บทที่ 11
การคำนวณกระแสลัดวงจร

11.1 บทนำ

การเลือกใช้บริภัณฑ์และระบบไฟฟ้าต้องคำนึงถึง

- กระแสขณะใช้งานตามปกติ
- กระแสขณะที่เกิดลัดวงจร

กระแสลัดวงจร

– การที่วงจรไฟฟ้าเกิดความผิดพลาดโดยอุบัติเหตุหรือ ความไม่ตั้งใจ

– ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลง

– ส่งผลให้กระแสไหลมากกว่ากระแสปกติหลายเท่า

– ทำให้เกิดความเครียดทางกล (Mechanical Stress) และ ความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) ขึ้น

– ทำให้บริภัณฑ์เสียหายและเป็นอันตรายต่อคนได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องคำนึงถึงผลของกระแสลัด วงจรเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจร

- เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบจ่ายกำลัง ไฟฟ้าผู้ออกแบบระบบไฟฟ้า
- จะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้า เพื่อที่จะได้เลือกบริภัณฑ์ที่เหมาะสม
- ถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้บริภัณฑ์ที่ทนกระแสลัดวงจรไม่เพียงพอก็อาจจะ เกิดความเสียหายแก่ทรัพย์สิน และชีวิตเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น
- ถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้ขนาดของบริภัณฑ์ใหญ่เกินไป ราคาค่าติดตั้งระบบไฟฟ้าก็จะแพงเกินไปโดยไม่จำเป็น

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก สำหรับผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าที่ดี

11.2 มาตรฐานการคำนวณกระแสลัดวงจร

มาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจรขึ้น คือ

IEC 60909 " Short-circuit Current Calculation in Three-phase A.C. System "

มาตรฐาน IEC 60909 ได้แบ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(Far-from-generator Short Circuit)

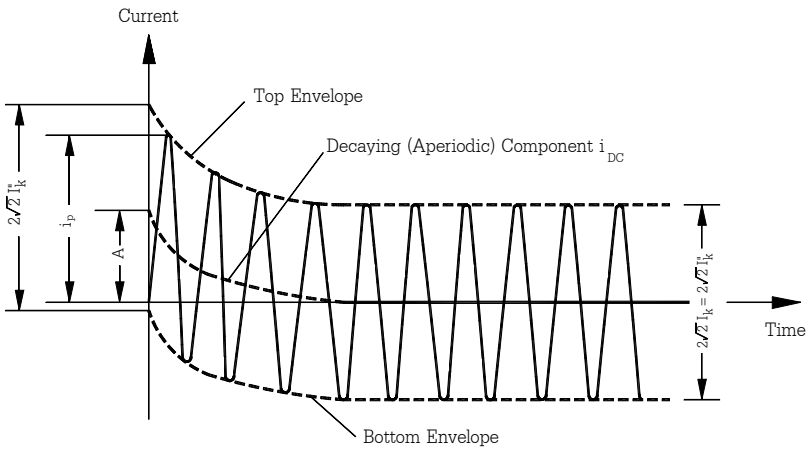
2. การลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(Near-to-generator Short Circuit)

เมื่อเกิดการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสลัดวงจรจะเป็นผลของกระแส 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1. ส่วนประกอบ A.C. ซึ่งมีขนาดคงที่ ตลอดระยะเวลาการเกิดลัดวงจร
2. ส่วนประกอบ D.C. ซึ่งมีค่าสูงสุดค่าหนึ่ง และค่อยๆ มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์



รูปที่ 11.1 แสดงรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การลัดวงจรของระบบไฟฟ้าอาจแบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

1. การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

(Balanced Three-Phase Short Circuit)

2. การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน

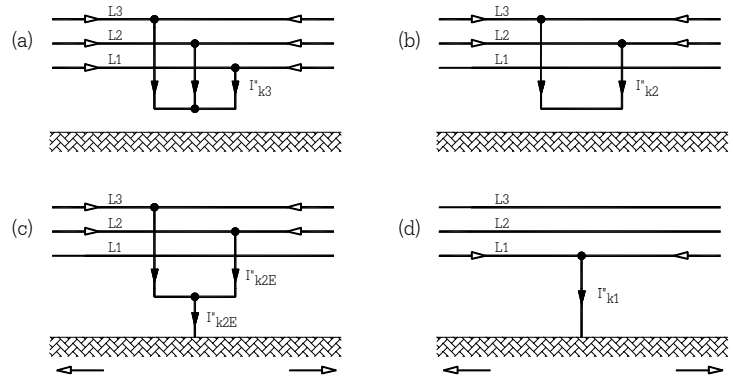
(Line to Line Short Circuit Without Earth Connection)

3. การลัดวงจรแบบสายถึงสายต่อกับดิน

(Line to Line Short Circuit With Earth Connection)

4. การลัดวงจรแบบสายถึงดิน

(Line to Earth Short Circuit)



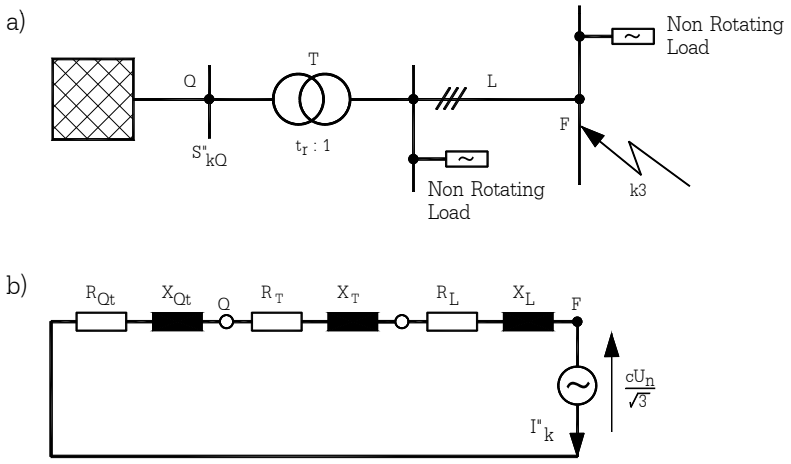
a) Balance Three Phase Short Circuit.
b) Line to Line Short Circuit Without Earth Connection.
c) Line to Line Short Circuit With Earth Connection.
d) Line to Earth Short Circuit.

รูปที่ 11.2 ชนิดของการลัดวงจร

11.3 แหล่งจ่ายไฟสมมูล

การลัดวงจรที่จุดใดๆ ในวงจรไฟฟ้า ณ จุดนั้นอาจจะแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายไฟสมมูล (**Equivalent Voltage Source**) โดยที่แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนระบบไฟฟ้า เครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกลอซิงโครนัส จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ภายในของมัน

รูปที่ **11.3** แสดงตัวอย่างของแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร **F** ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนแหล่งจ่ายไฟอื่นๆ ในระบบให้มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 11.3 แสดงตัวอย่างของแหล่งจ่ายไปสมมูล

ที่ตำแหน่งลัดวงจร **F** แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะมีค่า $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ โดย **c** คือ ตัวประกอบแรงดัน (**Voltage Factor**) และ U_n คือ แรงดันของระบบที่ใช้

ค่าตัวประกอบแรงดัน **c** จะมีค่าแตกต่างกันไปตามระบบแรงดันที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ **11.1**

ตารางที่ 11.1 Voltage Factor c

Nominal Voltage U_a	Voltage Factor c for the Calculation of	
	Maximum Short-circuit Current C_{maz}	Minimum Short-circuit Current C_{min}
Low Voltage 100 V to 1000 V (IEC Publication 38 , Table I)		
a) 230 V / 400 V	1.00	0.95
b) Other Voltages	1.05	1.00
Medium Voltage > 1 kV to 35 kV (IEC Publication 38 , Table III)	1.10	1.00
High Voltage > 35 kV to 230 kV (IEC Publication 38 , Table IV)	1.10	1.00

Note. - cU_a Should Not Exceed the Highest Voltage U_m for Equipment of Power System

ตัวอย่างที่ 11.1 ระบบไฟฟ้ามีค่า $R_Q = 0.1\ X_Q$

ให้หาค่า X_Q ในเทอมของ Z_Q

วิธีทำ

$$\therefore\ Z_Q = \sqrt{R_Q^2 + X_Q^2}$$

$$= \sqrt{(0.1X_Q)^2 + X_Q^2}$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+0.1^2}}$$

$$= 0.995 Z_Q$$

11.4 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร อาจแบ่งออกเป็น **3** ส่วน ตามหลักของ **Symmetrical Components** คือ

- $Z_{(1)}$ **Positive Sequence Impedance**
- $Z_{(2)}$ **Negative Sequence Impedance**
- $Z_{(0)}$ **Zero Sequence Impedance**

$Z_{(1)}$ ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

$Z_{(1)}, Z_{(2)}, Z_{(0)}$ ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบที่เหลือ

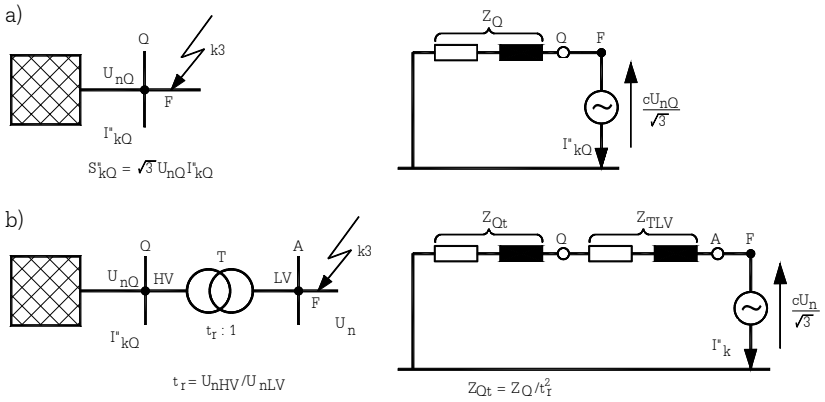
ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรอาจแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

- ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า
- ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
- ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง
- ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์

ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (Electrical System Impedance)

ขนาดของระบบไฟฟ้าอาจแทนได้ด้วยค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (Initial Symmetrical Short-circuit Power) S''_{kQ} ถ้าระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากจนถือว่าเป็นบัสอนันต์ (Infinite Bus) จะได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก จนถือได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์

รูปที่ **11.4** จะแสดงรูปของระบบและวงจรสมมูล สำหรับระบบไฟฟ้าทั้งกรณีที่มีหม้อแปลงและกรณีที่ไม่มี หม้อแปลง



รูปที่ **11.4** ระบบและวงจรสมมูล สำหรับระบบไฟฟ้า

a) $$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \qquad \text{.....(11.1)}$$

b) $$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \qquad \text{.....(11.2)}$$

โดยที่ :

U_{nQ} = แรงดันของระบบที่จุด Q

S''_{kQ} = กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ที่จุด Q

I''_{kQ} = กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ที่จุด Q

c = ตัวประกอบแรงดัน

t_r = อัตราส่วนการแปลงพิกัด (Rated Transformation Ratio) โดยที่ Tap-changer อยู่ในตำแหน่งหลัก

แรงดันสูงกว่า **35** kV จ่ายด้วยสายส่งเหนือศีรษะ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_Q อาจพิจารณาเพียงค่ารีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียว เป็น $Z_Q = j X_Q$

<u>กรณีอื่นๆ</u> ถ้าไม่ทราบค่าความต้านทาน R_Q ของระบบไฟฟ้าที่แน่นอน

$$R_Q = 0.1\, X_Q$$

และ $$X_Q = 0.995\, Z_Q$$

ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} และกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} นั้น สามารถหาได้จากทางการไฟฟ้า สำหรับที่ระดับแรงดัน **22** kV และ **24** kV นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้ S''_{kQ} = **500** MVA ซึ่งถ้าคำนวณตามสูตรที่กล่าวมาแล้ว จะได้ว่า

ตัวอย่างที่ 11.2 ระบบไฟฟ้ามี S''_{kQ} = 500 MVA ที่ 22 kV , $R_Q = 0.1\ X_Q$ ถ้ามีหม้อแปลง 22 kV/400-230 V ต่ออยู่ ให้หาค่า R_{Qt} และ X_{Qt} ของระบบไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

วิธีทำ

$$Z_{Qt} = c\,\frac{U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2}$$

$$= \frac{1.1 \quad 22^2}{500} \times \frac{1}{\left(\frac{23000}{400}\right)^2}$$

$$= 3.52 \times 10^{-4}\ \Omega$$

ตัวอย่างที่ 11.2(ต่อ)

$$X_{Qt} = 0.995\ Z_Q$$

$$= 0.995 \times 0.3532$$

$$= 0.350\ m\Omega$$

$$R_{Qt} = 0.1\ X_{Qt}$$

$$= 0.035\ m\Omega$$

ระบบ 400/230 V Z_{Qt} = 0.352 mΩ X_{Qt} = 0.350 mΩ R_{Qt} = 0.035 mΩ

ระบบ 416/240 V Z_{Qt} = 0.381 mΩ X_{Qt} = 0.379 mΩ R_{Qt} = 0.038 mΩ

ค่าที่คำนวณได้เป็นค่า Positive-sequence ส่วนค่า Negative-sequence ก็ถือว่าเท่ากับค่า Positive-sequence แต่ Z_o ของวงจร ระบบไฟฟ้าไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีหม้อแปลงต่อแบบ Delta-way หรือ Wye-delta อยู่เสมอ ซึ่งจะแยก Zero-sequence System ออกจากกัน

ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

(Transformer Impedance)

$$Z_T = R_T + jX_T$$

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \qquad \text{..... (11.3)}$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \qquad \text{..... (11.4)}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \qquad \text{..... (11.5)}$$

สำหรับค่า $Z_{(0)T} = R_{(0)T} + j\,X_{(0)T}$ ของหม้อแปลงนั้นอาจหาได้จากบริษัทผู้ผลิต แต่สำหรับหม้อแปลงซึ่งต่อแบบDelta-way อาจใช้ค่าโดยประมาณดังต่อไปนี้ได้ คือ

$$R_{(0)T} = R_T$$

$$X_{(0)T} = 0.95\ X_T$$

ตัวอย่างที่ 11.3 หม้อแปลงขนาด **2000** kVA ,

22 kV/400-230 V % U_k = 6 , Load Loss = 24 kW

ให้หา R_T และ X_T อ้างอิงไปทางด้านแรงต่ำ

วิธีทำ

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$= \frac{6}{100} \times \frac{0.4^2}{2}$$

$$= 4.8 \times 10^{-3} \ \Omega$$

$$= 4.80 \ \text{m}\Omega$$

ตัวอย่างที่ 11.3 (ต่อ)

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3 I_{rT}^2}$$

$$= \frac{24 \times 1000}{3\left(\frac{2000 \times 1000}{\sqrt{3} \quad 400}\right)^2}$$

$$= 9.60 \times 10^{-4} \ \Omega$$

$$= 0.96 \ \text{m}\Omega$$

$$X_T = \sqrt{4.80^2 - 0.96^2}$$

$$= 4.70 \ \text{m}\Omega$$

ข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณนั้น สามารถหามาได้จากป้ายพิกัดหรือสอบถามจากบริษัทผู้ผลิต ตารางที่ **11.2** และ **11.3** แสดงค่าข้อมูลต่างๆ ของหม้อแปลงชนิด Oil Type ขนาดพิกัดต่างๆ โดยที่ ด้านแรงสูง = **22** kV , **33** kV ด้านแรงต่ำ = **400/230** V และด้านแรงสูง = **12** kV , **24** kV แรงต่ำ = **416/240** V ตามลำดับ ส่วนตารางที่ **11.4** และ **11.5** แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ารวมกับค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบ **400/230** V และ **416/240** V ตามลำดับ

ตารางที่ **11.2** หม้อแปลงไฟฟ้า ด้านแรงต่ำ **400/230** V

พิกัด (kVA)	I_{FL} (A)	$\%u_k$	P_L(kW)	Z_T(mΩ)	R_T(mΩ)	X_T(mΩ)
315	455	4	3.9	20.32	6.29	19.32
400	577	4	4.6	16.0	4.60	15.32
500	722	4	5.5	12.8	3.52	12.31
630	909	4	6.5	10.16	2.62	9.82
800	1155	6	11.0	12.00	2.75	11.68
1000	1443	6	13.5	9.60	2.16	9.35
1250	1804	6	16.4	7.68	1.68	7.49
1600	2309	6	19.8	6.00	1.24	5.87
2000	2887	6	24.0	4.80	0.96	4.70
2500	3608	6	26.8	3.84	0.69	3.78

ตารางที่ 11.3 หม้อแปลงไฟฟ้า ด้านแรงต่ำ 416/240 V

พิกัด (kVA)	I_{FL}(A)	$\%u_k$	P_L(kW)	Z_T(mΩ)	R_T(mΩ)	X_T(mΩ)
315	437	4	3.9	21.98	6.81	20.90
400	555	4	4.6	17.31	4.98	16.58
500	694	4	5.5	13.84	3.81	13.31
630	874	4	6.5	10.99	2.83	10.62
800	1110	6	11.0	12.98	2.97	12.63
1000	1388	6	13.5	10.38	2.34	10.11
1250	1735	6	16.4	8.31	1.82	8.11
1600	2221	6	19.8	6.49	1.34	6.35
2000	2776	6	24.0	5.19	1.04	5.09
2500	3470	6	26.8	4.15	0.74	4.08

ตารางที่ 11.5 ระบบไฟฟ้ารวมกับหม้อแปลงไฟฟ้า ด้านแรงต่ำ 416/240 V

พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA)	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (mΩ)	อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (mΩ)	อิมพีแดนซ์รวม (mΩ)
315	6.81 + j 20.90	0.04 + j 0.38	6.85 + j 21.28
400	4.98 + j 16.58	0.04 + j 0.38	5.02 + j 16.96
500	3.81 + j 13.31	0.04 + j 0.38	3.85 + j 13.69
630	2.83 + j 10.62	0.04 + j 0.38	2.87 + j 11.00
800	2.97 + j 12.63	0.04 + j 0.38	3.01 + j 13.01
1000	2.34 + j 10.11	0.04 + j 0.38	2.38 + j 10.49
1250	1.82 + j 8.11	0.04 + j 0.38	1.86 + j 8.49
1600	1.34 + j 6.35	0.04 + j 0.38	1.38 + j 6.73
2000	1.04 + j 5.09	0.04 + j 0.38	1.08 + j 5.47
2500	0.74 + j 4.08	0.04 + j 0.38	0.78 + j 4.46

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเหนือศีรษะและเคเบิล

(Overhead Lines and Cables Impedance)

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร $Z_L = R_L + j X_L$ สามารถหาได้โดยการคำนวณจากข้อมูลต่างๆ ของตัวนำ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัด และ ระยะศูนย์กลางของตัวนำ

ค่าความต้านทานประสิทธิผลต่อหน่วยความยาว R'_L ของสายเหนือศีรษะที่อุณหภูมิ 20°C สามารถคำนวณได้จากค่าพื้นที่หน้าตัด q_n และค่าความต้านทานจำเพาะ ดังนี้

ρ

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \qquad \text{..... (11.6)}$$

โดยที่ :

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega mm^2}{m} \quad \text{For Copper}$$

$$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega mm^2}{m} \quad \text{For Alumin ium}$$

$$\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega mm^2}{m} \quad \text{For Alumin ium Alloy}$$

ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว X'_L สำหรับสายเหนือศีรษะ สามารถคำนวณได้จาก

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{0.25}{n}+\ln\frac{d}{r}\right)$$

$$= f\mu_0\left(\frac{0.25}{n}+\ln\frac{d}{r}\right) \quad \text{.....} \quad (11.7)$$

โดยที่ :

d = ระยะเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างตัวนำ

r = รัศมีของตัวนำเดี่ยว ในกรณีของตัวนำบันเดิล จะแทน r ด้วย $\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ โดยที่ R คือรัศมีบันเดิล

n = จำนวนตัวนำบันเดิล

แทนค่า $\mu_0 = 4\pi\ 10^{-4}$ H/km เป็นค่าความซาบซึมได้ (Permeability) ของสูญญากาศ ดังนั้นสามารถ สมการเขียนได้ง่ายขึ้นเป็น

$$X'_L = 0.0628\left(\frac{0.25}{n}+\ln\frac{d}{r}\right)\ \Omega/\text{km} \quad \text{for } f = 50\text{ Hz} \cdots\cdots \quad (11.8)$$

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน จึงได้ให้ข้อมูลค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสาย ไฟฟ้าชนิดแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC ดังแสดงในตารางที่ **11.6** ส่วนตารางที่ **11.7** แสดง ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของ**Busway** ทั้งชนิดอะลูมิเนียมและทองแดง

ตารางที่ 11.6 สายไฟฟ้าแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC

ขนาดสาย (mm^2)	ค่าความต้านทาน ($m\Omega$/m)	ค่ารีแอกแตนซ์ ($m\Omega$/m)
2.5	7.400	0.155
4	4.625	0.141
6	3.083	0.131
10	1.850	0.121
16	1.156	0.113
25	0.740	0.107
35	0.529	0.103
50	0.370	0.100
70	0.264	0.097
95	0.195	0.096
120	0.154	0.094
150	0.123	0.092
185	0.100	0.091
240	0.077	0.090
300	0.062	0.089
400	0.051	0.088
500	0.041	0.087

ตารางที่ 11.7 Busway

ขนาด (A)	อะลูมิเนียม ($m\Omega$/m)		ทองแดง ($m\Omega$/m)	
	ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์	ความต้านทาน	รีแอกแตนซ์
225-600	0.1342	0.0350	0.0764	0.0350
800	0.0814	0.0216	0.0764	0.0350
1000	0.0712	0.0186	0.0623	0.0260
1200	0.0568	0.0150	0.0489	0.0216
1350	0.0407	0.0112	0.0417	0.0186
1600	0.0367	0.0098	0.0328	0.0150
2000	0.0292	0.0079	0.0240	0.0112
2500	0.0269	0.0071	0.0164	0.0079
3000	0.0210	0.0057	0.0161	0.0077
4000	0.0148	0.0038	0.0121	0.0057

สำหรับค่า Zero Sequence Impedance

$Z_{(0)L}$ = $R_{(0)L}$ + j $X_{(0)L}$ ขึ้นอยู่กับทางกลับของกระแสลัดวงจรลงดิน (Return Path)

หาได้จากอัตราส่วน

$R_{(0)L} / R_L$ และ $X_{(0)L} / X_L$ ซึ่งหาได้ด้วยการวัด หรือการคำนวณ

อัตราส่วนโดยประมาณ คือ

$R_{(0)L} / R_L$ = 4

$X_{(0)L} / X_L$ = 3

ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ (Motor Impedance)

มอเตอร์ซิงโครนัส

- จะจ่ายกระแสลัดวงจรไปยังตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร
- ไม่ต้องคิดถึงผลของมอเตอร์ซิงโครนัส

เมื่อ

$$\sum I_{rM} \leq 0.01 I''_k \quad \text{..... (11.9)}$$

โดยที่ :

$\sum_{\text{วงจร}} I_{rM}$ = ผลรวมของกระแสพิกัดของมอเตอร์ในบริเวณที่เกิดลัด

I''_k = กระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งลัดวงจรโดยไม่มีผลของมอเตอร์

ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์

$Z_M = R_M + jX_M$ สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U^2_{rM}}{S_{rM}} \quad \text{..... (11.10)}$$

โดยที่ :

U_{rM} = แรงดันพิกัดของมอเตอร์

I_{rM} = กระแสพิกัดของมอเตอร์

S_{rM} = กำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์

I_{LR}/I_{rM} = อัตราส่วนของกระแสล็อกโรเตอร์ต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์

สำหรับค่าโดยประมาณของ R_M/X_M ให้ใช้ค่าดังนี้

R_M/X_M = 0.01 , X_M = 0.995 Z_M สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว 1 MW

R_M/X_M = 0.15 , X_M = 0.989 Z_M สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว 1 < MW

R_M/X_M = 0.42 , X_M = 0.922 Z_M สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำที่ต่อถึงกัน

สามารถคำนวณหากำลังปรากฏ S_{rM} ได้โดยกำหนดให้

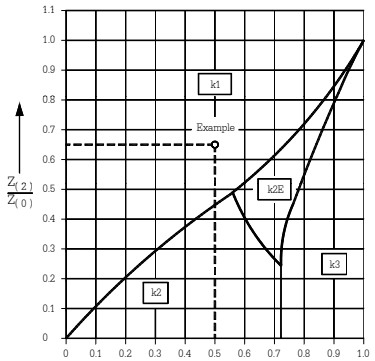
ตัวประกอบกำลัง Cos Φ = 0.8

ประสิทธิภาพ η = 0.9

การคำนวณกระแสลัดวงจร

ชนิดของการลัดวงจรที่ให้กระแสสูงสุด

การลัดวงจรทั้ง **4** ชนิด



ถ้า

$z_{(2)} / z_{(1)}$ = 0.5 กระแสลัดวงจรแบบสายถึงดิน (k_1)

$z_{(2)} / z_{(0)}$ = 0.65 จะให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด

รูปที่ **11.5** ชนิดของการลัดวงจร

การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

(Balanced Three-phase Short Circuit)

- เกี่ยวข้องเฉพาะ อิมพีแดนซ์ซีเควนส์บวก (**Positive Sequence Impedance**) เท่านั้น

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2+X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \qquad \text{..... (11.11)}$$

โดยที่ :

$cU_n/\sqrt{3}$ = แหล่งจ่ายไฟสมมูล

R_k = ผลรวมของความต้านทานที่ต่ออนุกรม

X_k = ผลรวมของรีแอกแตนซ์ที่ต่ออนุกรม

Z_k = อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ในกรณีของการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะได้ว่า

$$I_k = I_b = I''_k$$

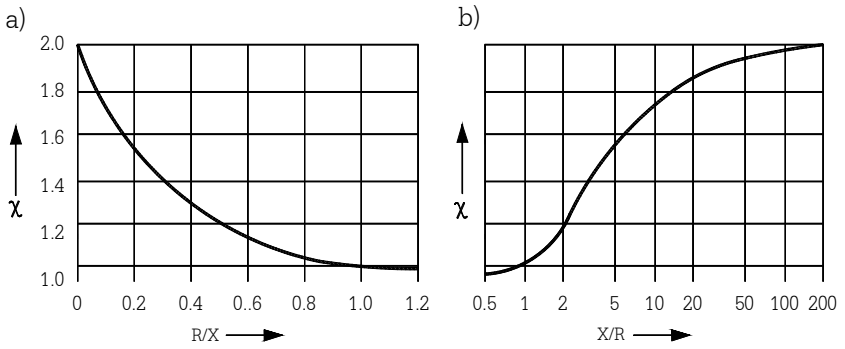
กระแสลัดวงจรค่ายอด i_p

เนื่องจากกระแสลัดวงจรมาจากวงจรที่ต่ออนุกรม ดังนั้นกระแสลัดวงจรค่ายอดจึงหาได้จาก

$$i_p = \chi\sqrt{2}\, I''_k \qquad \text{..... (11.12)}$$

โดยที่ค่า χ จะขึ้นอยู่กับค่า **R/X** หรือ **X/R** อาจคำนวณค่า χ ได้โดยประมาณจาก

$$\chi \approx 1.02 + 0.98e^{-3R/X}$$



รูปที่ **11.6** ตัวคูณค่ายอด

กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร I_b

สำหรับการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$I_b = I_k = I''_k$$

การลัดวงจรสายถึงสายไม่ต่อกับดิน

(Line to Line Short Circuit Without Earth Connection)

กระแสลัดวงจรเริ่มต้น I''_{k2}

ด้วยแรงดันสมมูลเท่ากับ cU_n / กระแสลัดวงจรเริ่มต้นสามารถคำนวณได้

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{Z_{(1)}+Z_{(2)}} \quad \text{..... (11.13)}$$

$$= \frac{cU_n}{2Z_{(1)}} \quad \text{ถ้า} \quad Z_{(1)} = Z_{(2)}$$

อัตราส่วนของ I''_{k2} กับ I''_k หาได้คือ $\frac{I''_{k2}}{I''_k} = \frac{\sqrt{3}}{2}$

กระแสลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน = $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ของกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

กระแสลัดวงจรยอด

$$i_{p2} = \chi\sqrt{2}\, I''_{k2}$$

ใช้คำนวณหากระแสลัดวงจรต่ำสุด (Minimum Fault Current ; I_{min})

การลัดวงจรแบบสายถึงดิน *(Line to Earth Short Circuit)*

- เป็นการลัดวงจรที่เกิดบ่อยที่สุด สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ที่ต่อลงดิน
- การลัดวงจรแบบนี้จะเกิดระหว่างสายเฟส (สายมีไฟ , สาย Hot) กับสายนิวทรัล (Neutral) หรือสายดิน (Ground)และสำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส 2 สาย (ไฟฟ้าแรงดัน 220 V , 230 V หรือ 240 V) การลัดวงจรที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นแบบสายถึงดิน

กระแสลัดวงจรเริ่มต้น I''_{k1}

ด้วยแรงดันสมมูลเท่ากับ cU_n / กระแสลัดวงจรเริ่มต้นสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$= \frac{\sqrt{3}\, cU_n}{Z_{(0)}+Z_{(1)}+Z_{(2)}} \quad \text{..... (11.14)}$$

$$= \frac{\sqrt{3}\, cU_n}{2Z_{(1)}+Z_{(0)}} \quad \text{ถ้า} \quad Z_{(1)} = Z_{(2)}$$

กระแสลัดวงจรยอด

$$i_{p1} = \chi\sqrt{2}\, I''_{k1}$$

การคำนวณกระแสลัดวงจร (คิดผลของมอเตอร์)

- เมื่อเกิดการลัดวงจรมอเตอร์ซิงโครนัสจะจ่ายกระแสลัดวงจรไปยังจุดที่เกิดการลัดวงจรด้วย ในกรณีการลัดวงจรแบบ 3 เฟส จะส่งผลต่อกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_k กระแสลัดวงจรค่ายอด i_p และกระแสลัดวงจรแบบสมมาตร I_b
- เราไม่คิดผลของมอเตอร์เมื่อ $I_{rm} < 0.01\, I''_k$ ในการคำนวณกระแสลัดวงจรกรณีคิดผลของมอเตอร์ด้วย ทำได้โดยคำนวณหากระแสลัดวงจรในกรณีไม่คิดผลของมอเตอร์ก่อน จากนั้นก็คิดกระแสที่เป็นผลของมอเตอร์ทั้งหมดแล้วจึงนำมารวมกันเป็นกระแสลัดวงจรทั้งหมด

กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kM}

การคำนวณกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นที่เป็นผลมาจาก มอเตอร์ ในกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล สามารถหาได้จาก

..... (11.15)

$$I''_{kM} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_M}$$

กระแสลัดวงจรค่ายอด i_{pm}

$$i_{pm} = \chi_m \sqrt{2}\ I''_{km}$$

มอเตอร์แรงดันสูง :

χ = 1.65 (สอดคล้องกับค่า $R_M/X_M = 0.15$) สำหรับกำลังมอเตอร์ต่อคู่ของขั้ว < 1 MW

χ = 1.75 (สอดคล้องกับค่า $R_M/X_M = 0.10$) สำหรับกำลังมอเตอร์ต่อคู่ของขั้ว 1 MW ขึ้นไป

สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำที่ต่อถึงกัน

χ = 1.3 (สอดคล้องกับค่า $R_M/X_M = 0.42$)

กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร I_{bm}

$$I_{bm} = \mu_q\ I''_{km} \qquad \text{..... (11.16)}$$

ค่า μ จะขึ้นอยู่กับ ค่าอัตราส่วนของ I''_{kM}/I_{rM} และ ค่าเวลาประวิงที่ต่ำที่สุด (Minimum Time Delay) t_{min} ดังนี้

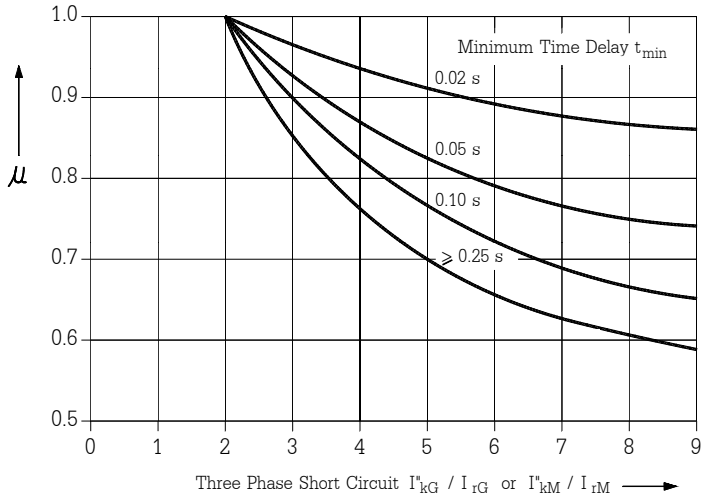
$$\mu = 0.84 + 0.26e^{-0.26\, I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{for } t_{min} = 0.02\ s$$

$$\mu = 0.71 + 0.51e^{-0.30\, I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{for } t_{min} = 0.05\ s$$

$$\mu = 0.62 + 0.72e^{-0.32\, I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{for } t_{min} = 0.10\ s$$

$$\mu = 0.56 + 0.94e^{-0.38\, I''_{kM}/I_{rM}} \quad \text{for } t_{min} \geq 0.25\ s$$

สามารถหาค่า ไได้จากกราฟ



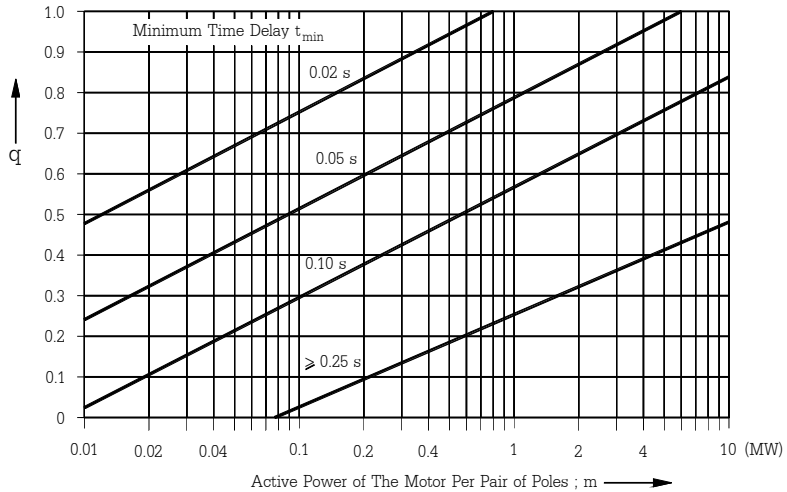
รูปที่ 11.7 ตัวคูณการลดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์

หาค่า q ได้

$$q = 1.03 + 0.12 \ln m \quad \text{for } t_{min} = 0.02 \text{ s}$$
$$q = 0.79 + 0.12 \ln m \quad \text{for } t_{min} = 0.05 \text{ s}$$
$$q = 0.57 + 0.12 \ln m \quad \text{for } t_{min} = 0.10 \text{ s}$$
$$q = 0.26 + 0.10 \ln m \quad \text{for } t_{min} \geq 0.02 \text{ s}$$

โดยที่ ค่า m คือค่ากำลังใช้งานพิกัดของมอเตอร์ (MW) ต่อคู่ของขั้ว หากคำนวณค่า q ได้มากกว่า 1 แล้ว ให้ใช้ q = 1 แทน นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า q ได้จากรูปที่ 11.8 ด้วย

หาค่า q ได้จากกราฟ



รูปที่ 11.7 ตัวคูณการลดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์

กระแสลัดวงจรอยู่ตัว I_{km}

$$I_{km} = 0$$

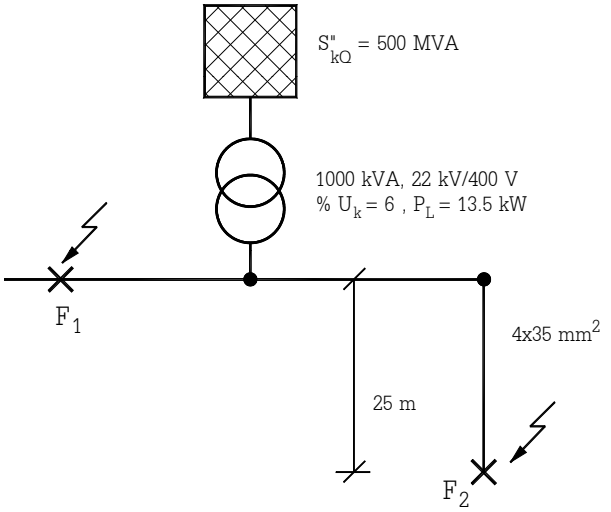
11.7 ตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจร

ตัวอย่างที่ 11.4 ระบบไฟฟ้ามีดังรูป และมีข้อมูลดังนี้

- ระบบไฟฟ้า $S''_{kQ} = 500$ MVA $U_{nQ} = 22$ kV
- หม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV/400 V , $S_{rT} = 1000$ kVA ,
  $u_{kr} = 6$ % , $P_{krT} = 13.5$ kW
- สายไฟฟ้า PVC 435 mm^2 ยาว 25 m.
  $R_L = 0.529$ m/m. $X_L = 0.103$ m/m. , $R_{(0)L}/R_L = 4$,
  $X_{(0)L}/X_L = 3$

จงหากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_1 และ F_2

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)



ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

วิธีทำ

ที่ตำแหน่ง F_1 หา Z_1

ระบบไฟฟ้า

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2}$$

$$= \frac{(1.1 \times 22^2)}{500} \cdot \left(\frac{0.4}{22}\right)^2$$

$$= 0.352 \text{ m}$$

$$X_{Qt} = 0.995 Z_{Qt} = 0.350 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0.1 X_{Qt} = 0.035 \text{ m}\Omega$$

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

หม้อแปลง

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$= \frac{6}{100} \cdot \frac{0.4^2}{1}$$

$$= 9.60 \text{ m}$$

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{P_{krT} U_{rT}^2}{S_{rT}^2}$$

$$= \frac{13.5 \times 0.4^2}{1^2}$$

$$= 2.16 \text{ m}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

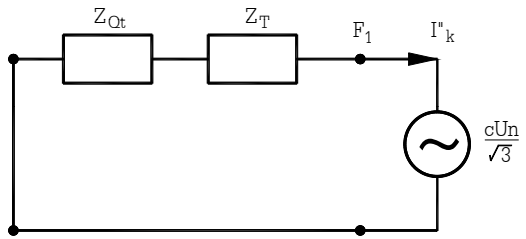
$$= \sqrt{9.6^2 - 2.16^2}$$

$$= 9.35 \text{ m}$$

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_1



$$Z_k = Z_{Qt} + Z_T$$
$$= (0.035 + j\,0.35) + (2.16 + j\,9.35)$$
$$= 2.195 + j\,9.70 \text{ m}$$
$$|Z_k| = 9.95 \text{ m} \quad \text{ค่า } R/X = 0.23$$

จะได้ว่า $\chi = 1.52$

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$$
$$= \frac{(1.0 \times 400)}{(\sqrt{3} \times 9.95)}$$
$$= 23.2 \text{ kA}$$

$$i_p = \chi \sqrt{2}\, I''_k$$

$$= 1.52 \times \sqrt{2} \times 23.2$$
$$= 49.9 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''k$$
$$= \frac{\sqrt{3}}{2} \times 23.2$$
$$= 20.1 \text{ kA}$$

การลัดวงจรแบบสายถึงดิน

หา $Z_{(0)}$

ระบบไฟฟ้า

ไม่ต้องคิด $Z_{(0)}$ เนื่องจากหม้อแปลงต่อแบบเดลตา-วาย

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

หม้อแปลงไฟฟ้า

$Z_{(0)T} = R_{(0)T} + j\,X_{(0)T}$

$R_{(0)T} = R_T = 2.16 \text{ m}\Omega$

$X_{(0)T} = 0.95 X_T = 0.95 \times 9.35$

$= 8.88 \text{ m}\Omega$

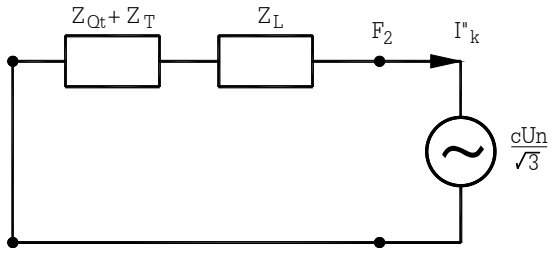
$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\, U_n}{2Z_{(1)} + Z_{(0)}}$$
$$= \frac{\sqrt{3} \times 400}{2(2.195 + j9.70) + 2.16 + j8.88}$$
$$= \frac{\sqrt{3} \times 400}{6.55 + j28.28}$$
$$= 23.9 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

การลัดวงจรแบบสายถึงดินที่ขั้วหม้อแปลง กระแสลัดวงจรอาจมีค่าสูงกว่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลได้

ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_2

การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล



ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

$$Z_{L1} = 25\times(0.529+j0.103)$$
$$= 13.23 + j\,2.58\ m\Omega$$

$$Z_k = (Z_{Qt}+Z_T)+Z_{L1}$$
$$= (2.20 + j\,9.7) + (13.23 + j\,2.58)$$
$$= 15.43 + j\,12.28\ m\Omega$$

$|Z_k| = 19.72$ m ค่า $R/X = 1.26$ จะได้ว่า $= 1.04$

$$I_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2+X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$$

$$= \frac{(1.0\times400)}{(\sqrt{3}\times19.72)}$$

$$= 11.7\ kA$$

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

$$i_p = \chi\sqrt{2}\,I''_k$$
$$= 1.04\times\sqrt{2}\times11.7$$
$$= 17.2\ kA$$

การลัดวงจรแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน

$$I''k2 = \frac{\sqrt{3}}{2}\,I''k$$
$$= \frac{\sqrt{3}}{2}\times11.7$$
$$= 10.1\ kA$$

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

การลัดวงจรแบบสายถึงดิน

การลัดวงจรให้คิดลัดวงจรผ่านสายศูนย์

หา $Z_{(0)}$

สายเคเบิล

ให้ $\frac{R_{0L}}{R_L} = 4$, $\frac{X_{0L}}{X_L} = 3$

$R_{0L} = 4 \times 13.23 = 52.92\ m\Omega$

$X_{0L} = 3 \times 2.58 = 7.74\ m\Omega$

$\therefore Z_{0k} = (2.16 + 52.92) + j\,(8.88 + 7.74)\ \Omega$

$= 55.08 + j\,16.62$ m

ตัวอย่างที่ 11.4 (ต่อ)

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\ U_n}{2Z_1 + Z_0}$$

$$= \frac{\sqrt{3}\times 400}{2(15.43+j12.28)+55.08+j16.62}$$

$$= \frac{\sqrt{3}\times 400}{85.94+j41.18}$$

$$= 7.3 \text{ kA}$$

การลัดวงจรแบบสายถึงดินที่ไกลจากหม้อแปลงไฟฟ้า กระแสลัดวงจรจะน้อยกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลเสมอ เนื่องจากทางกลับของกระแสจะมี $Z_{(0)}$ มาก

ตัวอย่างที่ 11.5 จากตัวอย่างที่ 11.1

ถ้าระบบไฟฟ้าเป็นแบบ ***INFINITE BUS***

จงหาค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ตำแหน่ง F1

วิธีทำ

ตำแหน่ง F1

$\therefore$ ระบบไฟฟ้าเป็นแบบ ***INFINITE BUS***

$\therefore$

$$Z_{Qt} = 0$$

$$Z_T = 2.16 + j\,9.35 \text{ m}\Omega$$

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\ Z_k}$$

$$= \frac{1\times 400}{\sqrt{3}\ \sqrt{2.16^2+9.35^2}}$$

$$= 24.1 \text{ kA}$$

หมายเหตุ

ถ้าระบบไฟฟ้าเป็นแบบ Inifinite Bus กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ขั้วแรงต่ำของหม้อแปลง สามารถหาได้จากสูตร

$$I''_k = \frac{100}{\%U_k} I_n$$

โดยที่

U_k = % อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

I_n = กระแสพิกัดของหม้อแปลง (A)

จากตัวอย่าง

$\therefore$

$$I''_k = \frac{100}{6}\times\frac{1000}{24\sqrt{3}\ \text{kA}400}$$

ตัวอย่างที่ 11.6 ระบบดังรูป มีข้อมูลดังนี้

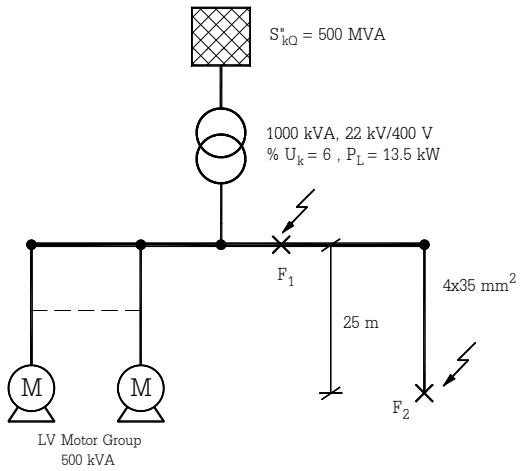
- ระบบไฟฟ้า S''_{kQ} = 500 MVA U_{nQ} = 22 kV
- หม้อแปลง 22 kV/400 V , S_{rT} = 1000 kVA , u_{kr} = 6 % , P_{krT} = 13.5 kW
- สายไฟฟ้า PVC 335 mm^2 ยาว 25 m

  R_L = 0.529 mΩ /m X_L = 0.103 mΩ /m
- กลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำ U_{rM} = 400 V , S_{rM} = 500 kVA , I_{LR}/I_{rM} = 6.25

จงหากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_1 และ F_2

ตัวอย่างที่ 11.6 (ต่อ)

วิธีทำ



ตัวอย่างที่ 11.6 (ต่อ)

มอเตอร์ ที่เวลา $t = 0$

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

$$= \frac{1}{6.25} \times \frac{400^2}{500}$$

$$= 51.2 \text{ m}\Omega$$

เนื่องจากเป็นมอเตอร์แรงดันต่ำ ซึ่งจะมีค่า

$R_M/X_M = 0.42$ ดังนั้น มี ตัวประกอบกำลังเป็น 0.38

$Z_M = 51.2\underline{/67.67^\circ}$ mΩ

ตัวอย่างที่ 11.6 (ต่อ)

ระบบไฟฟ้า

$$Z_S = 2.195 + j\,9.70$$

$$= 9.95\underline{/77.25^\circ} \text{ m}\Omega$$

$$Z_M // Z_S = 51.2\underline{/67.67^\circ} // 9.95\underline{/77.25^\circ}$$

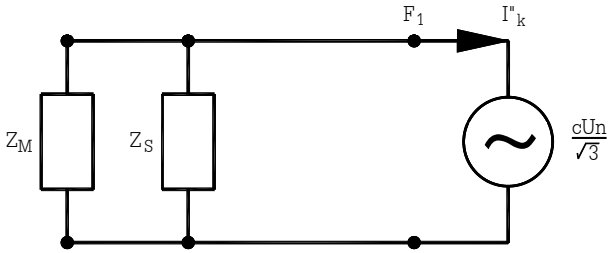
$$= 2.06 + j\,8.09$$

ดังนั้น $Z_k = 2.06 + j\,8.09$ mΩ

$$|Z_k| = 8.35 \text{ m}\Omega$$

ตัวอย่างที่ 11.6 (ต่อ)

ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_1



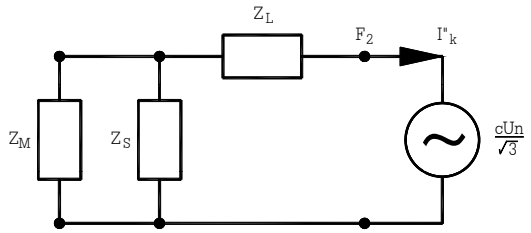
$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$$

$$= \frac{(1.0 \times 400)}{(\sqrt{3} \times 8.35)}$$

$$= 27.7 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 11.6 (ต่อ)

สัดวงจรที่ตำแหน่ง F_2



Z_k ใหม่ = $(2.06 + j\,8.09) + (13.23 + j\,2.58)$ Ω

= $15.29 + j\,10.67$ mΩ

$|\underline{Z}''_k|$ = $\frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2+X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k}$

= $\frac{18.64}{\sqrt{3}\sqrt{15.29^2+10.67^2}}$

= $\frac{(1.0\times400)}{(\sqrt{3}\times18.64)}$

= 12.4 kA

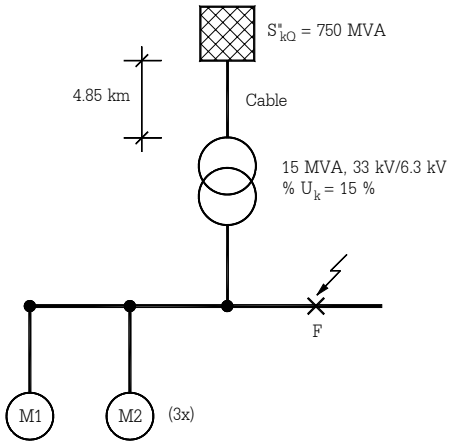
ตัวอย่างที่ 11.7 ระบบดังรูป มีข้อมูลดังนี้

- ระบบไฟฟ้า S''_{kQ} = 750 MVA U_{nQ} = 33 kV
- หม้อแปลง 33 kV/6.3 kV , S_{rT} = 15 MVA , u_{kr} = 15 %
- สายไฟฟ้า X_L = 0.1 Ω/km ยาว 4.85 km
- มอเตอร์ซิงโครนัส M1 U_{rM} = 6 kV , P_{rM} = 5 MW , Cos φ = 0.86 , η_r = 0.97 , I_{LR}/I_{rM} = 4 , คู่ของขั้ว = 2
- กลุ่มของมอเตอร์ซิงโครนัส 3 ตัว M2 แต่ละตัวมี U_{rM} = 6 kV , P_{rM} = 1 MW , Cos φ = 0.83 , η_r = 0.94 , I_{LR}/I_{rM} = 5.5 , คู่ของขั้ว = 1

จงหากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง F

ตัวอย่างที่ 11.7 (ต่อ)

วิธีทำ



ในการคำนวณ จะคิดเฉพาะค่ารีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียว ไม่คิดค่าความต้านทาน

ระบบไฟฟ้า

X_{Qt} = $\frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2}$

= $\frac{1.1\times(33)^2}{750} \cdot \frac{1}{(33/6.3)^2}$

= 0.0582

สายเคเบิล L

X_{Lt} = $X'_L \cdot l \cdot \frac{1}{t_r^2}$

= $0.1\times4.85 \cdot \frac{1}{(33/6.3)^2}$

= 0.0177 Ω

ตัวอย่างที่ 11.7 (ต่อ)

หม้อแปลงไฟฟ้า

$$X_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}}$$

$$= \frac{15}{100} \cdot \frac{6.3^2}{15}$$

$$= 0.3969\Omega$$

ค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจร

$$X_k = X_{Qt} + X_{Lt} + X_T$$

$$= 0.0582 + 0.0177 + 0.3969 \quad \Omega$$

$$= 0.4728$$

ตัวอย่างที่ 11.7 (ต่อ)

กระแสลัดวงจร I''_k ไม่คิดผลของมอเตอร์

$$I''_{k(\text{without M1,M2})} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \times X_k}$$

$$= \frac{1.1 \times 6}{\sqrt{3} \times 0.4728}$$

$$= 8.06 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 11.7 (ต่อ)

กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ M1

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\cos\varphi_r \eta_r}$$

$$= \frac{5}{0.86 \times 0.97}$$

$$= 6 \text{ MVA}$$

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \frac{6^2}{6}$$

$$= 1.5\Omega$$

$$I''_{kM1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{M1}}$$

$$= \frac{1.1 \times 6}{\sqrt{3} \times 1.5}$$

$$= 2.54 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 11.7 (ต่อ)

กระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ M2

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\cos\varphi_r \eta_r}$$

$$= \frac{1}{0.86 \times 0.94}$$

$$= 1.28 \text{ MVA}$$

$$Z_{M2} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

$$= \frac{1}{3} \times \frac{1}{5.5} \times \frac{6^2}{1.28}$$

$$= 1.705\Omega$$

$$= \frac{cU_n}{\sqrt{3} \times Z_{M2}}$$

$$I''_{kM2} = \frac{1.1 \times 6}{\sqrt{3} \times 1.5}$$

$$= 2.23 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 11.7 (ต่อ)

กระแสลัดวงจรรวม ที่ตำแหน่ง F เมื่อคิดผลของมอเตอร์ด้วย

$$I''_k = I''_{k(\text{without M1,M2})} + I''_{kM1} + I''_{kM2}$$

$$= 8.06 + 2.54 + 2.23 = 12.83 \text{ kA}$$

กระแสลัดวงจรแบบสมมาตร

ที่เวลา $t_{min} = 0.1$ s

มอเตอร์ M1

$$= \frac{S_{rM}}{\sqrt{3} \times U_{rM}}$$

$$= \frac{6}{\sqrt{3} \times 6}$$

$$I''_{kM1} / I_{rM1} = 0.577 \text{ kA}$$

$$= 2.54/0.577$$

$$= 4.40$$

ตัวอย่างที่ 11.7 (ต่อ)

ค่ากำลังใช้งานพิกัดของมอเตอร์ต่อคู่ของขั้ว = 5/2

= 2.5 MW

ดังนั้น จะได้ว่า $\mu_{M1} = 0.8$ และ $q_{M1} = 0.68$

$$I_{bM1} = (\mu_{M1})(q_{M1})(I''_{KM1})$$

$$= 0.8 \times 0.68 \times 2.54$$

$$= 1.38 \text{ kA}$$

มอเตอร์ M2

$$I_{rM} = \frac{S_{rM}}{\sqrt{3} \times U_{rM}}$$

$$= \frac{1.28}{\sqrt{3} \times 6}$$

$$= 0.123 \text{ kA}$$

มีมอเตอร์ 3 ตัว รวมเป็น 0.369 kA

$$I''_{kM2} / I_{rM2} = 2.23/0.369$$

$$= 6.05$$

ค่ากำลังใช้งานพิกัดของมอเตอร์ต่อคู่ของขั้ว = 1/1 = 1 MW

ดังนั้น จะได้ว่า $\mu_{M2} = 0.72$ และ $q_{M2} = 0.57$

$$I_{bm2} = (\mu_{M2})(q_{M2})(I''_{KM2})$$

$$= 0.72 \quad 0.57 \quad 2.23$$

$$= 0.92 \text{ kA}$$

$$I_b = I_{b(\text{without M1,M2})} + I_{bM1} + I_{bM2}$$

$$= 8.06 + 1.38 + 0.92$$

$$= 10.36 \text{ kA}$$

11.8 การคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยคอมพิวเตอร์

- มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลายโปรแกรมที่ใช้คำนวณกระแส ลัดวงจร ได้แก่
  - DOC ของ ABB
  - MELSHORT ของ มิตซูบิชิ
- โปรแกรมเหล่านี้ช่วยอำนวยความสะดวกเป็นอย่างมากใน การคำนวณกระแสลัดวงจร
- การใช้งานง่ายโดยเฉพาะในการคำนวณกระแสลัดวงจร หลายๆ จุดก็จะทำให้ประหยัดเวลา และมีความถูกต้อง

11.9 ค่ากระแสลัดวงจรจากคอมพิวเตอร์

ค่ากระแสลัดวงจรที่แสดงในตารางนั้น ได้มาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้า มีค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{KQ} = 500 MVA
2. หม้อแปลงเป็น Oil Type มีค่าแรงดันอิมพีแดนซ์และค่ากำลังสูญโหลดตามตารางที่ **11.2**
3. สายไฟฟ้าแรงดันต่ำหุ้มฉนวน PVC มีค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ตามตารางที่ **11.6**
4. แรงดันทางด้านแรงต่ำมีค่า **400/230**V
5. ค่าตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor) สำหรับแรงดันต่ำให้มีค่าเท่ากับ **1.00**
6. ไม่คิดผลจากมอเตอร์

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm^2)	ระยะจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (m)					
		0	10	25	50	75	100
1000	16	23.2	13.2	6.9	3.7	2.5	1.9
	25	23.2	16.0	9.6	5.5	3.8	2.9
	35	23.2	17.7	11.7	7.2	5.1	3.9
	50	23.2	18.9	13.8	9.1	6.7	5.3
	70	23.2	19.7	15.4	10.9	8.3	6.7
	95	23.2	20.2	16.5	12.3	9.7	8.0
	120	23.2	20.5	17.1	13.2	10.7	8.9
	150	23.2	20.7	17.6	13.9	11.4	9.7
	185	23.2	20.8	17.9	14.5	12.0	10.3
	240	23.2	21.0	18.3	15.0	12.6	10.9
	300	23.2	21.1	18.5	15.3	13.0	11.3

ตัวอย่างที่ 11.8 จากตารางพิกัดหม้อแปลง **1000** kVA ,

LV 400/230 V

วิธีทำ

จากตาราง

ที่ขั้วหม้อแปลงแรงต่ำ I''_k = 23.2 kA

ใช้สาย 35 mm^2 ห่างไป **25** m I''_k = 11.7 kA

สาย **35** mm^2 ห่างไป **30** m

สามารถหาได้โดยวิธี Interpolation

ระยะ **25** m I''_k = 11.7 kA

ระยะ **50** m I''_k = 7.2 kA

ตัวอย่างที่ 11.8(ต่อ)

ระยะต่างกัน 50 - 25 = 25 m

I''_k ต่างกัน = 11.7 - 7.2 = 4.5 kA

ระยะห่าง **35** m

$$I''_k = 11.7 - \frac{4.5}{25} \times (35-30)$$

$$= 10.8 \text{ kA}$$

THE END