

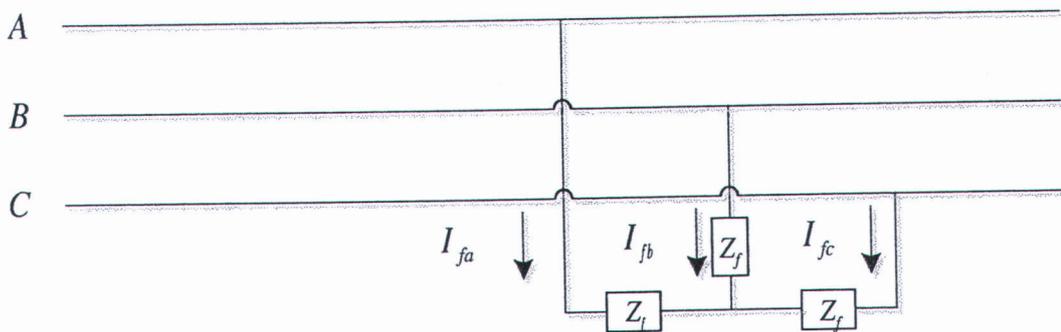
บทที่ 2

ประเภทของการลัดวงจรและการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร

ประเภทของการลัดวงจรสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ การลัดวงจรแบบสามเฟส (Three phase fault) การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single line-to-ground fault) การลัดวงจรแบบเฟส-เฟส (Line-to-line fault) และการลัดวงจรแบบเฟส-เฟส-ดิน (Double line-to-ground fault) อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการลัดวงจรแค่ 2 ประเภท คือ การลัดวงจรแบบสามเฟส และ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวรายละเอียดของประเภทและการคำนวณกระแสลัดวงจรเพียง 2 ประเภทการลัดวงจรเท่านั้น โดยการลัดวงจรแบบสามเฟสจะมีรายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 2.1 และการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน จะมีรายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 2.2

2.1 การลัดวงจรแบบสามเฟส (Three Phase Fault) [13]

การลัดวงจรแบบสามเฟส นี้เกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำทั้ง 3 เฟส เกิดการลัดวงจรพร้อมกัน โดยการลัดวงจรแบบสามเฟส นั้นเกิดขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการลัดวงจรประเภทอื่น (5% ของการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า) อย่างไรก็ตามความรุนแรงหรือขนาดของกระแสของลัดวงจรดังกล่าวจะมีมากที่สุด ภาพการลัดวงจรแบบสามเฟส แสดงได้รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การลัดวงจรแบบสามเฟส

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ จะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรซึ่งมักจะมีค่าสูงกว่ากระแสไหลตหลายเท่า สำหรับการคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรนี้ เพื่อนำไปเลือกฟักัดของอุปกรณ์ป้องกัน และนำไปตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้า สำหรับการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรจะใช้วิธีการคำนวณแบบอิมพีแดนซ์เมทริกซ์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ วิธีการดังกล่าวนี้อาศัยหลักการของเทวินินในการคำนวณ โดยที่ต้องมีการจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปที่คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณได้ นั่นคือรูปของเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามโดยส่วนมากที่นิยมใช้คือจัดอยู่ในรูปของ อิมพีแดนซ์เมทริกซ์ (Z_{bus}) โดยค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) โดยค่าแรงดันระหว่างเกิดการลัดวงจรที่บัสเกิดการลัดวงจรคำนวณได้จากสมการที่ (2.2) และค่าแรงดันระหว่างเกิดการลัดวงจรที่บัสใดๆคำนวณได้จากสมการที่(2.1)-(2.3) สำหรับค่ากระแสที่ไหลในแต่สายสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (2.1)$$

$$V_k(F) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(F) \quad (2.2)$$

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \quad (2.3)$$

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{Z_{ij}} \quad (2.4)$$

โดย

k คือ บัสที่เกิดการลัดวงจร

$V_k(0)$ คือ ค่าแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจรที่บัสเกิดการลัดวงจร

$V_i(F)$ คือ ค่าแรงดันระหว่างเกิดการลัดวงจรที่ i

$V_j(F)$ คือ ค่าแรงดันระหว่างเกิดการลัดวงจรที่ j

$I_k(F)$ คือ กระแสลัดวงจรที่บัสเกิดการลัดวงจร

Z_{kk} คือ อิมพีแดนซ์เมทริกซ์ของบัสที่เกิดการลัดวงจร

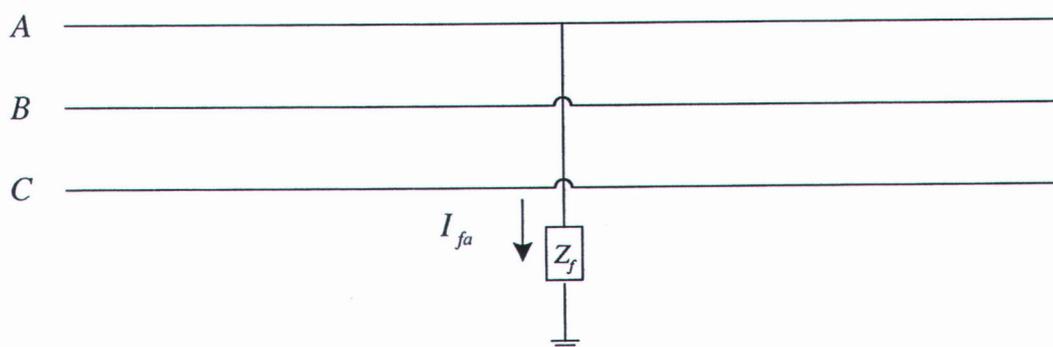
Z_f คือ อิมพีแดนซ์ของการลัดวงจร

Z_{ij} คือ อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ระหว่างบัส i กับ j

Z_{ij} คือ อิมพีแดนซ์ของสาย $i-j$

2.2 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line-to-Ground Fault) [13]

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน เกิดจากการที่สายไฟเฟสใดเฟสหนึ่งเกิดการลัดวงจรลงดินแสดงได้ตามรูปที่ 2.2 ซึ่งการลัดวงรดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นมากที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง (70%-80% ของการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า) อย่างไรก็ตามขนาดของกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการลัดวงจรแบบสามเฟส ยกเว้นในบางกรณี เช่น เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บริเวณใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินอาจมีขนาดกระแสลัดวงจรที่มากกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟสได้



รูปที่ 2.2 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

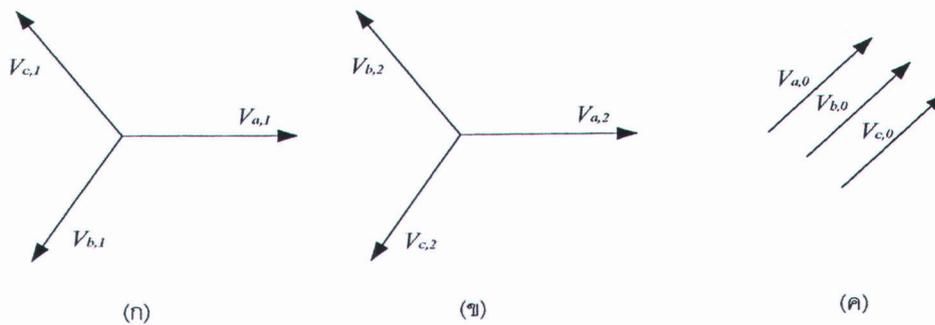
การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินจะเป็นการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical fault) ซึ่งการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรจะคำนวณได้ยากกว่าการลัดวงจรแบบสามเฟส ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงใช้ส่วนประกอบสมมาตรเพื่อแปลงให้อยู่ในระบบส่วนประกอบอันดับ ดังนั้นก่อนที่จะอธิบายถึงวิธีการคำนวณกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน จึงขออธิบายรายละเอียดของส่วนประกอบสมมาตรดังต่อไปนี้

2.2.1 ส่วนประกอบสมมาตร

ส่วนประกอบสมมาตรจะประกอบด้วยส่วนประกอบอันดับ 3 อันดับคือ

1. ส่วนประกอบอันดับบวก (Positive-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์สมดุล 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมระหว่างเฟสต่างกัน 120 องศา โดยมีลำดับเฟส เป็น abc ดังรูปที่ 2.3 (ก)

2. ส่วนประกอบอันดับลบ (Negative-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์สมมูล 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมระหว่างเฟสต่างกัน 120 องศา โดยมีลำดับเฟส เป็น acb ดังรูปที่ 2.3 (ข)
3. ส่วนประกอบอันดับศูนย์ (Zero-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟสเซอร์สมมูล 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันและมีมุมเท่ากัน ดังรูปที่ 2.3 (ค)



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบสมมาตรของระบบ 3 เฟส

เมื่อพิจารณาค่ากระแสในระบบสามเฟสให้อยู่ในรูปส่วนประกอบแต่ละลำดับใน ส่วนประกอบสมมาตรจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ I_b &= I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 \\ I_c &= I_c^0 + I_c^1 + I_c^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) ทำการจัดรูปให้ทุกเทอมอยู่ในรูปของส่วนประกอบของเฟสเซอร์ a ทั้งหมด จะได้ดังสมการที่ (2.6) โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ $a = 1 \angle 120^\circ$

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ I_b &= I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 \\ I_c &= I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อทำการจัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

หรือ



$$I^{abc} = AI_a^{012} \quad (2.8)$$

นอกจากนี้ยังสามารถจัดรูปสมการเพื่อหาส่วนประกอบลำดับต่างๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

หรือ

$$I_a^{012} = A^{-1} I^{abc} \quad (2.10)$$

โดย

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ และ } A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบลำดับ [13-15]

1) อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบลำดับของสายส่ง

อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบลำดับของสายบนดิน สำหรับสายวงจรเดี่ยว (Single-circuit line) อัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกเท่ากับ 2 เมื่อไม่มีสายดิน และ 3.5 เมื่อมีสายดิน สำหรับสายวงจรรคู่ (Double circuit line) อัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกเท่ากับ 5.5 สำหรับสายใต้ดิน อัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกเท่ากับ 1-1.25 (สายแกนเดี่ยว) และ 3-5 (สายสามแกน)

2) อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบลำดับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สำหรับการศึกษาการลัดวงจรส่วนใหญ่จะพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีด้วยกันสามค่าคือ ซับทรานเซียนต์ (Subtransient) ทรานเซียนต์ (Transient) และซิงโครนัส (Synchronous) หรือ สถานะอยู่ตัว (Steady state) สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

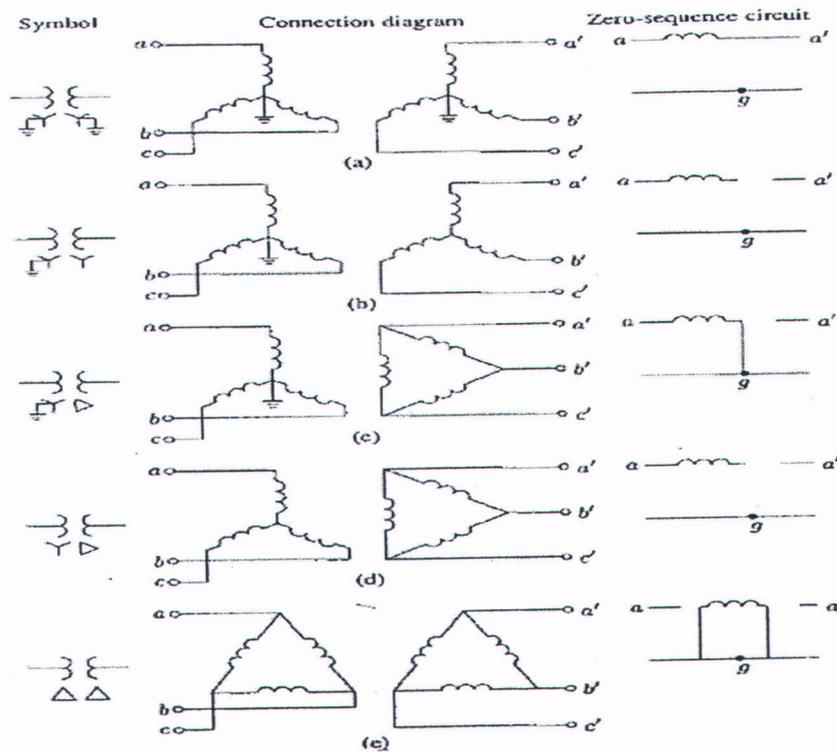


ตารางที่ 2.1 อิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

Type of Machine		x_d'' (PU)	x_d' (PU)	x_o (PU)	x_2 (PU)	x_o (PU)
Turbine	2 pole	0.09	0.15	1.2	0.09	0.03
Generator	4 pole	0.14	0.22	1.7	0.14	0.07
Silent Pole	with dampers	0.2	0.3	1.25	0.2	0.18
Generator	without dampers	0.28	0.3	1.2	0.35	0.12

3) อิมพีแดนซ์ส่วนประกอบลำดับของหม้อแปลง

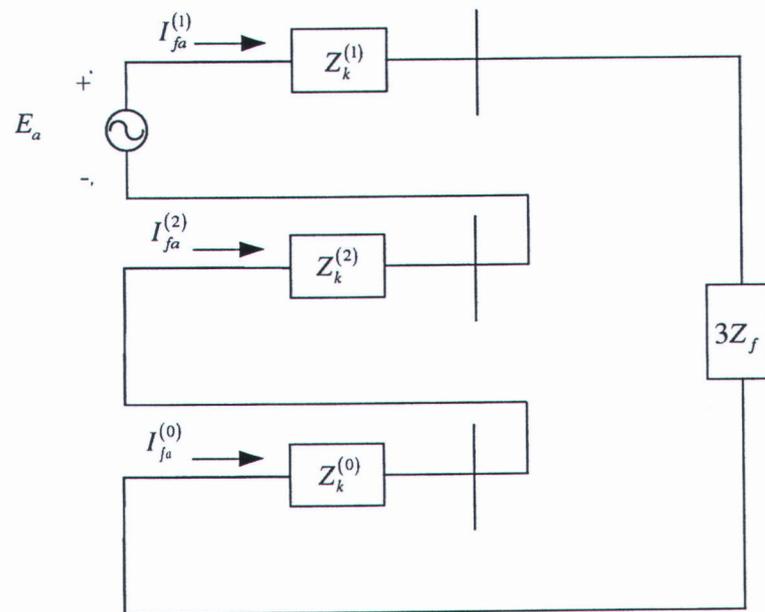
หม้อแปลงจะถูกจำลองด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของการรั่วไหล ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะเปลี่ยนเมื่อลำดับเฟสเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลำดับลบของหม้อแปลงจะมีค่าเดียวกัน อย่างไรก็ตามอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับการต่อขดลวดของหม้อแปลง โดยวงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลงในแต่ละรูปแบบแสดงได้รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลลำดับศูนย์ของหม้อแปลง

2.2.2 การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน [13]

เมื่อทราบถึงส่วนประกอบลำดับต่างๆ จากหัวข้อข้างต้นแล้ว ในส่วนของหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้ส่วนประกอบลำดับในการคำนวณ โดยกำหนดให้เกิดการลัดวงจรที่เฟส a ตามรูปที่ 2.2 และมีวงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลขณะเกิดการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

จากรูปที่ 2.5 ค่ากระแสลัดวงจรในส่วนประกอบลำดับสามารถหาได้ตามสมการต่อไปนี้

$$I_a^0(F) = \frac{E_a}{Z_k^0 + Z_k^1 + Z_k^2 + 3Z_f} \quad (2.11)$$

และค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถหาได้ตามสมการต่อไปนี้

$$I_a(F) = 3I_a^0 = \frac{3E_a}{Z_k^0 + Z_k^1 + Z_k^2 + 3Z_f} \quad (2.12)$$

สำหรับค่าแรงดันแต่ละบัสระหว่างเกิดการลัดวงจรในส่วนประกอบลำดับหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} V_i^0(F) &= 0 - Z_{ik}^0 I_k^0 \\ V_i^1(F) &= V_i^1(0) - Z_{ik}^1 I_k^1 \\ V_i^2(F) &= 0 - Z_{ik}^2 I_k^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

โดยที่ $V_i^1(0) = V_i(0)$ คือค่าแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจรที่บัส i

ค่าแรงดันระหว่างเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถหาได้ตามสมการต่อไปนี้

$$V_i^{abc} = AV_i^{012} \quad (2.14)$$

สำหรับค่ากระแสลัดวงจรที่ไหลในสาย i ไป j ในส่วนประกอบลำดับหาได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} I_{ij}^0 &= \frac{V_i^0(F) - V_j^0(F)}{z_{ij}^0} \\ I_{ij}^1 &= \frac{V_i^1(F) - V_j^1(F)}{z_{ij}^1} \\ I_{ij}^2 &= \frac{V_i^2(F) - V_j^2(F)}{z_{ij}^2} \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดยที่ z_{ij}^0, z_{ij}^1 และ z_{ij}^2 คือส่วนประกอบลำดับศูนย์ ลำดับบวก และลำดับลบของค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งระหว่างบัส i และ j อย่างไรก็ตามจากค่ากระแสลัดวงจรในส่วนประกอบลำดับทำการเปลี่ยนเป็นค่ากระแสในระบบสามเฟสได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$I_i^{abc} = AI_i^{012} \quad (2.16)$$

2.3 กระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากหัวที่ผ่านมาจะเป็นการกล่าวถึงประเภทของการลัดวงจรและการคำนวณกระแสลัดวงจรแต่ละประเภท ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงค่ากระแสลัดวงจรที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ซึ่งค่ากระแสลัดวงรดังกล่าวนี้จะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรในระบบเพิ่มมากขึ้นโดยค่ากระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสลัดวงจรจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้

ขนาดของกระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจร โหมดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวรรวมกับค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรไฟฟ้า โดยค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขของการลัดวงจรจะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง เวลาตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.1 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ช่วงชับทรานเซียนต์ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร จากตารางที่ 2.1 ค่าอิมพีแดนซ์ช่วงชับทรานเซียนต์จะขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เป็นประเภท 4 โพล ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ช่วงซับซ้อนที่ 0.14 PU อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประมาณค่ากระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสมีค่าประมาณ 5 เท่าจากกระแสทำงานปกติ ซึ่งกระแสลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 500-1000 [3] ดังนั้นจากสมการที่ (2.17)-(2.19) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวช่วงซับซ้อนซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ช่วงสถานะคงตัวอยู่ประมาณ 5 เท่า ดังสมการที่ (2.20)

$$I_{DG}(F) = \frac{V_{DG}}{X''_{DG}} \quad (2.17)$$

$$I_{DG}(F) = 5 \times I_n \quad (2.18)$$

$$I_n = \frac{V_{DG}}{X_{DG}} \quad (2.19)$$

$$X''_{DG} = \frac{X_{DG}}{5} \quad (2.20)$$

โดยที่ $I_{DG}(F)$, I_n , V_{DG} , X''_{DG} , และ X_{DG} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่ากระแสการทำงานปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์ช่วงซับซ้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์ช่วงสถานะอยู่ตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะอยู่ในหน่วยของค่าฐาน (Per Unit: PU)