

บทที่ 5

การทดสอบหม้อแปลง

การทดสอบหม้อแปลงเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติการฉนวน ที่ต้องทนต่อสภาพแรงดันใช้งานและแรงดันเกิน คุณลักษณะการใช้งาน ตรวจสอบการระบายความร้อนและค่าต่างๆ ที่ได้ ออกแบบไว้เพื่อเทียบกับมาตรฐาน รวมไปถึงการตรวจสอบคุณภาพในขั้นตอนการประกอบหม้อแปลงด้วย

หม้อแปลงที่ออกแบบนี้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย ฉะนั้นการทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน IEC ซึ่งมีรายการและลำดับการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) การวัดค่าความต้านทานของขดลวด
- 2) การวัดอัตราส่วนของแรงดันและการตรวจสอบสัญลักษณ์ของกลุ่มเวกเตอร์
- 3) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด
- 4) การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด
- 5) การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์และเรกูลেশัน
- 6) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน
- 7) การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม
- 8) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ (BIL)

ก่อนทำการทดสอบจะทำการตรวจสอบสภาพการฉนวนของหม้อแปลงด้วยเมกเกอร์ ที่แรงดัน 5000 โวลต์โดยวัดค่าฉนวนระหว่างจุดต่างๆ ได้ผลดังนี้

ระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ	50000 M Ω
ระหว่างขดลวดแรงสูงกับตัวถังหม้อแปลง	30000 M Ω
ระหว่างขดลวดแรงต่ำกับตัวถังหม้อแปลง	20000 M Ω

5.1 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด วัดด้วยบริดจ์ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง และใช้พิจารณาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดในการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง การวัดค่าความต้านทานจะต้องระบุอุณหภูมิของขดลวด

ขณะวัด ถ้าอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบหม้อแปลงมีค่าคงที่เป็นเวลานาน ประมาณได้ว่า อุณหภูมิของขดลวดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซภายในหม้อแปลง

ค่าความต้านทานที่วัดได้จะแปลงไปเป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง 75°C [15] คือ

$$\text{ความต้านทานที่ } 75^{\circ}\text{C} = \frac{\text{ความต้านทานที่วัดได้} \times (235 + 75)}{235 + \text{อุณหภูมิของขดลวดขณะทำการวัด}}$$

ในการวัดค่าความต้านทานจะวัดที่ขั้ว A, B และ C ของขดลวดแรงสูงที่ภายในต่อเป็น Δ ดังนั้นถ้าวัดความต้านทานที่ขั้ว A และ B ค่าความต้านทานต่อเฟสจะเท่ากับ $\frac{3}{2}$ ของค่าที่วัดได้ ส่วนขดลวดแรงต่ำซึ่งภายในต่อแบบ Y เมื่อวัดวัดระหว่างขั้ว a และ b ค่าความต้านทานต่อเฟสจะเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของค่าที่วัดได้ รายละเอียดรูปการต่อขดลวดภายในแสดงในรูปที่ 4.10 ผลการวัดค่าความต้านทานแสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ค่าความต้านทานของขดลวด

อุณหภูมิ ของขดลวด ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิ	ขดลวดแรงสูง (Ω)		ขดลวดแรงต่ำ (Ω)	
		12 kV	24 kV		416/240 V
29.3	A-B	0.47964	1.90764	a-b	0.0006266
	B-C	0.47964	1.91297	b-c	0.0006266
	C-A	0.47897	1.91297	c-a	0.0006266
	เฉลี่ย	0.47942	1.91119	เฉลี่ย	0.0006266
75.0	A-B	0.56257	2.23749	a-b	0.0007349
	B-C	0.56257	2.24374	b-c	0.0007349
	C-A	0.56179	2.24374	c-a	0.0007349
	เฉลี่ย	0.56231	2.24166	เฉลี่ย	0.0007349

5.2 การวัดอัตราส่วนของแรงดัน

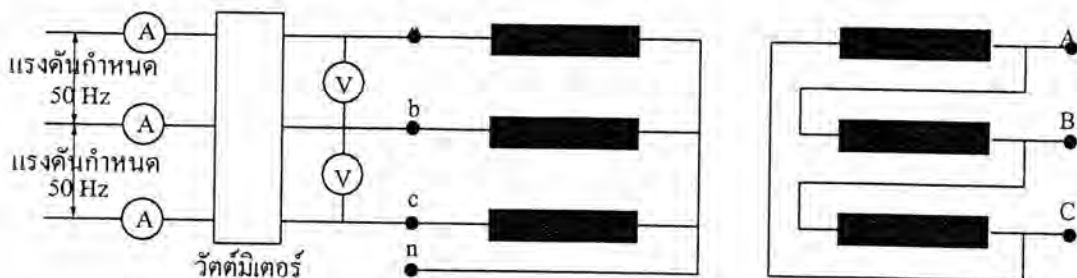
การวัดอัตราส่วนแรงดันวัดด้วย ratio meter ซึ่งเป็นอัตราส่วนของขดลวดในเฟสเดียวกัน เช่น ถ้าวัดระหว่างขั้ว A-B ขดลวดในเฟสเดียวกันที่จะวัดอัตราส่วนคือ b-n เป็นต้น และต้องเลือกกลุ่มเวกเตอร์ให้ถูกต้องก่อนการวัดด้วย ผลการทดสอบอัตราส่วนแรงดันได้ตามตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 อัตราส่วนแรงดัน

จุดแยกที่	อัตราส่วนแรงดัน					
	ระบบ 12 kV			ระบบ 24 kV		
	A-B : b-n	B-C : c-n	C-A : a-n	A-B : b-n	B-C : c-n	C-A : a-n
1	49.99	50.00	50.00	100.00	100.02	100.02
2	48.78	48.78	48.78	97.59	97.59	97.59
3	47.57	47.50	47.57	95.16	95.15	95.16
4	46.36	46.36	46.36	92.73	92.72	92.72
5	45.14	45.14	45.14	90.29	90.29	90.30

5.3 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลดต้องวัดที่แรงดันและความถี่ที่กำหนด โดยการป้อนแรงดันกระแสสลับเข้าทางด้านขดลวดแรงต่ำ ค่าที่อ่านได้จากวัดคัมมิเตอร์ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด และค่ากระแสที่ได้ คือ กระแสขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลง วงจรทดสอบแสดงในรูปที่ 5.2



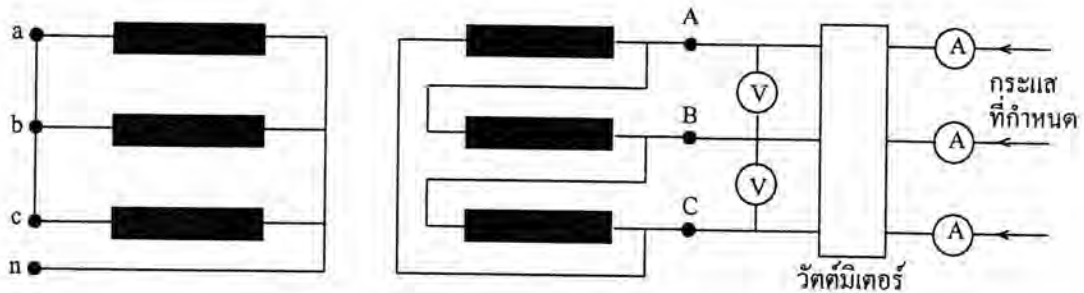
รูปที่ 5.1 วงจรวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและกระแสขณะไม่มีโหลด

ผลการทดสอบคือ

แรงดันที่ป้อน	416	V
กระแสขณะไม่มีโหลด	15.42	A
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย	2420	W

5.4 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดคือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียให้กับหม้อแปลงขณะทำการจ่ายกระแสที่กำหนด หาได้โดยการทำการลัดวงจรด้านขดลวดแรงต่ำและป้อนกระแสที่กำหนดเข้าทางด้านขดลวดแรงสูงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและวงจรทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์ ประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด และกำลังสูญเสียเพิ่ม (กำลังสูญเสียสเตรย์กับกำลังสูญเสียกระแสไหลวน) การแปลงค่ากำลังสูญเสียเพิ่มจากอุณหภูมิที่ทำการวัด ไปยังอุณหภูมิอ้างอิง 75°C [15] คือ

$$\text{กำลังสูญเสียเพิ่มที่ } 75^{\circ}\text{C} = \frac{\text{กำลังสูญเสียเพิ่มที่วัดได้} \times (235 + \text{อุณหภูมิขณะทำการวัด})}{235 + 75}$$

ค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้องจะต้องแปลงไปเป็นค่าที่อุณหภูมิ 75°C ตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่อุณหภูมิ 75°C คือ กำลังสูญเสียในขดลวดที่อุณหภูมิ 75°C รวมกับกำลังสูญเสียเพิ่มที่อุณหภูมิ 75°C ผลการวัดค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดแสดงดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด

ระบบแรงดัน (kV)	12	24
แรงดันที่ป้อน (V)	750	1524
กระแสที่ป้อน (A)	76.98	38.49
<u>ที่อุณหภูมิ 29.3°C</u>		
กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (W)	15750	17000
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	8896	8882
กำลังสูญเสียเพิ่ม (W)	6854	8118
<u>ที่อุณหภูมิ 75.0°C</u>		
กำลังสูญเสียในขดลวด (W)	10434	10417
กำลังสูญเสียเพิ่ม (W)	5844	6921
กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (W)	16278	17338

เมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดของหม้อแปลง สามารถคำนวณประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1 ตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ = 1 ที่อุณหภูมิ 75°C

ระบบแรงดัน (kV)	12	24
กำลังสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	2420	2420
กำลังสูญเสียขณะมีโหลด (W)	16278	17338
กำลังสูญเสียรวม (W)	18698	19758
ประสิทธิภาพ (%)	98.84	98.78

5.5 การวัดค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์และเรกูลชัน

การวัดค่าแรงดันอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ทำได้โดยใช้วิธีวัดวงจรขดลวดทางด้านแรงต่ำ และป้อนกระแสที่กำหนดเข้าทางขดลวดด้านแรงสูงดังรูปที่ 5.3 และขณะป้อนกระแสกระทั้งมีค่าเท่ากับกระแสที่กำหนด แรงดันที่วัดได้ในขณะนั้นคือแรงดันอิมพีแดนซ์ ซึ่งค่าแรงดันนี้และค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลด จะนำไปคำนวณเป็นค่า per-unit impedance Z_{eq} และ R_{eq} ตามลำดับ และนำไปหาค่า per-unit reactance X_{eq} อีกด้วยดังสมการ (5.1)

$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (5.1a)$$

$$R_{eq} = \frac{P_t}{S_b} \quad (5.1b)$$

$$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq})^2 - (R_{eq})^2} \quad (5.1c)$$

เมื่อได้ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์แล้วนำค่าที่ได้ ไปคำนวณหาค่าแรงกระตุ้นตามสมการ (2.14) จากค่าตามตารางที่ 5-3 ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์และแรงกระตุ้นจะได้ตามตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์และแรงกระตุ้นที่อุณหภูมิ 75°C

ระบบแรงดัน (kV)	12	24
Z_{eq} (%)	6.25	6.35
R_{eq} (%)	1.02	1.08
X_{eq} (%)	6.17	6.26
VR ,pf = 1.0 (%)	1.21	1.27
VR ,pf = 0.8 (%)	4.61	4.71

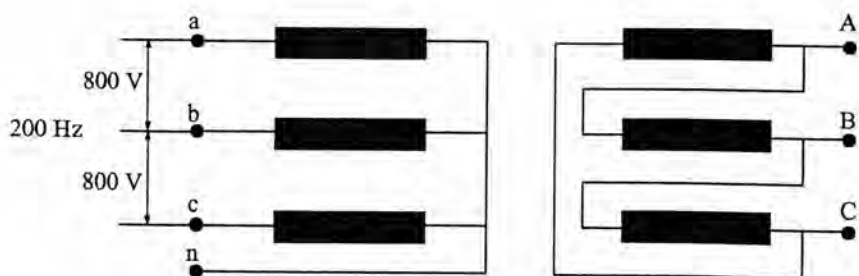
5.6 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกิน

การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเกินจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำโดยการป้อนแรงดันเข้าทางด้านแรงต่ำ จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านแรงสูง เป็นการสร้างแรงดันสูงด้วยตัวหม้อแปลงเอง
- 2) การทดสอบความคงทนด้วยแรงดัน AC จากแหล่งจ่ายอื่น โดยอาศัยแรงดันทดสอบจากหม้อแปลงตัวอื่น

5.6.1 การทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ (Induce voltage test)

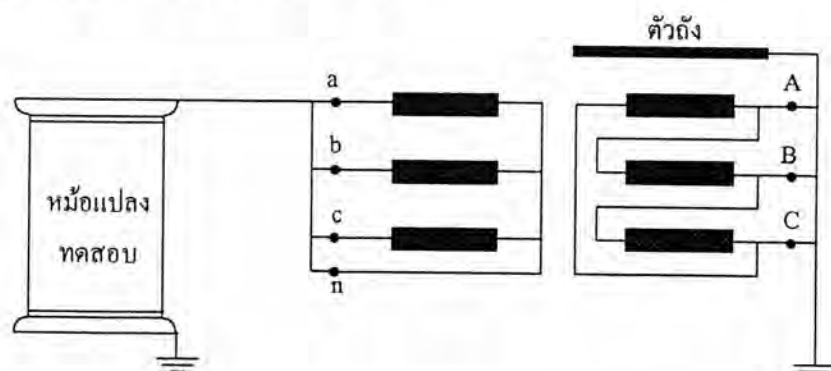
เป็นการทดสอบฉนวนระหว่างรอบของขดลวดภายในเฟส โดยการป้อนแรงดันเกินกำหนด 2 เท่าเข้าที่ขดลวดแรงต่ำที่ความถี่ 200 Hz (การใช้ความถี่สูง ก็เพื่อหลีกเลี่ยงการอิ่มตัวของแกนเหล็ก) ดังรูปที่ 5.4



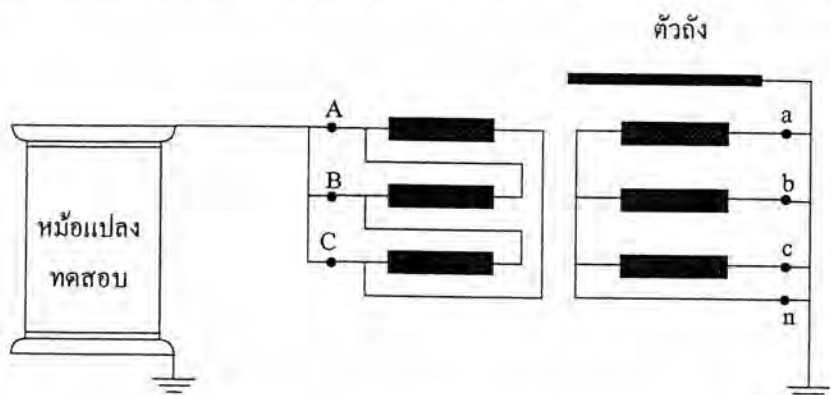
รูปที่ 5.3 วงจรทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ

5.6.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับ (AC withstand test)

เป็นการทดสอบฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับแรงต่ำ และขดลวดแรงสูงกับตัวถัง โดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.5 แรงดันทดสอบจากหม้อแปลงทดสอบเป็นแรงดันกระแสสลับเฟสเดียวความถี่ 50 Hz ระยะเวลาทดสอบ 1 นาที



รูปที่ 5.4 วงจรทดสอบความคงทนด้านแรงต่ำด้วยแรงดัน 10 kV เป็นเวลา 1 นาที



รูปที่ 5.5 วงจรทดสอบความคงทนด้านแรงสูงด้วยแรงดัน 28 kV สำหรับระบบ 12 kV และแรงดัน 50 kV สำหรับระบบ 24 kV เป็นเวลา 1 นาที

5.7 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม

การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงที่ออกแบบนี้ จะทำการทดสอบที่ระบบแรงดัน 24 kV เพียงระบบเดียว เพราะค่ากำลังสูญเสียรวมที่ระบบแรงดัน 24 kV มีค่ามากกว่าที่ระบบแรงดัน 12 kV ซึ่งการทดสอบจะต้องวงจรเช่นเดียวกับการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดคั่งรูปที่ 5.3 โดยลัดวงจรทางด้านขดลวดแรงต่ำและป้อนแรงดัน 50 Hz เข้าทางด้านขดลวดแรงสูงจนได้ค่ากำลังสูญเสียเท่ากับค่ากำลังสูญเสียรวมที่ 75°C จากนั้นบันทึกค่าอุณหภูมิเพิ่มของก๊าซส่วนบนทุกๆ ชั่วโมง จนอุณหภูมิที่วัดได้แตกต่างกันไม่เกิน 1°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เมื่ออุณหภูมิของก๊าซคงที่ถึงจุดสูงสุดแล้ว ให้ทำการลดค่ากระแสที่ป้อนลงถึงค่ากระแสกำหนดของหม้อแปลง คงค่านีไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นตัดกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดแรงสูงทันที แล้ววัดค่าความต้านทานขดลวดด้านแรงสูง R_H และด้านแรงต่ำ R_L เทียบกับเวลา นำค่าความต้านทานที่ได้มาเขียนกราฟเทียบกับเวลาเพื่อหาค่าความต้านทาน R_H และ R_L ณ จุดตัดกระแสที่ใช้ป้อนให้กับขดลวดแรงสูงออก ได้ค่าเป็น R_{H1} และ R_{L1} นำไปคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่ม

ตารางที่ 5-6 ผลการวัดค่าความต้านทานเทียบกับเวลา

นาที่ที่	ความต้านทานด้านแรงสูง (Ω)	นาที่ที่	ความต้านทานด้านแรงต่ำ ($m\Omega$)
1.5	2.3796	1.75	0.800
2.0	2.376	2.25	0.799
2.5	2.375	2.75	0.799
3.0	2.373	3.25	0.798
3.5	2.371	3.75	0.798
4.0	2.369	4.25	0.797
4.5	2.367	4.75	0.797
5.0	2.366	5.25	0.796

อุณหภูมิของบรรยากาศขณะทดสอบ

30°C

ในการหาอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.2) ดังใน IEC 76-1

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235 \quad (5.2a)$$

$$\Delta\theta_w = \theta_2 - \theta_a \quad (5.2a)$$

เมื่อ θ_1, θ_2 : อุณหภูมิของขดลวด

R_1, R_2 : ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิ θ_1, θ_2 ตามลำดับ

θ_a : อุณหภูมิของบรรยากาศ

$\Delta\theta_w$: อุณหภูมิเพิ่มของขดลวด

จากค่าความต้านทานที่วัดได้ในตารางที่ 5-6 นำมาเขียนสมการ ซึ่งมีการลดลงของค่าความต้านทานเป็นเอ็กโปเนนเชียลเทียบกับเวลา (โดยใช้โปรแกรมจัดการด้านกราฟ) ได้ดังนี้

$$\text{ด้านแรงสูง} \quad R_H(t) = 2.38450e^{-0.00161t} \Omega \quad (5.3)$$

$$\text{ด้านแรงต่ำ} \quad R_L(t) = 0.80167e^{-0.00131t} m\Omega \quad (5.4)$$

ในสมการ (5.3) และ (5.4) เมื่อ t เท่ากับ 0 จะค่าความต้านทานขณะตัดกระแส

$$R_{H1} = 2.3845 \Omega \quad \text{และ} \quad R_{L1} = 0.80167 m\Omega$$

ดังนั้นจากสมการ (2.5) จะได้ค่าของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวด คือ

$$\text{ด้านแรงสูง} \quad \theta_2 = \frac{2.3845}{1.91119} (235 + 29.3) - 235 = 94.75^\circ C \quad \text{และ}$$

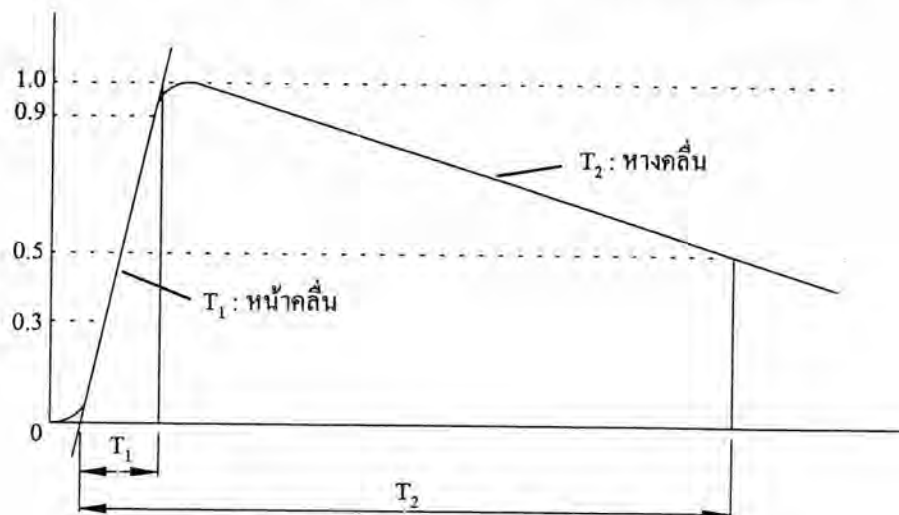
$$\Delta\theta_w = 94.75 - 30 = 64.75^\circ C$$

$$\text{ด้านแรงต่ำ} \quad \theta_2 = \frac{0.80167}{0.6266} (235 + 29.3) - 235 = 103.14^\circ C \quad \text{และ}$$

$$\Delta\theta_w = 103.14 - 30 = 73.14^\circ C$$

5.8 การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์

เป็นการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μ s ขั้วลบคลื่นเต็ม ซึ่งกำหนดตามมาตรฐานด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 และเวลาช่วงหางคลื่น T_2 ดังในรูปที่ 5.6

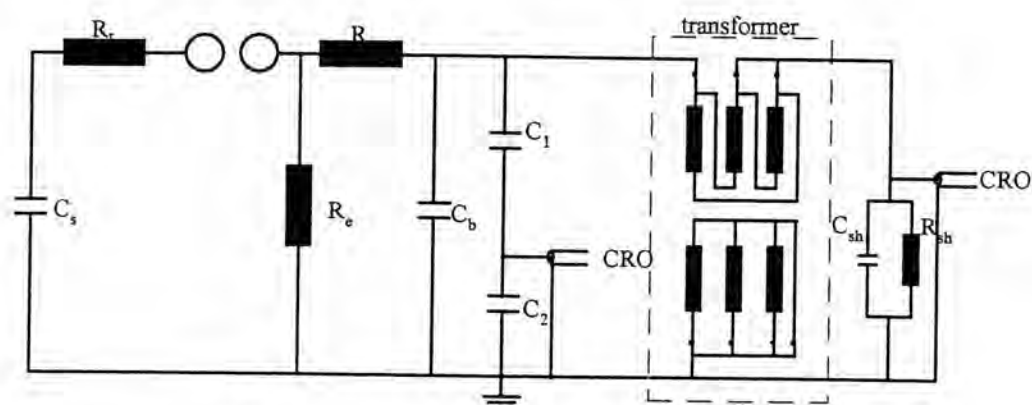


รูปที่ 5.6 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม

วงจรทดสอบประกอบด้วย เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 20 kJ และองค์ประกอบในการปรับรูปคลื่น ระบบการวัดแรงดันทดสอบและกระแสอิมพัลส์ที่ไหลผ่านขดลวด การต่อขั้วเพื่อทดสอบหม้อแปลงจะทำการป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าที่ขั้วแรงสูงที่ทะเลเฟส ส่วนเฟสที่เหลือจะทำการต่อผ่านความต้านทานลงกราวด์ เพื่อใช้วัดกระแสที่ไหลผ่านขดลวดดังในรูปที่ 5.7 โดยการทดสอบจะทำการทดสอบหม้อแปลงทั้ง 2 ระบบแรงดันตามมาตรฐาน IEC 76-3 คือ

ระบบ 12 kV ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ BIL 75 kV

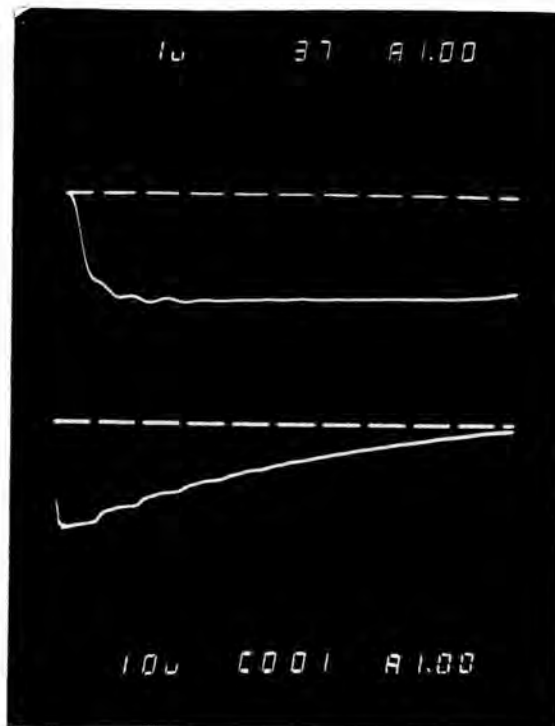
ระบบ 24 kV ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ BIL 125 kV



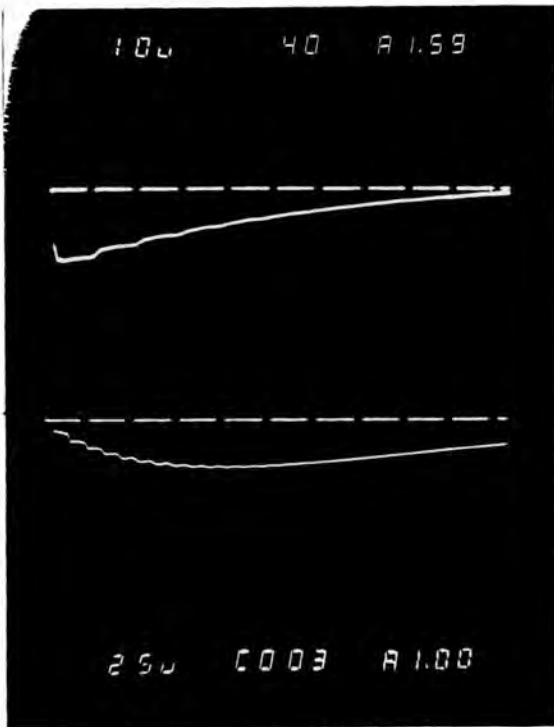
รูปที่ 5.7 วงจรทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์

- เมื่อ C_s : ความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 R_L : ความต้านทานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
 R_d, R_e : ความต้านทานปรับรูปคลื่น
 C_b : ความจุไฟฟ้าของโหลด
 C_1, C_2 : ความจุไฟฟ้าของโวลเตจดีไวเดอร์
 C_{sh}, R_{sh} : ความจุไฟฟ้าและความต้านทานของ shunt วัดกระแส

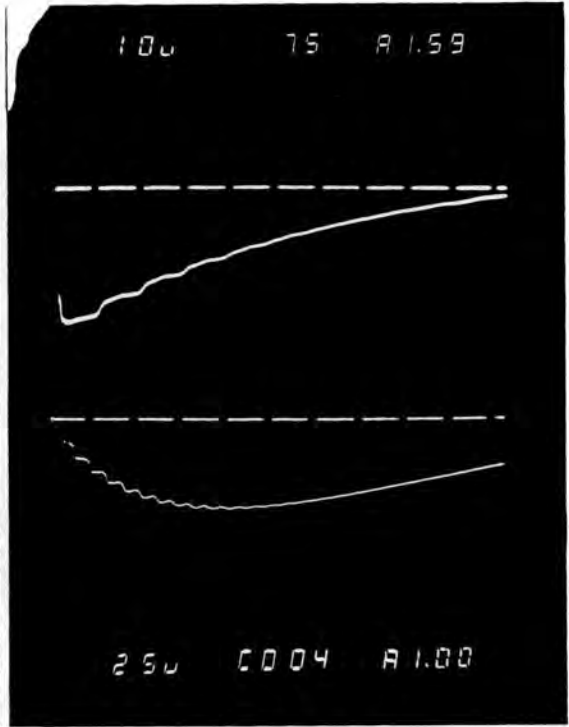
ผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ของระบบ 12 kV แสดงดังออสซิลोगแกรมรูปที่ 5.8 และระบบ 24 kV แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยในรูปคลื่นปรับเทียบ upper beam 1 $\mu\text{s}/\text{div}$ และ lower beam 10 $\mu\text{s}/\text{div}$ สำหรับรูปคลื่นในแต่ละเฟส upper beam คือ รูปคลื่นแรงดัน 10 $\mu\text{s}/\text{div}$ และ lower beam คือ รูปคลื่นกระแส 25 $\mu\text{s}/\text{div}$



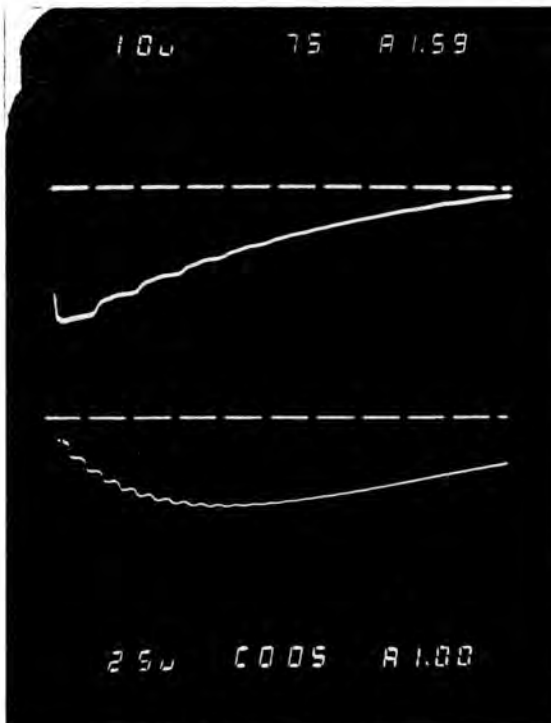
រូបភាព 5.8 កំរិត 60% Wave form calibration
តម្លៃ 12 kV



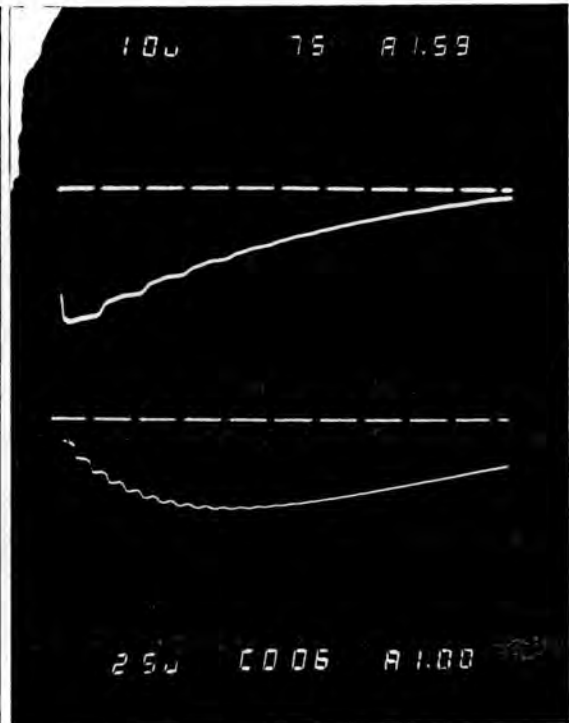
รูปที่ 5.8ข 60% RW เฟส A



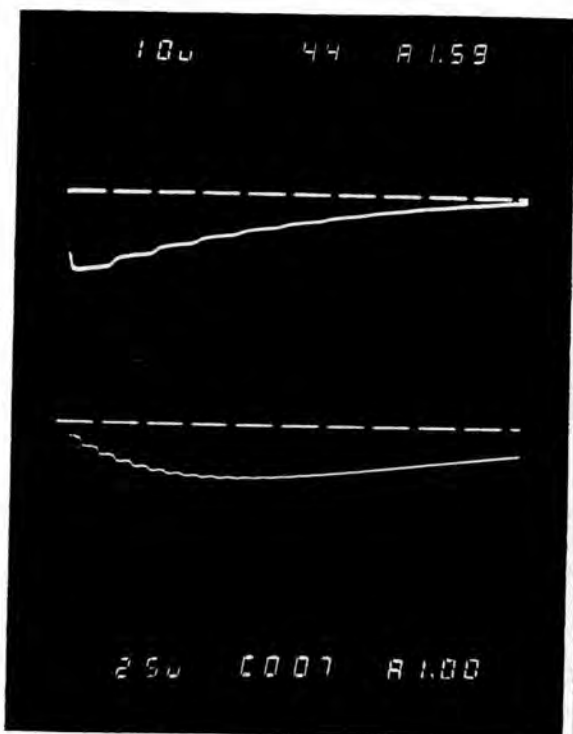
รูปที่ 5.8ค 100% FW เฟส A



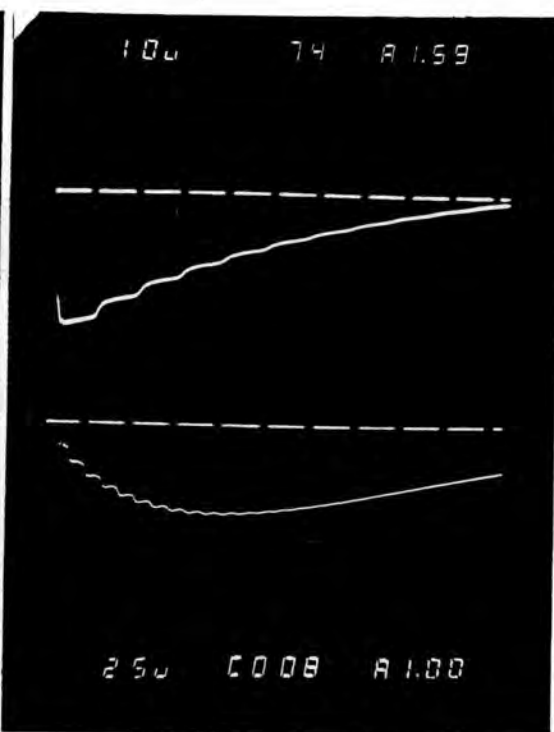
รูปที่ 5.8ง 100% FW เฟส A



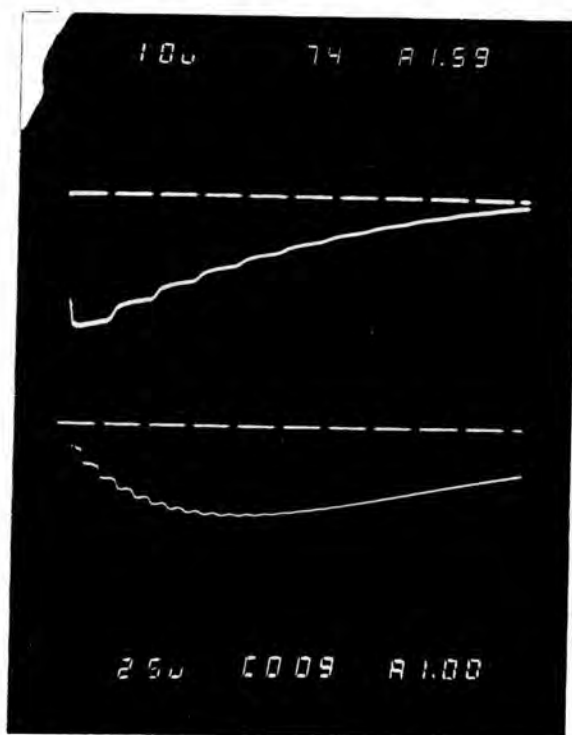
รูปที่ 5.8จ 100% FW เฟส A



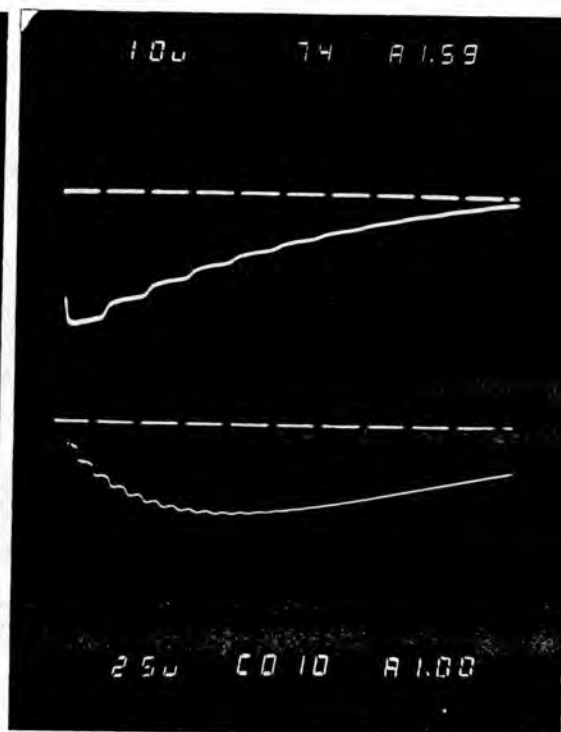
รูปที่ 5.8ค 60% RW เฟส B



รูปที่ 5.8ข 100% FW เฟส B

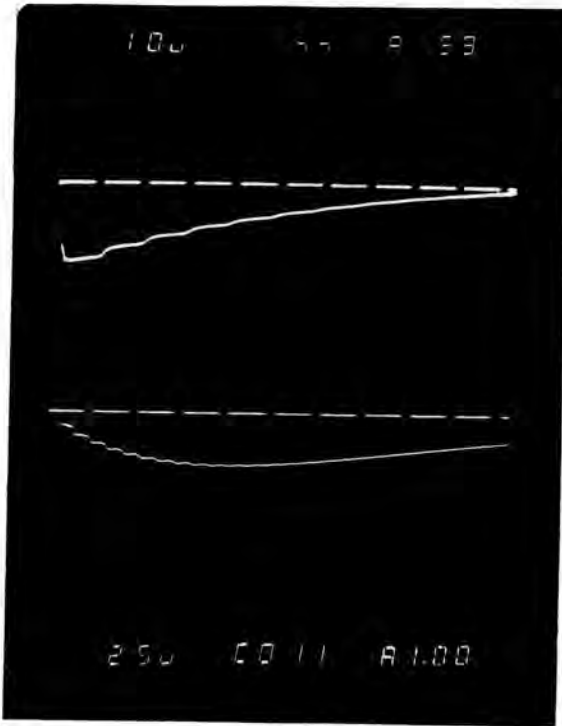


รูปที่ 5.8ง 100% FW เฟส B

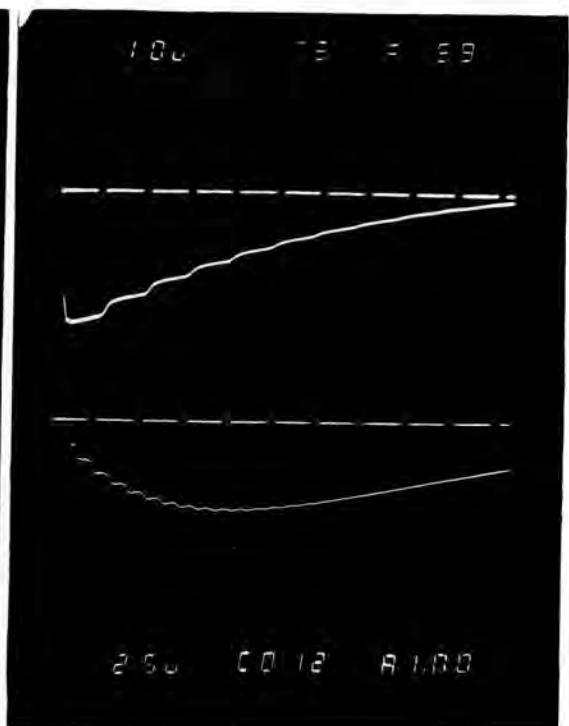


รูปที่ 5.8ฉ 100% FW เฟส B

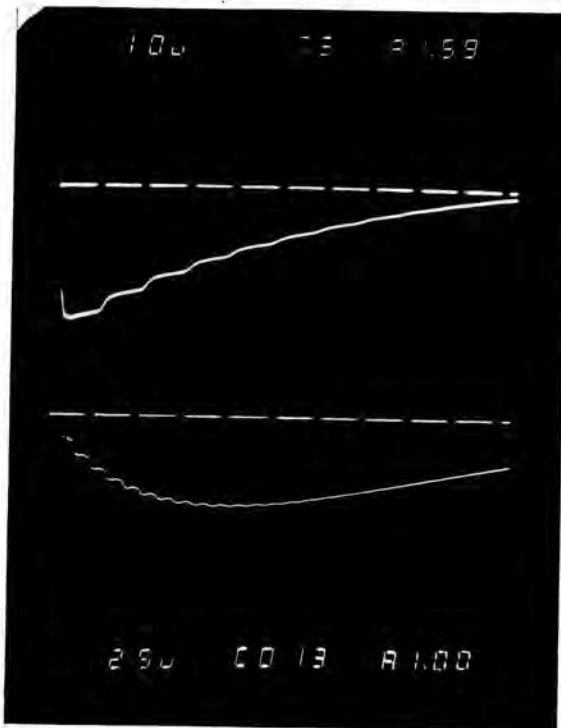
ระบบ 12 kV



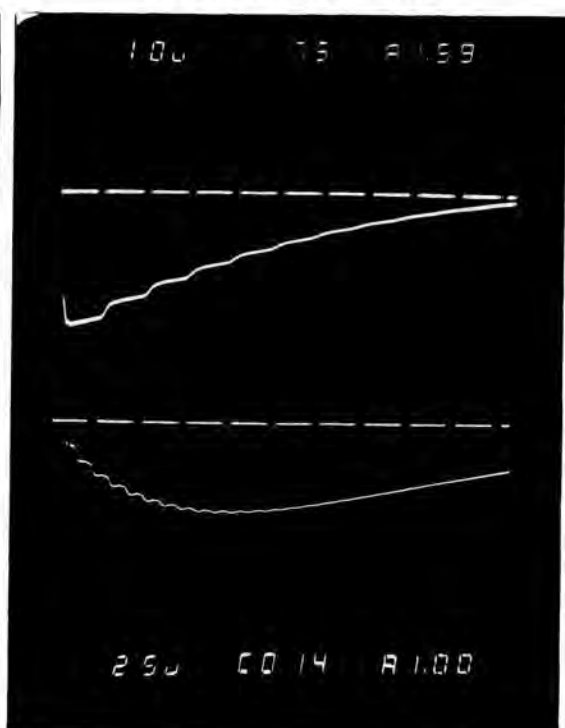
รูปที่ 5.8ก 60% RW เฟส C



รูปที่ 5.8ข 100% FW เฟส C

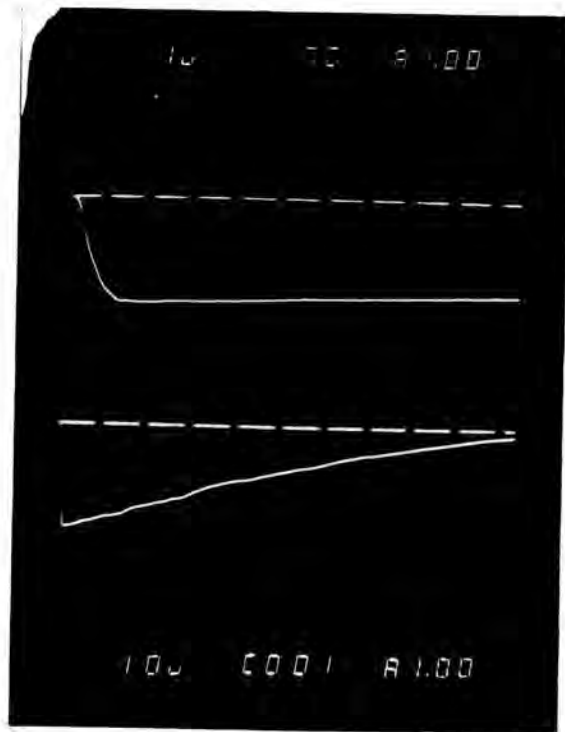


รูปที่ 5.8ค 100% FW เฟส C

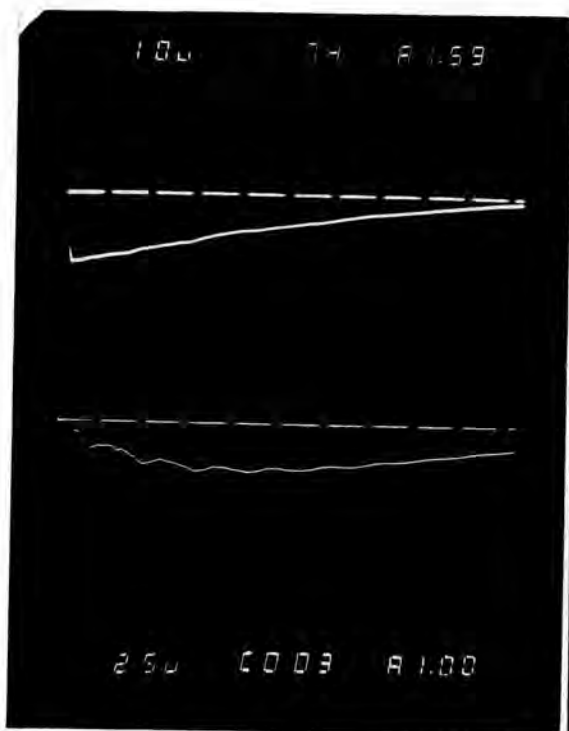


รูปที่ 5.8ง 100% FW เฟส C

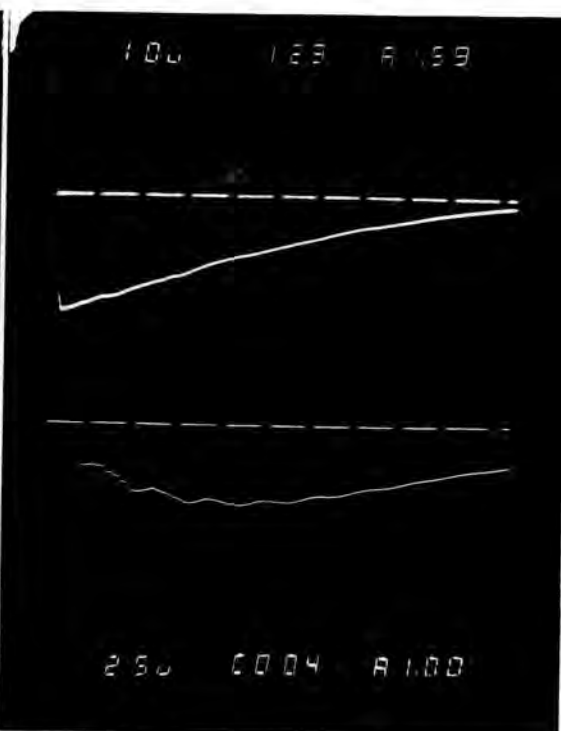
ระบบ 12 kV



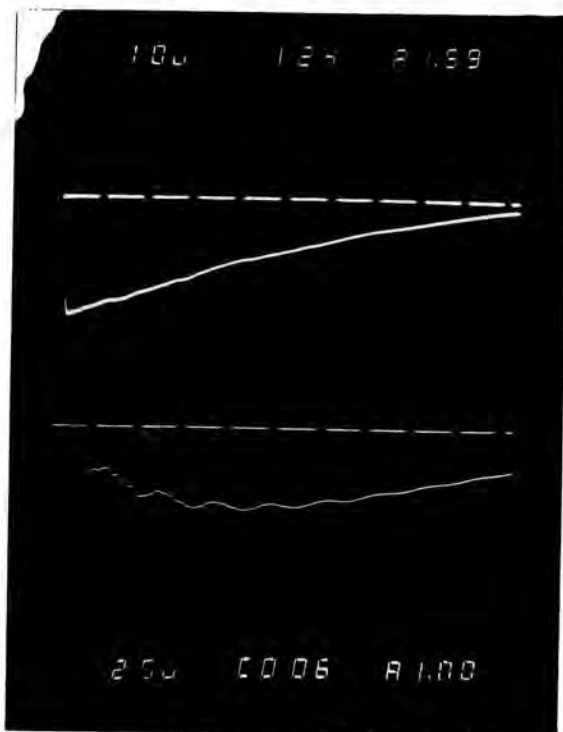
រូបទី 5.9ក 60% Wave form calibration
របប 24 kV



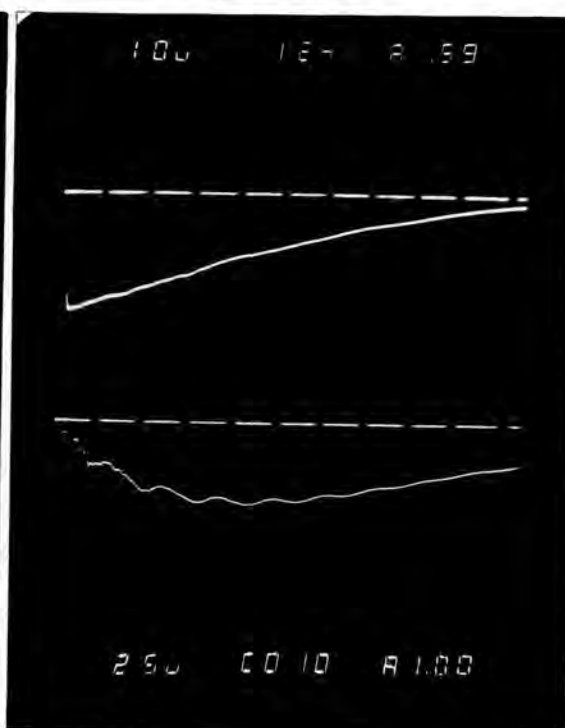
รูปที่ 5.9บ 60% RW เฟส C



รูปที่ 5.9ค 100% FW เฟส C

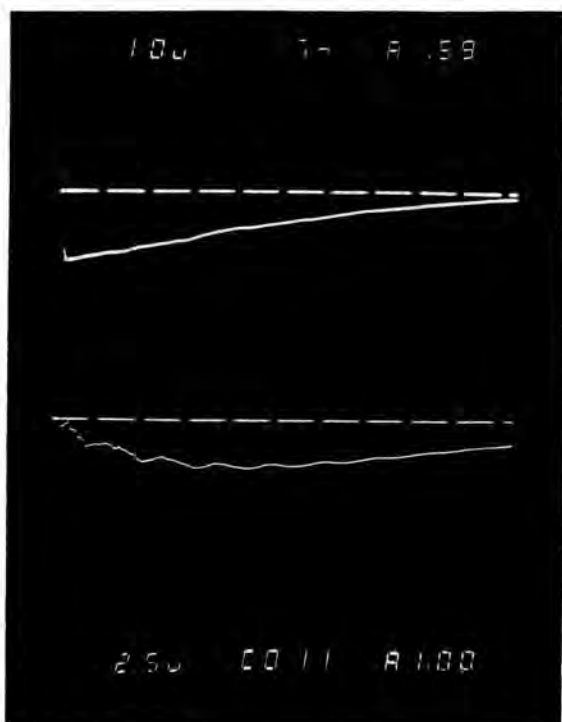


รูปที่ 5.9ง 100% FW เฟส C

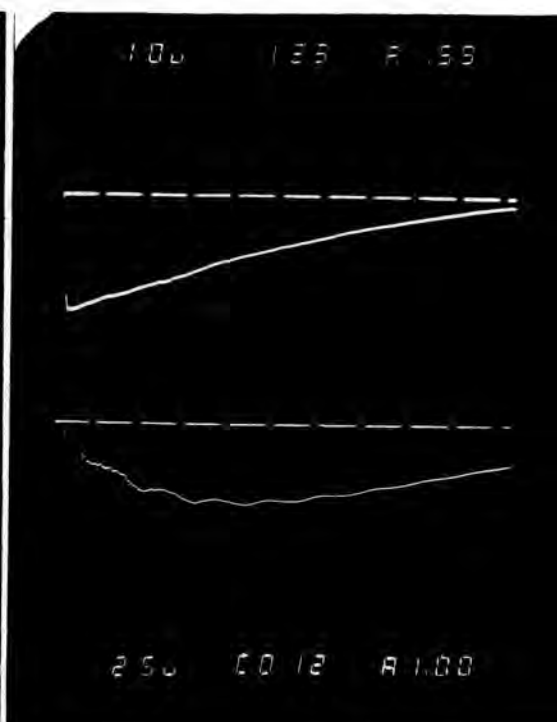


รูปที่ 5.9จ 100% FW เฟส C

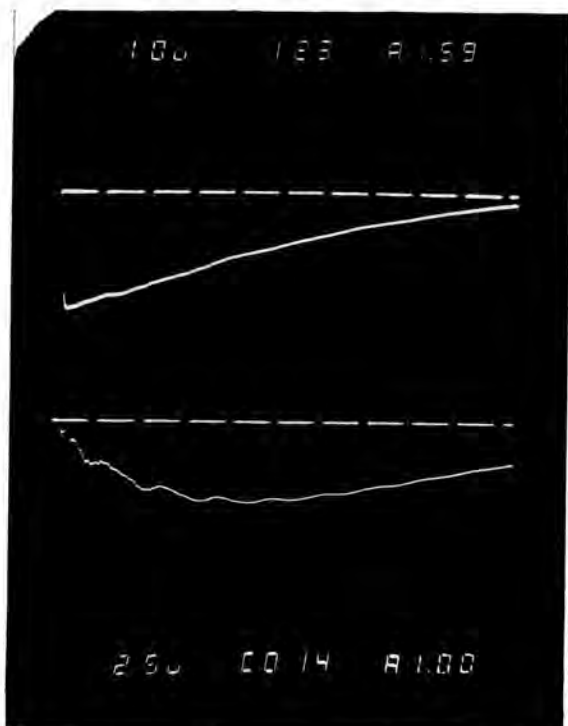
ระบบ 24 kV



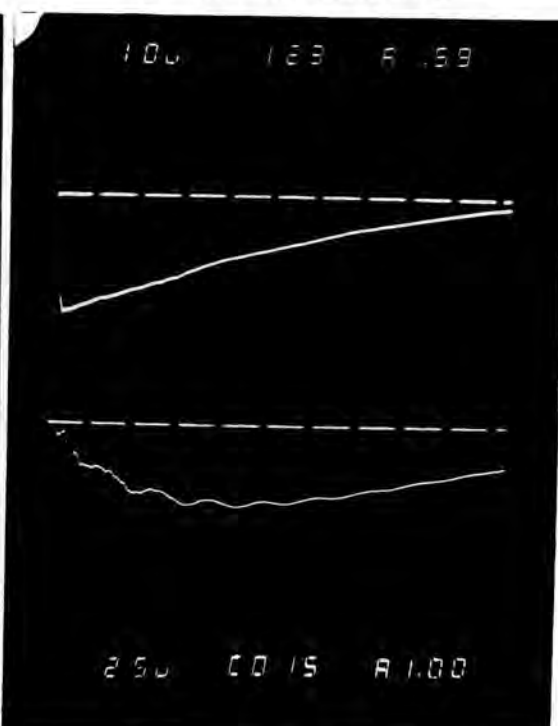
รูปที่ 5.9ค 60% RW เฟส B



รูปที่ 5.9ข 100% FW เฟส B

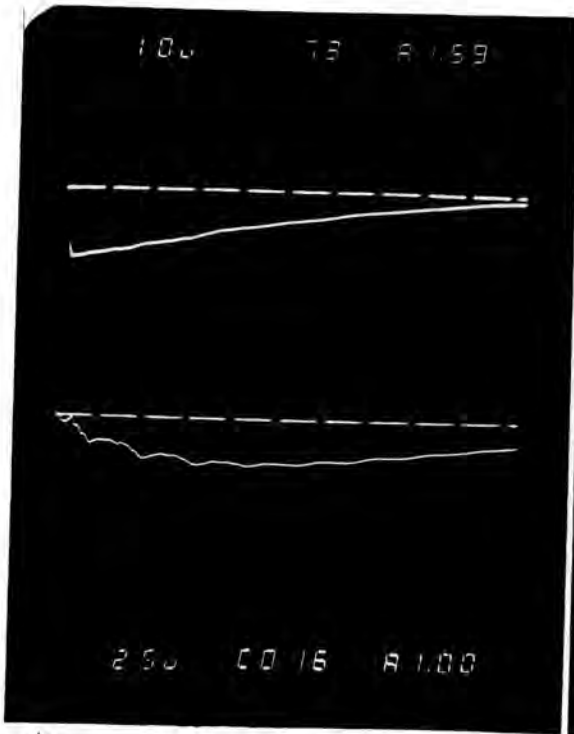


รูปที่ 5.9ง 100% FW เฟส B

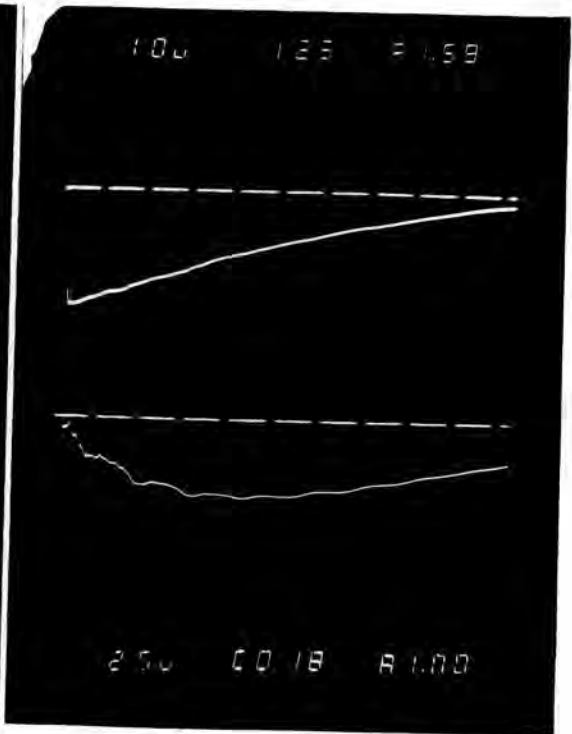


รูปที่ 5.9ฉ 100% FW เฟส B

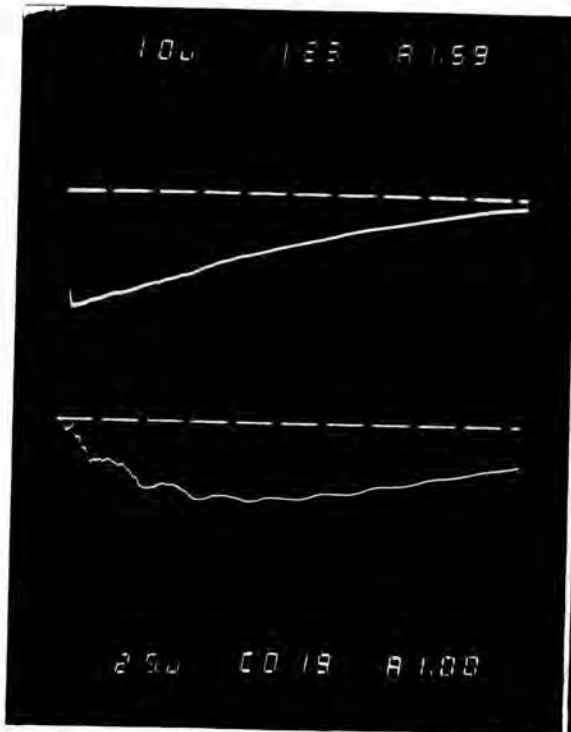
ระบบ 24 kV



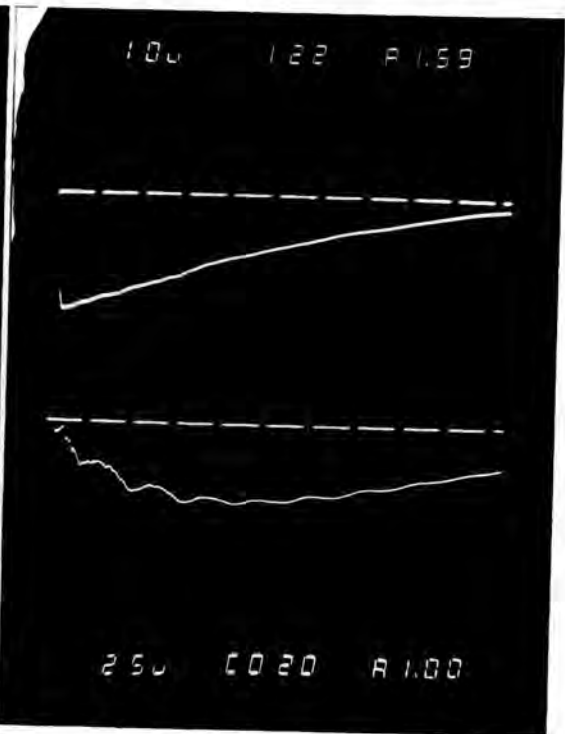
รูปที่ 5.9ก 60% RW เฟส A



รูปที่ 5.9ข 100% FW เฟส A



รูปที่ 5.9ค 100% FW เฟส A



รูปที่ 5.9ง 100% FW เฟส A

ระบบ 24 kV

5.9 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

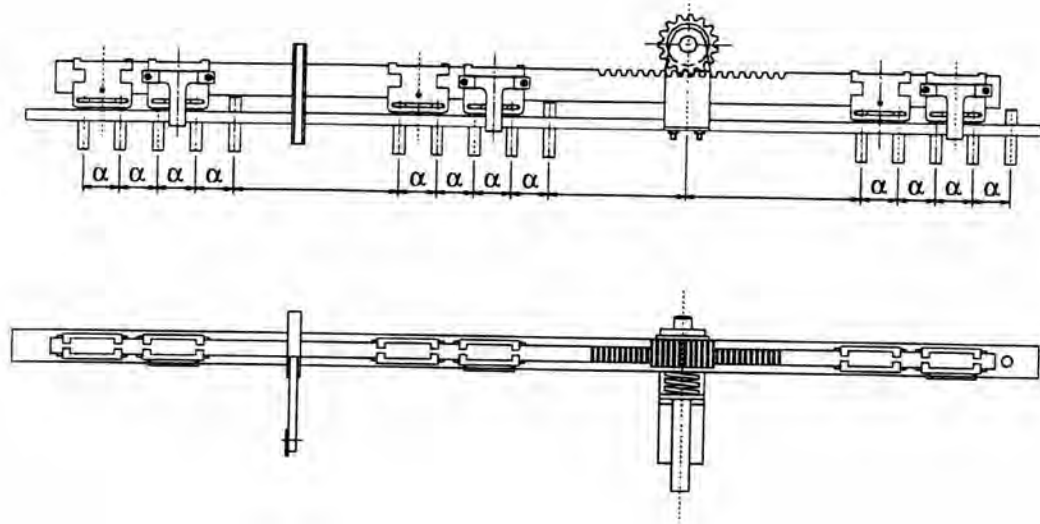
ในการประกอบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าฉนวนก๊าซ SF₆ ได้เกิดปัญหาหลัก 2 ประการกับตัวเปลี่ยนจุดแยกระบบและฉนวนของขดลวดแรงสูง ซึ่งทำให้การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไม่ผ่าน 2 ครั้ง แต่เมื่อได้ทำการปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องแล้วนำกลับมาทดสอบ จึงผ่านการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งปัญหา วิธีการแก้ไข และข้อเสนอแนะ ตลอดจนถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะได้กล่าวต่อไป

5.9.1 ตัวเปลี่ยนจุดแยกเปลี่ยนแรงดัน

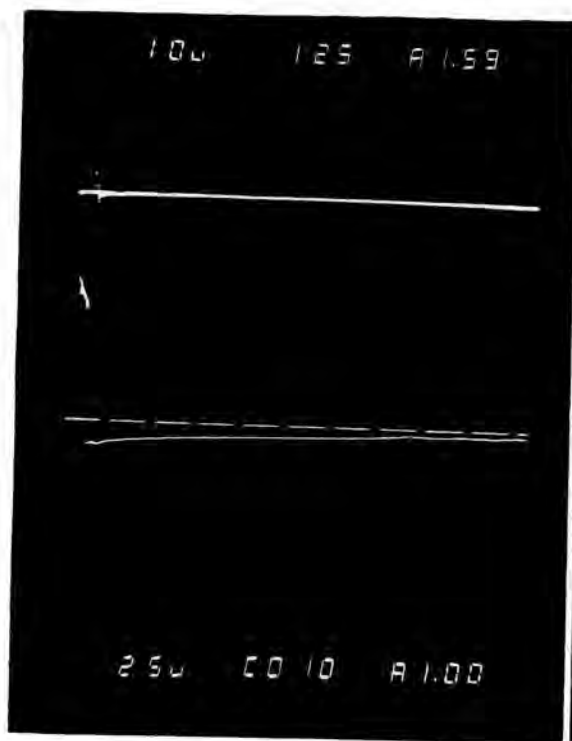
จากการทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ในครั้งแรก ปรากฏว่าหม้อแปลงที่ได้ประกอบสร้างขึ้นทดสอบไม่ผ่าน เนื่องจากระยะระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง (α) ของสลีปคังในรูปที่ 5.10 ไม่เพียงพอที่จะทนแรงดันอิมพัลส์ได้ ซึ่งระยะเดิมที่ออกแบบไว้คือ 38 mm จึงทำให้เกิดความฟิวตามผิวของเบกไลท์ในตำแหน่งดังกล่าวซึ่งเกิดในเฟสเดียวกัน โดยเกิดรูปคลื่นตัดบนแรงดันคังรูปที่ 5.11 และสามารถวิเคราะห์ได้จากออสซิลोगแกรมของรูปคลื่นแรงดันและกระแสดังรูปที่ 5.12 ซึ่งเกิดออสซิลชันบนรูปคลื่นแรงดัน (รูปบน) และเกิดดิสชาร์จบนรูปคลื่นกระแส (รูปล่าง) อย่างรุนแรงอย่างเห็นได้ชัดในเวลาที่สอดคล้องกัน สันนิษฐานว่าเกิดความฟิวตามผิวบนตัวเปลี่ยนจุดแยกหรือสายนำ เนื่องจากช่วงเวลาที่เกิดการออสซิลชันก่อนถึงค่ายอดของกระแส เมื่อถอดฝาหม้อแปลงออก และตรวจสอบสภาพความเสียหายก็พบรอยอาร์คไหม้บนเบกไลท์ในเฟส C จึงได้ทำการออกแบบใหม่โดยเพิ่มระยะจากเดิม 1.5 เท่า เป็น 60 mm และผ่านการทดสอบครั้งที่ 2

จากผลการทดสอบที่ได้ในครั้งที่ 2 ท

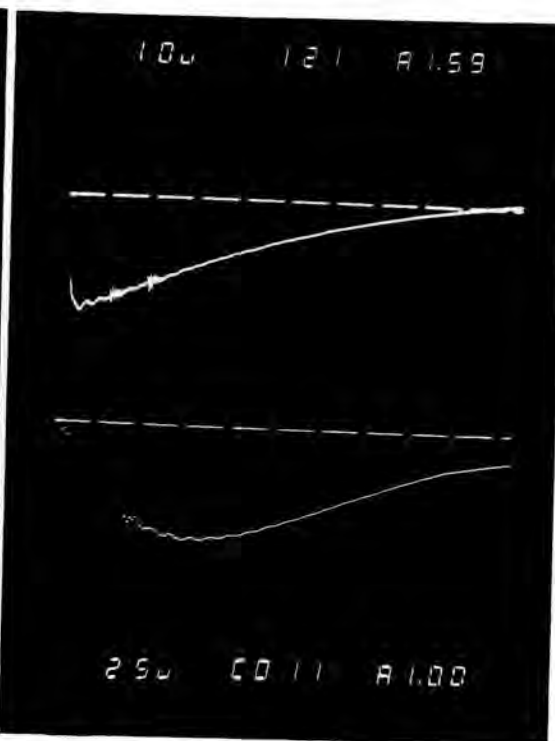
ความประณีตของชิ้นงานและเรื่องความสะอาดมีความสำคัญยิ่ง เช่น ขอบคมของโลหะที่ประกอบเป็นหน้าสัมผัส ฟันละอองที่จับบนผิวเบกไลท์ เป็นต้น เพราะว่ามันแปลกปลอมเพียงเล็กน้อยก็เป็นสาเหตุให้ค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ลดลงได้กว่า 50% ดังนั้นในการออกแบบสร้างหม้อแปลงในครั้งต่อไปควรจะต้องมีการศึกษาค่าแรงดันวาบฟิวตามผิวของอิมพัลส์บนเบกไลท์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบด้วย



รูปที่ 5.10 ตัวเปลี่ยนจุดแยกเปลี่ยนระบบ



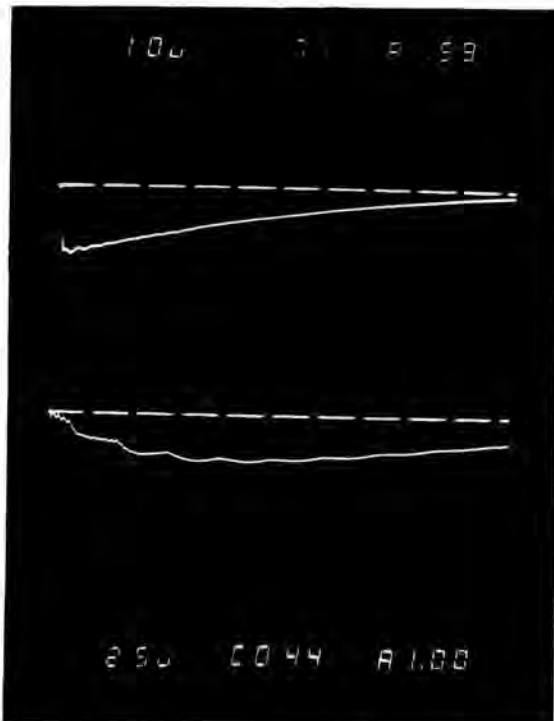
รูปที่ 5.11 เกิดคลื่นตักบนรูปคลื่นแรงดัน ทดสอบขณะเกิดวาบไฟตามผิว



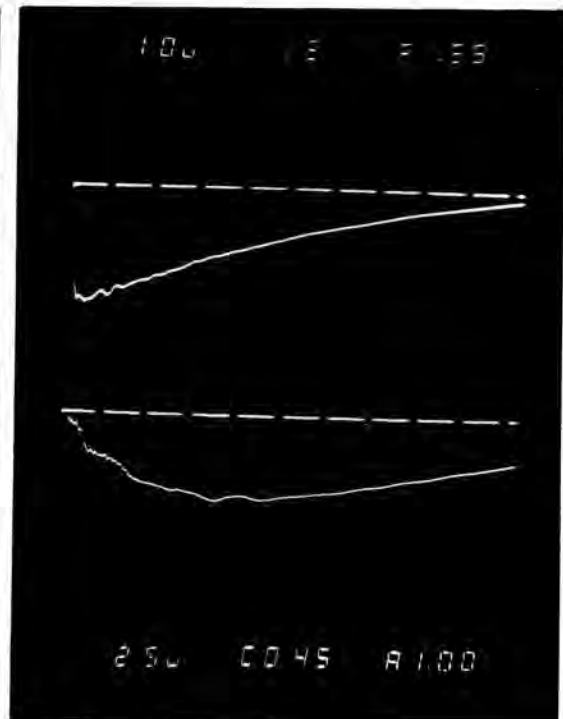
รูปที่ 5.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแส วาบไฟตามผิวบนตัวเปลี่ยนจุดแยก

5.9.2 ฉนวนของขดลวดแรงสูง

เมื่อทำการทดสอบหม้อแปลงในครั้งที่ 2 รูปคลื่นของกระแสที่ได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ผ่านหม้อแปลงมีความแตกต่างระหว่างรูปคลื่น reduce และ full ในเฟส C ดังรูปที่ 5.13 จึงได้ตั้งข้อสันนิษฐานไว้ว่ามีการลัดวงจรระหว่างขดลวด เพราะว่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเปลี่ยนแปลงเป็นเหตุให้รูปคลื่นกระแสเปลี่ยนแปลงตามด้วย จึงได้นำกลับไปทดสอบแรงดันเหนี่ยวนำ แต่ก็ไม่พบว่าหม้อแปลงมีการลัดวงจรระหว่างขดลวด จึงถอดหม้อแปลงออกเพื่อตรวจสอบอย่างละเอียดอีกครั้งและไม่พบความเสียหายในขดลวดชุดเฟส C ดังนั้นได้ทำการตั้งสมมติฐานว่าฉนวน PVF ที่ใช้เคลือบขดลวดแรงสูงอาจมีรอยร้าวเกิดขึ้นจากการอบหลายครั้ง และกคในขณะประกอบสร้าง เนื่องจากฉนวน PVF เป็นฉนวนแข็งที่ทนความร้อนได้เพียง 105°C



รูปที่ 5.13ก รูปคลื่นแรงดันและกระแส
reduce 60% เฟส C



รูปที่ 5.13ข รูปคลื่นแรงดันและกระแส
full 100% เฟส C

จึงได้ออกแบบขดลวดแรงสูงใหม่หุ้มด้วยกระดาษ nomex ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าฉนวน PVF แทนขดลวดชุดเดิมโดยให้สัดส่วนด้านความหนาและความสูงของขดลวดเท่าเดิม แต่เปลี่ยนวิธีการพันจากการพันแบบ section coil เป็นแบบ disc continuous เมื่อประกอบสร้างหม้อแปลงเรียบร้อยแล้วนำมาทดสอบ

5.9.3 ค่ากำลังสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่ม

ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ประกอบสร้างขึ้น เมื่อเทียบกับค่าที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-7 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการออกแบบและทดสอบ

	ค่าออกแบบ	ค่าทดสอบ
กำลังสูญเสีย		
ขณะไม่มีโหลด	2019	2402
ขณะมีโหลด (ที่ 75°C)	10398	17338
ค่าอุณหภูมิเพิ่ม (°C)		
ขดลวดแรงต่ำ	93.72	73.14
ขดลวดแรงสูง	62.82	64.75

ค่ากำลังสูญเสียไม่มีโหลดที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่า อาจเกิดจากการเรียงแผ่นเหล็กฉีกอนในตำแหน่งรอยต่อไม่สนิท จึงทำให้เกิดช่องว่างอากาศมากกว่าที่คำนวณได้ และเมื่อพิจารณาค่ากำลังขณะมีโหลดจะพบว่ามีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบมาก จากตารางที่ 5-3 ค่ากำลังสูญเสียในขดลวดเท่ากับ 10417 W ดังนั้นค่ากำลังสูญเสียเพิ่มประมาณ 7000 W จะต้องเกิดจากการใช้เส้นลวดแบนในการพันขดลวดแรงต่ำ เนื่องจากเกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวนในเนื้อทองแดง

จากตารางที่ 5-7 อุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงต่ำมีค่าต่ำกว่าที่ออกแบบไว้เนื่องจากขดลวดแรงต่ำใช้ลวดเปลือย และอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงสูงมีประมาณเท่ากับค่าที่ออกแบบไว้

5.9.4 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ 75°C

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 6.35% มีค่าสูงกว่าค่าในออกแบบซึ่งเท่ากับ 4.84% อาจเกิดจาก 2 สาเหตุ คือ มิติของขดลวดที่พันได้ไม่ได้มีติดตามที่ออกแบบไว้ และจากค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดมีค่าสูงกว่าที่ออกแบบไว้มากค่า R_{eq} จึงมีค่าสูงทำให้ค่า Z_{eq} ในสมการ (2.12c) มีค่ามากกว่าที่ออกแบบไว้