หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
การวิเคราะห์การลัดวงจร

ในบทนี้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับอธิบายถึงทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์การลัดวงจร โดยวิธีบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ (Bus Impedance Matrix) โดยเริ่มอธิบายถึง องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ของระบบไฟฟ้ากำลัง การสร้างบัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ และการลัดวงจรชนิดต่าง ๆ รวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์การลัดวงจรชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนเฟสอื่น (Change In Symmetry)

2.1 องค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components)[1],[3]

Dr. C.L. Fortescue ได้ศึกษาเกี่ยวกับ เฟเซอร์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ไม่สมดุลย์ สามารถแทนได้ด้วย เฟเซอร์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุลย์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเฟเซอร์ ทั้งสามนี้ประกอบด้วย

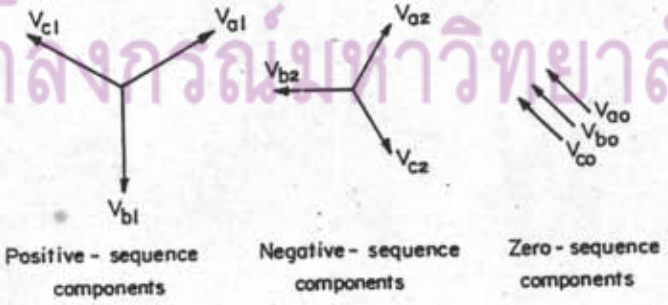
. องค์ประกอบซีเควนซ์บวก (Positive-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟเซอร์สามชุดที่มีขนาดเท่ากัน มุมต่างกัน 120 องศา และมีลำดับเฟสเหมือนกันกับเฟเซอร์เริ่มต้น

. องค์ประกอบซีเควนซ์ลบ (Negative-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟเซอร์สามชุดที่มีขนาดเท่ากัน มุมต่างกัน 120 องศา และมีลำดับเฟสตรงข้ามกับเฟเซอร์เริ่มต้น

. องค์ประกอบซีเควนซ์ศูนย์ (Zero-Sequence Components) ประกอบด้วยเฟเซอร์สามชุดที่มีขนาดเท่ากัน มุมระหว่างเฟเซอร์เป็นศูนย์

ถ้าแต่ละชุดของค่าเริ่มต้นของเฟเซอร์ที่ไม่สมดุลย์ เป็นผลรวมขององค์ประกอบทั้งสามข้างต้น เฟเซอร์เริ่มต้นดังกล่าวสามารถอธิบายได้ในเทอมขององค์ประกอบบนแกนซีเควนซ์ได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบสมมาตร

$$V_a = V_{a1}+V_{a2}+V_{ao} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b1}+V_{b2}+V_{bo} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c1}+V_{c2}+V_{co} \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.1)-(2.3) สังเกตุได้ว่าองค์ประกอบซีเควนซ์ทั้งสามในแต่ละกลุ่มของเฟเซอร์เริ่มต้นมีลักษณะสมมาตรในการจัดลำดับ นั่นคือมีการวางตัวด้วยมุม $2\pi/3$ radian ซึ่งกันและกัน การวางตัวแยกของเฟเซอร์แบบนี้ สามารถใช้โอเปอเรเตอร์ (a-oparator) ของระบบสามเฟสได้ดังนี้

$$a = 1\angle 2\pi/3 = 1\angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3}$$

$$a2 = 1\angle 4\pi/3 = 1\angle 240^\circ = 1e^{j4\pi/3}$$

ดังนั้นสามารถสร้าง Linear Transformation สำหรับองค์ประกอบทั้งสามได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยที่เรากำหนดให้

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

จะได้

$$V_{abc} = A\, V_{012} \quad (2.5)$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ao} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

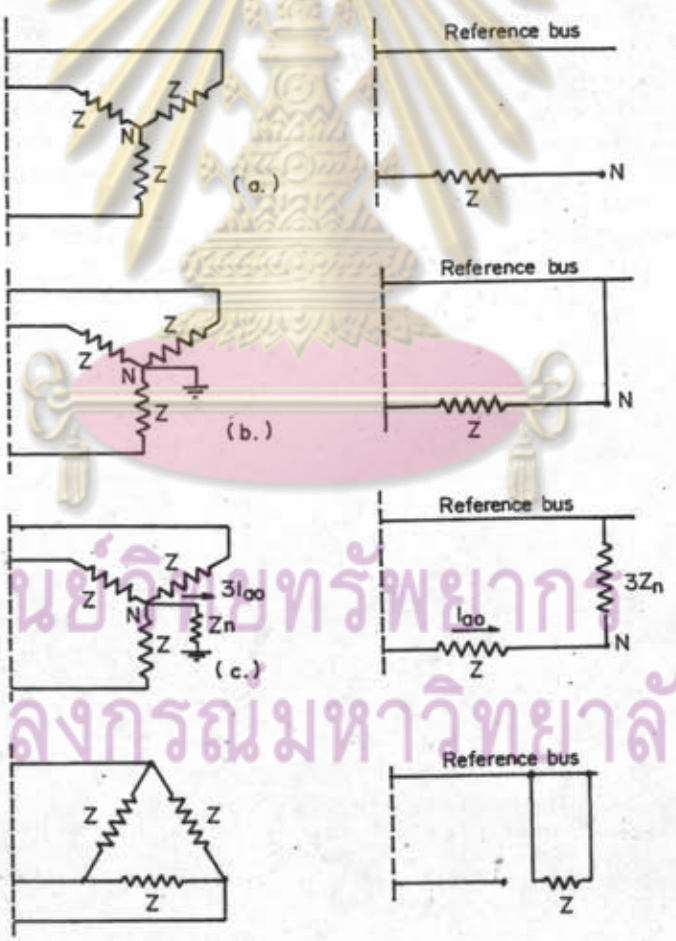
จะได้

$$I_{abc} = A\, I_{012} \quad (2.7)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

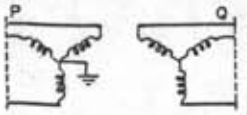
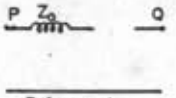
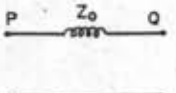
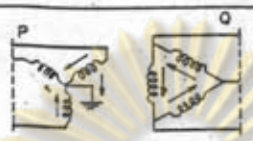
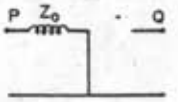
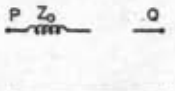
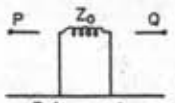
การวิเคราะห์การลัดวงจรชนิดไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault) ของระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วยการหาองค์ประกอบสมมาตรของกระแสที่ไม่สมดุลย์ (Unbalance) ที่ไหลในระบบ จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าจำเป็นที่จะต้องหาค่าอิมพิแดนซ์ในซีเควนซ์ต่าง ๆ และจัดให้อยู่ในข่ายวงจรของแต่ละซีเควนซ์

อิมพิแดนซ์ในซีเควนซ์บวก และลบของข่ายวงจรที่สมมาตรจะมีค่าเท่ากัน แต่จะต่างกับอิมพิแดนซ์ในซีเควนซ์ศูนย์ จะเห็นได้ว่าในข่ายวงจรต่าง ๆ ค่าอิมพิแดนซ์ในซีเควนซ์บวกและลบของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงในข่ายวงจรจะมีค่าตรงตามค่าอิมพิแดนซ์ในซีเควนซ์นั้น ๆ ส่วนค่าอิมพิแดนซ์ในซีเควนซ์ศูนย์ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลง ในข่ายวงจรจะมีค่าต่างๆ แปรตามชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงนั้น ๆ สรุปได้ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.2 วงจรเสมือนซีเควนซ์ศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CCT.
P Y Y Q		
P Y Y Q		
P Y Δ Q		
P Y Δ Q		
P Δ Δ Q		

รูปที่ 2.3 วงจรเสมือนซีเควนซ์ศูนย์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.2 การวิเคราะห์การลัดวงจรด้วยบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์[2]

วิธีสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์อาจจำแนกออกได้เป็น 2 วิธีคือ

1) TRANSFORMATION METHOD โดยใช้ Incidence Matrix วิธีนี้จะใช้เนื้อที่ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์มาก ทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้กัน

2) Z-BUS METHOD โดยสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ขึ้นทีละขั้น ใช้การจำลองข่ายวงจร (Network) ขึ้นมาโดยเริ่มอีลีเมนต์ (Element) ต่าง ๆ เข้าไปทีละเส้นโดยอาศัยหมายเลขของแต่ละบัสเป็นหมายเลขอ้างอิง ขั้นตอนและวิธีการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ โดยวิธีบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ สรุปได้ดังตาราง 2.1

การใช้บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในการวิเคราะห์การลัดวงจรของระบบไฟฟ้าทั่วไป ทำให้สามารถคำนวณกระแส และแรงดันในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าในขณะเกิดลัดวงจรขึ้น ปริมาณเหล่านี้เป็นสิ่งที่ต้องการและจำเป็นในการออกแบบการป้องกันระบบไฟฟ้าด้วยรีเลย์ และใช้ในการกำหนดความสามารถในการตัดตอนของเซอร์กิตเบรคเกอร์ โดยคำนวณค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) กระแสลัดวงจรที่บัสต่าง ๆ

2) แรงดันภายหลังการลัดวงจรที่บัสต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) กระแสภายหลังการลัดวงจรที่ลายน์ต่าง ๆ

ในการวิเคราะห์การลัดวงจร ปกตินิยมแทนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งจะลดการคำนวณที่ไม่จำเป็นลง โดยคำตอบที่ได้มีความแม่นยำ และสามารถยอมรับได้ นั่นคือ

- แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าหลังรีแอคแตนซ์
- ตัดชันท์โหลดต่าง ๆ (เช่น โหลดทั่วไป Line Charging etc.)
- ปรับ Tap ของหม้อแปลงไว้ที่ Nominal Tap

นอกจากนั้น ในการวิเคราะห์การลัดวงจรจำเป็นต้องแยกให้เห็นถึง ความแตกต่างระหว่างภาวะเกิดลัดวงจร ภาวะหลังเกิดลัดวงจร กระแส/แรงดันในเฟสต่าง ๆ และกระแส/แรงดัน ในเทอมของค่าส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Compoments) จึงควรมีข้อตกลงเกี่ยวกับเครื่องหมายต่าง ๆ ดังนี้

- ภาวะก่อนเกิดลัดวงจรใช้ Subscript 0
- ภาวะหลังเกิดลัดวงจรใช้ Subscript F
- กระแส/แรงดันในเฟสต่าง ๆ ใช้ Subscript A, B, C
- กระแส/แรงดันในซีเควนซ์ต่าง ๆ ใช้ Subscript 0, 1, 2
- ตำแหน่งของบัสต่าง ๆ ใช้ Subscript เป็นตัวเลข เช่น $0,1,2,\ldots,n$
- ตำแหน่งของลายน์ต่าง ๆ ใช้ Subscript เป็นตัวเลข เช่น $1,2,\ldots,m$ เป็นต้น

Add p-q	Mutual coupling		No mutual coupling	
	p is not the reference bus	p is the reference bus	p is not the reference bus	p is the reference bus
Branch	$Z_{ij} = Z_{pi} + \frac{\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pi}-\bar{Z}_{qi})}{y_{pq,pq}}$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq q$	$Z_{qi} = \frac{\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pi}-\bar{Z}_{qi})}{y_{pq,pq}}$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq q$	$Z_{qi} = Z_{pi}$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq q$	$Z_{qi} = 0$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq q$
	$Z_{qq} = Z_{pq} + \frac{1+\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pq}-\bar{Z}_{qq})}{y_{pq,pq}}$	$Z_{qq} = \frac{1+\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pq}-\bar{Z}_{qq})}{y_{pq,pq}}$	$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq,pq}$	$Z_{qq} = z_{pq,pq}$
Link	$Z_{ii} = Z_{pi} - Z_{qi} + \frac{\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pi}-\bar{Z}_{qi})}{y_{pq,pq}}$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq i$	$Z_{ii} = -Z_{qi} + \frac{\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pi}-\bar{Z}_{qi})}{y_{pq,pq}}$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq i$	$Z_{ii} = Z_{pi} - Z_{qi}$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq i$	$Z_{ii} = -Z_{qi}$ $i=1,2,\ldots,m$ $i\neq i$
	$Z_{ii} = Z_{pi} - Z_{qi} + \frac{1+\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pi}-\bar{Z}_{qi})}{y_{pq,pq}}$	$Z_{ii} = -Z_{qi} + \frac{1+\bar{y}_{pq,pq}(\bar{Z}_{pi}-\bar{Z}_{qi})}{y_{pq,pq}}$	$Z_{ii} = Z_{pi} - Z_{qi} + z_{pq,pq}$	$Z_{ii} = -Z_{qi} + z_{pq,pq}$
Modification of the element for elimination of ith node				
Z_{ij} (modified) $= Z_{ij}$ (before elimination) $- \frac{Z_{ii}Z_{ij}}{Z_{ii}}$ $i,j = 1,2,\ldots,m$				

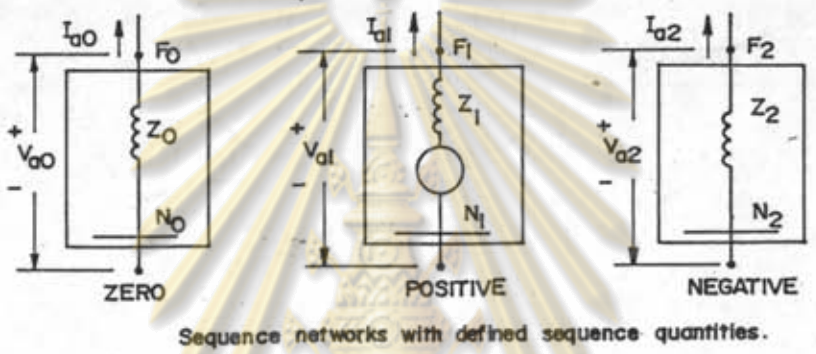
ตารางที่ 2.1 สมการการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การคำนวณการลัดวงจร และสมการของการเกิดลัดวงจรแบบต่าง ๆ [1],[2],[3]

วิธีการคำนวณ กระแส/แรงดัน ของการเกิดลัดวงจรนั้น พื้นฐานหลักของการคำนวณค่าต่างๆ อาศัยองค์ประกอบซีเควนซ์ (Sequence Co-ordination) ในสภาวะของข่ายวงจร (Characters of Network) ในสภาวะการเกิดลัดวงจร การวิเคราะห์ของการลัดวงจร อาจใช้ทฤษฎี " Superposition pre-fault voltage source " ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1) ระบบไฟฟ้าทั่วไปเป็นระบบที่สมดุลย์และสมมาตร (Balance and Symmetrical System) ถ้าสมมุติให้เกิดลัดวงจรที่จุด F สามารถเขียนข่ายวงจรซีเควนซ์ (Sequence Network) ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ข่ายวงจรซีเควนซ์

ซึ่งจากรูปที่ 2.4 สามารถเขียนสมการของแรงดันได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ hV_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \qquad (2.8)$$

หรือ

$$V_{012} = E - Z_{012}\, I_{012} \qquad (2.9)$$

2) ค่าอิมพิแดนซ์ของระบบ (System Impedance) เป็นค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่งและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ ค่าเหล่านี้จะเป็นค่าปริมาณซีเควนซ์ที่จะนำมาสร้างสมการ (Linear Equation) สำหรับการวิเคราะห์

3) เงื่อนไขและขอบเขตของชนิดของการลัดวงจร (Boundary Condition) แต่ละประเภท เป็นจุดสำคัญที่บอกให้ทราบว่า เกิดความไม่สมดุลย์อย่างไรในระบบ ที่ตำแหน่งบัสใดและ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เฟสใด (ปกติการวิเคราะห์การลัดวงจรจะกำหนดให้เฟส a เป็นเฟสอ้างอิง)

องค์ประกอบทั้งสามนี้ จะต้องนำมาพิจารณาร่วมกันในการคำนวณหาค่ากระแส/แรงดันที่เกิดจากการลัดวงจร ไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรแบบใด (Shunt and Series Fault) ดังที่จะกล่าวถึงตามลำดับ

2.3.1 การลัดวงจรแบบขนาน (Shunt Fault)

Shunt Fault เป็นการลัดวงจรแบบสมดุลย์และไม่สมดุลย์ (Balance and Unbalance Fault) ซึ่งมีความเกี่ยวพันกับบัสอ้างอิง (Reference Bus) Shunt Fault ยังสามารถแบ่งออกเป็นการลัดวงจรชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.3.1.1 การลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดิน (Single Line-to-Ground Fault)

การลัดวงจรชนิดนี้อาจเกิดบนเฟสใดเฟสหนึ่ง โดยปกติจะให้เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดิน รูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข่ายวงจรซีเควนซ์ (Sequence Network Connection) ต่างๆ

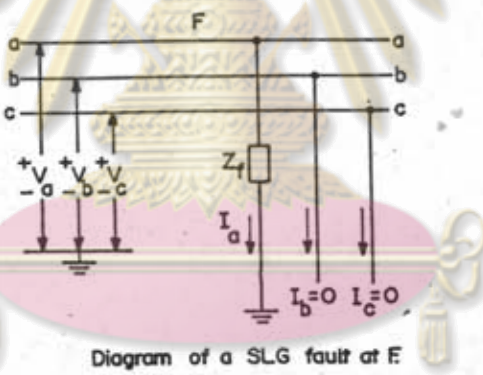
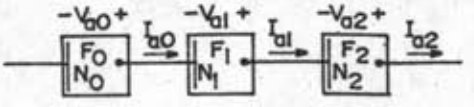


Diagram of a SLG fault at F

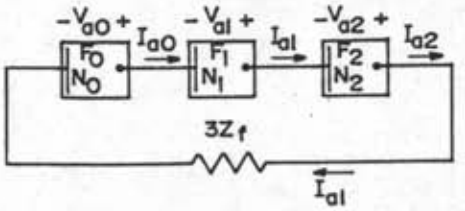
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมแสดงการเกิดลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Sequence network partial connection specified by the current equation

รูปที่ 2.6 ข่ายวงจรซีเควนซ์ในส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแส



Sequence network connection for a SLG fault.

รูปที่ 2.7 ข่ายวงจรซีเควนซ์สำหรับการลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดิน

จากรูปที่ 2.5 - 2.7 สามารถสรุปสมการหลักของการเกิดลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดินได้ดังนี้

Boundary Condition $I_b = I_c = 0$

$V_a = Z_f I_a$

Solution $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \dfrac{hV_f}{(Z_0+2Z_1+3Z_f)}$ (2.10)

$I_a = 3I_{a1}/h$ (2.11)

2.3.1.2 การลัดวงจรชนิดสองสาย (Line-to-Line Fault)

การลัดวงจรชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างสายเฟสกับสายเฟส โดยปกติให้เกิดระหว่างเฟส B กับเฟส C (เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง) รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดลัดวงจรชนิดสองสาย รูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข่ายวงจรบนแกนซีเควนซ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

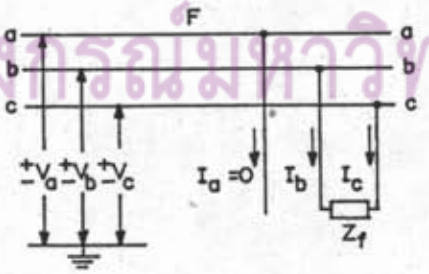
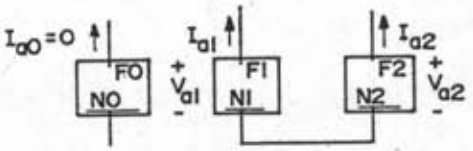


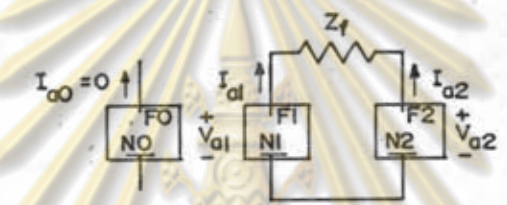
Diagram of a LL fault at F

รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมแสดงการเกิดลัดวงจรชนิดสองสาย



Sequence network paritai connection specified by the current equation.

รูปที่ 2.9 ข่ายวงจรซีเควนซ์ในส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแส



Sequence network connection for a LL fault.

รูปที่ 2.10 ข่ายวงจรซีเควนซ์สำหรับการลัดวงจรชนิดสองสาย

จากรูปที่ 2.8 - 2.10 สามารถสรุปสมการหลักของการเกิดลัดวงจรชนิดสองสายได้ดังนี้

Boundary Condition

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b - V_c = I_b Z_f$$

Solution

$$I_{a0} = 0 \qquad (2.12)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{hV_f}{(2Z_1+Z_f)} \qquad (2.13)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.1.3 การลัดวงจรชนิดสองสายลงดิน (Double Line-to-Ground Fault) การลัดวงจรชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างสายเฟสกับเฟสลงดิน โดยปกติให้เกิดระหว่างเฟส B กับเฟส C ลงดิน (เฟส A เป็นเฟสอ้างอิง) รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดลัดวงจรชนิดสองสายลงดิน รูปที่ 2.12 และ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข่ายวงจรซีเควนซ์ต่าง ๆ

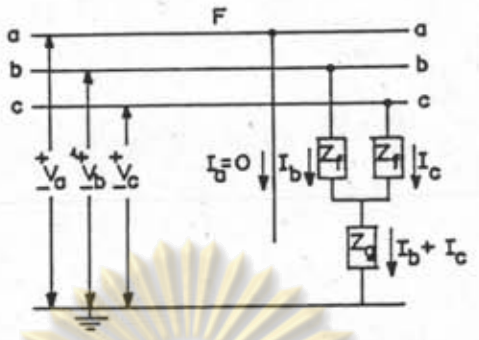
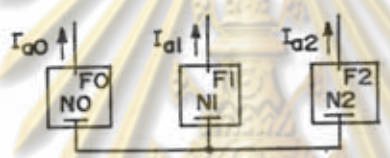


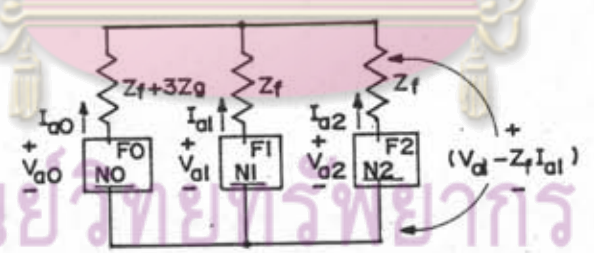
Diagram of a 2LG fault at F

รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแสดงการเกิดลัดวงจรชนิดสองสายลงดิน



Sequence network partial connection specified by the current equation.

รูปที่ 2.12 ข่ายวงจรซีเควนซ์ในส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแส



Sequence network connection for a 2LG fault.

รูปที่ 2.13 ข่ายวงจรซีเควนซ์สำหรับการลัดวงจรชนิดสองสายลงดิน

จากรูปที่ 2.11 - 2.13 สามารถสรุปสมการหลักของการเกิดลัดวงจรชนิดสองสายลงดิน ได้ดังนี้

Boundary Condition

$$I_a = 0$$

$$V_b = (Z_f+Z_g)I_b+Z_gI_c$$

$$V_c = (Z_f+Z_g)I_c+Z_gI_b$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Solution

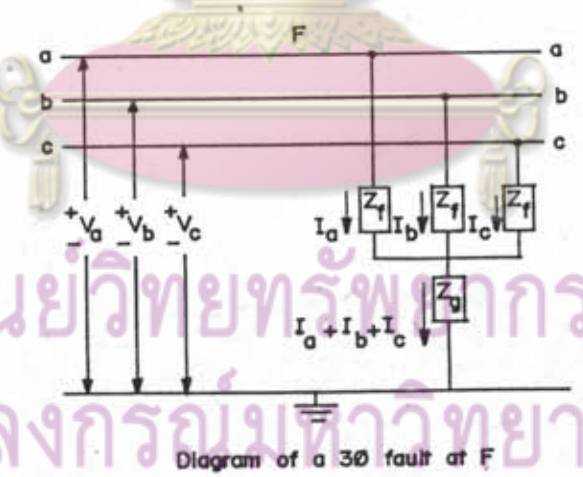
$$I_{a1} = \frac{hV_F}{Z_1+Z_f + \frac{(Z_1+Z_f)(Z_0+Z_f+3Z_g)}{Z_0+Z_1+2Z_f+3Z_g}} \quad (2.14)$$

$$I_{a2} = - \frac{Z_0+Z_f+3Z_g}{Z_0+Z_1+2Z_f+3Z_g} I_{a1} \quad (2.15)$$

$$I_{a0} = - \frac{Z_1+Z_f}{Z_0+Z_1+2Z_f+3Z_g} I_{a1} \quad (2.16)$$

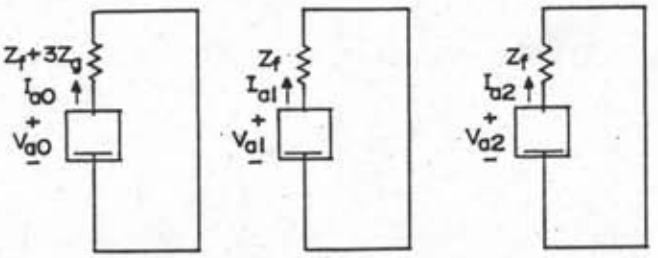
2.3.1.4 การลัดวงจรชนิดสามสาย (Three-Phase Fault)

การลัดวงจรชนิดสามสายลงดิน เป็นการลัดวงจรแบบสมดุลย์ (Balance) โดยทั่วไปเป็นการลัดวงจรที่รุนแรงที่สุดเมื่อเทียบกับการลัดวงจรชนิดอื่น (การลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดินอาจรุนแรงกว่าชนิดสามสายลงดินในกรณีที่ (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีนิวตรอลต่อลงดินโดยตรง หรือมีอิมพีแดนซ์ค่าต่ำ ๆ ต่อระหว่างนิวตรอลลงดิน และ (2) เกิดบนด้านวายกราวนด์ (Y-grounded) ของแบงค์หม้อแปลงชนิดเดลต้า-วายกราวนด์ (D-Y-grounded Transformer banks))[11] การวิเคราะห์การลัดวงจรทั่วไป จำเป็นต้องวิเคราะห์การลัดวงจรชนิดสามสายลงดินเพื่อพิจารณาหาค่า Interrupting Capacity ของเซอร์กิตเบรคเกอร์ รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดลัดวงจรชนิดสามสายลงดิน รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของข่ายวงจรซีเควนซ์



รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมแสดงการเกิดลัดวงจรชนิดสามสาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Sequence network connections for a 3Ø fault.

รูปที่ 2.15 ข่ายวงจรบนแกนซีเควนซ์สำหรับการลัดวงจรชนิดสามสาย

จากรูปที่ 2.14 และ 2.15 สามารถสรุปสมการหลักของการเกิดลัดวงจรชนิดสามสายลงดิน ได้ดังนี้

Boundary Condition

$$V_a = Z_f I_a + Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

$$V_b = Z_f I_b + Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

$$V_c = Z_f I_c + Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

Solution

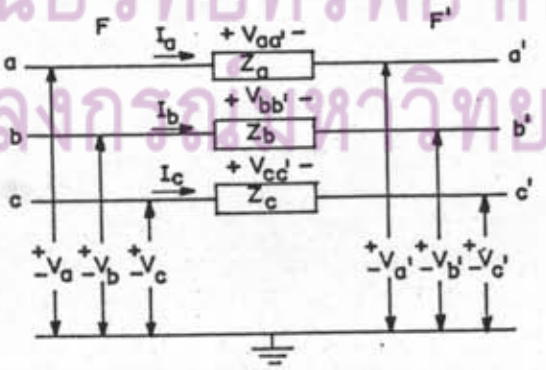
$$I_{a1} = hV_f / (Z_1 + Z_f) \qquad (2.17)$$

$$I_{a2} = I_{a0} = 0 \qquad (2.18)$$

2.3.2 การลัดวงจรแบบอนุกรม (Series Faults)

Series Faults เป็นการลัดวงจรแบบไม่สมดุลย์ (Unbalanced) ภายในสายส่งไม่ยุ่งเกี่ยวกับ Reference Bus ได้แก่ การขาดของสายส่ง (Line-Open) การวิเคราะห์จะใช้ค่าต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในรูปของ Node-to-Node Value และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตตามไดอะแกรม (Circuit Diagram) นอกจากนี้แล้ว ที่ไม่ได้กล่าวรวมไว้อีกแบบหนึ่งของการลัดวงจรแบบไม่สมดุลย์คือ การที่ค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่งในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Circuit diagram for unequal series impedances at F-F'

รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมแสดงค่าอิมพิแดนซ์ของสายส่งในแต่ละเฟสที่ไม่เท่ากัน

2.4 การวิเคราะห์การลัดวงจรที่เกิดบนเฟสอื่น โดยใช้เทคนิคของ Kron (Change In Symmetry)

ในบางกรณีเราอาจจะต้องวิเคราะห์ Unbalance Fault โดยที่เฟส A ไม่ใช่เฟสอ้างอิง ซึ่งมีอยู่อย่างน้อย 2 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีแรกเป็นของ Atabekov โดยใช้พื้นฐานโครงสร้างของ Generalized Fault Diagram วิธีที่สองเป็นของ Kron โดยใช้ทฤษฎีการแปลงเมตริกซ์ (Matrix Transformation) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เฉพาะทฤษฎีการแปลงเมตริกซ์ ซึ่งง่ายและสะดวกในการวิเคราะห์

2.4.1 เมตริกซ์ K

สมมุติเรามีข่ายวงจรไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนสมการของกระแสและแรงดันในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$V = ZI \tag{2.19}$$

โดยที่กระแสในสมการ (2.19) อาจเขียนให้อยู่ในรูปสถานะใหม่ (I') ได้ดังนี้

$$I = KI' \tag{2.20}$$

ซึ่งเมตริกซ์ K เรียกว่า เมตริกซ์เชื่อมต่อระบบ (Connection Matrix) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสในสถานะเดิมเทียบกับกระแสในสถานะใหม่ จากสมการ (2.20) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันในสถานะใหม่ได้ดังนี้

$$V' = Z'I' \tag{2.21}$$

โดยอาศัยหลักการของกำลังไฟฟ้าคงที่ (Power Invarient) จะได้

$$P+jQ = V^{t}I^{*} = V'^{t}I'^{*} \tag{2.22}$$

แทนค่าสมการ (2.20) ลงในสมการ (2.22) จะได้

$$(V^{t}K^{*}-V'^{t})I'^{*} = 0 \tag{2.23}$$

$$V^{t}K^{*}-V'^{t} = 0 \tag{2.24}$$

$$V' = K^{*t}V \tag{2.25}$$

แทนค่าสมการ (2.19), (2.20) ลงในสมการ (2.25) จะได้

$$V' = K^{*t}ZKI' \tag{2.26}$$

ซึ่งจะได้

$$Z' = K^{*t}ZK \tag{2.27}$$

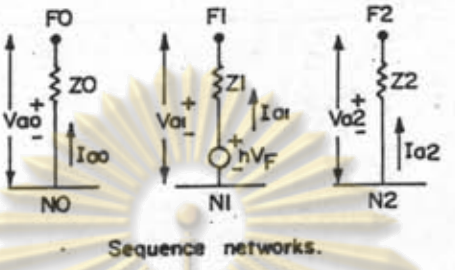
2.4.2 การแปลงการลัดวงจรจากเฟสอื่น (Fault Transformation)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงการนำเทคนิคของ Kron มาหาผลของข่ายวงจรไฟฟ้าที่เกิดลัดวงจร สมมุติว่าข่ายวงจรไฟฟ้าเกิดลัดวงจรที่จุด F และวงจรเทวินินของส่วนประกอบสมมาตรของซีเควนซ์บวก, ลบ, ศูนย์ (Positive ,Negative ,Zero Sequence Thevenin Equivalent)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015739

สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.17



Sequence networks.

รูปที่ 2.17 วงจรซีเควนซ์

กรณีเกิดลัดวงจรขึ้นบนเฟสอื่นที่ไม่ใช่เฟส A เราจะใช้เมตริกซ์ K ในการแปลงค่าต่างๆ จากการเกิดลัดวงจรที่เฟสอื่นมาเป็นค่าที่เฟส A โดยมีเครื่องหมาย "′" หมายถึงค่าที่แปลงมายังเฟส A ตารางที่ 2.2 และ 2.3 เป็นตารางที่สรุปกรณีต่างๆของการเกิดลัดวงจรและค่าเมตริกซ์ K ที่ใช้ในการแปลง โดยที่การลัดวงจรที่จะวิเคราะห์อาจจำแนกได้ดังนี้

1. การลัดวงจรแบบหนึ่งสายลงดิน (Single Line-to-ground Fault ,SLG)
2. การลัดวงจรแบบสองสายลงดิน (Line-to-line-to-ground Fault ,2LG)
3. การลัดวงจรระหว่างสาย (Line-to-line Fault ,LL)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Type Fault	Solution Equation	Symmetrical Phase	Current System	Constraints Sequence	Constraint Matrix K
SLG or two lines open	$I = KI'_{a0}$	a	$I_b = 0$ $I_c = 0$	$I'_{a0} = I_{a1} = I'_{a2}$	$\begin{matrix} & 0' \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 2 & 1 \end{matrix}$
		b	$I_a = 0$ $I_c = 0$	$I_{a0} = a^2 I'_{a1} = aI'_{a2}$	$\begin{matrix} & 0' \\ 0 & 1 \\ 1 & a \\ 2 & a^2 \end{matrix}$
		c	$I_a = 0$ $I_b = 0$	$I'_{a0} = aI'_{a1} = a^2 I'_{a2}$	$\begin{matrix} & 0' \\ 0 & 1 \\ 1 & a^2 \\ 2 & a \end{matrix}$
2LG or one line open	$I = K\begin{bmatrix} I'_{a0} \\ I'_{a1} \end{bmatrix}$	a (b-c fault)	$I_a = 0$	$I'_{a0} + I'_{a1} + I'_{a2} = 0$	$\begin{matrix} & 0' & 1' \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \end{matrix}$
		b (a-c fault)	$I_b = 0$	$I'_{a0} + a^2 I'_{a1} + aI'_{a2} = 0$	$\begin{matrix} & 0' & 1' \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & -a^2 & -a \end{matrix}$
		c (a-b fault)	$I_c = 0$	$I'_{a0} + aI'_{a1} + a^2 I'_{a2} = 0$	$\begin{matrix} & 0' & 1' \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & -a & -a^2 \end{matrix}$
L-L	$I = KI'_{a1}$	...	...	same as 2LG but with $I'_{a0} = 0$	use 2nd column of 2LG results

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ค่าเมตริกซ์ K ในเทอมของ I_{a0} และ I_{a1}

Type Fault	Symmetrical Phase	$V' = K^{*t} hE$	$Z' = K^{*t}\, ZK$ †	k
SLG or two lines open	a	$V'_{00} = hV_F$	$Z = Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_{gg}$	does not apply
	b	$V'_{00} = a^2 hV_F$	same	
	c	$V'_{00} = ahV_F$	same	
2LG or one line open	a (b-c fault)	$\begin{bmatrix} V'_{a0} \\ V'_{a1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ hV_F \end{bmatrix}$	$Z' = \begin{bmatrix} Z_{00} & kZ_{22} \\ k^2 Z_{22} & Z_{11} \end{bmatrix}$	1
	b (a-c fault)	same	change k only	a^2
	c (a-b fault)	same	change k only	a
LL	any	$V'_{a1} = hV_F$	$Z' = Z_{11}$	

*Values for V' and Z' in this table correspond to solution for currents I_{a0} and I_{a1}
†Z' components are defined as $Z_{00} = Z_0 + Z_2 + 3Z_g + 2Z$, $Z_{11} = Z_1 + Z_2 + 2Z$, $Z_{22} = Z_2 + Z$, and $Z_{gg} = Z_g$ (SLG) = Z(2LO)

ตารางที่ 2.3 ค่าแรงดันและอิมพีแดนซ์ที่ถูกแปลงให้สอดคล้องกับเมตริกซ์ K ในตารางที่2.2*

2.4.2.1 ตัวอย่างการหาผลลัพธ์

ก) การเกิดลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดินบนเฟส A จากตาราง 2.2 จะได้

$$K = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และ $I' = I_{a0}'$

จากตาราง 2.3 จะได้ $V' = hV_F$ และ $Z' = Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g$

จากสมการ (2.21) $V' = Z' I'$

จะได้ $hV_F = (Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g) I_{a0}'$

$$I_{a0}' = \frac{hV_F}{Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g} \qquad (2.28)$$

(กรณี $Z_1 = Z_2$) $$I_{a0}' = \frac{hV_F}{Z_0+2Z_1+3Z_g}$$

ซึ่งได้ผลลัพธ์ตรงกับสมการ (2.10)

ส่วนการเกิดลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดินบนเฟส B จะได้ผลลัพธ์ทำนองเดียวกับการเกิดบนเฟส A ยกเว้นค่าซีเควนซ์ จะหมุนไป -120 องศา (หรือ +240 องศา) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวเราสามารถหาได้จากตาราง 2.2 และ 2.3 ข้างต้น

จากตาราง 2.2

$$K = \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix}$$

และจากตาราง 2.3

$$V' = a^2 hV_F \quad , \quad Z' = Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g$$

จากสมการ (2.21)

$$V' = Z'I'$$

จะได้ $a^2 hV_F = (Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g)I_{a0}'$

$$I_{a0}' = \frac{a^2 hV_F}{Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g} \qquad (2.29)$$

จากตาราง 2.2

$$I_{a0}' = a^2 I_{a1}' = aI_{a2}'$$

จะได้ $$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g} \qquad (2.30)$$

$$I_{a2}' = \frac{ahV_F}{Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g} \qquad (2.31)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ในทำนองเดียวกัน การเกิดลัดวงจรชนิดหนึ่งสายลงดินบนเฟส C สามารถหาค่าได้ดังผลลัพธ์ต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$I_{a0}' = \frac{ahV_F}{Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g} \qquad (2.32)$$

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g} \qquad (2.33)$$

$$I_{a2}' = \frac{a2hV_F}{Z_0+Z_1+Z_2+3Z_g} \qquad (2.34)$$

ข) การเกิดลัดวงจรชนิดสองสายลงดิน ระหว่างเฟส B-C จากตาราง 2.2 จะได้

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

และ

$$I = \begin{bmatrix} I_{a0}' \\ I_{a1}' \end{bmatrix}$$

จากตาราง 2.3 จะได้

$$V' = \begin{bmatrix} 0 \\ hV_F \end{bmatrix}$$

และ

$$Z' = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{22} \\ Z_{22} & Z_{11} \end{bmatrix}$$

จากสมการ (2.21) $V' = Z'I'$

จะได้

$$\begin{bmatrix} 0 \\ hV_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{22} \\ Z_{22} & Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0}' \\ I_{a1}' \end{bmatrix} \qquad (2.35)$$

$$I_{a1}' = \frac{\det \begin{bmatrix} Z_{00} & 0 \\ Z_{22} & hV_F \end{bmatrix}}{\det Z'} = \frac{Z_{00} hV_F}{Z_{00}Z_{11} - Z_{22}^2}$$

จากตาราง 2.3 $Z_{00} = Z_0+Z_2+3Z_g+2Z$

$Z_{11} = Z_1+Z_2+2Z$

$Z_{22} = Z_2+Z$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้ $$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_{11}-Z_{22}^2/Z_{oo}}$$

$$= \frac{hV_F}{(Z_1+Z_2+2z)-Z_{22}^2/(Z_o+Z_2+3z_g+2z)}$$

ถ้า $z = z_g = 0$ จะได้

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_1+Z_oZ_2/(Z_o+Z_2)} \qquad (2.36)$$

จากสมการ (2.35) จะได้

$$I_{ao}' = -\frac{Z_{22}hV_F}{Z_{oo}Z_{11}-Z_{22}^2}$$

$$= -\frac{hV_F}{Z_{oo}Z_{11}/Z_{22}-Z_{22}^2}$$

สมมุติ $z = z_g = 0$ จะได้

$$I_{ao}' = -\frac{hV_F}{(Z_o+Z_2)(Z_1+Z_2)-Z_2^2/Z_2}$$

$$= -\frac{hV_F}{(Z_o+Z_1)+Z_oZ_1/Z_2} \qquad (2.37)$$

จากตาราง 2.2

$$I_{ao}'+I_{a1}'+I_{a2}' = 0$$

จะได้ $$I_{a2}' = -I_{ao}'-I_{a1}'$$

$$= \frac{hV_F}{(Z_o+Z_1)+Z_oZ_1/Z_2} - \frac{hV_F}{Z_1+Z_oZ_2/(Z_o+Z_2)}$$

$$= \frac{(-Z_o-Z_2+Z_2)hV_F}{Z_oZ_1+Z_oZ_2+Z_1Z_2}$$

$$= -\frac{Z_ohV_F}{Z_oZ_1+Z_oZ_2+Z_1Z_2}$$

$$= -\frac{hV_F}{(Z_1+Z_2)+Z_1Z_2/Z_o} \qquad (2.38)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในทำนองเดียวกันการเกิดลัดวงจรชนิดสองสายดินระหว่างเฟส A-C และ A-B สามารถหาค่าได้ตังวิธีข้างต้น สรุปได้ดังนี้

ระหว่างเฟส A-C

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_1+Z_0Z_2/(Z_0+Z_2)} \quad (2.39)$$

$$I_{a0}' = -\frac{a^2hV_F}{(Z_0+Z_1)+Z_0Z_1/Z_2} \quad (2.40)$$

$$I_{a2}' = -a^2I_{a0}'-I_{a1}' \quad (2.41)$$

ระหว่างเฟส A-B

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_1+Z_0Z_2/(Z_0+Z_2)} \quad (2.42)$$

$$I_{a0}' = -\frac{ahV_F}{(Z_0+Z_1)+Z_0Z_1/Z_2} \quad (2.43)$$

$$I_{a2}' = -aI_{a0}'-I_{a1}' \quad (2.44)$$

ค) การเกิดลัดวงจรชนิดสองสาย ระหว่างเฟส B-C จากตาราง 2.2 จะได้

$$K = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร

และ $I = K\,I_{a1}'$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตาราง 2.3 จะได้

$V_{a1}' = hV_F$

และ $Z' = Z_{11}$

จากสมการ (2.21) $V' = Z'I'$

จะได้ $hV_F = Z_{11}I_{a1}'$

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_1+Z_2+2z}$$

ถ้าได้ z = 0 จะได้

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_1+Z_2} \quad (2.45)$$

จากตาราง 2.2 $I_{a1}' + I_{a2}' = 0$

จะได้ $$I_{a2}' = -\frac{hV_F}{Z_1+Z_2} \quad (2.46)$$

$$I_{ao}' = 0 \quad (2.47)$$

ในทำนองเดียวกันการเกิดลัดวงจรชนิดสองสาย ระหว่างเฟส A-C และ A-B สามารถหาค่าได้ดังวิธีข้างต้น สรุปได้ดังนี้

ระหว่างเฟส A-C

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_1+Z_2} \quad (2.48)$$

$$I_{a2}' = -\frac{ahV_F}{Z_1+Z_2} \quad (2.49)$$

$$I_{ao}' = 0 \quad (2.50)$$

ระหว่างเฟส A-B

$$I_{a1}' = \frac{hV_F}{Z_1+Z_2} \quad (2.51)$$

$$I_{a}2' = -\frac{a^2hV_F}{Z_1+Z_2} \quad (2.52)$$

$$I_{ao}' = 0 \quad (2.53)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย