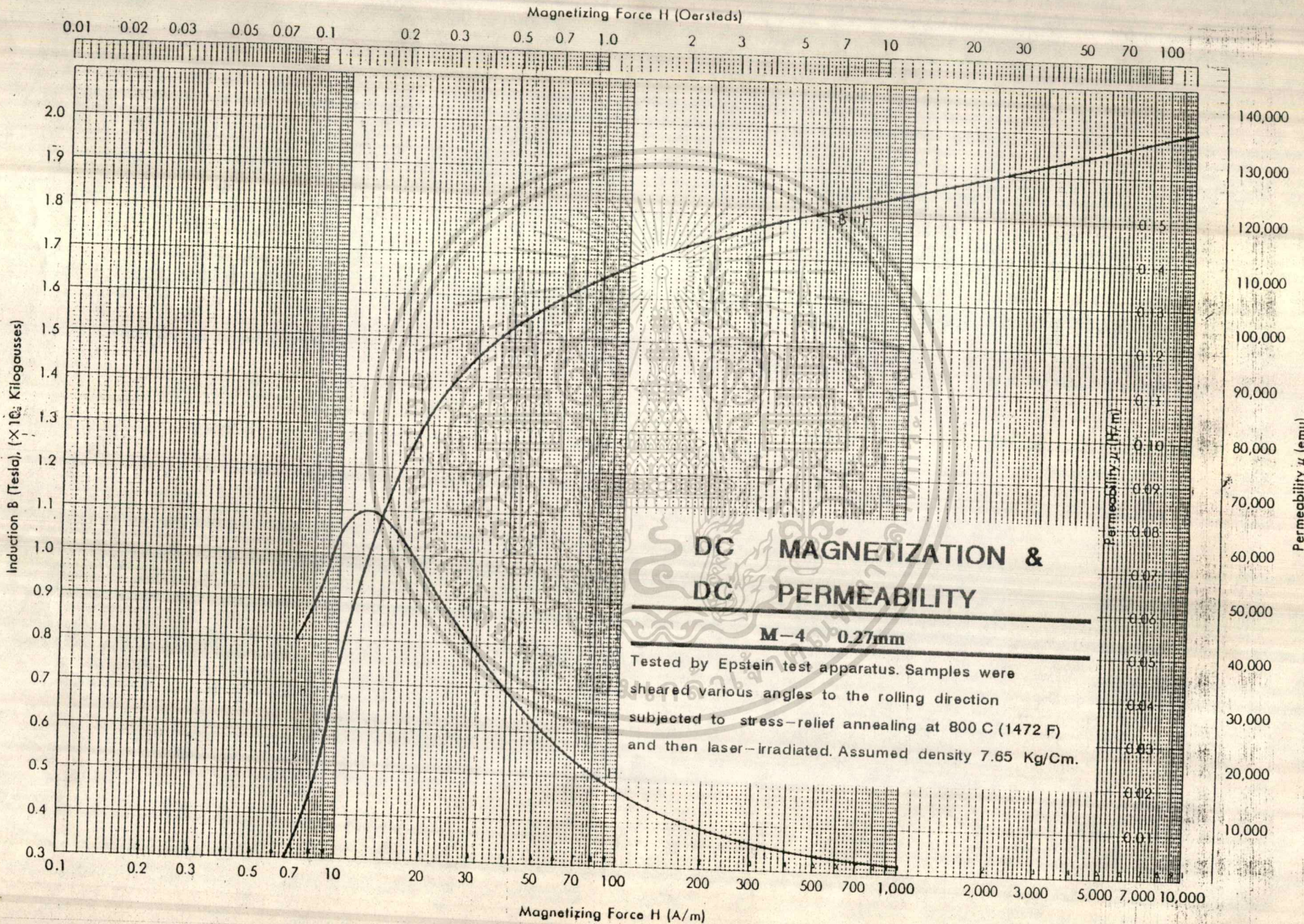
Exciting Force (A/in.)

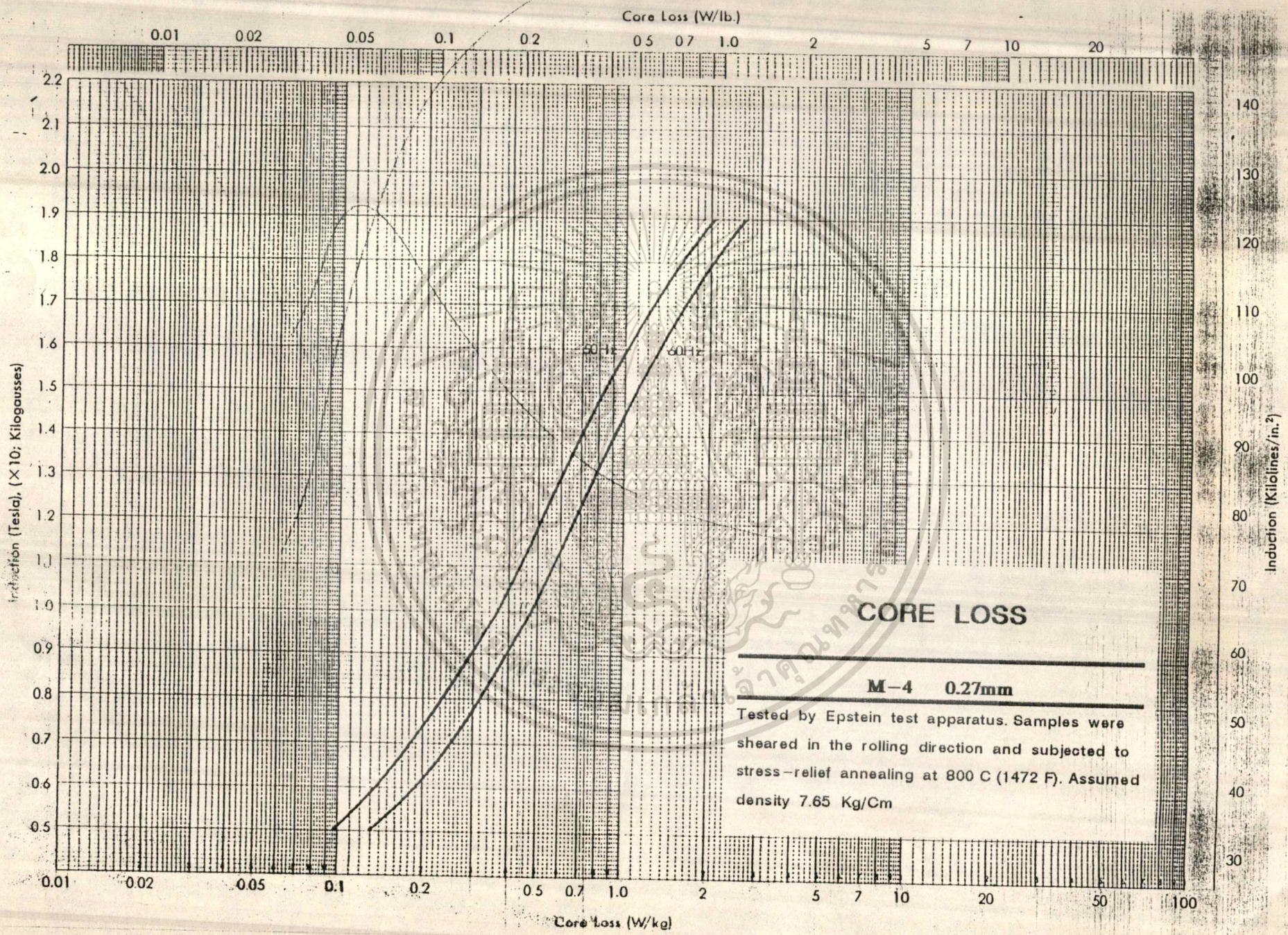


EXCITING FORCE

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. Frequency 50 Hz





หนังสืออ้างอิง

- 1.) E.W GOLDING , MEASUREMENTS AND MEASURING INSTRUMENTS.,
P.363 - P.423 , PITMA.
- 2.) FOREST K. HARRIS,Ph.D , ELECTRICAL MEASUREMENTS , P.542 -
P.600, PRIVATE LIMITED.
- 3.) เอก ไชยสวัสดิ์ , การวัดและเครื่องวัดไฟฟ้า. , หน้า79 - หน้า81, บริษัท
สามเสนการพิมพ์ จำกัด. กรุงเทพฯ
- 4.) วิบูล เขมรังษณ์ , ทฤษฎีเครื่องวัดไฟฟ้า การวัดขนาดทางไฟฟ้า , หน้า209
- หน้า217 , โรงพิมพ์เจริญธรรม กรุงเทพฯ
- 5.) รศ. ศุภี บรรจงจิตร , อุปกรณ์และการติดตั้งในงานระบบไฟฟ้า , บริษัทซีเอ็ด
ยูเคชั่น จำกัด, 2535
- 6.) มาตรฐานการทดสอบ CURRENT TRANSFORMER มก.กพพ. 4-2534
เอกสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 7.) B. RAVINDRANATH , M. CHANDER, POWER SYSTEM PROTECTION AND
SWITCHGEAR . P.136-P.157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

- ขอขอบคุณ คุณชไม เล็กเจริญ ผู้จัดการโรงงาน บริษัทไดนาคาสส์ จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์ เหล็ก H.4 เพื่อใช้เป็นวัสดุในการสร้างแกนหม้อแปลงกระแส รวมทั้งคุณสมบัติและรายละเอียดที่เอื้ออำนวยในการสนับสนุนการทำงานของทีมงาน
- ขอขอบคุณ หจก. วาทกิด เอ็นจิเนียริงซัพพลาย ที่ได้ให้รายละเอียดและข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุด CURRENT TRANSFORMER TESTER รวมทั้งได้ให้บริการทางด้าน COMPUTER ซึ่งเอื้ออำนวยในด้านการเก็บข้อมูล
- ขอขอบคุณ คุณกำธร วิธนาเขมาภีร์รัตน์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและเก็บอุปกรณ์ระหว่างที่ทีมงานสร้างชุดทดสอบ
- ขอขอบคุณ คุณจรรยา ทวีวัฒน์ ที่ได้ให้ข้อมูลรวมทั้งให้ค่าปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการสร้างชุด PHASE SHIFTER ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ประกอบในการสร้างชุดทดสอบหม้อแปลงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้