

บทที่ 9 Fault Analysis

1. บทนำ

จุดประสงค์ของเอกสารนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานในการคำนวณ fault current และอธิบายถึงการนำ fault analysis ไปใช้งานพิจารณาความเหมาะสมของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เช่น transformer, circuit breaker เป็นต้น

การคำนวณ fault level หรือ short circuit level มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลเรื่องกระแสและแรงดัน ขณะเกิด fault และนำไปพิจารณาอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานว่ามี rating ที่เหมาะสมเพียงใด circuit breaker ต้องมี rated capacity ที่เหมาะสมในการ closing onto fault หรือ interrupting fault current ได้ อุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ในส่วนที่ fault current ไหลผ่าน เช่น bus bar, insulator, power transformer, current transformer, surge arrester, cable หรือ line ต้องสามารถทนสภาพการเกิด fault ทั้งกระแสและ/หรือ แรงดันในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น 1 sec หรือ 3 sec จนกว่า fault จะถูก clear ออกไปโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายทั้งจากความร้อนและ/หรือทางกล (overheating/mechanical damage) ระบบ ground ในสถานีซึ่งรวมถึง flexible ground ที่ operator/maintenance staff นำไปใช้งานชั่วคราวต้องเหมาะสมที่จะสามารถทนกระแส และไม่ทำให้ step/touch voltage เกินกว่าค่ากำหนด ผลจากการวิเคราะห์สามารถนำไปออกแบบระบบป้องกันที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้อุปกรณ์ที่เสียหายหรือการหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในวงกว้าง

ค่าจำกัดของ fault level ที่ระดับแรงดันต่างๆ มีไว้เพื่อการออกแบบอุปกรณ์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปริมาณ fault current หรือ impedance ของอุปกรณ์นั้น เช่น impedance ของสายส่ง, power transformer ที่ต่อเข้ากับระบบแรงดันตรงนั้น เช่น กฟผ. ได้กำหนด fault level ที่ระดับแรงดันต่างๆ เพื่อการจัดหาอุปกรณ์หม้อแปลงไว้ ดังนี้

525 kV system	:	45,000 MVA
230 kV system	:	30,000 MVA
115, 69 kV system	:	5,000 MVA
11, 22, 33 kV system	:	500 MVA

2. ลักษณะของ fault current

ลักษณะวงจรขณะเกิด fault อาจจะถูกกล่าวได้ว่าเป็นวงจร R-L circuit ที่ต่อกับ sinusoidal voltage source ทำให้กระแสขณะเกิด fault อาจมี DC component ซึ่งจะ decay ลงด้วย time constant ที่เป็นสัดส่วนกับ ratio ของ X/R ของวงจร ปริมาณของ DC component นี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาหรือมุมบนรูปคลื่น sine wave ของแรงดันขณะเกิด fault (instant in cycle) ถ้าหลัง

จากเกิด fault แล้ว circuit breaker ได้รับคำสั่งให้ open ในเวลาที่เหมาะสม ค่าของ DC component จะลดลงจนเหมาะสมกับการ interruption ของ breaker ฉะนั้นถ้า open เร็วไป จะต้องคำนึงถึง current interruption จะสูงเนื่องจาก DC component ซึ่งอาจใช้ factor คร่าวๆ เพื่อใช้คูณกับค่า symmetrical time ของ fault current ดังนั้นถ้า breaker มี opening time ที่ 2 cycles จะใช้ factor 1.4 ถ้า breaker มี opening time ที่ 3 cycles ใช้ factor 1.2 เป็นต้น ถ้านานเกิน 8-10 cycle ก็สามารถใช้ factor 1.0 ได้

กรณีเกิด fault ในระบบชนิด 3 phase พร้อมๆ กัน ขณะนั้นแรงดันไม่เท่ากันทุก phase อย่างน้อย 1 phase จะมี DC component รวมอยู่ด้วย และจะมีค่าสูงมากที่สุดใน phase ที่มีแรงดันของระบบใกล้เคียงศูนย์

สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ทำหน้าที่ interrupt fault current จำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องของ mechanical strength ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก fault current ด้วยเช่นกัน เช่น ขดลวดของ power/instrument transformer เป็นต้น ในกรณีนี้ค่าสูงสุดของแรงจะเกิดขึ้นในขณะทีกระแสเป็น first asymmetrical หรือ peak แรกของกระแสลัดวงจร ซึ่งจะมีทั้ง DC component และ symmetrical component รวมกัน

1.1 ชนิดของ fault และ เหตุการณ์

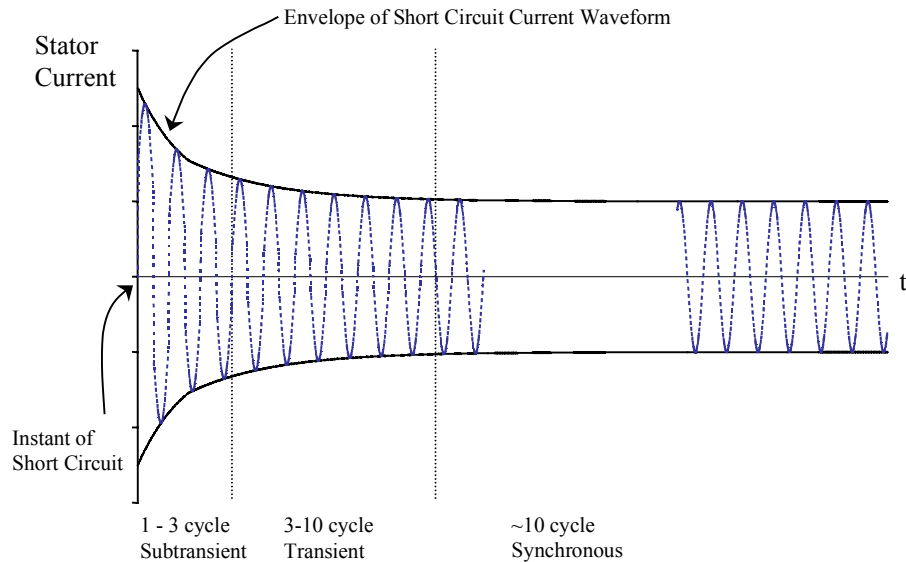
ในระบบที่แรงดันสูงกว่า 115 kV ขึ้นไป สายส่งมี phase spacing ที่กว้าง ฉะนั้น fault ส่วนใหญ่จะเกิดเป็นชนิด single-phase to ground เช่น จากฟ้าผ่า อุปกรณ์เกิด failure ขณะใช้งาน หรือ two-phase fault อาจเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก เช่น เกิดจากไฟไหม้ได้ สายส่ง เป็นต้น และ ชนิด three-phase fault มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมาก สาเหตุ อาจมาจากฟ้าผ่า เสาล้ม ไฟไหม้ได้สายส่ง หรือการที่ operator/ maintenance staff ลืมปลดสาย ground ออกหลังจากปฏิบัติงานเสร็จ ในระบบแรงดันที่ต่ำกว่า 115 kV อาจเกิด multi-phase fault ได้ง่ายขึ้น เนื่องจาก phase spacing ใกล้กัน

ระหว่าง fault ชนิด three-phase และ single-phase อาจมีกระแสที่ต่างกันก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับ system configuration คือ ถ้าตำแหน่งที่มีหม้อแปลงที่มีขดลวดต่อ ชนิด delta tertiary ต่ออยู่หลายๆ ตัว จะทำให้ fault current ของ single phase สูงกว่า three-phase fault เพราะ tertiary จะเป็นตัวที่ทำให้เกิด path ของ zero sequence current ที่มี zero sequence impedance ต่ำ และเมื่อต้องการเลือก breaker rating จะต้องใช้ค่า single phase to ground fault นี้เป็นข้อมูล

เราสามารถลด single phase to ground fault level ได้โดยการติดตั้ง neutral reactor เพื่อเพิ่ม impedance to ground ให้กับ zero-sequence current

1.2 Three-phase fault ที่ synchronous machine terminals

Impedance ของ generator ขณะเกิด fault จะไม่คงที่ แต่จะประกอบด้วย varying reactance ซึ่งช่วงแรกมีค่าต่ำ และเพิ่มขึ้นจนคงที่ envelope ของ stator current waveform ขณะเกิด three-phase fault ที่ terminal ของ generator สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 : แสดง Generator Short Circuit Current

3. Per unit system ที่ใช้ในการคำนวณ fault

ในการคำนวณ fault ขั้นแรกต้อง convert impedance ของทุกอุปกรณ์ในระบบให้มีค่า base เดียวกันก่อน ค่า per-unit system ที่ใช้เป็น common MVA base คือ 100 แต่เราสามารถสร้าง base ต่างๆ ได้ดังนี้

Nominal phase to phase voltage : kV_b

Rated หรือ 3 phase MVA : MVA_b

ดังนั้น base phase current เป็น kA : $kA_b = \frac{MVA_b}{\sqrt{3}kV_b}$

base phase impedance เป็น ohm : $Z_b = \frac{kV_b^2}{MVA_b} = \frac{kV_b}{\sqrt{3}kA_b}$

ดังนั้น เราสามารถเปลี่ยน impedance Z ให้เป็น per unit ได้โดย

$$Z_{pu} = \frac{Z(\Omega)}{Z_b} = \frac{Z(\Omega) \times MVA_b}{kV_b^2}$$

หรือ เปลี่ยน

$$Z(\Omega) = \frac{Z_{pu} \times kV_b^2}{MVA_b}$$

3 phase MVA สามารถเปลี่ยนเป็น per-unit ได้

$$MVA_{pu} = \frac{MVA}{MVA_b} = \frac{\sqrt{3} kV \times kA}{\sqrt{3} kV_b \times kA_b} = V_{pu} \times I_{pu}$$

* อย่าลืมไม่มี $\sqrt{3}$ คูณ เพราะเป็น per unit

การเปลี่ยนค่า per unit impedance จาก base MVA 1 ไปยัง base MVA 2 จะใช้สมการ

$$Z_{(MVA2)} = Z_{(MVA1)} \times \frac{MVA2}{MVA1}$$

การเปลี่ยนค่า per unit impedance จาก base kV1 ไปยัง base kV2

$$Z_{(kV2)} = Z_{(kV1)} \times \left(\frac{kV1}{kV2} \right)^2$$

ถ้ารวมการเปลี่ยน base ทั้ง kV และ MVA จะได้

$$Z_{pu(new\ base)} = Z_{pu(old\ base)} \times \left(\frac{kV_{old\ base}}{kV_{new\ base}} \right)^2 \times \frac{MVA_{new}}{MVA_{old}}$$

4. Symmetrical Component

การใช้ Symmetrical Component method เป็นวิธีหนึ่ง ที่ใช้ในการคำนวณกระแส และ แรงดันที่เกิดขึ้น ขณะเกิด unbalance fault เช่น phase to ground, phase to phase, two phase to ground, open end line

1.1 Sequence impedance and sequence network

Circuit ใดๆ ก็ตามจะมีแรงดันตกคร่อม impedance ที่เกิดขึ้นจากกระแสของแต่ละ sequence และขึ้นอยู่กับ impedance ในวงจรที่เกี่ยวข้องกับ sequence current นั้นๆ เช่น impedance ของ circuit ที่ positive sequence current ไหลผ่าน เราจะเรียกว่าเป็น positive sequence impedance และ negative/zero sequence impedance ก็ จะเรียกเช่นเดียวกัน

ในการวิเคราะห์ห้วงจรของ Unsymmetrical fault ที่เกิดขึ้นใน Symmetrical System จะหาค่า Symmetrical Component ของ unbalance current ต่างๆ ที่ไหลผ่าน จุด fault นั้น แต่ละ component ของกระแสใน 1 phase จะทำให้เกิด voltage drop ที่

เป็น Component ของ sequence นั้นๆ โดยมีเฉพาะ positive sequence voltage source ต่ออยู่กับวงจร เนื่องจาก generator ถูกออกแบบให้จ่ายไฟในลักษณะ balanced three phase voltage

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ Sequence voltage, current และ impedance ได้ดังนี้โดยใช้ 'a' operator

$$V_{a1} = E_g - I_{a1}Z_1$$

$$V_{a2} = 0 - I_{a2}Z_2$$

$$V_{a0} = 0 - I_{a0}Z_0$$

โดยที่ E_g คือ generator positive sequence voltage

1,2,0 เป็น positive, negative, zero sequence

positive sequence network จะเหมือนกับวงจรที่กำลังพิจารณา หรือเหมือนกับวงจรที่ใช้วิเคราะห์ three-phase symmetrical short circuit

negative sequence network ทั่วไปจะเหมือนกับ positive sequence

zero sequence จะขึ้นอยู่กับ network connection และการต่อลง ground

1.2 Sequence impedance

Synchronous machine :

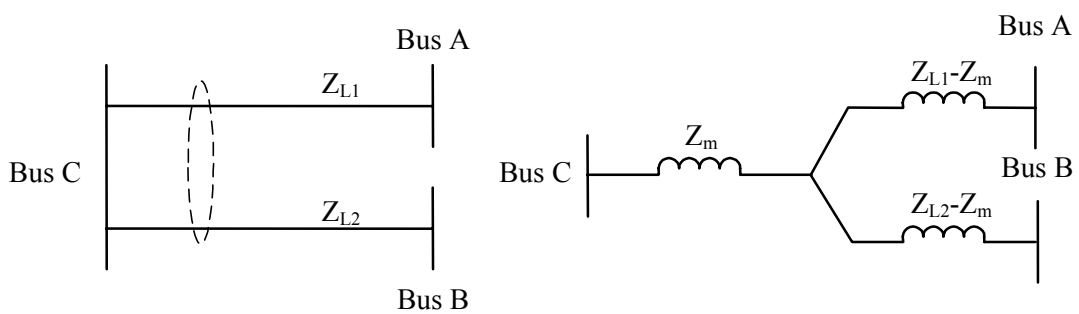
สำหรับ Positive Sequence Impedance จะมีทั้งในรูป transient และ steady state ดังอธิบายไว้ในรูป 1 คือ x'' , x' และ x_s negative sequence impedance จะแตกต่างจาก positive เนื่องจากเป็น rotating machine คือ negative sequence current จะทำให้เกิด magnetic field ที่ rotate รอบ rotor surface เป็น 2 เท่าของ synchronous speed และมีทิศทางตรงข้าม ดังนั้น Z_2 จึงไม่เท่ากับ Z_1 โดยทั่วไปอาจให้ค่า Z_2 ประมาณ 70% ของ Z_1 อย่างไรก็ตามในกรณีที่เกิด fault ภายนอก machine และเป็น remote fault อาจใช้ค่า $Z_2=Z_1$ ได้ เพราะ system impedance จะมีค่าสูงกว่า machine impedance จึงทำให้ค่าความแตกต่างของ Z_2 และ Z_1 ไม่ significant

zero sequence impedance จะขึ้นอยู่กับ single phase impedance ของ stator winding และการต่อระหว่าง star point ของ winding ลง ground เพราะ zero sequence current ของแต่ละ phase จะมี angle ที่ in-phase กัน จึงเหมือนกับการ demagnetization ใน generator circuit ที่เป็นหลัก ทำให้ค่า zero impedance มีค่าต่ำจนถึงประมาณ ~50% ของ positive sequence generator ทั่วไปจะมี resistor หรือ reactor ต่อไว้ระหว่าง neutral กับ ground

เวลาต่อ generator เข้าระบบ จะผ่านหม้อแปลงที่มี connection เป็น delta-star

ซึ่งไม่สามารถจ่าย zero sequence current เข้าสู่ระบบได้ เพราะ delta connection จะ block ไว้

Line และ cable : Positive/ Negative sequence impedance จะเท่ากัน, zero sequence impedance จะขึ้นอยู่กับ path ที่กระแสไหลกลับ supply source คือ generator เช่น ทางดิน หรือ มี neutral wire ซึ่งรวมถึง overhead ground wire ของสายส่ง เช่นกัน นอกจากนี้จะมี zero sequence mutual impedance ระหว่าง parallel circuit ซึ่งจะ share earth return path กันได้ด้วย mutual coupling effect อาจเขียน equivalent circuit ได้ดังรูป 2



รูปที่ 2 : แสดง Mutual Coupling Effect Equivalent Circuit

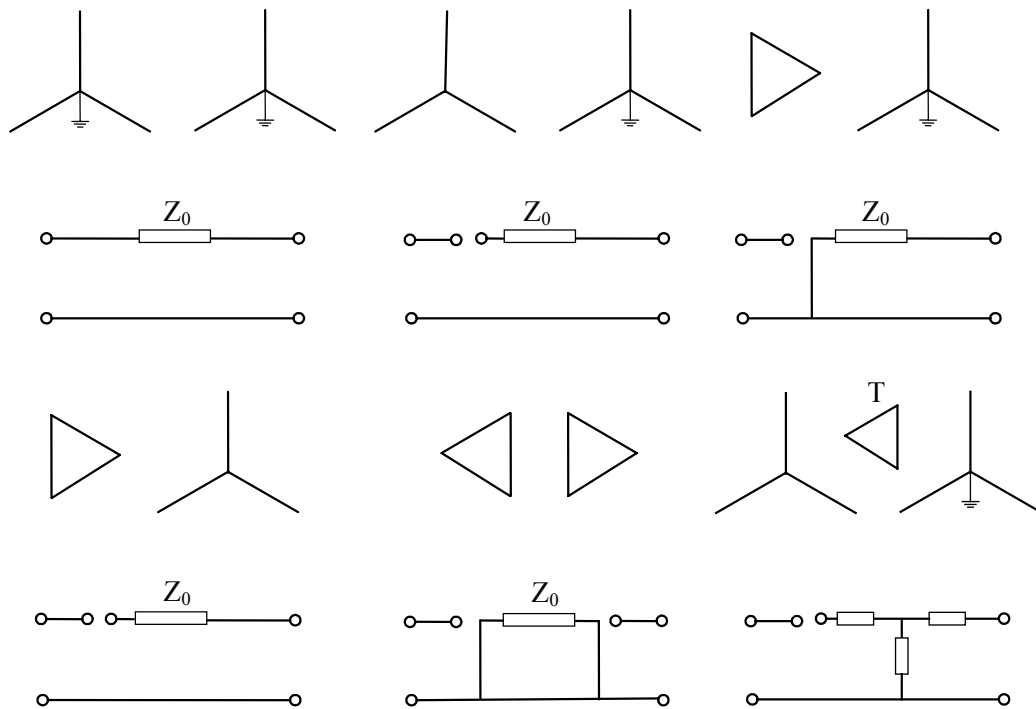
Induction Motor ถึงแม้ว่า motor จะไม่มี external excitation แต่มี magnetic flux ภายใน motor ซึ่งจะสามารถจ่ายกระแสขณะเกิด fault ใน line ได้ แต่กระแสนี้จะลดลงสู่ศูนย์โดยเร็ว ฉะนั้นเฉพาะ motor ตัวใหญ่ๆ เท่านั้น จะนำมาคิดคำนวณหา fault current

Power Transformer จะมีค่า positive sequence impedance เท่ากับ leakage impedance และเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่เป็น static ไม่เหมือนกับ machine จึงทำให้ negative sequence impedance เท่ากับ positive sequence impedance

zero sequence impedance เมื่อ zero sequence current ไหลผ่านใน winding ที่อยู่ด้านหนึ่ง จะทำให้เกิด ampere turn ขึ้นในขดลวดอีกด้านหนึ่งด้วย ฉะนั้นใน star connection กระแสจะเกิดขึ้นได้ต้องมีการการต่อ neutral ลง ground หรือ กระแสสามารถไหลวนอยู่ใน delta winding ทำให้ zero sequence current ไม่ไหลออกมาใน line

การต่อ connection แบบ star-star จะไม่มี phase shift ระหว่าง windings แต่ถ้าหม้อแปลงมี connection เป็น delta-star จะเกิด phase shift ขึ้น 30 องศา ระหว่าง primary กับ

secondary (Dy1) แต่จะไม่มีผลกับ magnitude ของ fault current ที่จุด fault แต่จะต้องคำนึงถึงด้วยเมื่อต้องการหา voltage ตัวอย่าง zero sequence impedance ของหม้อแปลงตามรูปที่ 3

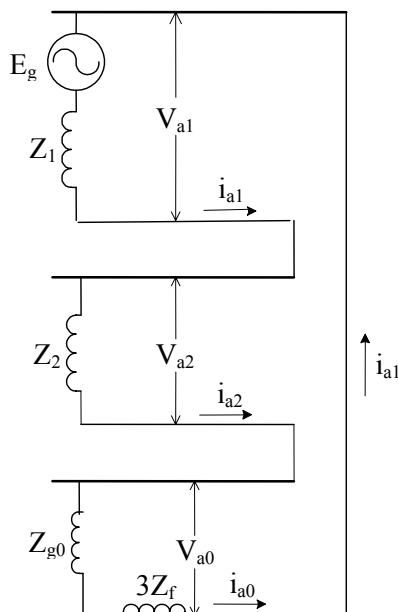


รูปที่ 3 : แสดง zero sequence impedance ของ Transformer

5. การวิเคราะห์ Unsymmetrical fault

ในระบบสายส่งแรงสูงการเกิด fault จะเกิดจาก flashover ข้าม insulator ลง tower กระแสจะไหลผ่าน tower ลง ground จึงมักจะกำหนดให้มีค่า grounding resistance : Z_f

Single phase to ground : fault impedance Z_f



Condition : $I_b = I_c = 0, V_a = 0$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2 + Z_{g0} + 3Z_f}$$

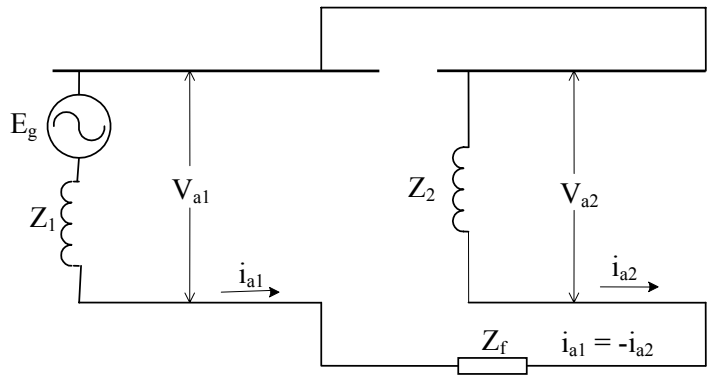
positive, negative, zero network series กัน

Line to line fault : fault impedance Z_f

Condition : $V_a = V_b - I_b Z_f$ $I_b = -I_c$ $I_a = 0$

$V_{a1} - V_{a2} = I_{a1} Z_f$ $-I_{a1} = -I_{a2}$ $I_{a0} = 0$

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2} \text{ for } Z_f = 0$$



positive, negative network ขนาดกัน

Double line to ground fault : fault impedance Z_f

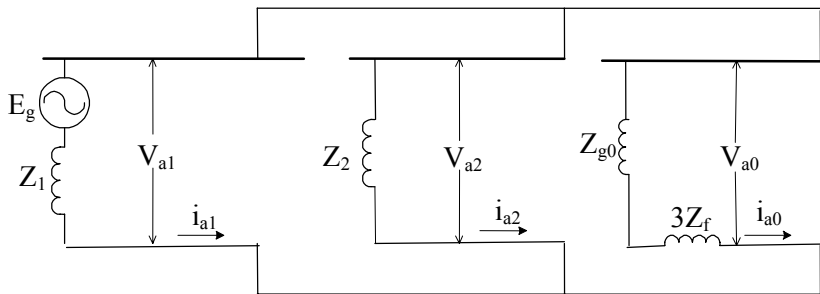
Condition : $V_b = 0, V_c = 0, I_a = 0$

$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0}$

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_1 + Z_2 \frac{Z_{g0} + 3Z_f}{Z_2 + Z_{g0} + 3Z_f}}$$

positive, negative, zero network in parallel

การหา fault current ในวงจรที่มี transformer เข้ามาเกี่ยวข้อง จะเชื่อมโยง sequence impedance แต่ละชนิดกับ sequence impedance ของ network ซึ่งจะรวม impedance ของหม้อแปลงเข้าไปด้วย เมื่อคำนวณ กระแส, แรงดัน



6. การ limit fault level

ในบางสถานี fault level จะมีค่าสูงเกินค่า rating ของ breaker capacity การเปลี่ยน breaker อาจต้องใช้เงินลงทุนสูง จึงอาจพิจารณาแนวทางอื่นๆ ได้ เช่น

- Bus-splitting วิธีการแยก bus ออกเป็น 2 ส่วน ทำให้ fault level ในแต่ละ bus ลดลงได้ เนื่องจากจำนวน line ที่ต่อเข้า bus แต่ละชุดลดลง ทำให้เพิ่ม impedance ของ network ที่มองจากแต่ละ bus วิธีนี้อาจทำให้เกิดปัญหาเรื่อง voltage หรือ reliability ในการจ่าย load เป็นต้น

- ใช้ tie-bus circuit breaker วิธีนี้จะใช้เงินลงทุนน้อย ซึ่งจะออกแบบให้ tie-bus breaker ทำงานก่อน เพื่อลด fault level และ breaker ที่จะ clear fault จะทำงานภายหลัง

- ใช้ series reactor ใน line วิธีนี้จะลงทุนสูง เนื่องจาก reactor rating สูงที่ต้องมี rate กระแสเท่ากับ line current และจะมีปัญหาเรื่องต้องการ Var compensate เพิ่มขึ้น

- ใช้ neutral reactor ต่อที่ neutral ของ star winding ของ หม้อแปลง หรือเรียกว่า impedance earthing วิธีนี้จะสามารถลด fault current ที่จ่ายออกจากหม้อแปลงได้ แต่ต้องระวังเรื่อง over voltage ใน healthy phase

เมื่อทราบวิธีการหา fault current แล้ว เมื่อต้องการนำมาพิจารณาเรื่อง short circuit mechanical strength ใน winding ของหม้อแปลง ต้องคำนึงถึง force ที่เกิดขึ้นที่ peak แรก ของ Asymmetrical current ซึ่งสามารถใช้ Asymmetrical factor คูณค่า symmetrical current ที่หาได้ในระบบของ กฟผ. มีหม้อแปลงที่มี Asymmetrical factor อยู่ประมาณ $1.98 \times \sqrt{2} = 2.8$ หรือหาได้จากสูตร

$$K = 1 + e^{-\frac{\pi R}{X}} \quad R, X \text{ in ohm}$$

หรือสามารถดูได้จากตารางใน ANSI Std. ตามความสัมพันธ์ของ ratio X/R

note

$i(t)$: short circuit current

$$i(t) = I \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + e^{-\frac{t}{\tau}} \right] ; I = \text{peak current of symmetrical component}$$

หาค่าที่ peak แรก; $i = I \times K$

$$t = \frac{1}{2f}; \quad i = \sqrt{2} I_{\text{rms}} K$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X}{2\pi f R} \text{ sec}$$

