



บทที่ 2

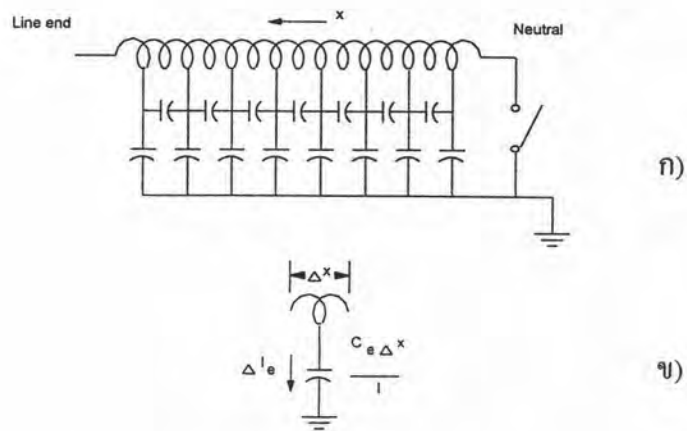
การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ BIL คือการทดสอบสภาพการฉนวนของอุปกรณ์ด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ($1.2/50 \mu\text{sec}$) ที่เลียนแบบจากแรงดันเสิร์จที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในแรงดันสูงนั้น โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแบบตัวเก็บประจุ ดังนั้นเมื่อมีแรงดันเสิร์จเกิดขึ้นจะทำให้เกิดเกรเดียนต์ตามความยาวของตัวเก็บประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตอนต้นของการฉนวนจะได้รับเกรเดียนต์สูงสุด ซึ่งถ้าการฉนวนในบริเวณดังกล่าวไม่ดีพอก็จะทำให้เกิดความเสียหาย และนำไปสู่การเกิดความผิดปกติได้ในที่สุด

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะเป็นตัวเก็บประจุเช่นกัน เมื่อได้รับแรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า การฉนวนของขดลวดในรอบต้น ๆ จะได้รับเกรเดียนต์สูง จึงจำเป็นต้องมีการฉนวนมากพอเพื่อให้สามารถทนต่อเกรเดียนต์ของแรงดันเกินได้ ค่าแรงดันเกรเดียนต์จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการจัดวางของขดลวด และการพิจารณาว่าการฉนวนของหม้อแปลงจะมีคุณภาพดีพอตามที่มาตรฐานกำหนดได้นั้น ต้องทำการพิจารณาผลการทดสอบ BIL โดยดูรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่ได้จากวงจรทดสอบ

2.1 แรงดันกระจายเริ่มต้นเมื่อมีเสิร์จแรงดันรูปขั้นกระทบต่อขดลวดหม้อแปลง

ขดลวดของหม้อแปลง ที่มีการกระจายขดลวดแบบสม่ำเสมอ จะมีวงจรสมมูลแสดงดังในรูปที่ 2.1 [3] ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอตามความยาวของขดลวด แต่ละช่วงสั้น ๆ ของขดลวดจะมีความจุไฟฟ้าสแตตริกกับดิน และความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดที่อยู่ใกล้กันต่ออนุกรม ขั้วนิวทรัลของขดลวดจะต่อหรือไม่ต่อสามารถเขียนแทนได้ด้วยสวิตช์



รูป 2.1 วงจรสมมูลของขดลวดหม้อแปลงที่มี
การกระจายขดลวดอย่างสม่ำเสมอ

การศึกษาลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อขดลวดของหม้อแปลง สามารถศึกษาได้จากผลตอบสนองที่มีต่อแรงดันรูปขั้นของหม้อแปลงที่มีขดลวดเพียงขดเดียว และมีการกระจายของขดลวดสม่ำเสมอซึ่งเป็นกรณีศึกษาอย่างง่าย การวิเคราะห์ผลกระทบหลังจากที่เสร็จกระทบต่อขดลวดออกอาจแบ่งเป็นสามช่วงเวลา คือช่วงเวลารวมเป็นช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (ประมาณน้อยกว่า 1 ไมโครวินาที) ในช่วงเวลานี้ปริมาณกระแสเนื่องจากเสร็จของแรงดัน ยังไม่สามารถสังเกตได้เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำของขดลวดในตัวหม้อแปลง กระแสที่ไหลผ่านจะเป็นกระแสกระจัด (displacement current) ที่ไหลผ่านทางความจุไฟฟ้าสแตตริคและค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดต่อกันแบบอนุกรม จึงทำให้เกิดแรงดันกระจายเริ่มต้น (initial distribution voltage) ขึ้น สำหรับในช่วงเวลาที่สามนั้นเป็นช่วงที่แรงดันกระจายของขดลวดอยู่ในสภาพอยู่ตัว และในช่วงเวลาที่สองซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพเริ่มต้นไปสู่สภาพอยู่ตัว [6]

ในการวิเคราะห์หาค่าแรงดันกระจายเริ่มต้น ตามที่ Allan Greenwood ได้แสดงการวิเคราะห์ไว้ดังต่อไปนี้ [6] ในช่วงแรกจะไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวดเนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำในขดลวด ดังนั้นในช่วงระยะเวลาดังกล่าววงจรสมมูลในรูปที่ 2.1 จะเหลือเพียงแค่วงจรตาข่ายของค่าความจุไฟฟ้าเท่านั้น ถ้าให้ค่าความจุที่เทียบกับดินของขดลวดเป็น C_e และให้ค่าความจุไฟฟ้าอนุกรมเป็น C_s แล้วจะได้

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้าสแตตริคัลลงดิน / หน่วยความยาว} = C_e / l$$

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้าอนุกรม / หน่วยความยาว} = C_s l$$

กำหนดให้ l คือความยาวของขดลวด

U คือแรงดันเทียบกับดินที่จุดใด ๆ ในขดลวด

I_e คือกระแสรวมในค่าความจุไฟฟ้าสแตตริคัลลงดิน

I_s คือกระแสในค่าความจุไฟฟ้าอนุกรม

และกำหนดให้ทิศทางบวกของระยะ x เริ่มจากขั้วนิวทรัลไปทางขั้วต่อไฟ

ถ้าพิจารณาองค์ประกอบเล็ก ๆ ความยาว Δx ดังในรูป 2.1 ข) ค่าความจุเทียบกับดิน จะเป็น $C_e \Delta x / l$ และกระแสรั่วที่ไหลผ่านองค์ประกอบนี้เป็น

$$\Delta I_e = \frac{C_e \Delta x \omega U}{l} \quad (2.1)$$

เมื่อ ω เป็นความถี่ของแรงดัน U

$$\text{แต่} \quad \Delta I_e = \frac{dI_s}{dx} \Delta x \quad (2.2)$$

ถ้ารวมสมการที่ 2.1 และ 2.2 จะได้

$$\frac{dI_s}{dx} = \frac{C_e \omega U}{l} \quad (2.3)$$

$$\text{ค่าความจุไฟฟ้าอนุกรมของขดลวดส่วนย่อย} = \frac{I C_s}{\Delta x} \quad (2.4)$$

$$\text{และค่าความต่างศักย์คร่อมองค์ประกอบย่อย} = \frac{dU}{dx} \Delta x \quad (2.5)$$

ดังนั้นค่ากระแสที่ไหลผ่านความจุไฟฟ้าอนุกรมจะมีค่าเป็น $C_s dU/dt$ และจากสมการ 2.4 และ 2.5 จะเขียนได้ว่า

$$I_s = I C_s \omega \frac{dU}{dx} \quad (2.6)$$

และเมื่อทำการหาอนุพันธ์ของสมการ 2.6 จะได้

$$\frac{dI_s}{dx} = IC_s \omega \frac{d^2 U}{dx^2} \quad (2.7)$$

เนื่องจากสมการที่ 2.3 และ 2.7 เท่ากันทำให้

$$\frac{C_e \omega U}{l} = IC_s \omega \frac{d^2 U}{dx^2}$$

หรือ

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - \frac{1}{l^2} \frac{C_e}{C_s} U = 0 \quad (2.8)$$

สมการที่ได้แสดงให้เห็นเป็นอิสระจาก ω และสามารถหาผลตอบได้ในรูป

$$U = A_1 e^{px} + A_2 e^{-px} \quad (2.9)$$

โดยที่

$$p = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{C_e}{C_s}}$$

A_1 และ A_2 เป็นค่าคงที่มีค่าขึ้นอยู่กับเงื่อนไขจุดนิวทรัลต่อลงดินโดยตรงหรือไม่ต่อ โดยสามารถพิจารณาเป็นกรณีได้ดังนี้

2.1.1 กรณีต่อนิวทรัลลงดิน

ถ้าต่อนิวทรัลของหม้อแปลงลงดินโดยตรง จะได้เงื่อนไขคือที่ $x = 0, U = 0$ และที่ $x = l, U = V$ เมื่อ V เป็นขนาดของแรงดันเสิร์จรูปซัน และแทนเงื่อนไขเหล่านี้ลงในสมการ 2.9 จะได้

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= 0 \\ A_1 e^{pl} + A_2 e^{-pl} &= V \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$A_1 = -A_2 = \frac{V}{e^{pl} - e^{-pl}}$$

ถ้าให้

$$pl = \sqrt{\frac{C_e}{C_s}} = \alpha$$

$$\text{แล้ว} \quad A_1 = -A_2 = \frac{V}{2 \sinh \alpha} \quad (2.11)$$

ถ้าแทนค่าสมการ 2.11 ใน 2.9 แล้วจะได้

$$\begin{aligned} U &= \frac{V}{2 \sinh \alpha} \left[e^{\alpha x/l} - e^{-\alpha x/l} \right] \\ &= V \frac{\sinh(\alpha x/l)}{\sinh \alpha} \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.1.2 กรณีไม่ต่อนิวตรัลลงดิน

ขั้วนิวตรัลไม่ตอลงดิน ขอบเขตของเงื่อนไขจะเป็น ที่ $x = 0, I_s = 0$ หรือ $\frac{dE}{dx} = 0$ และที่ $x = l, E = V$ เมื่อแทนเงื่อนไขเหล่านี้ ทำให้ได้คำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์เป็น

$$\begin{aligned} p(A_1 - A_2) &= 0 \\ A_1 e^{pl} + A_2 e^{-pl} &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

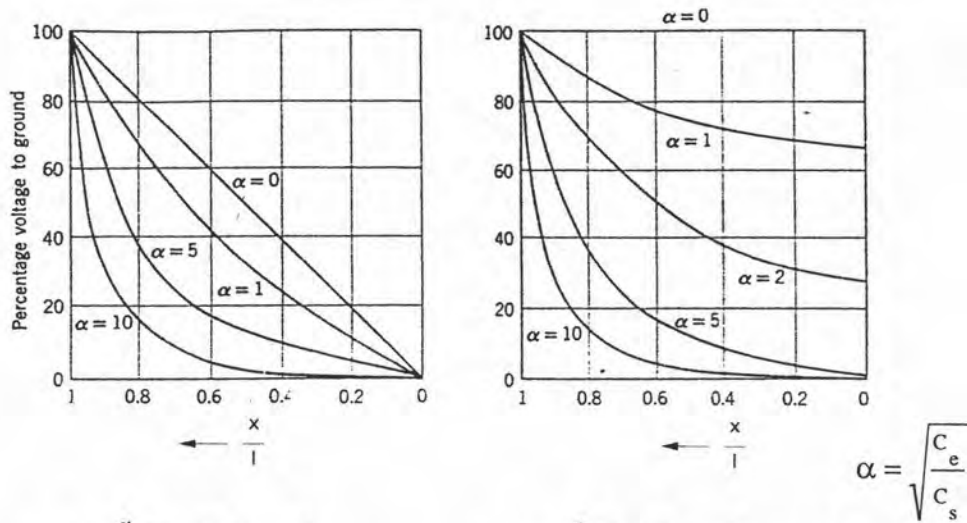
จากจุดนี้จะได้ค่าคงที่

$$A_1 = A_2 = \frac{V}{2 \cosh pl} = \frac{V}{2 \cosh \alpha} \quad (2.14)$$

แทนค่าคงที่จากสมการ 2.14 ลงในสมการ 2.9 และเป็นสมการสำหรับกรณี ขั้วนิวตรัลแยกอิสระจากดิน

$$\begin{aligned} U &= \frac{V}{2 \cosh \alpha} \left[e^{\alpha x/l} + e^{-\alpha x/l} \right] \\ &= V \frac{\cosh(\alpha x/l)}{\cosh \alpha} \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากสมการ 2.12 และสมการ 2.15 จะช่วยหาสามารถหาค่าแรงดันกระจายเริ่มต้นสำหรับขดลวดเมื่อมีแรงดันเสิร์จรูปขั้นมากระทบ และสังเกตได้ว่าทั้งสองกรณีขึ้นอยู่กับตัวแปร α หรืออัตราส่วนของ $[C_v/C_s]^{1/2}$ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.2



ก) ขั้วนิวทรัลต่อลงดิน ข) ขั้วนิวทรัลแยกอิสระจากดิน
รูปที่ 2.2 แสดงแรงดันกระจายเริ่มต้นที่เป็นผลตอบต่อแรงดันรูปขั้น
ของหม้อแปลงซึ่งมีขดลวดสมมาตร [6]

ในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันกระจายมีความไม่สม่ำเสมอสูงมากขึ้น เมื่อค่า α มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นที่ $\alpha = 10$ ค่าแรงดันประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ตกคร่อมอยู่กับขดลวดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ตอนต้น ค่าเกรเดียนต์ที่ถูกต้อง ณ จุดขั้วต่อไฟสามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์ สมการ 2.12 และ 2.15 ดังนี้

ก) กรณีที่ขั้วนิวทรัลต่อลงดิน

$$\frac{dU}{dx} = \frac{\alpha}{l} V \frac{\cosh(\alpha x / l)}{\sinh \alpha}$$

ถ้า $x = l$, $\frac{dU}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \coth \alpha$ (2.16)

ข) กรณีที่ขั้วนิวทรัลแยกอิสระจากดิน

$$\frac{dU}{dx} = \frac{\alpha}{l} V \frac{\sinh(\alpha x / l)}{\cosh \alpha}$$

ถ้า $x = l$, $\frac{dU}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \tanh \alpha$ (2.17)

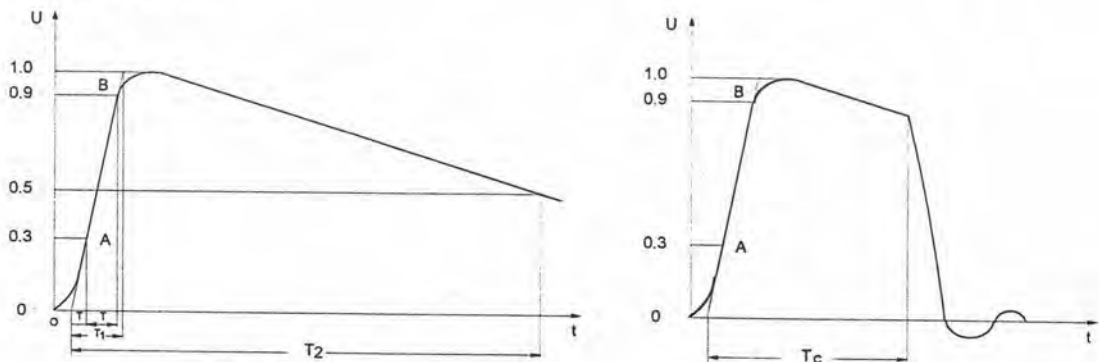
กรณีค่า α ที่มีค่ามาก ๆ นั้น ทำให้ $\coth \alpha \approx \tanh \alpha \approx 1$ ดังนั้นที่ต้นขดลวดจะได้รับแรงดันกระจายมีค่าเท่ากับ $dU/dx = \alpha V/l$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ α เท่าของค่าแรงดันกระจายโดยเฉลี่ย

ในสภาวะเสิร์จ ฉนวนระหว่างขดลวดที่บริเวณต้นขดลวดจะได้รับความเครียดสนาม

ไฟฟ้ารุนแรงมากที่สุด ถ้าหากการฉนวนของขดลวดไม่ดีพอ ก็จะเป็นเหตุทำให้เกิดความผิดปกติหรือเสียหายแก่หม้อแปลง ดังนั้นการออกแบบโครงสร้าง การวางขดลวด และการฉนวนขดลวดต้องคำนึงถึงแรงดันกระจายอิมพัลส์เริ่มต้นเป็นเรื่องสำคัญยิ่งประการหนึ่ง และเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าว่ามีคุณสมบัติทนต่อแรงดันเกินอิมพัลส์ได้ จึงจำเป็นต้องทดสอบความคงทนด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามมาตรฐานกำหนด

2.2 แรงดันทดสอบ BIL

การทดสอบ BIL เป็นการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ขนาดแรงดัน U_m ขั้วของแรงดันบวกหรือลบ รูปคลื่นเต็มคลื่นหรือรูปคลื่นตัด ซึ่งตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐานสากล IEC (International Electrotechnique Commission) หรือมาตรฐาน ANSI (American National Standard Institute) ได้กำหนดค่าไว้เป็นรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsec ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC, ANSI [7,8] ดังในรูปที่ 2.3



(ก) รูปคลื่นเต็ม

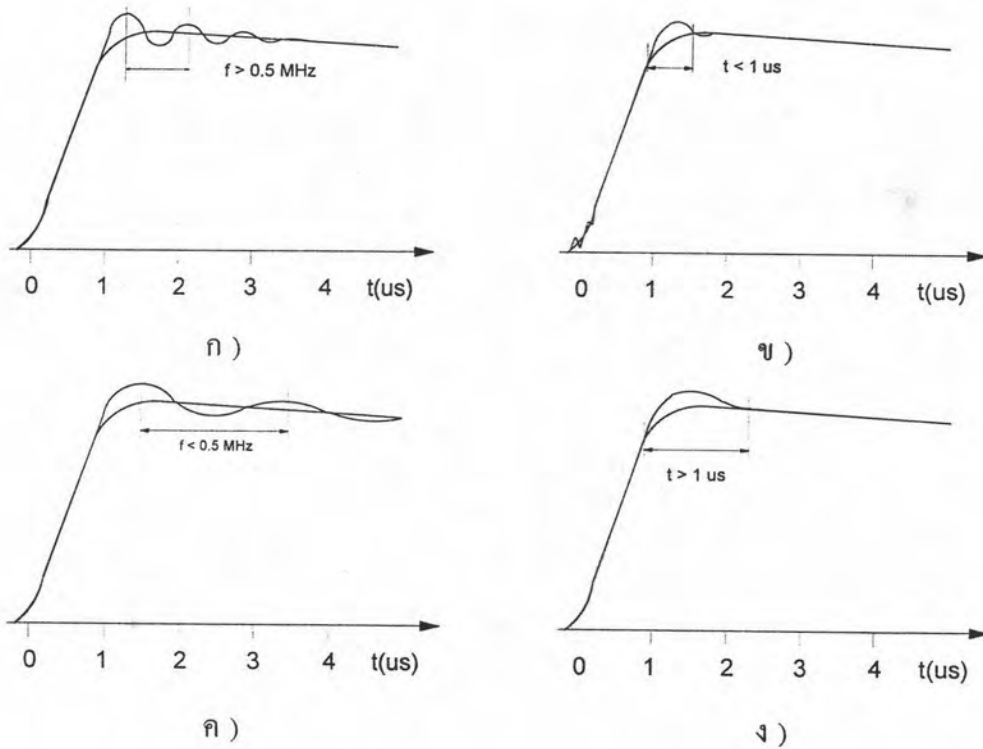
(ข) รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น

รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50 μsec

การสร้างแรงดันอิมพัลส์ทดสอบบางกรณี ก็เป็นการยากที่จะปรับให้ได้รูปคลื่นตามที่กำหนดในมาตรฐานเพราะในวงจรทดสอบจะมีค่าความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ที่มักจะทำให้เกิดออสซิลเลชันหรือเกิดความคลาดเคลื่อนในรูปคลื่น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งในมาตรฐาน [7,8] ได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้กล่าวคือ

เวลาช่วงหน้าคลื่น	$T_1 = 1.2 \mu\text{sec} \pm 30 \%$
เวลาช่วงหางคลื่น	$T_2 = 50 \mu\text{sec} \pm 20 \%$
ค่ายอดแรงดัน	$U_m \pm 3 \%$

รูปคลื่นแรงดันที่มีออสซิลเลชัน ขนาดออสซิลเลชันในบริเวณค่ายอดยอมให้ $\pm 5\%$ ของค่ายอด ส่วนขนาดออสซิลเลชันในช่วงหน้าที่ต่ำกว่า 50% ของค่ายอดยอมให้ $\pm 25\%$ ของค่ายอด การหาค่ายอดแรงดันขึ้นอยู่กับความถี่หรือช่วงออสซิลเลชันดังในรูปที่ 2.4 [7,8]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่มีการแกว่ง
 ก),ข) ค่าแรงดันทดสอบหาจากการเฉลี่ยคลื่นระลอก
 ค),ง) ค่าแรงดันทดสอบหาจากค่ายอด

ค่าแรงดันทดสอบ BIL ขึ้นอยู่กับการเลือกทดสอบตามมาตรฐานใดเช่น IEC, ANSI ดังแสดงในตารางที่ 2.1

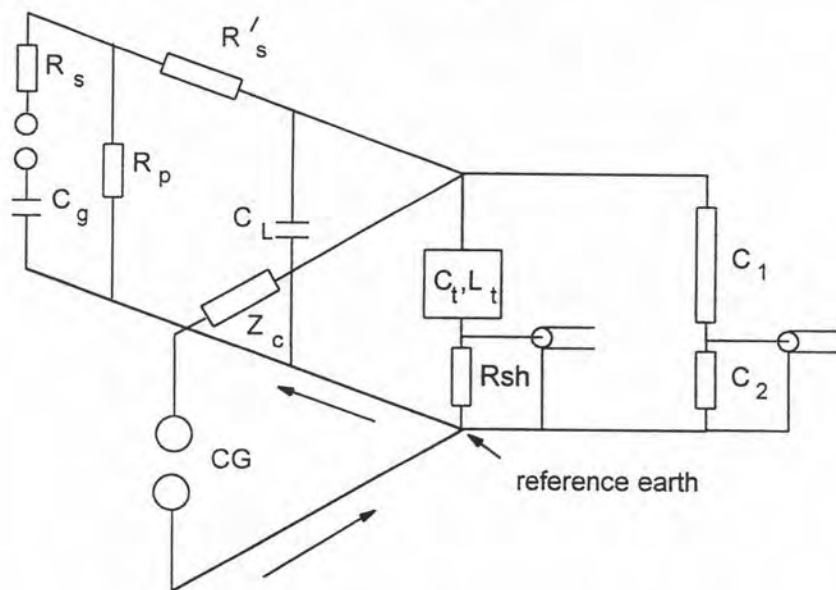
ตารางที่ 2.1 ระบบแรงดันสูงสุดและค่าแรงดันทดสอบ BIL สำหรับค่าแรงดันระบบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 300 กิโลโวลต์ (เฉพาะค่าแรงดันระบบที่ใช้ภายในประเทศ)

ระบบแรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)		แรงดันทดสอบอิมพัลส์ รูปคลื่นเต็ม (กิโลโวลต์)		แรงดันทดสอบอิมพัลส์ รูปคลื่นตัด (กิโลโวลต์)	
IEC[1]	ANSI[9]	IEC[1]	ANSI[9]	IEC[1]	ANSI[9]
≤ 1.1		-		-	
7.2		60		60	
	8.7		75		88
12		75		75	
	15		95		110
24		125		125	
	25		150		175
			125		145
	34.5		200		230
			150		175
36		170		170	
	69		350		400
72.5		325		325	
	115		550		630
			450		520
123		550		550	
		450		450	
	230		1050		1210
			900		1035
245		950		950	
		850		850	

2.3 อุปกรณ์การทดสอบ

2.3.1 วงจรทดสอบ

อุปกรณ์ประกอบวงจรทดสอบ BIL ของหม้อแปลงประกอบด้วย เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และองค์ประกอบปรับรูปคลื่น ระบบวัดแรงดันทดสอบและระบบวัดกระแสอิมพัลส์ที่ไหลผ่านขดลวดที่ทดสอบ อุปกรณ์สร้างรูปคลื่นตัด (ช่องแกปทรงกลม) อุปกรณ์เหล่านี้จะต่อเป็นวงจรที่สำคัญ 3 วงจรดังแสดงในรูปที่ 2.5 [10]



รูปที่ 2.5 วงจรทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

- C_g = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ เพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์
- C_L = ตัวเก็บประจุโหลดเพื่อช่วยในการปรับแก้ให้ได้รูปคลื่นแรงดันมาตรฐาน
- C_t = ค่าตัวเก็บประจุของหม้อแปลงทดสอบ
- L_t = ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลงทดสอบ
- R_s = ความต้านทานภายในอนุกรมของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
- R'_s = ความต้านทานภายนอกต่ออนุกรมสำหรับปรับหน้าคลื่น
- R_p = ความต้านทานต่อแบบขนาน
- Z_1, Z_2 = อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงและภาคแรงดันต่ำตามลำดับของโวลเตจดีไวเดอร์
- CG = แก๊ปตัดคลื่น
- R_{sh} = ชันต์สำหรับบันทึกรูปคลื่นกระแส

การจัดวางวัสดุทดสอบและอุปกรณ์ทดสอบจะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสิ่งที่อยู่ใกล้เคียง บริเวณทดสอบควรจะต้องมีที่ว่างพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงที่จะนำมาทดสอบ และขนาดแรงดันทดสอบ เกี่ยวกับการต่อลงดินก็เป็นเรื่องสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการทดสอบ เนื่องจากแรงดันทดสอบและกระแสเป็นรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว ฉะนั้นการต่อลงดิน ณ จุดที่ถือเป็นศักย์ดินอ้างอิง (reference earth) จึงต้องเลือกจุดต่อที่เหมาะสม ในทางปฏิบัติจะใช้ระบบสายดินของห้องทดสอบเป็นศักย์ดินอ้างอิง โดยต่อจุดที่ใกล้กับวัสดุทดสอบคือหม้อแปลงมากที่สุด สายต่อลงดินและสายป้อนแรงดันระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์กับวัสดุทดสอบควรมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก ๆ โดยทั่วไปมักใช้แถบทองแดงบางซึ่งมีความกว้างและหนาประมาณ 120 มม. และ 0.5 มม. ตามลำดับ [11]

2.3.2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์สำหรับการทดสอบ BIL ได้จากวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยอาศัยหลักการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุแล้วปล่อยให้คายประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าตัวองค์ประกอบให้ได้รูปคลื่นตามที่ต้องการดังรูปที่ 2.6 ก) เมื่อต้องการแรงดันทดสอบสูง ๆ (มากกว่า 200 kV) สามารถสร้างรูปคลื่นได้โดยใช้วงจรพื้นฐานมาต่อซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น ตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's multiple circuit) ดังในรูปที่ 2.6 ข) (HAEFELY)

การเลือกเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สำหรับทดสอบ BIL จะกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ แรงดันอัดประจุ (ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ) และพลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิดซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

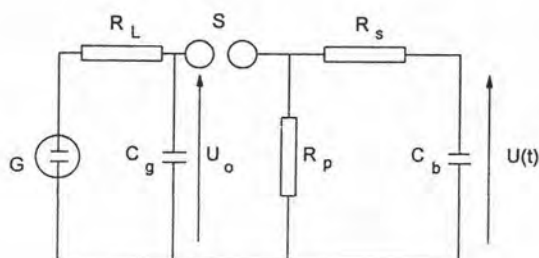
$$w = \frac{1}{2} C_g U_0^2 \times 10^{-9} \quad \text{kJ} \quad (2.18)$$

เมื่อ U_0 คือแรงดันอัดประจรรวมหน่วยเป็น kV

C_g คือความจุไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดเป็น pF

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดหมายถึง อัตราส่วนแรงดันที่จ่ายออกต่อแรงดันที่ป้อนอัดประจุซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความจุ C_g เมื่อเทียบกับความจุไฟฟ้าโหลดรวมทั้งหมด $C_b = C_L + C_t$ และเทคนิคการปรับรูปคลื่นให้ได้รูปคลื่นมาตรฐานตามข้อแนะนำใน

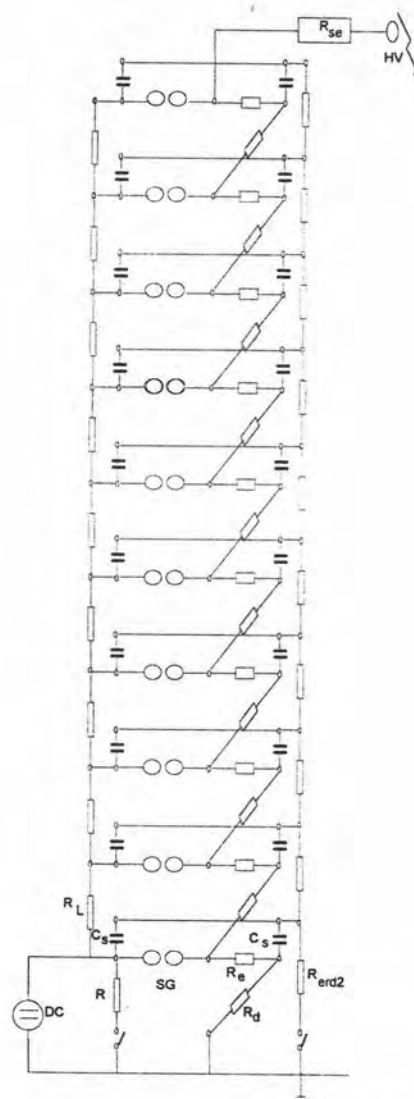
มาตรฐานสากลเช่น IEC สามารถดูได้จากภาคผนวก ค. [15]



ก) วงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร

- G คือตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง
- U_0 คือแรงดันอัดประจุกระแสตรง
- C_g คือตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน
- C_b คือโหลดตัวเก็บประจุ (รวมอุปกรณ์วัดแรงดันแบบตัวเก็บประจุ(ถ้ามี))
- R_L คือความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ
- R_s คือความต้านทานหน่วง
- R_p คือความต้านทานปล่อยประจุ
- $U(t)$ คือแรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา
- S คือสปาร์กแก๊ป



ข) วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

รูปที่ 2.6 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนดและมีประสิทธิภาพสูง ความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้า C_g กับ C_b ควรเป็น

$$C_g \geq 10 * C_b \quad (2.19)$$

ในกรณีทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลง 3 เฟส (ซึ่งทำการทดสอบทีละเฟส

ส่วน 2 เฟสที่เหลือและทางด้านจ่ายออกต่อลัดวงจรลงดิน) ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
อิมพัลส์ C_g ของหม้อแปลงขนาดเล็ก อาจคำนวณได้จากความสัมพันธ์ [12]

$$C_g \geq \frac{P_n \cdot 10^8}{U_n^2 \epsilon_{sc}} \text{ pF} \quad (2.20)$$

เมื่อ P_n คือค่ากำลังที่กำหนดของหม้อแปลงเป็น MVA

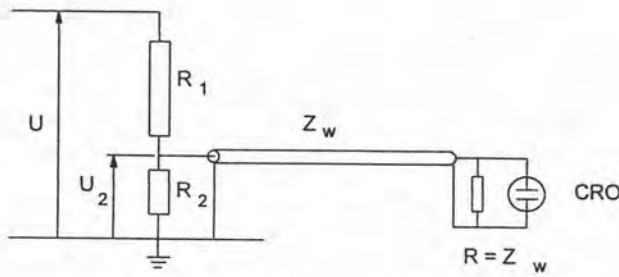
U_n คือแรงดันที่กำหนดของหม้อแปลงเป็น kV

ϵ_{sc} คือแรงดันลัดวงจรเป็น %

2.3.3 ระบบวัดแรงดัน

ระบบวัดแรงดันประกอบด้วย โวลเตจดีไวเดอร์ เคเบิลวัด อุปกรณ์วัดและการ
บันทึกรูปคลื่นแรงดันภาคแรงต่ำ โวลเตจดีไวเดอร์อาจจะเป็นแบบความต้านทาน ซึ่งเหมาะ
สำหรับการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่มีขนาดไม่เกิน 2000 kV [11] ถ้าแรงดันสูงกว่านั้นจะ
ใช้โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุที่มีความต้านทานหน่วง (damped capacitive voltage
divider) คุณสมบัติของโวลเตจดีไวเดอร์ที่ใช้วัดแรงดันทดสอบ จะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐาน
กำหนดเช่น เวลาตอบสนอง T ต้องน้อยกว่า $0.2 \mu\text{sec}$ และความคลาดเคลื่อนของการวัดแรงดัน
ค่ายอด $\Delta U \leq \pm 3 \%$ [10] และจะต้องไม่เป็นโหลดแก่เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

อุปกรณ์วัดและการบันทึกรูปคลื่นแรงดันด้านภาคแรงต่ำ ของโวลเตจดีไวเดอร์
ประกอบด้วย โวลท์มิเตอร์วัดค่ายอด และออสซิลโลสโคปที่มีอิมพีแดนซ์ป้อนเข้าสูง เพื่อไม่ให้
เป็นโหลดของโวลเตจดีไวเดอร์ และต้องมีชิลด์ป้องกันคลื่นรบกวน มีอัตราการบันทึกภาพสูง
พิกัดแรงดันป้อนเข้าสูง ไม่มีแอมพลิฟายเออร์ มีแบนด์วิดท์สูง และเวลาตอบสนองน้อย
สัญญาณที่ออกจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ เพื่อเข้าโวลท์มิเตอร์หรือออสซิลโลสโคปต้อง
ใช้เคเบิลมีชิลด์ และใช้เมทซิงอิมพีแดนซ์โดยต้องทำให้ถูกต้องดังรูปที่ 2.7

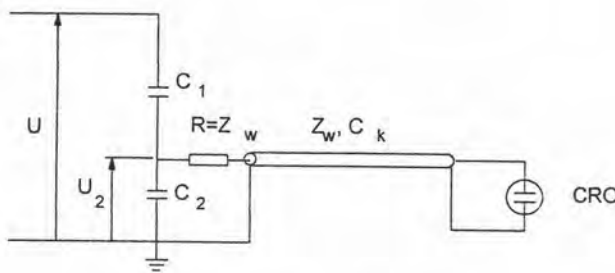


$$U = \frac{R_1 + R_2^*}{R_2^*} \cdot U_2$$

$$R_2^* = \frac{R_2 \cdot Z_w}{R_2 + Z_w}$$

เมื่อ

ก) โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน



ความถี่สูง

$$U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot U_2$$

ความถี่ต่ำ

$$U = \frac{C_1 + C_2 + C_k}{C_1} \cdot U_2$$

ข) โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

รูปที่ 2.7 การต่อวงจรระบบวัดแรงดัน

2.3.4 แก๊ปตัดคลื่น

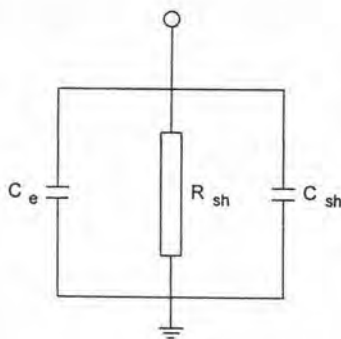
ในกรณีแรงดันทดสอบไม่สูงมากนักเช่น การทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลง ในระบบจำหน่ายซึ่งมีระบบแรงดันไม่เกิน 52 kV หรือ BIL ไม่เกิน 250 kV อาจสร้างคลื่นตัดได้ โดยใช้ช่องว่างของแท่งกลมปลายแหลม (rod-rod gap) ปรับระยะช่องว่างให้พอเหมาะที่จะได้ ช่วงคลื่นตัด T_c อยู่ในช่วง 2-6 ไมโครวินาที ตามที่มาตรฐานกำหนด [9] กรณีที่แรงดันสูงมากขึ้นต้องใช้ระยะแก๊ปมากขึ้น การเกิดคลื่นตัดจะไม่แน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศ จึงใช้ แก๊ปตัดคลื่นที่มีไกสวิตซ์ที่สามารถควบคุมเวลาคลื่นตัดได้ [13] จะเป็นการลดอัตราเสี่ยงของ หม้อแปลงอันเนื่องจากการลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้เวลาคลื่นตัดตามมาตรฐานกำหนด

2.3.5 ชั้นดับบันทึกรูปคลื่นกระแส

ชั้นดับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประการหนึ่ง ของวงจรทดสอบ BIL ของ หม้อแปลงไฟฟ้า การตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงเมื่อได้รับแรงดันทดสอบ

อาจสังเกตได้จากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนถ้าหากความผิดพร่องที่เกิดขึ้นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปมากเช่น เกิดการลัดวงจรลงดิน เป็นต้น แต่ในกรณีที่เกิดผิดพร่องเล็กน้อย เช่น เกิดผิดพร่องระหว่างรอบขดลวด เกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน เป็นต้น การตรวจจับโดยสังเกตจากรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทำได้ยาก ความผิดพร่องเล็กน้อยเช่นนี้ต้องตรวจจับโดยการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านชั้นดี ที่ต่อจากปลายขดลวดทดสอบด้านที่ต่อดินดังแสดงในรูปที่ 2.5

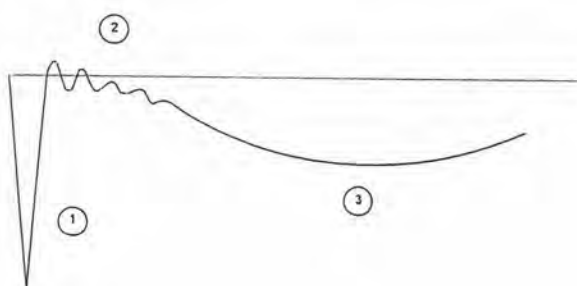
ชั้นดีสำหรับวัดกระแสดังกล่าวนี้จะเป็นความต้านทานล้วน มีความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำต่ำ และโดยเหตุที่วงจรสมมูลของหม้อแปลงเริ่มแรกที่ได้รับแรงดันอิมพัลส์จะมีลักษณะเป็นตาข่ายความจุไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นความต้านทานชั้นดีจะมีความจุไฟฟ้าระหว่างปลายขดลวดด้านต่อดิน กับดินขนานอยู่ด้วยคือ C_e ดังแสดงในรูปที่ 2.8



- C_e คือ ความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับดิน
- C_{sh} คือ ความจุไฟฟ้าที่อาจต่อเพิ่มขนานกับความต้านทานชั้นดี
- R_{sh} คือ ความต้านทานชั้นดี

รูปที่ 2.8 ชั้นดีวัดกระแส

รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านชั้นดีจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ ให้กับขดลวดหม้อแปลง อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ ส่วนต้นรูปคลื่นจะเป็นกระแสแบบประจุ (capacitive current) มีลักษณะเป็นพัลส์ความชันสูงคือส่วนที่ 1 ในรูปที่ 2.9 เรียกว่า กระแสสไปก์ ต่อจากสไปก์เป็นส่วนที่สองมีลักษณะเป็นออสซิลเลชันที่มีค่าความถี่ธรรมชาติสูงส่วนที่ 2 ซึ่งเกิดจากความจุไฟฟ้าและความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลง ในส่วนที่ 3 เป็นกระแสเหนี่ยวนำตามรูปคือส่วน ข)



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นกระแสผ่านขดลวดหม้อแปลง

ลักษณะสมบัติของชั้นตัววัดกระแสสำหรับตรวจจับความผิดปกติที่ควรพิจารณามี 2 ประการ [2] คือ

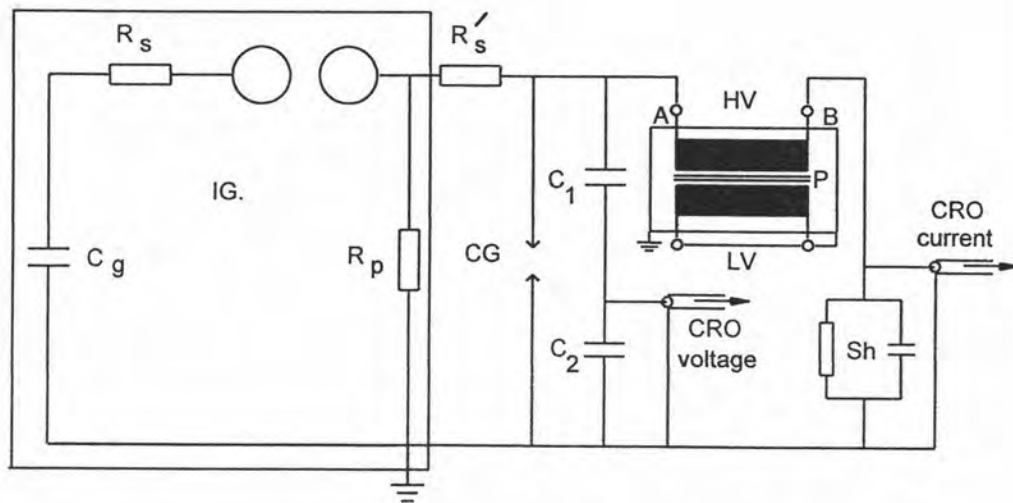
1) เวลาคงตัวของชั้นตัวคือ $\tau_0 = R_{sh}C_e$ ซึ่งเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของชั้นตัวว่า จะตรวจจับความผิดปกติได้ดีและละเอียดเพียงใด ถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นในขดลวดจะทำให้เกิดออสซิลเลชันที่มีความถี่สูงเป็นเมกะเฮิรต์ซ์ ซึ่งสูงกว่าความถี่ธรรมชาติของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด แต่มีขนาดเล็กมีลักษณะเป็นเพียงจุดกระตุ้นในรูปคลื่นกระแส ณ จุดที่เกิดผิดปกติ รูปภาพของกระแสผิดปกติ จะแสดงออกมาให้เห็นได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับว่าแรงดันคร่อมชั้นตัว จะติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากความผิดปกติได้มากน้อยเพียงใด ชั้นตัวที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ทันก็ต้องเป็นชั้นตัวที่มีเวลาคงตัว τ_0 น้อยกว่า 1 ใน 4 ของคาบการออสซิลเลชันของกระแสผิดปกติ

2) ความไวของชั้นตัว (sensitivity) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงค่าในแนวความสูงของรูปคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส 1 หน่วยนั่นคือ การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของแรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงกระแส 1 หน่วย ความไวนี้แปรตามค่าความต้านทานชั้นตัว ถ้าเพิ่มความต้านทานของชั้นตัวจะเพิ่มความไวสูงขึ้น รูปคลื่นกระแสจะโตขึ้น ทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ชัดเจนขึ้น แต่การเพิ่มความต้านทานชั้นตัวจะทำให้เวลาคงตัวของชั้นตัวเพิ่มขึ้นด้วย ถ้าค่าความต้านทานชั้นตัวมีค่าสูงมากเกินไป จะทำให้แรงดันที่ชั้นตัวสูงซึ่งอาจทำให้เกิดเบรกควาน์ที่อุปกรณ์วัดได้ จึงต้องเลือกใช้ค่าความต้านทานชั้นตัวให้พอเหมาะ

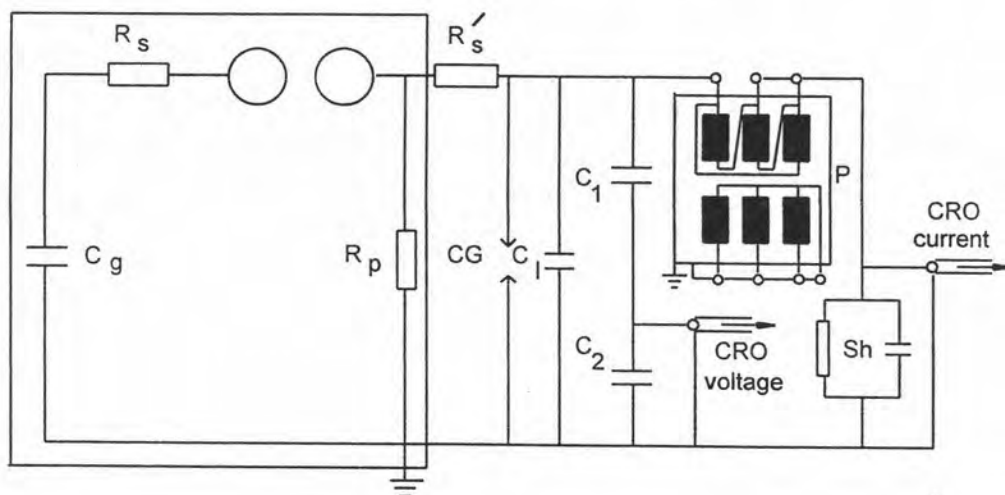
2.4 วิธีทำการทดสอบ

2.4.1 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ

หม้อแปลงที่นำมาทำการทดสอบ BIL อาจเป็นเฟสเดียวหรือสามเฟส การต่อวงจรทดสอบคล้ายกันคือ ทดสอบทีละเฟสโดยใช้ปลายขั้วข้างหนึ่งของขดลวดเฟสที่จะรับการทดสอบเป็นที่ป้อนแรงดัน ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของขดลวดจะต่อลงดินผ่านชั้นตัวสำหรับวัดกระแสอิมพัลส์ที่ไหลผ่านขดลวดนั้น สำหรับขั้วของขดลวดหรือเฟสที่ไม่ได้รับการทดสอบจะต่อลงดินดังในรูปที่ 2.10(ก) และ 2.10 (ข) ซึ่งแสดงการต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบสำหรับหม้อแปลงเฟสเดียวและสามเฟสตามลำดับ



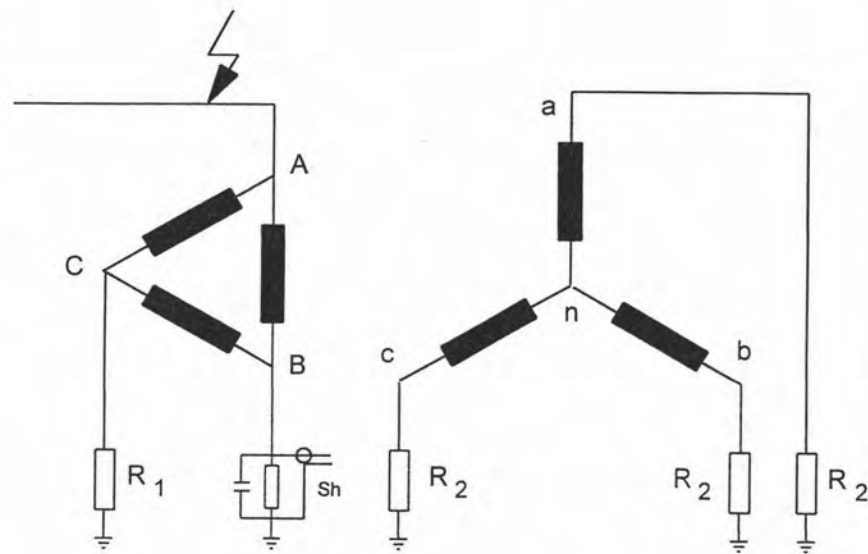
ก) หม้อแปลงรับการทดสอบเฟสเดียว



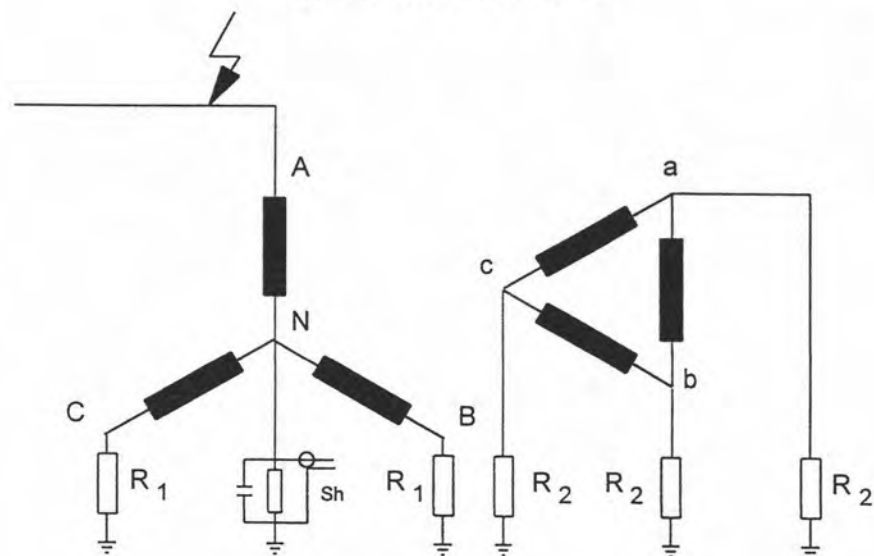
ข) หม้อแปลงรับการทดสอบสามเฟส

รูปที่ 2.10 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ

ในกรณีหม้อแปลง 3 เฟสขนาดใหญ่ มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ และตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีขนาดจำกัด มักจะมีปัญหาความยุ่งยากในการที่จะปรับรูปคลื่นแรงดันทดสอบให้ได้เกณฑ์ที่กำหนดคือ รูปคลื่นมักจะมีออสซิลเลชัน และช่วงหางคลื่นมักจะสั้น การแก้ปัญหาอาจทำได้โดยต่อขั้วหรือเฟสที่มีได้รับการทดสอบผ่านความต้านทานลงดิน โดยที่ขั้วตลอดที่มีได้ทดสอบนั้นจะต้องมีแรงดันไม่เกิน 75 % ของแรงดันทดสอบ ดังการต่อในรูปที่



ก) หม้อแปลง 3 เฟส $\Delta - Y$



ข) หม้อแปลง 3 เฟส จุดนิวทรัลต่อลงดิน

รูปที่ 2.11 การต่อขั้วหม้อแปลงรับการทดสอบ BIL

สำหรับหม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

2.4.2 การเปรียบเทียบระบบวัดแรงดัน

เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าระบบวัดแรงดันทดสอบนั้นมีความถูกต้อง จำเป็นต้องมีการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบระบบวัดแรงดันที่จะทดสอบก่อนเริ่มต้นทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการทดสอบเพื่อตรวจรับปกติทั่วไป จะทำการเทียบระบบวัดแรงดันด้วยช่องแกปทรงกลม (sphere-gap) ตามข้อกำหนด IEC Publ.52 [14]

2.4.3 ลำดับขั้นการทดสอบ

หลังจากทำการปรับเทียบระบบวัดแรงดันเรียบร้อยแล้ว จะเป็นลำดับขั้นตอน การป้อนแรงดันทดสอบซึ่งขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทราบแน่ ชัดก่อนว่าจะทดสอบด้วยมาตรฐานใด แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปลำดับขั้นการทดสอบ BIL สำหรับหม้อแปลงนั้นจะประกอบด้วย

1) การตรวจสอบและปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ให้ได้ตามเกณฑ์กำหนดคือ รูปคลื่นจะต้องมีเวลาดำเนินอยู่ระหว่าง 0.84 - 1.56 μsec และเวลาหางคลื่นอยู่ระหว่าง 40 - 60 μsec การตรวจปรับรูปคลื่นจะทำในขณะที่มีหม้อแปลงรับการทดสอบต่ออยู่ด้วยและป้อนแรงดัน ไม่ควรเกิน 75 % ของค่า BIL โดยการปรับค่าองค์ประกอบของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

2) ทดสอบที่แรงดันอิมพัลส์ลดระดับของคลื่นเต็ม (Reduced level full voltage = RF) มีค่าระหว่าง 50 ถึง 75 % ของแรงดันทดสอบ บันทึกรูปคลื่นแรงดันและกระแส ผ่านขดลวดทดสอบไว้เป็นรูปคลื่นอ้างอิง

3) ป้อนแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม 100 % (Full voltage = FW) 2 ครั้ง บันทึกแรงดันและกระแสไว้เช่นกัน

4) ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด (Chopped wave = CW) โดยการ ทดสอบรูปคลื่นตัดนี้จะทำตามมาตรฐานที่อ้างอิง หรือขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ให้ทดสอบ และจะทำการทดสอบรูปคลื่นตัดที่ส่วนหางของคลื่น 2 ครั้ง ขนาดและช่วงเวลาค้นตัดขึ้นอยู่กับ มาตรฐานที่อ้างอิง และจะทำการบันทึกภาพไว้

การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด โดยทั่วไปจะถือว่าเป็นการทดสอบ พิเศษคือ จะทดสอบเมื่อระบุให้ทดสอบเท่านั้น ลำดับขั้นและจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันตาม มาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลำดับชั้นการป้อนแรงดัน ขนาดและลักษณะของแรงดันทดสอบ

มาตรฐาน	ทดสอบตามข้อ	ลำดับชั้นการป้อนแรงดันทดสอบ 1.2/50 μ sec	ค่ายอดแรงดันรูปคลื่นตัดเป็น % ของค่า BIL	ช่วงเวลากลิ่นตัด T_c (μ sec)
IEC[1] TIS[16]	12	1) 1 x RF 50%-75% 2) 3 x FW 100%	-	-
IEC[1] TIS[16]	13	1) 1 x RF 50%-75% 2) 1 x FW 100% 3) 2 x CW 100% 4) 1 x FW 100%	100	2 - 6
ANSI[9]	10.3	1) 1 x RF 50%-75% 2) 2 x CW 115% 3) 1 x FW 100%	115-125	1 - 3

RF = แรงดันรูปคลื่นเต็มแบบลดระดับ (Reduced level of full wave)

FW = แรงดันรูปคลื่นเต็ม (Full wave)

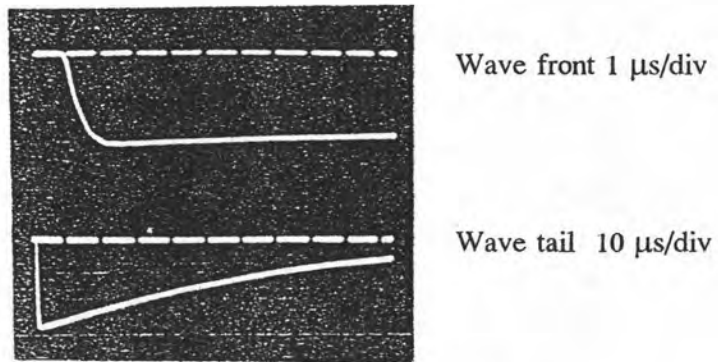
CW = แรงดันรูปคลื่นตัด (Chopped wave)

T_c = เวลากลิ่นตัด (Chopping time)

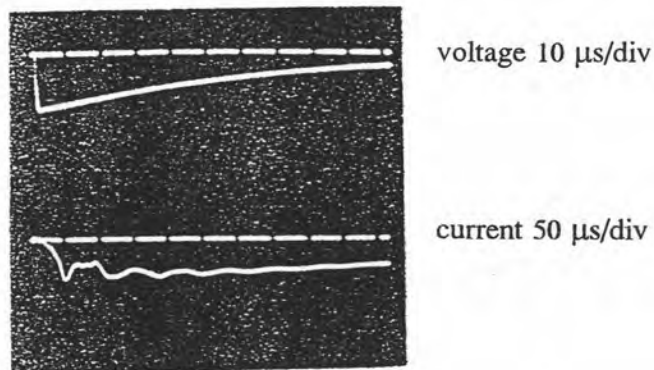
2.4.4 ตัวอย่างผลการทดสอบบันทึกรูปคลื่นอิมพัลส์ด้วยวิธีแอนะล็อก

ตัวอย่างของออสซิลโลแกรมรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่บันทึกตามลำดับ จากการทดสอบหม้อแปลง 3 เฟส 160 kVA 22 kV - 400/230 ซึ่งมีค่า BIL = 125 kV (IEC) แสดงไว้ในรูปที่ 2.12

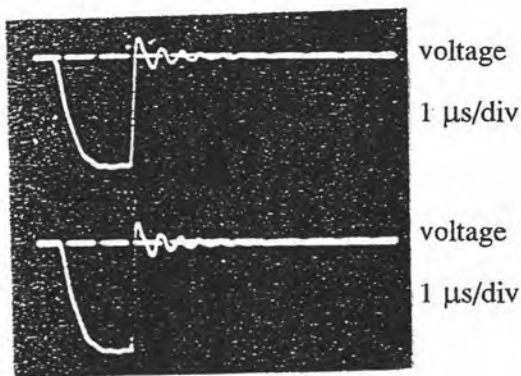
ตัวอย่างของออสซิลโลแกรมรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่บันทึกตามลำดับ จากการทดสอบหม้อแปลง 3 เฟส 750 kVA 12/24 kV - 416/240 V ซึ่งมีค่า BIL = 125 kV (ANSI) แสดงไว้ในรูปที่ 2.13



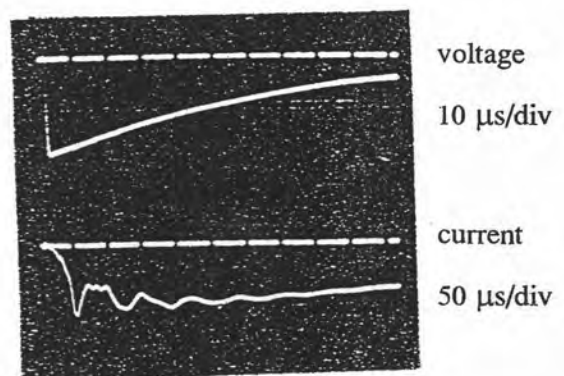
1) WF Calibrated voltage 75 kV (1.2/50 μsec)



2) RW 75 kV



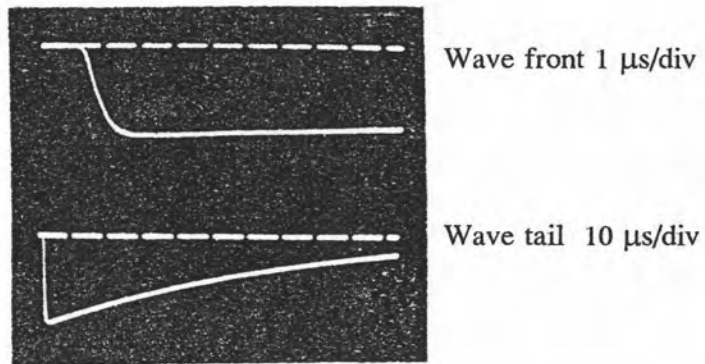
3) Two-CW 145 kV



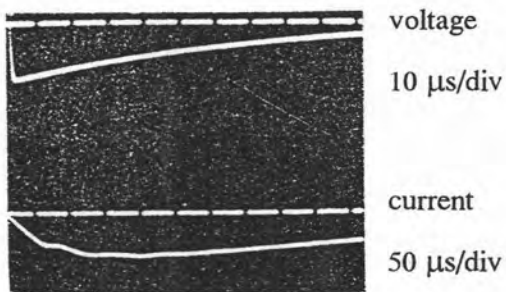
4) FW 125 kV

รูปที่ 2.12 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน ANSI

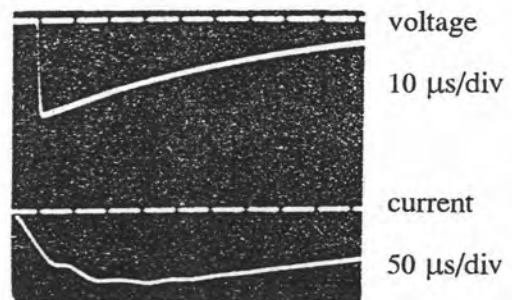
ของหม้อแปลง 3 เฟส 750 kVA 12/24 kV - 416/240 V



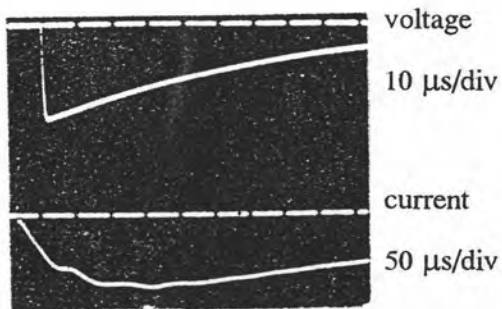
1) WF Calibrated voltage 75 kV (1.2/46 μsec)



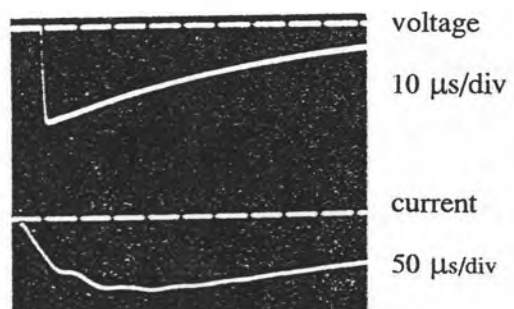
2) RW 75 kV



3) FW 125 kV



4) FW 125 kV



5) FW 125 kV

รูปที่ 2.13 ออสซิลโลแกรมแรงดันและกระแสจากการทดสอบ BIL ตามมาตรฐาน IEC ของหม้อแปลง 3 เฟส 160 kVA 22 kV - 400/230 V

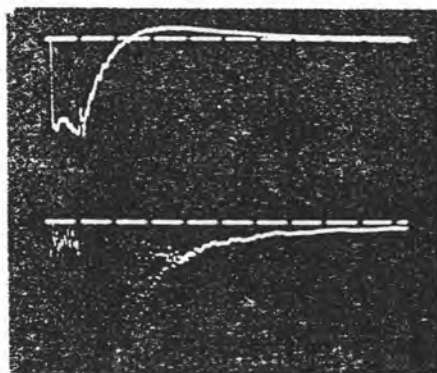
ออสซิลโลแกรมที่แสดงในตัวอย่างลำดับขั้นทดสอบ BIL บนหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังตามรูปที่ 2.12, 2.13 เป็นภาพที่ได้จากการบันทึกด้วยกล้องโพลาลอยด์บนออสซิลโลสโคปแบบแอนะล็อก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยออสซิลโลแกรมรูปแรกของการทดสอบเป็นภาพการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดัน ให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานยอมรับ โดยการใช้สเกลทางเวลาเป็น 1 μsec เพื่อตรวจวัดหน้าคลื่นและ 10 μsec เพื่อตรวจวัดหลังคลื่น สำหรับออสซิลโลแกรมลำดับขั้นตอนการทดสอบนั้น ปกติจะเป็นการตรวจวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแสในเวลาเดียวกัน โดยที่รูปบนจะเป็นแรงดันบันทึกด้วยสเกลทางเวลา 10 μsec เพื่อให้สามารถใช้ตรวจความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรระหว่างขดลวด และรูปล่างเป็นกระแสบันทึกด้วยสเกลทางเวลาเป็น 25 μsec และ 50 μsec ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาที่มีค่ากระแสสูงสุดเนื่องจากการตรวจสอบความผิดปกติของหม้อแปลงที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จำเป็นต้องตรวจสอบในบริเวณที่กระแสมีค่าสูงสุด

2.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

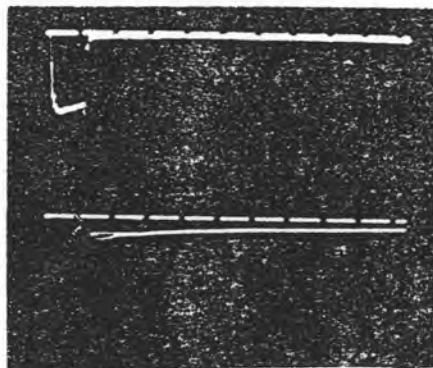
การวิเคราะห์ผลการทดสอบ BIL เพื่อวินิจฉัยว่าหม้อแปลงมีคุณภาพได้เกณฑ์ตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ จะอาศัยพิจารณาจากออสซิลโลแกรมของแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบขณะป้อนแรงดันอิมพัลส์ โดยการเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันและกระแสระหว่างรูปคลื่นที่ได้จากแรงดันทดสอบลดระดับประมาณ 50-75% (RW) กับรูปคลื่นที่ได้จากแรงดันทดสอบที่กำหนด 100% (FW) หรือเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นที่ระดับแรงดันที่กำหนดหลายครั้งต่อเนื่องกันคือ เปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสกับรูปคลื่นกระแส และรูปคลื่นแรงดันกับรูปคลื่นแรงดัน โดยมีเกณฑ์ว่ารูปคลื่นจะต้องเหมือนกันทุกประการ ไม่มีข้อแตกต่างกันแม้แต่จุดเล็ก ๆ ในกรณีที่มีจุดสังเกตที่ผิดปกติ หรือมีความแตกต่างเกิดขึ้นนั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าหม้อแปลงไม่สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าตามที่มาตรฐานกำหนดได้ โดยที่การวินิจฉัยตัดสินการทดสอบลักษณะนี้ต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์สูงเป็นพิเศษ เพราะความแตกต่างนั้นอาจเนื่องมาจากสิ่งรบกวนต่าง ๆ ได้มากมายหลายประการซึ่งต้องตรวจสอบให้แน่ชัด

2.5.1 การเปรียบเทียบภาพถ่ายแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม

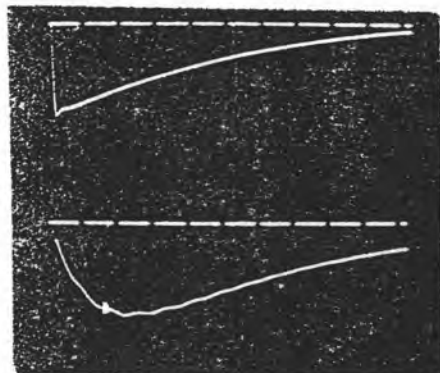
ออสซิลโลแกรมของรูปคลื่นแรงดันทดสอบ มักจะไม่ค่อยมีความไวต่อการตรวจจับความผิดพร่อง ฉะนั้นการตรวจจับโดยดูจากรูปคลื่นแรงดันคลาดเคลื่อนไปจะใช้ได้สำหรับกรณีที่เกิดผิดพร่องในฉนวนสำคัญและค่อนข้างมาก เช่นกรณีของความผิดพร่องลงดินในฉนวนสำคัญที่ใกล้ขั้วขดลวดที่ป้อนแรงดัน จะทำให้เกิดการหักหรือคลื่นตัดอย่างกะทันหันดังเช่น รูปที่ 2.14 ข) เกิดการเสียหายฉนวนปล้นที่ปลอกฉนวนนำสายลงดิน หรือกรณีที่มีการเกิดวาทไฟตามผิวขั้วขดลวดหรือลัดวงจรบางส่วน จะทำให้อิมพีแดนซ์ของขดลวดลดลง เป็นผลให้เวลาช่วงหางคลื่นสั้นลง กระแสจะเพิ่มมากขึ้นดังเช่นในรูปที่ 2.14 ง) เป็นต้น



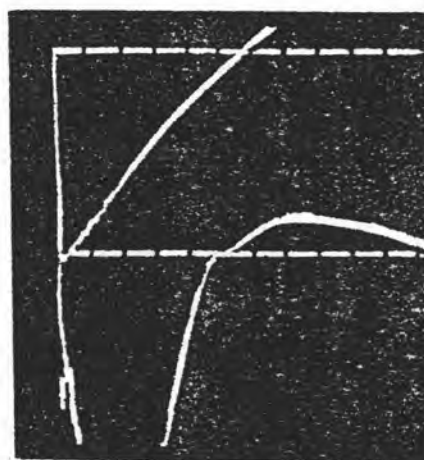
ก) เกิดการเสียหายฉนวนปล้นที่ขั้วภายนอกหม้อแปลง



ข) เกิดการเสียหายฉนวนปล้นที่ปลอกฉนวนนำสายลงดิน



ค) เกิดการคายประจุบางส่วนบริเวณสายนำภายในหม้อแปลง



ง) เกิดการลัดวงจรระหว่างขดลวดภายในหม้อแปลง

รูป 2.14 ภาพตัวอย่างรูปคลื่นที่ไม่สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าได้

2.5.2 การเปรียบเทียบภาพถ่ายกระแส (แรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็ม)

ออสซิลโลแกรมรูปคลื่นกระแสจะมีความไวมากที่สุด สำหรับการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นในหม้อแปลง อย่างไรก็ตามความไวในการตรวจจับนี้ก็ไวต่อสิ่งรบกวน จึงต้องใช้ความละเอียดในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงอย่างมากของรูปคลื่นกระแสจะเป็นสิ่งชี้บ่งถึงการเกิดเสถียรภาพฉนวนพันในฉนวนของขดลวดหรือลงดิน ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอาจจะใช้เป็นที่ชี้แนะถึงชนิดและตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติ
