

## การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 150 kV 5kVA แบบใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม Design and Construction of a 150 kV 5 kVA Oil Immersed Insulated Testing Transformer

ประมวญ คงสาคร\* และ คงกระพันธ์ พงษ์พิทักษ์ \*\*

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 150kV 5kVA ตัวถังฉนวนอีพ็อกซีเสริมแก้วไฟเบอร์และใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม

การออกแบบได้เน้นให้มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสามารถนำไปใช้งานทั้งในห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูงและโรงงานสนาม โครงสร้างประกอบด้วยขดลวดแรงต่ำ และขดลวดแรงสูงพันรอบแกนเหล็ก โดยพันแบบทรงกระบอกร่วมแกนและใส่แผ่นชีลด์ทองแดงหุ้มที่ปลาย และนิวตริลของขดลวดแรงสูงเพื่อช่วยในการกระจาย แรงดันเสิร์จฉนวนที่ใช้รองระหว่างชั้นและห่อหุ้มขดลวด เป็นกระดาษฉนวนแกนเหล็กเป็นแผ่นลามิเนตตีตีสตีลผสมซิลิกอน จัดวางเป็นแบบคอร์ การใช้ถังฉนวนซึ่งทำจากอีพ็อกซีเสริมแก้วไฟเบอร์ ขดลวดและแกนเหล็กวาง จุ่มอยู่ในน้ำมัน

ผลการทดสอบของหม้อแปลงทดสอบ พบว่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำ และขดลวดแรงสูงเท่ากับ 18.1°C, 28.6°C และ 12.3°C ตามลำดับ ความผิดพลาดในอัตราส่วนของแรงดันมีค่า 0.04% ความต้านทานของขดลวดแรงต่ำสูงคลาดเคลื่อนจากค่าออกแบบ -12.78% และของขดลวดแรงต่ำคลาดเคลื่อนไป -6.55% สำหรับค่าความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำสูงกับแรงดันต่ำ แรงต่ำสูงกับกราวด์และแรงต่ำกับกราวด์มีค่า 80,000 MΩ, 80,000 MΩ และ 50,000 MΩ ตามลำดับ

### Abstract

The research reports the design and construction of a single phase 150kV 5kVA testing transformer

which cooling and electrical insulated by mineral oil immersed.

The design is emphasized at the structure not to be complex and suitable to be used in the high voltage laboratory and field test. The main structure consists of two windings, low voltage winding is wound around the steel core, high voltage winding is wound as a concentric cylinder on top of the low voltage winding. At the beginning and end of high voltage winding added a copper sheets shield which in order to reduced the gradient of surge voltage. The insulation paper and pressboard are used for support and internal insulation system. The steel core is made from grain oriented laminated steel with low core losses. Transformer tank was glass fiber epoxy resin.

Electrical testing result found that the efficiency, top oil temperature rise, low and high voltage winding temperature rise are 18.1°C, 28.6°C and 12.3°C. The error in voltage ratio from design valued is 0.04%, High and low voltage winding resistance are -12.78% and -6.55% respectively, difference from design. Insulation resistance between low and high voltage, low voltage and ground, high voltage and ground are 80,000 MΩ, 80,000 MΩ and 50,000 MΩ respectively.

### 1. บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในประเทศเช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า แผงสวิตช์เกิตัดตอน

\* ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\*\* บริษัท อิทธิไทย จำกัด

อัตโนมัติ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงอื่นๆ สามารถผลิตได้แล้วในประเทศ

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง ก่อนจะนำไปติดตั้งใช้งานในระบบจำเป็นจะต้องผ่านการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเกิน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยอาจแยกออกเป็นชนิดการทดสอบดังนี้

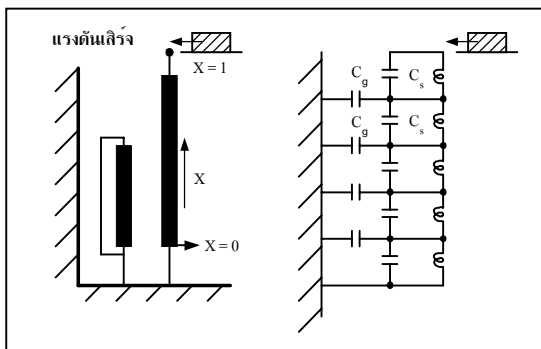
1. การทดสอบความทนทานต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันพิกัด
2. การทดสอบความทนต่อแรงดันเกินไฟฟ้ากระแสสลับ
3. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์

การทดสอบดังกล่าวข้างต้น จะต้องใช้หม้อแปลงทดสอบ เป็นอุปกรณ์สำคัญในการกำเนิดแรงดันสูง กระแสสลับ แรงดันสูงกระแสตรงหากนำไปต่อร่วมกับวงจรเรียงกระแส และเป็นตัวสร้างแรงดันกระแสตรงแก่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จากความสำคัญของหม้อแปลงทดสอบดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบ และสร้างหม้อแปลงทดสอบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้า ให้สามารถใช้ในการทดสอบแรงดันเกิน แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในระบบแรงดัน 72.5 kV ได้

## 2. การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ

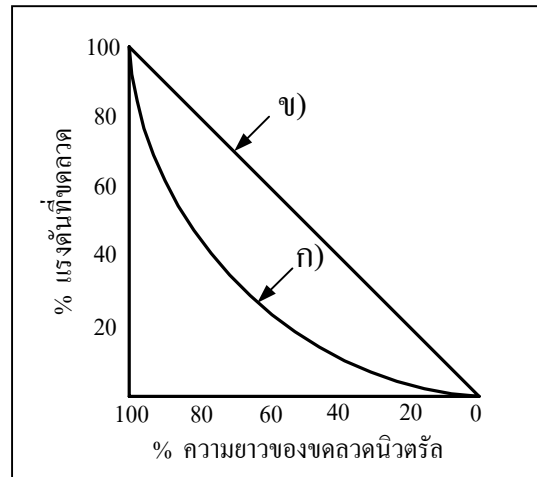
กำหนดโครงสร้างประกอบด้วยขดลวดแรงดันต่ำ เป็นชุดที่ป้อนกำลังไฟฟ้าเข้า ขดลวดแรงสูงเป็นชุดที่



$C_s$  = ความจุไฟฟ้าต่อแบบอนุกรมตลอดความยาวของขดลวด

$C_g$  = ความจุไฟฟ้าต่อแบบขนานระหว่างขดลวดกับส่วนที่ต่อลงดิน

ภาพที่ 1 ขดลวดหม้อแปลงและวงจรสมมูลเมื่อได้รับแรงดันเสิร์จ



ก) แรงดันกระจายช่วงต้น

ข) แรงดันกระจายช่วงปลาย

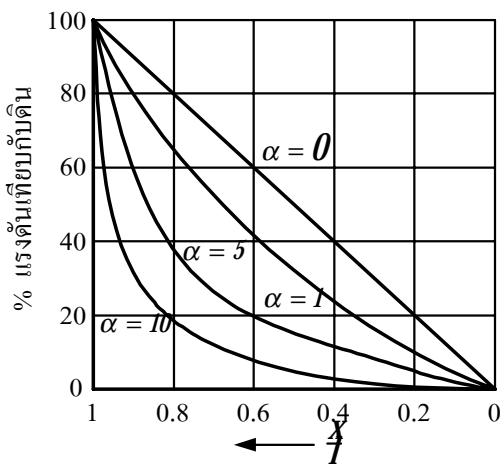
ภาพที่ 2 แรงดันกระจายในขดลวดเมื่อหม้อแปลงได้รับเสิร์จ

จ่ายกำลังไฟฟ้าออก ฉนวนเลือกให้เป็นกระดาษฉนวนและน้ำมันหม้อแปลง แกนเหล็กและขดลวดจะจมอยู่ในน้ำมัน ตัวถังเป็นอ็อกซี่เสริมแก้วไฟเบอร์ ไม่ต้องใช้ปลอกฉนวนนำสาย แต่เนื่องจากการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและในขดลวดไม่ค่อยมีประสิทธิภาพดีนัก จึงต้องออกแบบให้กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ในแกนเหล็กและในขดลวดมีค่าต่ำ ความร้อนนี้แผ่กระจายออกผ่านน้ำมันที่สัมผัสกับขดลวดและแกนเหล็กตามมาตรฐานสากล IEC ยอมให้อุณหภูมิมีค่าสูงต่อเนื่องไม่เกิน 105°C เมื่อใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนแทรกซึมร่วมกับกระดาษฉนวนเป็นวัสดุฉนวนแข็ง [4]

### 2.1 การกระจายแรงดันในขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลง

การเกิดแรงดันกระจายไม่สม่ำเสมอเห็นได้จากวงจรสมมูลของหม้อแปลง ที่มีการพันขดลวดสม่ำเสมอตลอดความยาว ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุดังแสดงในภาพที่ 1

เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันเสิร์จ ส่วนที่เป็นตัวเก็บประจุจะเป็นตัวตอบสนองต่อช่วงหน้าคลื่นที่ชันมากเป็นอันดับแรกเรียกว่าแรงดันช่วงต้นซึ่งไม่สม่ำเสมอและตัวเหนี่ยวนำจะเป็นตัวตอบสนองต่อช่วงท้ายคลื่นดังในภาพที่ 2



ภาพที่ 3 แรงดันกระจายในขดลวดหม้อแปลงทดสอบ (จุดนิวทรัลต่อดิน)

แรงดันกระจายในขดลวดขึ้นอยู่กับค่า  $\alpha$  ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของ  $\sqrt{C_g/C_s}$  ดังแสดงในภาพที่ 3 จะเห็นว่าถ้าค่า  $\alpha$  มีค่ามากขึ้นขดลวดรอบแรกๆ ทางด้านปลายขั้วแรงสูงจะรับแรงดันสูงขึ้นเช่นที่  $\alpha = 10$  จะพบว่าที่ความยาวของขดลวด 5% แรกของความยาวทั้งหมดต้องรับแรงดันเฉลี่ยสูงถึง 70%

เมื่อหม้อแปลงทดสอบได้รับแรงดันเฉลี่ยหรือแรงดันยูปตัวที่ปลายขดลวดแรงสูงจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นการหุ้มฉนวนตรงปลายขั้วแรงสูงจะต้องเพิ่มมากขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดการเบรกดาวน์ผ่านฉนวนได้ ซึ่งปัญหาแรงดันกระจายบนขดลวดสามารถแก้ปัญหาได้ โดยการลดค่าความจุไฟฟ้าแบบขนานระหว่างขดลวดกับดิน ( $C_g$ ) ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มความเป็นฉนวนระหว่างขดลวดกับส่วนที่เป็นค้ำยัน และเพิ่มค่าความจุไฟฟ้านุกรมตลอดความยาวของขดลวด ( $C_s$ ) เพื่อให้  $\alpha$  มีค่าน้อยกว่า 1 [3]

ถึงแม้ว่าการจัดวางขดลวดแบบคละจะทำให้แรงดันกระจายบนขดลวดสม่ำเสมอขึ้นก็ตาม แต่แรงดันตกคร่อมของปลายขั้วแรงสูงด้านบนสุด จะยังคงมีค่าสูงอยู่ การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการใส่ซีลด์ที่ปลายของขดลวดแรงดันสูง ส่วนที่นิวทรัลของขดลวดแรงดันสูงก็ควรใส่ซีลด์เพื่อป้องกันการส่งผ่านแรงดันเฉลี่ยหรือ แรงดันยูปตัวอย่างรวดเร็วจากขดลวดแรงดันสูงเข้าสู่ขดลวดแรงดันต่ำ ผ่านค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้งสอง

## 2.2 ค่าสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้า

ในหม้อแปลงทดสอบสนามไฟฟ้า เป็นแบบสม่ำเสมอ

หรือเป็นแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและสนามไฟฟ้าที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาเพื่อการออกแบบ และเลือกชนิดฉนวนให้เหมาะสมได้ดังนี้

1. สนามไฟฟ้าระหว่างเลเยอร์กับเลเยอร์ที่อยู่ติดกัน
2. สนามไฟฟ้าระหว่างเลเยอร์กับแกนเหล็กหรือส่วนที่เป็นค้ำยันไฟฟ้าศูนย์
3. สนามไฟฟ้าระหว่างเลเยอร์นอกสุดกับเลเยอร์ชุดในสุดของขดลวดแรงดันสูง

## 2.3 ไดอิเล็กทริกคร่อมของชั้นฉนวน

เนื่องจากที่ต้องใช้ฉนวนเหลวร่วมกับฉนวนแข็ง เพื่อง่ายแก่การออกแบบจึงกำหนดว่าไดอิเล็กทริกของฉนวนที่เป็นกระดาษและน้ำมันสามารถผสมกันได้อย่างสม่ำเสมอ คุณสมบัติของฉนวนที่เป็นกระดาษและน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 1 สนามไฟฟ้าวิกฤตของน้ำมันบริสุทธิ์อาจมีค่าถึงประมาณ 1000 kV/cm แต่ในสภาพจริงน้ำมันที่ซั้มักจะมีความชื้นและวัตถุปนเปื้อนอยู่เสมอ [3]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกระดาษฉนวนและน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

วัสดุฉนวน	Dielectric constant ( $\epsilon_r$ ) ที่ 50Hz กำหนด air =1	$\tan \delta$ At 50Hz (watt x10 <sup>-4</sup> )	Breakdown Strength (kV/mm)	ค.ต.ท จำเพาะ ( $\Omega/cm$ )
กระดาษฉนวน	2 - 2.5	25 - 40	10 - 20	$10^{15}$
กระดาษฉนวนแช่น้ำมัน	3 - 4	10 - 30	40 - 50	$10^{15}$
หม้อแปลง				$10^{13}$ -
น้ำมันหม้อแปลง	2 - 2.5	1 - 5	10 - 25	$10^{15}$
Epoxy casting Resin (EP)	3.2 - 3.9	35 - 50	20 - 45	$10^{15}$ - $10^{16}$

## 2.4 แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ

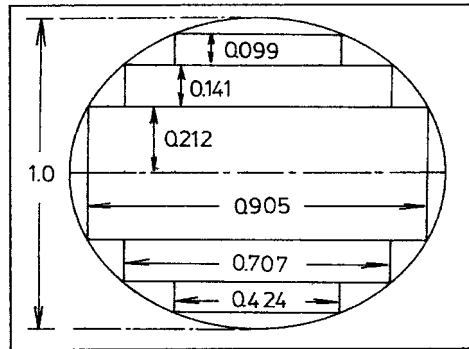
แรงดันที่ป้อนเข้าของหม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปจะมีค่าไม่เกิน 2 kV ส่วนแรงดันขาออกจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบสูงสุดที่ต้องใช้ [3] ส่วนรูปคลื่นแรงดันต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60-1973 แรงดันเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทดสอบหาได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงกำลังทั่วไปคือ

$$e = 4.44 \times f \times N \times A_1 \times B$$

และแรงดันเหนี่ยวนำต่อรอบจะเป็น

$$e_t = 4.44 \times f \times A_1 \times B$$

- เมื่อ  $e$  เป็นแรงดันเหนี่ยวนำรวม  
 $e_t$  เป็นแรงดันเหนี่ยวนำต่อรอบ  
 $f$  เป็นความถี่  
 $N$  เป็นจำนวนรอบของขดลวด  
 $A_1$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและ  
 $A_1$  เป็นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก



## 2.5 ขนาดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบใช้ในการทดสอบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งถือได้ว่าเป็นโหลดส่วนใหญ่เป็นลักษณะของค่าความจุไฟฟ้า บางครั้งอาจเกิดการเบรกดาวน หรือเจาะทะลุที่ฉนวนของวัสดุทดสอบทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น กระแสลัดวงจรต้องสูงมากพอเพื่อให้เกิดเห็นความบกพร่องของการฉนวนของวัสดุทดสอบได้อย่างชัดเจน [3] แต่กำลังไฟฟ้ลัดวงจรก็ไม่ควรสูงเกินไปเพราะอาจจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ กำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบคำนวณได้ดังนี้ [4]

$$S_n = 2 \times \pi \times f \times U^2 \times C$$

- เมื่อ  $S_n$  เป็นกำลังไฟฟ้ากำหนดของหม้อแปลงทดสอบ  
 $U$  เป็นแรงดันทดสอบ และ  
 $C$  เป็นค่าคาปาซิแตนซ์

หม้อแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงสุดไม่เกิน 72.5 kV ซึ่งมีแรงดันทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน 140 kV ตารางแสดงค่าคาปาซิแตนซ์และกำลังไฟฟ้าในการทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าความจุไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าในการทดสอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง	ค่าคาปาซิแตนซ์ (pF)	กำลังไฟฟ้าในการทดสอบ (VA)
1. ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10 - 100	62 - 616
2. ปลอกฉนวนนำสาย	150 - 400	924 - 2463
3. หม้อแปลงกระแส	200 - 600	1232 - 3695
4. เคเบิลแรงสูง	150 - 300	924 - 1848
5. หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	800	4926
6. อุปกรณ์วัดแรงดัน	50 - 500	308 - 3079

ภาพที่ 4 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กแบบ Three steps core

## 2.6 การออกแบบแกนเหล็ก

การออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงทดสอบต้องให้ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กในแกนเหล็กมีค่าต่ำกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อป้องกันมิให้เกิดฮาร์โมนิคขึ้นในขณะที่จ่ายแรงดันกระตุ้นให้หม้อแปลงทดสอบ อันจะเป็นผลให้แรงดันที่จ่ายออกจากหม้อแปลงทดสอบมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไป

ในการสร้าง เลือกใช้แกนเหล็กเป็นแบบ Three steps core [5] ซึ่งมีค่า Space factor ( $k_s$ ) เท่ากับ 0.84 และ insulation thickness ( $k_{ins}$ ) เท่ากับ 0.97 พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กดังภาพที่ 4

โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ต้องการ (A) มีค่า 6186.66 มม<sup>2</sup>

ในการออกแบบได้เลือกแกนเหล็กให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 95 มม. และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีค่า 1.34 wb/mm<sup>2</sup> ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดของแผ่นเหล็กและพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กแต่ละชั้น

เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็ก = 95 mm.		
แกนเหล็ก ชั้นที่	ขนาดความกว้างแผ่นเหล็ก (mm.)	พื้นที่แกนเหล็ก (mm. <sup>2</sup> )
1	80	4,000
2	70	1,400
3	50	600
รวมพื้นที่หน้าตัด		6,000

## 2.7 การออกแบบขดลวด

หม้อแปลงทดสอบที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ได้ออกแบบให้ใช้งานในอุณหภูมิภายนอกไม่เกิน 40°C และเมื่อใช้งานเต็มพิกัดไหลดอย่างต่อเนืองได้กำหนดให้มีอุณหภูมิของขดลวดเพิ่มขึ้นไม่เกิน 65°C เมื่อนำอุณหภูมิบรรยากาศและอุณหภูมิของขดลวดเพิ่มมารวมกันจะได้เท่ากับ 105°C

ขดลวดแรงดันต่ำได้เลือกใช้ขดลวด class B ซึ่งทนอุณหภูมิได้ 120°C ส่วนขดลวดแรงดันสูงเลือกใช้ขดลวด class H ซึ่งทนอุณหภูมิได้ 180°C และยังทนต่อโคจรนำได้ดี และทนต่อการเสื่อมเมื่อใช้งานในอุณหภูมิสูงได้ดี และมีความอ่อนตัวและรับแรงกระแทกทางกลได้ดี [8] ขนาดของขดลวดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ขนาดของขดลวดทองแดงเคลือบฉนวนที่นำมาใช้พันขดลวดแรงต่ำและแรงสูง

ขดลวด	ขนาดขดลวดเฉลี่ย		การเคลือบฉนวน	
	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm.)	เทียบเคียงกับ SWG.	ความหนา (mm.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm.)
ขดลวดแรงต่ำ	3.251	10	0.036	3.323
ขดลวดแรงสูง	0.35	29	0.016	0.382

### 2.7.1 การออกแบบขดลวดแรงดันต่ำ

ขดลวดแรงดันต่ำที่มีจำนวนรอบทั้งหมด 135 รอบ แบ่งออกเป็น 2 ชั้น ชั้นที่ 1 มีจำนวน 68 รอบ และชั้นที่ 2 มีจำนวน 67 รอบ พันด้วยลวดทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ SWG. 10 Class B เส้นผ่าศูนย์กลางรอบฉนวน 3.251 mm. เลือกใช้ความหนาแน่นกระแส 2.4 A/mm<sup>2</sup> (ค่าที่นิยมใช้กันคือ 1.5 ถึง 2.6 A/mm<sup>2</sup>) แรงดันสูงสุดระหว่างขั้วที่สามารถทนได้ 240 V

### 2.7.2 การออกแบบขดลวดแรงดันสูง

การพันขดลวดแรงดันสูงต้องจัดวางแบบคละ เพื่อให้แรงดันเสริมกระจายไปบนขดลวดอย่างสม่ำเสมอ แต่ยุ่งยากมากจึงแบ่งขดลวดออกเป็น 6 ชั้น โดยพยายามให้ผลคูณของรัศมีเฉลี่ยกับความสูงของขดลวดในแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

แรงดันตกคร่อมปลายขั้วแรงดันสูงด้านบนสุดจะมีค่าสูงอยู่ [2] ได้แก้ปัญหาโดยใช้แผ่นซิลด์ที่ปลายของขดลวดแรงดันสูง สลับที่นิวทรัลของขดลวดแรงดันสูงก็ใส่ซิลด์เพื่อป้องกันการส่งผ่านแรงดันเสริม หรือแรงดันยวบตัวอย่างรวดเร็วจากขดลวดแรงดันสูงสู่ขดลวดแรงดันต่ำ

ขดลวดแรงดันสูงมีจำนวนรอบทั้งหมด 84,375 รอบ แบ่งการพันออกเป็น 6 ชั้น โดยชั้นที่ 1 พันไว้ 14,375 รอบ ชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 6 พันไว้ 14,000 รอบ ดังตารางที่ 5 ขดลวดพันด้วยทองแดงเคลือบฉนวนเบอร์ SWG 29 Class H มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.35 mm. เลือกใช้ความหนาแน่นกระแส 0.3554 A/mm<sup>2</sup> เนื่องจากต้องการให้เส้นลวดสามารถรับกระแสจำนวนมาก ที่เกิดจากการลัดวงจรที่เกิดจากการทดสอบอุปกรณ์ได้และยังต้องมีความแข็งแรงสามารถทนต่อแรงดันทางกล ขณะพันขดลวดได้แรงดันสูงสุดที่ขดลวดแรงดันสูงทนได้มีค่า 150 kv

ตารางที่ 5 รายละเอียดของขดลวดแรงสูง

ชั้นที่	จำนวนรอบ	ความสูงของขดลวด (mm.)
1	14,375	280
2	14,000	260
3	14,000	240
4	14,000	220

### 2.7.3 การออกแบบตัวถัง

ตัวถังหม้อแปลงทดสอบทำจากวัสดุ อีพ็อกซีเสริมแก้วไฟเบอร์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 535 mm. หนา 17 mm. และมีความสูง 850 mm. การออกแบบแกนเหล็กและขดลวดได้ยึดเอาขนาดของถัง เป็นหลัก แกนเหล็กและขดลวดภายในหม้อแปลงทดสอบมีความสูงจากฐานด้านล่างถึงด้านบนสุด เท่ากับ 650 mm. ผลการทดสอบถึงด้วยการป้อนแรงดันจนเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนได้ค่า เท่ากับ 128kv/40cm. หรือ 3.2 kv/cm. ฉะนั้น ความสูงต่ำสุดของถัง เมื่อเผื่อแรงดันใช้งานที่อาจสูงขึ้นไป 1.2 เท่า ซึ่งจะมีค่า 180 kv

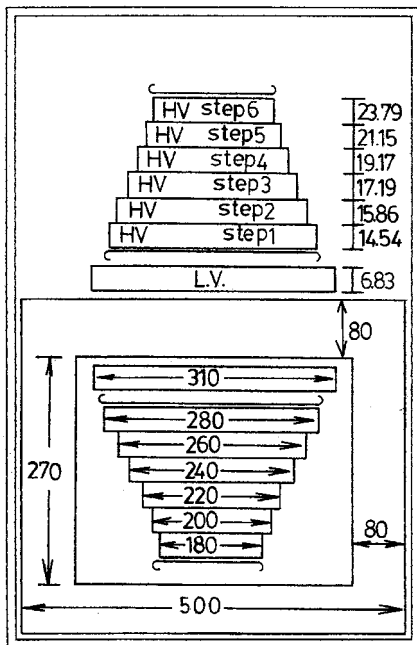
ใช้ถังที่มีความสูง 85 cm. สามารถทนแรงดันวาบไฟตามผิวได้ 272 kv ซึ่งสามารถทนแรงดันวาบไฟตามผิวเผื่อกรณีแรงดันเกิน 180 kv ซึ่งจะมีความปลอดภัยของตัวถังได้ 1.5 เท่า

ฝาปิดด้านล่างใช้แผ่นเหล็กเจาะรูสำหรับติดตั้งปลอกฉนวนนำสายสำหรับขดลวดแรงดันต่ำ ปลายสายนิวทรัลแรงดันสูง และวาล์วเติมน้ำมัน ส่วนฝาปิดด้านบนใช้แผ่นเหล็กเจาะรูสำหรับติดตั้งหลักนำสายที่ใช้สำหรับเป็นจุดต่อสายไปยังอุปกรณ์ทดสอบและหลักนำสายนี้ยังเป็นตัวจับยึดของวงแหวนทรงกระบอกกลมที่ติดตั้งไว้เพื่อลดโคโลนาที่เกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งมีความเข้ม ค่อนข้างสูงบริเวณนั้น

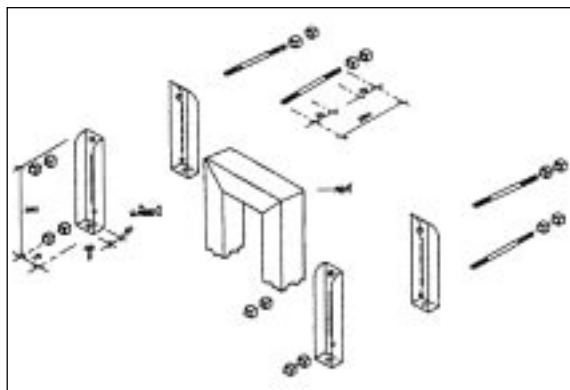
ขนาดของแกนเหล็ก ขดลวด ฉนวน และขนาดถึง  
ที่ได้ออกแบบไว้ดังแสดงดังภาพที่ 5

เส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ม้วนรอยต่อเป็น  
ไปในแนวเดียวกับแนวรีดของแผ่นเหล็ก แกนเหล็ก  
ประกอบเสร็จแล้วจะยึดเข้าด้วยกันให้แน่นด้วยแคลมป์  
ที่มีการลบบุมที่ขอบให้เรียบมน ดังจะเห็นจากภาพที่ 6  
และภาพที่ 7

ขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง พันซ้อนกันเป็น  
แบบทรงกระบอกรวมแกนดังในภาพที่ 8 และภาพที่ 9  
กระดาะฉนวนที่กั้นระหว่างแกนเหล็กกับขดลวดแรงต่ำนี้



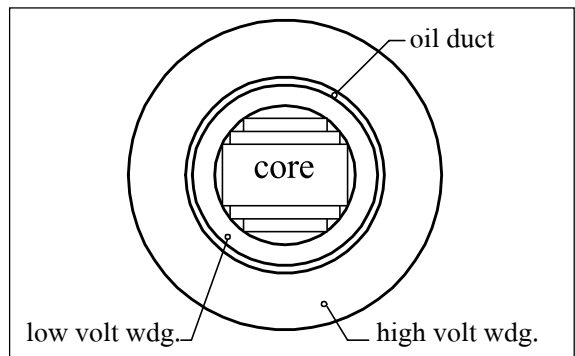
ภาพที่ 5 มิติของแกนเหล็ก ขดลวด และฉนวนที่ออกแบบ



ภาพที่ 6 ชุดประกอบแคลมป์และแกนเหล็กของหม้อ  
แปลงทดสอบ



ภาพที่ 7 ชุดแกนเหล็กของหม้อแปลงทดสอบ



ภาพที่ 8 ภาพตัดขวางของแกนเหล็กและขดลวด



ภาพที่ 9 การพันขดลวดแรงต่ำและแรงสูงบนเครื่องพัน

ทำให้เกิดร่องน้ำมันเพื่อช่วยระบายความร้อนของแกน  
เหล็กอันเนื่องมาจากกำลังสูญเสียในแกนเหล็กด้วย

## 2.8 การอบขดลวด ฉนวนในเตาอบสุญญากาศและ การเติมน้ำมัน

นำขดลวดที่พันเสร็จแล้วทั้งสองชุดมาประกอบ  
เข้ากับแกนเหล็กแล้วทำการยึดขดลวดกับแกนเหล็กให้

แน่น หลังจากนั้นจึงนำมายึดติดกับฐานแล้วนำไปทดลองบรรจุลงถึงดังภาพที่ 10 ขั้นตอนต่อไปก็คือการนำเข้าอบสุญญากาศ (ภาพที่ 11) โดยใช้อุณหภูมิในการอบประมาณ 100°C ภายใต้ความดันสุญญากาศ 0.2 มิลลิบาร์ในการอบขดลวดและฉนวนที่สภาวะดังกล่าวใช้เวลารวมทั้งสิ้น 36 ชั่วโมง โดยแบ่งการอบสุญญากาศเป็น 3 ครั้งแต่ละครั้งใช้เวลา 12 ชั่วโมง

หลังจากเติมน้ำมันแล้วนำหม้อแปลงทดสอบออกจากเตาแล้วทำการยึดทุกส่วนให้แน่นแล้วทิ้งไว้ให้เย็นเพื่อรอการทดสอบทางไฟฟ้าต่อไป (ภาพที่ 12)

### 3. การทดสอบ

การทดสอบหม้อแปลงทดสอบที่สร้างขึ้น ก็เพื่อตรวจลักษณะสมบัติของหม้อแปลง แต่เนื่องจากไม่มีมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง ดังนั้นการทดสอบจึงใช้มาตรฐานเทคนิคการทดสอบตามที่แนะนำไว้ในมาตรฐาน IEC Publ No.76 Part-5 "Power Transformer." ดังนี้



ภาพที่ 10 การทดลองประกอบลงถัง



ภาพที่ 11 การอบขดลวดและฉนวน



ภาพที่ 12 หม้อแปลงทดสอบที่สร้างเสร็จแล้ว

1. วัดอัตราส่วนแรงดันของขดลวดและการตรวจสอบขั้ว
2. วัดความต้านทานของขดลวด
3. วัดความต้านทานของฉนวน
4. การทดสอบความทนทานต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันพิกัด
5. ทดสอบค่าความสูญเสีย อุณหภูมิเพิ่ม และประสิทธิภาพ

#### 1. การวัดค่าอัตราส่วนแรงดันของขดลวด

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบอัตราส่วนการวัดแรงดันในขดลวด

ขั้ววัด	ค่าจากการคำนวณ	ค่าจากการวัด	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
U - O : u-v	625	625.25	+ 0.04 %

#### 2. การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

ตารางที่ 7 ผลการวัดค่าความต้านทานของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ

ขดลวดวัด	ค่าความต้านทานของขดลวด ( $\Omega$ )			% ความคลาดเคลื่อน
	ค่า ค.ต.ท.จากการคำนวณที่ 75°C	ค่า ค.ต.ท.จากการวัดที่ 29.8°C	ค่า ค.ต.ท.จากการวัดที่ 75°C	
ขดลวดแรงต่ำ	147.49 m $\Omega$	109.88 m $\Omega$	128.63 m $\Omega$	-12.78
ขดลวดแรงสูง	17,004 $\Omega$	13,573 $\Omega$	15,890 $\Omega$	-6.55

### 3. การวัดค่าความต้านทานของฉนวน

ตารางที่ 8 ค่าความต้านทานของฉนวน

วัดความต้านทานของฉนวนระหว่าง	ค่าความต้านทาน (M $\Omega$ )
ขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ ( U - O : u - v )	80,000
ขดลวดแรงสูงกับกราวด์ ( U - O : Earth )	80,000
ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์ ( u - v : Earth )	50,000

### 4. การทดสอบความทนทานต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันพิกัด

ตารางที่ 9 ค่าแรงดันทดสอบและระยะเวลาทดสอบ

ขดลวดทดสอบ	แรงดันทดสอบ (kV)	ระยะเวลาทดสอบ (นาที)	ผลการทดสอบ
ขดลวดแรงต่ำ	0.24	5	ทนได้
ขดลวดแรงสูง	150	5	ทนได้

### 5. ความสูญเสีย อุนหภูมิเพิ่ม และประสิทธิภาพ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบหม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้างขึ้นเทียบกับเกณฑ์

	เกณฑ์	ค่าทดสอบ
1. ค่ากำลังสูญเสียแบบไรภาระ	-	98.0 watt.
2. ค่ากำลังสูญเสียแบบมีภาระ	-	80.09 watt.
3. ประสิทธิภาพ ( $\eta$ )	90.0 %	96.56 %
4. แรงดันอิมพีแดนซ์	5 - 7 %	2.4 %
5. อุนหภูมิเพิ่มของขดลวด	ไม่เกิน 65 $^{\circ}$ C	ขดลวดแรงสูง 12.3 $^{\circ}$ C ขดลวดแรงต่ำ 28.6 $^{\circ}$ C
อุนหภูมิเพิ่มของน้ำมัน	ไม่เกิน 60 $^{\circ}$ C	18.1 $^{\circ}$ C

### 6. สรุปผลงานวิจัย

ในการออกแบบสามารถที่จะทำให้มีขนาดเล็ก หากไม่เผื่อแพคเกจเจอร์ความปลอดภัยไว้มากจนเกินไป สำหรับหม้อแปลงที่ออกแบบสร้างขึ้นมานี้มีน้ำหนักเบา เพราะใช้ถังซึ่งทำจากอีพ็อกซีเสริมแก้วไฟเบอร์และประกอบด้วยไม่จำเป็นต้องใช้ปลอกฉนวนนำสาย สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายไปใช้งานทดสอบในภาคสนาม หรือใช้งานในห้องทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

การใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึมทำให้บำรุงรักษาได้ง่าย หม้อแปลงทดสอบได้ผ่านการทดสอบตามเกณฑ์มาตรฐาน การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง IEC 76-1 ถึง 5 พอสรุปได้ดังนี้

1. ฉนวนภายในระหว่างขดลวดกับขดลวด ขดลวดกับนิวทรัล และฉนวนของตัวถังสามารถทนต่อแรงดันพิกัด 150 kV

2. จากการทดสอบหม้อแปลงทดสอบมีประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) สูงถึง 96.56%

3. การทดสอบอุนหภูมิที่เพิ่มขึ้นของขดลวด และน้ำมัน คืออุนหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง 12.3 $^{\circ}$ C อุนหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ 28.6 $^{\circ}$ C และมีอุนหภูมิเพิ่มของน้ำมัน 18.1 $^{\circ}$ C

### เอกสารอ้างอิง

- คองกระพันธ์ พงษ์พิทักษ์. "การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาด 150kV 5kVA แบบใช้น้ำมันเป็นฉนวนแทรกซึม." กรุงเทพมหานคร : วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิตสาขารัฐศาสตร์ สาขาวิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- มนตรี ไทยมานะ. "การออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบ 100 kV 10 kVA ใช้ก๊าซ SF6 เป็นฉนวน." กรุงเทพมหานคร : วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
- สำรวย สังข์สะอาด. "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" กรุงเทพมหานคร : ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- Chunikkin A., and Zhavoronkov. Moscow Power Engineering Institute. "High Voltage Switchgear." Russia, 1985.
- Deshpande MV. Engineering Faculty of University of Maharashtra State. "Design and Testing of Electrical Machines." India. 1983. (Mimeographed).
- Greenwood A., Consulting Engineering Power Transmission of General Electric Company. "Electrical Transients in Power System." USA. 1970.
- IEC Publ No.76 Part 1-5. "Power Transformer." England. 1993. (Mimeographed).
- Siam Electric Industries Ltd. "Enameled Copper Wire." Samulprakarn Thailand 1996. (Mimeographed).