

บทที่ 5

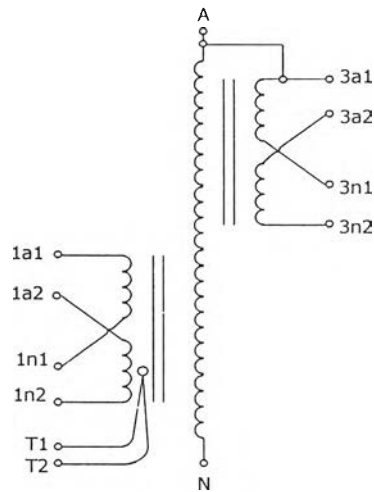
การทดสอบ

การทดสอบเพื่อตรวจสอบลักษณะสมบัติของหม้อแปลงที่สร้างขึ้นว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบหรือไม่ เนื่องจากไม่มีมาตรฐานสำหรับหม้อแปลงทดสอบโดยตรง ฉะนั้นการทดสอบจะทำเพียงบางรายการตาม มาตรฐานกำหนด IEC Publ.No.76-1:1993 [11]และ IEC Publ.No.60-2:1973 [12] และเพิ่มเติมบางรายการ ซึ่งมีรายการทดสอบดังนี้

- 1) การวัดค่าความต้านทาน
- 2) การทดสอบไดอิเล็กทริกระหว่างขั้วของขดลวดแรงต่ำ
- 3) ความต้านทานฉนวน
- 4) การทดสอบขั้วและอัตราส่วนแรงดันของขดลวด
- 5) การวัดค่าแรงดันลัดวงจรและกำลังสูญเสียขณะมีโหลด
- 6) การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม
- 7) การวัดค่าการกระจายจางบางส่วน
- 8) การทดสอบความเป็นฉนวนที่แรงดันสูง

หม้อแปลงที่ประกอบสร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยขดลวด 3 ชุดหลัก และกำหนดสัญลักษณ์ขั้วของลวดทั้ง 3 ชุดหลักและขั้วของเทอร์โมคัปเปิล และการต่อขดลวดต่างๆจะเป็นไปตามรูปที่ 5.1

- 1) ขดลวดแรงดันสูง กำหนดสัญลักษณ์ขั้ว คือ A-N
- 2) ขดลวดแรงดันต่ำประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดคือ
 - ขดลวดแรงดันต่ำชุดที่ 1 กำหนดสัญลักษณ์ คือ 1a1-1n1
 - ขดลวดแรงดันต่ำชุดที่ 2 กำหนดสัญลักษณ์ คือ 1a2-1n2
- 3) ขดลวดต่อควบประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดคือ
 - ขดลวดต่อควบชุดที่ 1 กำหนดสัญลักษณ์ คือ 3a1-3n1
 - ขดลวดต่อควบชุดที่ 2 กำหนดสัญลักษณ์ คือ 3a2-3n2
- 4) ขั้วของเทอร์โมคัปเปิล กำหนดสัญลักษณ์ คือ T1-T2



รูปที่ 5.1 การทำสัญลักษณ์ที่ขั้วขดลวดของหม้อแปลง

5.1 การวัดค่าความต้านทาน

การวัดค่าความต้านทานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการพันขดลวด ซึ่งค่าความต้านทานของขดลวดจะมีผลต่อกำลังสูญเสียและอุณหภูมิของหม้อแปลงโดยตรง โดยความต้านทานขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงต่ำจะวัดด้วย Portable wheatstone bridge Yokogawa model 2755 และ model 2769 ตามลำดับ และทำการวัดความต้านทานตามข้อต่อไป

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานที่วัดได้ที่อุณหภูมิ 30°C และค่าความต้านทานที่คำนวณที่อุณหภูมิ 75°C

ขดลวด	ค่าความต้านทานกระแสตรง			ความคลาดเคลื่อน (%)
	การวัด		การคำนวณ	
	30°C	75°C	75°C	
1a1 -1n1	2.24 mΩ	2.62 mΩ	2.49 mΩ	5
1a2-1n2	2.43 mΩ	2.84 mΩ	2.76 mΩ	2.8
3a1-3n2	8.38 mΩ	9.80 mΩ	9.08 mΩ	7.3
3a2-3n2	8.38 mΩ	9.80 mΩ	9.08 mΩ	7.3
A-N	664 Ω	776.88 Ω	796.87 Ω	2.6

5.2 การทดสอบไดอิเล็กทริกระหว่างขั้วของขดลวดแรงต่ำ

ตามมาตรฐาน IEC 76-3 ที่ระดับแรงดันใช้งานน้อยกว่า 1.1 kV แรงดันทดสอบคือ 3 kV เวลาทดสอบ 1 นาที ระหว่างขั้ว 2 ชุดที่อยู่ติดกัน การทดสอบจะเป็นไปตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบไดอิเล็กทริกระหว่างขั้วของขดลวดแรงต่ำ

ลำดับที่	ขดลวดชุดแรก	ขดลวดชุดที่ 2	ผลการทดสอบ
1)	1a1-1n1	1a2-1n2	ผ่าน
2)	1a1-1n1	ตัวถัง	ผ่าน
3)	1a1-1n2	ตัวถัง	ผ่าน
4)	N	ตัวถัง	ผ่าน
5)	3a1-3n1	3a2-3n2	ผ่าน
6)	3a1-3n1	หัวแรงสูง	ผ่าน
7)	3a2-3n2	หัวแรงสูง	ผ่าน

5.3 ความต้านทานฉนวน

การวัดค่าความต้านทานจะทำได้ด้วย MEGGER-TEST 500 V โดยวัดทั้งก่อนและหลังการทดสอบความทนของฉนวนของขดลวดแรงต่ำ ในการวัดแต่ละครั้งใช้เวลา 9 วินาที ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการวัดความต้านทานฉนวน

ลำดับที่	ขดลวดชุดแรก	ขดลวดชุดที่ 2	ค่าความต้านทาน(MΩ)	
			ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
1)	1a1-1n1	1a2-1n2	5400	4800
2)	1a1-1n1	tank	14000	15300
3)	1a1-1n2	tank	14000	12000
4)	N	tank	25800	17800
5)	3a1-3n1	3a2-3n2	6100	7750
6)	3a1-3n1	head	4280	5350
7)	3a2-3n2	head	3880	5050

5.4 การทดสอบขั้วและอัตราส่วนแรงดันของขดลวด

การทดสอบขั้วและอัตราส่วนแรงดันระหว่างขั้วของขดลวด 2 ชุด โดยใช้ Transformer ratio meter TR800 การวัดทำตามตารางที่ 5.4 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบชั่วและอัตราส่วนแรงดันของขดลวด

ขดลวดที่ 1	ขดลวดที่ 2	อัตราส่วนแรงดันระหว่างขดลวด ชุดที่ 1 และขดลวดชุดที่ 2	ความเคลื่อน (%)	ชั่ว
1a1-1n1 ต่อขนาน 1a2-1n2	A-N	1 : 604.5	0.75	เหมือนกัน
1a1-1n1 ต่อขนาน 1a2-1n2	3a1-3n1 ต่อขนาน 3a2-3n2	1 : 1	0	เหมือนกัน
1a1-1n1 ต่ออนุกรม 1a2-1n2	A-N	1 : 301.08	0.36	เหมือนกัน
ขดลวดที่ 1	ขดลวดที่ 2	อัตราส่วนแรงดันระหว่างขดลวด ชุดที่ 1 และขดลวดชุดที่ 2	ความเคลื่อน (%)	ชั่ว
1a1-1n1 ต่ออนุกรม 1a2-1n2	3a1-3n1 ต่ออนุกรม 3a2-3n2	1 : 1	0	เหมือนกัน
3a1-3n1 ขนาน 3a2-3n2	A-N	1 : 604.5	0.75	เหมือนกัน
3a1-3n1 ขนาน 3a2-3n2	A-N	1 : 301.08	0.36	เหมือนกัน

5.5 การวัดค่าแรงดันลัดวงจรและกำลังสูญเสียขณะมีโหลด

การทดสอบจะทำตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้คือ

- 1) ลัดวงจรที่ขดลวดแรงสูงและทำการป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดแรงดันต่ำจนได้กระแสฟัดัดประมาณ 0.5 A (ขดลวดแรงดันต่ำ 2 ขด ต่ออนุกรมกัน)
- 2) ลัดวงจรที่ขดลวดแรงสูง และทำการป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดต่อควบจนได้กระแสฟัดัดประมาณ 0.5 A (ขดลวดต่อควบ 2 ขด ต่ออนุกรมกัน)
- 3) ลัดวงจรที่ขดลวดต่อควบ และทำการป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดแรงดันต่ำจนได้กระแสฟัดัดประมาณ 0.5 A (ขดลวดแรงดันต่ำ 2 ขด ต่ออนุกรมกัน)

โดยที่ $W_{DC}(T_1)$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียกระแสตรงของขดลวดที่ทำการทดลองโดยการคำนวณจากกระแสและความต้านทานที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิ T_1

$W_{DC}(T_2)$ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียกระแสตรงของขดลวดที่ทำการทดลองโดยการคำนวณจากกระแสและความต้านทานที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิ T_2

$R_1(T_1)$ คือ ความต้านทานที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิ T_1 ของขดลวดที่ 1

$R_2(T_1)$ คือ ความต้านทานที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิ T_1 ของขดลวดที่ 2

W_{STHAY} คือ กำลังสูญเสียสเตรย์

โดยมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับอุณหภูมิโดยที่ทำงานที่กระแสกำหนดดังนี้ [2]

$$W_{DC}(T_1) = I_1^2 R_1(T_1) + I_2^2 R_2(T_2) \quad (6.1)$$

$$W_{DC}(T_2) = W_{DC}(T_1) \times \frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1} \quad (6.2)$$

$$W_{STRAY}(T_2) = W_{STRAY}(T_1) \times \frac{234.5 + T_1}{234.5 + T_2} \quad (6.3)$$

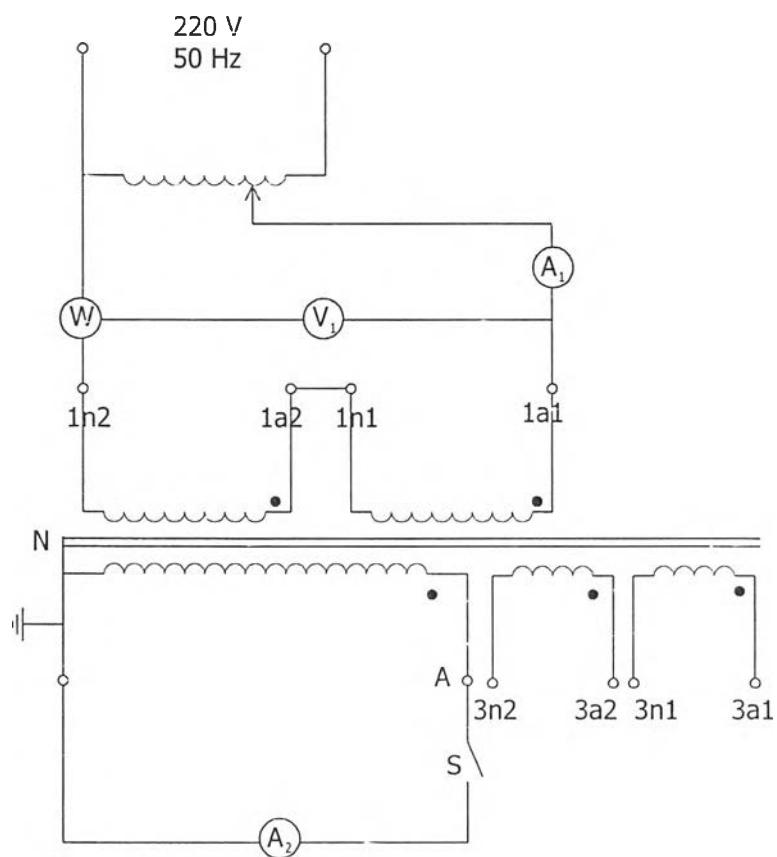
โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดประกอบไปด้วย หม้อแปลงวัดกระแส Yokogawa model 2241 หม้อแปลงวัดแรงดัน Yokogawa model 2261 และ Digital power meter Yokogawa WG-130 การทดสอบได้ผลตามตารางที่ 5.5 และ 5.6

ตารางที่ 5.5 ผลการวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและค่าแรงดันลัดวงจรที่อุณหภูมิ 30°C

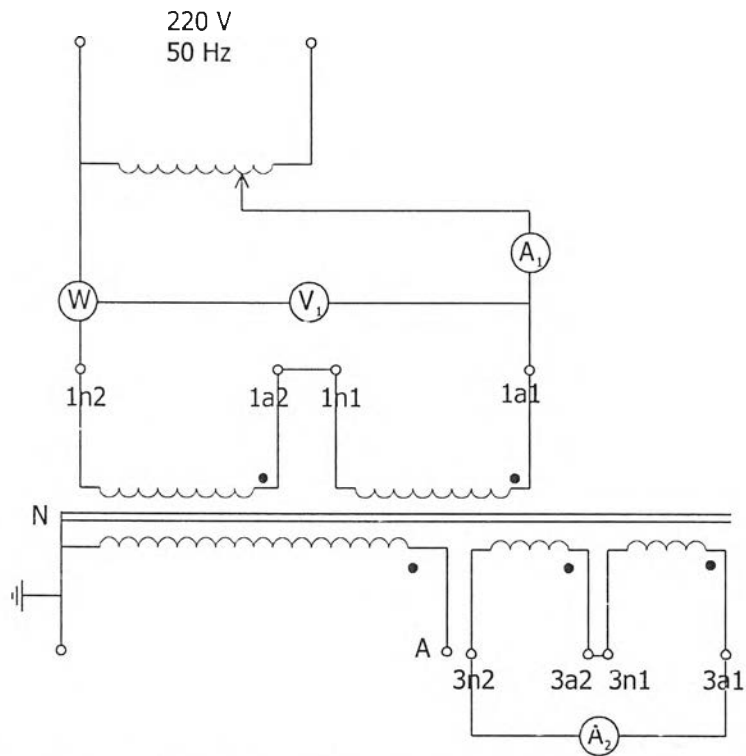
	ขดลวดชุดที่ 1	ขดลวดชุดที่ 2	W_{DC} (W)	W_{STRAY} (W)	ค่าแรงดันลัดวงจร
1)	1a1-1n1 ต่ออนุกรม 1a2-1n2	A-N	1084	504	6.27 %
2)	1a1-1n1 ต่ออนุกรม 1a2-1n2	3a1-3n1 ต่ออนุกรม 3a2-3n2	1928	1096	22.42 %
3)	3a1-3n1 ต่ออนุกรม 3a2-3n2	A-N	2172	545	11.14 %

ตารางที่ 5.6 ผลการวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและค่าแรงดันลัดวงจรที่อุณหภูมิ 75°C

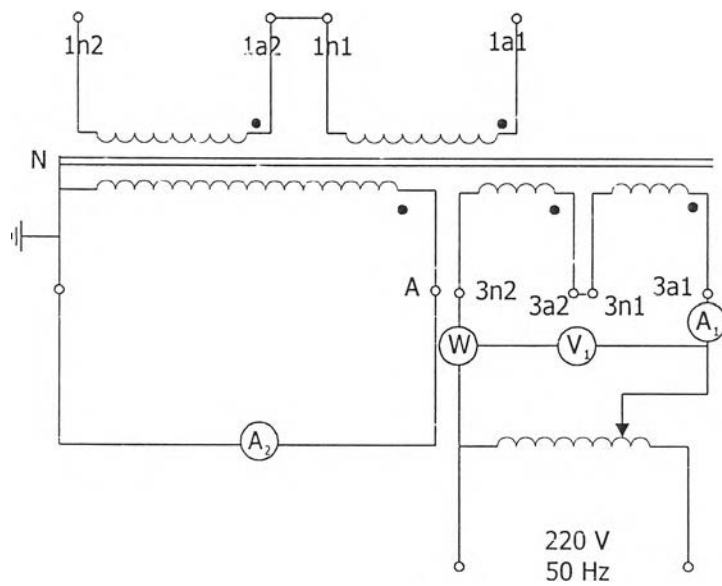
	ขดลวดชุดที่ 1	ขดลวดชุดที่ 2	W_{DC} (W)	W_{STRAY} (W)	ค่าแรงดันลัดวงจร
1)	1a1-1n1 ต่ออนุกรม 1a2-1n2	A-N	1268	430	6.27 %
2)	1a1-1n1 ต่ออนุกรม 1a2-1n2	3a1-3n1 ต่ออนุกรม 3a2-3n2	2256	936	22.42 %
3)	3a1-3n1 ต่ออนุกรม 3a2-3n2	A-N	2514	465	11.14 %



รูปที่ 5.2 วงจรวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและค่าแรงดันลัดวงจรของขดลวดแรงดันต่ำกับ
ขดลวดแรงดันสูง



รูปที่ 5.3 วงจรวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและค่าแรงดันลัดวงจรของขดลวดแรงดันต่ำกับ
ขดลวดต่อควบ



รูปที่ 6.4 วงจรวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดและค่าแรงดันลัดวงจรของขดลวดต่อควบกับ
ขดลวดแรงดันสูง

5.6 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม

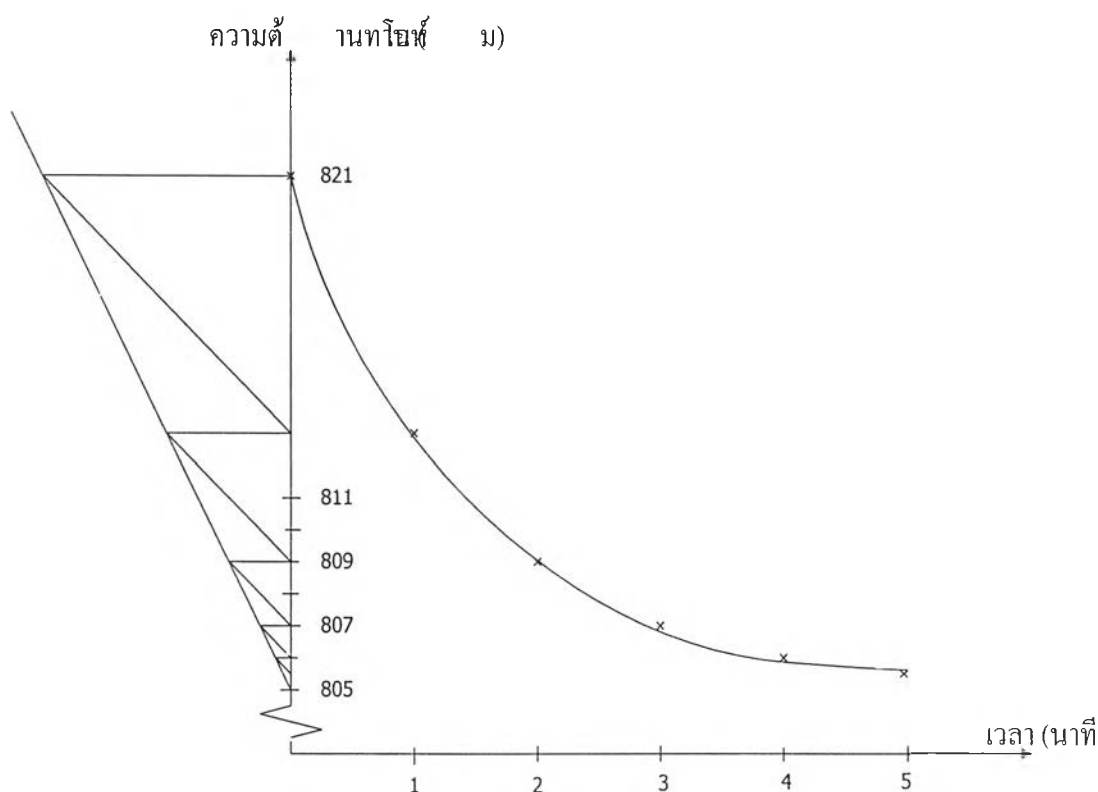
เนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดแรงดันที่มีกำลังไฟฟ้าสูงพอที่จะจ่ายกำลังสำหรับกำลังสูญเสียขณะมีโหลด และกำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลดพร้อมกันในการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม ฉะนั้นเลือกทำการทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มสำหรับกำลังสูญเสียขณะมีโหลดเท่านั้น โดยลัดวงจรขดลวดแรงสูงและป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดต่อความจนได้กระแสพิคัดประมาณ 300 A (ขดต่อความ 2 ขด ต่ออนุกรม) เนื่องจากมีฉนวนล้อมรอบหนาที่สุดและหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการนำความร้อนของฉนวน ในการทดสอบจะรักษาระดับกำลังสูญเสียให้คงที่ตลอดการทดลอง โดยอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันส่วนบนสุดของตัวถังจะต้องไม่เกิน 60°C ที่อุณหภูมิโดยรอบ 40°C และอุณหภูมิของขดลวดไม่เกิน 105°C (ฉนวน class A) โดยอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจริงจะหาได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 5.7 อุณหภูมิของน้ำมันและอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่วัดได้เทียบกับเวลา

เวลา (hrs)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (W)
	T_{amp}	T_{oil}	
1	31	29	3100
2	30.5	30	3100
3	30	30.5	3100
4	29	31	3100
5	29	31.9	3100
6	28.5	34.5	3100
7	28	37.7	3100
8	27.5	39.8	3100
9	27	42.2	3100
10	27	43.8	3100
11	26.5	45.7	3100
12	26	47	3100
13	26.5	48.5	3100
14	27	49	3100
15	27.5	50.2	3100
16	28	51.3	3100
17	28	50.3	3100
18	28	49.8	3100

ตารางที่ 5.8 ความต้านทานกระแสดรของขดลวดแรงดันสูงวัดเทียบกับเวลาหลังจากหยุดจ่ายกำลังไฟฟ้า

เวลาหลังจากตัดกำลังไฟฟ้าออก (นาท)	ความต้านกระแสดร (Ω)
2	809
3	807
4	806
5	805



รูปที่ 5.5 กราฟลออณหภูมิของขดลวดแรงสูงหลังจากทำการตัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้

จากรูปที่ 5.5 ทำให้รู้อุณหภูมิของขดลวดแรงดันสูงที่สมดุลความร้อน คือ

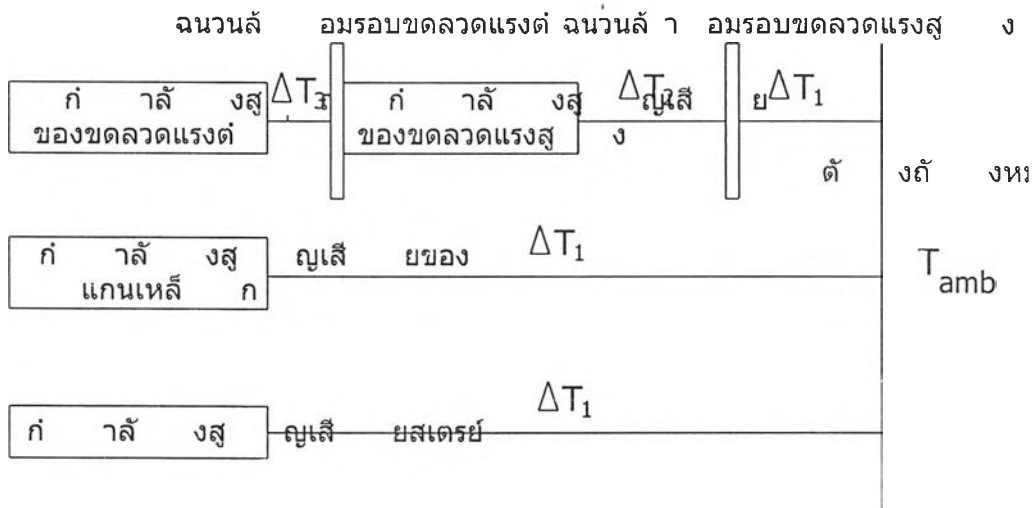
$$T_2 = \frac{R_2}{R_1} (T_1 + 234.5) - 234.5 = \frac{821}{777} (75 + 234.5) - 234.5 = 92.5^\circ\text{C}$$

จากสมการที่ 2.58 สามารถคำนวณ $\lambda = \frac{P}{A \times \Delta T_1} = \frac{3100}{22 \times 13} = 10.8$

จากสมการที่ 2.54 สามารถคำนวณ $\sigma = \frac{ql}{A \times \Delta T_2} = \frac{2685 \times 0.02}{3 \times 42} = 0.426$

เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดความร้อนประกอบด้วยกำลังสูญเสียของขดลวดแรงต่ำ ขดลวดแรงสูง

แกนเหล็ก และกำลังสูญเสียสเตอรย์ ตามรูปที่ 5.6 จากการทดลองและการคำนวณสามารถหาค่า λ, σ ได้ ทำให้สามารถคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ทำงานที่กำลังงาน 300 kVA และ 400 kVA ได้ดังนี้



รูปที่ 5.6 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลง

โดยที่ T_{amb} คือ อุณหภูมิแวดล้อม

ΔT_1 คือ อุณหภูมิเพิ่มของตัวถังจากอุณหภูมิแวดล้อม

ΔT_2 คือ อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงจากอุณหภูมิของน้ำมันส่วนบนตัวถัง

ΔT_3 คือ อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำจากอุณหภูมิขดลวดแรงสูง

ที่ระดับกำลังงาน 300 kVA

$$\text{จากสมการที่ 2.60 สามารถคำนวณ } \Delta T_1 = \frac{(1268 + 491) + 1500}{10.8 \times 13} = 23^\circ\text{C}$$

$$\text{จากสมการที่ 2.54 สามารถคำนวณ } \Delta T_2 = \frac{777 \times 0.02}{0.426 \times 3} = 12^\circ\text{C}$$

$$\text{จากสมการที่ 2.54 สามารถคำนวณ } \Delta T_3 = \frac{491 \times 0.01}{0.41 \times 1.41} = 8^\circ\text{C}$$

(พื้นที่ผิวการระบายความร้อนของขดลวดแรงต่ำ คือ $\pi \times 0.5 \times 0.9 = 1.41 \text{ m}^2$)

$$\text{ฉะนั้นค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง } \Delta T_{HV} = T_{amb} + \Delta T_1 + \Delta T_2 = T_{amb} + 35^\circ\text{C}$$

$$\text{ฉะนั้นค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ } \Delta T_{LV} = T_{amb} + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = T_{amb} + 43^\circ\text{C}$$

ที่ระดับกำลังงาน 400 kVA

$$\text{จากสมการที่ 2.60 สามารถคำนวณ } \Delta T_1 = \frac{((1268 + 491) \times 1.3^2) + 1500}{10.8 \times 13} = 32^\circ\text{C}$$

$$\text{จากสมการที่ 2.54 สามารถคำนวณ } \Delta T_2 = \frac{777 \times 1.3^2 \times 0.02}{0.426 \times 3} = 22^\circ\text{C}$$

$$\text{จากสมการที่ 2.54 สามารถคำนวณ } \Delta T_3 = \frac{491 \times 1.3^2 \times 0.01}{0.426 \times 1.41} = 14^\circ\text{C}$$

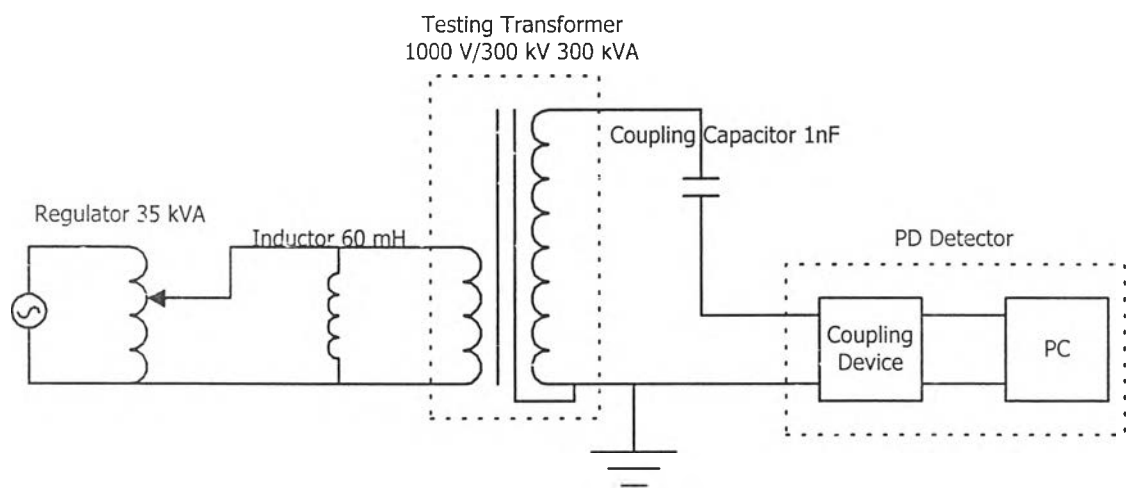
$$\text{ฉะนั้นค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง } \Delta T_{\text{HV}} = T_{\text{amb}} + \Delta T_1 + \Delta T_2 = T_{\text{amb}} + 54^\circ\text{C}$$

$$\text{ฉะนั้นค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ } \Delta T_{\text{LV}} = T_{\text{amb}} + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = T_{\text{amb}} + 68^\circ\text{C}$$

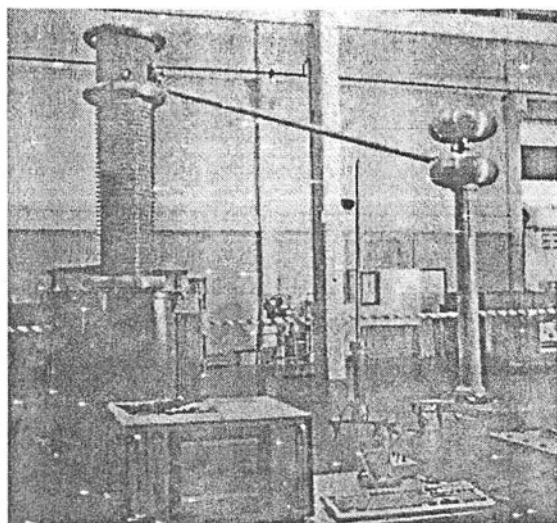
5.7. การทดสอบวัดค่าการดีสชาร์จบางส่วน

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายในจะทำให้ค่าคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนลดลง และเมื่อใช้งานที่สภาวะการเกิดดีสชาร์จภายในไปเรื่อยๆ ในที่สุดก็จะเกิดการเบรกดาวนในฉนวนในที่สุด

การวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 44-4 [13] ค่าการดีสชาร์จบางส่วนต้องไม่เกิน 10 pC โดยทำการทดสอบที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้น 60 เปอร์เซ็นต์ โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 และค่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วนเป็นไปตามตารางที่ 5.9



รูปที่ 5.7 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 5.8 ภาพวงจรที่ใช้ในการวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนและวัดค่าแรงดันทดสอบ

ตารางที่ 5.9 ค่าดีสชาร์จบางส่วนเทียบกับแรงดัน

แรงดันทดสอบ (kV)	ค่าดีสชาร์จบางส่วน (pC)
100	2.51
150	2.39
200	2.52
250	2.56
270	2.51
290	5.12

5.8. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันสูง (High voltage withstand test)

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันสูงกระแสสลับ 50 Hz โดยการเหนี่ยวนำ เนื่องจากไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันสูงถึงค่าแรงดันทดสอบ จึงทำการป้อนแรงดันด้านแรงต่ำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ด้านแรงสูงจนถึงค่าแรงดันที่กำหนด หลังจากนั้นทำการป้อนแรงดันขึ้นจนด้านแรงดันสูงถึงค่าแรงดันทดสอบ 330 kV_{rms} 50 Hz นาน 1 นาที

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบความเป็นฉนวนที่แรงดันสูง

แรงดันทดสอบ (kV)	ผลการทดสอบ
330	ผ่าน