บทที่ 6

การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเรเดียล

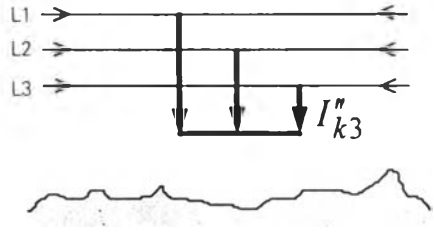
6.1 คำนำ

การลัดวงจร หมายถึง การที่วงจรไฟฟ้าเกิดความผิดพลาดโดยอุบัติเหตุหรือความไม่ตั้งใจ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสไหลมากกว่าปกติหลายเท่า กระแสลัดวงจรจะทำให้เกิดความเครียดทางกล (Mechanical stress) และความเครียดทางความร้อน (Thermal stress) ซึ่งสามารถส่งผลทำให้อุปกรณ์เสียหายและเป็นอันตรายต่อคนได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องคำนึงถึงผลของกระแสลัดวงจรเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และใช้ในการปรับตั้งค่าพิกัดการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าต่อไป ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้า เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าจะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้า เพื่อที่จะได้เลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม และถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้ขนาดของอุปกรณ์ที่ทนกระแสลัดวงจรไม่เพียงพอก็อาจจะเกิดความเสียหายแก่ทรัพย์สินและชีวิตเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ในทางกลับกันถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เกินไป ราคาค่าติดตั้งระบบไฟฟ้าก็จะแพงเกินไปโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าที่ดี

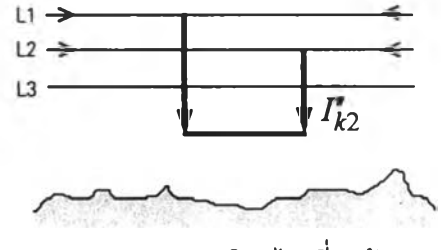
เนื่องจากกระแสลัดวงจรมีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า หลายประเทศจึงได้มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจร และเพื่อให้การคำนวณเป็นไปในทางเดียวกัน ทาง IEC (International Electrotechnical Commission) จึงได้ร่างมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจรขึ้น คือ IEC 781 "Application guide for calculation of short-circuit currents in low-voltage radial systems" [14] ซึ่งได้จำแนกการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1) การลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล (Balanced three-phase short circuit)
2) การลัดวงจรระหว่างสายโดยไม่เกี่ยวข้องกับพื้นดิน (Line-to-line short circuit without earth connection)
3) การลัดวงจรระหว่างสายกับพื้นดิน (Line-to-earth short circuit)

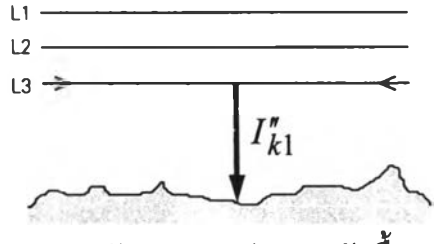
การลัดวงจรทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 6.1



การลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล



การลัดวงจรระหว่างสายโดยไม่เกี่ยวข้องกับพื้นดิน



การลัดวงจรระหว่างสายกับพื้น

รูปที่ 6.1 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า

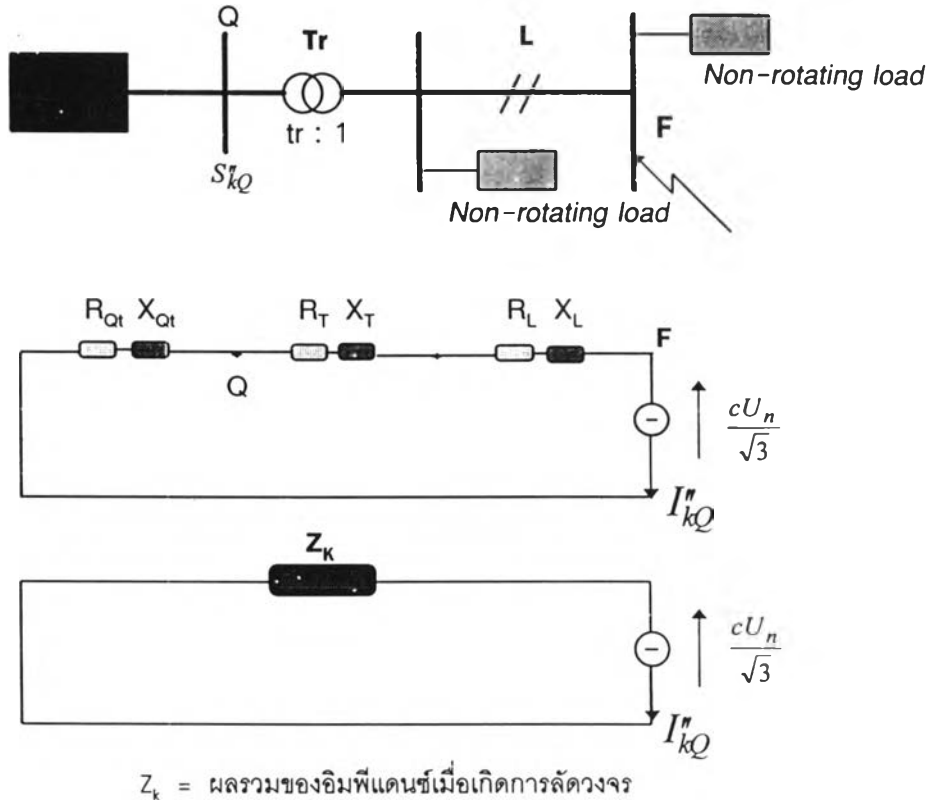
โดยทั่วไปแล้ว การลัดวงจรไฟฟ้าแบบ 3 เฟสสมดุล จะให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด แต่ก็มีบางกรณี เช่น การลัดวงจรไฟฟ้าระหว่างสายกับพื้นดิน ซึ่งมีผลของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Zero-sequence impedance) ที่อาจทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมากกว่า ดังนั้นเพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันในระบบทุกตัวมีพิกัดครอบคลุมถึงค่ากระแสลัดวงจรสูงที่สุดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จึงควรมีการคิดค่ากระแสลัดวงจรในทุกกรณีที่เป็นไปได้

ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในวงจรไฟฟ้าแบบเรเดียลของระบบการจ่ายไฟฟ้าภายในอาคารไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรประเภทใดก็ตาม จะมีขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน คือ

- แทนจุดที่จะคำนวณหากระแสลัดวงจรด้วยแหล่งจ่ายไฟสมมูล
- เปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าให้เป็นค่าอิมพีแดนซ์
- เข้ากระบวนการคำนวณขนาดของกระแสลัดวงจร

6.2 แหล่งจ่ายไฟสมมูล (Equivalent voltage source) [4,14-15]

ตาม IEC 909 "Short-circuit current calculation in three-phase a.c. System" [15] เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุดใดๆในวงจรไฟฟ้า ณ.จุดนั้นอาจจะแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายไฟแหล่งเดียวในระบบ ส่วนระบบไฟฟ้า, เครื่องจักรกลอซิงโครนัส และสายส่ง จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ภายใน ตามรูปที่ 6.2 แสดงถึงตัวอย่างของแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ.ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร F ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนแหล่งจ่ายไฟอื่นๆในระบบให้มีค่าเป็นศูนย์



Z_k = ผลรวมของอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดการลัดวงจร

$= (R_{Qt}+jX_{Qt}) + (R_T+jX_T) + (R_L+jX_L)$

$= (R_{Qt}+R_T+R_L) + j(X_{Qt}+X_T+X_L)$

รูปที่ 6.2 ตัวอย่างของแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ.ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรในวงจรอิมพีแดนซ์

ที่ตำแหน่งลัดวงจร F แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะมีค่า $cU_n / \sqrt{3}$ โดย U_n คือ แรงดันของระบบที่ใช้ และ c คือ ตัวประกอบแรงดัน (Voltage factor) ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปตามระบบแรงดันที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 [4,15]

ตารางที่ 6.1 ค่าตัวประกอบแรงดัน (Voltage factor)

แรงดันพิกัด (U_n)	ค่าตัวประกอบแรงดัน	
	C_{max}	C_{min}
แรงดันต่ำ (100 V - 1 kV)		
ก) 230V / 400 V	1.00	0.95
ข) แรงดันระดับอื่น	1.05	1.00
แรงดันปานกลาง (>1 kV - 35 kV)	1.10	1.00
แรงดันสูง (>35 kV - 230 kV)	1.10	1.00

6.3 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short-circuit impedance)

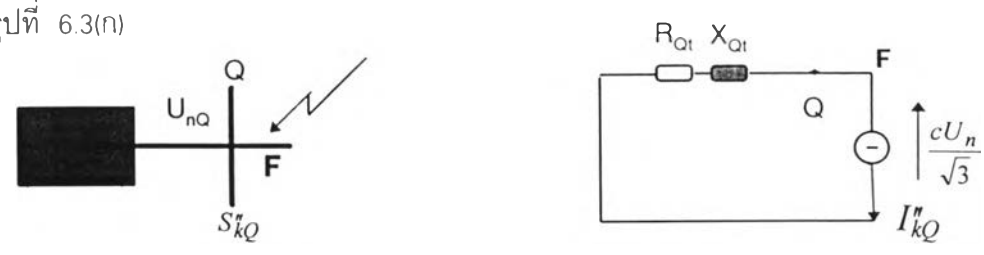
ในการคำนวณกระแสลัดวงจร นอกจากจะต้องทราบค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูลแล้ว ยังจำเป็นจะต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรอาจแบ่งเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

- อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า
- อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
- อิมพีแดนซ์ของสายส่ง
- อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์

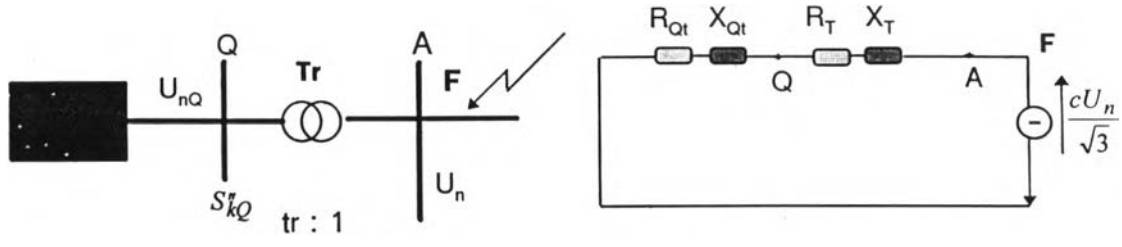
6.3.1 อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (Electrical system impedance) [4,14-15]

ขนาดของระบบไฟฟ้าอาจแทนได้ด้วยค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น (Initial symmetrical short-circuit power : S''_{kQ}) ถ้าระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากจนถือว่าเป็นบัสอนันต์ (Infinite bus) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของระบบมีค่าน้อยมากจนถือได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์

รูปที่ 6.3(ก)



รูปที่ 6.3(ข)



รูปที่ 6.3 แสดงรูปของระบบและวงจรสมมูลสำหรับระบบไฟฟ้า
ทั้งกรณีที่ไม่มีหม้อแปลง (ก) และกรณีที่มีหม้อแปลง (ข)

พิจารณาการลัดวงจรในรูปที่ 6.3(ก) ถ้าทราบกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} หรือกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} ที่จุด Q ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_Q ของระบบที่จุด Q สามารถหาได้จาก

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}}$$

ส่วนกรณีการลัดวงจรในรูปที่ 6.3(ข) ซึ่งจ่ายไฟมาจากระบบแรงดันปานกลางหรือแรงดันสูงผ่านหม้อแปลง ถ้าทราบกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} หรือกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} ที่จุด Q ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Qt} ซึ่งแปลงให้อยู่ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง สามารถหาได้จาก

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \frac{1}{t_r^2}$$

โดยที่ U_{nQ} = แรงดันของระบบที่จุด Q

S''_{kQ} = กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นที่จุด Q

I''_{kQ} = กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นที่จุด Q

c = ตัวประกอบแรงดัน

t_r = อัตราส่วนการแปลงพิกัด (Rated transformation ratio)

ในกรณีที่ระบบมีแรงดันสูงกว่า 35 kV จ่ายด้วยสายส่งเหนือศีรษะ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_Q อาจพิจารณาเพียงค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) เพียงอย่างเดียว เป็น $Z_Q = jX_Q$

ส่วนในกรณีอื่นๆ ถ้าไม่ทราบค่าความต้านทาน R_Q ของระบบไฟฟ้าที่แน่นอนให้ใช้ความสัมพันธ์ $R_Q = 0.1X_Q$ โดยที่ $X_Q = 0.995\ Z_Q$

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

ระบบ 400/230 V $Z_{Qt} = 0.352\ \Omega$, $X_{Qt} = 0.350\ \Omega$ และ $R_{Qt} = 0.040\ \Omega$

ระบบ 416/240 V $Z_{Qt} = 0.382\ \Omega$, $X_{Qt} = 0.380\ \Omega$ และ $R_{Qt} = 0.040\ \Omega$

6.3.2 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (Transformer Impedance) [4,14-15]

ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด $Z_T = R_T + jX_T$ สามารถคำนวณได้จากข้อมูลค่าพิกัดของหม้อแปลง ดังนี้

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

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2}$$

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

โดยที่ U_{rT} = แรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ

I_{rT} = กระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงดันต่ำ

S_{rT} = กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลง

P_{krT} = กำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงในขดลวดที่กระแสพิกัด

u_{kr} = แรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นเปอร์เซ็นต์

u_{Rr} = แรงดันโอห์มมิก (Ohmic voltage) พิกัด

สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นนั้น สามารถหาได้จากป้ายพิกัด (Name plate) หรือสอบถามจากบริษัทผู้ผลิต

6.3.3 อิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายเคเบิล (Line and cable impedance) [4,14-15]

ค่าอิมพีแดนซ์ $Z_L = R_L + jX_L$ สามารถหาได้โดยการคำนวณจากข้อมูลต่างๆ ของตัวนำ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัด และระยะศูนย์กลางของตัวนำ

ค่าความต้านทานประสิทธิผลต่อหน่วยความยาว R_L ของสายเหนือศีรษะที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณได้จากค่าพื้นที่หน้าตัด q_n และค่าความต้านทานจำเพาะ ρ ดังนี้

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n}$$

โดยที่ $\rho = \frac{1}{54}$ $\Omega mm^2/m$ for copper

$\rho = \frac{1}{34}$ $\Omega mm^2/m$ for aluminium

$\rho = \frac{1}{31}$ $\Omega mm^2/m$ for aluminium alloy

ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว X'_L สำหรับสายเหนือศีรษะ สามารถคำนวณได้จาก

$$X'_L = 2\pi f * \frac{u_0}{2\pi}\left(\frac{0.25}{n} + \ln\frac{d}{r}\right)$$
$$= f\mu_0\left(\frac{0.25}{n} + \ln\frac{d}{r}\right)$$

โดยที่ d = ระยะเฉลี่ยเรขาคณิตระหว่างตัวนำ

r = รัศมีของตัวนำเดี่ยว ส่วนในกรณีของตัวนำบันเดิล จะแทน r ด้วย $\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ โดยที่ R คือ รัศมีบันเดิล

n = จำนวนตัวนำบันเดิล

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

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

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน จึงได้ให้ข้อมูลค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายไฟฟ้าชนิดแรงต่ำดังแสดงในตารางที่ 6.2 [4] ส่วนตารางที่ 6.3 จะแสดงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของรางนำกระแส (Busway) ทั้งชนิดอลูมิเนียมและทองแดง [4]

ตารางที่ 6.2 ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว ของสายไฟฟ้าแรงต่ำ

ขนาดสาย (sqmm.)	ค่าความต้านทาน (mΩ/m)	ค่ารีแอกแตนซ์ (mΩ/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 6.3 ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของ Busway

ขนาด	อลูมิเนียม (mΩ/m)		ทองแดง (mΩ/m)	
(A)	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

6.3.4 อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ (Motor Impedance) [4,14-15]

มอเตอร์อซิงโครนัสจะจ่ายกระแสลัดวงจรไปยังตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร และในกรณีที่มอเตอร์อซิงโครนัสหรือกลุ่มของมอเตอร์อซิงโครนัส มีกระแสพิกัดรวมน้อยกว่า 1% ของกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I_k'' อาจจะไม่ต้องคิดถึงผลของมอเตอร์อซิงโครนัสก็ได้ ดังนั้นผลของมอเตอร์อซิงโครนัสจะสามารถตัดทิ้งได้ ถ้า

$$\sum I_{rM} \leq 0.01 I_k''$$

โดยที่ $\sum I_{rM}$ = ผลรวมของกระแสพิกัดของมอเตอร์ในบริเวณที่เกิดการลัดวงจร

I_k'' = กระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งลัดวงจรโดยไม่มีผลของมอเตอร์

ส่วนในกรณีที่จะต้องคิดกระแสลัดวงจรจากมอเตอร์ ค่าอิมพีแดนซ์ $Z_M = R_M + jX_M$ ของมอเตอร์ สามารถคำนวณได้จาก

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

โดยที่ U_{rM} = แรงดันพิกัดของมอเตอร์

I_{rM} = กระแสพิกัดของมอเตอร์

S_{rM} = กำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์

I_{LR}/I_{rM} = อัตราส่วนของกระแสล็อกโรเตอร์ ต่อ กระแสพิกัดของมอเตอร์

สำหรับค่าโดยประมาณของ R_M/X_M ให้ใช้ค่าดังนี้

$R_M/X_M = 0.10$, $X_M = 0.995\ Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง ที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว $\geq$1 MW

$R_M/X_M = 0.15$, $X_M = 0.989\ Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง ที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว $<$1 MW

$R_M/X_M = 0.42$, $X_M = 0.922\ Z_M$ สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำที่ต่อถึงกัน

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลายๆตัวที่ต่อเป็นบัสเดียวกัน อาจรวมกันเป็นกลุ่มมอเตอร์ได้ ถ้าพิกัดกลุ่มมอเตอร์มีค่าเป็น kW หรือ MW ก็สามารถคำนวณหากำลังปรากฏ S_{rM} ได้โดยกำหนดให้ ตัวประกอบกำลัง $\cos\varphi$ = 0.8 และประสิทธิภาพ η = 0.9

การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทั้งสี่ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น เป็นการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Positive-sequence impedance : Z1) [8-9,14-15,33] ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ลำดับลบ (Negative-sequence impedance : Z2) ส่วนอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Zero-sequence impedance : Z0) นั้นสามารถหาได้จากเอกสารของอุปกรณ์แต่ละประเภท ซึ่งอาจบอกมาในรูปของอัตราส่วนกับอิมพีแดนซ์ลำดับบวก

6.4 วิธีการคำนวณกระแสลัดวงจร

หลังจากผ่าน 2 ขั้นตอนแรกมาแล้ว จากนั้นจะต้องทำการยุบระบบที่จะวิเคราะห์เมื่อเกิดการลัดวงจรให้เป็นวงจรอย่างง่าย แล้วจึงใช้สูตรเพื่อหาขนาดของกระแสลัดวงจร ซึ่งวงจรของระบบก่อนทำการยุบวงจรนั้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดลัดวงจร

กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้นในกรณีของการลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุล : I''_{k3} สามารถหาได้จาก [4,8,14-15,33]

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_{k1}|} \qquad ; |Z_{k1}| = \sqrt{R_{k1}^2 + Z_{k1}^2}$$

โดยที่ $cU_n / \sqrt{3}$ = แหล่งจ่ายไฟสมมูล

R_{k1} = ผลรวมของความต้านทานลำดับบวก

X_{k1} = ผลรวมของรีแอกแตนซ์ลำดับบวก

Z_{k1} = ผลรวมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรลำดับบวก

ส่วนกระแสลัดวงจรในกรณีของการลัดวงจรระหว่างสายโดยไม่เกี่ยวข้องกับพื้นดิน (Line-to-line short circuit without earth connection) : I''_{k2} สามารถหาได้จาก [8,14-15]

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|Z_{k1} + Z_{k2}|} = \frac{cU_n}{2|Z_{k1}|}$$

และกระแสลัดวงจรในกรณีของการลัดวงจรระหว่างสายกับพื้นดิน (Line-to-earth short circuit) : I''_{k1} สามารถหาได้จาก [8,14-15]

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{(Z_{k0} + Z_{k1} + Z_{k2})} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{(Z_{k0} + 2Z_{k1})}$$

โดยที่ Z_0 = ผลรวมของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์

นอกจากนั้นในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีมอเตอร์ อาจแยกคิดคำนวณกระแสลัดวงจรได้โดยคำนวณหากระแสลัดวงจรในกรณีไม่คิดผลของมอเตอร์ก่อน จากนั้นจึงคิดกระแสที่เป็นผลของมอเตอร์ทั้งหมดแล้วนำมารวมกันเป็นกระแสลัดวงจรทั้งหมด ซึ่งกระแสลัดวงจรที่เป็นผลมาจากมอเตอร์ สามารถหาได้จาก [4]

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

โดยที่ Z_{kM} = ผลรวมของอิมพีแดนซ์จากมอเตอร์

6.5 ตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจร

เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการคำนวณหากระแสลัดวงจรในระบบสายส่งไฟฟ้าแบบเรเดียลของการจ่ายไฟฟ้าภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการจำลองระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เป็นวงจรอิมพีแดนซ์ พิจารณาจากตัวอย่างของระบบไฟฟ้าอย่างง่ายตามรูปที่ 6.4 และ 6.6 ของตัวอย่างการคำนวณที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

6.5.1 ตัวอย่างการคำนวณที่ 1

ระบบไฟฟ้ารูปที่ 6.4 มีข้อมูล ดังนี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้า : 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 3x35 sqmm. ยาว 25 m.

R_L = 0.529 mΩ/m., X_L = 0.103 mΩ/m.

จงหากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุลที่ตำแหน่ง F

วิธีทำ

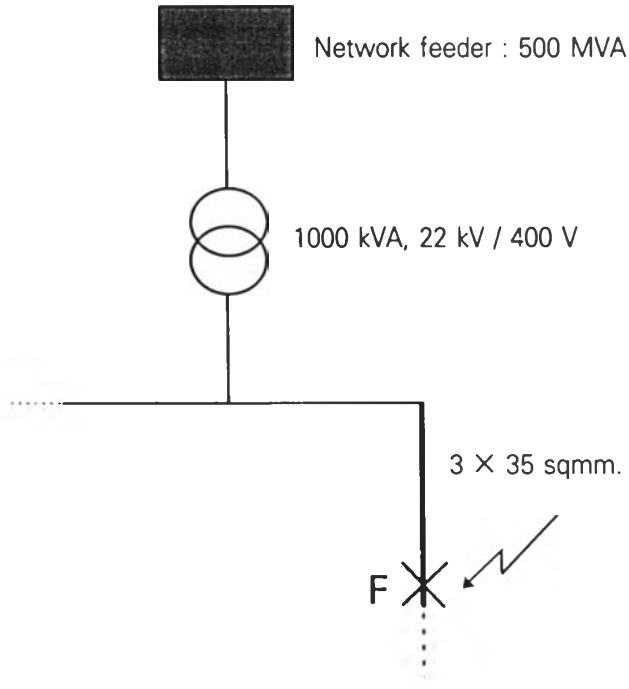
พิจารณาอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวเมื่อเกิดการลัดวงจร ดังต่อไปนี้

แหล่งจ่ายไฟฟ้า : $Z_{Qt} = \frac{cU^2_{nQ}}{S''_{kQ}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1.1 \times 22^2}{500} \times \left(\frac{0.4}{22}\right)^2$

$= 0.352\ m\Omega$

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

$R_{Qt} = 0.100 X_{Qt} = 0.035\ m\Omega$



รูปที่ 6.4 ระบบไฟฟ้าอย่างง่ายของตัวอย่างการคำนวณที่ 1

หม้อแปลง $Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100} \times \frac{0.4^2}{1}$

$= 9.60\ m\Omega$

$R_T = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = P_{krT} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = 13.5 \times \frac{0.4^2}{1^2}$

$= 2.16\ m\Omega$

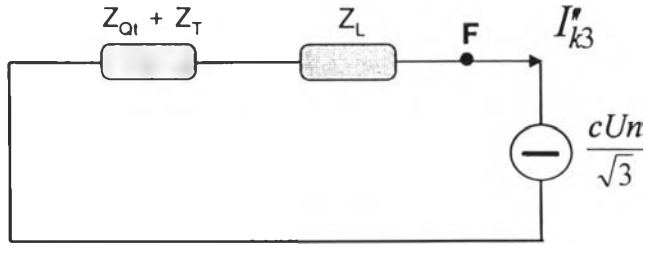
$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{9.6^2 - 2.16^2}$

$= 9.35\ m\Omega$

สายไฟฟ้า : $Z_l = 25(0.529+j0.103)$

$= 13.23+j2.58 \quad m\Omega$

กรณีลัดวงจรที่ตำแหน่ง F จะได้วงจรสมมูล ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง F ของตัวอย่างการคำนวณที่ 1

ดังนั้น จะได้ผลรวมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรแบบลำดับบวก คือ

$$Z_{K1} = (Z_{Qt}+Z_T) + Z_L$$

$$= (2.20+j9.7)+(13.23+j2.58)$$

$$= 15.43+j12.28 \quad m\Omega$$

นั่นคือ $|Z_{k1}| = 19.72 \quad m\Omega$

ดังนั้น $$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_{k1}|} = \frac{(1.0 \times 400)}{(\sqrt{3} \times 19.72)}$$

$= 11.71$ kA

6.5.2 ตัวอย่างการคำนวณที่ 2

จากข้อมูลของตัวอย่างการคำนวณที่ 1 มีการเพิ่มกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำดังในรูปที่ 6.6 โดยที่มี $U_{rM} = 400$ V, $S_{rM} = 500$ kVA และ $I_{LR}/I_{rM} = 6.25$

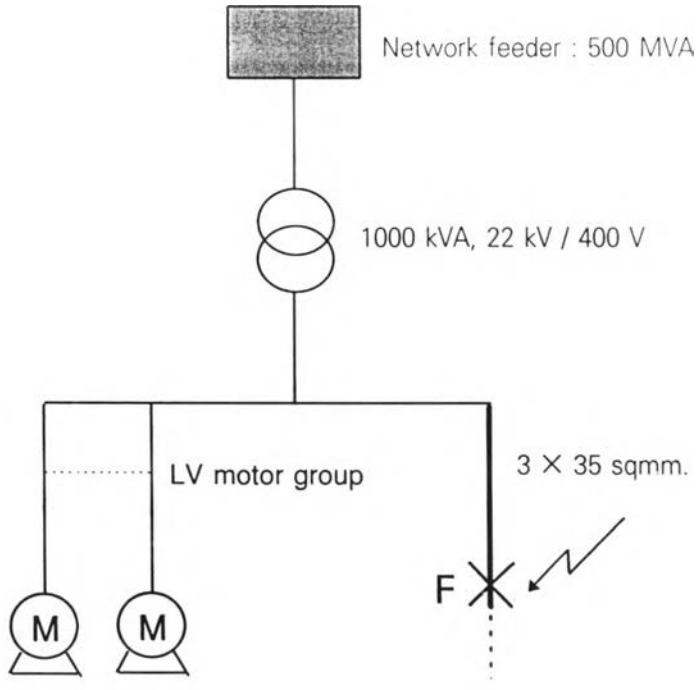
จงหากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสสมดุลที่ตำแหน่ง F

วิธีทำ

พิจารณามอเตอร์ ที่เวลา t=0

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR} / I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{6.25} \times \frac{400^2}{500}$$

$= 51.2 \ m\Omega$



รูปที่ 6.6 ระบบไฟฟ้าอย่างง่ายของตัวอย่างการคำนวณที่ 2

เนื่องจากเป็นกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำ จึงได้ว่า

$$X_M = 0.922 * Z_M$$

$$= 0.922 * 51.2 = 47.21\ m\Omega$$

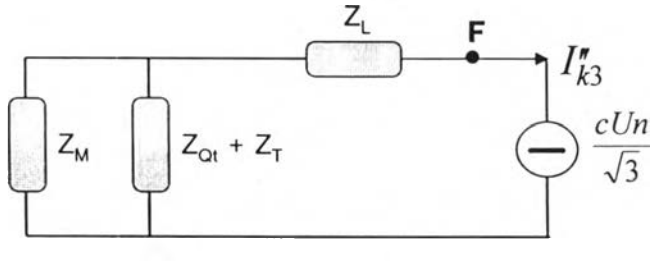
และ $$R_M = 0.42 * X_M$$

$$= 0.42 * 47.21 = 19.83\ m\Omega$$

ดังนั้น $$Z_M = R_M + jX_M$$

$$= 19.83 + j47.21\ m\Omega$$

กรณีลัดวงจรที่ตำแหน่ง F จะได้วงจรสมมูล ดังนี้



รูปที่ 6.7 วงจรสมมูลเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง F ของตัวอย่างการคำนวณที่ 2

จากตัวอย่างที่ 1 จะได้

Z_{Qt} = 0.035 + j0.350 $m\Omega$

Z_T = 2.16 + j9.35 $m\Omega$

Z_L = 13.23 + j2.58 $m\Omega$

ดังนั้น ผลรวมของอิมพีแดนซ์ลัดวงจรแบบลำดับบวก คือ

Z_{k1} = [(Z_M // (Z_{Qt}+Z_T))] + ZL

(// คือเครื่องหมายแสดงการต่อขนานของอิมพิแดนซ์)

= 15.29 + j10.67 $m\Omega$

นั่นคือ $|Z_{k1}| = \sqrt{15.29^2 + 10.67^2}$ = 18.64 $m\Omega$

ดังนั้น $I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_{k1}|} = \frac{(1.0 \times 400)}{(\sqrt{3} \times 18.64)}$ = 12.40 kA