

หน่วยที่ 10 การวัดความสัมพันธ์ของการฉนวน

Unit 10 Relation of Insulation

การจัดความสัมพันธ์ของฉนวนจะต้องมีแฟกเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบ เช่น แรงดันของระบบ ระดับแรงดันป้องกัน ซึ่งการออกแบบระบบโดยพิจารณาแฟกเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ฉนวนทำงานได้ดีและเหมาะสมจะเรียกว่า การจัดความสัมพันธ์ของการฉนวน

10.1 ระดับแรงดันของระบบ (System voltage level)

10.1.1 ระดับแรงดันสูงที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ตามมาตรฐานนานาชาติ (International Electrotechnical Commission : IEC) แบ่งได้ดังนี้

- 1) แรงดันสูง (High voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 1 kV จนถึง 230 kV
- 2) แรงดันสูงพิเศษ (Extra high voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 230 kV จนถึง 765 kV
- 3) แรงดันสูงยิ่งยวด (Ultra high voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดสูงกว่า 765 kV

10.1.2 ระดับแรงดัน ตามมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (American National Standards Institute : ANSI) แบ่งได้ดังนี้

- 1) แรงดันต่ำ (Low voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 120/240 V (1 เฟส) จนถึง 600 V
- 2) แรงดันปานกลาง (Medium voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 2.4 kV จนถึง 69 kV
- 3) แรงดันสูง (High voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 115 kV จนถึง 230 kV
- 4) แรงดันสูงพิเศษ (Extra high voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 345 kV จนถึง 765 kV

1

10.1.3 ระดับแรงดันในประเทศไทย แบ่งได้ดังนี้

- 1) แรงดันต่ำ (Low voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาด 220/380 V หรือ 220/440 V
- 2) แรงดันปานกลาง (Medium voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 11 kV จนถึง 33 kV
- 3) แรงดันสูง (High voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 69 kV จนถึง 230 kV
- 4) แรงดันสูงพิเศษ (Extra high voltage) หมายถึง แรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 500 kV ขึ้นไป

นอกจากนี้มาตรฐานดังกล่าวยังกำหนดระดับมาตรฐานตามรูปร่างของเส้นแรงดัน (Standard voltage shapes) ดังนี้

- แรงดันความถี่กำลัง ชั่วเวลาสั้นมาตรฐาน (Standard short-duration power-frequency voltage) คือ แรงดันรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ระหว่าง 48 Hz ถึง 62 Hz ชั่วเวลา 60 วินาที
- แรงดันอิมพัลส์สวิตช์มาตรฐาน (Standard switching impulse) เป็นแรงดันอิมพัลส์ที่มีความถี่แคบยอด (Time to peak) 250 μ s และเวลาถึงกลางค่ายอด (Time to half-value) 2,500 μ s
- แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน (Standard lightning impulse) เป็นแรงดันอิมพัลส์ที่มีความถี่แคบยอด (Front time) 1.2 μ s และ เวลาถึงกลางค่ายอด (Time to half-value) 50 μ s
- แรงดันอิมพัลส์สวิตช์รวมมาตรฐาน (Standard combined switching impulse) เป็นแรงดัน

อิมพัลส์รวมมีส่วนประกอบปริมาณค่ายอดเท่ากันและมีส่วนประกอบชั่วเวลาต่างกัน อิมพัลส์สวิตช์มาตรฐานและประกอบชั่วเวลาเป็นแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ที่มีความถี่แคบยอดและเวลาถึงกลางค่ายอดเหมือนกับอิมพัลส์ฟ้าผ่าปริมาณค่ายอดของแรงดันเป็นค่ารวมจากผลรวมของปริมาณค่ายอดของทั้งสองส่วนประกอบ

2

ตารางที่ 10.1 ประเภทของแรงดัน แบ่งตามลักษณะและเวลาของตัวของรูปคลื่นแรงดันตามมาตรฐาน IEC 60071-1(1993)

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow - front	Fast - front	Very - fast - front
Voltage shape					
Range of voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0.03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_1 > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0.1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_1 > 3 \text{ ns}$ $0.2 \text{ MHz} < f < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ MHz} < f < 300 \text{ MHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Standard voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ T_1 *)	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_1 = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*)
Standard withstand test	*)	Short-duration power-frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	*)

*) To be specified by the relevant apparatus committees

3

ตารางที่ 10.2 ชนิดของแรงดันไฟฟ้า และรูปแบบสนามไฟฟ้า และการใช้งานแรงดัน

DC-Voltage		AC-Voltage		Impulse-Voltage		Transient	
Smoothing	Switching Operation	VLF 0.1Hz	AC 50Hz	AC 100Hz	Switching Impulse	Lightning Impulse	Breakdown
Month, Day	hr, min	$T = 10\text{s}$	$T = 20\text{s}$	$T = 10\text{ms}$	250/2500 μs	1/250 μs	μs
Stationary		Quasi-Stationary				Electromagnetic Wave	
$(J \neq K, E)$		$(J \neq K, E)$					
Quasi-Stationary (Dielectric Displacement Field)							
		Capacitive mode		$(D \neq E, E)$			
HVDC Transmission System Laser, Laser Monitor		Cable Test Voltage	HVAC Transmission System	Transformer Test Voltage	Switching Impulse Test Voltage	Lightning Impulse Test Voltage	Medium Technical
							Fast Transient Nuclear Impulse (FDI - impulse)

4

10.2 ศัพท์เทคนิคที่เกี่ยวข้องกับฉนวน

- 1) BIL (Basic Impulse Insulate Level) เป็นค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า
- 2) SIL (Switching Impulse Insulate Level) จะเหมือนกับ BIL เพียงแต่จะเป็นค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตช์
- 3) Flashover หรือการพาไฟตามผิว
- 4) Sparkover จะเป็นการเกิดประกายไฟผ่านฉนวนก๊าซหรือฉนวนของเหลว
- 5) Puncture หรือการเจาะผ่าน เป็นการทดสอบแบบทำลาย
- 6) Direct Strike หรือปรากฏการณ์ฟ้าผ่าแบบผ่าตรง
- 7) Indirect Strike หรือปรากฏการณ์ฟ้าผ่าแบบโดยอ้อม
- 8) Operating or switching overvoltage เป็นแรงดันที่เกิดขึ้นจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือการสวิตช์
- 9) External insulation หรือฉนวนภายนอก
- 10) Internal insulation หรือฉนวนภายใน
- 11) Self-restoring insulation หรือฉนวนคืนสภาพเอง
- 12) Non-self-restoring insulation หรือฉนวนแบบไม่คืนสภาพตัวเอง

5

10.3 การทดสอบฉนวนด้วยไฟฟ้าแรงสูง

10.3.1 การทดสอบลูกถ้วยฉนวน

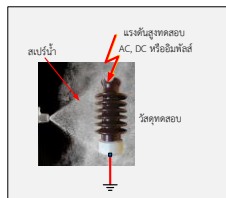
- 1) การทดสอบเฉพาะแบบ (Type test) หมายถึง การทดสอบเพื่อตรวจสอบหรือพิสูจน์ว่าลักษณะการออกแบบมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่

สภาพแห้ง (Dry test) หมายถึง ด้วยสภาพทดสอบอยู่ในสภาพแห้ง ทดสอบในสภาวะอากาศทั่วๆ ไป โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน



6

สภาพเปียก (Wet test) หมายถึง การทดสอบฉนวนโดยเลียนแบบสภาวะการใช้งานในสภาพเปียกฝน เป็นการทดสอบเสมือนการใช้งานจริงตามธรรมชาติที่มีผลต่อฉนวน โดยการพ่นน้ำเข้าไปขณะทดสอบ โดยคุณลักษณะของน้ำที่ใช้พ่นต้องผ่านการทดสอบมาก่อน เป็นน้ำที่อุณหภูมิห้อง ค่าความนำความมาตรฐาน โดยอาจจะเป็นการจำลองปริมาณและทิศทางการตกของฝน



- 2) การทดสอบรับรอง (Acceptance test) หมายถึง การตรวจสอบตัววัสดุอุปกรณ์ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่ายังมีคุณภาพได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่
- 3) การทดสอบประจำ (Routine test) หมายถึง การทดสอบที่ทำเป็นประจำในโรงงาน เป็นการทดสอบกับลูกถ้วยฉนวนทุกลูก เพื่อตรวจสอบลูกถ้วยนั้นไม่มีความบกพร่องจากการผลิต

7

10.3.2 การทดสอบฉนวนนำสายไฟแรงสูง

ทดสอบฉนวนนำสายหรือบูชิ่ง มี 2 แบบ คือ แบบคาปาซิเตอร์ และแบบไม่เป็นคาปาซิเตอร์ โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน

10.3.3 การทดสอบเคเบิลแรงสูง

- 1) การหาค่าแพคเตอร์พลังงานสูญเสียได้โดยเลคตริก วัดได้ด้วย Schering bridge ที่แรงดันต่างๆ ตั้งแต่ 0.5 จนถึง 2.5 เท่าของแรงดันที่กำหนดของเคเบิล (แรงดันเฟสของเคเบิล)
- 2) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ฉนวนทดสอบด้วยแรงดันกระแสไฟฟ้าสลับความถี่พลังงานแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์
- 3) การวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD) โดยวัด PD อยู่ในเทอมของแรงดันทดสอบด้วยเครื่องตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่มีความถี่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 40 kHz ถึง 400 kHz



8

10.3.4 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

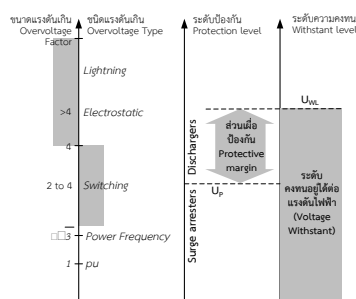
การทดสอบความทนต่อแรงดันเกินเหนี่ยวนำ ป้อนแรงดันความถี่สูง (100-400 Hz) เข้าทางด้านแรงดันต่ำขนาด 2 เท่าของแรงดันที่กำหนด เพื่อลดการอิมพัลส์ของแกนเหล็กและจำกัดกระแสหรือขนาดของหม้อแปลงตัวง่าย

- 1) การวัดดิสชาร์จบางส่วน เพื่อตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จภายใน
- 2) การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ (BIL) มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความทนอยู่ได้ของฉนวนหม้อแปลงต่อแรงดันไฟฟ้าเกินหวั่นเขียนขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่า เพราะแรงดันหวั่นเขียนอิมพัลส์รูปคลื่นที่ผ่านความชันช่วงเพิ่มขึ้นสูง แรงดันกระจายจะไม่เท่ากันตลอดแนวยาวของขดลวด



9

10.4 จุดประสงค์ของการจัดความสัมพันธ์ของการฉนวน



แสดงหลักการการจัดสัมพันธ์ของการฉนวน (Insulation coordination principle)

10

ตารางที่ 10.3 ระดับการฉนวนมาตรฐานช่วงที่ 1 (Standard insulation levels for range I)
(1 kV < $U_m \leq 245$ kV)

Highest voltage for equipment U_m (kV) (r.m.s. value)	Standard short-duration power-frequency withstand voltage (kV) (r.m.s. value)	Standard Lightning impulse withstand voltage (kV) (peak value)
3.6	10	20
7.2	20	40
12	28	60
		75
		95
17.5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72.5	140	325

11

ตารางที่ 10.3 ระดับการฉนวนมาตรฐานช่วงที่ 1 (Standard insulation levels for range I)
(1 kV < $U_m \leq 245$ kV) (ต่อ)

123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1,050

NOTE - If value in brackets are considered insufficient to prove that the required phase to phase withstand voltage are met, additional phase to phase withstand test are needed.

12

ตารางที่ 10.4 ระดับการฉนวนมาตรฐานช่วงที่ 2 (Standard insulation levels for range II)
($U_m > 245$ kV)

Highest voltage for equipment U_m (kV) (r.m.s. value)	Standard switching impulse withstand voltage			Standard lightning impulse withstand voltage (kV) (peak value)
	Longitudinal insulation (note 1) (kV) (peak value)	Phase-to-earth (kV) (peak value)	Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value)	
300	750	750	1.50	850
	750	850	1.50	950
362	850	850	1.50	950
	850	950	1.50	1,050
420	850	850	1.60	1,050
	850	950	1.50	1,175
	950	950	1.50	1,300
	950	1,050	1.50	1,425

13

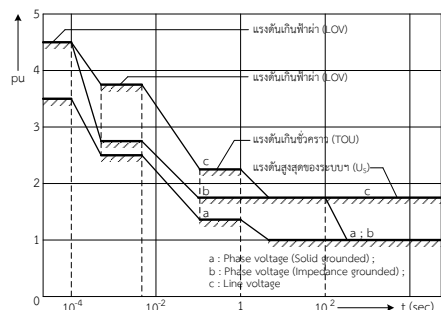
ตารางที่ 10.4 ระดับการฉนวนมาตรฐานช่วงที่ 2 (Standard insulation levels for range II)
($U_m > 245$ kV) (ต่อ)

Highest voltage for equipment U_m (kV) (r.m.s. value)	Standard switching impulse withstand voltage			Standard lightning impulse withstand voltage (kV) (peak value)
	Longitudinal insulation (note 1) (kV) (peak value)	Phase-to-earth (kV) (peak value)	Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value)	
525	950	950	1.70	1,175
	950	1,050	1.60	1,300
	950	1,175	1.50	1,425
765	1,175	1,300	1.70	1,550
	1,175	1,425	1.70	1,657
	1,175	1,550	1.60	1,800
	1,175	1,650	1.60	1,950

NOTES : 1. Value of the impulse component of the relevant combined test.

2. The introduction of $U_m = 550$ kV (instead of 525 kV), 800 kV (instead of 765 kV), 1,200 kV, of a value between 765 kV and 1,200 kV, and of the associated standard withstand voltage, is under consideration.

14



แสดงชนิดและระยะเวลาของแรงดันที่เป็นภาระของฉนวน ของระบบ $U_m = 123$ kV

15

10.5 ระดับแรงดันคงทนอยู่ได้ของการฉนวน (Withstand voltage)

แรงดันเกินฟ้าผ่า จะมีความรุนแรงหรือความเสียหายต่อฉนวนอุปกรณ์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณประจุที่สะสมในฉนวน เมื่อประจุสะสมมากแรงดันก็จะสูง
- ชนิดของฟ้าผ่า เป็นแบบฟ้าผ่าบวก หรือฟ้าผ่าลบ แต่โดยเฉลี่ยกระแสฟ้าผ่าประมาณ 22 kA
- แรงดันเกินสวิตช์ จะมีความรุนแรงมากขึ้นขึ้นอยู่กับ
- พารามิเตอร์ของระบบ (System parameter) เช่น ความต้านทาน (R) เป็นตัวนำวงนอกขนาดแรงดัน, ความเหนี่ยวนำ (L) และความจุไฟฟ้า (C) เป็นตัวทำให้รูปร่างของรูปคลื่นเปลี่ยน
- วิธีการในการสวิตช์ (Switching method) จะให้ดีที่สุดคือสวิตช์ที่แรงดันเป็นศูนย์ ซึ่งทำได้ยาก

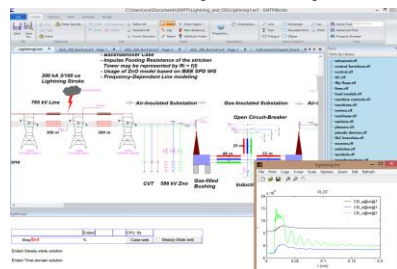
10.5.1 การหาค่าแรงดันคงทนอยู่ได้โดยวิธีการทดสอบชนิดของแรงดันที่จะทดสอบขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้งานและชนิดของฉนวน แบ่งได้เป็นดังนี้

- การทดสอบหาค่าความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าบนฉนวน แบบพื้นดินสภาพตนเองได้ (Self restoring) หรือมีส่วนผสมระหว่างฉนวนพื้นดินสภาพเองได้กับฉนวนพื้นดินสภาพเองไม่ได้
- การทดสอบหาค่าความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์สวิตช์ จะทดสอบกับอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้กับระบบที่แรงดันสูงกว่า 300 kV
- การทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่พลังงานเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งเป็นการทดสอบผลกระทบจากแรงดันเกินชั่วครู่

16

10.5.2 การหาค่าแรงดันคงทนอยู่ได้โดยวิธีเชิงสถิติ

เนื่องจากค่าทางสถิติจะต้องใช้ข้อมูลค่อนข้างมาก เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ ซึ่งมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปมาช่วยหาการกระจายเชิงสถิติของแรงดันเกินทั้งแบบฟ้าผ่าและแบบสวิตช์ซึ่งได้ เช่น โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program)



แสดงโปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transient Program)

17