

บทที่ 6 overvoltage

1. over voltage

ทุกครั้งที่เราพูดถึงเรื่อง voltage stress ที่ insulation จะได้ยินคำเหล่านี้เสมอ

1. nominal system voltage เป็นค่าแรงดัน rms ของ phase to phase ของระบบที่ออกแบบไว้ เช่น 525, 230, 115...kV
2. highest system voltage เป็นค่าแรงดัน rms ของ phase to phase ซึ่งคาดว่าอาจเกิดขึ้นได้ในสภาวะปกติเช่น 550, 242, 121...kV ค่านี้จะไม่รวมถึงสภาวะที่เกิด over voltage เนื่องจาก fault หรือ load rejection
3. highest voltage for equipment เป็น over voltage ที่กำหนดไว้สำหรับ equipment ค่าที่ระบุจะต้องมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าค่าที่ระบุในข้อ 2

1.1 การจำแนก over voltage

นอกจาก nominal power frequency voltage 50 Hz แล้ว ยังมี over voltage ชนิดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น และมีผลกระทบต่อ insulation ของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบ ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

- power frequency over voltage
- over voltage เนื่องจาก ferro-resonance
- switching over voltage
- lightning over voltage

1.1 power frequency over voltage

ขนาดของ power frequency over voltage จะไม่สูงมากนัก อย่างไรก็ตามอาจเกิดขึ้นได้นาน 20-30 วินาที เรียกว่า temporary over voltage จะมีผลกับพวก surge arrester, และ polluted line insulator เป็นต้น สาเหตุการเกิดมักมาจาก เกิด ground fault หรือ load rejection

ground fault

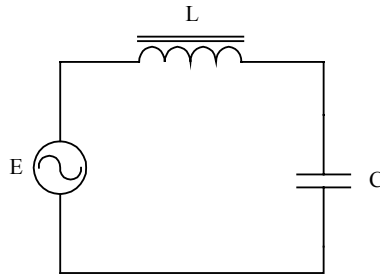
ขณะที่เกิด single line to ground fault หรือ double line to ground fault อาจทำให้เกิด over voltage ใน phase ที่เหลือ ที่เรียกว่า healthy phase ได้ สามารถคำนวณหา over voltage นี้ได้ด้วยวิธีใช้ symmetrical component ค่า over voltage to ground ใน healthy phase เมื่อระบบเป็นชนิด isolated neutral อาจเกิดขึ้นสูงถึง line to line voltage ในระบบที่เป็นชนิด effectively ground system จะมี over voltage ที่จุด fault น้อยกว่า 1.5 เท่า ซึ่งขึ้นอยู่กับ zero sequence impedance ของระบบ ช่วงเวลาที่ over voltage ขึ้นอยู่กับ fault clearing time ของ circuit breaker แต่ระดับแรงดันก็จะแตกต่างกันไป

load rejection

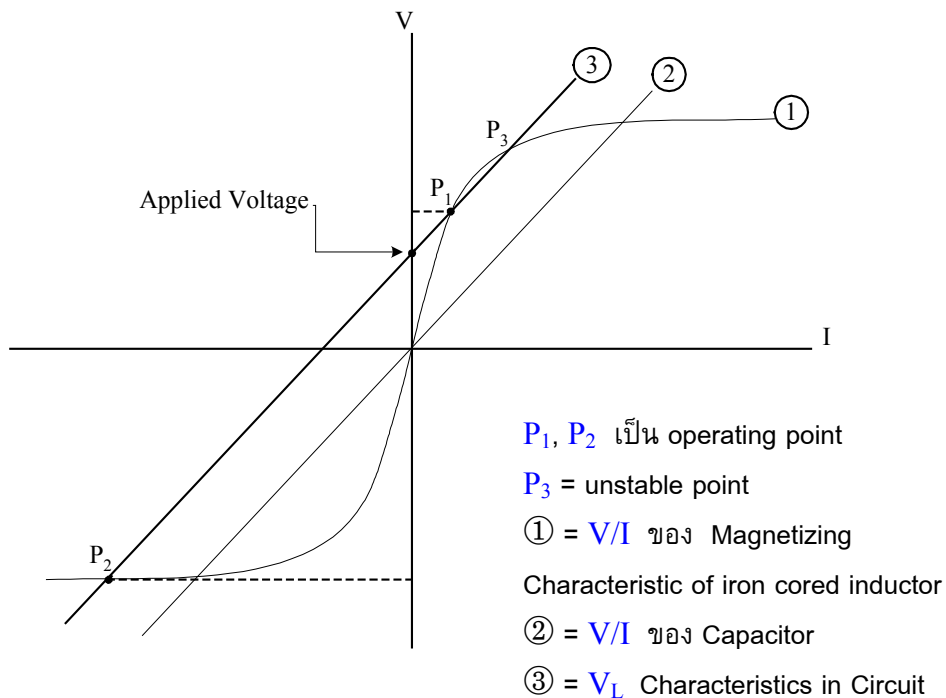
ขณะที่ load ใหญ่ๆ ถูกปลดออกจากระบบ จะทำให้เกิด over voltage ขึ้นที่ terminal ที่ load ต่ออยู่ หรือที่ terminal ของ generator ซึ่งจะสูงขึ้นโดยฉับพลันในช่วงแรก และจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนไปถึงจุด steady-state open circuit กรณีนี้จะมี automatic voltage regulator (AVR) เป็นตัวปรับสภาพแรงดัน ในขณะที่เดียวกัน speed ของ generator จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และมีผลกับ frequency ซึ่งจะมี governor เป็นตัวปรับและควบคุม

1.2 over voltage เนื่องจาก ferro-resonance

ferro-resonance อาจเกิดขึ้นได้เมื่อระบบที่มี low impedance ต่ออนุกรมกับอุปกรณ์ที่มีแกนเหล็ก iron core เป็นองค์ประกอบ และมี capacitance ดังรูป 1



รูปที่ 1 แสดง Equivalent Circuit ของวงจร Ferro-resonance



รูปที่ 2 แสดง V/I Characteristic ของวงจร Ferro-resonance

ถ้า E คือ sinusoidal voltage, V_L และ V_C เป็น voltage drop คร่อม L และ C ตามลำดับ เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E = V_L + V_C \dots\dots\dots (1)$$

$$V_C = -jI/\omega C \dots\dots\dots (2)$$

$$V_L = E + jI/\omega C \dots\dots\dots (3)$$

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็น V-I characteristic ของ L และ C ร่วมกัน และเส้นตรง ③ แสดงการเปลี่ยนแปลงของ V_L ตาม equation (3) จากรูปจะเห็นว่า จุด P_1 , P_2 และ P_3 จะเป็นจุดที่มีโอกาสเป็นไปได้ในสมการ V_L แต่จากการพิจารณาถึงจุดสมดุล (stable) พบว่าจะมีเพียงจุด P_1 และ P_2 เท่านั้น ส่วน P_3 จะไม่ stable เนื่องจากหากมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเพียงเล็กน้อย component ของ V_L และ V_C จะไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของ source voltage

P_1 แสดงสภาพ $V_L \cong E$ เมื่อแรงดันเกิดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด จุดทำงานจะวิ่งไปที่จุด P_2 ที่ทำให้ ferro-resonance อาจเกิดขึ้นได้ ตัวอย่างของ circuit ที่อาจเกิด ferro-resonance คือ

- single phase switching ของ fuse, เมื่อ fuse ขาด, หรือ conductor ขาดจะเกิด ferro-resonance circuit ระหว่าง cable กับ transformer
- PT ผ่าน grading capacitor ของ HV circuit breaker หรือ stray capacitance ของ breaker ใน GIS
- capacitive coupling ระหว่าง HV line ที่มี PT หรือ unloaded transformer ที่อยู่ปลายสาย
- ในวงจร CVT เมื่อเกิด fault ทางด้าน secondary circuit แล้ว fuse ด้าน secondary circuit ขาดตัดกระแสลัดวงจร เป็นต้น

แรงดันที่ปรากฏที่ secondary terminal จะมีรูปร่างเปลี่ยนไป เกิด distortion ไม่เป็น sine wave เนื่องจากมี component ของ harmonics หรือ sub-harmonic ที่เป็น even order ปนอยู่ การศึกษา ferro-resonance จำเป็นต้องมี characteristic ของ iron core ประกอบการคำนวณ

1.3 switching over voltage

over voltage ที่เกิดจากการทำ switching อาจสูงถึง 4 เท่าของ rated system voltage และ wave shape อาจมีลักษณะ fast oscillation ผสมกับ sine wave ของ power frequency voltage เรียกว่า transient switching over voltage

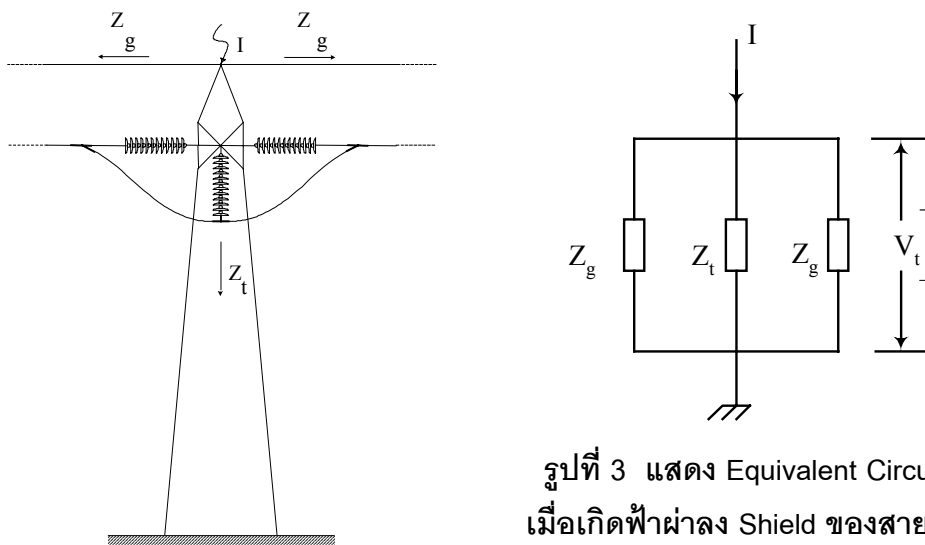
เหตุการณ์ที่สามารถทำให้เกิด over voltage ขึ้นในระบบ ได้แก่ three phase fault, short line fault, ปลด unloaded line หรือ energize capacitor bank, line และ magnetizing current chopping ของ air blast breaker เป็นต้น

1.4 lightning over voltage

lightning characteristic ขณะที่เกิดฟ้าผ่า (lightning stroke) จะมีกระแสไหลจากเมฆที่มีประจุ charge สูงไหลลงสู่พื้นดิน ประจุทั้งบวก และลบสามารถไหลลงดินได้ แต่ stroke ส่วนใหญ่จะเป็นประจุลบ ฟ้าผ่า 1 ครั้งอาจประกอบด้วยหลายๆ stroke ต่อเนื่องกัน ช่วงเวลาระหว่าง stroke จะอยู่ระหว่าง 1-100 millisecond กระแสจะมีทิศทางเดียว และมีลักษณะเพิ่มขึ้นถึง peak อย่างรวดเร็วในช่วงแรก อาจมีกระแสสูงถึง 1-100 kA เกิดขึ้นภายใน 1-10 microsecond และการลดลงจะช้ากว่าช่วงแรก ทั่วไปช่วงเวลาที่กระแสลดลงครึ่งหนึ่งจะใช้เวลาประมาณ 20-50 microsecond การคำนวณกระแสของฟ้าผ่าจะใช้สถิติและโอกาสที่จะเกิดขึ้น จำนวน stroke ขึ้นอยู่กับความสูงของสายส่ง และจำนวนวันในหนึ่งปีที่มีฝนตกฟ้าคะนอง (thunder day) หรือ เรียกว่า isokeraunic level ตรงบริเวณตำแหน่งที่พิจารณา แรงดันที่เกิดขึ้นจะมีค่า และความชันของรูปคลื่นสูงมากจึงเป็น transient over voltage

1.4.1 การคำนวณ lightning over voltage เมื่อมี stroke บน shield line

สายส่งแรงสูงจะมี overhead ground wire อยู่ส่วนบนคลุมเหนือ line conductors และจะต่อลงดินที่ทุกๆ tower structure แต่ในระบบสายส่ง 500 kV จะมีการ isolated เป็นช่วงๆ ขณะที่เกิดฟ้าผ่าจะผ่าลงบน ground wire กระแสจะไหลผ่าน ground wire ไปยัง tower ทั้ง 2 ด้าน และไหลลงดินผ่าน structure ซึ่งต้องสร้าง low impedance path เพื่อป้องกันการเกิด back flashover ของ phase insulator บางครั้ง จะมี stroke ที่ลอดผ่าน overhead ground wire (shielding) มาสู่ phase conductor ได้ เราเรียกว่า shielding failure โอกาสที่จะเกิด shielding failure จะมีสูงขึ้นเมื่อเสาสูงขึ้น และ shielding angle มากขึ้น แต่ shielding failure จะลดลง เมื่อ stroke มีกระแสต่ำ จำนวนครั้งของ shield failure ต่อ 100 km-year ของสายส่งจะขึ้นอยู่กับ isokeraunic level, ความสูงเฉลี่ยของสายส่ง, shielding angle และ insulation level ของลูกถ้วยสายส่ง ขณะที่ฟ้าผ่าลงมาที่เสาของสายส่งที่มี shield กระแสจะแบ่งระหว่าง ground wire และเสา tower ดังรูป 3



รูปที่ 3 แสดง Equivalent Circuit เมื่อเกิดฟ้าผ่าลง Shield ของสายส่ง

ขณะที่ฟ้าผ่าลงมาที่เสาของสายส่งที่มี shield conductor กระแสจะแบ่งระหว่าง ground wire และเสา tower ดังรูป 3

$$V_t = \frac{IZ_t}{1 + \frac{2Z_t}{Z_g}}$$

$$\frac{IZ_t \cdot \frac{Z_g}{2}}{\frac{Z_g}{2} + Z_t} = \frac{IZ_t}{1 + \frac{2Z_t}{Z_g}}$$

แรงดันคร่อม tower ที่จุดบนสุดที่ถูก stroke = V_t

I = stroke current

Z_g = surge impedance ของ overhead ground wire มีค่า $\approx 400 \Omega$

Z_t = surge impedance ของ tower ใช้ค่าประมาณ 100Ω

ในช่วงเวลาต่อมาหลังจากเกิด stroke บนยอดเสาจะมี reflect wave จากฐานของ tower และจาก tower ถัดไปทั้ง 2 ด้านกลับมาที่ยอดเสาที่ฟ้าผ่าลง ทำให้แรงดันของ tower V_t ลดลง induced voltage kV_t จะปรากฏบน phase conductor ของสายส่งในขณะนั้น wave ของประจุวิ่งไปสู่เสาต้นข้างเคียงทั้งซ้าย และขวา ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม line insulator มีค่าเท่ากับ V

$$V_i = V_t - kV_t = V_t(1-k)$$

$$V_i = \frac{IZ_t}{1 + \frac{2Z_t}{Z_g}}(1-k)$$

k factor คือ coupling factor ทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.3 ถ้า V_i สูงมากๆ จะเกิด flashover ข้าม insulator หรือเรียกว่า back-flashover จาก tower มายัง phase conductor และจะเกิดแรงดันที่มีความชันวิ่งตาม conductor ไปยัง tower ถัดไป

steep-fronted-wave voltage surge เกิดขึ้นบน conductor ขณะที่เกิด back-flashover จะมี surge ชนิดนี้วิ่งไปทั้ง 2 ด้านของ phase conductor ระบบจะเห็น ground fault อย่างไรก็ตาม ชั่วคราว clear fault จะนาน 2-3 cycle ซึ่ง surge ที่วิ่งอยู่ใน phase conductor ที่มีความเร็วเท่าแสง จะวิ่งไปถึงสถานีทั้ง 2 ฝ่าย เมื่อ breaker open เพื่อ clear fault อาจเกิด multi stroke ตามมาอีกครั้ง ยังมีโอกาสที่ฟ้าผ่าลงกลาง ground wire ที่เรียกว่า stroke on the mid span จะเกิดแรงดันที่มีขนาด $V_g = I Z_g/2$ วิ่งไปทั้ง 2 ด้าน ออกจากจุดที่ถูก strike induced voltage ที่

เกิดขึ้นที่ phase conductor ที่อยู่ใกล้ ground wire มีค่าเท่ากับ kV_g ทำให้เกิดแรงดันต่างกันระหว่าง ground wire และ phase wire มีค่า V

$$V = V_g - kV_g = V_g(1-k) = IZ_g(1-k)/2$$

เมื่อ wave ของแรงดันวิ่งมาถึง tower จะพบว่าจุดนั้นมี surge impedance ที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) impedance ดังกล่าว คือ เสา และ ground wire ที่ต่อออกจาก tower ทั้งสองด้าน จึงทำให้เกิด reflect ของ wave และลดแรงดันที่ tower เราสามารถเขียนแรงดันของเสาขณะนั้นได้ คือ induced voltage บน phase conductor จะมีค่า kV_t และแรงดันคร่อมลูกถ้วย

$$V_i = \frac{IZ_t}{1 + \frac{2Z_t}{Z_g}}(1-k)$$

จะเห็นว่าค่าเท่ากับกรณีเกิด stroke บนเสา tower แรงดันที่ต่างกันระหว่าง ground wire กับ phase conductor ที่ตรงกลาง span จะสูงกว่า V_i กรณี stroke ที่เกิดขึ้นมีกระแสสูงอาจเกิด back flashover ได้ทั้งกรณีที่เกิด stroke บนเสา หรือ mid span อย่างไรก็ตาม back flashover มักเกิดขึ้นเมื่อ stroke เกิดขึ้นบน tower

1.4.2 การลดขนาด over voltage เนื่องจากฟ้าผ่าที่มีผลกับอุปกรณ์

shielding

ใช้ ground wire shield สายส่ง เพื่อป้องกัน direct stroke ที่มีกระแสสูง ช่วยทำให้ propagated wave ที่วิ่งเข้าหาสถานีไฟฟ้ามี magnitude ลดลง

propagated wave มี 2 ลักษณะคือ

- induced stroke ที่เกิดขึ้นบน phase conductor
- back-flashover จาก tower ข้าม insulator ไปสู่ phase conductor แรงดันที่ทำให้เกิด flashover ต้องมากกว่า CFO ของลูกถ้วย

เราสามารถลดโอกาสที่จะเกิด back flashover ได้โดยการทำให้ tower footing resistance ให้ต่ำลง ในสถานีจะมี overhead ground wire และ เสาล่อฟ้า เพื่อ shield ในสถานีเช่นกัน จึงป้องกัน direct stroke ลงอุปกรณ์ที่อยู่ใน switchyard ได้ และมี ground mesh ที่พื้นดินในสถานี และใน control room เพื่อป้องกันมิให้ touch/step voltage สูงจนเป็นอันตรายกับ operator หรือ ช่างบำรุงรักษา ใน switchyard จะโรยหินไว้เพื่อทำให้พื้นดินใน switchyard ขึ้นมีผลดีกับ ground resistance และเพิ่ม resistance ระหว่างคนกับดิน

surge arrester

ส่วนใหญ่ ANSI std. จะออกแบบติดตั้ง arrester ไว้ที่หน้าหม้อแปลง และกำหนดค่า BIL

ของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับ arrester ที่ติดตั้ง และต้องคำนึงถึงระยะห่างของอุปกรณ์กับ arrester เพราะอิทธิพลของ reflected wave จากการทำงานของ arrester ที่ตั้งอยู่หน้าหม้อแปลง แต่ IEC std. จะคำนึงถึงการป้องกันอุปกรณ์ ตั้งแต่จุดที่ line ต่อเข้าที่สถานีโดยจะติดตั้ง arrester ไว้ในทุก line ตรงตำแหน่งต่อเข้าสถานี ซึ่งจะทำให้ surge ที่เข้ามาถึงอุปกรณ์ในสถานีต่ำลง ซึ่งมีข้อดีกว่า ANSI std คือ เมื่อปลด line ออกแล้ว อุปกรณ์ที่ยังต่ออยู่กับ line เช่น CT, PT หรือ CVT จะยังมี arrester ป้องกันได้ เพราะในกรณีเกิด multi stroke อาจเกิดหลังจาก breaker open แล้วอาจทำให้อุปกรณ์เสียหาย และหลังจาก open สภาพ insulation ภายในของ breaker ยังไม่กลับสู่สภาพที่ทนแรงดันของ second stroke ได้ line arrester จึงป้องกันไม่ให้ breaker เกิด re-ignition