



มอร. 300 – 0008 – 1051

การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

มาตรฐานงานช่าง กรมอุทกหารเรือ

วันรับหนังสือ 10 ส.ค. 2552

ลงทะเบียน.....

หน้าหนังสือ.....

มอร. 300 – 0008 – 1051

การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

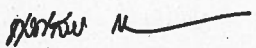
แก้ไขครั้งที่.....เมื่อ.....
แก้ไขครั้งที่.....เมื่อ.....
แก้ไขครั้งที่.....เมื่อ.....



ประกาศกรมอุทการเรือ
เรื่อง กำหนดมาตรฐานงานช่าง กรมอุทการเรือ

อาศัยอำนาจตามความในข้อ ๗.๓ และ ข้อ ๑๒ แห่งระเบียบ กรมอุทการเรือ ว่าด้วยมาตรฐานงานช่าง
พ.ศ. ๒๕๕๑ เจ้ากรมพัฒนาการช่าง กรมอุทการเรือ ให้ใช้มาตรฐานงานช่าง กรมอุทการเรือ มอว.๓๐๐ - ๐๐๐๘ - ๑๐๕๑
การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ดังรายละเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ประกาศ ณ วันที่ ๒ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๕๑

พล.ร.ต.รศ. 

(พงศ์สรร ถวิลประวัตติ)

จก.กพช.อร.

รายการแก้ไข

รายการแก้ไข

หมายเลขหน้า

การแก้ไขครั้งที่

บันทึกการแก้ไข

วัน เดือน ปี	รายการแก้ไข

มาตรฐานงานช่าง กรมอุตุนิยมวิทยา
การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

1. เอกสารอ้างอิง

- 1.1 IEC STANDARD 61363-1 (1998)
- 1.2 IEC STANDARD 60909 PARTS 0 — 4
- 1.3 B. DE METZ-NOBLAT, F. DUMAS, G. THOMASSET "CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS" SCHNIEDER ELECTRIC, CASHIER TECHNIQUE NO. 158, 2002
- 1.4 GUNTER G. SEIP "ELECTRICAL INSTALLATION HANDBOOK" VERLAG PUBLICIS MCD 2000, JOHN WILEY & SONS.

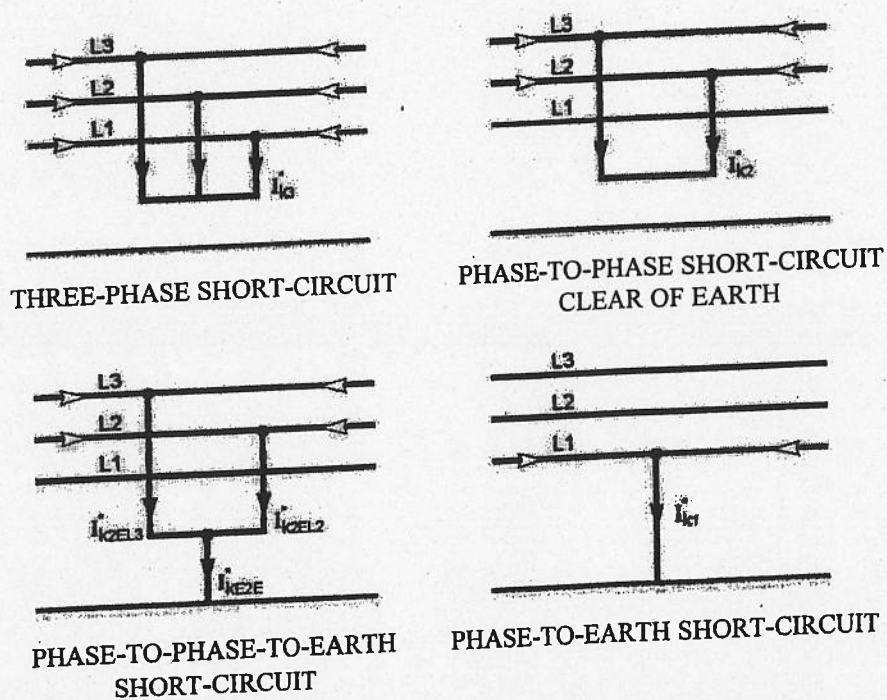
2. ความมุ่งหมาย

เพื่อใช้เป็นมาตรฐานงานช่าง กรมอุตุนิยมวิทยา สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (SHORT-CIRCUIT CURRENT) ในระบบจ่ายไฟฟ้าของเรือ

3. เนื้อหา

การเกิดการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟสแบบ (THREE-PHASE SYMMETRICAL FAULT) สามารถเกิดได้ 3 แบบ โดยที่แต่ละแบบจะมีโอกาสในการเกิดที่ไม่เท่ากัน ดังนี้

1. การลัดวงจรแบบ PHASE-TO-EARTH มีโอกาสเกิดขึ้นได้ถึง 80%
2. การลัดวงจรแบบ PHASE-TO-PHASE มีโอกาสเกิดขึ้นได้ถึง 15%
3. การลัดวงจรแบบ THREE-PHASE มีโอกาสเกิดขึ้นได้ถึง 5%



รูปที่ 1 แสดงรูปแบบของการเกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส



กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

โครงข่ายระบบไฟฟ้าทั่วไป จะต้องประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า และภาระ (LOAD) โดยส่วนประกอบต่างๆจะต้องมีค่า IMPEDANCE เสมอ เมื่อมีการลัดวงจรไฟฟ้าเกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งในระบบ โครงข่ายๆ ที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน จะกำหนดให้ IMPEDANCE ของระบบที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าเป็น UPSTREAM IMPEDANCE; Z_{sc} (เพื่อความสะดวกในการคำนวณ) ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อมีการลัดวงจรไฟฟ้า เกิดระหว่างจุด A และ B กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) ที่เกิดจะมีค่าที่สูงมาก เมื่อเทียบกับค่า IMPEDANCE ของ ภาระ (Z_s) จึงไม่นำค่า Z_s มาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น ขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงขึ้นอยู่กับค่า Z_{sc} เท่านั้น

ขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิดขึ้น จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ซึ่งแต่ละช่วงเวลาก็จะมีขนาดของ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และระยะเวลาที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน สำหรับช่วงเวลาแรกกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าสูงที่สุด ค่ากระแสไฟฟ้า สูงสุดนี้จะใช้สำหรับกำหนดค่า CAPACITY ของ CIRCUIT-BREAKER แต่จะเกิดในช่วงเวลาที่สั้นมากๆ ประมาณ รูปคลื่นที่ 1-3 (รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร เป็นคลื่นรูปชาม) หรือ ประมาณ 10-20 MILLISECONDS และ เรียกกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในช่วงระยะเวลานี้ว่า "SUB-TRANSIENT CURRENT" หลังจากนั้น ขนาดของกระแสไฟฟ้า จะลดลงอย่างรวดเร็ว อยู่ในช่วงระยะเวลา 20-500 MILLISECONDS เรียกกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในช่วงระยะเวลานี้ว่า "TRANSIENT CURRENT" กระแสไฟฟ้าลัดวงจรในช่วงระยะเวลานี้ก็นำมาใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของ อุปกรณ์จำพวก SWITCHGEAR ต่างๆ และอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายจากการเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า และในช่วง เวลาสุดท้ายขนาดของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าคงที่ เรียกกระแสไฟฟ้าลัดวงจรในช่วงระยะเวลานี้ว่า "STEADY-STATE CURRENT"

สำหรับค่า Z_{sc} จะขึ้นอยู่กับค่าของ REACTANCE (X) และ RESISTANCE (R) ดังแสดงในสมการที่ (1)

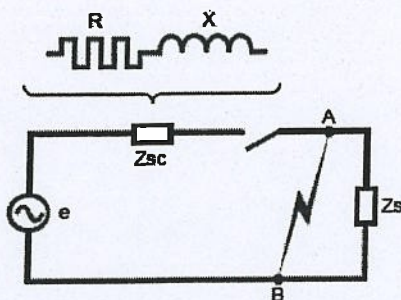
$$Z_{sc} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า IMPEDANCE, REACTANCE และ RESISTANCE นิยมที่จะ แสดงอยู่ในรูปแบบของ POWER FACTOR ($\cos \phi$) ดังสมการที่ (2)

$$\cos \phi = \frac{R}{Z_s} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2)$$

เนื่องจากค่า REACTANCE จะมีค่ามากกว่าค่า RESISTANCE มาก จึงนิยมที่จะประมาณค่าของ $\cos \phi$ ให้ อยู่ในรูปแบบของสัดส่วนระหว่าง R/X ดังสมการที่ (3)

$$\cos \phi \approx \frac{R}{X} \quad (3)$$



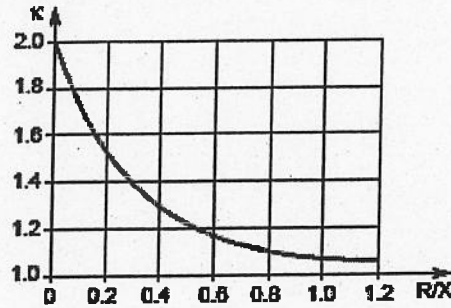
รูปที่ 2 โครงข่ายระบบไฟฟ้าแบบง่าย

ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุด (I_p) ที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของ R/X ด้วย เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของ I_p จะเป็นไปตามสมการที่ (4) ดังนี้

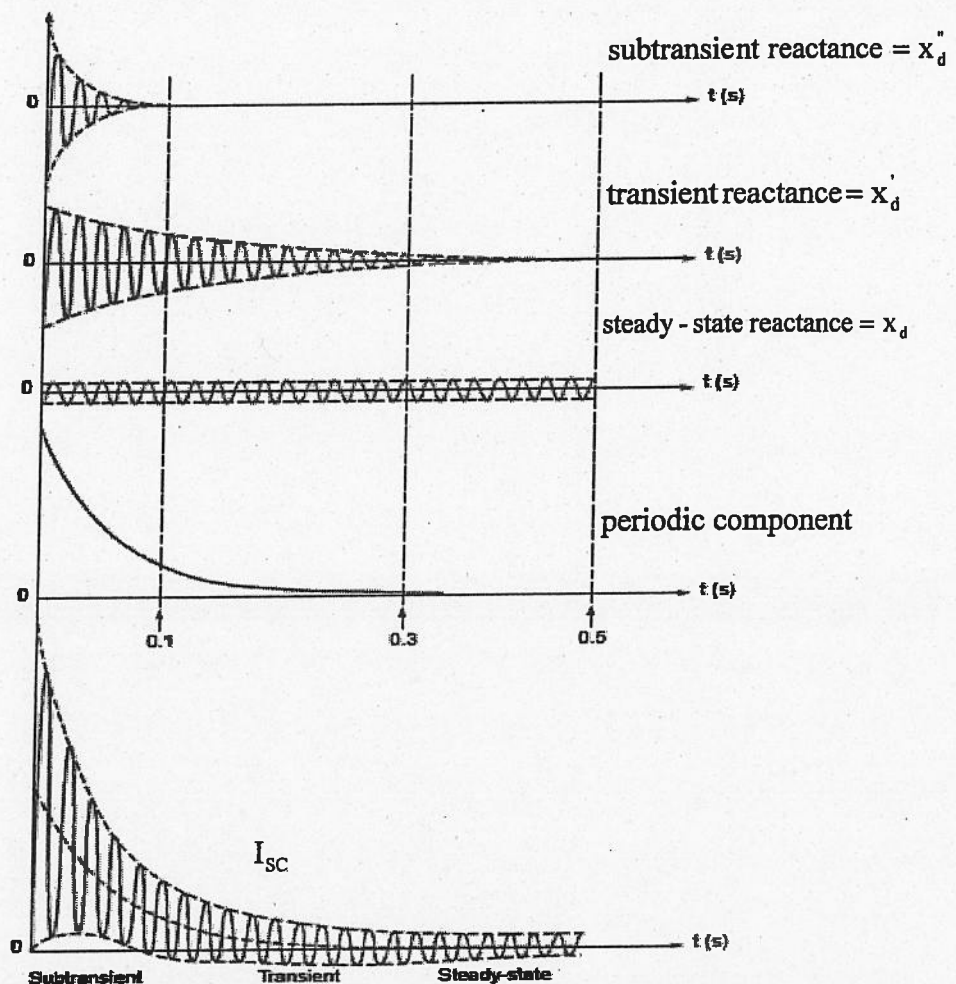
$$I_p = \kappa \sqrt{2} \times I_A \quad (4)$$

กำหนดให้

κ คือ ค่า COEFFICIENT มีค่าเท่ากับ $1.02 + 0.98e^{-\frac{R}{X}}$ หรือใช้กราฟ ดังแสดงในรูปที่ 3
 I_A คือ SYMMETRICAL SHORT-CIRCUIT CURRENT



รูปที่ 3 VARIATION OF COEFFICIENT K DEPENDING ON R / X OR R / L (IEC 60909)



รูปที่ 4 TOTAL SHORT-CIRCUIT CURRENT I_{sc} , AND CONTRIBUTION OF ITS COMPONENTS



วิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

วิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) ในที่นี้ จะแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. ใช้วิธีแบบ IMPEDANCE METHOD
2. ใช้วิธีแบบ IEC 60909

วิธีแบบ IMPEDANCE METHOD

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (I_{sc}) จะแบ่งออกเป็น 4 ชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีสมการที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. THREE-PHASE SHORT-CIRCUIT หาได้จากสมการที่ (5) ดังนี้

$$I_{sc_3} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{sc}} \quad (5)$$

กำหนดให้

I_{sc_3} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ THREE-PHASE SHORT-CIRCUIT

U คือ แรงดันไฟฟ้าตกรวมจุดที่เกิดการลัดวงจรแบบ PHASE-TO-PHASE

Z_{sc} คือ ค่า IMPEDANCE แบบ POSITIVE-IMPEDANCE PER PHASE

การหาค่าของ Z_{sc} หาได้จากสมการที่ (6)

$$Z_{sc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2} \quad (6)$$

กำหนดให้

$\sum R$ คือ THE SUM OF SERIES RESISTANCES

$\sum X$ คือ THE SUM OF SERIES REACTANCE

2. PHASE-TO-PHASE SHORT-CIRCUIT CLEAR OF EARTH

การเกิดการลัดวงจรแบบนี้ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าน้อยกว่าการเกิดการลัดวงจรแบบ THREE - PHASE SHORT-CIRCUIT ยกเว้นกรณีที่การลัดวงจรเกิดขึ้นใกล้แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ใกล้เคียงกัน การหากระแสไฟฟ้าลัดวงจร หาได้จากสมการที่ (7) ดังนี้

$$I_{sc_2} = \frac{U}{2Z_{sc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sc_3} \approx 0.86 I_{sc_3} \quad (7)$$

กำหนดให้

I_{sc_2} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ PHASE-TO-PHASE SHORT-CIRCUIT CLEAR OF EARTH

3. PHASE-TO-NEUTRAL SHORT-CIRCUIT CLEAR OF EARTH

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณ จะต้องเป็นแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่เทียบระหว่างเฟสกับนิวทรัล ดังสมการที่ (8)

$$V = U / 3 \quad (8)$$

กำหนดให้

V คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่าง PHASE-TO-NEUTRAL
ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร สามารถหาได้จากสมการที่ (9)

$$I_{sc1} = \frac{U / 3}{Z_{sc} + Z_{Ln}} \quad (9)$$

กำหนดให้

I_{sc1} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ PHASE-TO-NEUTRAL SHORT-CIRCUIT CLEAR OF EARTH

Z_{Ln} คือ ค่า IMPEDANCE แบบ LINE-TO-NEUTRAL

ในกรณีที่ $Z_{Ln} > Z_{sc}$ จะมีผลทำให้ $I_{sc1} > I_{sc3}$

4. PHASE-TO-EARTH FAULT (ONE OR TWO PHASES)

การหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร จะต้องนำค่า IMPEDANCE ในรูปแบบของ ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE PER PHASE (Z_0) มาใช้ในการคำนวณ ยกเว้น กรณีที่ระบบไฟฟ้ามีส่วนประกอบของเครื่องกลไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบนี้จะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ THREE-PHASE FAULT

วิธีการหาค่า IMPEDANCE

ค่า IMPEDANCE ที่นำมาใช้คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ไม่จำเป็นที่จะต้องเริ่มคิดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามาจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร แต่สมการที่จะใช้ SHORT-CIRCUIT POWER (S_{sc}) ในหน่วยของ MVA แทนได้ สำหรับการหาค่า IMPEDANCE ของส่วนประกอบต่างๆในระบบไฟฟ้า จะมีข้อกำหนด ดังนี้

1. EQUIVALENT IMPEDANCE OF THE UPSTREAM NETWORK

การกำหนดค่า IMPEDANCE จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงจนถึงหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า กำหนดโดยใช้ SHORT-CIRCUIT POWER ตามสมการที่ (10)

$$Z_{up} = \frac{U^2}{S_{sc}} \quad (10)$$

กำหนดให้

S_{sc} คือ SHORT-CIRCUIT POWER; MVA

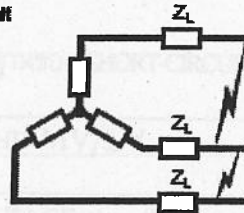
สำหรับการหาค่า UPSTREAM RESISTANCE AND REACTANCE ของระบบไฟฟ้าแรงดันสูง (HV) สามารถที่จะใช้วิธีการประมาณค่าได้ในรูปแบบสัดส่วนของ R_{up}/Z_{up} โดยจะมีการประมาณค่าไว้ ดังนี้

$$R_{up}/Z_{up} \approx 0.3 \text{ at } 6 \text{ kV}$$

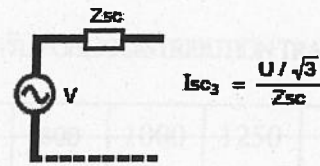
$$R_{up}/Z_{up} \approx 0.2 \text{ at } 20 \text{ kV};$$

$$R_{up}/Z_{up} \approx 0.1 \text{ at } 150 \text{ kV}.$$

Three-phase fault

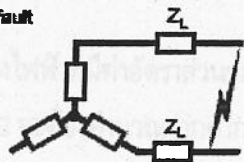


≡

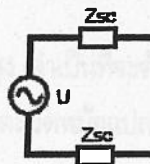


$$I_{sc3} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{sc}}$$

Phase-to-phase fault

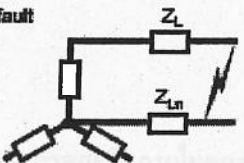


≡

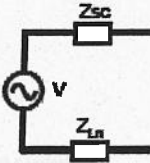


$$I_{sc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{sc}}$$

Phase-to-neutral fault

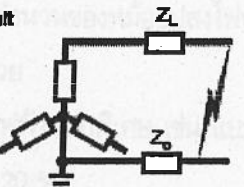


≡

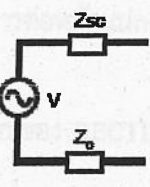


$$I_{sc1} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_{Ln}}$$

Phase-to-earth fault



≡



$$I_{sc0} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{sc} + Z_0}$$

รูปที่ 5 แสดงรูปแบบการเกิดการลัดวงจรไฟฟ้าแบบต่างๆ

2. หม้อแปลงไฟฟ้า (TRANSFORMER)

ค่า IMPEDANCE ของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่นำมาใช้ในการคำนวณจะใช้ค่า IMPEDANCE ภายในของหม้อแปลงไฟฟ้า (INTERNAL IMPEDANCE TRANSFORMER) หาค่าโดยใช้สมการที่ (11)

$$Z_T = \frac{u_{sc}}{100} \times \frac{U^2}{S_n} \quad (11)$$

กำหนดให้

U คือ แรงดันไฟฟ้าตกรวมแบบ PHASE-TO-PHASE ของหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่มีภาระ (LOAD)

S_n คือ ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าในหน่วยของ KVA

$\frac{u_{sc}}{100}$ คือ เปอร์เซนต์ของแรงดันไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิเมื่อทำการลัดวงจรแรงดันไฟฟ้า

ทางด้าน LV

3. ค่า IMPEDANCE ของสายไฟฟ้า (LINE IMPEDANCE); (Z_L)

การกำหนดค่า Z_L ขึ้นอยู่กับค่า RESISTANCE และค่า REACTANCE ต่อหน่วยความยาวของสายไฟฟ้า สำหรับค่า RESISTANCE (R_L) ของสายไฟฟ้านำสามารถหาได้จากสมการที่ (17)

$$R_L = \frac{\rho}{A} \quad (17)$$

กำหนดให้

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้า

ρ คือ ค่า CONDUCTOR RESISTIVITY ค่านี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการคำนวณของค่ากระแสไฟฟ้า ลัดวงจร (ค่าสูงสุด หรือ ค่าต่ำสุด) หรือดูข้อมูลเพิ่มเติมจากตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่า CONDUCTOR RESISTIVITY ตามค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (ค่าสูงสุด หรือ ค่าต่ำสุด)

Rule	Resistivity (*)	Resistivity value ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)		Concerned conductors
		Copper	Aluminium	
Max. short-circuit current	ρ_0	0.01851	0.02941	PH-N
Min. short-circuit current				
■ With fuse	$\rho_2 = 1.5 \rho_0$	0.028	0.044	PH-N
■ With breaker	$\rho_1 = 1.25 \rho_0$	0.023	0.037	PH-N (**)
Fault current for TN and IT systems	$\rho_1 = 1.25 \rho_0$	0.023	0.037	PH-N PE-PEN
Voltage drop	$\rho_1 = 1.25 \rho_0$	0.023	0.037	PH-N
Overcurrent for thermal-stress checks on protective conductors	$\rho_1 = 1.25 \rho_0$	0.023	0.037	PH, PE and PEN

(*) ρ_0 = RESISTIVITY OF CONDUCTORS AT $20^\circ\text{C} = 0.01851 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ FOR COPPER AND $0.02941 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ FOR ALUMINIUM.

(**) N, THE CROSS-SECTIONAL AREA OF THE NEUTRAL CONDUCTOR, IS LESS THAN THAT OF THE PHASE CONDUCTOR.

ค่า REACTANCE (X_L) สามารถหาได้จากสมการที่ (18) ใช้ได้ทั้งแบบ SINGLE-PHASE และแบบ PHASE-TO-PHASE

$$X_L = L\omega = \left[15.7 + 144.44 \log \left(\frac{d}{r} \right) \right] \text{ m}\Omega / \text{km} \quad (18)$$

กำหนดให้

r คือ รัศมีของแกนขดลวดตัวนำ

d คือ ระยะเฉลี่ยระหว่างตัวนำแต่ละตัว

ในกรณีที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงของการคำนวณมาก สามารถที่จะเลือกใช้ค่าเฉลี่ยตามที่กำหนด ดังนี้

1. สำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ค่าเฉลี่ย $X = 0.3 \Omega/\text{km}$

2. สำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง และแรงดันสูง ค่าเฉลี่ย $X = 0.4 \Omega/\text{km}$

นอกจากนี้ค่า X_L ยังขึ้นอยู่กับระบบการเดินสายตัวนำ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า X_L กับระบบการเดินสายตัวนำ

Wiring system	Busbars	Three-phase cable	Spaced single-core cables	Touching single-core cables (triangle)	3 touching cables (flat)	3 «d» spaced cables (flat) d = 2r	3 «d» spaced cables (flat) d = 4r
Diagram							
Reactance per unit length, values recommended in UTE C 15-105 (mΩ/m)		0.08	0.13	0.08	0.09	0.13	0.13
Average reactance per unit length values (mΩ/m)	0.15	0.08	0.15	0.085	0.095	0.145	0.10
Extreme reactance per unit length values (mΩ/m)	0.12-0.18	0.06-0.1	0.1-0.2	0.08-0.09	0.09-0.1	0.14-0.15	0.18-0.20

4. ค่า CAPACITANCE ของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิล

ค่า CAPACITANCE ของสายไฟฟ้าหรือสายเคเบิลที่เทียบระหว่างสายไฟฟ้ากับระดับพื้นดิน ถ้ามีค่ามากกว่าค่า CAPACITANCE ที่เทียบระหว่างสายไฟฟ้าแต่ละเส้นประมาณ 10-20 เท่า จะต้องนำค่าดังกล่าวมาใช้ประกอบการคำนวณเพื่อหาค่าของ EARTH FAULT ด้วย

5. การกำหนดค่า IMPEDANCE ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

5.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

โดยทั่วไปการกำหนดค่า IMPEDANCE จะกำหนดในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ การหาค่า IMPEDANCE หาได้โดยใช้สมการที่ (19)

$$Z = \frac{x}{100} \times \frac{U^2}{S_n} \quad (19)$$

กำหนดให้

U คือ แรงดันไฟฟ้าแบบ PHASE-TO-PHASE ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่จ่ายภาระ

S_n คือ กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หน่วย VA

x คือ EQUIVALENT OF THE TRANSFORMER

สำหรับ REACTANCE VALUES ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โม และแบบ SALIENT POLES (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ) จะมีการกำหนดค่าบางค่าให้ตามตารางที่ (4)

ตารางที่ 4 แสดงค่า REACTANCE VALUES (PER UNIT)

	Subtransient reactance	Transient reactance	Synchronous reactance
Turbo-generator	10-20	15-25	150-230
Salient-pole generators	15-25	25-35	70-120

5.2 SYNCHRONOUS COMPENSATORS AND MOTORS

การลัดวงจรไฟฟ้าจะมีผลเช่นเดียวกับการลัดวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปริมาณของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของค่า REACTANCE ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่า SYNCHRONOUS COMPENSATOR AND MOTOR REACTANCE VALUES, IN PER UNIT

	Subtransient reactance	Transient reactance	Synchronous reactance
High-speed motors	15	25	80
Low-speed motors	35	50	100
Compensators	25	40	160

5.3 CAPACITORS

การลัดวงจรไฟฟ้าเมื่อเกิดใกล้บริเวณที่มีการต่อของ SHUNT CAPACITOR BANK จะมีผลทำให้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าตัว CAPACITOR จะเป็นตัวปล่อยประจุไฟฟ้าเพิ่มในระบบ โดยปริมาณของกระแสไฟฟ้าจะสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า ในลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. แรงดันไฟฟ้าขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ประจุไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากตัว CAPACITOR ในช่วงคลื่นลูกแรกที่มีค่าสูงสุดจะเป็นแบบ ASYMMETRICAL
 2. แรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้ามีค่าสูงสุด ประจุไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากตัว CAPACITOR ในช่วงคลื่นลูกแรกที่มีค่าสูงสุดเป็นแบบ SYMMETRICAL แต่ค่าสูงสุดของ PEAK น้อยกว่าแบบ ASYMMETRICAL
- โดยทั่วไป การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดไม่ต้องนำค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจาก SHUNT CAPACITOR BANK มาคิดได้

5.4 SWITCHGEAR

อุปกรณ์จำพวก SWITCHGEAR เช่น CIRCUIT BREAKERS, CONTACTORS WITH BLOW-OUT COILS, DIRECT THERMAL RELAYS เป็นต้น อุปกรณ์ SWITCHGEAR ถ้าติดตั้งอยู่ในระบบก่อนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร (LOCATED UPSTREAM) จะต้องนำค่า IMPEDANCE ของอุปกรณ์แต่ละชนิดมาคำนวณ แต่อาจจะมีกรณียกเว้นสำหรับอุปกรณ์ประเภท BREAKING DEVICES ที่มีช่วงเวลาที่เปิดวงจรของอุปกรณ์ที่มีความเร็วตอบสนองต่อการลัดวงจรมาก อาจไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาได้

ความสัมพันธ์ระหว่าง IMPEDANCE กับแรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ

เนื่องจากการหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบไฟฟ้า จะพบว่าค่า IMPEDANCE ของระบบจะสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ จากความสัมพันธ์นี้ทำให้เกิดวิธีที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบที่มีความแตกต่างของระดับแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 2 ระดับ (ระดับแรงดันไฟฟ้าจะแบ่งที่หม้อแปลงไฟฟ้า) ง่ายขึ้น ด้วยวิธีการหาค่า RELATIVE IMPEDANCE ดังนี้

1. สายตัวนำในส่วนของ OVER HEAD LINES

$$R_{CR} = \frac{R}{U^2} \quad (20)$$

$$X_{CR} = \frac{X}{U^2} \quad (21)$$

กำหนดให้

R และ X มีหน่วยเป็น โอห์ม

U มีหน่วยเป็น โวลต์

2. หม้อแปลงไฟฟ้า โดยทั่วไปจะกำหนดค่า u_{SC} และ ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า S_n (KVA) ค่า ดังนั้น RELATIVE IMPEDANCE ทาจากสมการที่ (22)

$$Z_{TR} = \frac{u_{SC}}{S_n \times 100} \quad (22)$$

3. เครื่องจักรกลไฟฟ้า RELATIVE IMPEDANCE ทาจากสมการที่ (23)

$$Z_{MR} = \frac{x}{S_n \times 100} \quad (23)$$

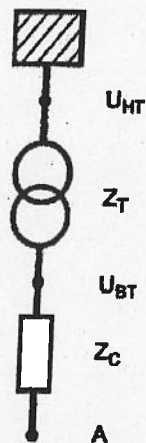
กำหนดให้

x คือ เปอร์เซนต์ของ IMPEDANCE

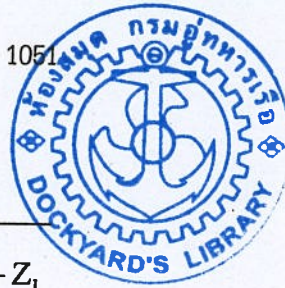
4. การหา SHORT-CIRCUIT POWER ของระบบอาจจะแสดงอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (24) ดังนี้

$$S_{SC} = \frac{1}{\sum Z_R} \quad (24)$$

ตัวอย่างการหา S_{SC} จากรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรพื้นฐานที่มีการลัดวงจรเกิดที่จุด A



เมื่อมีการลัดวงจรเกิดที่จุด A

$$S_{sc} = \frac{U_{LV}^2}{Z_T \left(\frac{U_{LV}}{U_{HV}} \right)^2 + Z_L}$$

$$= \frac{1}{\frac{Z_T}{U_{HV}^2} + \frac{Z_L}{U_{LV}^2}}$$

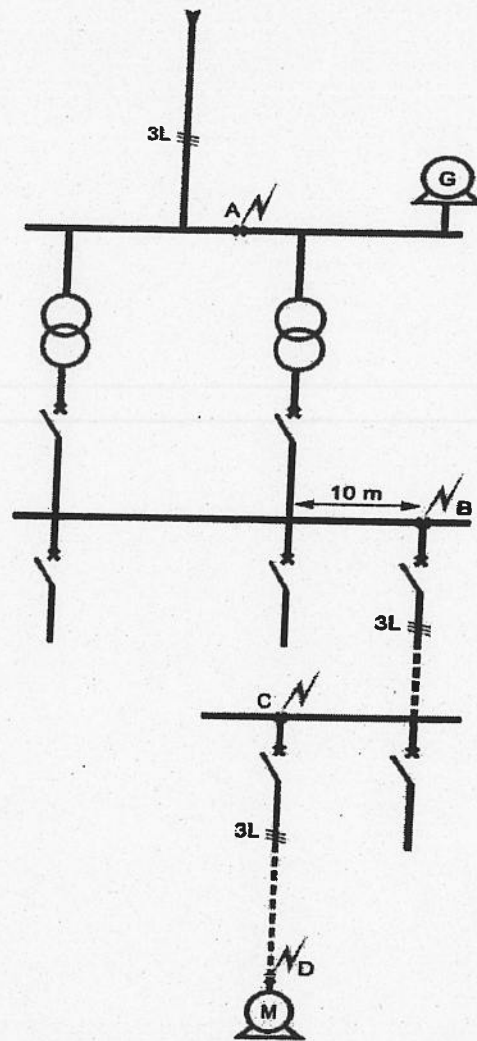
5. กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดที่เกิดการลัดวงจร

$$I_{sc} = \frac{S_{sc}}{\sqrt{3}U} = \frac{1}{\sqrt{3}U \sum Z_R} \quad (25)$$

ตัวอย่างการคำนวณการหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ปัญหา ระบบโครงข่ายไฟฟ้าแรงสูง ขนาด 20 KV จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับระบบ HV/LV ของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ด้วยสายส่งที่มีความยาว 2 KM (OVERHEAD LINE) และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสนับสนุน ขนาด 1 MVA ต่อขนานกับ BUSBARS ที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ LV โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1,000 KVA จำนวน 2 ลูก (ต่อขนานกัน) ที่ BUSBARS ของระบบ LV จะประกอบด้วยภาระที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 50 KW จำนวน 20 ตัว โดยแต่ละตัวจะมีสายต่อแยกออกจากกัน เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น มอเตอร์ไฟฟ้าทุกตัวอยู่ในระหว่างการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีข้อกำหนดเพิ่มเติม ดังนี้

- ที่จุด A เป็น HV BUSBAR (ไม่ต้องคิดค่าของ IMPEDANCE)
- ที่จุด B เป็น LV BUSBAR มีระยะห่างจากหม้อแปลงไฟฟ้า 10 เมตร
- ที่จุด C เป็น BUSBAR ของตู้จ่ายไฟย่อย
- ที่จุด D เป็นจุดจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์
- UP STREAM NETWORK: $U_1 = 20$ KV, $S_{sc} = 500$ MVA
- OVERHEAD LINE: 3 CABLES, 50 MM², COPPER, LENGTH = 2 KM
- GENERATOR: 1 MVA, $x_{SUBT} = 15\%$
- 2 TRANSFORMERS: 1,000 KVA, SECONDARY WINDING 237/410 V, $u_{sc} = 5\%$
- MAIN LV SWITCHBOARD 3 BARS, 400 MM²/PH, COPPER, LENGTH = 10 KM
- CABLE 1: 3 SINGLE - CORE CABLES, 400 MM², ALUMINIUM, SPACED, LAID FLAT, LENGTH = 80 M
- LV SUB-DISTRIBUTION BOARD: NEGLECTING THE LENGTH OF THE BUSBARS
- CABLE 2: 3 SINGLE - CORE CABLES, 35 MM², COPPER 3-PHASE, LENGTH = 30 M
- MOTOR: 50 KW (EFFICIENCY = 0.9; $\cos \phi = 0.8$), $x = 25\%$



รูปที่ 7 แสดงแผนภาพสำหรับการคำนวณตัวอย่างการหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

วิธีทำ หาค่า IMPEDANCE จากส่วนประกอบต่างๆ ภายในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ด้านแรงดันต่ำ (ต่ำกว่า 20 kV)

1. UPSTREAM NETWORK

$$Z_{UP} = \frac{(20 \times 10^3)^2}{500 \times 10^6}$$

$$X_{UP} = 0.98 \times Z_{UP} = 0.78 \quad \Omega$$

$$R_{UP} = 0.2 \times Z_{UP} \approx 0.2 X_{UP} = 0.15 \quad \Omega$$

2. OVERHEAD LINE (50 mm²)

$$X_{CO} = 0.4 \times 2 = 0.8 \quad \Omega$$

$$R_{CO} = 0.018 \times \frac{2,000}{50} = 0.72 \quad \Omega$$

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$X_G = \frac{15}{100} \times \frac{(20 \times 10^3)^2}{10^6} = 60 \quad \Omega$$

$$R_G = 0.1 X_G = 6 \quad \Omega$$

การลัดวงจรไฟฟ้าที่จุด A

4. หม้อแปลงไฟฟ้า (ทางด้านแรงดันต่ำ)

$$Z_T = \frac{1}{2} \times \frac{5}{100} \times \frac{410^2}{10^6}$$

$$X_T \approx Z_T = 4.2 \text{ m}\Omega$$

$$R_T = 0.2X_T = 0.84 \text{ m}\Omega$$

5. CIRCUIT-BREAKER

$$X_{CB} = 0.15 \text{ m}\Omega$$

6. BUSBARS

$$X_B = 0.15 \times 10^{-3} \times 10 = 1.5 \text{ m}\Omega$$

$$R_B = 0.023 \times \frac{10}{400} = 0.57 \text{ m}\Omega$$

การลัดวงจรไฟฟ้าที่จุด B

7. CIRCUIT-BREAKER

$$X_{CB} = 0.15 \text{ m}\Omega$$

8. CABLE 1 (400 mm²/PHASE)

$$X_{C1} = 0.15 \times 10^{-3} \times 80 = 12 \text{ }\Omega$$

$$R_{C1} = 0.036 \times \frac{80}{400} = 7.2 \text{ }\Omega$$

การลัดวงจรไฟฟ้าที่จุด C

9. CIRCUIT-BREAKER

$$X_{CB} = 0.15 \text{ m}\Omega$$

10. CABLE 2 (35 mm²)

$$X_{C2} = 0.09 \times 10^{-3} \times 30 = 2.7 \text{ m}\Omega$$

$$R_{C2} = 0.023 \times \frac{30}{35} = 19.3 \text{ m}\Omega$$

การลัดวงจรไฟฟ้าที่จุด D

11. มอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 50 kW

$$X_M = \frac{25}{100} \times \frac{410^2}{\left(\frac{50}{0.9} \times 0.8\right) 10^3} = 605 \text{ m}\Omega$$

$$R_M = 0.2X_M = 121 \text{ m}\Omega$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดต่างๆ

1. การลัดวงจรที่จุด A (HV BUSBAR)

$$X_A = 0.78 + 0.8 \approx 1.58 \Omega$$

$$R_A = 0.15 + 0.72 \approx 0.87 \Omega$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \approx 1.80 \Omega$$

$$I_A = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 1.80} \approx 6,415 \text{ A}$$

กำหนดให้

I_A คือ สภาวะ "STEADY-STATE I_{sc} " เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า PEAK ASYMMETRICAL;

I_{pA}

หาค่าอัตราส่วนของ $\frac{R_A}{X_A}$ เพื่อหาค่า κ จากรูปที่ 3

$$\frac{R_A}{X_A} = 0.55 \quad \text{จากรูป } \kappa = 1.2$$

$$I_{pA} = 1.2 \times \sqrt{2} \times 6,415 = 10,887 \text{ A}$$

2. การลัดวงจรที่จุด B (LV SWITCHBOARD BUSBAR)

ค่า REACTANCE และค่า RESISTANCE จาก HV BUSBAR จะต้องนำมาใช้คำนวณด้วย โดยการ
ใช้ค่าตัวคูณที่เป็นอัตราส่วนของแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ

$$Z_{BT} = Z_{HT} \left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}} \right)^2$$

เมื่อ

$$\left(\frac{U_{BT}}{U_{HT}} \right)^2 = \left(\frac{410}{20,000} \right)^2 = 0.42 \times 10^{-3}$$

ดังนั้น

$$X_B = [(0.42 \times X_A) + 4.2 + 0.15 + 1.5] \times 10^{-3} = 6.51 \text{ m}\Omega$$

$$R_B = [(0.42 \times R_A) + 0.84 + 0.57] \times 10^{-3} = 1.77 \text{ m}\Omega$$

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} = 6.75 \text{ m}\Omega$$

$$I_B = \frac{410}{\sqrt{3} \times 6.75 \times 10^{-3}} = 35,070 \text{ A}$$

$$\frac{R_B}{X_B} = 0.27 \quad \text{จากรูป } \kappa = 1.46$$

$$I_{pB} = 1.46 \times \sqrt{2} \times 35,070 = 72,400 \text{ A}$$

3. การลัดวงจรที่จุด C (LV SUB-DISTRIBUTION BOARD)

ค่า REACTANCE และค่า RESISTANCE ของ CIRCUIT BREAKER และของ CABLES จะต้อง
นำมาใช้คำนวณร่วมกับ IMPEDANCE ของ LV ด้วย ดังนี้

$$X_C = (X_B + 0.15 + 12) \times 10^{-3} = 18.67 \text{ m}\Omega$$

$$R_C = (R_B + 7.2) \times 10^{-3} = 9.0 \text{ m}\Omega$$

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = 20.7 \text{ m}\Omega$$

$$I_C = \frac{410}{\sqrt{3} \times 20.7 \times 10^{-3}} = 11,400 \text{ A}$$

$$\frac{R_C}{X_C} = 0.48 \text{ ดังนั้น } \kappa = 1.25$$

$$I_{pC} = 1.25 \times \sqrt{2} \times 11,400 = 20,200 \text{ A}$$

4. การลัดวงจรที่จุด D (LV MOTOR)

ค่า REACTANCE และค่า RESISTANCE ของ CIRCUIT BREAKER และของ CABLES จะต้องนำมาใช้คำนวณร่วมกับ IMPEDANCE ด้วย ดังนี้

$$X_D = (X_C + 0.15 + 2.7) \times 10^{-3} = 21.52 \text{ m}\Omega$$

$$R_D = (R_C + 19.2) \times 10^{-3} = 28.2 \text{ m}\Omega$$

$$Z_D = \sqrt{R_D^2 + X_D^2} = 35.5 \text{ m}\Omega$$

$$I_D = \frac{410}{\sqrt{3} \times 35.5 \times 10^{-3}} = 6,700 \text{ A}$$

$$\frac{R_D}{X_D} = 1.31 \text{ ดังนั้น } \kappa = 1.04$$

$$I_{pD} = 1.04 \times \sqrt{2} \times 6,700 = 9,900 \text{ A}$$

การหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรด้วยวิธีของ IEC 60909

วิธีการของ IEC 60909 เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 550 KV ค่าของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่คำนวณได้จะเป็นเพียงค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด เท่านั้น ซึ่งค่านี้เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการกำหนดคุณลักษณะของอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายต่างๆ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ขั้นตอนการคำนวณ

1. กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า

การกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดเกิดการลัดวงจร สามารถกำหนดได้จากสมการ $c \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ ตัวแปร c จะเป็นตัว FACTOR ที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าก่อนที่มีการลัดวงจร U_n ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่า FACTOR C ที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า U_n

Rated voltage U_n	Voltage factor c for calculation of	
	Isc max.	Isc min.
LV (100 to 1000 V)		
If tolerance + 6%	1.05	0.95
If tolerance + 10%	1.1	0.95
MV and HV		
1 to 550 kV	1.1	1

2. หาค่า IMPEDANCE ในรูปแบบ SEQUENCE

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ SYMMETRICAL FAULT จะต้องหาค่า IMPEDANCE ในรูปแบบ POSITIVE SEQUENCE, NEGATIVE SEQUENCE และ ZERO SEQUENCE ของ UPSTREAM NETWORK ของตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร

3. คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) โดยใช้ SYMMETRICAL COPONENTS

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเป็นแบบ SYMMETRICAL ดังนั้นวิธีการหาค่า I_{sc} จะต้องนำ SYMMETRICAL COPONENTS ทั้ง 3 แบบ โดยใช้สูตรการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สูตรในการหาค่า I_{sc} ตามชนิดของการเกิดการลัดวงจร

ชนิดของการลัดวงจร	สูตรกระแสไฟฟ้าลัดวงจร สภาวะปกติ	สูตรกระแสไฟฟ้าลัดวงจร เมื่อ มีการลัดวงจรเกิดทางจาก เครื่องกลไฟฟ้าเป็นระยะ ทางไกลมาก
THREE-PHASE (ANY Z_e)	$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{(1)} }$	$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{(1)} }$
PHASE-TO-PHASE CLEAR OF EARTH ($Z_e = \infty$)	$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{ Z_{(1)} + Z_{(2)} }$	$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{2 Z_{(1)} }$
PHASE-TO-EARTH	$I_{k1}'' = \frac{cU_n \sqrt{3}}{ Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)} }$	$I_{k1}'' = \frac{cU_n \sqrt{3}}{ 2Z_{(1)} + Z_{(0)} }$
PHASE-TO-PHASE-TO-EARTH	$I_{ke2E}'' = \frac{cU_n \sqrt{3} Z_i }{ Z_{(1)}Z_{(2)} + Z_{(2)}Z_{(0)} + Z_{(1)}Z_{(0)} }$ $I_{k2EL2}'' = \frac{cU_n \sqrt{3} Z_{(0)} - aZ_{(2)} }{ Z_{(1)}Z_{(2)} + Z_{(2)}Z_{(0)} + Z_{(1)}Z_{(0)} }$	$I_{ke2E}'' = \frac{cU_n \sqrt{3}}{ Z_{(1)} + 2Z_{(0)} }$ $I_{k2EL2}'' = \frac{cU_n \left \left(\frac{Z_{(0)}}{Z_{(1)}} \right) - a \right }{ Z_{(1)} + 2Z_{(0)} }$

	$I_{k2EL3}'' = \frac{cU_n \sqrt{3} Z_{(0)} - a^2 Z_{(2)} }{ Z_{(1)}Z_{(2)} + Z_{(2)}Z_{(0)} + Z_{(1)}Z_{(0)} }$	$I_{k2EL3}'' = \frac{cU_n \left(\frac{Z_{(0)}}{Z_{(1)}} - a^2 \right)}{ Z_{(1)} + 2Z_{(0)} }$
--	--	--

4. สำหรับจุดที่เกิดการลัดวงจรไฟฟ้ามีความห่างไกลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีผล

4.1 ค่า INITIAL (I_k''), STEADY-STATE (I_k) และ BREAKING (I_b) ของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากัน ($I_k'' = I_k = I_b$)

4.2 ค่า IMPEDANCE ของ POSITIVE SEQUENCE $Z_{(1)}$ และ NEGATIVE SEQUENCE $Z_{(2)}$ เท่ากัน ($Z_{(1)} = Z_{(2)}$)

5. ค่า RESISTANCE PER UNIT LENGTH; R_L ของตัวนำสายเคเบิลที่นำมาคำนวณ จะต้องกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 20°C ในกรณีที่อุณหภูมิมากกว่า 20°C ให้คำนวณด้วยสูตร

$$R_L = \left[1 + \frac{0.004}{^\circ\text{C}} (\theta_e - 20^\circ\text{C}) \right] \times R_{L20} \quad (26)$$

กำหนดให้

R_{L20} คือ ค่า RESISTANCE ที่อุณหภูมิ 20°C

θ_e คือ ค่า PERMISSIBLE TEMPERATURE ($^\circ\text{C}$)

$\frac{0.004}{^\circ\text{C}}$ คือ ค่า FACTOR สำหรับตัวนำที่ทำจาก COPPER, ALUMINIUM และ ALUMINIUM

ALLOYS

6. หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวดจำนวน 2-3 ขด ค่า IMPEDANCE คำนวณจากสูตร

$$Z_{TK} = K_T Z_T \quad (27)$$

$$K_T = 0.95 \frac{C_{\max}}{1 + 0.6x_T} \quad (28)$$

กำหนดให้

x_T คือ ค่า RELATIVE REACTANCE ของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถหาได้จากสมการ

$$x_T = X_T \frac{S_{rT}}{U_{rT}^2} \quad (29)$$

$C_{\max}$ คือ ค่า VOLTAGE FACTOR ตามตารางที่ 6

7. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ภายในสถานีจ่ายไฟฟ้า การเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่บริเวณนี้ จะกำหนดวิธีการหาค่า SUBTRANSIENT IMPEDANCE ของ POSITIVE SEQUENCE NETWORK ด้วยสมการ

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (30)$$

กำหนดให้

R_G คือ ค่า ความต้านทานของขดลวด STATOR ของ SYNCHRONOUS MACHINE สามารถกำหนดได้จากเงื่อนไข ดังนี้

$$R_G = 0.05X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่า } U_{rG} > 1\text{ kV} \text{ เมื่อ } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$$

$$R_G = 0.07X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่า } U_{rG} > 1\text{ kV} \text{ เมื่อ } S_{rG} < 100 \text{ MVA}$$

$$R_G = 0.15X_d'' \text{ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่า } U_{rG} \leq 1\text{ kV}$$

K_G คือ ค่า CORRECTION FACTOR สามารถหาได้จากสมการ

$$K_G = \frac{c_{\max} U_n}{U_{rG} (1 + x_d'' \sin \phi_{rG})} \quad (31)$$

สถานีจ่ายไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า (ON - LOAD - TAP - CHANGER) เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรบริเวณภายนอก (ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า) การกำหนดค่า IMPEDANCE สามารถกำหนดจากสมการ ดังนี้

$$Z_s = K_s (t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (32)$$

K_s คือ ค่า CORRECTION FACTOR สามารถหาได้จากสมการ

$$K_s = \frac{c_{\max} \cdot U_{nQ}^2 \cdot U_{rTLV}^2}{U_{rQ}^2 \cdot U_{rTHV}^2 (1 + |x_d'' - x_T| \sin \phi_{rG})} \quad (33)$$

t_r สามารถหาได้จากสมการ

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \quad (34)$$

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิด (I_{kG}'') คำนวณจากสมการ ดังนี้

$$I_{kG}'' = \frac{c U_{rG}}{\sqrt{3} K_{G,S} Z_G}$$

กำหนดให้

$$K_{G,S} = \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \phi_{rG}}$$

สำหรับสถานีจ่ายไฟฟ้าที่ไม่ได้ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรบริเวณภายนอก (ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า) การกำหนดค่า IMPEDANCE สามารถกำหนดจากสมการ ดังนี้

$$Z_{SO} = K_{SO} (t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (35)$$

K_{so} คือ ค่า CORRECTION FACTOR สามารถหาได้จากสมการ

$$K_{so} = \frac{c_{max} \cdot U_{nQ} \cdot U_{rTLV} \cdot (1 \pm P_T)}{U_{rG} \cdot (1 \pm P_G) \cdot U_{rTHV} \cdot (1 + x_d'' \sin \phi_{rG})} \quad (36)$$

กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เกิด (I_{kG}'') คำนวณจากสมการ ดังนี้

$$I_{kG}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}K_{G,so}Z_G} \quad (37)$$

กำหนดให้

$$K_{G,so} = \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \phi_{rG}} \cdot \frac{1}{1 + P_G}$$

8. ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุด (I_p) สามารถหาได้จากสมการ

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (38)$$

สำหรับ κ สามารถใช้ค่าจากรูปที่ 3 หรือประมาณค่าจากสมการ

$$\kappa = 1.02 + 0.98e^{-3\frac{x}{x}} \quad (39)$$

9. ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร แบบ BREAKING CURRENT (I_b) สามารถหาได้จากสมการ

$$I_b = \mu \cdot I_k'' \quad (40)$$

สำหรับค่า μ คือ ค่า FACTOR ที่กำหนดในช่วงเวลาหน่วงต่ำสุด (t_{min}) สามารถเลือกใช้ค่าตามกราฟที่แสดงในรูปที่ 8 โดยค่า I_r คือ ค่า RATED CURRENT ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

10. ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสภาวะ STEADY - STATE (I_k) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

10.1 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุด

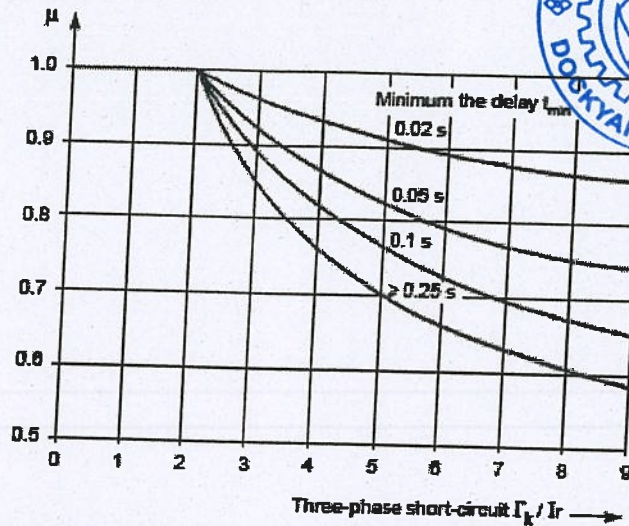
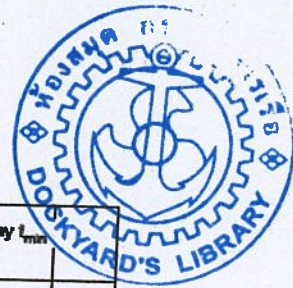
$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I_r$$

10.2 ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำสุด

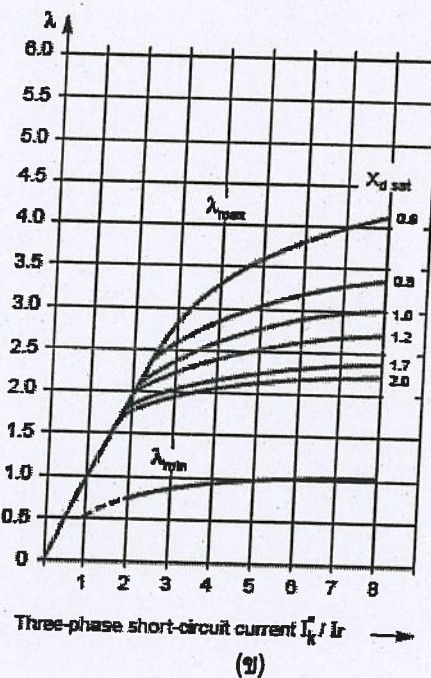
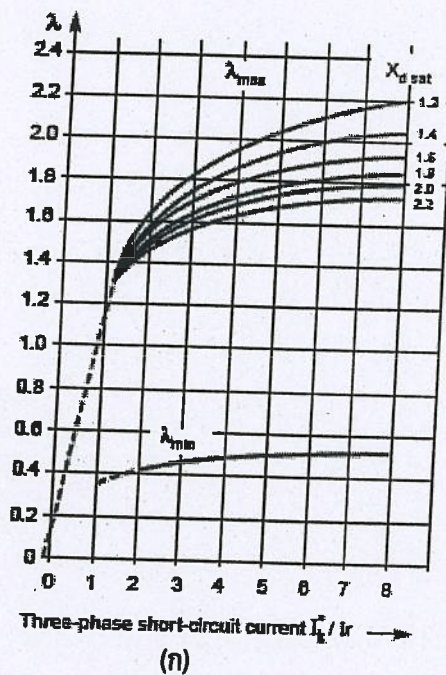
$$I_{kmin} = \lambda_{min} \cdot I_r$$

กำหนดให้

λ_{max} และ λ_{min} สำหรับ TURBO - GENERATOR สามารถหาได้จาก และ เครื่องกลไฟฟ้าแบบ SALIENT POLES สามารถหาได้จากรูปที่ 9



รูปที่ 8 กราฟ FACTOR μ สำหรับคำนวณหาค่า SHORT-CIRCUIT BREAKING CURRENT



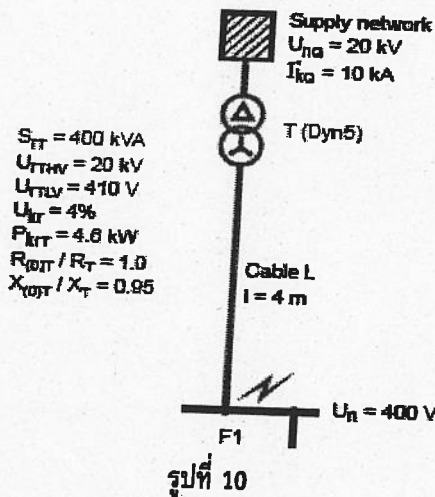
รูปที่ 9 กราฟหาค่า λ_{max} และ λ_{min} สำหรับ (ก) TURBO GENERATOR และ (ข) SALIENT POLES GENERATOR

ตัวอย่างการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

ตัวอย่างที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 20 KV จ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับบัสบาร์ โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อมีการลัดวงจรไฟฟ้าแบบ PHASE-TO-EARTH ที่จุด F1 ดังแสดงในรูปที่ 10 จงคำนวณหาค่า INITIAL SHORT-CIRCUIT CURRENT (I_k'') และ PEAK SHORT-CIRCUIT CURRENT (I_p) เมื่อกำหนดให้

- ไม่คิดค่า IMPEDANCE ระหว่างสายไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า

- สายไฟฟ้า (CABLE L) ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับบัสบาร์เป็นสายชนิด 2 เส้น (ลวดตัวนำทำมาจากอลูมิเนียม (Al) ภายในสายไฟฟ้าแต่ละเส้นจะมีลวดตัวนำไฟฟ้า 3 เส้นลวด) ขนาด $3 \times 185 \text{ mm}^2$ ยาว 4 เมตร มีค่า IMPEDANCE ดังนี้
 $Z_L = (0.208 + j0.068) \Omega / \text{km}; R_{(0)L} = 4.23R_L; X_{(0)L} = 1.21X_L$
- จุดที่เกิดการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาก
- $S_{rT} = 400 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 20 \text{ kV}; U_{rTLV} = 410 \text{ V}; U_{kr} = 4\%$
- $P_{krT} = 4.6 \text{ kW}; R_{(0)T} / R_T = 1.0; X_{(0)T} / X_T = 0.95$



วิธีทำ

1. IMPEDANCE OF THE SUPPLY NETWORK ทางด้านแรงดันต่ำ (LV SIDE)

$$Z_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}} \left(\frac{U_{rTLV}}{U_{rTLV}} \right)^2 = \frac{1.1 \times 20}{\sqrt{3} \times 10} \times \left(\frac{0.41}{20} \right)^2 = 0.534 \text{ m}\Omega$$

เนื่องจากไม่มีการกำหนด $\frac{R_Q}{X_Q}$ จึงต้องสมมุติว่า $\frac{R_Q}{X_Q} = 0.1$

$$X_{Qt} = 0.995 Z_{Qt} = 0.531 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0.1 X_{Qt} = 0.053 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{Qt} = (0.053 + j0.531) \text{ m}\Omega$$

2. IMPEDANCE ของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$Z_{TLV} = \frac{U_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{4}{100} \times \frac{(410)^2}{400 \times 10^3} = 16.81 \text{ m}\Omega$$

$$R_{TLV} = R_{krT} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = 4,600 \times \frac{(410)^2}{(400 \times 10^3)^2} = 4.83 \text{ m}\Omega$$

$$X_{TLV} = \sqrt{Z_{TLV}^2 - R_{TLV}^2} = 16.10 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{TLV} = (4.83 + j16.10) \text{ m}\Omega$$

$$x_T = X_T \frac{S_{rT}}{U_{rTLV}^2} = 16.10 \times \frac{400}{410^2} = 0.03831$$

หาค่า IMPEDANCE CORRECTION FACTOR

$$K_T = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_T} = 0.95 \frac{1.05}{1 + (0.6 \times 0.03831)} = 0.975$$

$$Z_T = K_T Z_{TLV} = (4.71 + j15.70) \text{ m}\Omega$$

ค่า IMPEDANCE ของสายไฟฟ้า

$$Z_L = 0.5 \times (0.208 + j0.068) \times 4 \times 10^{-3} = (0.416 + j0.136) \text{ m}\Omega$$

ผลรวมของค่า IMPEDANCE ทั้งหมด

$$Z_k = Z_{Qt} + Z_{TK} + Z_L = (5.18 + j16.39) \text{ m}\Omega$$

3. หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของ I_k'' และ I_p ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1.05 \times 400}{\sqrt{3} \times 17.17} = 14.12 \text{ kA}$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_k}{X_k} = \frac{5.18}{16.37} = 0.316$$

$$\kappa = 1.02 + 0.98e^{-3\frac{R}{X}} = 1.4$$

$$I_p = \kappa \sqrt{2} \times I_k'' = 1.4 \sqrt{2} \times 14.12 = 27.96 \text{ kA}$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ PHASE-TO-EARTH ที่จุด F1

1. กำหนดค่า ZERO - SEQUENCE IMPEDANCE

1.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

$$R_{(0)T} = R_T; X_{(0)T} = 0.95X_T$$

$$Z_{(0)TK} = K_T (R_T + j0.95X_T) = (4.712 + j14.913) \text{ m}\Omega$$

1.2 สายไฟฟ้า

$$Z_{(0)L} = (4.23R_L + j1.21X_L) = (1.76 + j0.165) \text{ m}\Omega$$

2. หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของ I_k'' และ I_p ของ PHASE-TO-EARTH

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_K = (5.18 + j16.37) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{(0)} = Z_{(0)TK} + Z_{(0)L} = (16.83 + j47.82) \text{ m}\Omega$$

2.1 ค่า I_k''

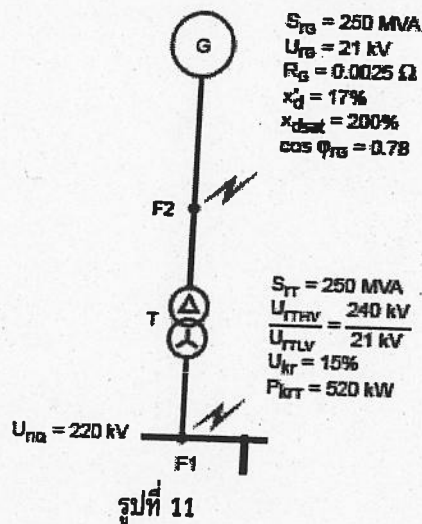
$$I_{k1}'' = \frac{cU_n \sqrt{3}}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} = \frac{1.05 \times 400 \sqrt{3}}{50.70} = 14.35 \text{ kA}$$

2.2 ค่า I_{P1} โดยใช้ค่า k จาก POSITIVE - SEQUENCE IMPEDANCE

$$I_{P1} = k\sqrt{2}I_{k1} = 1.4\sqrt{2} \times 14.35 = 28.41 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 2 สถานีจ่ายไฟฟ้าแห่งหนึ่ง ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จำนวน 1 เครื่อง และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ NO - LOAD TAP - CHANGER ดังแสดงในรูปที่ 11 เกิดการลัดวงจรไฟฟ้าที่ 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่ง F1 เกิดภายนอกสถานีจ่ายไฟฟ้า และ F2 เกิดภายในสถานีจ่ายไฟฟ้า จงหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร $I_k''; I_p; I_{kmax}$ และ I_b โดยมีข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

- ค่า IMPEDANCE ของสายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า ไม่นำมาคิด
- กำหนดค่า $c = 1.1$
- กำหนดค่า $t_{min} = 0 \text{ s}$
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบ CYLINDICAL ROTOR (SMOOTH POLES)



วิธีทำ

1. หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่จุด F1

$$Z_{THV} = \frac{u_{kt}}{100} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rt}} = \frac{15}{100} \times \frac{240^2}{250} = 34.56 \Omega$$

$$R_{THV} = P_{krt} \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rt}^2} = 0.52 \times \frac{240^2}{250^2} = 0.479 \Omega$$

$$X_{THV} = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2} = 34.557 \Omega$$

$$Z_{THV} = (0.479 + j34.557) \Omega$$

IMPEDANCE ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100} \times \frac{U_{rg}^2}{S_{rg}} = \frac{17}{100} \times \frac{21^2}{250} = 0.2999 \Omega$$

$$Z_G = R_G + jX_d'' = 0.0025 + j0.2999$$

$$|Z_G| = 0.2999 \Omega$$

$$S_{rg} > 100 \text{ MVA} \text{ ดังนั้น } R_{Gf} = 0.05X_d'' \text{ และ } Z_{Gf} = 0.015 + j0.2999$$

$$K_s = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{max}}{1 + |X_d'' - X_T| \sin \phi_{rG}}$$

$$= \frac{220^2}{21^2} \times \frac{21^2}{240^2} \times \frac{1.1}{1 + |0.17 - 0.15| \times 0.6258} = 0.913$$

$$Z_s = K_s (t_r^2 Z_G + Z_{THV}) = 0.913 \left(\left(\frac{240}{21} \right)^2 \times (0.0025 + j0.2999) + (0.479 + j34.557) \right)$$

$$= 0.735 + j67.313$$

$$I_{ks}'' = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}Z_s} = \frac{11 \times 220}{\sqrt{3}(0.735 + j67.313)} = 0.023 - j2.075$$

$$|I_{ks}''| = 2.08 \text{ kA}$$

หาค่า PEAK SHORT-CIRCUIT CURRENT

$$Z_{sf} = 2.226 + j67.313 \text{ ดังนั้น } \frac{R_{sf}}{X_{sf}} = 0.033 ; \kappa = 1.908$$

$$I_{ps} = \kappa_s \times \sqrt{2} \times I_{ks}'' = 1.908 \times \sqrt{2} \times 2.08 = 5.61 \text{ kA}$$

หาค่า SHORT-CIRCUIT BREAKING CURRENT

ค่า FACTOR μ ได้จากการใช้ตารางของรูปที่ 8 โดยจะต้องหาค่าของฟังก์ชันของ $\frac{I_{kg}''}{I_{rG}}$ เมื่อกำหนดให้

ช่วงเวลา DEAD TIME มีค่าต่ำสุด; t_{min}

$$\frac{I_{kg}''}{I_{rG}} = \frac{I_{ks}''}{I_{rG}} \times \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{2.08}{6.873} \times \frac{240}{21} = 3.46$$

จากรูปที่ 7 ที่เวลา $t_{min} = 0.1 \text{ s}$ จะได้ค่า $\mu \approx 0.85$

$$I_{bs} = 0.85 \times 2.08 = 1.77 \text{ kA}$$

หาค่า MAXIMAL STEADY-STATE SHORT-CIRCUIT CURRENT

ค่า FACTOR λ_{max} ได้จากการใช้ตารางของรูปที่ 9 โดยจะต้องหาค่าของฟังก์ชันของ $\frac{I_{kg}''}{I_{rG}}$ และ $x_{dsat} = 2.0$

จะได้ $\lambda_{max} = 1.65$

$$I_{ks} = \lambda_{max} I_{rG} \times \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = 1.65 \times 6.873 \times \frac{21}{240} = 0.99 \text{ kA}$$

2. หาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่จุด F2

$$I_{kG}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}K_{G,S}Z_G}$$

$$K_{G,S} = \frac{c_{max}}{1 + x_d \sin \phi_{rG}} = \frac{1.1}{1 + (0.17 \times 0.626)} = 0.994$$

$$I_{kG}'' = \frac{1.1 \times 21}{\sqrt{3} \times 0.994 \times 0.2999} = 44.74 \text{ kA}$$

หาค่า PEAK SHORT-CIRCUIT CURRENT

$$I_{pG} = \kappa_G \times \sqrt{2} \times I_{kG}''$$

$$\kappa_G = \frac{R_{Gf}}{X_d''} \text{ เมื่อ } R_{Gf} = 0.05X_d'' \text{ ดังนั้น } \frac{R_{Gf}}{X_d''} = 0.05$$

$$\kappa_G = 1.86$$

$$I_{pG} = 1.86 \times \sqrt{2} \times 44.74 = 117.69 \text{ kA}$$

หาค่า SHORT-CIRCUIT BREAKING CURRENT

ค่า FACTOR μ ได้จากการใช้ตารางของรูปที่ 7 โดยจะต้องหาค่าของฟังก์ชันของ $\frac{I_{kG}''}{I_{rG}}$ เมื่อกำหนดให้

ช่วงเวลา DEAD TIME มีค่าต่ำสุด; t_{min}

$$\frac{I_{kG}''}{I_{rG}} = \frac{44.74}{6.873} = 6.51$$

จากรูปที่ 7 ที่เวลา $t_{min} = 0.1 \text{ s}$ จะได้ค่า $\mu \approx 0.71$

$$I_{bs} = 0.71 \times 44.74 = 31.77 \text{ kA}$$

หาค่า MAXIMAL STEADY-STATE SHORT-CIRCUIT CURRENT

ค่า FACTOR λ_{max} ได้จากการใช้ตารางของรูปที่ 9 โดยจะต้องหาค่าของฟังก์ชันของ $\frac{I_{kG}''}{I_{rG}}$ และ

$$x_{dsat} = 2.0$$

$$\frac{I_{kG}''}{I_{rG}} = 6.51 \text{ จะได้ } \lambda_{max} = 1.75$$

$$I_{kG} = \lambda_{max} I_{rG} = 1.75 \times 6.873 = 12.0 \text{ kA}$$



การแจกจ่าย

หน่วย	จำนวนเล่ม	เลขทะเบียน
กพช.อร.		
จก.กพช.อร.	1	
ผ.วิชาการ กวจพ.กพช.อร.	1	
ห้องสมุด กวจพ.กพช.อร.	5	
กคภ.กพช.อร.	2 (รวมต้นฉบับ)	
กผช.อร.		
กผงร.กผช.อร.	1	
กอร.กผช.อร.	1	
กอก.กผช.อร.	1	
กอฟ.กผช.อร.	1	
อธบ.อร.		
กผป.อธบ.อร.	1	
กณ.อธบ.อร.	1	
อจปร.อร.		
ห้องสมุด อจปร.อร.	3	
กผป.อจปร.อร.	1	
กอบ.อจปร.อร.	1	
กคภ.อจปร.อร.	1	
กชส.อจปร.อร.	1	
กรก.อจปร.อร.	1	
กบต.อจปร.อร.	1	
กบก.อจปร.อร.	1	
อรม.อร.		
กจก.อรม.อร.		
หน่วย	จำนวนเล่ม	เลขทะเบียน
กผป.อรม.อร.	1	
กคภ.อรม.อร.	1	
กรก.อรม.อร.	1	
กฟพ.อรม.อร.	1	
กสน.อรม.อร.		

กรม.ฐท.สส.

กผกช.กรม.ฐท.สส.

1

กงน.กรม.ฐท.สส.

1

ฐท.สข.

กงน.ฐท.สข.

1

ฐท.พง.

กงน.ฐท.พง.

1