บทที่ 5

การเลือกค่าความต้านทานต่อลงดิน
และการออกแบบระบบป้องกัน

ในการออกแบบระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำนั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถเลือกจำกัดค่ากระแสได้ตั้งแต่ช่วง 200-2000 A ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานที่เลือกใช้มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ดีค่าความต้านทานต่อลงดินที่เลือกเมื่อนำมาใช้แล้วต้องมีค่ากระแสผิดพร่องเพียงพอให้ระบบป้องกันทำงานได้อย่างดีด้วย

5.1 หลักการเลือกค่าความต้านทานต่อลงดิน

ได้มีการกล่าวถึงหลักการเลือกค่าความต้านทานต่อลงดินในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้นโดยพิจารณาดังนี้ [4]

- ค่าความต้านทานที่เลือกใช้นั้นจะต้องไม่ทำให้เกิดค่าแรงดันเกินชั่วครู่มากกว่า 250 % ของค่ายอดแรงดันเฟสลงดิน
- ทำการเลือกค่าพิกัดของความต้านทานแบบต่อเนื่องสำหรับการทำงานแบบไม่ดัดวงจร และเลือกค่าพิกัดของความต้านทานแบบระยะสั้นสำหรับการทำงานแบบตัดวงจร
- ค่าความต้านทานที่ใช้ต้องจำกัดค่ากระแสไว้ค่าหนึ่ง ซึ่งมากเพียงพอให้รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินสามารถทำงานได้ อย่างไรก็ดีค่าความต้านทานที่มีค่าสูง(ค่ากระแสผิดพร่องค่าต่ำ) จะส่งผลดีในการลดความเสียหายมากกว่า
- ขดลวดของอุปกรณ์ไฟฟ้าต้องได้รับการป้องกันอย่างน้อย 90% ของขดลวดทั้งหมด

พิจารณาข้อกำหนดข้างต้นดังนี้

1. ค่าแรงดันเกินชั่วครู่ของระบบต่อลงดินแต่ละแบบนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งพบว่าเมื่อเลือกใช้ระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำนั้นจะสามารถจำกัดค่าแรงดันเกินชั่วครู่ไม่เกิน 250% เมื่อเลือกค่าความต้านทานที่จำกัดกระแสให้อยู่ในช่วง 200-2000 A สำหรับการออกแบบระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานจึงไม่ต้องพิจารณา

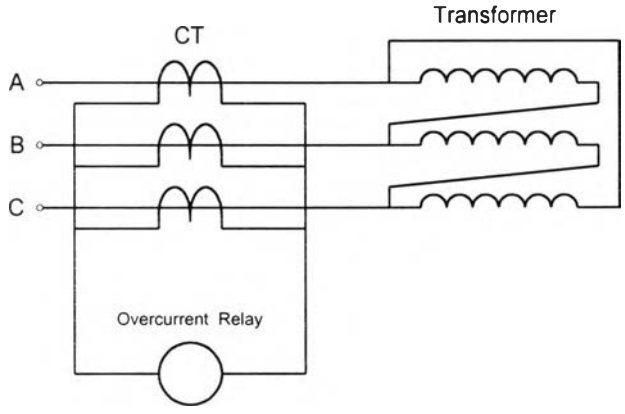
2. แม้ว่าระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานค่าต่ำนั้นจะสามารถลดความเสียหายเนื่องจากกระแสผิดพร่องได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบต่อลงดินโดยตรง แต่ขนาดกระแสผิดพร่องก็ยังมีค่าสูงเกินระดับที่สามารถให้ระบบยังคงทำงานต่อเนื่องเมื่อเกิดความผิดพร่องต่อไปได้ ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ดังนั้นค่าพิกัดของความต้านทานที่ใช้ในระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำนั้นจึงพิจารณาเพียงพิกัดระยะสั้นและทำงานแบบตัดวงจรเท่านั้น

3. ค่ากระแสผิดพร่องที่เพียงพอนั้นจะต้องแยกพิจารณาเป็น 2 แบบ คือระบบที่มีขนาดเล็กและระบบที่มีขนาดใหญ่

ระบบที่มีขนาดเล็ก นั้นคือระบบที่มีบริเวณจำกัดหรือระบบที่มีความยาวสายส่งน้อย ซึ่งเป็นระบบที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานต่อลงดินนั้นถือว่าน้อยมาก ดังนั้นค่ากระแสผิดพร่องของระบบนี้จึงมีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงความยาว (ค่ากระแสผิดพร่องสูงสุดและค่ากระแสผิดพร่องต่ำสุดมีขนาดใกล้เคียงกัน) ดังนั้นการป้องกันจึงสามารถทำได้ง่าย

ระบบที่มีขนาดใหญ่ คือระบบที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบใกล้เคียงกับค่าความต้านทานต่อลงดินระบบดังนี้ ค่ากระแสผิดพร่องที่จุดต่อความต้านทานลงดินและค่ากระแสผิดพร่องต่ำสุดจะมีค่าต่างกันซึ่งถ้าเลือกค่าความต้านทานที่จำกัดค่ากระแสไว้น้อยก็อาจทำให้ค่ากระแสผิดพร่องต่ำสุดนั้นมีค่าน้อยจนเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นกระแสผิดพร่องจะไม่เพียงพอที่จะทำให้รีเลย์ทำงานได้ดังนั้นจึงต้องนำกระแสผิดพร่องต่ำสุดมาเป็นข้อพิจารณาด้วย เมื่อค่ากระแสผิดพร่องต่ำสุดมีค่าน้อยเกินไปก็ให้ใช้ค่าความต้านทานที่จำกัดค่ากระแสให้มีขนาดสูงขึ้น

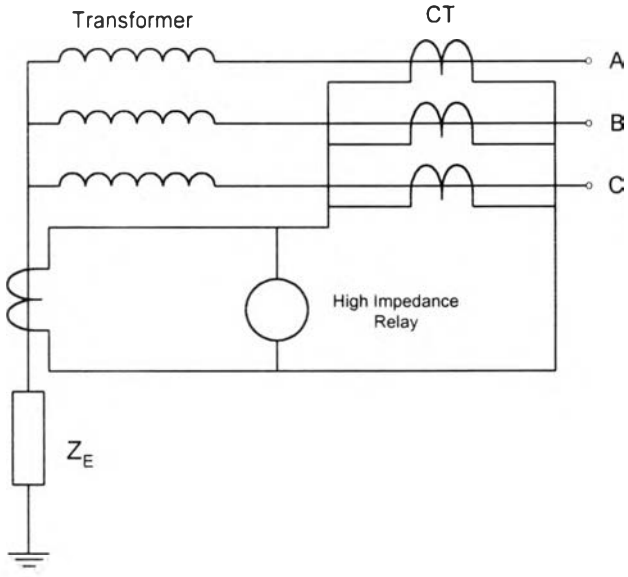
4. การป้องกันขดลวดของอุปกรณ์นั้นถ้าระบบที่มีขนาดเล็กนั้นการป้องกันสามารถทำได้จากการปรับตั้งรีเลย์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อการปรับตั้งรีเลย์ แต่สำหรับระบบที่มีขนาดใหญ่เช่นในสถานีจ่ายไฟฟ้านั้นการป้องกันขดลวดอุปกรณ์เช่นหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องใช้การป้องกันแบบสมดุล (Balanced) หรือการป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบจำกัดบริเวณ (Restricted Earth Fault) ซึ่งใช้หลักการรีเลย์อิมพีแดนซ์ค่าสูง [1], [19]



รูปที่ 5.1 การป้องกันแบบจำกัดบริเวณในหม้อแปลงเดลต้า

การป้องกันความผิดพร่องลงดินแบบจำกัดบริเวณ (Restricted Earth Fault) สำหรับหม้อแปลงที่มีขดลวดแบบเดลต้าทำได้โดยการต่อหม้อแปลงกระแสแบบ Residual Connection ที่สายส่งทั้งสามเฟสขนานกัน รีเลย์จะทำงานสำหรับการลัดลงจรลงดินภายในเท่านั้นเนื่องจากหม้อแปลงไม่สามารถจ่ายกระแสลำดับศูนย์ได้

สำหรับหม้อแปลงขดลวดแบบสตาร์นั้น นอกจากการต่อหม้อแปลงที่สายส่งแล้ว ยังจะต้องต่อขนานกับหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับสายนิวทรอลด้วย เมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินภายนอกบริเวณกระแสในหม้อแปลงทั้งสามของสายส่งจะเท่ากับค่ากระแสที่นิวทรอล รีเลย์จึงไม่ทำงาน แต่เมื่อเกิดความผิดพร่องลงดินภายในขดลวดแล้วจะมีกระแสไหลที่นิวทรอลเท่านั้น ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นรีเลย์จึงทำงาน



รูปที่ 5.2 การป้องกันแบบจำกัดบริเวณในหม้อแปลงวาย

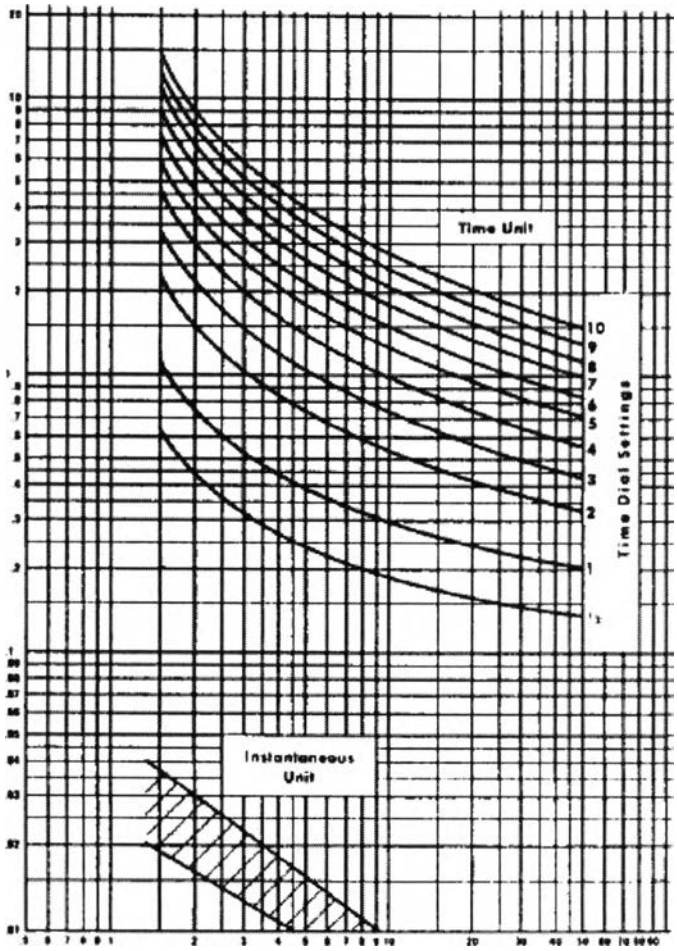
5.2 รีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

รีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันความผิดพร่องลงดินนั้นมี 2 ชนิดคือ [4]

- รีเลย์แบบ Power System Type หรือ Utility Type
- รีเลย์แบบ Ground Fault Sensor (GFS) Type

5.2.1 รีเลย์ Power System Type

รีเลย์แบบ Power System นั้น โดยปกติจะมีลักษณะการต่อเป็นแบบ Residual Connection สามารถทำงานได้ดีที่ค่ากระแสปรับตั้งมากกว่า 1.5 ดังรูปที่ 5.3 และเพื่อที่จะทำให้การทำงานของระบบป้องกันถูกต้องแม่นยำมากขึ้นทำให้แน่ใจว่ามีกระแสผิดพร่องไหลผ่านความต้านทาน จึงควรให้ค่ากระแสปรับตั้งอย่างน้อย 1.5 – 2 เท่า

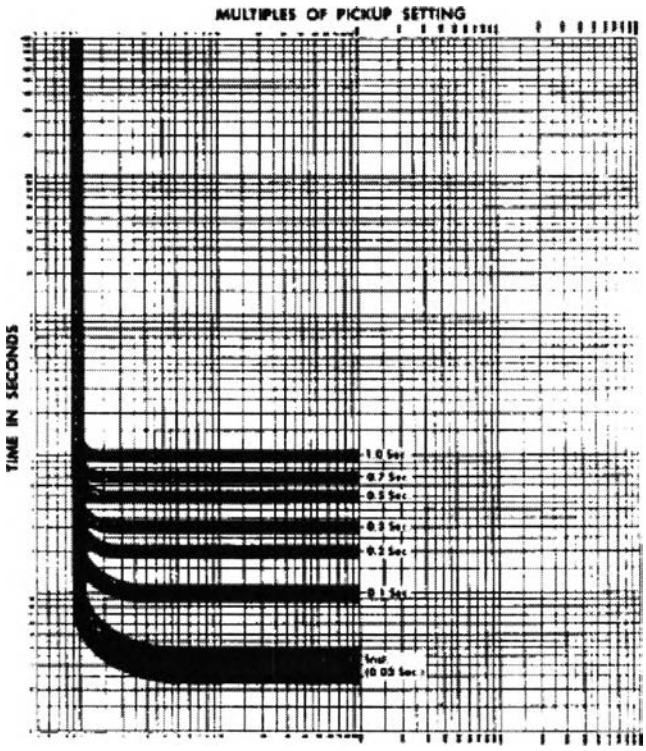


รูปที่ 5.3 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ Power System Type

5.2.2 รีเลย์ Ground Fault Sensor Type

รีเลย์แบบ GFS (Ground Fault Sensor) นั้น หม้อแปลงวัดกระแสจะมีลักษณะการต่อเป็นแบบ Window หรือที่เรียกว่า Core Balance โดยมีกราฟลักษณะสมบัติแสดงดังรูปที่ 5.4 จากกราฟลักษณะสมบัติของรีเลย์แบบ GFS นั้นจะเห็นได้ว่ารีเลย์แบบ GFS จะทำงานได้ถูกต้องที่ค่าสูงกว่าค่า

กระแสปรับตั้งเล็กน้อย รีเลย์แบบ GFS นั้นปกติจะใช้เป็นแบบ Zone Selective คือทำงานเมื่อความผิดพร่องเกิดเฉพาะในส่วนที่ต้องการเท่านั้น เหมาะสำหรับการป้องกันการทำงานของรีเลย์ที่ระดับการทำงานสูงกว่า (Upstream Relay)



รูปที่ 5.4 ลักษณะสมบัติของรีเลย์ Ground Fault Sensor Type

ในการป้องกันความผิดพร่องลงดินที่มีการต่อแบบ Residual Connection นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงความไวของรีเลย์นั้นด้วย เนื่องจากการต่อลักษณะนี้อาจทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดจากความสมดุลของเฟส เช่น การเกิดกระแสพุ่ง (Inrush Current) ของหม้อแปลง หรือค่ากระแสสตาร์ทของมอเตอร์ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการทำงานผิดพลาดดังกล่าว จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้รีเลย์แบบ Instantaneous (50N) และใช้รีเลย์แบบเวลา (51N) แทน โดยทำการปรับตั้งค่ากระแสไว้อย่างน้อย 10 % ของค่าพิกัดกระแสของหม้อแปลงวัดกระแสนั้น

สำหรับระบบที่มีการต่อลงดินผ่านความต้านทานนั้น รีเลย์ที่มีการต่อแบบ Residual อาจจะไม่เหมาะสมถ้าค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสนั้นมีค่าไม่ต่ำพอ เพราะจะทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดขึ้นได้ในบางกรณี

5.3 การปรับตั้งรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดิน

หลักการปรับตั้งรีเลย์ป้องกันความผิดพร่องลงดินโดยพิจารณาเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

1. การป้องกันขดลวดของอุปกรณ์ (Equipment Winding Protection)

เพื่อต้องการให้ระบบป้องกันสามารถป้องกันขดลวดของอุปกรณ์ได้ 90 % ของขดลวดอุปกรณ์ซึ่งได้แก่หม้อแปลงหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามข้อกำหนดข้างต้นนั้น ในทางปฏิบัติจะทำการเลือกให้พิกัดกระแสของหม้อแปลงในด้านปฐมภูมิ (Primary Current Rating) นั้นเป็นครึ่งหนึ่งของพิกัดกระแสของความด้านทานต่อลงดินนั้นแล้วทำการปรับตั้งรีเลย์ให้มีค่าปิคอัพ 10% ของค่าพิกัดความด้านทานต่อลงดินนั้น [4]

สำหรับระบบที่ขนาดใหญ่นั้นการปรับตั้งรีเลย์ในลักษณะนี้ไม่สามารถทำได้เนื่องมาจากในระบบใหญ่นั้นต้องทำการประสานสัมพันธ์ในส่วนของความผิดพร่องลงดิน การเลือกค่ากระแสปรับตั้งที่ค่า 10 % ที่รีเลย์ตัวบนสุด (Upstream Relay) นั้นจะทำการประสานสัมพันธ์กับรีเลย์ตัวล่าง (Downstream Relay) ได้ยากหรืออาจไม่สามารถทำการประสานสัมพันธ์ได้เลย ดังนั้นการปรับตั้งจึงต้องคำนึงถึงการประสานสัมพันธ์เป็นหลัก

2. ค่าความไวของรีเลย์ (Relay Sensitivity)

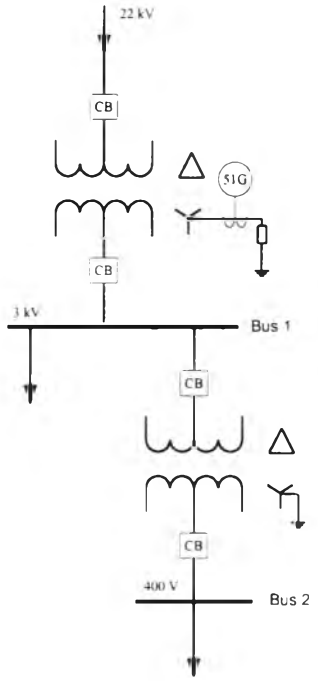
โดยปกติแล้วรีเลย์ Power System Type นั้นสามารถปรับตั้งให้ค่ากระแสปรับตั้งมีค่าต่ำถึง 0.1 A แต่โดยปกติแล้วค่าปรับตั้งดังกล่าวไม่สามารถใช้ในทางปฏิบัติได้ (จากเหตุผลในการต่อรีเลย์แบบ Residual Connection ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2)

ถ้าเลือกค่ากระแสปรับตั้งเป็น 0.5 A เพื่อให้การทำงานมีความถูกต้องมากขึ้นค่ากระแสปรับตั้งควรจะเป็น 1.5 เท่าของ ค่ากระแสปิดอัพต่ำสุดจึงควรปรับตั้งกระแส 0.75 A ในด้านทุติยภูมิ และโดยปกตินั้นค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสจะมีค่าประมาณ 1.35 เท่าของค่ากระแสโหลดสูงสุด ดังนั้น ค่ากระแสทำงานต่ำสุดนั้นจะมีค่าประมาณ $1.35 \times 0.75/5 = 0.2$ pu. ของค่ากระแสโหลดสูงสุด ดังนั้นเมื่อทำการปรับตั้งรีเลย์ค่าดังกล่าวความไวของรีเลย์จะมีค่า 20 % ของกระแสโหลด (ค่า 0.2 pu. นี้เป็นค่าปรับตั้งของเซอร์กิตเบรคเกอร์แรงดันต่ำโดยมาก) ส่วนรีเลย์แบบ GFS นั้นสามารถปรับตั้งให้มีค่าน้อยกว่านี้ได้

5.4 การออกแบบระบบป้องกันมีดังนี้

ระบบไฟฟ้าที่นำมาออกแบบระบบป้องกันความผิดพร่องลงดินนั้นมี 2 ระบบ ระบบแรกเป็นระบบไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินผ่านความต้านทานซึ่งมีขนาดเล็ก และระบบที่ 2 เป็นระบบต่อลงดินผ่านความต้านทานของสถานีจ่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 kV

ระบบที่ 1 ระบบ 22/3 kV มีรูปดังนี้



รูปที่ 5.5 วงจรเส้นเดียวของระบบที่ 1

มีค่าความอิมพีแดนซ์ฐาน 10 MVA ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ 1

	ระบบ	หม้อแปลง 10 MVA 22/3 kV	หม้อแปลง 1 MVA 3 kV/400 V
Z^1	j0.002	j0.08	j0.575
Z^2	j0.002	j0.08	j0.575
Z^0	j0.002	j0.08	j0.575

เมื่อเลือกใช้ความต้านทานต่อลงดินค่า 400 A จะได้ค่ากระแสผิดพร่องที่บัสต่างๆเป็นดังนี้

เกิดความผิดพร่องแบบเฟสลงดินที่บัสที่ 1 ค่ากระแสผิดพร่องมีค่า 399.91 A (400 A)

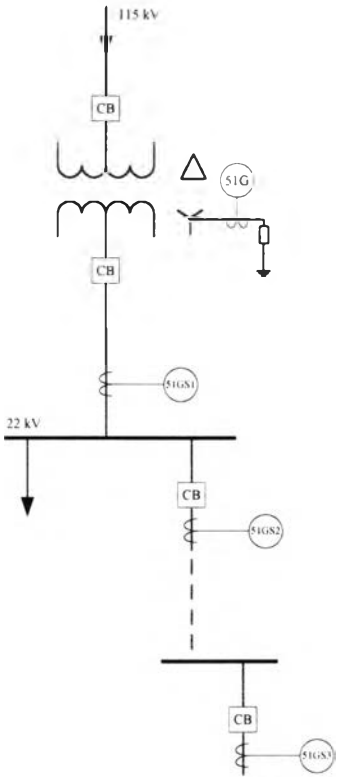
เกิดความผิดพร่องแบบเฟสลงดินที่บัสที่ 2 ค่ากระแสผิดพร่องมีค่า 19101.67 A โดยกระแสไหลจากบัส 1 ไปบัส 2 มีค่าดังนี้ เฟส A B และ C มีค่า 2037 1018 และ 1018 A

จากรูปจะเห็นได้ว่าบัสที่ 1 นั้นเป็นระบบต่อลงดินผ่านความต้านทาน 400 A ค่ากระแสผิดพร่องถูกจำกัดค่าเป็น 400 A ส่วนบัสที่ 2 เป็นระบบต่อลงดินโดยตรง เมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นจึงมีค่ากระแสผิดพร่องมาก อย่างไรก็ดีค่ากระแสผิดพร่องดังกล่าวจะถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตของบัสที่ 2

เท่านั้น ดังจะเห็นได้จากกระแสที่ไหลจากบัสที่ 1 ไปบัสที่ 2 ในเฟสที่เกิดความผิดพร่องมีค่าเท่ากับกระแสพิกัดของหม้อแปลง 22/3 kV 10 MVA คือ 1925 A เท่านั้น

สำหรับการป้องกันความผิดพร่องลงดินในส่วนของความต้านทานต่อลงดินนั้น เลือกใช้อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสเป็น 200/5 (50% ของพิกัดกระแสความต้านทานต่อลงดิน)และเลือกค่าปรับตั้งที่ 40 A (10% ของค่ากระแสความต้านทานต่อลงดิน) ตามหลักการที่กล่าวไว้ข้างต้น

ระบบที่ 2 เป็นสถานีจำหน่ายไฟฟ้า โดยหม้อแปลง 40 MVA 115/22 kV ต่อความต้านทานลงดินเป็นดังรูปที่ 5.6

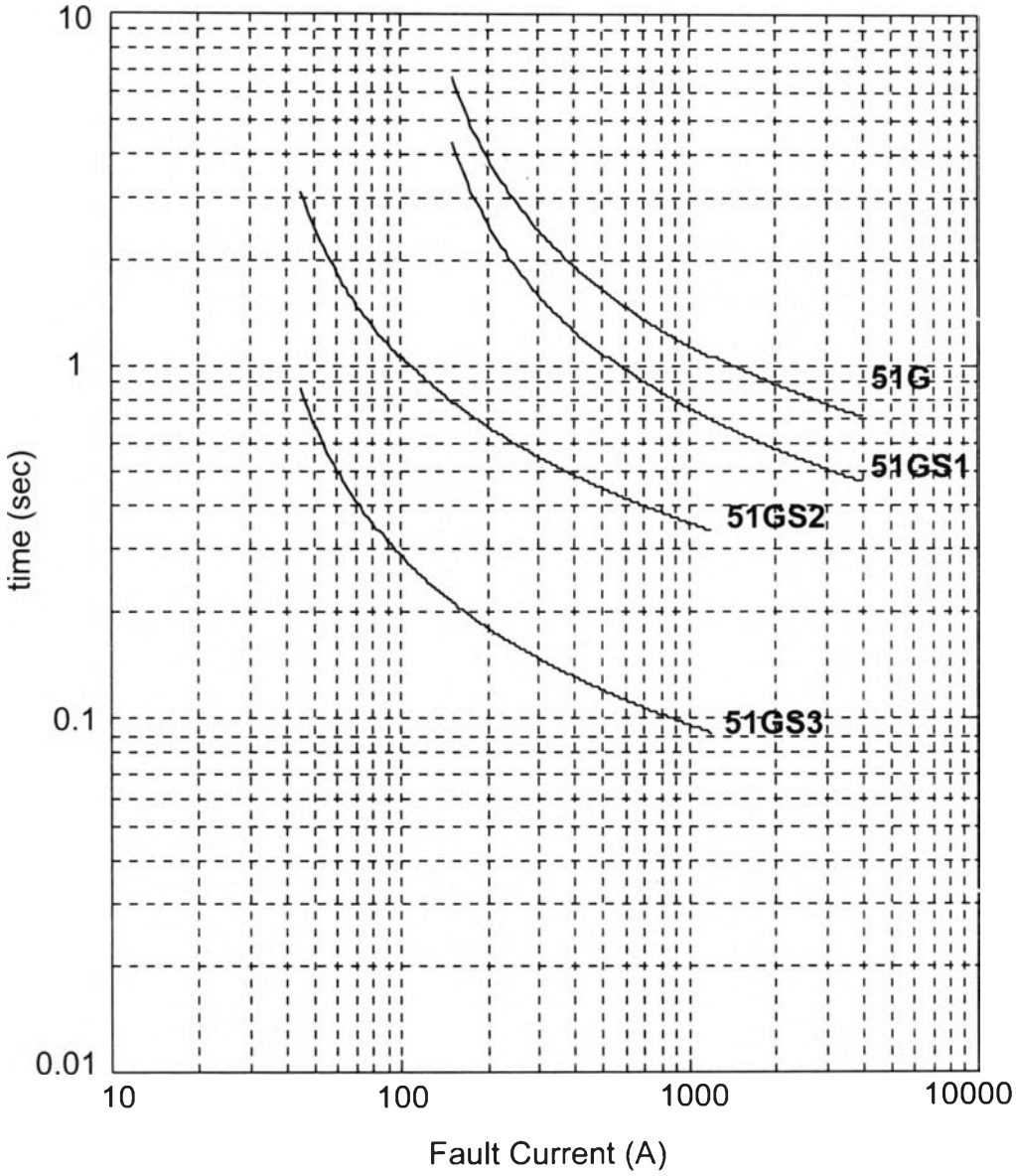


รูปที่ 5.6 วงจรเส้นเดียวของระบบที่ 2

เนื่องจากการวิเคราะห์ระบบต่อลงดินในสถานีจ่ายไฟฟ้าสามารถทำได้โดยให้บัสขาออกไปจนถึงโหลดนั้นแทนด้วยสายส่งระยะต่างๆจึงสามารถหาค่ากระแสและแรงดันได้ดังตารางที่ ก.2 ก.8 และ ก.14 โดยระบบป้องกันของระบบนั้นทำการติดตั้งรีเลย์ 51G เพื่อป้องกันที่ความต้านทานต่อลงดิน รีเลย์ 51GS1 51GS2 ป้องกันที่บัส 22 kV ขาเข้าและขาออกตามลำดับ และรีเลย์ 51GS3 ป้องกันที่บัสที่อยู่ไกลโดยสมมุติให้มีค่ากระแสผิดพร่อง 300 A สามารถทำการปรับตั้งที่ 20 % ใช้รีเลย์แบบ SI (Standard Inverse) ได้ดังตารางที่ 5.2 โดยการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์เมื่อเลือกใช้ค่าความต้านทานต่อลงดินขนาด 1000 A แสดงได้ดังรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.2 ค่าปรับตั้งรีเลย์ในระบบที่ 2

รีเลย์	กระแสผิดพร่องสูงสุด (A)	หม้อแปลงกระแส	TMS
51G	1000	500/5	0.390
51GS1	1000	500/5	0.255
51GS2	1000	150/5	0.185
51GS3	300	150/5	0.050



รูปที่ 5.7 การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ในระบบที่ 2