สารบัญ

เรื่อง	หน้า
1.1 บทนำ	1
1.2 มาตรฐานการคำนวณกระแสลัดวงจร	1
1.3 แหล่งจ่ายไฟสมมูล	3
1.4 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร	4
1.5 การคำนวณกระแสลัดวงจร	12
1.6 ตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจร	14
1.7 การคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยคอมพิวเตอร์	17
1.8 ค่ากระแสลัดวงจรจากคอมพิวเตอร์	18
1.9 การใช้ตาราง	28

การคำนวณกระแสลัดวงจร

1.1 บทนำ

ในการเลือกใช้บริภัณฑ์และระบบไฟฟ้านั้น นอกจากจะคำนึงถึงกระแสขณะใช้งานตามปกติแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงกระแสขณะที่เกิดลัดวงจรด้วย การลัดวงจรหมายถึงการที่วงจรไฟฟ้าเกิดความผิดพลาดโดยอุบัติเหตุหรือความไม่ตั้งใจ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสไหลมากกว่ากระแสปกติหลายเท่า กระแสลัดวงจรจะทำให้เกิดความเครียดทางกล (Mechanical Stress) และความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) ขึ้น ซึ่งสามารถส่งผลทำให้บริภัณฑ์เสียหายและเป็นอันตรายต่อคนได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องคำนึงถึงผลของกระแสลัดวงจรเพื่อจะได้ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้า เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของการออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าจะต้องทราบค่ากระแสลัดวงจรล่วงหน้า เพื่อที่จะได้เลือกบริภัณฑ์ที่เหมาะสม ถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้บริภัณฑ์ที่ทนกระแสลัดวงจรไม่เพียงพอก็อาจจะเกิดความเสียหายแก่ทรัพย์สิน และชีวิตเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ในทางกลับกันถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้ขนาดของบริภัณฑ์ใหญ่เกินไป ราคาค่าติดตั้งระบบไฟฟ้าก็จะแพงเกินไปโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับผู้ออกแบบระบบไฟฟ้าที่ดี

1.2 มาตรฐานการคำนวณกระแสลัดวงจร

เนื่องจากกระแสลัดวงจรมีความสำคัญอย่างมากต่อการเลือกใช้บริภัณฑ์ไฟฟ้า หลายประเทศจึงได้มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจร เพื่อให้การคำนวณเป็นไปในแนวเดียวกัน ทาง IEC (International Electrotechnical Commission) จึงได้ร่างมาตรฐานสากลสำหรับการคำนวณกระแสลัดวงจรขึ้น 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)

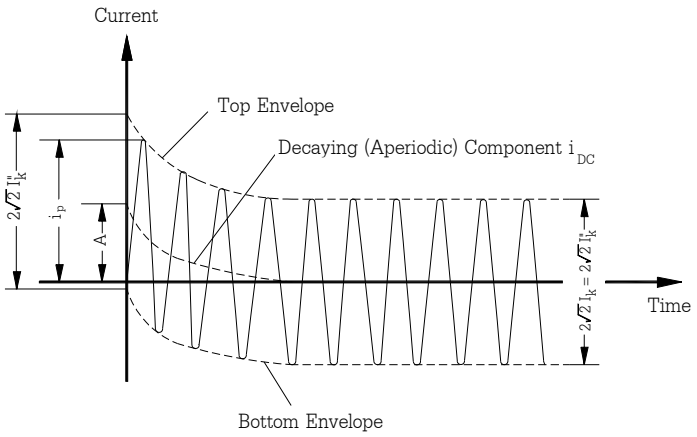
การลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายไฟตลอดช่วงเวลาการลัดวงจรและค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าคงที่ด้วย

ส่วนการลัดวงจรใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสลัดวงจรส่วน A.C. จะค่อยๆ มีค่าลดลง

สถานประกอบการส่วนมากจะรับไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายแรงดันสูง แรงดันปานกลาง และแรงดันต่ำของทางการไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าดังที่กล่าวมานี้เป็นระบบที่ถือว่าไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวเฉพาะการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อเกิดการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้น กระแสลัดวงจรจะเป็นผลของกระแส 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

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



รูปที่ 1 แสดงรูปคลื่นของกระแสลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

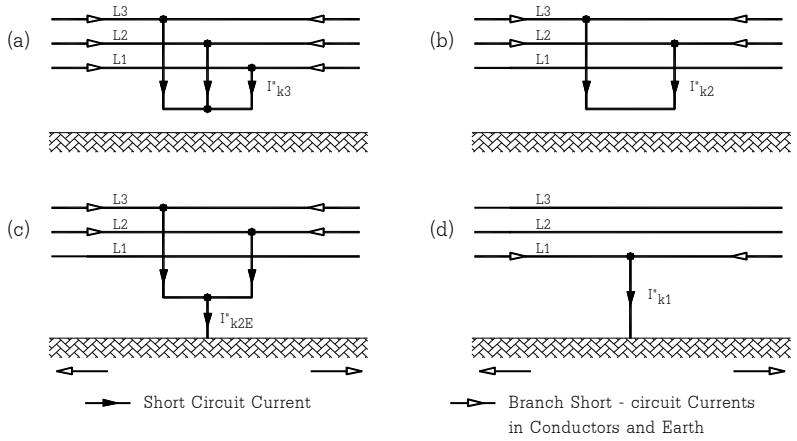
นิยามที่สำคัญตาม IEC 60909 มีดังนี้

1. กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_k (Initial Symmetrical Short-circuit Current) หมายถึง ค่าR.M.S. ของส่วนประกอบ A.C. ของกระแสลัดวงจรขณะเริ่มลัดวงจร
2. กระแสลัดวงจรค่ายอด i_p (Peak Short-circuit Current) หมายถึง ค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจร จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า กระแสลัดวงจรค่ายอด i_p จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาแรกๆ ของการเกิดการลัดวงจร
3. กระแสลัดวงจรอยู่ตัว I_k (Steady-state Short-circuit Current) หมายถึง ค่า R.M.S. ของกระแสลัดวงจรซึ่งยังคงมีอยู่หลังจากการลดลงของภาวะชั่วครู่ (Transient)
4. กระแสตัดวงจรแบบสมมาตร I_b (Symmetrical Short-circuit Breaking Current) หมายถึง ค่า R.M.S. ของส่วนประกอบ A.C. ของกระแสลัดวงจรขณะที่หน้าสัมผัสขั้วแรกของบริภัณฑ์สวิตชิ่งแยกออก
5. กำลังลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_k (Initial Symmetrical Short-circuit (Apparent) Power) หมายถึง ค่าที่ได้จากผลคูณของกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_k , แรงดันของระบบ U_n และค่า $S''_k = \sqrt{3}\, U_n\, I''_k$
6. แรงดันของระบบ U_n (Nominal System Voltage) หมายถึง ค่าแรงดันระหว่างสาย ซึ่งระบบได้รับการออกแบบและลักษณะการทำงานได้อ้างอิงถึง

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 2 ชนิดของการลัดวงจร

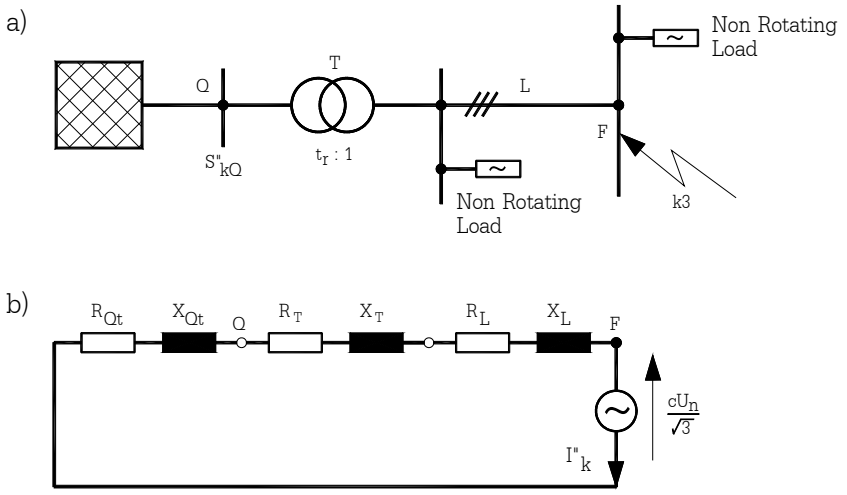
1.3 แหล่งจ่ายไฟสมมูล

ตาม IEC 60909 เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุดใดๆ ในวงจรไฟฟ้า ณ จุดนั้นอาจจะแทนได้ด้วยแหล่งจ่ายไฟสมมูล (Equivalent Voltage Source) โดยที่แหล่งจ่ายไฟสมมูลจะเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนระบบไฟฟ้า เครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกลอซิงโครนัส จะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ภายในของมัน

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของแหล่งจ่ายไฟสมมูล ณ ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร F ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวในระบบ ส่วนแหล่งจ่ายไฟอื่นๆ ในระบบให้มีค่าเป็นศูนย์

ที่ตำแหน่งลัดวงจร Fแหล่งจ่ายไฟสมมูลจะมีค่า $\frac{cUn}{\sqrt{3}}$ โดย c คือ ตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor) และ U_n คือ แรงดันของระบบที่ใช้

ค่าตัวประกอบแรงดัน c จะมีค่าแตกต่างกันไปตามระบบแรงดันที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของแหล่งจ่ายไปสมมูล

ตารางที่ 1 Voltage Factor c

Nominal Voltage U_a	Voltage Factor c for the Calculation of	
	Maximum Short-circuit Current C_{max}	Minimum Short-circuit Current C_{min}
Low Voltage 100 V to 1000 V (IEC Publication 38 , Table I) a) 230 V / 400 V b) Other Voltages	 1.05 1.10	 0.95 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 1 จงหา Voltage Factor c_{max} ที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุดสำหรับ

- ระบบ LV 230/400 V, 3 ph ,4 w
- ระบบ LV 240/416 V, 3 ph ,4 w
- ระบบ MV 22 kV, 3ph,3w

วิธีทำ จากตาราง Voltage Factor c

- ระบบ LV230/400 V ,3 ph ,4 w $C_{max} = 1.05$
- ระบบ LV 240/416 V ,3 ph ,4 w $C_{max} = 1.10$
- ระบบ MV 22 kV, 3 ph ,3w $C_{max} = 1.10$

1.4 อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ในการคำนวณกระแสลัดวงจร นอกจากจะต้องทราบค่าแหล่งจ่ายไฟสมมูลแล้ว ยังจำเป็นจะต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรด้วย

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 ที่สำคัญ ได้ดังนี้

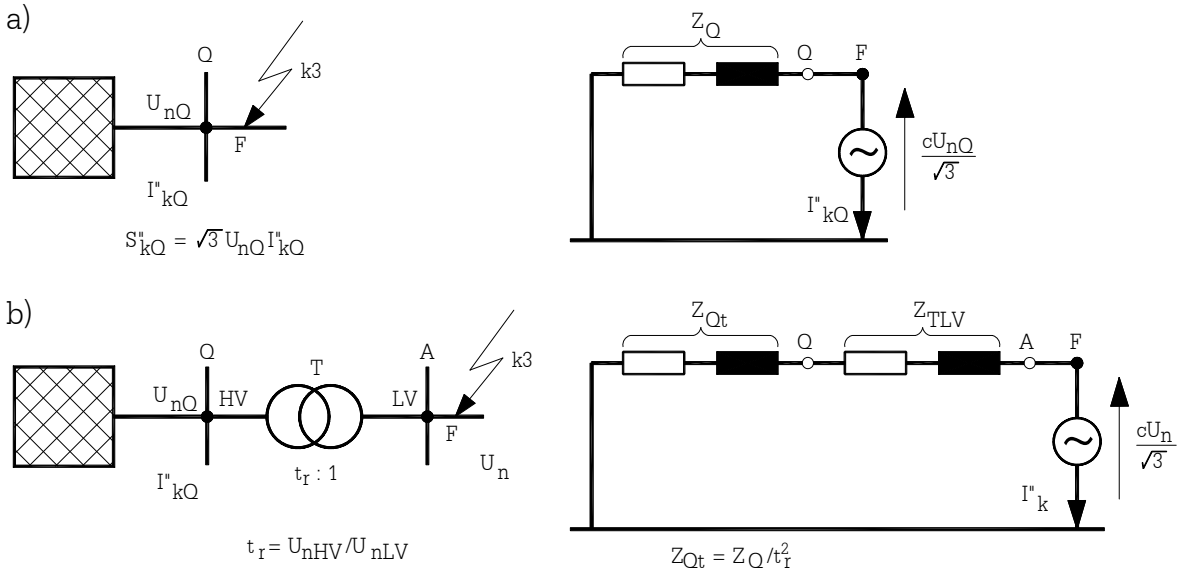
a) Network feeder
b) Two-wining transformers
c) Overhead Lines and Cables

รายละเอียดในแต่ละหัวข้อมีดังนี้

1.4.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของ (Network feeder)

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

รูปที่ 4 จะแสดงรูปของระบบและวงจรสมมูล สำหรับระบบไฟฟ้าทั้งกรณีที่มีหม้อแปลงและกรณีที่ไม่มีหม้อแปลง



รูปที่ 4 ระบบและวงจรสมมูล สำหรับระบบไฟฟ้า

พิจารณาการลัดวงจรในรูปที่ 4 (a) 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 4 (b) ซึ่งจ่ายไฟมาจากระบบแรงดันปานกลางหรือแรงดันสูงผ่านหม้อแปลงถ้าทราบกำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} หรือกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} ที่จุด Q ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Qt} ซึ่งแปลงให้อยู่ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง สามารถหาได้จาก

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

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

ในกรณีระบบมีแรงดันสูงกว่า 35 kV จ่ายด้วยสายส่งเหนือศีรษะ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_Q อาจพิจารณาเพียงค่ารีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียว เป็น $Z_Q = jX_Q$

ส่วนในกรณีอื่นๆ ถ้าไม่ทราบค่าความต้านทาน R_Q ของระบบไฟฟ้าที่แน่นอน

$$R_Q = 0.1\ X_Q$$

และ $$X_Q = 0.995\ Z_Q$$

ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{kQ} และกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_{kQ} นั้นสามารถหาได้จากทางการไฟฟ้า สำหรับที่ระดับแรงดัน 22 kV และ 24 kV นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้ S''_{kQ} = 500 MVA

<u>ตัวอย่างที่ 2</u> ระบบไฟฟ้ามีค่า $R_Q = 0.1\ X_Q$ ให้หาค่า X_Q ในเทอมของ Z_Q

<u>วิธีทำ</u>

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

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

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

$$= 0.995\ Z_Q$$

ตัวอย่างที่ 3 ระบบไฟฟ้ามี S''_{kQ} = 500 MVA ที่ 22 kV , $R_Q = 0.1\ X_Q$
ถ้ามีหม้อแปลง 22 kV / 230-400V ต่ออยู่
ให้หาค่า R_{Qt} และ X_{Qt} ของระบบไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

วิธีทำ

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

$$= \frac{1.1 \quad 22^2}{500} \times \frac{1}{\left(\frac{22000}{400}\right)^2}$$

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

$$= 0.352 \ m\Omega$$

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

$$= 0.995 \times 0.352$$

$$= 0.350 \ m\Omega$$

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

$$= 0.035 \ m\Omega$$

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

ค่าที่คำนวณได้เป็นค่า Positive-sequence Impedance ส่วนค่า Negative-sequence Impedance ก็ถือว่าเท่ากับค่า Positive-sequence Impedance แต่ Zero-sequence Impedance (Z_o) ของวงจรระบบไฟฟ้าไม่ต้องการ เนื่องจากจะมีหม้อแปลงต่อแบบ Delta- Wye หรือ Wye-delta อยู่เสมอซึ่งจะแยก Zero-sequence System ออกจากกัน

1.4.2 Two-wining transformers

ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงชนิด 2 ขดลวด $Z_T = R_T + jX_T$ สามารถคำนวณได้จากข้อมูลค่าพิกัดของหม้อแปลงดังนี้

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

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

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

โดยที่ :

U_{rT} = แรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงต่ำ

I_{rT} = กระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงดันสูงหรือด้านแรงต่ำ

S_{rT} = กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลง

P_{krT} = กำลังสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงในขดลวดที่กระแสพิกัด

u_{kr} = แรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นเปอร์เซ็นต์

u_{Rr} = แรงดัน

อัตราส่วน X/R เพิ่มขึ้นตามขนาดของหม้อแปลง สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่ความต้านทานจะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นในการคำนวณหาขนาดกระแสลัดวงจรอาจให้ค่าอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วยรีแอกแตนซ์เพียงอย่างเดียวแต่ค่าความต้านทานจะต้องนำมาคิดเมื่อต้องการคำนวณกระแสยอด (Peak Short Circuit)

<u>ตัวอย่างที่ 4</u> หม้อแปลงขนาด 1000 kVA , 22 kV/ 230 -400 V ,
% U_k = 6 ,Load Loss = 13.5 kW
ให้หา R_T , X_T และ Z_T อ้างอิงไปทางด้านแรงต่ำ

<u>วิธีทำ</u>

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

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

$$= 9.6 \times 10^{-3}\ \Omega$$

$$= 9.6\ m\Omega$$

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3\, I_{rT}^2} = P_{krT} \times \frac{U^2_{rT}}{S^2_{rT}}$$

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

$$= 2.16\ m\Omega$$

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

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

$$= 9.35\ m\Omega$$

$$= 5.85$$

ตารางที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้า ด้านแรงต่ำ 230 / 400V

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 3 ระบบไฟฟ้ารวมกับหม้อแปลงไฟฟ้า ด้านแรงต่ำ 230 / 400V

พิกัดของ หม้อแปลงไฟฟ้า (kVA)	อิมพีแดนซ์ของ หม้อแปลงไฟฟ้า (mΩ)	อิมพีแดนซ์ของ ระบบไฟฟ้า (mΩ)	อิมพีแดนซ์รวม (mΩ)
315	6.29 + j 19.32	0.04 + j 0.35	6.33 + j 19.67
400	4.60 + j 15.32	0.04 + j 0.35	4.64 + j 15.67
500	4.60 + j 12.31	0.04 + j 0.35	3.56 + j 12.66
630	2.62 + j 9.82	0.04 + j 0.35	2.66 + j 10.17
800	2.75 + j 11.68	0.04 + j 0.35	2.79 + j 12.03
1000	2.16 + j 9.35	0.04 + j 0.35	2.20 + j 9.70
1250	1.68 + j 7.49	0.04 + j 0.35	1.72 + j 7.84
1600	1.24 + j 5.87	0.04 + j 0.35	1.28 + j 6.22
2000	0.96 + j 4.70	0.04 + j 0.35	1.00 + j 5.05
2500	0.69 + j 3.78	0.04 + j 0.35	0.73 + j 4.13

1.4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเหนือศีรษะและเคเบิล (Overhead Lines and Cables Impedance)

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

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

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

โดยที่ :

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

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

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

ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วยความยาว X'_L สำหรับสายเหนือศีรษะสามารถคำนวณได้จาก

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

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

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 ดังนั้น สามารถสมการเขียนได้ง่ายขึ้นเป็น

$$X'_L = 0.0628\left(\frac{0.25}{n} + \ln\frac{d}{r}\right)\ \Omega/km \quad \text{for } f = 50\ Hz \quad \ldots\ldots\ (11.9)$$

<u>ตัวอย่างที่ 5</u> สาย OverheadLine ทำด้วย Aluminium ขนาด 95 mm^2
ให้หาค่า X'_L ถ้าสายวางตามยาวมีระยะห่าง 150 mm

<u>วิธีทำ</u> สายขนาด 95 mm^2

$A = \pi r^2$

$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{95}{\pi}}$

$= 5.50$ mm

$d = \sqrt[3]{d_{ab} \times d_{bc} \times d_{ca}}$

$$= \sqrt[3]{150 \times 150 \times 300}$$

$$= 189 \text{ mm}$$

$$X'_L = 0.0628 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right)$$

$$= 0.0628 \left(\frac{0.25}{1} + \ln \frac{189}{5.50} \right)$$

$$= 0.2378 \ \Omega / \text{km}$$

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน จึงได้ให้ข้อมูลค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของสายไฟฟ้าชนิดแรงต่ำหุ้มด้วยฉนวน PVC ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 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

1.5 การคำนวณกระแสลัดวงจร

การลัดวงจรในระบบไฟฟ้าที่มีการต่อลงดิน อาจมีได้ 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)

โดยทั่วไป **การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล จะให้กระแสลัดวงจรสูงสุด** และการคำนวณก็ทำสะดวกที่สุด เนื่องจากจะเกี่ยวกับ Positive Sequence Impedance ($Z_{(1)}$) อย่างเดียว ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล เท่านั้น

การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล (Balanced Three-phase Short Circuit)

กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_k

จากรูปที่ 4 กระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น I''_k สามารถหาได้จาก

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

โดยที่ :

$\frac{cUn}{\sqrt{3}}$ = แหล่งจ่ายไฟสมมูล

R_k = ผลรวมของความต้านทานที่ต่ออนุกรม

X_k = ผลรวมของรีแอกแตนซ์ที่ต่ออนุกรม

Z_k = อิมพีแดนซ์ลัดวงจร

ในกรณีของการลัดวงจรไกลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะได้ว่า

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

กระแสลัดวงจรค่ายอด i_p

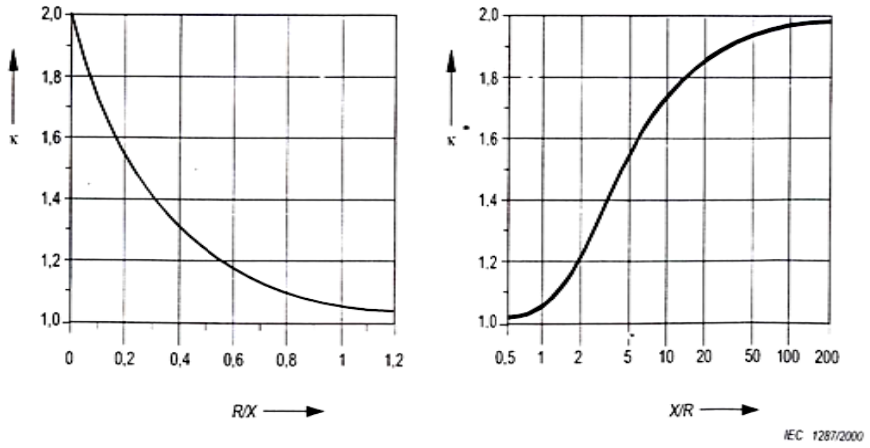
เนื่องจากกระแสลัดวงจรมาจากวงจรที่ต่ออนุกรม ดังนั้นกระแสลัดวงจรค่ายอดจึงหาได้จาก

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

โดยที่ค่า κ จะขึ้นอยู่กับค่า R/X หรือ X/R อาจคำนวณค่า κ ได้โดยประมาณจาก

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

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่า κ ได้จากรูป



รูปที่ 5 ตัวคูณค่ายอด

<u>ตัวอย่างที่ 6</u> ระบบไฟฟ้ามี Impedenes ลัดวงจรZ_k = 0.01 +j 0.05 Ω ให้หาค่า κ

<u>วิธีทำ</u> R/X = $\frac{0.01}{0.05} = \frac{1}{5}$ = 0.2

จากกราฟ $\kappa \approx$ 1.55

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

$$= 1.02 + 0.98e^{-3(0.2)}$$

$$= 1.557$$

<u>ตัวอย่างที่ 7</u> ระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรมี P.F. = 0.1 , I''_k = 10 kA ให้หากระแส i_p

<u>วิธีทำ</u> P.F. = 0.1 = Cos ϕ ,ϕ = 84.26 °

tanϕ = X/R= 9.95

R/X = 0.101

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

$= 1.02 + 0.98e^{-3(0.101)}$

$= 1.75$

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

$= 1.75 \times \sqrt{2} \times 10$

$= 24.7$ kA

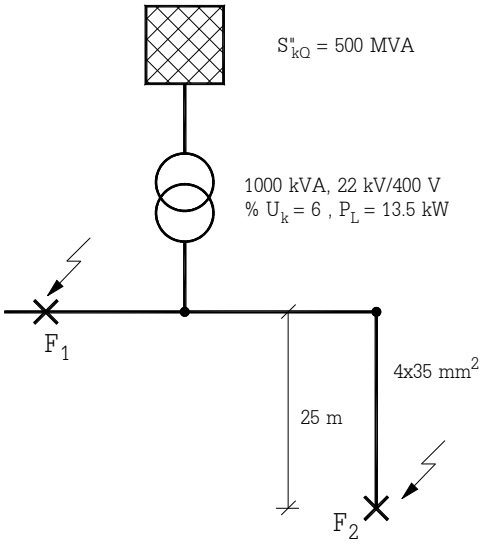
1.6 ตัวอย่างการคำนวณกระแสลัดวงจร

<u>ตัวอย่างที่ 8</u> 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 4×35 mm^2 ยาว 25 m.

R_L = 0.529 mΩ/m. X_L = 0.103 mΩ/m. , $R_{(0)L}/R_L$ = 4 , $X_{(0)L}/X_L$ = 3

จงหากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_1 และ F_2 ให้ $_{LV}C_{max}$ = 1.00



<u>วิธีทำ</u>

ที่ตำแหน่ง F_1

หา Z_1

<u>ระบบไฟฟ้า</u>

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

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

$= 0.352$ mΩ

$X_{Qt} = 0.995 Z_{Qt} = 0.350$ mΩ

$R_{Qt} = 0.1 X_{Qt} = 0.035$ mΩ

หม้อแปลง

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

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

$$= 9.60\ m\Omega$$

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

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

$$= 2.16\ m\Omega$$

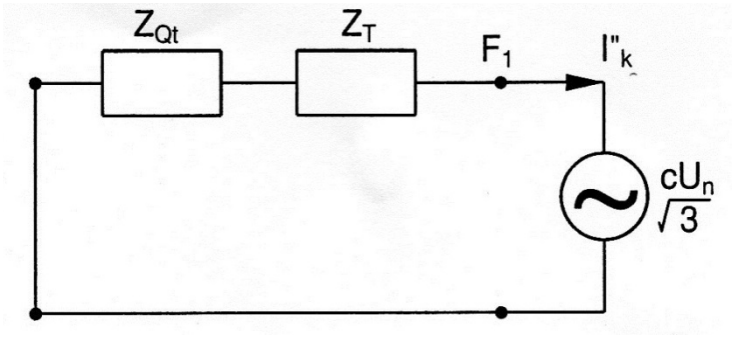
$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

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

$$= 9.35\ m\Omega$$

การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล

ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_1



Z_T = 2.16 + j 9.35)

Z_k = Z_{Qt} + Z_T

= (0.035 + j 0.35) + (2.08 + j 9.01)

= 2.195 + j 9.70 mΩ

$|Z_k|$ = 9.95 mΩ ค่า R/X = 0.23 จะได้ว่า κ = 1.52

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

$$= \frac{1.00 \times 400}{\sqrt{3} \times 9.95}$$

$$= 23.2 \text{ kA}$$

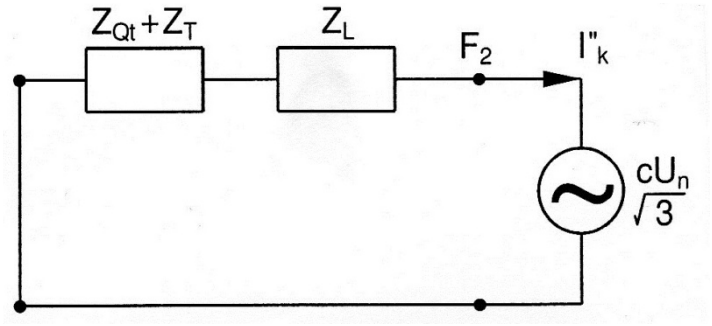
$$i_p = \kappa\sqrt{2}\, I''_k$$

$$= 1.52 \times \sqrt{2} \times 23.2$$

$$= 49.9 \text{ kA}$$

ลัดวงจรที่ตำแหน่ง F_2

การลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุล



$$Z_{L1} = 25 \times (0.529 + j\, 0.103)$$

$$= 13.23 + j\, 2.58 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = (Z_{Qt} + Z_T) + Z_{L1}$$

$$= (2.20 + j\, 9.7) + (13.23 + j\, 2.58)$$

$$= 15.43 + j\, 12.28 \text{ m}\Omega$$

$|Z_k| = 19.72 \text{ m}\Omega$ ค่า R/X = 1.26 จะได้ว่า $\kappa = 1.04$

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

$$= \frac{1.00 \times 400}{\sqrt{3} \times 19.72}$$

$$= 11.7 \text{ kA}$$

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

$$= 1.04 \times \sqrt{2} \times 11.7$$

$$= 17.2 \text{ kA}$$

ตัวอย่างที่ 9 จากตัวอย่างที่ 8

ถ้าระบบไฟฟ้าเป็นแบบ Infinite Bus

จงหาค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ตำแหน่ง F1

วิธีทำ

ตำแหน่ง F1

$\therefore$ ระบบไฟฟ้าเป็นแบบ Infinite Bus

$$\therefore \quad Z_{Qt} = 0$$

$$Z_T = 2.16 + j\,9.35 \ m\Omega$$

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

$$= \frac{1.00 \times 400}{\sqrt{3} \times \sqrt{2.16^2 + 9.35^2}}$$

$$= 24.1 \ kA$$

หมายเหตุ

ถ้าระบบไฟฟ้าเป็นแบบ Inifinite Bus กระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสมดุลที่ขั้วแรงต่ำของหม้อแปลงสามารถหาได้จากสูตร

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

โดยที่

U_k = % อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

I_n = กระแสพิกัดของหม้อแปลง (A)

$\therefore$ จากตัวอย่าง

$$I''_k = \frac{100}{\%U_k} \times \frac{1000}{\sqrt{3} \times 400}$$

$$= (100 / 6) \times 1.443$$

$$= 24.1 \ kA$$

1.7 การคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยคอมพิวเตอร์

เนื่องจากการคำนวณกระแสลัดวงจรตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น การคำนวณจะเกี่ยวข้องกับตัวเลขมาก หากต้องคำนวณกระแสลัดวงจรหลายๆ จุด ก็จะเป็นงานที่ใช้เวลามากและอาจจะเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในงานด้านต่างๆ โดยเฉพาะงานด้านวิศวกรรม เนื่องจากการคำนวณกระแสลัดวงจรตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น มีหลักการคำนวณที่แน่นอนเป็นระบบ เหมาะแก่การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อช่วยในการคำนวณ ปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลายโปรแกรมที่ใช้คำนวณกระแสลัดวงจร โปรแกรมเหล่านี้จะช่วยอำนวยความสะดวกเป็นอย่างมากในการคำนวณกระแสลัดวงจร การใช้งานง่าย โดยเฉพาะในการคำนวณกระแสลัดวงจรหลายๆ จุดก็จะทำให้ประหยัดเวลาและมีความถูกต้อง

1.8 ค่ากระแสลัดวงจรจากคอมพิวเตอร์

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยคอมพิวเตอร์จะช่วยทำให้การคำนวณทำได้ง่าย แต่ในบางโอกาสอาจจะไม่สะดวกที่จะต้องใช้คอมพิวเตอร์ทุกครั้งในการคำนวณจึงได้จัดทำตารางแสดงค่ากระแสลัดวงจรขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ทำให้ผู้ออกแบบสามารถนำค่ากระแสลัดวงจรนี้ไปใช้ในการออกแบบได้ทันที โดยในที่นี้จะใช้โปรแกรม DOC ของ ABB ในการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจร ค่ากระแสลัดวงจรที่ได้จากโปรแกรม DOC จะแสดงอยู่ในตารางข้างท้าย สำหรับค่ากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ไม่มีในตาราง สามารถหาได้จากวิธี Interpolation

ค่ากระแสลัดวงจรที่แสดงในตารางนั้น ได้มาจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ระบบไฟฟ้ามีค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น S''_{KQ} = 500 MVA
2. หม้อแปลงเป็น Oil Type มีค่าแรงดันอิมพีแดนซ์และค่ากำลังสูญเสียโหลดตามตารางที่ 2
3. สายไฟฟ้าแรงดันต่ำหุ้มฉนวน PVC มีค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ตามตารางที่ 4
4. แรงดันทางด้านแรงต่ำมีค่า 230/400V
5. ตัวประกอบแรงดัน (Voltage Factor) สำหรับแรงดันต่ำให้มีค่าเท่ากับ 1.00
6. ไม่คิดผลจากมอเตอร์

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
315	16	11.2	8.4	5.5	3.4	2.4	1.8
	25	11.2	9.3	6.9	4.6	3.4	2.7
	35	11.2	9.7	7.8	5.6	4.3	3.5
	50	11.2	10.1	8.5	6.6	5.3	4.4
	70	11.2	10.3	9.0	7.4	6.2	5.3
	95	11.2	10.4	9.3	7.9	6.8	5.9
	120	11.2	10.5	9.5	8.2	7.2	6.4
	150	11.2	10.5	9.7	8.5	7.5	6.7
	185	11.2	10.6	9.8	8.6	7.7	7.0
	240	11.2	10.6	9.9	8.8	8.0	7.2
	300	11.2	10.6	9.9	8.9	8.1	7.4
	400	11.2	10.7	10.0	9.0	8.2	7.4
	2 x 95	11.2	10.8	10.2	9.3	8.6	7.9
	2 x 120	11.2	10.8	10.3	9.5	8.8	8.2
	2 x 150	11.2	10.9	10.4	9.7	9.0	8.5
	2 x 185	11.2	10.9	10.4	9.8	9.2	8.6
	2 x 240	11.2	10.9	10.5	9.9	9.3	8.8
	2 x 300	11.2	10.9	10.5	9.9	9.4	8.9

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
400	16	14.1	9.9	6.0	3.5	2.4	1.9
	25	14.1	11.2	7.8	5.0	3.6	2.8
	35	14.1	11.9	9.0	6.2	4.6	3.7
	50	14.1	12.4	10.1	7.4	5.8	4.7
	70	14.1	12.7	10.8	8.5	6.9	5.8
	95	14.1	12.9	11.3	9.3	7.7	6.6
	120	14.1	13.0	11.6	9.7	8.3	7.2
	150	14.1	13.1	11.8	10.1	8.7	7.7
	185	14.1	13.2	12.0	10.3	9.0	8.0
	240	14.1	13.3	12.1	10.6	9.3	8.4
	300	14.1	13.3	12.2	10.7	9.5	8.6
	400	14.1	13.3	12.3	10.8	9.7	8.8
	2 x 95	14.1	13.5	12.6	11.3	10.2	9.3
	2 x 120	14.1	13.6	12.8	11.6	10.6	9.7
	2 x 150	14.1	13.6	12.9	11.8	10.9	10.1
	2 x 185	14.1	13.6	13.0	12.0	11.1	10.3
	2 x 240	14.1	13.7	13.0	12.1	11.3	10.6
	2 x 300	14.1	13.7	13.1	12.2	11.4	10.7
	3 x 185	14.1	13.8	13.3	12.6	12.0	11.4
	3 x 240	14.1	13.8	13.4	12.7	12.1	11.5
	3 x 300	14.1	13.8	13.4	12.8	12.2	11.7

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
500	16	17.6	11.3	6.4	3.6	2.5	1.9
	25	17.6	13.2	8.6	5.2	3.7	2.9
	35	17.6	14.2	10.2	6.6	4.8	3.8
	50	17.6	14.9	11.6	8.2	6.2	5.0
	70	17.6	15.4	12.7	9.5	7.5	6.2
	95	17.6	15.7	13.4	10.5	8.6	7.2
	120	17.6	15.9	13.8	11.2	9.3	8.0
	150	17.6	16.0	14.1	11.7	9.9	8.5
	185	17.6	16.1	14.3	12.0	10.3	9.0
	240	17.6	16.2	14.5	12.4	10.7	9.5
	300	17.6	16.3	14.7	12.6	11.0	9.8
	400	17.6	16.3	14.8	12.8	11.2	10.0
	2 x 95	17.6	16.6	15.3	13.4	11.8	10.5
	2 x 120	17.6	16.7	15.5	13.8	12.4	11.2
	2 x 150	17.6	16.8	15.7	14.1	12.8	11.7
	2 x 185	17.6	16.8	15.8	14.3	13.1	12.0
	2 x 240	17.6	16.9	15.9	14.5	13.4	12.4
	2 x 300	17.6	16.9	16.0	14.7	13.6	12.6
	3 x 185	17.6	17.1	16.4	15.3	14.3	13.5
	3 x 240	17.6	17.1	16.4	15.4	14.5	13.7
	3 x 300	17.6	17.1	16.5	15.5	14.7	13.9

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
630	16	22.0	12.7	6.8	3.7	2.5	1.9
	25	22.0	15.3	9.3	5.4	3.8	2.9
	35	22.0	16.8	11.3	7.0	5.0	3.9
	50	22.0	18.0	13.3	8.9	6.6	5.2
	70	22.0	18.7	14.8	10.6	8.1	6.6
	95	22.0	19.2	15.8	11.9	9.5	7.8
	120	22.0	19.5	16.4	12.8	10.4	8.7
	150	22.0	19.7	16.8	13.4	11.1	9.4
	185	22.0	19.8	17.1	13.9	11.7	10.0
	240	22.0	19.9	17.5	14.4	12.2	10.6
	300	22.0	20.0	17.7	14.7	12.6	11.0
	400	22.0	20.1	17.8	14.9	12.9	11.3
	2 x 95	22.0	20.5	18.6	15.8	13.6	11.9
	2 x 120	22.0	20.7	18.9	16.4	14.4	12.8
	2 x 150	22.0	20.8	19.1	16.8	15.0	13.4
	2 x 185	22.0	20.8	19.3	17.1	15.4	13.9
	2 x 240	22.0	20.9	19.5	17.5	15.8	14.4
	2 x 300	22.0	21.0	19.6	17.7	16.1	14.7
	2 x 400	22.0	21.0	19.7	17.8	16.2	14.9
	3 x 185	22.0	21.2	20.1	18.5	17.1	15.9
	3 x 240	22.0	21.3	20.3	18.8	17.5	16.3
	3 x 300	22.0	21.3	20.3	18.9	17.7	16.6

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
800	16	18.7	11.9	6.6	3.7	2.5	1.9
	25	18.7	13.9	8.9	5.3	3.8	2.9
	35	18.7	15.0	10.7	6.8	4.9	3.9
	50	18.7	15.9	12.2	8.5	6.4	5.2
	70	18.7	16.4	13.4	9.9	7.8	6.6
	95	18.7	16.7	14.2	11.0	8.9	7.8
	120	18.7	16.9	14.6	11.7	9.7	8.7
	150	18.7	17.0	14.9	12.2	10.3	9.4
	185	18.7	17.1	15.1	12.6	10.7	10.0
	240	18.7	17.2	15.4	13.0	11.2	10.6
	300	18.7	17.3	15.5	13.2	11.5	11.0
	400	18.7	17.3	15.6	13.4	11.7	11.3
	2 x 95	18.7	17.7	16.3	14.2	12.4	11.9
	2 x 120	18.7	17.8	16.5	14.6	13.0	12.8
	2 x 150	18.7	17.8	16.6	14.9	13.5	13.4
	2 x 185	18.7	17.9	16.8	15.1	13.8	13.9
	2 x 240	18.7	17.9	16.9	15.4	14.1	14.4
	2 x 300	18.7	18.0	17.0	15.5	14.3	14.7
	2 x 400	18.7	18.0	17.0	15.6	14.4	14.9
	3 x 185	18.7	18.2	17.4	16.2	15.1	15.9
	3 x 240	18.7	18.2	17.5	16.3	15.4	16.3
	3 x 300	18.7	18.2	17.5	16.4	15.5	16.6

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		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	20.5	17.6	13.9	11.4	9.7
	185	23.2	20.7	17.9	14.5	12.0	10.3
	240	23.2	20.8	18.3	15.0	12.6	10.9
	300	23.2	21.0	18.5	15.3	13.0	11.3
	400	23.2	21.1	18.6	15.5	13.3	11.6
	2 x 95	23.2	21.7	19.5	16.5	14.2	12.3
	2 x 120	23.2	21.8	19.9	17.1	15.0	13.2
	2 x 150	23.2	21.9	20.1	17.6	15.6	13.9
	2 x 185	23.2	22.0	20.3	17.9	16.0	14.5
	2 x 240	23.2	22.0	20.5	18.3	16.5	15.0
	2 x 300	23.2	22.1	20.6	18.5	16.7	15.3
	2 x 400	23.2	22.1	20.7	18.6	16.9	15.5
	3 x 185	23.2	22.4	21.2	19.5	17.9	16.6
	3 x 240	23.2	22.4	21.3	19.7	18.3	17.0
	3 x 300	23.2	22.5	21.5	19.8	18.5	17.3
	3 x 400	23.2	22.5	21.5	20.0	18.6	17.5

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
1250	16	28.8	14.4	7.1	3.8	2.6	1.9
	25	28.8	18.1	10.1	5.7	3.9	3.0
	35	28.8	20.4	12.7	7.5	5.2	4.0
	50	28.8	22.3	15.3	9.6	7.0	5.4
	70	28.8	23.5	17.5	11.8	8.8	7.0
	95	28.8	24.2	19.0	13.6	10.4	8.4
	120	28.8	24.7	19.9	14.7	11.6	9.5
	150	28.8	25.0	20.6	15.7	12.6	10.4
	185	28.8	25.2	21.1	16.4	13.3	11.2
	240	28.8	25.4	21.5	17.1	14.1	12.0
	300	28.8	25.5	21.8	17.5	14.6	12.5
	400	28.8	25.7	22.0	17.8	14.9	12.8
	2 x 95	28.8	26.4	23.2	19.0	15.9	13.6
	2 x 120	28.8	26.6	23.8	19.9	17.0	14.7
	2 x 150	28.8	26.8	24.1	20.6	17.8	15.7
	2 x 185	28.8	26.9	24.4	21.1	18.4	16.4
	2 x 240	28.8	27.0	24.7	21.5	19.0	17.1
	2 x 300	28.8	27.1	24.8	21.8	19.4	17.5
	2 x 400	28.8	27.1	25.0	22.0	19.7	17.8
	3 x 185	28.8	27.5	25.7	23.2	21.1	19.3
	3 x 240	28.8	27.6	25.9	23.5	21.5	19.8
	3 x 300	28.8	27.6	26.0	23.8	21.8	20.2
	3 x 400	28.8	27.7	26.1	23.9	22.0	20.4

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
1600	16	36.4	15.6	7.3	3.8	3.0	2.0
	25	36.4	20.4	10.7	5.8	4.0	3.0
	35	36.4	23.6	13.6	7.7	5.3	4.1
	50	36.4	26.3	16.9	10.2	7.2	5.6
	70	36.4	28.2	19.7	12.7	9.2	7.2
	95	36.4	29.4	21.9	14.9	11.1	8.9
	120	36.4	30.0	23.1	16.4	12.5	10.1
	150	36.4	30.5	24.1	17.6	13.7	11.2
	185	36.4	30.9	24.8	18.5	14.7	12.1
	240	36.4	31.2	25.5	19.4	15.6	13.1
	300	36.4	31.4	25.9	20.0	16.3	13.7
	400	36.4	31.5	26.3	20.5	16.7	14.2
	2 x 95	36.4	32.7	27.9	21.9	17.8	14.9
	2 x 120	36.4	33.0	28.7	23.1	19.2	16.4
	2 x 150	36.4	33.3	29.3	24.1	20.4	17.6
	2 x 185	36.4	33.4	29.7	24.8	21.2	18.5
	2 x 240	36.4	33.6	30.1	25.5	22.1	19.4
	2 x 300	36.4	33.7	30.3	25.9	22.6	20.0
	2 x 400	36.4	33.8	30.5	26.3	23.0	20.5
	3 x 185	36.4	34.4	31.7	27.9	24.8	22.3
	3 x 240	36.4	34.5	31.9	28.4	25.5	23.1
	3 x 300	36.4	34.6	32.1	28.7	25.9	23.6
	3 x 400	36.4	34.6	32.3	29.0	26.3	24.0

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
2000	16	44.8	16.5	7.5	3.9	2.6	2.0
	25	44.8	22.2	11.0	5.9	4.0	3.0
	35	44.8	26.4	14.3	7.9	5.4	4.1
	50	44.8	30.2	18.1	10.5	7.4	5.7
	70	44.8	32.8	21.7	13.3	9.5	7.4
	95	44.8	34.5	24.4	15.9	11.7	9.2
	120	44.8	35.5	26.1	17.7	13.3	10.6
	150	44.8	36.2	27.4	19.2	14.7	11.8
	185	44.8	36.7	28.4	20.4	15.8	12.9
	240	44.8	37.2	29.4	21.6	17.0	14.0
	300	44.8	37.5	30.0	22.3	17.8	14.7
	400	44.8	37.7	30.4	22.9	18.3	15.3
	2 x 95	44.8	39.4	32.4	24.4	19.3	15.9
	2 x 120	44.8	39.8	33.6	26.1	21.2	17.7
	2 x 150	44.8	40.2	34.4	27.4	22.6	19.2
	2 x 185	44.8	40.5	35.1	28.4	23.8	20.4
	2 x 240	44.8	40.7	35.6	29.4	24.9	21.6
	2 x 300	44.8	40.9	36.0	30.0	25.6	22.3
	2 x 400	44.8	41.0	36.3	30.4	26.1	22.9
	3 x 185	44.8	41.8	37.9	32.6	28.4	25.2
	3 x 240	44.8	42.0	38.3	33.3	29.4	26.2
	3 x 300	44.8	42.1	38.6	33.7	30.0	26.9
	3 x 400	44.8	42.2	38.8	34.1	30.4	27.4

กระแสลัดวงจรสมมาตรสามเฟส ที่ 400 V ในหน่วย kA

พิกัดหม้อแปลง (kVA)	ขนาดสาย (mm²)	ระยะห่างจากหม้อแปลงถึงตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร (เมตร)					
		0	10	25	50	75	100
2500	16	55.1	17.3	7.6	3.9	2.6	2.0
	25	55.1	24.0	11.3	5.9	4.0	3.0
	35	55.1	29.2	14.9	8.1	5.5	4.2
	50	55.1	34.1	19.3	10.9	7.5	5.7
	70	55.1	37.8	23.5	13.9	9.8	7.6
	95	55.1	40.3	26.9	16.8	12.1	9.5
	120	55.1	41.6	29.2	18.9	13.9	11.0
	150	55.1	42.6	30.9	20.7	15.5	12.4
	185	55.1	43.3	32.2	22.2	16.8	13.6
	240	55.1	44.0	33.4	23.6	18.2	14.8
	300	55.1	44.5	34.2	24.6	19.2	15.7
	400	55.1	44.8	34.8	25.3	19.8	16.3
	2 x 95	55.1	47.1	37.4	26.9	20.8	16.38
	2 x 120	55.1	47.8	39.0	29.2	23.0	18.9
	2 x 150	55.1	48.3	40.2	30.9	24.9	20.7
	2 x 185	55.1	48.7	41.1	32.2	26.3	22.2
	2 x 240	55.1	49.0	41.9	33.4	27.7	23.6
	2 x 300	55.1	49.3	42.4	34.2	28.6	24.6
	2 x 400	55.1	49.4	42.8	34.8	29.3	25.3
	3 x 185	55.1	50.7	45.0	37.7	32.2	28.0
	3 x 240	55.1	50.9	45.6	38.7	33.4	29.4
	3 x 300	55.1	51.1	46.0	39.3	34.2	30.3
	3 x 400	55.1	51.2	46.2	39.7	34.8	30.9

1.9 การใช้ตาราง

ค่ากระแสลัดวงจรในตาราง โดยทั่วไปจะเป็นค่าสูงสุด ตามข้อมูลที่ใช้ แต่ถ้าข้อมูลผิดไป เช่น ค่า Impedance ของหม้อแปลงลดลง, มีมอเตอร์ต่ออยู่เป็นต้น ค่ากระแสลัดวงจรที่แท้จริงอาจเพิ่มขึ้นบ้าง

ดังนั้นในการใช้ตารางควรเผื่อไว้ เพื่อความปลอยภัย**โดยทั่วไปควรเผื่อประมาณ 25 %**

<u>ตัวอย่างที่ 10</u> หม้อแปลง 1000 kVA, 22 kV / 230 - 400 V

ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่มี $S"_{KQ}$ = 500 MVAให้หา พิกัด I_{cu}ของ CB ที่ตู้ MDB

และถ้าสายขนาด 50 mm² ยาว 25 m จ่ายไฟไปให้ตู้DB

ให้หา พิกัดI_{cu}ของ CB ที่ตู้ DB

จากตาราง

หม้อแปลง 1000 kVA , I_k= 23.2 kA

I_{cu} ≥ 1.25 x 23.2 = 29 kA

CB ทั้งหมด ที่ตู้ MDB ต้องมี

I_{cu} = 30 kA

จากตาราง

สาย 50 mm² , ยาว 25 m, หม้อแปลง 1000 kVA

I_k = 13.8 kA

I_{cu} ≥ 1.25 x 13.8 = 17.3 kA

CB ทั้งหมด ที่ตู้ DB ต้องมี

I_{cu} = 18 kA

<u>ตัวอย่างที่ 11</u> หม้อแปลง 2000 kVA, 22 kV / 230 - 400 V ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่มี $S"_{KQ}$ = 500 MVA ให้หา พิกัด I_{cu} ของ CB ที่ตู้ MDB และถ้าสายขนาด 50 mm² ยาว 30 m จ่ายไฟไปให้ตู้ DB ให้หา พิกัด I_{cu} ของ CB ที่ตู้ DB

จากตาราง

หม้อแปลง 2000 kVA , I_k= 44.8 kA

I_{cu} ≥ 1.25 x 44.8 = 56 kA

CB ทั้งหมด ที่ตู้ MDB ต้องมี

I_{cu} = 56 kA

= 65 kA

จากตาราง

สาย 50mm² , ยาว 25 m , หม้อแปลง 2000 kVA I_k = 18.1 kA

สาย 50mm² , ยาว 50m , หม้อแปลง 2000 kVA I_k = 10.5 kA

ใช้วิธี Interpolation

ระยะห่าง 50 – 25 = 25 m

กระแสต่าง 18.1 – 10.5 = 7.6 kA

สาย 50mm² , ยาว 30m I_k = 18.1 – (7.6 / 25) x 5 = 16.6 kA

I_{cu} ≥ 1.25 x 16.6 = 20. 8 kA

CB ทั้งหมด ที่ตู้ DB ต้องมี

I_{cu} = 22 kA

บรรณานุกรม

1) ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ " การออกแบบระบบไฟฟ้า " ห้างหุ้นส่วนจำกัด โชติอนันต์ ครีเอชิ่ง

2) ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ " คู่มือการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า" Bangkok Cable Co.,LTD

3) กระทรวงอุตสาหกรรม "มอก 11-2553"

4) วสท. " มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556 "