

การทดสอบและการประเมินผล

หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้างขึ้นนี้จะต้องมีการทดสอบ เพื่อตรวจลักษณะสมบัติของหม้อแปลงก่อนว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ การทดสอบจะทดสอบตามมาตรฐานกำหนด IEC Publ. 76-1976 Power Transformers บางรายการ และเพิ่มเติมบางรายการ เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อไป เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบเป็นหม้อแปลงที่ใช้งานแตกต่างไปจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง รายการทดสอบหม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้างขึ้น มีดังต่อไปนี้

- การวัดค่าความต้านทานของขดลวด
- การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบขั้ว
- การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์
- การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและกระแสเมื่อไม่มีโหลด
- การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน
- การทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น
- การทดสอบอุณหภูมิ เพิ่ม
- การทดสอบวัดค่าคิซซาร์จบางส่วน
- การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน
- การใช้งาน
  - ใช้ทดสอบวาวไฟตามผิวแห้งบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า
  - ใช้ทดสอบวาวไฟตามผิวเปียกบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

5.1 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

การวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดจะกระทำก่อนการทดสอบรายการอื่นๆ เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของขดลวดเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซ SF<sub>6</sub> ในถัง เครื่องมือที่ใช้วัดได้แก่ Impedance Bridge Type 1656 ของ General Radio Company ค่าที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวด

ขดลวด	ค่าความต้านทานกระแสตรง ( $\Omega$ )			ความคลาดเคลื่อน (%)
	การวัด		การคำนวณ	
	26°C	75°C	75°C	
แรงด้ายคที 1	0.0615	0.0731	0.0683	7.02
แรงด้ายคที 2	0.060	0.0713	0.0683	4.39
แรงสูง	4.615	5483	5976	-8.25
ค่อควบ	0.117	0.139	0.139	0

อุณหภูมิของขดลวดระหว่างทำการวัดค่าความต้านทาน = 26°C

$$\text{ความต้านทานที่อุณหภูมิ } 75^{\circ}\text{C} \quad R_{75^{\circ}\text{C}} = \frac{(T_0 + 75)}{(T_0 + 26)} R_{26^{\circ}\text{C}}$$

เมื่อ  $T_0$  คือ อุณหภูมิที่ความต้านทานเสมือนมีค่าเป็นศูนย์  
สำหรับทองแดงมีค่าเท่ากับ 234.5

$$\text{ดังนั้น} \quad R_{75^{\circ}\text{C}} = \frac{(234.5 + 75)}{(234.5 + 26)} R_{26^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{นิยามของความคลาดเคลื่อน } (\%) = \frac{(\text{ค่าจากการวัด} - \text{ค่าจากการคำนวณ}^*)}{\text{ค่าจากการคำนวณ}} \times 100$$

\* ค่าจากการคำนวณในข้อ 3.3

## 5.2 การวัดอัตราส่วนแรงดันและการตรวจสอบซ้ำ

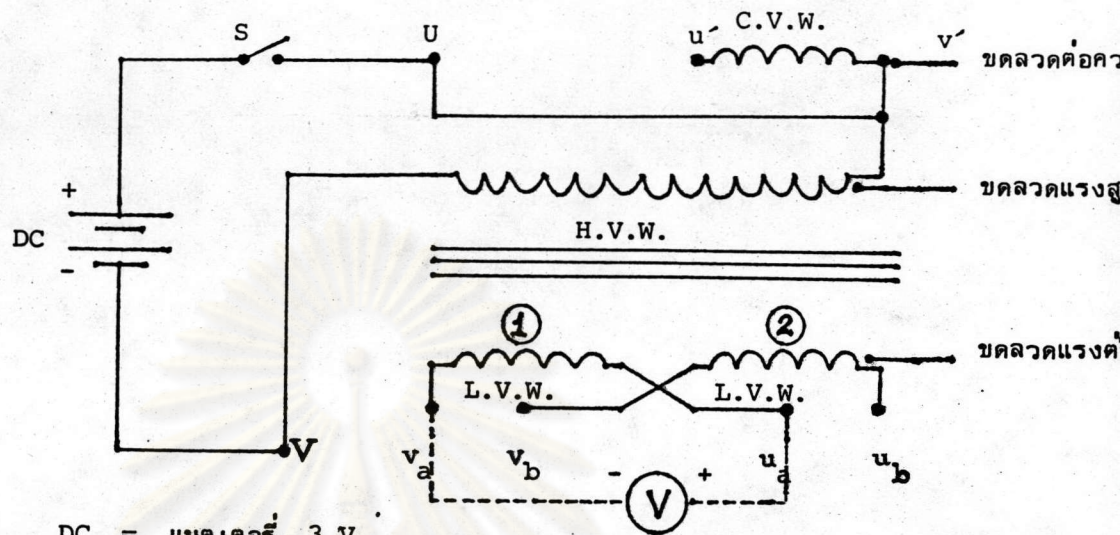
การวัดอัตราส่วนแรงดันใช้เครื่องมือ Transformer Ratio Meter ของ Norma ค่าอัตราส่วนแรงดันที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราส่วนแรงดันของขดลวด

อัตราส่วนแรงดัน ของขดลวด	อัตราส่วนแรงดัน		ความคลาดเคลื่อน (%)
	การวัด	การคำนวณ	
แรงสูง : แรงต่ำ	464.10 : 1	454.54 : 1	2.103
ค่อควบ : แรงต่ำ	1.01 : 1	1 : 1	1.0

ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดในมาตรฐาน =  $\pm 0.5 \%$

การตรวจสอบซ้ำ เนื่องจากหม้อแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นมีขดลวดแรงต่ำสองขดลวด และขดลวดค่อควบเพิ่มขึ้นมาอีกสำหรับกรณีต้องการต่อแบบชั้นบันได ดังนั้นการตรวจซ้ำจึงมีความจำเป็นมาก ซึ่งสามารถใช้วิธีง่ายๆ ตรวจสอบซ้ำ ดังต่อไปนี้



DC = แบตเตอรี่ 3 V

V = D.C. โวลต์มิเตอร์ 0-1000 V

S = สวิตช์ไฟ

รูปที่ 5.1 วงจรการตรวจสอบขั้ว

วิธีทดสอบ ทดสอบตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ค่อย่างจรงตามรูปที่ 5.1 สำหรับตรวจสอบขั้วของขลวดแรงต่ำ ขดที่ (1) กับ ขลวดแรงสูง (กรณีต้องการตรวจสอบขั้วของขลวดแรงต่ำขดที่ (2) และขลวดค่อคววที่เหลือกก็ใช้วิธีทดสอบทำนองเดียวกัน) เพื่อลดอันตรายจากแรงดันสูงที่เหนี่ยว นำขั้วครวว แบตเตอรี่จะค่อกับขลวดแรงสูงเสมอ ส่วนขลวดอื่นจะใช้ D.C. โวลต์มิเตอร์ ตรวจสอบทิศทางการกระดิกของเข็ม
- เลือกสเกลของ D.C. โวลต์มิเตอร์ ให้เหมาะสม แล้วกดสวิตช์เพื่อค่ออย่างจรงของ แบตเตอรี่ เข้ากับขลวดแรงสูง ขณะทีเริ่มกดสวิตช์สังเกตทิศทางการกระดิกของเข็มของ D.C. โวลต์มิเตอร์ ถ้ากระดิกขึ้นในทางบวก แสดงว่า ขั้วขลวดแรงสูงที่ค่อเข้า กับขั้วบวกของแบตเตอรี่จะเป็นขั้วที่มีทิศทางเดียวกับขั้วขลวดแรงต่ำขดที่ (1) ทีค่อ เข้ากับขั้วบวกของ D.C. โวลต์มิเตอร์ และกำหนดให้เป็น U สำหรับขั้วของ ขลวดแรงสูง,  $u_a$  สำหรับขั้วขลวดแรงต่ำขดที่ (1) ดังในรูปที่ 5.1 ส่วนปลาย

ขลวดที่เหลือจะเป็น  $V, v_a$  ของขลวดแรงสูงและขลวดแรงต่ำขดที่ (1)

ตามลำดับ แต่ถ้าเชื่อมกระดิกในทิศทางลบ แสดงว่า ขั้วจะสลับทิศทางกัน

- ทดสอบตามวิธีในข้อ 2) แต่เปลี่ยนเป็นขลวดแรงต่ำขดที่ (2) และขลวดต่อควบที่เหลือก็จะตรวจสอบขั้วเสร็จเรียบร้อยแล้ว

### ผลการทดสอบ

จะกำหนดเครื่องหมายของขั้วต่างๆ ของขลวดคังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยขั้วที่มีทิศทางเดียวกัน คือ  $U, u_a, u_b, u'$  และ  $V, v_a, v_b, v'$  สำหรับขั้วของขลวดแรงสูง, แรงต่ำขดที่ (1) , แรงต่ำขดที่ (2) และขลวดต่อควบตามลำดับ (การพันขลวดทั้งหมดเป็นแบบ Subtractive Polarity)

### 5.3 การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลดและแรงดันอิมพีแดนซ์

ต่อวงจรตามรูปที่ 5.2 โดยปล่อยขลวดต่อควบลอยไว้ ค่อยๆ เพิ่มแรงดัน  $U_2$  จนกระแส  $I_2$  มีค่าเท่ากับ 0.1 A (เมื่อขลวดแรงต่ำทั้งสองขดต่อขนานกัน) ค่าความต้านทานและอิมพีแดนซ์สมมูลของขลวดเมื่อคิดจากทางด้านแรงสูง สามารถหาค่าได้จากค่า  $W_2, U_2, I_2$  จากมิเตอร์ ดังต่อไปนี้

$$R_{e2} = \frac{W_2}{I_2^2}$$

โดย  $R_{e2}$  จะเป็นความต้านทาน เนื่องจากความต้านทานกระแสตรงและความต้านทานเนื่องจาก การสูญเสียกำลังไฟฟ้าสเตรย์เมื่อมีโหลดของขลวดทั้งสอง

อิมพีแดนซ์สมมูล เมื่อคิดทางด้านแรงสูง

$$Z_{e2} = \frac{U_2}{I_2}$$

ดังนั้น รีแอกแตนซ์สมมูล เมื่อคิดทางด้านแรงสูง

$$X_{e_2} = \sqrt{(Z_{e_2})^2 - (R_{e_2})^2}$$

หรือ

$$X_{e_2} = \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_2}\right)^2 - \left(\frac{W_2}{I_2}\right)^2}$$

สมการที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะไม่คิดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและกระแสกระตุ้นของแกนแม่เหล็ก ดังวงจรสมมูลของหม้อแปลงในรูปที่ 5.2 ก)

วิธีทดสอบ ทดสอบโดยวิธีลัดวงจรด้านแรงต่ำผ่านแอมมิเตอร์ ซึ่งขดลวดทั้งสองต่อแบบขนาน ดังวงจรตามรูปที่ 5.2 บ่อนแรงดัน  $U_2$  เข้าทางด้านแรงสูง จนมิลลิแอมมิเตอร์อ่านค่าได้กระแสที่กำหนด 100 mA บันทึกค่าแรงดัน  $U_2$  และกำลังไฟฟ้าย้อนเข้า  $W_2$

#### ผลการทดสอบ

อุณหภูมิห้อง $T_{amb}$	=	26	$^{\circ}C$
แรงดันลัดวงจร $U_2$	=	4350	V
กระแสลัดวงจร $I_2$	=	100	mA
กำลังไฟฟ้าย้อนเข้า $W_2$	=	128.4	W

โดย กำลังไฟฟ้าย้อนเข้า  $W_2$   $26^{\circ}C = W_{D.C.26^{\circ}C} + W_{stray 26^{\circ}C}$

เมื่อ  $W_{D.C.26^{\circ}C} =$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียในความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงต่ำร่วมกับขดลวดแรงสูงที่อุณหภูมิของขดลวดเท่ากับ  $26^{\circ}C$

$W_{stray 26^{\circ}C} =$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียเสถียรเมื่อมีไหลคที่อุณหภูมิของขดลวดเท่ากับ  $26^{\circ}C$



จากตารางที่ 5.1 จะได้

$$\begin{aligned}
 W_{D.C. 26^{\circ}C} &= I_2^2 R_2 26^{\circ}C + I_1^2 R_1 26^{\circ}C \\
 &= (0.1)^2 (4.615 \times 10^3) + (45.45)^2 (0.03037) \\
 &= 46.15 + 62.735 \\
 &= 108.88 \quad W
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad W_{\text{stray } 26^{\circ}C} &= 128.4 - 108.88 \\
 &= 19.51 \quad W
 \end{aligned}$$

$$\text{จาก} \quad W_{D.C. 75^{\circ}C} = W_{D.C. 26^{\circ}C} \times \left( \frac{234.5 + 75}{234.5 + 26} \right)$$

$$\text{และ} \quad W_{\text{stray } 75^{\circ}C} = W_{\text{stray } 26^{\circ}C} \times \left( \frac{234.5 + 26}{234.5 + 75} \right)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad W_{D.C. 75^{\circ}C} &= 108.88 \times 1.188 \\
 &= 129.36 \quad W
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{และ} \quad W_{\text{stray } 75^{\circ}C} &= \frac{19.51}{1.188} \\
 &= 16.42 \quad W
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad W_2 75^{\circ}C &= W_{D.C. 75^{\circ}C} + W_{\text{stray } 75^{\circ}C} \\
 &= 129.36 + 16.42 \\
 &= 145.78 \quad W
 \end{aligned}$$



อิมพีแดนซ์สมมูลที่  $26^{\circ}\text{C}$  คิดเทียบทางด้านแรงสูง

$$\begin{aligned} Z_{e2\ 26^{\circ}\text{C}} &= \frac{U_2}{I_2} \\ &= \frac{4350}{0.1} \\ &= 43500 \quad \Omega \end{aligned}$$

ความต้านทานสมมูลที่  $26^{\circ}\text{C}$  คิดเทียบทางด้านแรงสูง

$$\begin{aligned} R_{e2\ 26^{\circ}\text{C}} &= \frac{W_2\ 26^{\circ}\text{C}}{I_2^2} \\ &= \frac{128.4}{(0.1)^2} \\ &= 128.40 \quad \Omega \end{aligned}$$

รีแอกแตนซ์สมมูลที่  $26^{\circ}\text{C}$  คิดเทียบทางด้านแรงสูง

$$\begin{aligned} X_{e2\ 26^{\circ}\text{C}} &= \sqrt{Z_{e2\ 26^{\circ}\text{C}}^2 - R_{e2\ 26^{\circ}\text{C}}^2} \\ &= \sqrt{43500^2 - 12840^2} \\ &= 41561.8 \quad \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{e2\ 75^{\circ}\text{C}} &= \frac{W_2\ 75^{\circ}\text{C}}{I_2^2} \\ &= \frac{145.78}{(0.1)^2} \\ &= 14578 \quad \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Z_{e2\ 75^{\circ}\text{C}} &= \sqrt{41561.8^2 + 14578^2} \\ &= 44044.31 \quad \Omega \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์แรงดันอิมพีแดนซ์ (แรงดันลัดวงจร)

$$\begin{aligned} \epsilon_{sc} &= \frac{I_2 \times Z_{e2} 75^{\circ}\text{C}}{U_2} \times 100 \quad \% \\ &= \frac{(0.1) \times 44044.31}{100 \times 10^3} \times 100 \quad \% \\ &= 4.404 \quad \% \end{aligned}$$

จากการคำนวณในข้อ 3.3.2 ได้ค่าแรงดันลัดวงจร

$$\epsilon_{sc} = 4.5 \quad \%$$

$$\begin{aligned} \text{ความคลาดเคลื่อน (\%)} &= \frac{(4.404 - 4.5)}{4.5} \times 100 \\ &= -2.133 \quad \% \end{aligned}$$

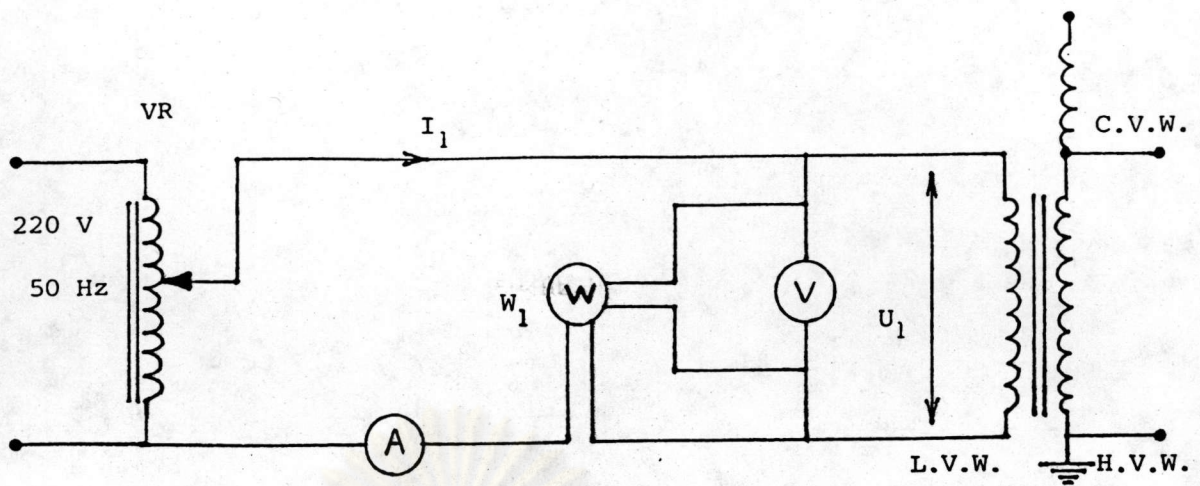
$$\text{ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดในมาตรฐาน} = \pm 10 \quad \%$$

$$\begin{aligned} \text{ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีโหลด} &= \frac{(145.78 - 130.31)}{130.31} \times 100 \\ &= 11.87 \quad \% \end{aligned}$$

$$\text{ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดในมาตรฐาน} = 14.28 \quad \%$$

#### 5.4 การวัดค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและกระแสเมื่อไม่มีโหลด

เมื่อหม้อแปลงไม่ได้จ่ายโหลดที่แรงดันและความถี่ปกติ (เปิดวงจรด้านโหลด) กำลังที่บ่อนเข้าจะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากฮีสเตอร์ซิสและกระแสไหลวน ในแกนแม่เหล็กและในขดลวด แต่กระแสเมื่อไม่มีโหลดน้อยมาก ดังนั้น จึงคิดเสมือนว่าเป็นกำลังสูญเสียในแกนแม่เหล็กทั้งหมดได้เลย และกำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้นิ่งที่ทุกค่าของโหลดวงจรทดสอบ ตามรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 วงจรการทดสอบเปิดวงจร

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ เหมือนกับการทดสอบลัดวงจร แต่ไม่ต้องใช้ PT และ T เพราะป้อนกำลังเข้าทางด้านแรงต่ำ ส่วนด้านแรงสูงเปิดวงจร กำลังที่ป้อนให้กับหม้อแปลงทดสอบได้รับจากตัวปรับแรงดันโดยตรง ดังวงจรรูปที่ 5.3 โดยต่อขดลวดแรงต่ำแบบขนานเพิ่มแรงดัน  $U_1$  ทีละขั้นๆ ละ 20 โวลต์ จนถึง 220 โวลต์ แต่ละขั้น  $U_1$  อ่านค่า  $I_1$ ,  $W_1$  จากแอมมิเตอร์และวัตต์มิเตอร์ ตามลำดับ

#### ผลการทดสอบ

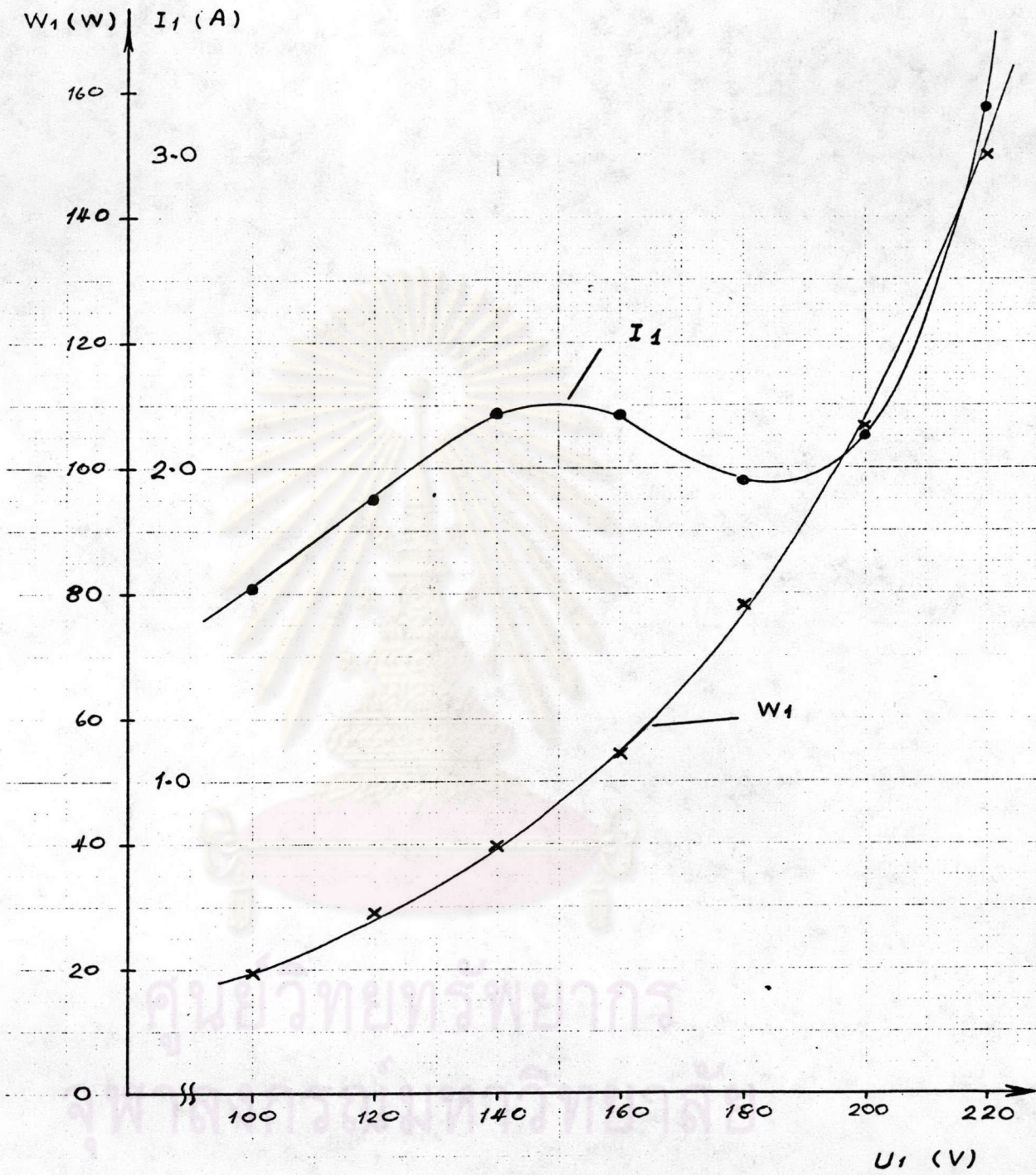
ค่ากระแสเมื่อไม่มีโหลด\*  $I_1$  และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ข้างล่าง และรูปที่ 5.4

\* กระแส เมื่อไม่มีโหลดหรือกระแสกระตุ้น

ตารางที่ 5.3 กระแสและกำลังไฟฟ้าป้อนเข้าเมื่อไม่มีโหลดเมื่อเปลี่ยนแรงดันป้อนเข้า

$U_1$ (V)	กระแสเมื่อไม่มีโหลด $I_1$ (A)	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า $P_1$ (W)
20	0.313	0.85
40	0.642	3.50
60	0.971	7.70
80	1.305	12.00
100	1.63	19.60
120	1.928	29.20
140	2.170	40.00
160	2.170	54.40
180	1.96	78.00
200	2.10	106.8
220	3.15	150.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

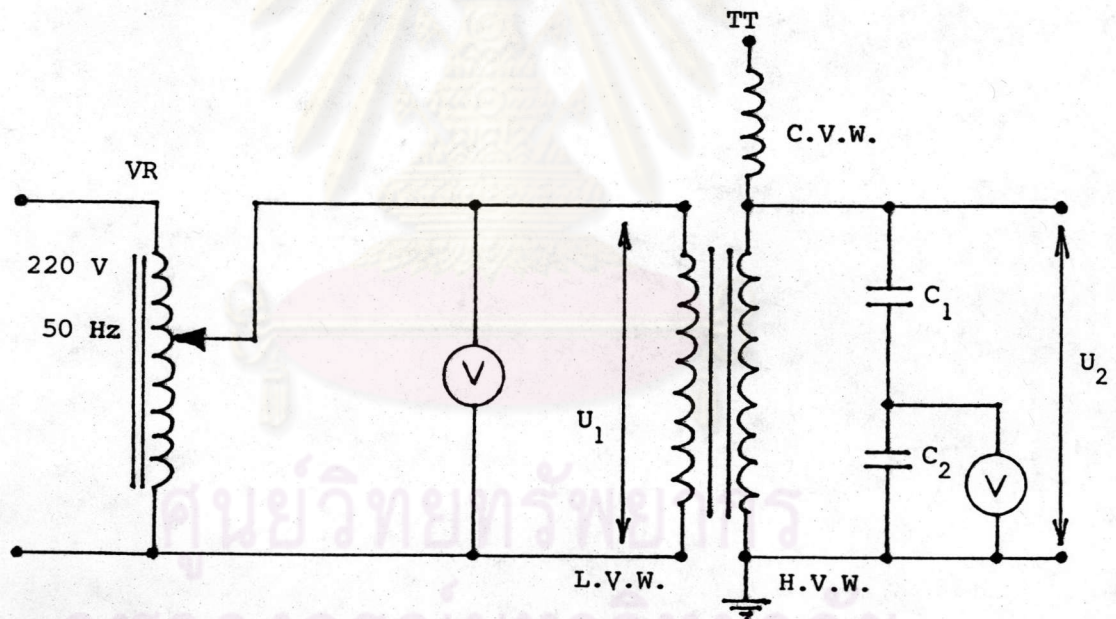


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อไม่มีโหลดกับแรงดันป้อนเข้า

### 5.5 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบฉนวนระหว่างรอบของขดลวด ระหว่างขดลวดและระหว่างขดลวดเหล่านี้กับดิน เนื่องจากแรงดันทดสอบสูงกว่าแรงดันใช้งานตามปกติ หม้อแปลงทดสอบโดยทั่วไปจะใช้แรงดันทดสอบประมาณ 110-120 % ของค่าแรงดันที่กำหนด ดังได้กล่าวไว้ในข้อ 2.5.2 ในการทดสอบหม้อแปลงที่ประกอบสร้างนี้ จะใช้ค่าแรงดันทดสอบความถี่ 50 Hz ขนาด 110 kV (110 % ของขนาดแรงดันที่กำหนด) เป็นเวลา 1 นาที

วิธีทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน IEC Publ. No.60-2 [29] โดยคําวงจร ดังรูปที่ 5.5 ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่า หม้อแปลงทดสอบมีความคงทนต่อแรงดันทดสอบ 110 kV ได้โดยไม่เกิดเบรคความหรือเสียหายใดๆ แสดงว่าการฉนวนของขดลวดแรงสูงดีพอ



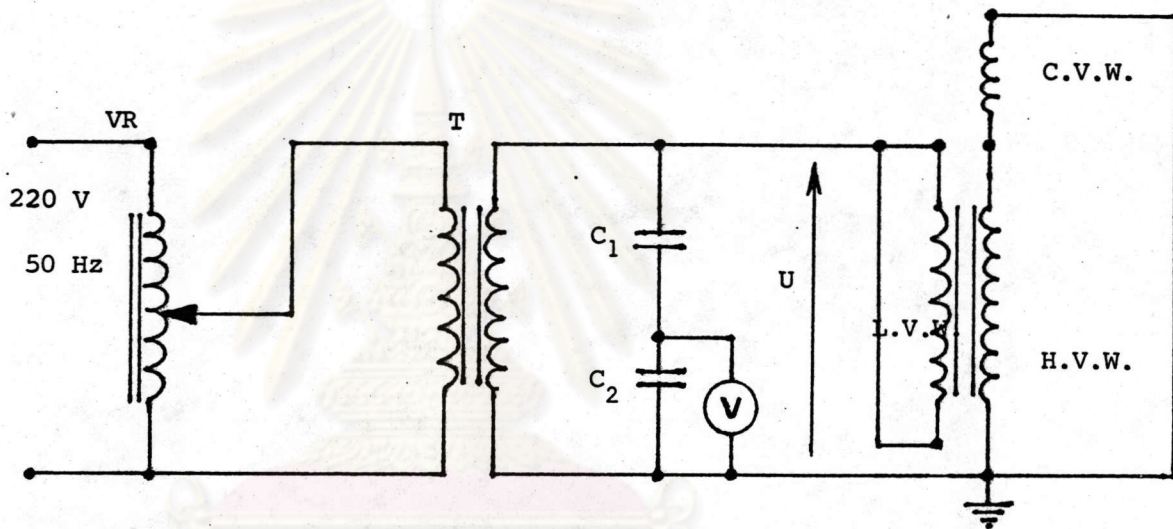
- VR = ตัวปรับแรงดันเบื้องต้นเข้า  
 $C_1, C_2$  = โวลเตจดีไวเคอร์แบบกะแมซิเคอร์ 1/1000 V  
 V = A.C. โวลต์มิเตอร์  
 TT = หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้าง

รูปที่ 5.5 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน

### 5.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่น

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขดลวดแรงสูง และขดลวดแรงต่ำกับดิน ตัวอย่าง ดังรูปที่ 5.6 เนื่องจากแรงดันที่กำหนดของขดลวดแรงต่ำเท่ากับ 220 V จึงใช้ค่าแรงดันทดสอบ  $U$  เท่ากับ 3000 V และใช้เวลาทดสอบ 1 นาที วิธี การทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน IEC Publ. No.60-2

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับดิน และขดลวดแรงต่ำ กับขดลวดแรงสูงดีพอ



VR = ตัวปรับแรงดันเบื้องต้นเข้า

T = หม้อแปลงเบื้องต้นกำลัง

$C_1, C_2$  = ไวลเดจติไวเตอร์แบบกะแปซิเตอร์ 1/1000 V

V = A.C. ไวลต์มิเตอร์

รูปที่ 5.6 วงจรการทดสอบความคงทนต่อแรงดันจากตัวจ่ายอื่นสำหรับทดสอบขดลวดแรงต่ำ



### 5.7 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม

การทดสอบนี้จะหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดและของก๊าซ  $\text{SF}_6$  ในส่วนบนของตัวถังจากอุณหภูมิห้องขณะใช้งานที่โหลดเต็มที้อย่างต่อเนื่องว่าสูงเกินอุณหภูมิใช้งานของฉนวนที่ออกแบบให้ อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดไม่เกิน  $75^\circ\text{C}$  (ฉนวนชั้น E) และก๊าซ  $\text{SF}_6$  คอนบนของตัวถังไม่เกิน  $55^\circ\text{C}$  แต่ในการประกอบสร้างหม้อแปลงนี้ได้ใช้ลวดอาบน้ำยา PEW (ฉนวนชั้น B) อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน  $80^\circ\text{C}$  สำหรับขดลวดแรงต่ำ, ขดลวดแรงสูง และขดลวดค่อควส่วนฉนวนเมลิเนกซ์ที่ใช้เป็นฉนวนของขดลวดนั้นเป็นฉนวนชั้น F อุณหภูมิเพิ่มไม่เกิน  $80^\circ\text{C}$  จึงไม่ต้องคำนึงถึง การวัดอุณหภูมิของขดลวดจะใช้วิธีวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแล้วหาอุณหภูมิจากความสัมพันธ์

$$T_b = \frac{R_b}{R_a} (T_o + T_a) - T_o$$

- เมื่อ  $T_a$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นการทดสอบของขดลวด  
 $T_b$  คือ อุณหภูมิสุดท้ายการทดสอบของขดลวด  
 $T_o$  คือ อุณหภูมิที่ความต้านทานเสมือนมีค่าเป็นศูนย์  
 สำหรับทองแดงมีค่าเท่ากับ 234.5

ส่วนในการวัดอุณหภูมิของก๊าซ  $\text{SF}_6$  คอนบนของตัวถัง จะใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบไบเมทัล ซึ่งติดตั้งคอนบนของตัวถัง

การวัดอุณหภูมิห้องจะใช้เทอร์โมมิเตอร์ติดตั้งไว้ที่สูงประมาณกึ่งกลางความสูงของตัวถัง และห่างจากตัวถังประมาณ 2 เมตร ในการทดสอบรายการนี้จะใช้วิธีสังเกตจอร์ซึ่งง่ายและสะดวก ถ้าให้ค่าความต้านทาน  $R_a$  เป็นค่าความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดสอบ  $T_a$  (โดยปกติเท่ากับอุณหภูมิห้อง  $T_{amb}$ ) และ  $R_b$  เป็นค่าความต้านทานตรงจุดที่ติดตั้งไฟฟ้าออก ที่อุณหภูมิของขดลวด คือ  $T_b$

ดังนั้น

$$\frac{R_b}{R_a} = (T_b + 234.5) / (T_a + 234.5)$$





- เพิ่มแรงดัน  $U_2$  จนได้ค่า  $W_2$  จากวัตต์มิเตอร์เท่ากับการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวม มีโหลดและไม่มีโหลดที่อุณหภูมิ  $75^\circ\text{C}$  จากการทดสอบในข้อ 5.3 และ 5.4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $145.78 + 150 = 295.78 \text{ W}$
- บันทึกค่าของอุณหภูมิ  $T_{\text{amb}}$  และ  $T_{\text{gas}}$  ทุกๆ ชั่วโมง ดังในตารางที่ 5.4
- การทดสอบดำเนินต่อไปจนเข้าจุดสมดุลความร้อน (ซึ่งขณะนี้  $T_{\text{gas}}$  จะมีค่าประมาณคงที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิห้อง) แล้วตัดกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าหม้อแปลงทดสอบออก และปล่อยให้ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง ก่อนทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดต่อไป (เพื่อให้อุณหภูมิของขดลวดเท่ากับอุณหภูมิห้อง)
- เพิ่มแรงดัน  $U_2$  จนได้ค่า  $W_2$  จากวัตต์มิเตอร์ เท่ากับการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีโหลด ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $145.78 \text{ W}$
- บันทึกค่าของอุณหภูมิ  $T_{\text{amb}}$  และ  $T_{\text{gas}}$  ทุกๆ ชั่วโมง ดังในตารางที่ 5.5
- การทดสอบดำเนินต่อไปจนเข้าจุดสมดุลความร้อน แล้วตัดจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า
- หลังจากตัดจ่ายกำลังไฟฟ้าแล้วบันทึกค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงสูงตามเวลาห่างกัน 1 นาที ตั้งแต่เวลาที่ 2 ถึงเวลาที่ 6 และบันทึกค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงต่ำตั้งแต่เวลาที่ 8 ถึงเวลาที่ 12

#### ผลการทดสอบ

1) อุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ  $\text{SF}_6$  ตอนบนของตัวถังจากอุณหภูมิห้อง (ดูตารางที่ 5.4)

$$= 41.8 - 26$$

$$= 15.8 \quad ^\circ\text{C}$$

2) ข้อมูลการวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงสูงตามเวลาหลังจากตัดจ่ายกำลังไฟฟ้า

เวลาหลังจากจุดตัดกำลังไฟ้ออก (นาทื)	ความต้านทานกระแสตรงของขลวดแรงสูง (kΩ)
2	5.85
3	5.84
4	5.83
5	5.826
6	5.825

โดยวิธีเขียนกราฟ (Extrapolation) จากเส้นโค้งของเวลากับความต้านทาน เมื่อต่อเส้นโค้งไปหาค่าความต้านทานสูงสุดที่จุดตัดจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังในรูปที่ 5.8 จะได้ค่าเท่ากับ 5.9 kΩ และจากตารางที่ 5.5 จะได้

อุณหภูมิเพิ่มของขลวดแรงสูงจากอุณหภูมิของก๊าซ SF<sub>6</sub> คอนบนของตัวถัง

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ \frac{R_b}{R_a} (T_a + 234.5) - 234.5 \right\} - T_{\text{gas}} \\
 &= \left\{ \frac{5.9}{4.615} (26 + 234.5) - 234.5 \right\} - 35 \\
 &= 63.53 \quad \text{°C}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อุณหภูมิเพิ่มของขลวดแรงสูงจากอุณหภูมิต้อง

$$\begin{aligned}
 &= \text{อุณหภูมิเพิ่มของขลวดแรงสูงจากอุณหภูมิของก๊าซ} \\
 &\quad \text{SF}_6 \text{ คอนบนของตัวถัง} + \text{อุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF}_6 \\
 &\quad \text{คอนบนของตัวถังจากอุณหภูมิต้อง} \\
 &= 63.53 + 15.8 \\
 &= 79.33 \quad \text{°C}
 \end{aligned}$$

- 3) ข้อมูลการวัดค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงต่ำ ตามเวลาหลังจากตัดจ่ายกำลังไฟฟ้า

เวลาหลังจากจุดตัดกำลังไฟฟ้าออก (นาทิจ)	ความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงต่ำ (Ω)
8	0.03640
9	0.03628
10	0.03620
11	0.03610
12	0.03605

โดยวิธีการเขียนกราฟจากเส้นโค้งของเวลากับความต้านทาน ดังในรูปที่ 5.9 จะได้ค่าความต้านทานสูงสุดขณะตัดจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.0375 Ω และจากตารางที่ 5.5 จะได้

อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำจากอุณหภูมิของก๊าซ SF<sub>6</sub> คอนบนของตัวถัง

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ \frac{R_b}{R_a} (T_a + 234.5) - 234.5 \right\} - 35 \\
 &= \left\{ \frac{0.0384}{0.03037} (26 + 234.5) - 234.5 \right\} - 35 \\
 &= 59.95 \quad ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำจากอุณหภูมิห้อง

$$\begin{aligned}
 &= \text{อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำจากอุณหภูมิของก๊าซ} \\
 &\text{SF}_6 \text{ คอนบนตัวถัง} + \text{อุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF}_6 \\
 &\text{คอนบนของตัวถังจากอุณหภูมิห้อง}
 \end{aligned}$$

$$= 59.95 + 15.8$$

$$= 75.76 \quad ^\circ\text{C}$$

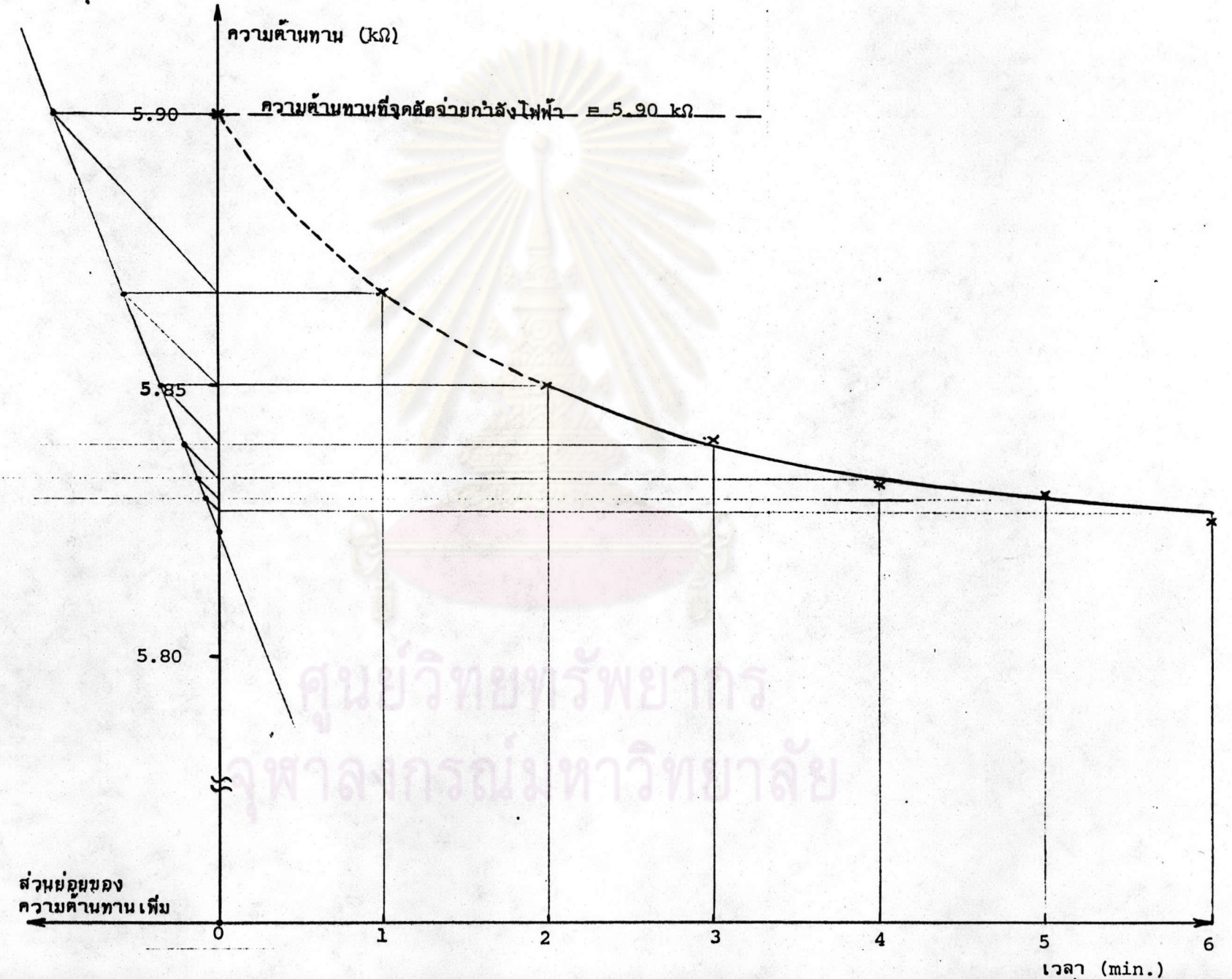
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซ SF<sub>6</sub> คอนบนของตัวถังจากอุณหภูมิห้อง

เวลา (hrs.)	อุณหภูมิ (°C)			กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า W <sub>2</sub> (W)
	T <sub>gas</sub>	T <sub>amb</sub>	T <sub>gas</sub> - T <sub>amb</sub>	
1	29.5	26.0	3.5	295.78
2	32.0	26.0	6.0	295.78
3	34.0	26.0	8.0	295.78
4	36.0	26.0	10.0	295.78
5	36.8	26.0	10.8	295.78
6	37.8	26.0	11.8	295.78
7	38.9	26.0	12.9	295.78
8	39.8	26.0	13.8	295.78
9	40.2	26.0	14.2	295.78
10	40.5	26.0	14.5	295.78
11	41.0	26.0	15.0	295.78
12	41.8	26.0	15.8	295.78
13	41.8	26.0	15.8	295.78
14	41.8	26.0	15.8	295.78
15	41.8	26.0	15.8	295.78
16	41.8	26.0	15.8	295.78

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดจากอุณหภูมิของก๊าซ SF<sub>6</sub>  
คอนบนของตัวถัง

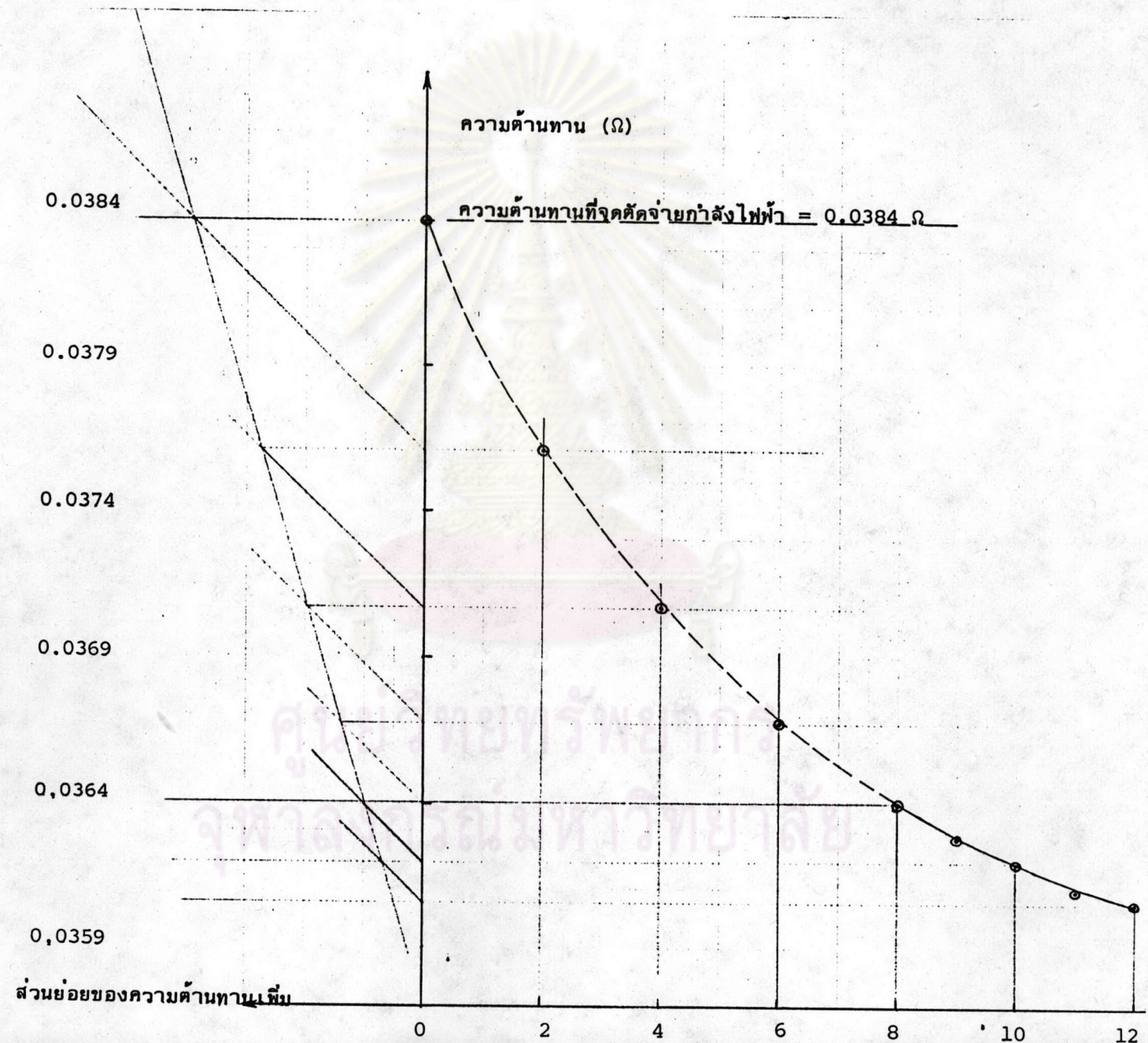
เวลา (hrs.)	อุณหภูมิ (°C)		กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า W <sub>2</sub> (W)
	T <sub>gas</sub>	T <sub>amb</sub>	
1	29.5	26.0	145.78
2	30.0	26.0	145.78
3	32.5	26.0	145.78
4	33.5	26.0	145.78
5	34.0	26.0	145.78
6	34.5	26.0	145.78
7	35.0	26.0	145.78
8	35.0	26.0	145.78
9	35.0	26.0	145.78
10	35.0	26.0	145.78
11	25.0	26.0	145.78
12	35.0	26.0	145.78
13	35.0	26.0	145.78
14	35.0	26.0	145.78
15	35.0	26.0	145.78
16	35.0	26.0	145.78

รูปที่ 5.8 การหาค่าความต้านทานกระแสตรงของขดลวดแรงสูงที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้า



ศูนย์วิทยพัชการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.9 การหาค่าความต้านทานกระแสตรงของหลอดความถี่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้า





5.8 การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน

(Partial Discharges = PD)

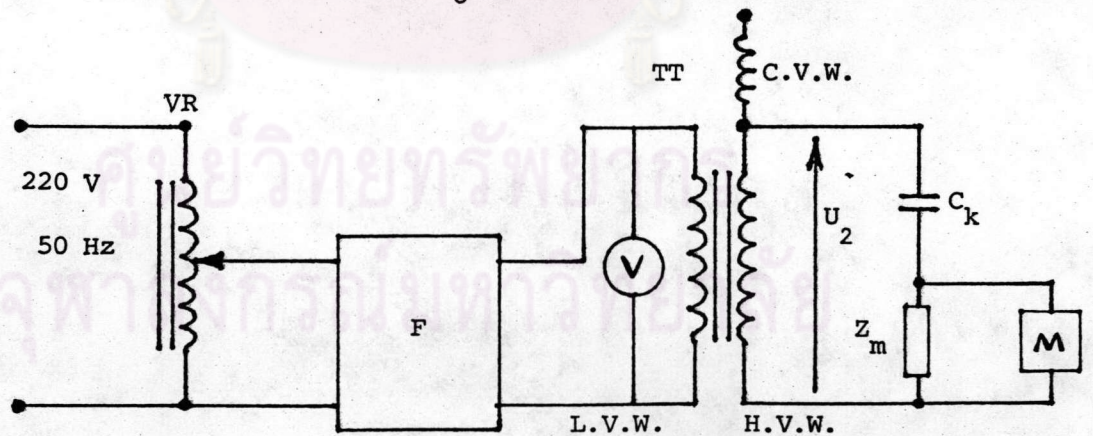
การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน ทดสอบตามมาตรฐาน IEC Publ. No.270 [30]

PD เป็นแฟกเตอร์สำคัญที่บ่งบอกคุณภาพของอุปกรณ์การเกิดดิสชาร์จบางส่วน ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการฉนวน ทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงหรือนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด วงจรที่ใช้วัด PD แสดงในรูปที่ 5.10 โดยทดสอบหลังจากการทดสอบความคงทนของไดอิเล็กตริกแล้ว

ผลการทดสอบได้ผลดังนี้

แรงดัน $U_2$ (kV)	PD (pC)
80	1.96
100	15.67

หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นฉนวน โดยปกติแล้วยอมให้มีค่า PD ≤ 20 pC [25]



VR = ตัวปรับแรงดันเบื้องต้น

V = A.C. โวลต์มิเตอร์

TT = หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้าง

F = ตัวกรองความถี่ผ่านต่ำ

C<sub>k</sub> = คัปปลิงคะแปซิเตอร์ 1000 pF, 120 kV

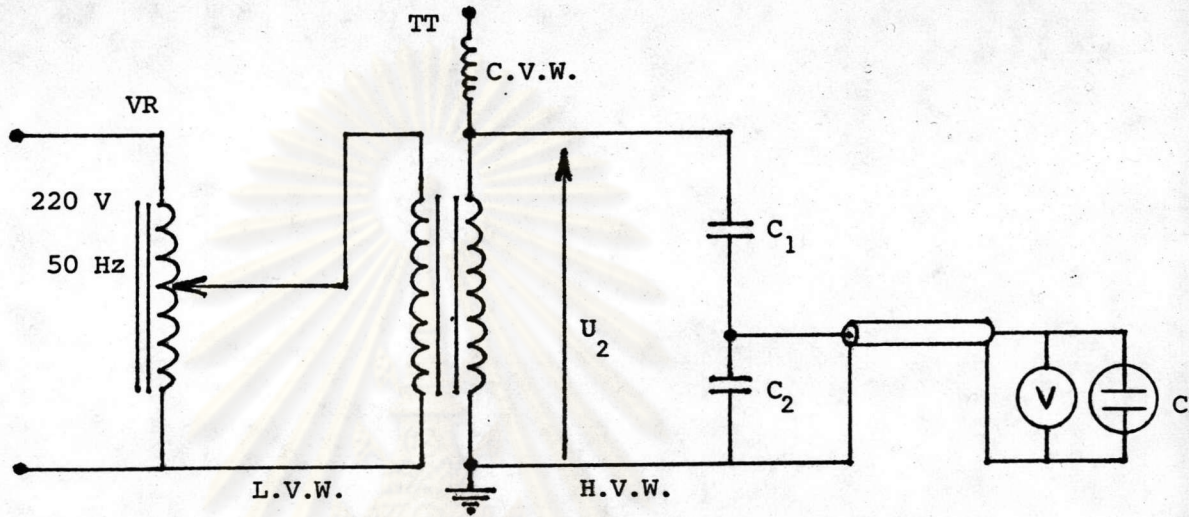
Z<sub>m</sub> = อิมพีแดนซ์วัด

M = เครื่องมือวัด PD

รูปที่ 5.10 วงจรการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน (PD)

5.9 การตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน

ลักษณะสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของหม้อแปลงทดสอบ คือ การสร้างแรงดันทดสอบที่มีรูปคลื่นแรงดันใกล้เคียงกับคลื่นรูปไซน์ที่แรงดันกำหนด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันของหม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้าง วงจรการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน ดังในรูปที่ 5.11



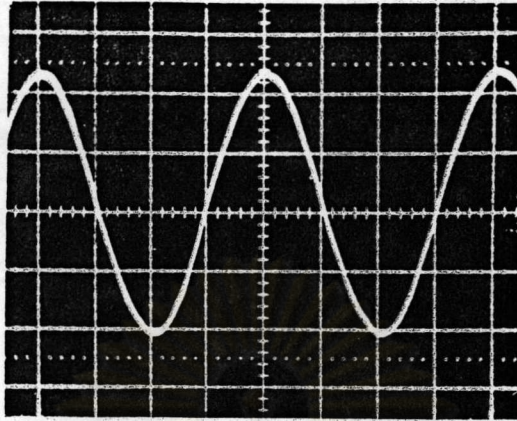
- VR = ตัวปรับแรงดันเบื้องต้น
- TT = หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้าง
- CRO = ออสซิลโลสโคปพร้อมกล้องถ่ายภาพลารอยด์
- $C_1 / C_2$  = โวลเตจดิวิเคอร์แบบแคปาซิเตอร์ 1/1000 V

รูปที่ 5.11 วงจรการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดัน

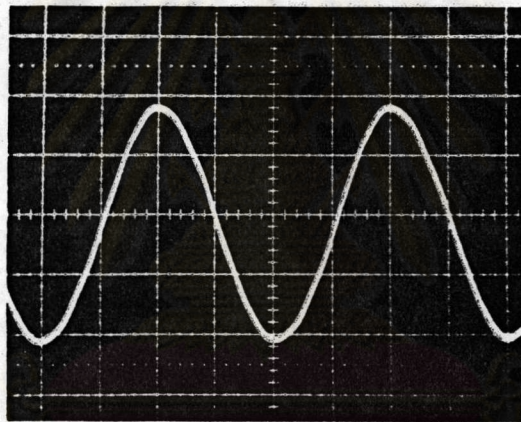
วิธีตรวจสอบ โดยการเพิ่มแรงดัน  $U_2$  จนแรงดัน  $U_2$  เท่ากับ 20 kV, 60 kV, 100 kV ตามลำดับ แต่ละค่าแรงดัน  $U_2$  ถ่ายรูปคลื่นแรงดันไว้ด้วยกล้องลารอยด์

ผลการทดสอบ

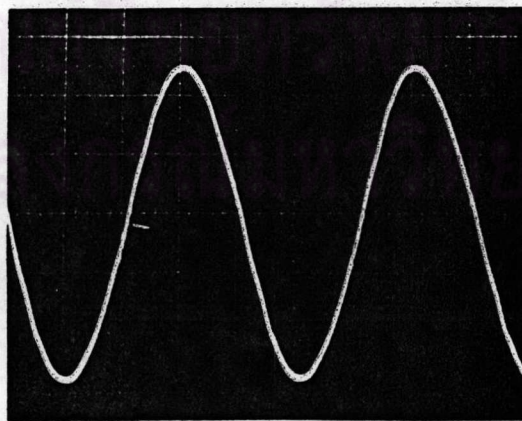
ปรากฏว่าลักษณะรูปคลื่นแรงดัน  $U_2$  ของขดลวดแรงสูงที่แรงดัน 20, 60, 100 kV จะมีลักษณะใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับคลื่นรูปไซน์ ดังในรูปที่ 5.12



ก)  $U_2 = 20 \text{ kV}$ .



ข)  $U_2 = 60 \text{ kV}$



ค)  $U_2 = 100 \text{ kV}$

รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายรูปคลื่นแรงดันของขดลวดแรงสูง

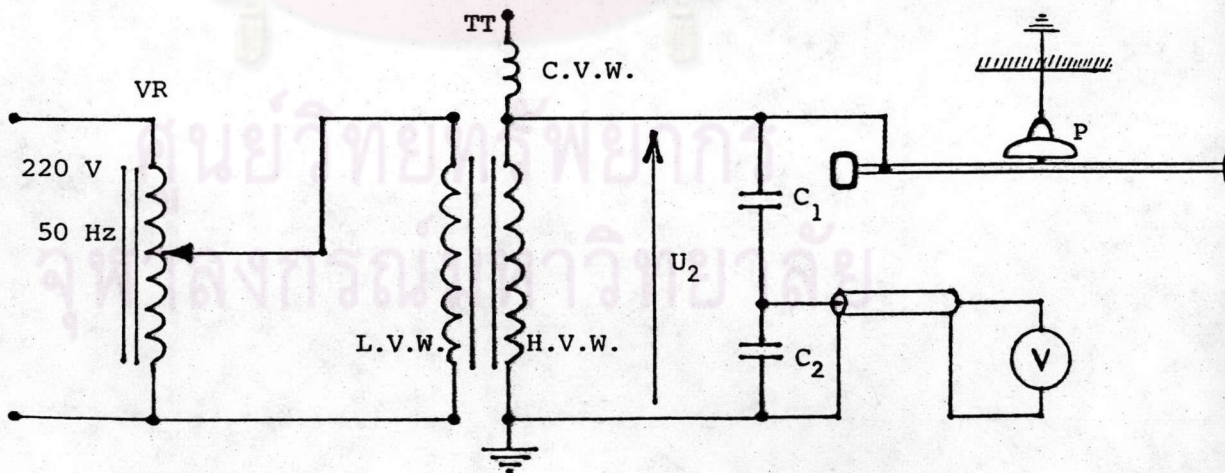
5.10 การใช้งาน

เนื่องจากรายการทดสอบที่แล้มาทั้งหมด เป็นการทดสอบลักษณะสมบัติบางประการของ หม้อแปลงทดสอบ ซึ่งยังขาดการทดลองใช้งานจริง เพราะว่าเวลาใช้งานจริงหม้อแปลงทดสอบมี โอกาสที่จะได้รับแรงดันขุมตัวที่มีอัตราการขุมตัวสูง อันเกิดจากการวาวไฟตามผิว เกิดเบรกคาวน หรือ เจาะผ่าทะลุวัสดุทดสอบ รวมทั้งจากแรงดันอิมพัลส์หรือแรงดันเกินที่มีความชันช่วงหน้าคลื่นสูง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีทดสอบแรงดันผสมระหว่างแรงดันกระแสสลับซ้อนด้วยแรงดันอิมพัลส์ ซึ่ง แรงดันแบ่งกระจายของขดลวดจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน  $\sqrt{\frac{C_g}{C_s}}$  ดังได้กล่าวแล้วในข้อ 2.5.1 จึงจำเป็นต้องทดลองใช้งานจริง ซึ่งประกอบด้วย

- ทดลองใช้ทดสอบวาวไฟตามผิวแห้งบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า
- ทดลองใช้ทดสอบวาวไฟตามผิวเปียกบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

5.10.1 ทดลองใช้ทดสอบวาวไฟตามผิวแห้งบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.354-2523 ทดลองใช้ทดสอบ ทาค่าแรงดันวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำของลูกถ้วยแขวนแบบ ข. (แบบ 52-2) ซึ่งมีค่าที่กักแรงดัน วาวไฟตามผิวแห้งเท่ากับ 65 kV วงจรการทดสอบ ดังในรูปที่ 5.13



- |                                |   |  |    |   |                             |
|--------------------------------|---|--|----|---|-----------------------------|
| VR                             | = | ตัวปรับแรงดันป้อนเข้า                    | TT | = | หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้าง |
| P                              | = | ลูกถ้วยแขวนแบบ ข. (วัสดุทดสอบ)           | V  | = | A.C. โวลต์มิเตอร์           |
| C <sub>1</sub> /C <sub>2</sub> | = | โวลต์เตจดีไวเซอร์แบบคะแปซิเตอร์ 1/2000 V |    |   |                             |

รูปที่ 5.13 วงจรการทดลองใช้หม้อแปลงที่ประกอบสร้าง ทดสอบวาวไฟตามผิวบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

หลังจากการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ค่าเป็นจำนวน 50 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ยแรงดันวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ค่าที่สภาวะห้องเท่ากับ 75 kV โดยที่หม้อแปลงทดสอบ ยังคงใช้งานได้ตามปกติ หลังจากการทดสอบหาค่าแรงดันวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ค่าแล้ว แสดงว่าการฉนวนของหม้อแปลงที่ประกอบสร้างต่อแรงดันที่มีอัตราการยุบตัวสูงคือพอ

#### 5.10.2 ทดลองใช้ทดสอบวาวไฟตามผิวเปียกบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.354-2523 ทดลองใช้ทดสอบหาค่าแรงดันวาวไฟตามผิวเปียกความถี่ค่าของลูกถ้วยแขวนแบบ ข. (แบบ 52-2) ซึ่งมีค่าพิกัดแรงดันวาวไฟตามผิวเปียกเท่ากับ 35 kV วงจรการทดสอบ ดังในรูปที่ 5.13

หลังจากการทดสอบวาวไฟตามผิวเปียกบนลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าเป็นจำนวน 50 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ยแรงดันวาวไฟตามผิวเปียกที่สภาวะห้องเท่ากับ 45 kV โดยที่หม้อแปลงทดสอบที่ประกอบสร้างยังคงใช้งานได้ตามปกติ แสดงว่าหม้อแปลงที่ประกอบสร้างนี้สามารถใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในสภาพเปียกได้ ซึ่งใช้กระแสทดสอบสูงและมีโอกาสได้รับแรงดันยุบตัวที่มีอัตราการยุบตัวสูงพร้อมกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย