บทที่3

หลักการหาพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต่ำ1เฟส

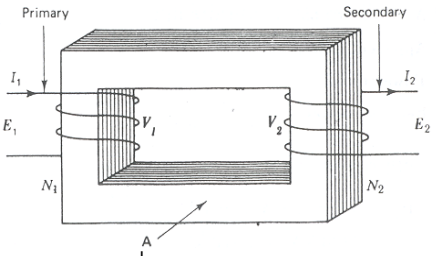
เนื่องจากงานวิจัยจะมุ่งเน้นการหาพารามิเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต่ำ1เฟส โดยวิธีแบบเดิมนั้นจะใช้วิธีทดสอบแบบวงจรลัด (Short Circuit Test) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ภายในซึ่งได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำรั่ว (Leakage Inductance) กับค่าความต้านทานภายใน ของหม้อแปลงที่ทดสอบ เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ภายในได้ดีในการอธิบายครั้งต่อไปนั้น จึงขอที่จะกล่าวถึงองค์ประกอบภายในและการทดสอบแบบเดิม

3.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า

องค์ประกอบสำคัญประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ซึ่งได้แก่ขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Winding)และแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า(Transformer Core)

3.1.1 ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Winding) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน รูปที่ 3.1

1. ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) เป็นขดลวดด้านที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding)เป็นขดลวดจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกไปสู่วงจรภายนอก

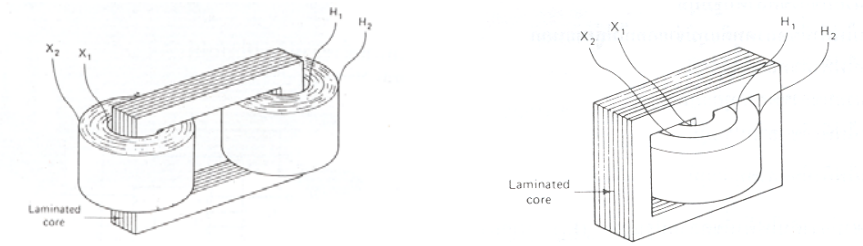


รูปที่ 3.1 หม้อแปลงไฟฟ้า
ที่มา : หม้อแปลงไฟฟ้า,มงคล ทองสงคราม,หน้าที่ 46

3.1.2 แกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Core) ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆนำมาอัดให้เป็นแกนหลักที่ใช้พันขดลวด ที่นิยมใช้กันมี 2 ประเภท

1. แบบคอร์ (Core type) เป็นการพันให้ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิแยกออกจากกันโดยนิยมใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่เพราะการพันขดลวดเช่นนี้ทำให้ตรวจสอบขดลวดที่ชำรุดได้ง่ายดังรูปที่ 3.2 (ก)

2. แบบเชลล์ (Shell type) เป็นการพันขดลวดลงบนแกนตรงกลางเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 (ข)



(ก) แบบคอร์ (Core type) (ข) แบบเชลล์ (Shell type)

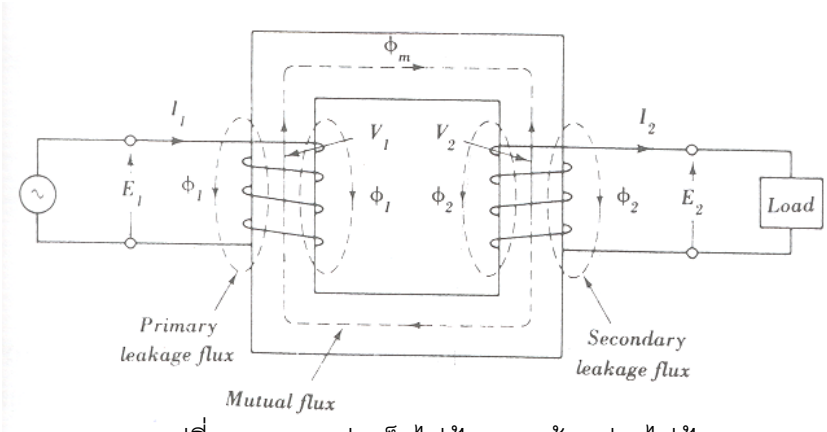
รูปที่ 3.2 แกนเหล็กหม้อแปลงไฟฟ้า

ที่มา : หม้อแปลงไฟฟ้า,มงคล ทองสงคราม,หน้าที่ 47-48

ในส่วนงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นหม้อแปลงที่ใช้แกนเหล็กแบบเชลล์ (Shell type) เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริงจะใช้แกนเหล็กแบบนี้ เนื่องจากจะทำให้ได้ค่าสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กในแกนเหล็กสูง

3.2 **วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า** (Transformer Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นวงจรที่ใช้สัญลักษณ์มาแทนองค์ประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อง่ายต่อการพิจารณาและการคำนวณค่าต่างๆในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 วงจรแม่เหล็กไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า

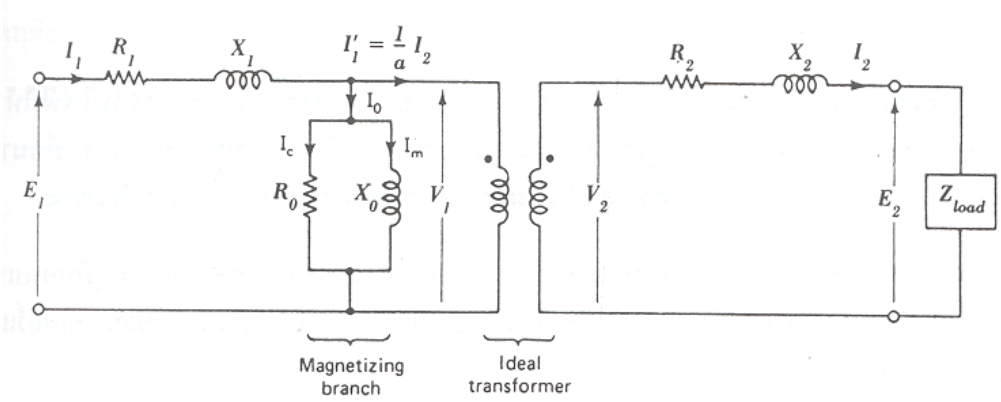
ที่มา : หม้อแปลงไฟฟ้า,มงคล ทองสงคราม,หน้าที่ 67

เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในรูปที่ 3.3 เคลื่อนตัวครบรอบจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับ Inductive Reactance (X_L) ซึ่งเราเรียกว่า Leakage Reactance นอกจากนี้ที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิยังมีความต้านทานอยู่จำนวนหนึ่งด้วย ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้า

จ่ายโหลดจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 2ส่วน คือ

- ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (R_1 และ R_2)
- ลีกเกจรีแอกแตนซ์ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (X_1 และ X_2)

นำค่าต่างๆทั้งขณะไม่มีโหลดและจ่ายโหลดมาเขียนวงจรสมมูล ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรวงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้า

ที่มา : หม้อแปลงไฟฟ้า,มงคล ทองสงคราม,หน้าที่ 67

เมื่อ R_1 = ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิ

R_2= ความต้านทานของขดลวดทุติยภูมิ

X_1 = ลีกเกจรีแอกแตนซ์ ของขดลวดปฐมภูมิ

X_2 = ลีกเกจรีแอกแตนซ์ของขดลวดทุติยภูมิ

3.3 **หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ** (Ideal Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal Transformer) หมายถึง การอธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่ได้คำนึงถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (E_1) ให้ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในทางอุดมคติจะเกิดกระแสไฟฟ้า (I_1)ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V_1) และแรงดันแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (MMF) นี้จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (ϕ_m) เคลื่อนตัวตัดขดลวดทุติยภูมิทำให้เกิดการเหนี่ยวเกิดแรงดันไฟฟ้า V_2 และกระแสไฟฟ้า I_2 ขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิ

ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติกับค่าสูงสุดของ ϕ_m สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

ระบบอังกฤษ $$E_1=4.44fN_1\phi_m x10^{-8} \quad (3\text{-}1)$$

ระบบ SI $E_1=4.44fN_1\phi_m$ (3-2)

หน่วยในระบบ

เมื่อ

	อังกฤษ	SI
E_1 = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิ	โวลท์(V)	โวลท์(V)
f = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า	เฮิรตซ์(Hz)	เฮิรตซ์(Hz)
N_1 = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ	รอบ(N)	รอบ(N)
ϕ_m = ฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (Mutual Flux)	เส้น(Lines)	เวเบอร์(Wb)

หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติไม่มีค่าสูญเสียใดๆดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิ (E_1) จึงมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิ (V_1)

$$V_1= 4.44fN_1\phi_m \quad (3\text{-}3)$$

ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิ (V_2) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_2= 4.44fN_2\phi_m \quad (3\text{-}4)$$

เมื่อ

N_1 = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

N_2 = จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

จากสมการ (1-3) และ(1-4) เขียนเป็นสมการ Mutual Flux

$$\phi_m = 4.44fN_1/ V_1 \quad (3\text{-}5)$$

และ

$$\phi_m = 4.44fN_2/ V_2 \quad (3\text{-}6)$$

เนื่องจาก ฟลักซ์แม่เหล็กร่วมมีค่าเท่ากัน (ϕ_m) ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3\text{-}7)$$

จากสมการที่ (3-7) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันและจำนวนรอบระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดด้านทุติยภูมิเราจึงเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนของจำนวนรอบ (Turns Ratio)

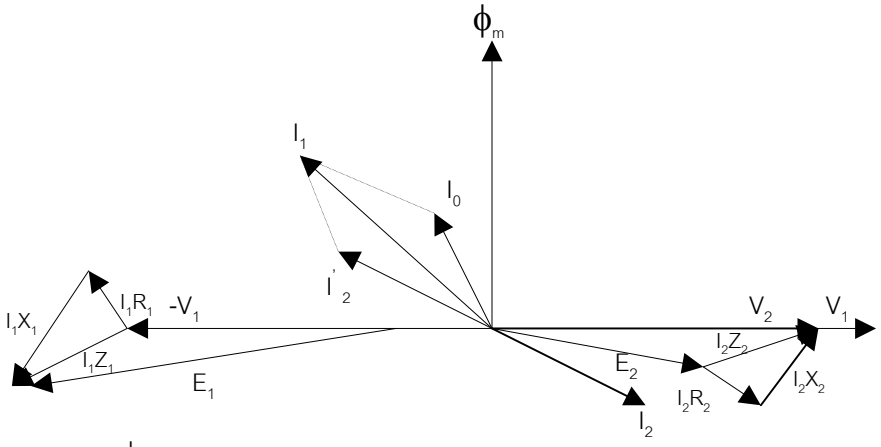
$$\text{Turns Ratio} = a = N_1 / N_2 \qquad (3\text{-}8)$$

3.4 แผนภาพเฟสเซอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด

(Phasor Diagram of Transformer with Load)

การเขียนแผนภาพเฟสเซอร์หม้อแปลงขณะจ่ายโหลดนั้นทำได้ยาก เพราะนอกจากต้องคำนึงถึงทิศทางของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิแล้ว ต้องคำนึงถึงค่า PF (Power Factor) ของโหลดซึ่งทำให้ทิศทางของกระแสและแรงดันของขดลวดทั้งสองมีค่าที่ต่างกัน

การเขียนแผนภาพเฟสเซอร์จะเขียนได้ง่าย เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้า $V_2 = E_2$ เท่านั้น ในความเป็นจริง V_2 และ E_2 ไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานและลีกเกจรีแอกแตนซ์ของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้านั้นเองดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.5 แผนภาพเฟสเซอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะมีโหลด

โดยกำหนดให้ $E_{1,2}$ = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$N_{1,2}$ = จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

ϕ_m = ฟลักซ์แม่เหล็กร่วม (Mutual Flux)

$I_{1,2}$ = กระแสที่ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

I'_1 = กระแสที่ย้ายมาด้านทุติยภูมิ

$R_{1,2}$ = ความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

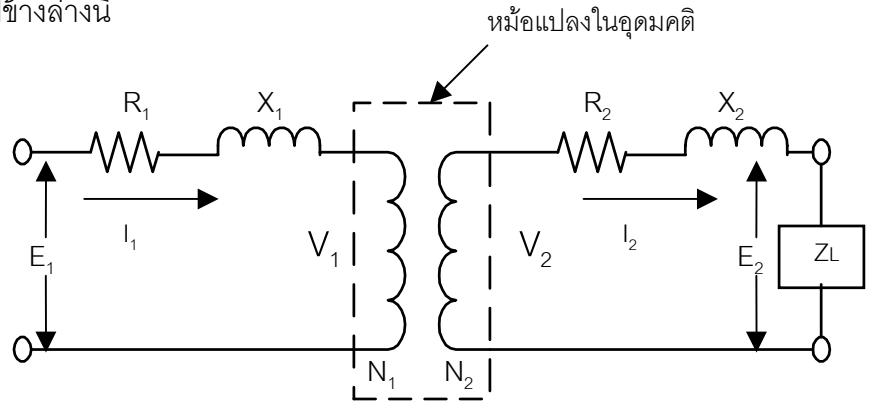
$X_{1,2}$ = ลีกเกจรีแอกแตนซ์ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

I_0 = กระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(MMF)

3.5 วงจรสมมูลและแผนภาพเฟสเซอร์เมื่อไม่คิดค่ากระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

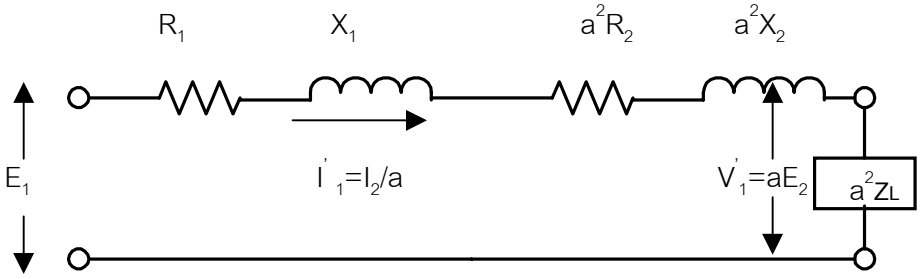
(Equivalent Circuit and Phasor Diagram with Neglected No-Load Current)

ในการศึกษาหม้อแปลงที่ผ่านมานั้นได้พิจารณากระแสไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (I_0) แต่ในหัวข้อนี้จะไม่นำมาพิจารณาI_0 เนื่องจากมีค่าน้อยมากเพียง 1% ถึง 3% ของกระแสที่พิกัดเท่านั้น เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ ด้วยเหตุนี้วงจรหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าขณะมีโหลด

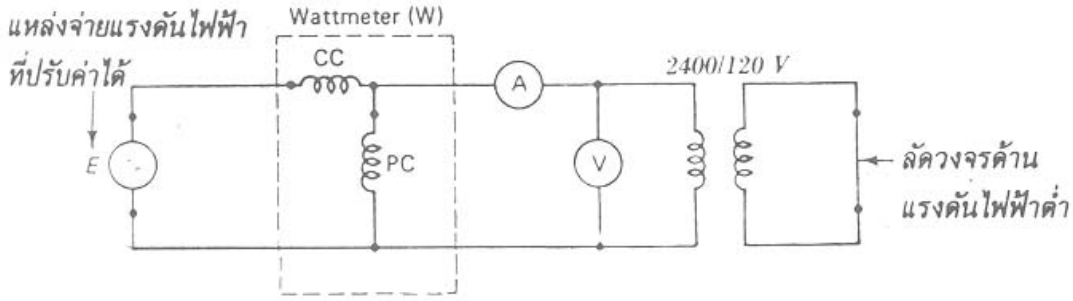
จากรูปที่ 3.6 เพื่อให้การคำนวณง่ายและมองเป็นวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม จึงทำการย้ายค่าต่างๆที่อยู่ด้านทุติยภูมิมายังด้านปฐมภูมิ โดยใช้อัตราส่วนหม้อแปลง (Turns Ratio) กำลังสองคูณค่าต่างๆที่อยู่ด้านทุติยภูมิ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลหม้อแปลงไฟฟ้าย้ายด้านทุติยภูมิมายังปฐมภูมิ

3.6 **การทดสอบแบบวงจรลัด** (Short Circuit Test)

เป็นการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใน โดยการวัดกำลังสูญเสียในขดลวด แล้วนำค่ากระแส แรงดัน และค่ากำลังไฟฟ้า คำนวณกลับมาหาค่าพารามิเตอร์ภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า



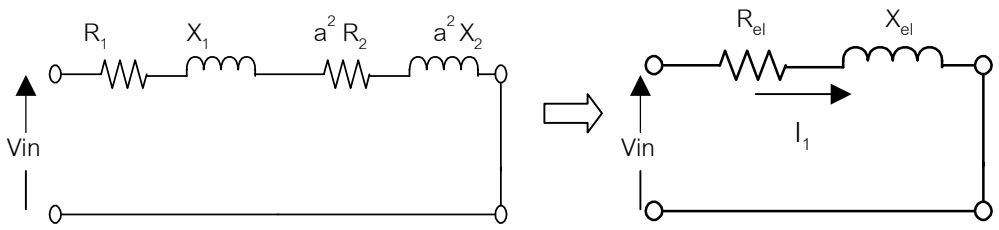
รูปที่ 3.8 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวงจรลัด

ที่มา : หม้อแปลงไฟฟ้า,มงคล ทองสงคราม,หน้าที่ 85

3.6.1 วิธีการทดสอบวงจรลัดหม้อแปลงไฟฟ้า

ลัดวงจรด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ แล้วจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ปรับค่าได้ทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูง ปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าไปจนกระแสถึงค่าพิกัดของหม้อแปลง อ่านค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ค่าที่ได้จะเป็นค่ากำลังสูญเสียในขดลวดไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า ($P=I^2R$)

ทดสอบแบบวงจรลัดนี้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเป็นผลมาจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดมาจากขดลวดปฐมภูมิรวมกับความต้านทานจากขดลวดทุติยภูมิ กำลังไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นผลมาจากค่า R_1รวมกับ $a^2 R_2$ ที่ย้ายด้านมาจากขดลวดทุติยภูมิโดยเรียกรวมผลรวมนี้ว่า R_{el} ส่วนค่ารวมความต้านทานเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดจาก X_1 รวมกับ a^2X_2 จะเรียกค่านี้ว่า X_{el} ตามรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลภายในหม้อแปลงทดสอบแบบวงจรลัด

3.6.2 สมการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์แบบวงจรลัดหม้อแปลงไฟฟ้า

1. ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาที่ขดลวดปฐมภูมิ คือ

$$Z_{el} = \frac{V_{sc}}{I_1} \qquad (3\text{-}9)$$

โดยที่ V_{sc}คือค่าแรงดันไฟฟ้าขณะทดสอบวงจรลัด

2. ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือค่ารวมความต้านทานเหนี่ยวนำไฟฟ้าเมื่อพิจารณาที่ขดลวดปฐมภูมิ

$$X_{el} = \sqrt{Z_{el}^2 - R_{el}^2} \qquad (3\text{-}10)$$

3. ค่า Power Factor ขณะทดสอบลัดวงจร คือ

$$\cos\theta_{sc} = \frac{R_{el}}{Z_{el}} \qquad (3\text{-}11)$$

4. ค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง คือ

$$P_{eu} = R_{el} I_1^2 \qquad (3\text{-}12)$$

จากสมการการคำนวณข้างบนนี้สังเกตุเห็นว่าจะเป็นการคำนวณหาค่าแบบวงจรไฟฟ้ากระแสสลับธรรมดานั้นเอง ค่าต่างๆที่ได้จากการลัดวงจรในการทดสอบที่ใช้ในการคำนวณนี้ โดยทั่วไปจะทดสอบที่ค่ากระแสเต็มพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้นๆ