หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวิเคราะห์ความผิดพร่องลงดิน
ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำเทียบกับการต่อลงดินโดยตรง

การวิเคราะห์ความผิดพร่องลงดินในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นสามารถทำได้ตามหลักการของส่วนประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) โดยความผิดพร่องลงดินที่วิเคราะห์ได้แก่

- ความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดิน (Single Line-to-ground Fault)
- ความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดิน (Double Line-to-ground Fault)

สำหรับระบบต่อลงดินแบบความต้านทานค่าต่ำและการต่อลงดินโดยตรงเป็นระบบที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วงจรส่วนประกอบสมมาตรที่เหมือนกัน จะต่างกันก็เพียงส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ซึ่งเป็นไปตามค่าความต้านทานที่ใช้ในการต่อลงดิน นอกจากนี้ตามมาตรฐานการแบ่งประเภทของการต่อลงดินของ IEEE ยังทำการแบ่งประเภทการต่อลงดินตามอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Z_0) ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวก(Z_1) ด้วย ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมที่ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบที่สนใจในรูปอัตราส่วนดังกล่าว

3.1 ค่า Impedance ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง

อิมพีแดนซ์ลำดับลบ (Z_2)

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) และ *สายส่ง (Transmission Line)* มีค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบเท่ากับอิมพีแดนซ์ลำดับบวก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) จะพิจารณาให้เป็นค่าเดียวกับรีแอคแทนซ์ชั่วแวบ (Subtransient Reactance, $X_d^{"}$) ซึ่งจะถูกต้องสำหรับเครื่องจักรกลตัวหมุนทรงกระบอก (Cylindrical Rotor Machine) แต่จะมีค่าแตกต่างเล็กน้อยสำหรับเครื่องจักรกลขั้วยื่น (Salient Pole Machine) คือ X_2 จะมีค่าในช่วง 1 - 1.4 เท่าของ $X_d^{"}$ โดยประมาณ ในทางปฏิบัติจะพิจารณาให้ $X_2 = X_d^{"}$ ที่ขณะเกิดความผิดพร่องสำหรับเครื่องจักรทั้งสอง

อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (Z_0)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีค่า X_0 ต่ำ ในทางปฏิบัติจะพิจารณาให้ X_0 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส(Synchronous Generator) เป็นหนึ่งในสามของรีแอคแทนซ์ชั่วครู่(Transient Reactance,X_d)

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง Z_0 จะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อลงดิน แต่มีค่าเท่ากับ Z_1 เมื่อการต่อของหม้อแปลงนั้นสามารถให้กระแส I_0 ผ่านลงดินได้

สายส่ง จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างรวมถึงความต้านทานของดินและระยะห่างของการวางสาย โดยปกติแล้ว $\frac{Z_0}{Z_1}$ จะมีค่าประมาณ 2.5-4.5 นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความแตกต่างระหว่าง $\frac{Z_0}{Z_1}$ ด้วย

อิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Z_1)

ค่า X_1 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดความผิดพร่อง เมื่อ Automatic Voltage Regulators (AVR) ไม่ทำงาน โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่รีแอคแทนซ์ชั่วแวบ ($X_d^{''}$) ตั้งแต่ช่วง 2-3 วินาทีแรกเริ่มจากเกิดความผิดพร่อง

จากคุณสมบัติของค่าอิมพีแดนซ์ต่างๆของระบบนั้นสามารถนำมาสรุปสำหรับการวิเคราะห์การต่อลงดินในรูปแบบต่างๆในรูปของ

$$K_2 = \frac{Z_2}{Z_1} \tag{3.1}$$

และ $$K_0 = \frac{Z_0}{Z_1} \tag{3.2}$$

เนื่องจาก K_2 เป็นค่าอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับลบต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวก ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับส่วนต่อลงดินดังนั้นค่า K_2 จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามวิธีการต่อลงดิน โดยปกติให้มีค่าเท่ากับ 1

ในบางกรณีอาจมีค่า K_2 อาจสูงถึง 1.4 ได้สำหรับกรณีเมื่อเกิดความผิดพร่องใกล้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเนื่องมาจากผลของค่า Subtransient Reactance ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่าค่ารีแอคแทนซ์ในภาวะปกติ ซึ่งเมื่อเกิดความผิดพร่องใกล้แหล่งกำเนิด ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจะลดน้อยลงทำให้ผลจาก Subtransient Reactance นี้มีมากจึงทำให้ค่า K_2 สูงขึ้นได้

K_0 เป็นค่าอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับสิ่งต่างๆดังนี้

- วิธีการต่อลงดินที่ต่างกัน
- ความสัมพันธ์ของค่ารีแอคแทนซ์ของหม้อแปลงและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- ปริมาณของหม้อแปลงระหว่างแหล่งกำเนิดและจุดที่เกิดความผิดพร่อง

สำหรับวิธีการต่อลงดินที่แตกต่างกันทำให้ค่าของ K_0 สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ K_0 ค่าอนันต์สำหรับระบบที่ไม่ต่อลงดินถึง K_0 อยู่ในช่วง 0.2 สำหรับระบบต่อลงดินโดยตรงที่ความผิดพร่องเกิดใกล้แหล่งกำเนิดมากๆ

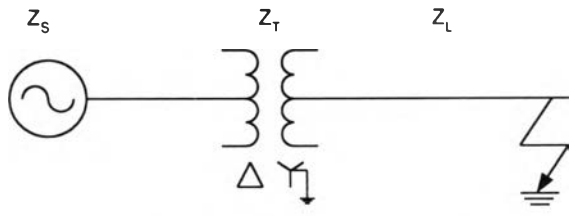
3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆในระบบต่อลงดิน

เมื่อทำการเปลี่ยนระบบการต่อลงดินจะมีผลกระทบต่อกระแสและแรงดัน ณ จุดต่างๆในระบบ เมื่อทำการเปรียบระบบการต่อลงดินจะทำการพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

- กระแสผิดพร่อง (Fault Current)
- แรงดันผิดพร่อง (Phase Fault Voltage) และแรงดันเฟสไม่ผิดพร่อง (Sound Phase Fault)
- ค่าแรงดันและกระแสตกค้าง (Residual Voltage and Residual Current)
- แรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Overvoltage)
- แรงดันตก (Voltage Dip)

3.2.1 กระแสผิดพร่องลงดิน (Ground Fault Current)

วงจรที่นำมาทำการวิเคราะห์จะเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ซึ่งถูกแยกวงจรลำดับศูนย์ออกด้วยหม้อแปลงแบบเดลตา-วาย-กราวน์ ซึ่งมีการต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ค่าต่างๆกัน และเป็นส่วนควบคุมระบบต่อลงดินของระบบที่อยู่หลังหม้อแปลงเป็นต้นไปดังรูปที่ 3.1



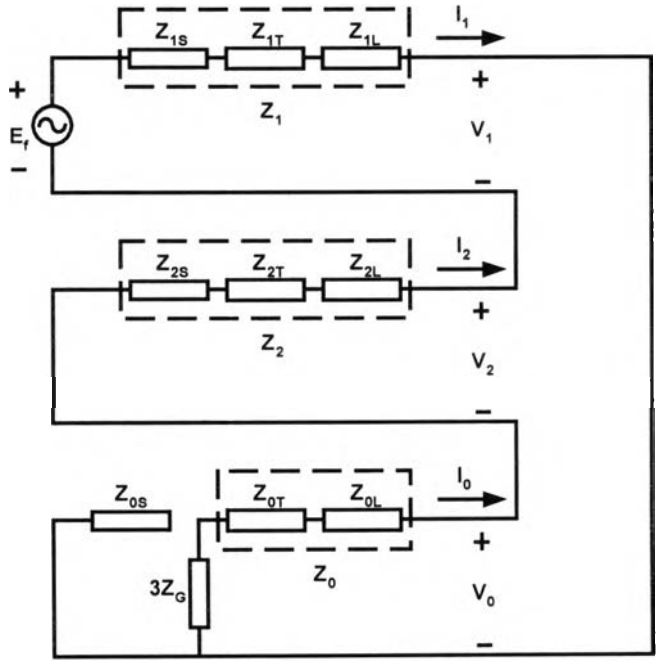
รูปที่ 3.1 วงจรที่ทำการวิเคราะห์

- *ความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดิน*

จาก $$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_G} \quad (3.3)$$

สามารถนำมาหาค่ากระแสได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลสำหรับความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดิน

เมื่อสมมุติว่าเกิดความผิดพร่องที่เฟส A สามารถหาค่ากระแสผิดพร่องได้ดังนี้

ดังนั้น $$I_F = I_0 + I_1 + I_2 \quad (3.5)$$

$$= \frac{3E_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_G} \quad (3.6)$$

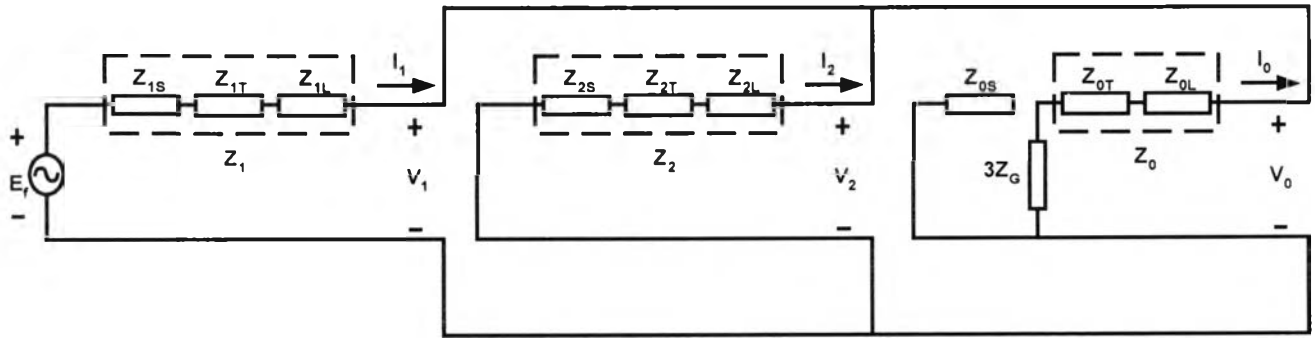
สามารถจัดให้อยู่ในรูปของ K_0 และ K_2 ได้ดังนี้

$$I_F = \frac{E_f}{Z_1} \frac{3}{1 + K_2 + K_0} \tag{3.7}$$

เมื่อให้ค่า $K_2 = 1$

$$I_F = \frac{E_f}{Z_1} \frac{3}{2 + K_0} \tag{3.8}$$

- *ความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดิน*



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลสำหรับความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดิน

$$I_1 = \frac{E_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \tag{3.9}$$

$$= \frac{E_f}{Z_1 (1 + \frac{K_2 K_0}{K_2 + K_0})} \tag{3.10}$$

$$= \frac{E_f (K_2 + K_0)}{Z_1 (K_2 + K_0 + K_2 K_0)} \tag{3.11}$$

$$I_2 = \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} I_1 \tag{3.12}$$

$$= - \frac{E_f K_0}{Z_1(K_2 + K_0 + K_2 K_0)} \tag{3.13}$$

$$I_0 = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} I_1 \tag{3.14}$$

$$= - \frac{E_f K_2}{Z_1(K_2 + K_0 + K_2 K_0)} \tag{3.15}$$

เมื่อให้ค่า $K_2 = 1$

$$I_1 = \frac{E_f (1 + K_0)}{Z_1(1 + 2K_0)} \tag{3.16}$$

$$I_2 = - \frac{E_f K_0}{Z_1(1 + 2K_0)} \tag{3.17}$$

$$I_0 = - \frac{E_f}{Z_1(1 + 2K_0)} \tag{3.18}$$

ค่ากระแสผิดพร่องอาจจัดให้อยู่ในรูปความผิดพร่องแบบ 3 เฟส (Three Phase Fault)

เนื่องจาก $$I_{3\phi Fault} = \frac{E_f}{Z_1} \tag{3.19}$$

สามารถหากระแสผิดพร่องของความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดินจากสมการที่ (3.4) ได้ ดังนี้

$$I_b = \frac{K_2(a^2 - 1) + K_0(a^2 - a)}{(K_2 + K_0 + K_2 K_0)} I_{3\phi} \tag{3.20}$$

$$I_b = \frac{K_2(a - 1) + K_0(a - a^2)}{(K_2 + K_0 + K_2 K_0)} I_{3\phi} \tag{3.21}$$

$$I_F = I_b + I_c \tag{3.22}$$

$$= \frac{-3K_2}{(K_2 + K_0 + K_2 K_0)} I_{3\phi} \tag{3.23}$$

3.2.2 แรงดันผิดพร่อง (Phase Fault Voltage) และแรงดันเฟสไม่ผิดพร่อง (Sound Phase Fault Voltage)

สามารถหาค่าแรงดันได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

เขียนในรูปของแรงดันแต่ละเฟสได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

สามารถเขียนสามารถสัมพันธ์ของแรงดันในรูปของค่า K_2 และ K_0 ได้ดังนี้

$$V_1 = E_f - I_1 Z_1 \tag{3.26}$$

$$V_2 = -I_2 Z_2 = -I_2 K_2 Z_1 \tag{3.27}$$

$$V_0 = -I_0 Z_0 = -I_0 K_0 Z_1 \tag{3.28}$$

- *ความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดิน*

1. แรงดันเฟสผิดพร่อง

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 0 \tag{3.29}$$

สำหรับกรณีที่ละเลยความต้านทานขณะเกิดความผิดพร่อง

2. แรงดันเฟสไม่ได้ผิดพร่องเฟส B

$$V_b = V_0+a^2V_1+aV_2 \quad (3.30)$$

$$= -I_0K_0Z_1 + a^2(E_f - I_1Z_1) - a(I_2K_2Z_1) \quad (3.31)$$

$$= a^2E_f - (K_0 + a^2 + aK_2)I_1Z_1 \quad (3.32)$$

$$= a^2E_f - \frac{a^2 + aK_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0}E_f \quad (3.33)$$

เมื่อให้ค่า $K_2 = 1$ และ $E_f = 1$ pu

$$V_b = a^2 - \frac{a^2 + a + K_0}{2 + K_0} \quad (3.34)$$

$$= \frac{(a^2 - a) + (a^2 - 1)K_0}{2 + K_0} \quad (3.35)$$

3. แรงดันเฟสไม่ได้ผิดพร่องเฟส C

$$V_c = V_0+aV_1+a^2V_2 \quad (3.36)$$

$$= -I_0K_0Z_1 + a(E_f - I_1Z_1) - a^2(I_2K_2Z_1) \quad (3.37)$$

$$= aE_f - (K_0 + a + a^2K_2)I_1Z_1 \quad (3.38)$$

$$= aE_f - \frac{a + a^2K_2 + K_0}{1 + K_2 + K_0}E_f \quad (3.39)$$

เมื่อให้ค่า $K_2 = 1$ และ $E_f = 1$ pu

$$V_c = a - \frac{a + a^2 + K_0}{2 + K_0} \quad (3.40)$$

$$= \frac{(a - a^2) + (a - 1)K_0}{2 + K_0} \quad (3.41)$$

- *ความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดิน*

1. แรงดันเฟสผิดพร่อง

$$V_b = V_c = 0 \tag{3.42}$$

สำหรับกรณีที่ละเลยความต้านทานขณะเกิดความผิดพร่อง

2. แรงดันในเฟสไม่ผิดพร่องเฟส A

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \tag{3.43}$$

$$= -I_0K_0Z_1 + (E_f - I_1Z_1) - I_2K_2Z_1 \tag{3.44}$$

$$= E_f - \frac{K_2 + K_0 - 2K_2K_0}{K_2 + K_0 + K_2K_0} E_f \tag{3.45}$$

$$= \frac{3K_2K_0}{K_2 + K_0 + K_2K_0} E_f I \tag{3.46}$$

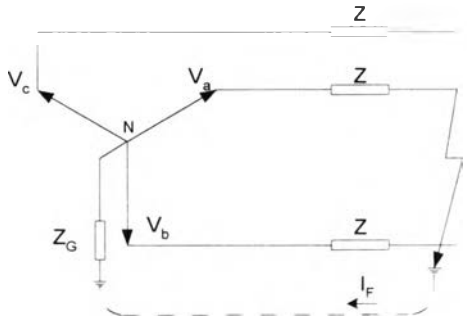
เมื่อให้ค่า $K_2 = 1$ และ $E_f = 1$ pu

$$V_a = \frac{3K_0}{1 + 2K_0} \tag{3.47}$$

3.2.3 แรงดันตกค้าง (Residual Voltage)

แรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างนิวทรอลและกราวน์ระหว่างเกิดความผิดพร่องพิจารณาดังรูป เป็นค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากกระแสผิดพร่อง (I_F) ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดิน (Z_N) เมื่อสมมุติให้ค่าอิมพีแดนซ์มีมุมค่าเดียวกันหมด จุดกราวน์จะอยู่บนเวกเตอร์ V_{aN} และค่าแรงดัน V_{NG} จะเป็นอัตราส่วนของ Z_G และ Z

ดังนั้น $V_{NG} = -I_FZ_G = -V_{aN}\frac{Z_G}{Z_G + Z}$ (3.48)



รูปที่ 3.4 วงจรแรงดันระหว่างนิวทรอลและกราวน์

แรงดันตกค้าง ($3V_0$) คือค่าผลความของแรงดันเฟสลงดินของทุกเฟส

$$V_{res} = 3V_0 = V_{aG} + V_{bG} + V_{cG} \quad (3.49)$$

จากรูป

$$V_{aG} = V_{aG} + V_{NG} \quad (3.50)$$

$$V_{bG} = V_{bG} + V_{NG} \quad (3.51)$$

$$V_{cG} = V_{cG} + V_{NG} \quad (3.52)$$

ดังนั้น

$$V_{aG} + V_{bG} + V_{cG} = V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} + 3V_{NG} \quad (3.53)$$

เนื่องจาก

$$V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 0 \quad (3.54)$$

$$3V_{NG} = V_{aG} + V_{bG} + V_{cG} \quad (3.55)$$

$$= 3V_0 \quad (3.56)$$

ดังนั้นค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างนิวทรอลและกราวน์นั้นจะมีค่าเดียวกับค่าแรงดันลำดับศูนย์ของระบบดังนี้

$$V_{res} = 3V_0 = 3V_{NG} \quad (3.57)$$

3.2.4 กระแสตกค้าง (Residual Current)

ค่ากระแสตกค้าง คือ ผลรวมของค่ากระแสในทุกเฟสดังนี้

$$I_{res} = I_a + I_b + I_c = 3I_0 \quad (3.58)$$

ค่ากระแสตกค้างจะขึ้นกับค่ากระแสลำดับศูนย์เพียงอย่างเดียว ซึ่งค่ากระแสตกค้างจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินดังนั้นจึงเป็นวิธีที่ดีในการตรวจจับความผิดพร่องลงดิน

เมื่อระบบมีการต่อลงดินโดยตรง ค่ากระแสตกค้างของระบบจะมีค่ามากและมีค่าเพียงพอสำหรับการวัดโดยสามารถให้หม้อแปลงวัดกระแสแบบ Ring Type

เมื่อระบบเป็นแบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน กระแสตกค้างจะถูกจำกัดให้อยู่ในขนาดของค่ากระแสโหลดเต็มพิกัด (Full Load Current) และสามารถใช้การวัดโดยหม้อแปลงกระแสแบบ Ring Type ได้เช่นกัน

ในระบบที่มีการต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ค่าสูง ค่ากระแสตกค้างจะมีค่าน้อยมากควรใช้หม้อแปลงวัดกระแสแบบ Core Type หรือหม้อแปลงวัดกระแสแบบ Ring Type ที่มีความถูกต้องสูงมากๆ

สำหรับระบบที่ไม่มีการต่อลงดินหรือระบบต่อลงดินแบบเรโซแนนซ์ ค่ากระแสบนเฟสที่เกิดความผิดพร่องและไม่เกิดความผิดพร่องนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงจากเดิมน้อยมาก ดังนั้นจึงควรใช้ รีเลย์แบบมีทิศทาง (Directional Relay) โดยมีการจำแนกขั้ว (Polarised) แรงดันจากค่าแรงดันตกค้างเพื่อแยกความแตกต่างของสายที่เกิดความผิดพร่องและไม่เกิดความผิดพร่องออกจากกัน

จากสมการที่แสดงในหัวข้อ 3.2.1-3.2.4 นั้น สามารถสรุปหาค่าแระแสผิดพร่องและแรงดันผิดพร่องของแต่ละเฟส เมื่อให้ความผิดพร่องเกิดขึ้นที่เฟส A รวมถึงค่าแรงดันตกค้างและค่ากระแสตกค้างในรูปตัวประกอบ K_0 และ K_2 ได้ดังตารางที่ 3.1 และเมื่อสมมุติให้ค่า $K_2 = 1\angle 0°$ คงที่ตลอดจะได้ค่ากระแสผิดพร่อง แรงดันผิดพร่อง ค่าแรงดันตกค้าง และค่ากระแสตกค้างดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อเกิดความผิดพร่องลงดิน

ค่าพารามิเตอร์	*Single Line-to-ground Fault*	*Double Line-to-ground Fault*
I_a	$\frac{3}{1+K_2+K_0} I_{3\phi}$	0
I_b	0	$\frac{K_2(a^2-1)+K_0(a^2-a)}{(K_2+K_0+K_2K_0)} I_{3\phi}$
I_c	0	$\frac{K_2(a-1)+K_0(a-a^2)}{(K_2+K_0+K_2K_0)} I_{3\phi}$
I_{res}	$\frac{3}{1+K_2+K_0} I_{3\phi}$	$\frac{-3K_2}{(K_2+K_0+K_2K_0)} I_{3\phi}$
V_a	0	$\frac{3K_2K_0}{K_2+K_0+K_2K_0} E_f$
V_b	$a^2E_f - \frac{a^2+aK_2+K_0}{1+K_2+K_0} E_f$	0
V_c	$aE_f - \frac{a+a^2K_2+K_0}{1+K_2+K_0} E_f$	0
V_{ab}	$-V_b$	V_a
V_{bc}	$E_{bc} - \frac{K_2-1}{1+K_2+K_0} E_{bc}$	0
V_{ca}	V_c	V_a
V_{res}	$\frac{-3K_0}{1+K_2+K_0} E_a$	V_a

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อเกิดความผิดพร่องลงดิน

เมื่อให้ค่า $K_2 = 1\angle 0^\circ$

ค่าพารามิเตอร์	*Single Line-to-ground Fault*	*Double Line-to-ground Fault*
I_a	$\frac{3}{2+K_0} I_{3\phi}$	0
I_b	0	$\frac{(a^2-1)+K_0(a^2-a)}{(1+2K_0)} I_{3\phi}$
I_c	0	$\frac{(a-1)+K_0(a-a^2)}{(1+2K_0)} I_{3\phi}$
I_{res}	$\frac{3}{2+K_0} I_{3\phi}$	$\frac{-3}{(1+2K_0)} I_{3\phi}$
V_a	0	$\frac{3K_0}{1+2K_0} E_f$
V_b	$a^2 E_f - \frac{a^2+a+K_0}{2+K_0} E_f$	0
V_c	$aE_f - \frac{a+a^2+K_0}{2+K_0} E_f$	0
V_{ab}	$-V_b$	V_a
V_{bc}	E_{bc}	0
V_{ca}	V_c	V_a
V_{res}	$\frac{-3K_0}{2+K_0} E_a$	V_a

3.2.5 แรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Overvoltage)

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อมีการต่อความต้านทานที่พิจารณาผ่านลงดิน ซึ่งจุดประสงค์ส่วนใหญ่เพื่อลดขนาดกระแสผิดพร่อง ให้เกิดความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นน้อยลง โดยปกติจะมีการจำกัดค่ากระแสผิดพร่องดังนี้

ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานต่อลงดินที่ใช้ในระดับแรงดันต่างๆ

ระดับแรงดัน (kV)	ค่ากระแสที่จำกัด (A)	ค่าความต้านทานที่ใช้ (Ω)
13.8	2000 - 200	4 - 40
12	2000 - 200	3.5 - 35
24	2000 - 200	7 - 70
22	2000 - 200	6.5 - 65
33	2000 - 200	9.5 - 95

ค่าความต้านทานที่ทำการต่อลงดินนี้จะมีผลกระทบต่อค่ากระแสในวงจรลำดับศูนย์เท่านั้น โดยผลของความต้านทานในวงจรลำดับศูนย์จะมีค่า 3R (สามเท่าของค่าความต้านทานต่อลงดิน) ต่ออนุกรมกับค่ารีแอคแทนซ์ในระบบ

สำหรับการวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วครู่ของระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนี้ จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

- การหน่วงของความต้านทานในวงจรเรโซแนนซ์ (Damping in Resonant Circuit)
- ค่าแรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Overvoltage)

1. การหน่วงของความต้านทานในวงจรเรโซแนนซ์

เมื่อพิจารณาวงจรทางไฟฟ้ากำลัง พบว่าการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ในการต่อลงดินนั้นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของวงจรลำดับศูนย์เปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาในส่วนของวงจรลำดับศูนย์พบว่าอยู่ในลักษณะของวงจรอนุกรม จากทฤษฎีการหน่วงในวงจรเรโซแนนซ์ สำหรับวงจรอนุกรมมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{Z_0} = R\sqrt{\frac{C_0}{L}} \qquad (3.59)$$

โดย λ คือค่าคงที่ในวงจรเรโซแนนซ์

R คือค่าความต้านทานในวงจร

Z_0 คือค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของระบบ

เมื่อ $\lambda > \frac{1}{2}$ หรือ $R < Z_0$ Under-damped

$\lambda = \frac{1}{2}$ หรือ $R = Z_0$ Critically Damped

$\lambda < \frac{1}{2}$ หรือ $R > Z_0$ Over-damped

สำหรับระบบ 13.8 kV ค่า L มีค่า 1 mH และ C มีค่า 5 μF

ดังนั้น $$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} = 14.1\ \Omega$$

สำหรับระบบ 13.8 kV

$$3R_N > 2Z_0 \quad \text{หรือ} \quad R_N \geq 9.4\ \Omega$$

ดังนั้นเมื่อ R_N ซึ่งเป็นค่าความต้านทานต่อลงดินมีค่ามากกว่า 9.4 Ω แล้วจะไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation) ขึ้นในวงจรลำดับศูนย์

ในระดับแรงดันอื่นๆนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ในทำนองเดียวกัน โดยค่า L และ C_0 สามารถคำนวณได้ตามรายละเอียดใน [8] , [13]

I19237700X

2. ค่าแรงดันเกินชั่วครู่

แรงดันเกินชั่วครู่นั้นสามารถเกิดได้ด้วยเหตุผลต่างๆกันเช่น แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Surge) แรงดันเกินสวิตซ์ชิ่ง (Switching Surge) แรงดันเกินจากความผิดพร่องลงดินแบบอาร์ค (Arcing Ground Fault)

แรงดันเกินฟ้าผ่าเป็นแรงดันเกินที่มีค่าสูงสุดในทุกประเภทของแรงดันเกิน ซึ่งขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่านั้นไม่ขึ้นกับขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าหรือชนิดของการต่อลงดิน ดังนั้นแรงดันเกินฟ้าผ่าจึงต้องป้องกันโดยกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arrester)

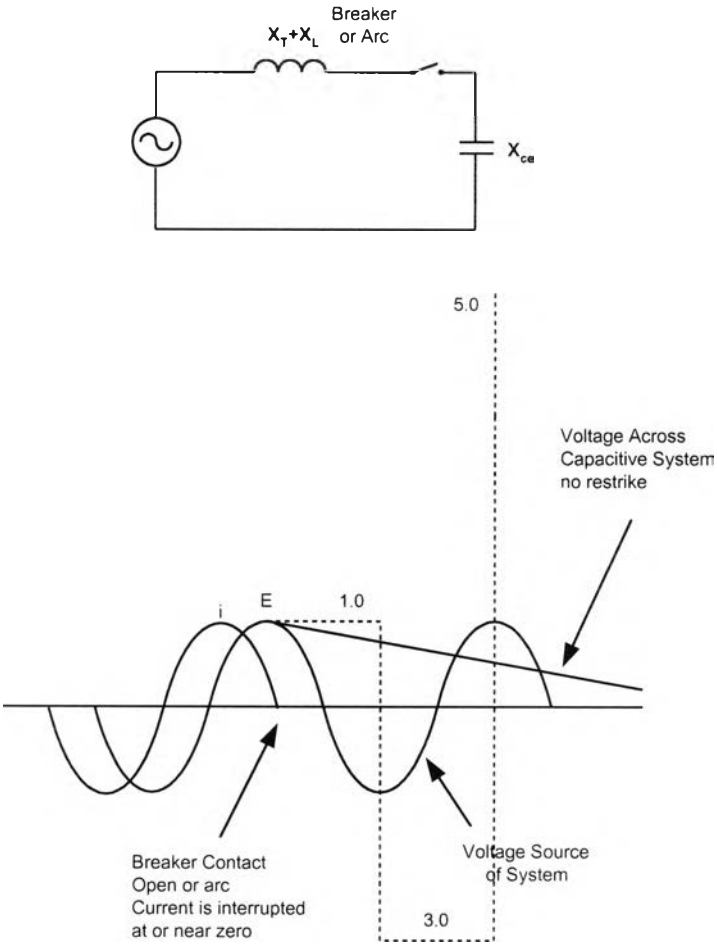
ส่วนการเกิดแรงดันเกินสวิตซ์ชิ่ง และแรงดันเกินจากการเกิดอาร์คนั้น ในทางทฤษฎีสามารถทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วครู่ค่าสูงได้ ซึ่งปกติจะเกิดกับระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน หรือระบบต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ค่าสูง แต่ในทางปฏิบัตินั้นค่าแรงดันเกินเหล่านั้นมักจะมีค่าน้อยกว่าที่คาดหมายไว้เสมอ อย่างไรก็ตามยังสามารถลดค่าแรงดันเกินนี้จากการใช้การต่อลงดินแบบเรโซแนนซ์ การต่อลงดินโดยตรง และการต่อลงดินผ่านความต้านทานได้

ในระบบที่ไม่มีการต่อลงดินและระบบต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ค่าสูงนั้นการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่นั้นมักจะมาจากการตัดวงจรและการเกิด Restrike ซึ่งโดยมากจะเกิดที่กระแสค่าต่ำซึ่งปกติจะไม่เกิน 10 A กลไกในการเกิดแรงดันเกินนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 นั้น ระบบที่ไม่มีการต่อลงดินจะมีเฟสของกระแสนำเฟสของแรงดันอยู่ 90° เมื่อเกิดการดัดวงจรที่กระแสเป็นศูนย์ทำให้ค่าแรงดันในขณะตัดวงจรนั้นมีค่าสูงที่สุด คือ มีค่า 1 pu. แรงดันนี้จะเก็บอยู่ในค่าตัวเก็บประจุลงดินของระบบไฟฟ้าแล้วค่อยลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากค่าความต้านทานลงดินค่าสูงในวงจรลำดับศูนย์และภายในครึ่งไซเคิลจะทำให้เกิดแรงดันเป็น 2 เท่าของค่ายอดแรงดันระบบคร่อมจุดดัดวงจรนั้นถ้าเกิดการ Restrike ขึ้นในขณะนั้นจะทำให้เกิดแรงดันเพิ่มเป็น 3 pu. และ 5 pu. เมื่อเกิด Restrikeอีก ในครึ่งไซเคิลถัดไป [14]

การเกิดแรงดันเกินดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าระบบที่ไม่มีการต่อลงดินมีความน่าจะเป็นในการเกิดแรงดันเกินสูงเนื่องจากเหตุผลดังนี้

1. เฟสของกระแสนำเฟสของแรงดันอยู่ 90° ทำให้เมื่อเกิดการตัดวงจรจะทำให้เกิดค่าแรงดันสูงในช่วงการดัดวงจรนั้น

2. ค่าความต้านทานในระบบที่ไม่มีการต่อลงดินและระบบที่มีการต่อลงดินแบบอิมพีแดนซ์ค่าสูงนั้นมีค่ามากทำให้ค่าคงที่เวลา (Time Constant) ในวงจรลำดับศูนย์ ของระบบนั้นมีค่ามากด้วย เมื่อเกิดการ Restrike ขึ้นจะทำให้แรงดันเกินมีค่าสูง



รูปที่ 3.5 การเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ในระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน

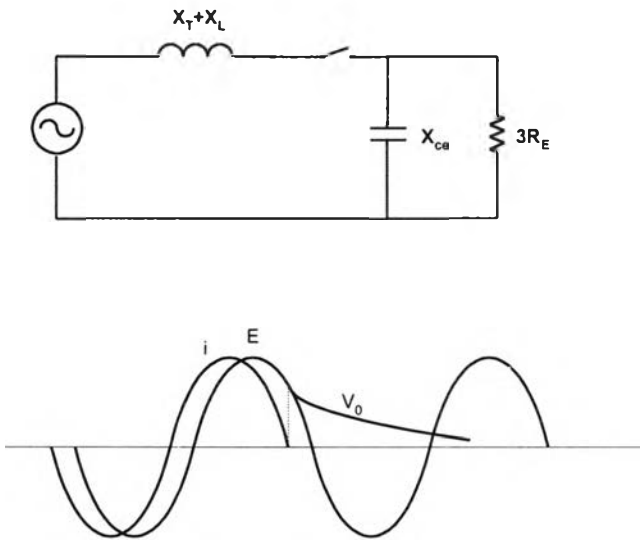
โดยค่า X_T และ X_L คือค่ารีแอคแทนซ์ของหม้อแปลงและสายส่งในระบบจำหน่าย

ค่า X_{cc} คือค่ารีแอคแทนซ์ของตัวเก็บประจุลงดินในระบบจำหน่ายนั้น

จากความน่าจะเป็นที่สูงสุดในการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ซึ่งเกิดในระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน พบว่าเมื่อมีการต่อความต้านทานลงดินค่าต่ำนั้นจะช่วยลดผลการเกิดแรงดันเกินดังนี้

1. ค่าความต้านทานจะช่วยลดความน่าจะเป็นในการเกิดแรงดันเกินเนื่องจากความแตกต่างระบบเฟสกระแสและแรงดันไม่เป็น 90° ทำให้เฟสที่เลื่อนออกไป และเมื่อมีการดัดวงจรค่าแรงดันเมื่อตัดวงจรจึงลดลง

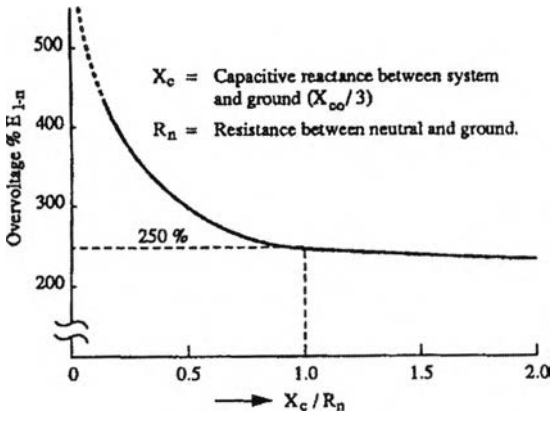
2. ค่าความต้านทานต่อลงดินค่าต่ำนี้จะหน่วง(Damp)ให้ค่าแรงดันเกินนั้นลดลงไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ความน่าจะเป็นในการเกิด Restrike นั้นลดลง หรือเมื่อเกิดการ Restrike แรงดันเกินที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อยกว่าระบบที่ไม่ต่อลงดินหรือระบบต่อลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ค่าสูง



รูปที่ 3.6 การเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ของระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน

มาตรฐานในการกำหนดค่าแรงดันเกินชั่วครู่สำหรับระบบต่อลงดินต่างๆนั้นเป็นไปตามตารางที่ 2.2 เมื่อระบบมีอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่ออิมพีแดนซ์ลำดับบวกอยู่ในช่วงที่กำหนด

พบว่าสำหรับระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำนั้นจะสามารถจำกัดค่าแรงดันเกินชั่วครู่ได้ไม่เกินค่า 250% โดยผลกระทบจากการต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นเป็นดังรูปที่3.7 [8]

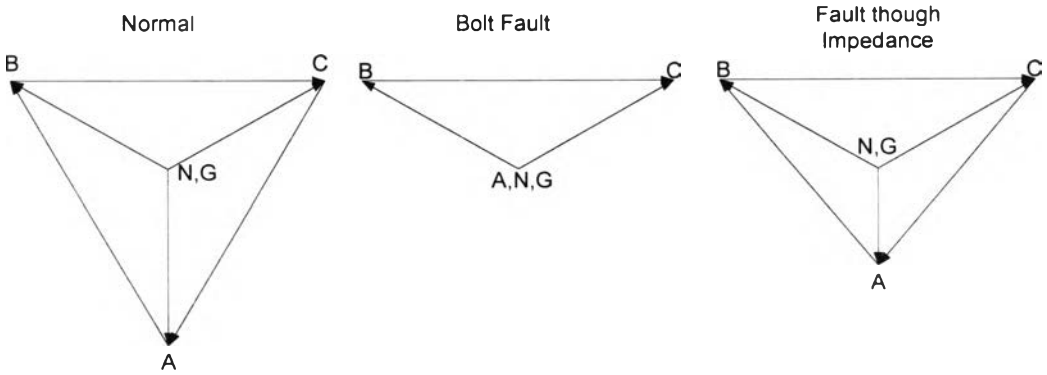


รูปที่ 3.7 ผลกระทบเมื่อต่อค่าความต้านทานที่จุดนิวทรอล
ในการจำกัดค่าแรงดันเกินชั่วครู่

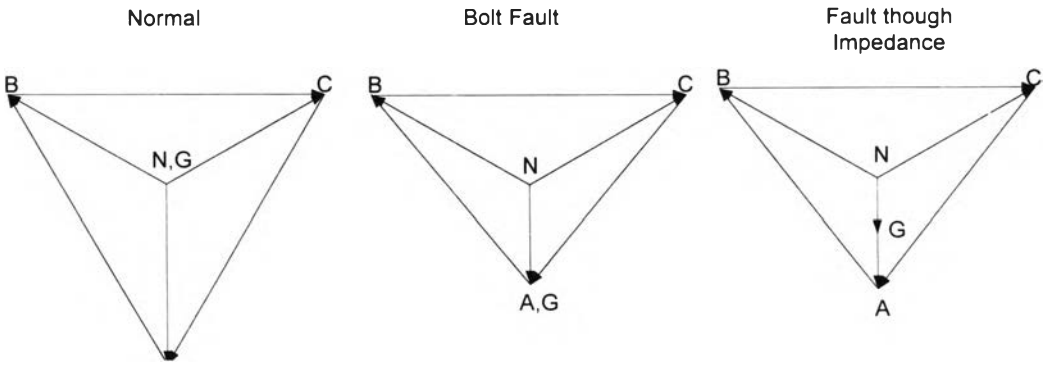
3.2.6 แรงดันตก (Voltage Dip)

เมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะในระบบที่มีการต่อลงดินโดยตรง แรงดันระหว่างสายจะมีค่าลดลงอย่างมากเรียกว่าเกิด แรงดันตกผิดปกติ (Voltage Dip) ดังนั้นโหลดไฟฟ้าที่เป็นโหลด 3 เฟส หรือโหลดไฟฟ้าที่รับแรงดันระหว่างสายนั้นจะเกิดปัญหาแรงดันตกเกิดขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบอย่างมากต่อโหลดไฟฟ้าที่มีข้อจำกัดด้านแรงดันตก เช่น โหลดมอเตอร์ หลอดไฟฟ้าความดันสูง

การต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานก็สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ดังรูปที่3.4



ก. เฟสเซอร์แรงดันของระบบต่อลงดินโดยตรง



ข. เฟสเซอร์แรงดันของระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน

รูปที่ 3.8 เฟสเซอร์แรงดันเปรียบเทียบระบบต่อลงดินโดยตรงและต่อผ่านความต้านทาน

จากรูปที่ 3.8 ก. และรูปที่ 3.8 ข. นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานต่อลงดินนั้นจะไม่มีผลกระทบต่อแรงดันในสภาวะการทำงานปกติ สำหรับสภาวะที่เกิดความผิดพร่องขึ้นในกรณีที่ละเลยความต้านทานผิดพร่องเป็นไปตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าแรงดันเมื่อเกิดความผิดพร่อง

ชนิดของแรงดัน	***ชนิดของการต่อลงดิน***					
	SG			***NRG***		
	Fault Phase		***Sound Phase***	***Fault Phase***		***Sound Phase***
$\%V_{LG}$	0		1	0		1-1.73
$\%V_{LL}$	V_{AB}	V_{BC}	V_{AC}	V_{AB}	V_{BC}	V_{AC}
	0.58	1	0.58	0.58-1	1	0.58-1

ดังนั้นการเลือกค่าความต้านทานต่อลงดินที่เหมาะสมสามารถจำกัดค่าแรงดันตกให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ สำหรับความผิดพร่องที่มีความต้านทานผิดพร่องนั้นทั้งระบบต่อลงดินโดยตรงและระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานจะมีค่าแรงดันใกล้เคียงกันและมีผลกระทบจากแรงดันตกน้อย

3.3 การวิเคราะห์ค่า K_0 และ K_2

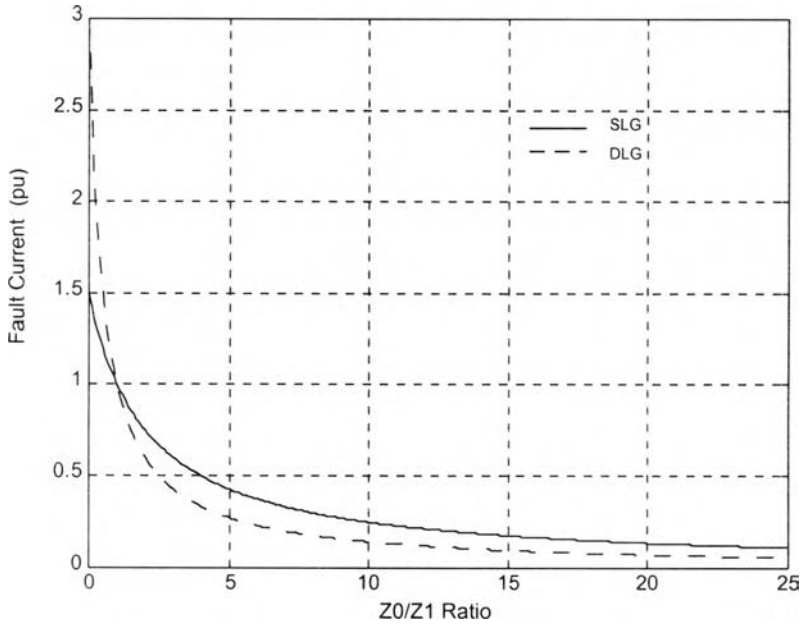
เมื่อค่า K_0 ของระบบเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่ากระแสผิดพร่อง ค่าแรงดันเฟสต่างๆของระบบ ดังที่กล่าวไปแล้ว เมื่อให้ค่า K_2 เป็นค่าคงที่มีค่า $K_2 = 1\angle 0^\circ$ ระบบต่อลงดินโดยตรงค่า K_0 ของระบบจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระบบการต่อลงดินดังนี้ [15], [16]

ค่า $K_0 = 0.5$ จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีการต่อลงดินโดยตรงและความผิดพร่องเกิดใกล้แหล่งกำเนิดมาก ค่าแรงดันของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องจะไม่เกิน แรงดันพิกัดเฟสลงดิน

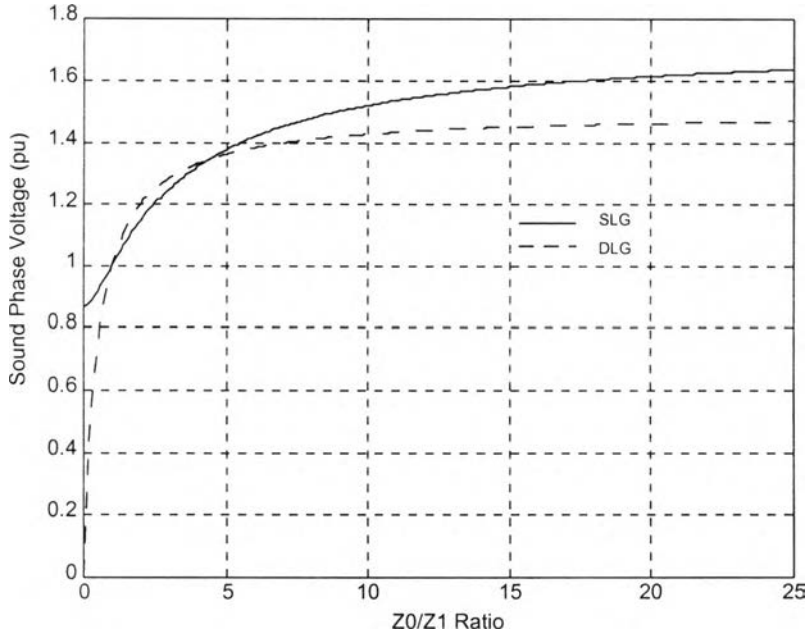
ค่า $K_0 = 1.0$ เมื่อระบบมีการต่อลงดินโดยตรงและความผิดพร่องเกิดห่างจากแหล่งกำเนิดมากขึ้นโดยค่าแรงดันของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องจะมีค่าเท่ากับแรงดันพิกัด

ค่า $K_0 = 2.5\text{-}4.5$ เมื่อระบบต่อลงดินโดยตรงนั้นเกิดความผิดพร่องห่างจากแหล่งกำเนิดมากขึ้นมากจะทำให้ค่า K_0 มีค่าเข้าใกล้ค่า K_0 ของสายส่ง

สำหรับการต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นจะช่วยเพิ่มค่า K_0 เมื่อความผิดพร่องเกิดใกล้แหล่งกำเนิดและค่าจะเข้าใกล้ค่า K_0 ของสายส่งเมื่อสายส่งความยาวมากขึ้นดังเช่นระบบต่อลงดินโดยตรง โดยจะแสดงใน 3.4 สามารถหาค่ากระแสและแรงดันที่ค่า K_0 ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 ค่ากระแสผิดพร่องที่ค่า K_0 ต่างๆ



รูปที่ 3.10 ค่าแรงดันเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องที่ค่า K_0 ต่างๆ

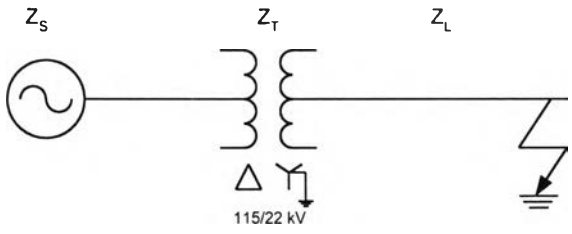
จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่า K_0 ให้กับระบบนั้นจะทำให้สามารถลดค่ากระแสผิดพร่องได้อย่างมากดังรูปที่ 3.9 ค่ากระแสผิดพร่องและแรงดันในเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องของความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดิน และความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดินจะเท่ากันเมื่อค่า K_0 เท่ากับ 1

เมื่อค่า K_0 มากกว่า 1 ค่ากระแสผิดพร่องและแรงดันเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องของความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดิน จะมากกว่าค่ากระแสและแรงดันของความผิดพร่องแบบ 2 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่าโดยมากแล้วค่า K_0 ของระบบจะมีค่ามากกว่า 1 เนื่องจากโอกาสที่จะเกิดความผิดพร่องใกล้แหล่งกำเนิดมีไม่มากนัก ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อลงดินผ่านความต้านทานเปรียบเทียบกับการต่อลงดินโดยตรงนั้นใช้ความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดินเป็นหลัก

3.4 การเปรียบเทียบระบบต่อลงดินโดยตรงกับระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน

การเปรียบเทียบระบบต่อลงดินโดยตรงกับระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นจะนำระบบตัวอย่างสถานีจ่ายไฟฟ้าสถานีหนึ่งมาทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานต่อลงดิน เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบจึงให้ค่าความต้านทานต่อลงดิน 3 ค่าครอบคลุมช่วง 200-2000 A ได้แก่ค่าความต้านทาน 200 1000 และ 2000 A

พิจารณาระบบทดสอบ สถานีควบคุมการจ่ายไฟซึ่งรับไฟจากหม้อแปลง 115/22 kV ขนาด 40 MVA เป็นดังรูปที่ 3.11 และมีข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของระบบฐาน 100 MVA เป็นตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.11 ระบบทดสอบการต่อลงดิน

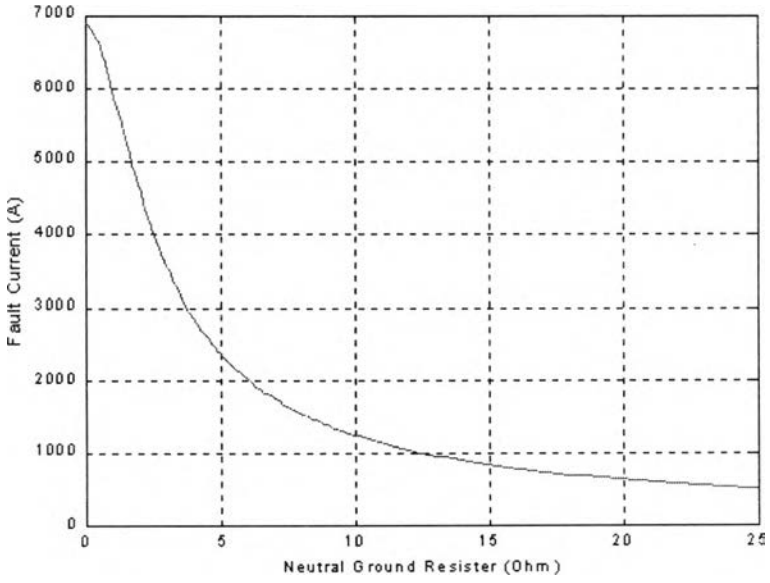
ตารางที่ 3.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสถานีควบคุมที่ใช้ทดสอบ [2]

	Z_S (PU)	Z_T (PU)	Z_L (PU)
Z^1	0.0201321+j0.0989263	j0.3154	0.0363043+j0.071165
Z^2	0.0201321+j0.0989263	j0.3154	0.0363043+j0.071165
Z^0	0.0442149+j0.2152169	j0.3154	0.0668828+j0.3225731

การหาค่าความต้านทานต่อลงดินนั้นจะคิดจากค่ากระแสผิดพร่องสูงสุดที่กำหนดไว้ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.60

$$I_F = \frac{3E_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R} \tag{3.60}$$

จากสมการที่ (3.60) เมื่อค่ากระแสผิดพร่องที่จำกัดโดยความต้านทานเมื่อเกิดความผิดพร่องที่หม้อแปลงซึ่งเป็นตำแหน่งของค่ากระแสผิดพร่องสูงสุดมีค่าต่างๆ จะต้องใช้ค่าความต้านทานต่างๆ กัน ดังรูปที่ 3.12



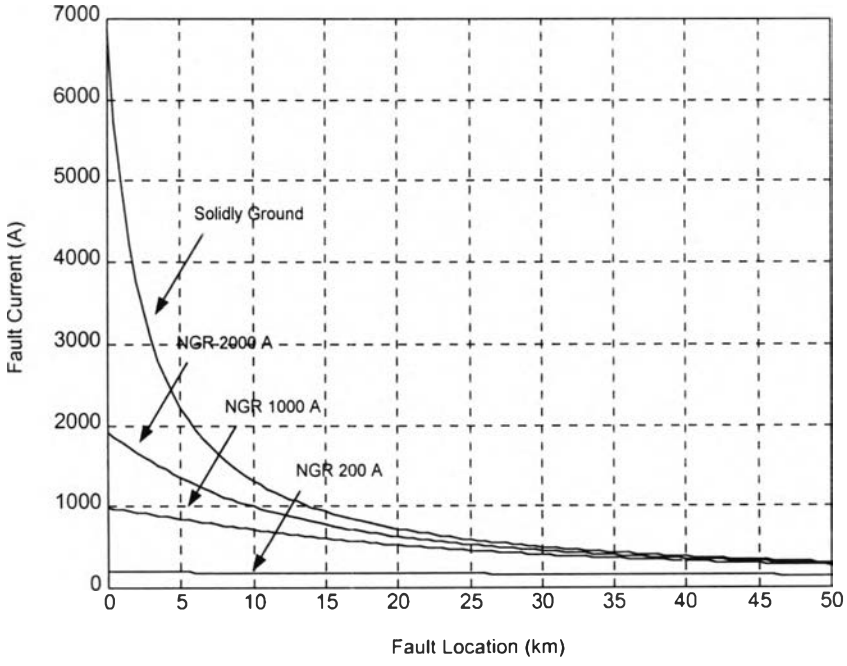
รูปที่ 3.12 ค่ากระแสเมื่อเลือกใช้ความต้านทานต่อลงดินต่างๆ

เมื่อค่าความต้านทานต่อลงดินในระบบนั้นมีค่าใกล้กระแสโหลดค่า Z_0 Z_1 และ Z_2 ของระบบจะอยู่ในช่วงจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานนั้น สมการ (3.60) จึงสามารถละเลยค่า Z_0 Z_1 และ Z_2 ของระบบและสามารถเขียนได้ดังนี้

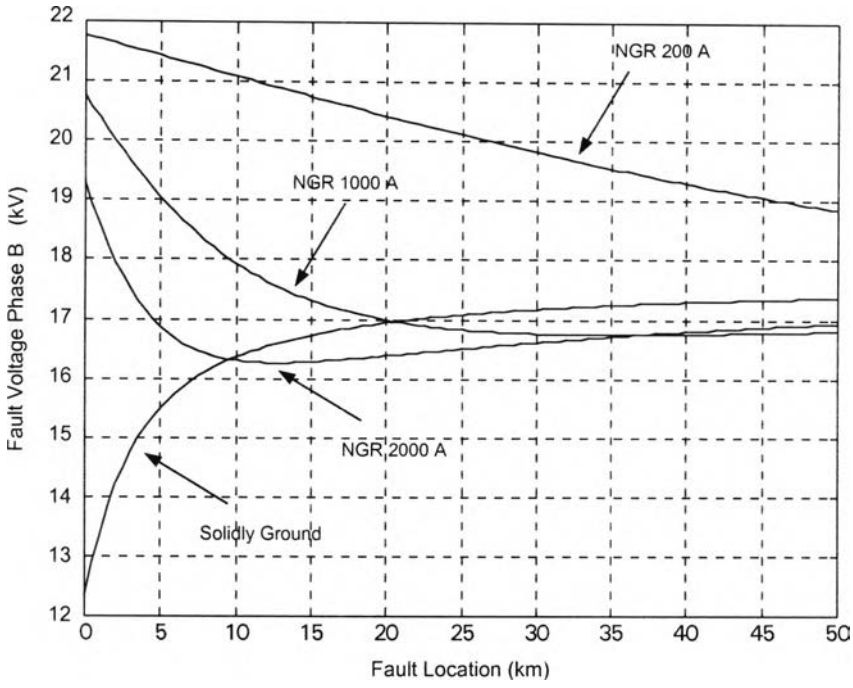
$$I_F = \frac{E_f}{R} \tag{3.61}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าความต้านทานที่ระดับแรงดันต่างๆ เมื่อต้องการจำกัดกระแสให้อยู่ในช่วง 200-2000 A ได้ดังตารางในภาคผนวก ก. ตารางที่ ก.1

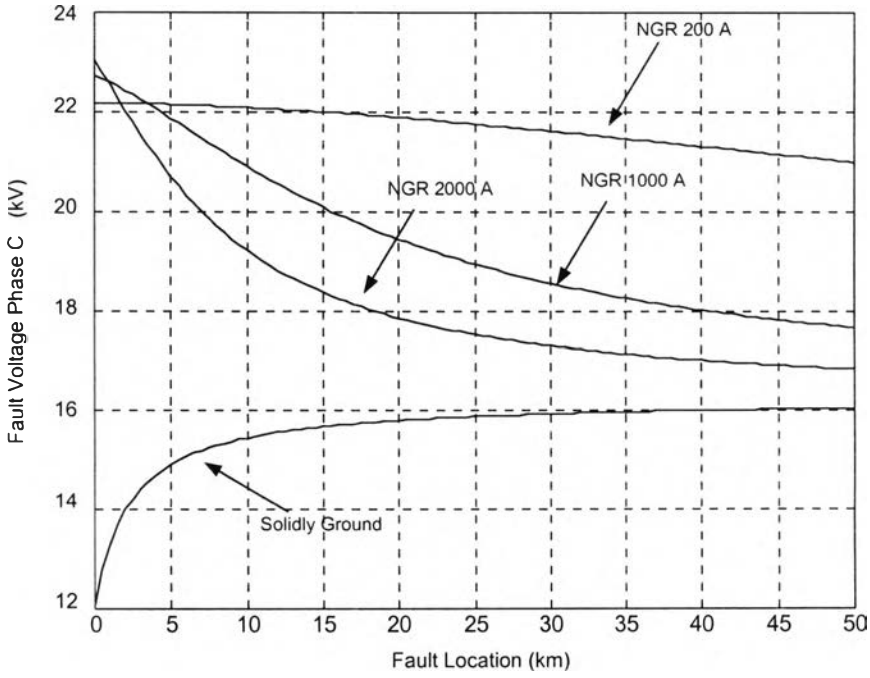
สำหรับระบบทดสอบดังกล่าวเป็นระบบ 22 kV ค่าความต้านทานต่อลงดินขนาด 200 1000 และ 2000 A ที่ใช้จะมีค่าเป็น 127.0 12.7 และ 6.3 Ω ตามลำดับ เมื่อระบบดังกล่าวมีการต่อลงดินผ่านความต้านทานทั้งสามค่า ทำการวิเคราะห์โดยคิดความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดินสามารถหาค่ากระแสผิดพร่องและค่าแรงดันของเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องเมื่อเกิดความผิดพร่อง ณจุดที่ห่างจากหม้อแปลงเป็นระยะต่างๆได้ดังรูปที่ 3.13-3.15



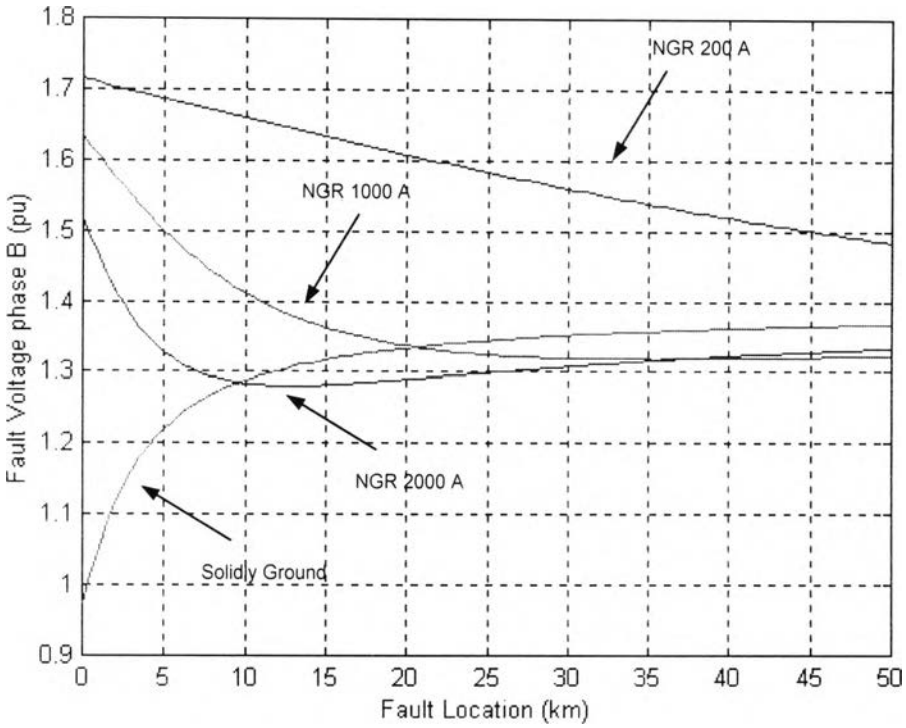
รูปที่ 3.13 เปรียบกระแสผิดพร่องเมื่อเกิดความผิดพร่องที่ระยะต่างๆห่างจากหม้อแปลง



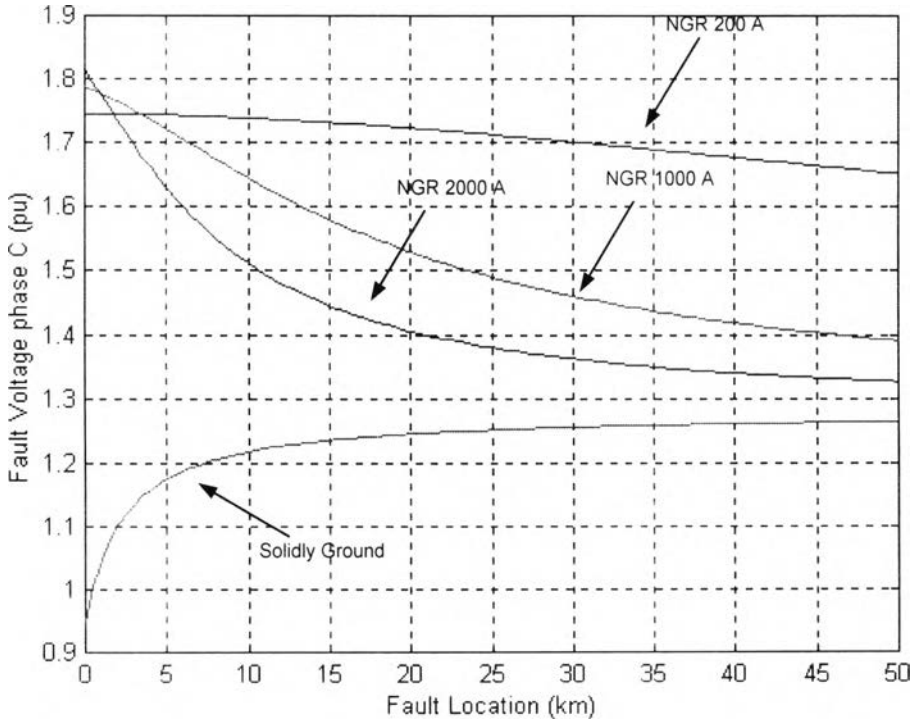
รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบค่าแรงดันเฟส B เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ระยะต่างๆห่างจากหม้อแปลง



รูปที่ 3.15 เปรียบค่าแรงดันเฟส C เมื่อเกิดความผิดพร่อง ที่ระยะต่างๆห่างจากหม้อแปลง



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบค่าแรงดันเฟส B pu. เมื่อเกิดความผิดพร่องที่ระยะต่างๆห่างจากหม้อแปลง



รูปที่ 3.17 เปรียบค่าแรงดันเฟส C pu. เมื่อเกิดความผิดพร่อง ที่ระยะต่างๆห่างจากหม้อแปลง

จากรูปที่ 3.13 นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบ 22 kV ขนาด 40 MVA ดังกล่าวซึ่งมีกระแสพิกัดอยู่ที่ 1050 A ทำการต่อลงดินโดยตรงที่จุดต่อลงดินของหม้อแปลงวาย-เดลตา เมื่อเกิดความผิดพร่องใกล้จุดต่อลงดินมากจะทำให้ค่ากระแสผิดพร่องนั้นมีค่าสูงได้ถึง 7 เท่าของค่ากระแสพิกัดและเมื่อระยะที่เกิดความผิดพร่องนั้นห่างมากขึ้นค่ากระแสผิดพร่องนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อความผิดพร่องอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดมากๆ เนื่องจากค่า K_0 มีค่าเข้าใกล้ค่า K_0 ของสายส่งนั่นเอง

ดังนั้นเมื่อระบบมีการต่อลงดินผ่านความต้านทานจะสามารถจำกัดค่ากระแสผิดพร่องสูงสุดได้ตามค่าความต้านทานที่นำมาต่อลงดินดังรูปที่ 3.13 จึงสามารถลดค่าความเสียหายจากกระแสผิดพร่องที่เกิดขึ้นใกล้จุดต่อลงดินได้อย่างมาก และเมื่อความผิดพร่องอยู่ห่างออกไปค่ากระแสผิดพร่องก็จะมีค่าลดลงช้าและเข้าใกล้ค่าเดียวกับการต่อลงดินโดยตรง

จากรูปที่ 3.14-3.17 นั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่องนั้นของระบบต่อลงดินโดยตรงและระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นจะมีความแตกต่างกันเมื่อความผิดพร่องเกิดใกล้จุดต่อลงดิน และจะมีค่าเข้าใกล้ค่าเดียวกันเมื่อเกิดความผิดพร่องในระยะไกลขึ้นเนื่องจากผลของสายส่งเช่นเดียวกัน

โดยสำหรับการต่อลงดินโดยตรงนั้นเมื่อความผิดพร่องเกิดใกล้แหล่งกำเนิดจะพบว่ามีค่าแรงดันเฟส B และ C ลงดินอยู่ที่ค่าประมาณแรงดันพิกัดเฟสลงดิน(Line-to-ground Rated Voltage)และเมื่อความผิดพร่องอยู่ไกลขึ้นก็จะมีค่าแรงดันดังกล่าวมากขึ้นเรื่อยๆจนสูงถึง 135 % ของแรงดันเฟสลงดินพิกัด แต่เมื่อเกิดระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน ค่าแรงดันดังกล่าวจะสูงสุดเมื่อเกิดความผิดพร่องใกล้แหล่งกำเนิด มีค่า 173% ของแรงดันพิกัดหรือมีค่าประมาณเท่ากับแรงดันพิกัดระหว่างสาย (Line-to-line Voltage) และจะมีค่าแรงดันดังกล่าวค่าใกล้กับการต่อลงดินโดยตรงคือประมาณ 140-160 % ของแรงดันพิกัด

ในส่วนของแรงดันตกเมื่อเกิดความผิดพร่องนั้นพบว่าแรงดันตกจะเกิดมากที่สุดที่จุดเกิดความผิดพร่องดังนั้นในการพิจารณาแรงดันตกนั้นจึงดูจากแรงดันตกที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นคือจุดที่เกิดความผิดพร่องนั่นเอง

จากตารางที่ 3.2 เมื่อพิจารณาในส่วนของความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดินพบว่าขนาดแรงดัน V_{bc} มีค่าเท่ากับ E_{bc} ดังนั้นแรงดันระหว่างสายของเฟส B และ C จึงมีค่าคงที่เท่ากับแรงดันพิกัดระหว่างสายหรือ 1.732 เท่าของแรงดันพิกัดเฟสลงดิน ส่วนขนาดแรงดัน V_{ab} และ V_{ca} นั้นมีขนาดเท่ากับแรงดัน V_b และ V_c ตามลำดับ ดังนั้นการพิจารณาแรงดันตกของแรงดันระหว่างสายจึงพิจารณาได้จากรูปที่ 3.14-3.17 เช่นเดียวกัน

โดยพบว่าสำหรับระบบต่อลงดินโดยตรงนั้นจะเกิดแรงดันตกมากที่สุดเมื่อเกิดความผิดพร่องใกล้แหล่งกำเนิดคือ แรงดันตก 45% (แรงดันมีค่า 0.95 pu) แรงดันที่จุดห่างจากความผิดพร่องนั้น

แรงดันตก 27% (แรงดันมีค่า 1.26 pu) นั่นหมายความว่าการใช้ระบบต่อลงดินโดยตรงนั้นเมื่อเกิดความผิดพร่องจะมีแรงดันตกอย่างน้อย 27% เสมอ ในทำนองเดียวกันพบว่าสำหรับระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นแรงดันตกจะมากที่สุดที่ค่าความต้านทานต่อลงดิน 2000 A คือแรงดันตก 26% (แรงดันมีค่า 1.28 pu) แรงดันตกมากที่สุดของค่าความต้านทานต่อลงดิน 1000 A คือแรงดันตก 24% (แรงดันมีค่า 1.32 pu) แรงดันตกมากที่สุดของค่าความต้านทานต่อลงดิน 200 A คือแรงดันตก 12 % (แรงดันมีค่า 1.52 pu) จากข้อวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปการเปรียบเทียบการต่อลงดินโดยตรงและการต่อลงดินผ่านความต้านทานได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สรุปเปรียบเทียบผลระหว่างการต่อลงดินโดยตรง
และการต่อลงดินผ่านความต้านทาน

ค่าที่พิจารณา	ระบบต่อลงดินโดยตรง	ระบบต่อลงดินผ่านความด้านทาน
1. ค่ากระแสผิดพร่อง	มีค่าสูงมาก (เช่นกรณีตัวอย่างมีค่ากระแส 7 เท่าของกระแสพิกัด	สามารถกำหนดค่ากระแสผิดพร่องมากที่สุดได้ตามค่าพิกัดความด้านทาน (200-2000 A)
2. แรงดันในเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพร่อง	แรงดันมากที่สุด 135% ของ V_{LN}	แรงดันมากที่สุด 173% ของ V_{LN}
3. แรงดันตก	แรงดันตก 27-45 % เสมอ	แรงดันตกมากที่สุด NGR 200 A แรงดันตก 12% NGR 1000 A แรงดันตก 24% NGR 2000 A แรงดันตก 26%
4. แรงดันเกินชั่วครู่	มีค่าจำกัดที่ 200 % ของ V_{LN}	มีค่าจำกัดที่ 250 % ของ V_{LN}

ดังนั้นการนำระบบต่อลงดินผ่านความด้านทานมาใช้กับแทนระบบต่อลงดินโดยตรงนั้นนอกจากสามารถลดความเสียจากค่ากระแสผิดพร่องที่สูงแล้วยังสามารถลดผลของแรงดันตกในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเกิดขึ้นเสมอสำหรับระบบต่อลงดินโดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถจำกัดค่าแรงดันเกินชั่วครู่ให้อยู่ในค่าเหมาะสมได้