คู่มือการเรียนวิชา
529308

การป้องกันและรีเลย์

Protection and Relay

รศ.ดร.กีรติ ชยะกุลคีรี

อ.ดร.อุเทน ลีตน

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Facebook ภาคการศึกษา 3/2560 สำหรับติดต่อสื่อสาร

http://bit.ly/fb_protection_360

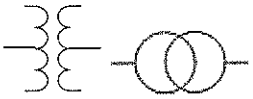
Google Drive สำหรับ Power Point และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

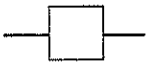
http://bit.ly/sut_protection

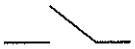
สัญลักษณ์ทางไฟฟ้ากำลังพื้นฐาน

อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง

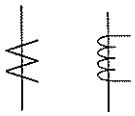
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

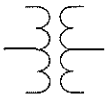

หม้อแปลงไฟฟ้า


เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)


สวิตช์ตัดวงจร (Disconnecting Swirch)

อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ


หม้อแปลงกระแส(Current Transformer, CT)


หม้อแปลงแรงดัน (Voltege Transformer, VT)

Transducer (หม้อแปลงกระแส และ/หรือ หม้อแปลงแรงดัน)

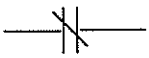
อุปกรณ์ป้องกันและวงจรควบคุม

รีเลย์ (Relay)

รีเลย์ปิดวงจร (Seal-in Relay, Seal-in Unit)

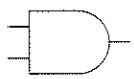
สัญญาณแสดงสถานการณ์ทำงานของรีเลย์
(Flag, Target, Indicator)

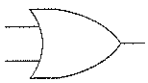
ขดลวดตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์
(Circuit Breaker Trip Coil)


หน้าสัมผัสปกติปิด (Normally Close Contact)

หน้าสัมผัสปกติเปิด (Normally Open Contact)

สัญลักษณ์ทางวงจรตรรก


AND gate


OR gate

Not

บทที่ 1

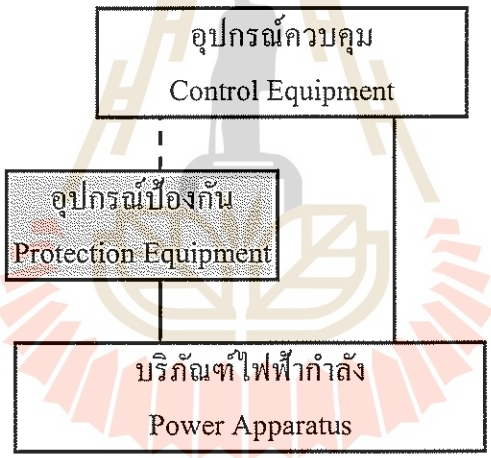
โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังและการเกิดลัดวงจร

(Power System Structures and Faults)

การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังมีความสำคัญอย่างยิ่งของระบบไฟฟ้ากำลังในการที่จะให้ความปลอดภัยต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเกิดการผิดพร่องขึ้นในระบบ ทั้งนี้สิ่งสำคัญในการออกแบบระบบป้องกันก็คือลักษณะโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ลักษณะของการผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังก็มีผลต่อการออกแบบระบบป้องกันเช่นกัน ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังและการเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังโดยเน้นเฉพาะการลัดวงจร

1.1 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

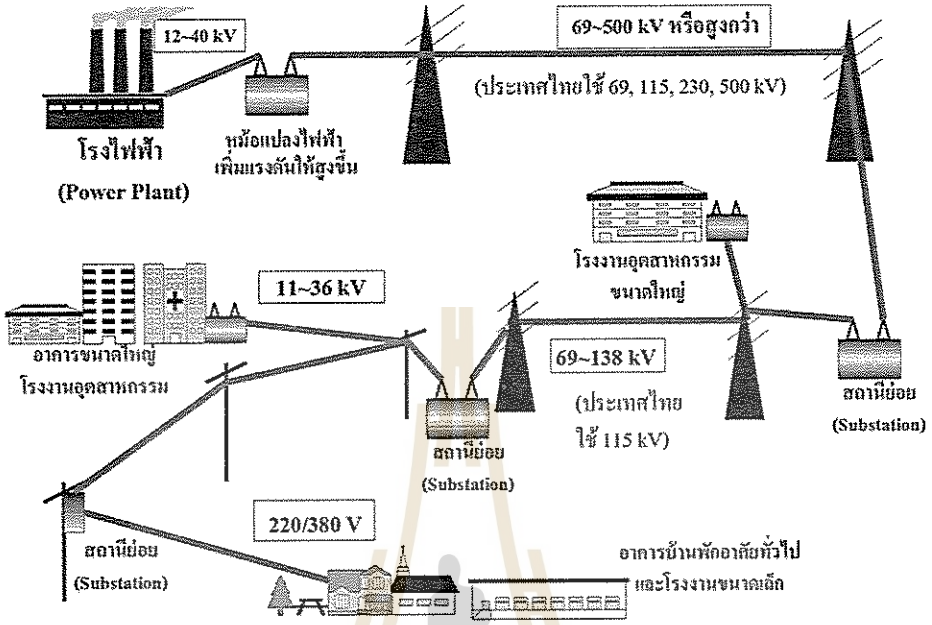
องค์ประกอบในการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งตามหน้าที่ได้เป็น 3 ส่วน คือ อุปกรณ์ควบคุม (Control Equipment) บริภัณฑ์ไฟฟ้ากำลัง (Power Apparatus) และอุปกรณ์ป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบในการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

ส่วนของบริภัณฑ์ไฟฟ้ากำลังเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่ง ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generators) สายส่งไฟฟ้า (Transmission Lines) และหม้อแปลงกำลัง (Power Transformers) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution Systems) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ส่วนประกอบถัดมาคืออุปกรณ์ควบคุมซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมสถานะต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าเช่น แรงดัน ความถี่ จนถึงค่ากำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนประกอบสุดท้ายคืออุปกรณ์ป้องกัน การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะต้องการความเร็วมากกว่าระบบควบคุม การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันจะมีผลต่อการเปิด-ปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งจะทำให้สภาวะของระบบไฟฟ้ากำลังเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่อุปกรณ์ควบคุมจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมตลอดเวลา

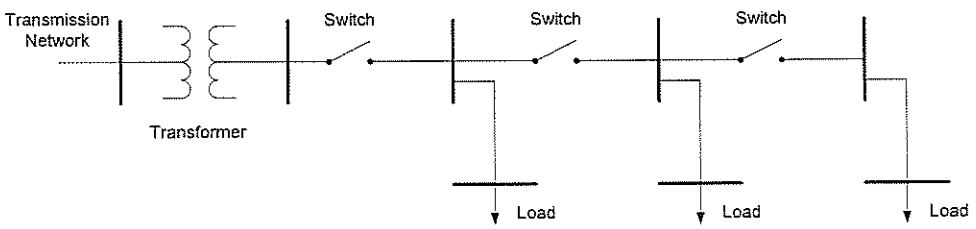
การจัดวางโครงสร้างของระบบไฟฟ้า (Layout) มีผลต่อชนิดและการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันโดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกล่าวถึงการจัดวางโครงสร้างของระบบไฟฟ้าซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบใหญ่ ๆ คือ ระบบแบบเรเดียลและระบบแบบโครงข่าย



รูปที่ 1.2 โครงสร้างส่วนของบริภัณฑ์ไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.1.1 ระบบแบบเรเดียลหรือแบบแขนง (Radial System)

ระบบแบบเรเดียลหรือแบบแขนงเป็นระบบที่มีการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดหนึ่งแหล่งไปยังภาระ (Load) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยทั่วไปจะเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งมีแรงดันไม่เกิน 115 kV ระบบแบบนี้จะมีราคาไม่สูงแต่มีความน่าเชื่อถือได้ต่ำ เนื่องจากการสูญเสียแหล่งจ่ายเพียงแหล่งเดียวจะมีผลให้ไฟฟ้าดับทั้งหมด หรือเมื่อเกิดความผิดพร่องที่ต้องปลดวงจรในตำแหน่งของสายส่งหลักก็จะทำให้เกิดไฟฟ้าดับในส่วนที่อยู่ถัดลงไปทั้งหมด การป้องกันระบบแบบเรเดียลจะมีความซับซ้อนไม่มาก โดยกำลังงานไฟฟ้าจะไหลในทิศทางเดียวไปยังภาระและมักจะเป็นระบบที่อยู่ห่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้ค่ากระแสลัดวงจรไม่สูงนัก

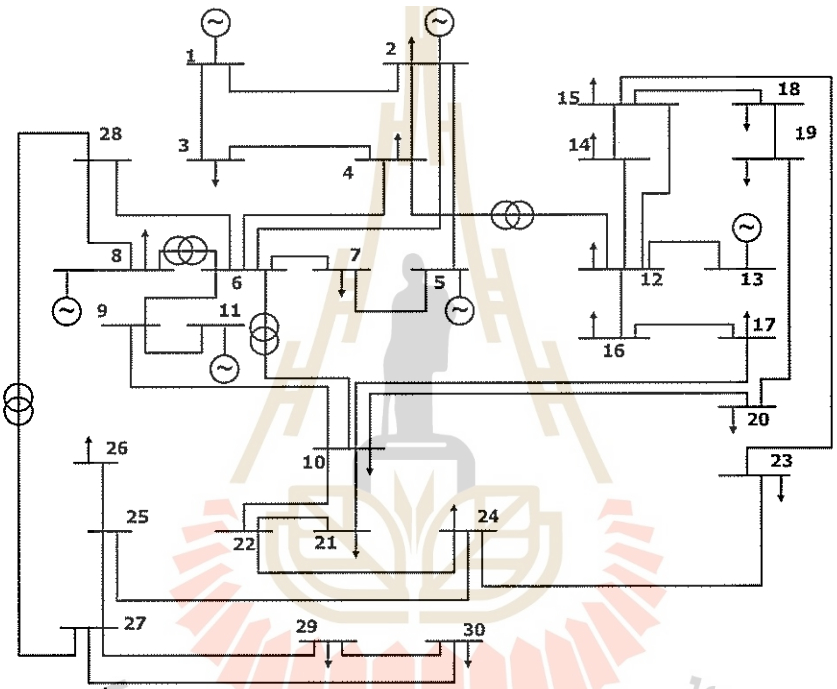


รูปที่ 1.3 ระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล

1.1.2 ระบบแบบโครงข่าย (Network System)

ระบบไฟฟ้าแบบโครงข่ายเป็นระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อเป็นวงปิด (Loop) ซึ่งมักจะมีมากกว่าหนึ่งวงปิดและมีแหล่งกำเนิดหลายแหล่งดังแสดงในรูปที่ 1.4 ระบบส่งไฟฟ้า (Transmission System) และระบบส่งไฟฟ้าย่อย (Subtransmission System) ในระบบขนาดใหญ่มักมีโครงสร้างเป็นระบบแบบโครงข่าย ข้อดีของระบบแบบโครงข่ายจะมีความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือได้สูงกว่าระบบแบบเรเดียล การสูญเสียแหล่งกำเนิดบางตัวหรือสายส่งบางเส้นก็จะไม่ทำให้เกิดปัญหาโดยรวมมากนัก

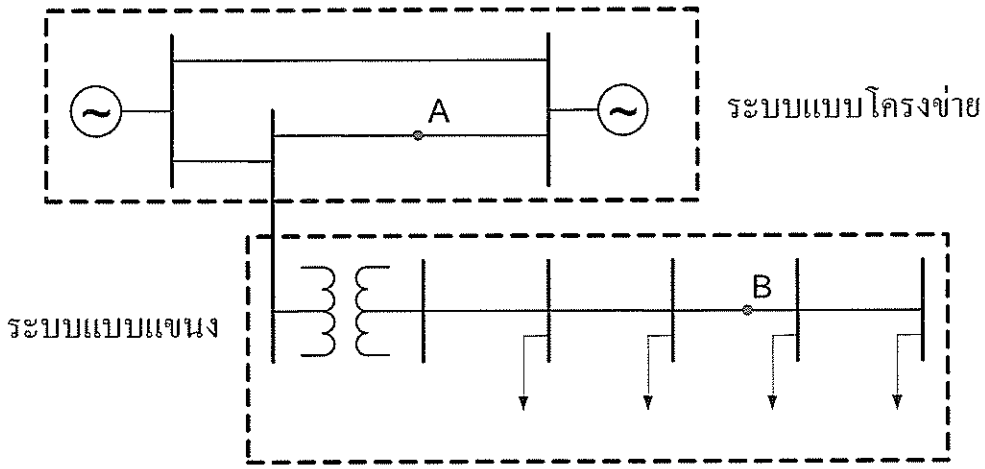
โครงสร้างแบบโครงข่ายทำให้กระแสลัดวงจรไหลจากทุกทิศทางที่จุดลัดวงจรเชื่อมต่ออยู่ ดังนั้นในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังแบบโครงข่ายจะต้องคำนึงถึงกระแสลัดวงจรที่ไหลจากทุกทิศทางด้วย นอกจากนี้ค่ากระแสลัดวงจรมักมีค่าสูงมากเนื่องจากเป็นระบบที่ต่ออยู่ใกล้แหล่งกำเนิด



รูปที่ 1.4 แสดงระบบไฟฟ้าแบบโครงข่าย (IEEE 30 Bus System)

ตัวอย่างที่ 1.1 จากรูปที่ 1.5 เป็นระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยระบบส่งที่เป็นแบบโครงข่ายและระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นแบบเรเดียล

การเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่ง A จะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรปริมาณมาก แต่หลังจากปลดสายส่งที่ลัดวงจรออกแล้วระบบยังสามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าไปยังภาระได้ แต่ถ้าเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง B จะเกิดค่ากระแสลัดวงจรน้อยกว่าที่ตำแหน่ง A แต่ในการป้องกันจะต้องตัดวงจรตั้งแต่สายส่งที่เกิดลัดวงจรไป ทำให้ไม่สามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าไปยังภาระได้ทั้งหมด



รูปที่ 1.5 รูประบบไฟฟ้ากำลังจากตัวอย่างที่ 1.1

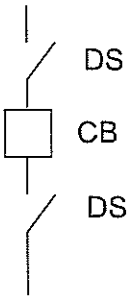
1.2 การจัดวางบัสในสถานีไฟฟ้า (Busbar Configuration in Substation)

ในสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีการออกแบบการจัดวางอุปกรณ์ป้องกันขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการทำงานและความน่าเชื่อถือได้ของระบบ โดยจะมีอุปกรณ์ในการเปิด-ปิดวงจรดังนี้

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker, CB)เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปิด-ปิดวงจรได้ในขณะที่มีกระแสไหลผ่าน เนื่องจากโครงสร้างถูกออกแบบมาเป็นพิเศษ เพื่อให้สามารถดับอาร์คในขณะที่สับสวิตช์เข้าหรือออก

2. สวิตช์ตัดวงจร (Disconnecting Switch, DS) เป็นอุปกรณ์ตัดตอนที่ทำงานร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยจะต่ออยู่ทั้งสองด้านของเบรกเกอร์ เหตุผลที่ต้องมีสวิตช์ตัดตอนนี้ก็เพื่อความปลอดภัยในการซ่อมบำรุง หรือ ซ่อมแซมเซอร์กิตเบรกเกอร์ เนื่องจากสวิตช์ตัดตอนแบบนี้ไม่มีความจำเป็นต้องตัดต่อวงจรในขณะที่มีกระแสไหลผ่าน โครงสร้างจึงไม่มีตัวดับอาร์ก

3. สวิตช์ต่อลงดิน (Ground Switch, GS) ในสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงจะมีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตลอดเวลา ดังนั้นในขณะที่มีการซ่อมบำรุงอาจมีแรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในสายส่งในบริเวณใกล้เคียงได้ นอกจากนี้อุปกรณ์บางตัวเช่น หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer หรือ Potential Transformer) จะมีการสะสมพลังงานในตัว ดังนั้นการไปสัมผัสบัสบาร์ที่มีอุปกรณ์เหล่านี้ต่ออยู่จะทำให้เกิดอันตรายได้ ในการทำงานปกติจะใช้เพียงเซอร์กิตเบรกเกอร์และสวิตช์ตัดวงจรแต่ในสภาวะที่ต้องการนำอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย อย่างเช่น หม้อแปลงหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ ไปซ่อมแซมจึงจะมีการถ่ายเท ประจุลงดิน (Discharge) โดยผ่านสวิตช์ต่อลงดินเพื่อความปลอดภัย

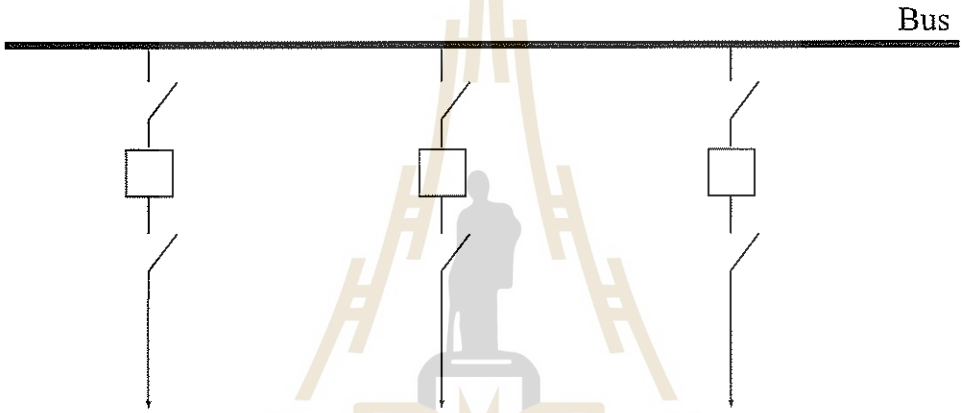


รูปที่ 1.6 การทำงานสวิตช์ตัดวงจร (DS) ร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB)

การจัดวางบัสในสถานีไฟฟ้าย่อยที่นิยมใช้มีดังนี้

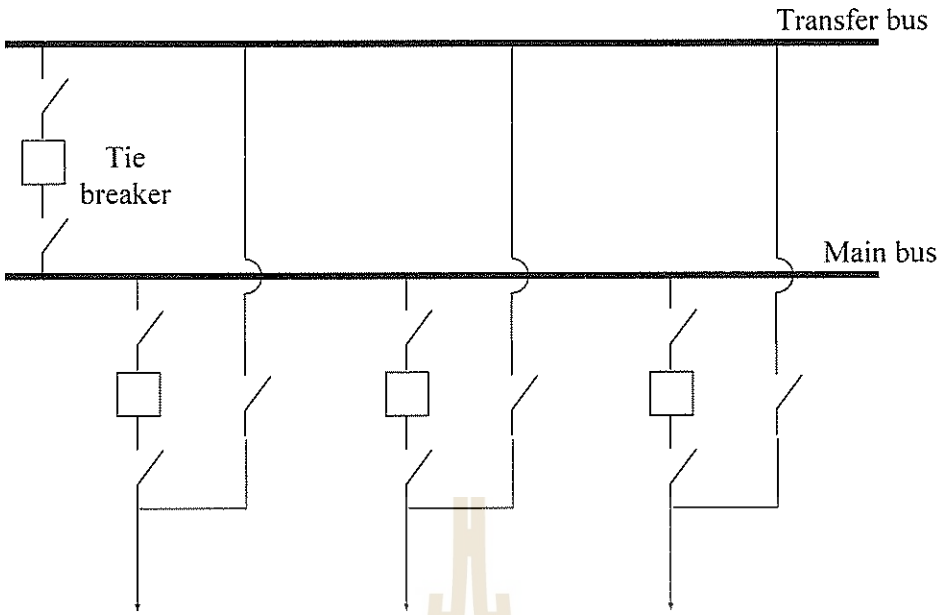
- การจัดบัสแบบบัสเดี่ยวเบรกเกอร์เดี่ยว (Single bus, single breaker)
- การจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์เดี่ยว (Two bus, Single breaker)
- การจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์คู่ (Two bus, two breakers)
- การจัดบัสแบบหนึ่งเบรกเกอร์ครึ่ง (Breaker and a half)
- การจัดบัสแบบวงแหวน (Ring bus)

การจัดบัสแบบบัสเดี่ยวเบรกเกอร์เดี่ยว (Single bus, single breaker) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.7 เป็นการจัดวางบัสที่เรียบง่ายที่สุดและมักจะมีการลงทุนต่ำที่สุด แต่เป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นน้อย เมื่อมีการซ่อมเบรกเกอร์จะต้องเปิดวงจรสายที่ต่ออยู่กับเบรกเกอร์นั้นออกจากวงจร และการซ่อมบำรุงบัสจะต้องทำการตัดวงจรที่ต่ออยู่กับบัสทั้งหมด



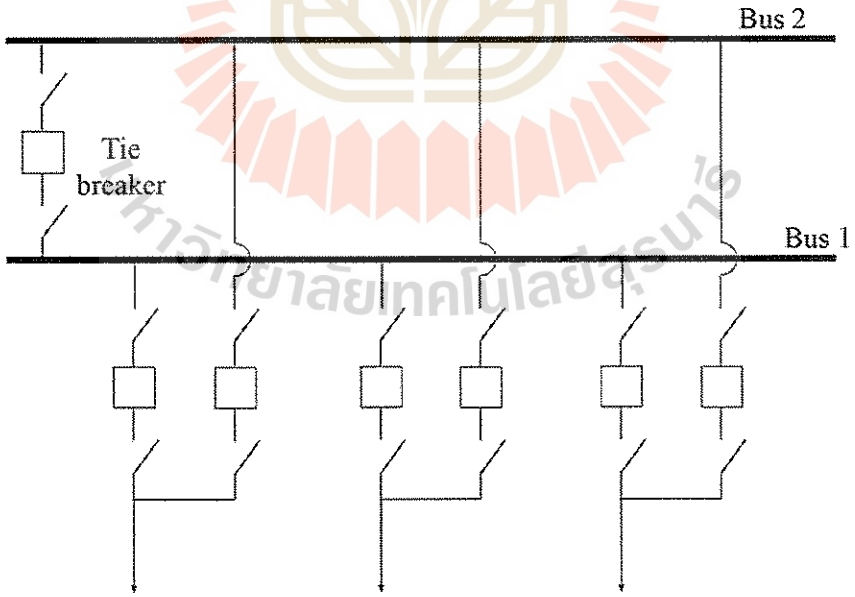
รูปที่ 1.7 การจัดบัสแบบบัสเดี่ยวเบรกเกอร์เดี่ยว (Single bus, single breaker)

การจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์เดี่ยว (Two bus, Single breaker) หรือเรียกว่า Main and Transfer Bus สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.8 เป็นระบบการจัด Busbar ที่มีอยู่ 2 Bus โดยเรียกว่าบัสหลัก (Main bus) และบัสส่งผ่าน (Transfer bus) โดยในสภาวะปกติบัสหลักจะเป็นบัสที่มีแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่บัสส่งผ่านจะไม่มีแรงดันไฟฟ้า การจัดวางบัสแบบนี้จะสามารถถอดเบรกเกอร์ไปซ่อมบำรุงได้โดยยังสามารถต่อวงจรอยู่ตลอดเวลา (ไม่ต้องดับไฟถ้าจ่ายไปยังผู้ใช้) โดยจะต่อเข้ากับบัสส่งผ่านและใช้เบรคเกอร์ที่เรียกว่าเบรกเกอร์ไท (Tie Breaker) ซึ่งต่ออยู่ระหว่างบัสทั้งสองแทน ซึ่งเบรกเกอร์ไทจะทำหน้าที่แทนเบรกเกอร์ของสายส่ง ดังนั้นจะสามารถทำการซ่อมบำรุงได้ครั้งละ 1 เบรคเกอร์

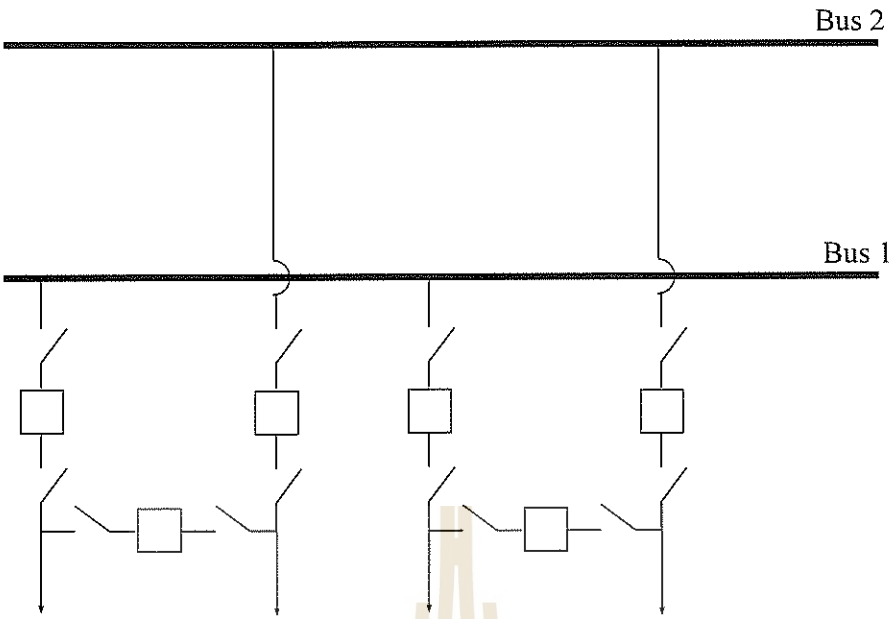


รูปที่ 1.8 การจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์เดี่ยว (Two bus, Single breaker)

การจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์คู่ (Two bus, two breakers) หรือแบบ Double Bus Double Breaker สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.9 การจัดบัสแบบนี้สามารถตัดแยกบัสใดบัสหนึ่งหรือเบรคเกอร์ที่ต่ออยู่กับบัสใดบัสหนึ่งออกจากวงจรโดยที่ยังต่อวงจรอยู่ นอกจากนี้การซ่อมบำรุงบัสยังสามารถทำได้โดยยังต่อวงจรอยู่เช่นกัน การจัดบัสแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นสูงมากที่สุด แต่มักจะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง เพราะต้องใช้จำนวนเบรกเกอร์เป็นสองเท่าของจำนวนวงจรสายส่งหรือหม้อแปลงที่ต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าย่อย



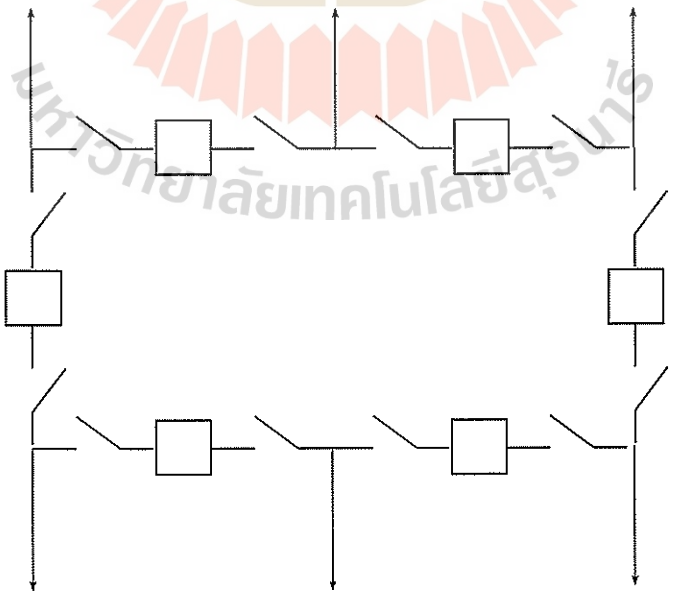
รูปที่ 1.9 การจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์คู่ (Two bus, two breakers)



รูปที่ 1.10 การจัดบัสแบบหนึ่งเบรกเกอร์ครึ่ง (Breaker and a half)

การจัดบัสแบบหนึ่งเบรกเกอร์ครึ่ง (Breaker and a half) แสดงได้ดังรูปที่ 1.10 เป็นการจัดวางบัสที่นิยมใช้มากที่สุดในระบบไฟฟ้าแรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage, EHV) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงเทียบเคียงกับการจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์คู่แต่ไม่ต้องใช้จำนวนเบรกเกอร์ถึงสองเท่ากล่าวคือใช้เพียงหนึ่งเท่าครึ่งของจำนวนวงจรทั้งหมด และโดยทั่วไปจะต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบผ่านเบรกเกอร์ 2 ตัวขนานกันเพื่อความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือได้ของระบบมากกว่า ทำให้มักจะใช้การจัดบัสแบบหนึ่งเบรกเกอร์ครึ่งการเชื่อมต่อดังกล่าว

การจัดบัสแบบวงแหวน (Ring bus) แสดงได้ดังรูปที่ 1.11 จะมีความน่าเชื่อถือได้สูงเช่นเดียวกัน แต่เมื่อมีการซ่อมบำรุงเบรกเกอร์ตัวหนึ่งวงแหวนจะไม่ต่อกันทำให้กลายเป็นระบบแบบเรเดียลซึ่งมีความน่าเชื่อถือได้ต่ำลง



รูปที่ 1.11 การจัดบัสแบบวงแหวน (Ring bus)

1.3 สาเหตุและสถิติการเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังมีความสำคัญมากต่อระบบไฟฟ้าเนื่องจากจะอุปกรณ์สำหรับป้องกันความเสียหายที่มีต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น เกิดการลัดวงจรไฟฟ้า (Short Circuit) เกิดแรงดันกระชาก (Surge) หรือเกิดความผิดปกติอื่น ๆ โดยปกติแล้วการป้องกันระบบไฟฟ้าจะเป็นการตัดวงจรแยก (Isolate) อุปกรณ์ที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบไฟฟ้ากำลังก่อนที่จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้น การตัดแยกอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นจะต้องทำให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนี้อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องมีความไวมากพอที่จะตรวจจับการผิดพร่องที่เกิดขึ้นและจะต้องทำการตัดแยกอุปกรณ์ออกจากระบบอย่างเหมาะสมด้วย ในปัจจุบันอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังจะทำงานด้วยระบบอัตโนมัติที่ สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นและส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ตัด-ต่อวงจรซึ่งก็คือเบรกเกอร์ได้โดยไม่ต้องรอคำสั่งจากผู้ควบคุม ชุดของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวเรียกว่า ระบบป้องกัน(Protection System)

การเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากจะเกิดจากการลัดวงจรแล้วยังเกิดขึ้นได้จากการเปิดวงจร (Open Circuit) ด้วย แต่การเกิดความผิดพร่องเปิดวงจรจะเกิดขึ้นไม่บ่อยนักและมักจะเปลี่ยนไปเป็นการลัดวงจรในเวลาต่อมา และในแง่ของความเสียหายหรืออันตรายที่มีต่อระบบแล้วการลัดวงจรจะมีมากกว่า

ตารางที่ 1.1 เปอร์เซนต์การเกิดความผิดพร่องในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง

อุปกรณ์	% การเกิดความผิดพร่อง
สายส่งไฟฟ้า	50
สายเคเบิ้ลใต้ดิน	9
หม้อแปลง	10
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	7
สวิตช์เกียร์	12
อุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ควบคุม	12

ตารางที่ 1.2 เปอร์เซนต์การเกิดความผิดพร่องแบบต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ชนิดของการผิดพร่อง	% การเกิดความผิดพร่อง
การลัดวงจรลงดิน (Line to Ground)	85
การลัดวงจรระหว่างสาย (Line to Line)	8
การลัดวงจรระหว่างสายและลงดิน (Double Line to Ground)	5
การลัดวงจรทั้งสามเฟส (Three phase)	2

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นและไม่สามารถตัดแยกอุปกรณ์ที่ลัดวงจรออกจากระบบได้เร็วพอ จะเกิดผลต่าง ๆ ต่อไปนี้ตามมา

1. เสถียรภาพ (Stability) ของระบบจะลดลง
2. เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์จากกระแสลัดวงจร กระแสที่ไม่สมดุล หรือจากแรงดันตก ที่เกิดจากการลัดวงจร
3. เกิดการระเบิดในอุปกรณ์ที่มีฉนวนน้ำมัน และอาจเป็นผลให้เกิดเพลิงไหม้ และอาจสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ในบริเวณใกล้เคียง
4. อุปกรณ์ป้องกันส่วนอื่นอาจทำการตัดวงจรเป็นลูกโซ่ (Cascade) ทำให้เกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างกว่าที่ควรจะเป็น

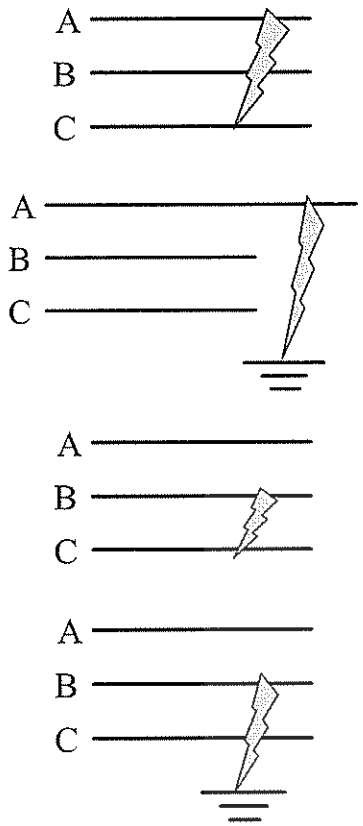
ตารางที่ 1.1 แสดงสถิติการเกิดความผิดพร่องเปรียบเทียบกันในอุปกรณ์ต่าง ๆ ระบบไฟฟ้า ส่วนตารางที่ 1.2 แสดงสถิติการเกิดการผิดพร่องในลักษณะต่าง ๆ *[B. Ram and D. N. Vishwakarma, 1997]* ทั้งนี้ในการออกแบบระบบป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังจะคำนึงถึงความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพร่องต่าง ๆ ด้วย ซึ่งจะเห็นว่าการเกิดความผิดพร่องถึง 50% จะเกิดที่สายส่งไฟฟ้าและการเกิดการผิดพร่อง 85% เป็นการเกิดการลัดวงจรลงดิน

1.4 การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง

การศึกษาและวิเคราะห์การลัดวงจรในระบบไฟฟ้าเป็นการวิเคราะห์ที่สำคัญอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลการวิเคราะห์การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังจะนำมาใช้ในการเลือกขนาดของอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถทนและตัดแยกอุปกรณ์จากกระแสลัดวงจรได้อย่างปลอดภัย ทั้งนี้การลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบประกอบด้วย

1. การลัดวงจรแบบ 3 เฟส (Three-Phase Fault) หรือเรียกว่าการลัดวงจรแบบสมมาตร (Symmetrical Fault)
2. การลัดวงจรสายเส้นหนึ่งลงดิน (Single Line to Ground, SLG)
3. การลัดวงจรระหว่างสาย (Line to Line Fault, LL)
4. การลัดวงจรสายสองเส้นลงดิน (Line to Line to Ground, LLG หรือ Double-Line to Ground)

รูปที่ 1.12 แสดงแผนภาพการลัดวงจรแต่ละแบบ ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วการลัดวงจรแบบ 3 เฟสจะส่งผลให้เกิดกระแสลัดวงจรสูงที่สุดที่จุดลัดวงจรเดียวกัน ส่วนการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดคือการลัดวงจรสายเส้นหนึ่งลงดิน ถึงแม้ว่าโดยมากแล้วจะมีค่ากระแสลัดวงจรต่ำที่สุดก็ตาม



การลัดวงจรแบบ 3 เฟส (Three-Phase Fault)

การลัดวงจรสายเส้นหนึ่งลงดิน (Single Line to Ground, SLG) ระหว่างเฟส A และลงดิน

การลัดวงจรระหว่างเฟส (Line to Line Fault, LL) ระหว่างเฟส B และ C

การลัดวงจรระหว่างเฟสและลงดิน (Line to Line to Ground, LLG หรือ Double-Line to Ground) ระหว่างเฟส B และ C และลงดิน

รูปที่ 1.12 แผนภาพการลัดวงจรแต่ละแบบ

ทั้งนี้เมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าของกระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force, emf) และค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระบบรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าระหว่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าและจุดที่ลัดวงจร กระแสลัดวงจรที่ไหลในช่วง 2-3 ลูกคลื่น (2-3 cycles) แรกกับกระแสลัดวงจรหลังเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) หรือเวลาผ่านไปนาน จะมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การกำหนดขนาดของเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับกระแสในสภาวะทำงานปกติ แต่ยังขึ้นอยู่กับกระแสสูงสุดที่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นก่อนที่เบรกเกอร์จะต้องทำการตัดวงจรโดยในการวิเคราะห์การลัดวงจรที่ไม่ใช่การลัดวงจรแบบ 3 เฟส (กล่าวคือการลัดวงจรสายเส้นหนึ่งลงดิน การลัดวงจรระหว่างเฟส หรือการลัดวงจรระหว่างเฟสและลงดิน) จะทำให้เกิดกระแสไหลในลักษณะที่ไม่สมมาตรกันใน 3 เฟส ซึ่งการวิเคราะห์จะมีความซับซ้อนโดยสามารถใช้การคำนวณด้วยวิธีส่วนประกอบสมมาตรในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งจะแสดงในบทที่ 4 ในการคำนวณได้ และรายละเอียดการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรจะแสดงในบทที่ 5

1.5 พื้นฐานการคำนวณในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.5.1 ค่าเฟเซอร์

การวิเคราะห์แบบเฟสเซอร์ (Phasors) เป็นการแปลงสัญญาณแบบไซนูซอยด์ (Sinusoidal) ที่อยู่ในสถานะอยู่ตัว (Steady state) ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน (Complex number) ที่มีค่าจริง (Real) และค่าจินตภาพ

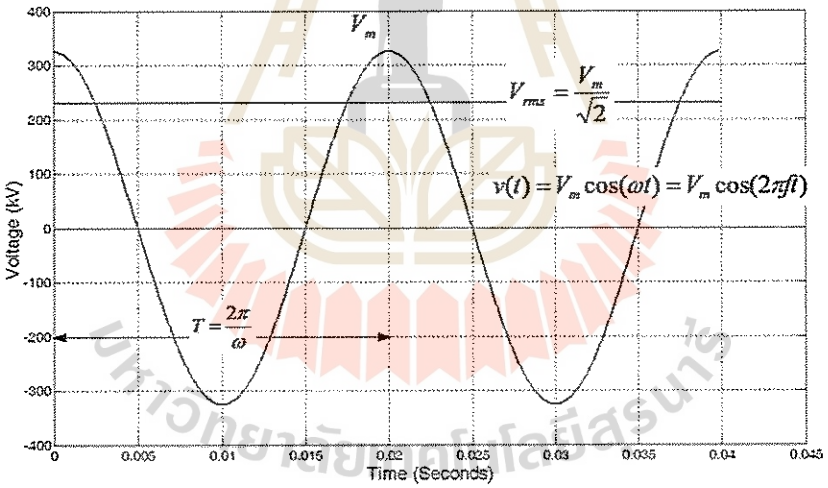
(Imaginary) เรียกว่า เฟสเซอร์ (Phasors) โดยในทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังจะนิยมแสดงรูปสัญญาณแบบไซนูซอยด์ (Sinusoidal) ด้วยฟังก์ชั่นโคไซน์ (Cosine) เพื่อความสะดวกในการคำนวณ

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current, AC) ที่มีสถานะอยู่ตัว (Steady state) นิยมวิเคราะห์ด้วยค่าเทียบเท่ากับค่าที่ส่งผ่านกำลังจริง (Real power) ของไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, DC) ที่เท่ากับกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่พิจารณา ซึ่งจะเท่ากับ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square, RMS) ซึ่งหาได้จากการหาค่าเฉลี่ยค่ายกกำลังสองของฟังก์ชันแล้วนำมาถอดรากที่สอง ดังสมการที่ (1.1)

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} (v(t))^2 dt}{t_2 - t_1}} \quad \text{V} \qquad (1.1)$$

โดยที่ V_{rms} คือค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square, RMS) ของ $v(t)$ ในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 ซึ่งในกรณีของสัญญาณไฟฟ้าแบบโคไซน์จะสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} (v(t))^2 dt}{t_2 - t_1}} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} (V_m \cos(2\pi ft))^2 dt}{t_2 - t_1}} \quad \text{V} \qquad (1.2)$$



รูปที่ 1.13 แสดงค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square, RMS)

เมื่อพิจารณาในช่วง 1 คาบเวลา (T) เท่ากับ $\frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$ จะได้ว่า เวลา $t_1 = 0$ และ $t_2 = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{0}^{T} (V_m \cos(2\pi ft))^2 dt}{T}} = \sqrt{\frac{\int_{0}^{T} (V_m \cos(\omega t))^2 dt}{T}} \quad \text{V} \qquad (1.3)$$

และจะได้ว่า

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T (V_m)^2(\cos(2(\omega t))+1)dt}{2T}} = \sqrt{\frac{(V_m)^2}{2T}\int_0^T (\cos(2\omega t)+1)dt}$$

$$= \sqrt{\frac{(V_m)^2}{2T}\left[\frac{\sin(2\omega t)}{2\omega}+t\right]_{t=0}^{t=T}} = \sqrt{\frac{(V_m)^2}{2T}\left(\left[\frac{\sin(2\omega T)}{2\omega}+T\right]-\left[\frac{\sin(2\omega(0))}{2\omega}+0\right]\right)}$$

$$= \sqrt{\frac{(V_m)^2}{2T}([0+T]-[0+0])} = \sqrt{\frac{(V_m)^2}{2}} \quad \text{V} \qquad (1.4)$$

นั่นคือ

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{V} \qquad (1.5)$$

ดังนั้นในกรณีของสัญญาณแบบไซนูซอยด์นั้นค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square, RMS) จะมีค่าเท่ากับค่ายอดของสัญญาณ (Amplitude) หารด้วยรากที่สองของสอง($\sqrt{2}$)โดยสามารถแสดงดังแสดงในรูปที่ 1.13

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าจะสามารถแสดงเป็นจำนวนเชิงซ้อนเพื่อการวิเคราะห์รูปสัญญาณโคไซน์และจะสามารถทำได้โดยการแทนรูปสัญญาณเป็นค่าเฟสเซอร์ได้ดังสมการที่ (1.6) และรูปที่ 1.14

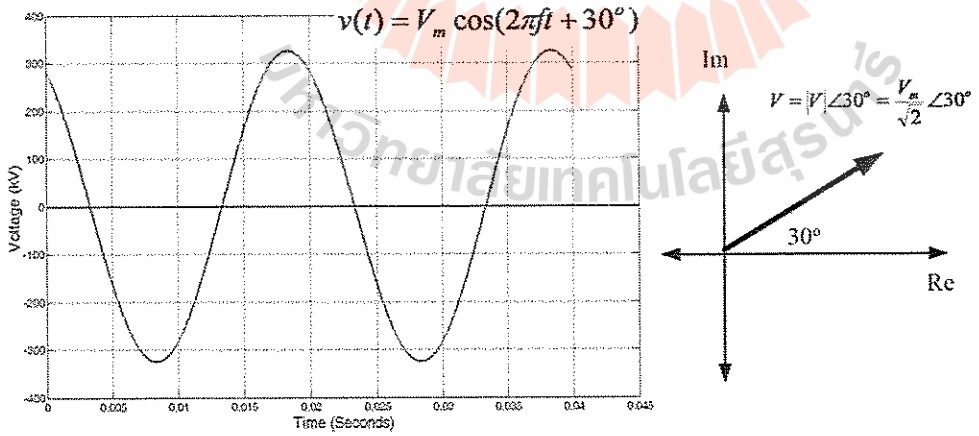
$$V = |V|e^{j\theta} = |V|\angle\theta^o = |V|(\cos\theta + j\sin\theta) \quad \text{V} \qquad (1.6)$$

โดยที่

V เป็นค่าเฟสเซอร์ที่แสดงแทนค่าแรงดันแบบสัญญาณโคไซน์ $v_1(t) = V_m\cos(2\pi ft+\theta)$

$|V|$ เป็นขนาดของ V ซึ่งเท่ากับค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square, RMS)

นั่นคือ $|V| = V_{rms}$



รูปที่ 1.14 แสดงการใช้เฟสเซอร์ในการแทนสัญญาณแบบโคไซน์โดยมีความถี่ (f) 50 Hz และแรงดัน (V_{rms}) 230 kV และมีการเลื่อนเฟสจากจุดกำเนิดเป็นมุมนำหน้า 30 องศา

ตัวอย่างที่ 1.1 แรงดันรูปโคไซน์มีค่ายอด 325.269 kV ความถี่ 50 Hz มีมุมเทียบกับจุดอ้างอิงนำหน้าอยู่ 30 องศา มีรูปสัญญาณเป็น $v(t) = 325.269\cos(2\pi(50)t + 30^o)$ kV จะสามารถแทนเป็นค่าเฟสเซอร์ได้เท่าใด

วิธีทำ แรงดันรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square, RMS)

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{325.269}{\sqrt{2}} = 230 \quad \text{kV}$$

เขียนในรูปเฟสเซอร์ได้เป็น

$$V = 230\angle 30^o \quad \text{kV}$$

ตัวอย่างที่ 1.2 แรงดันรูปโคไซน์มีค่าแสดงเป็นเฟสเซอร์เป็น $22\angle -30^o$ kV ความถี่ 50 Hz จะสามารถเขียนแสดงแทนแรงดันในรูปโคไซน์ได้เป็นค่าเท่าใด

วิธีทำ จากค่า $V_{rms} = 22$ kV และมุมเฟสล้าหลัง 30 องศา

ค่ายอดของแรงดัน

$$V_m = \sqrt{2}V_{rms} = \sqrt{2}(22) = 31.113 \quad \text{kV}$$

เขียนในรูปสัญญาณโคไซน์ได้เป็น

$$v(t) = 31.113\cos(2\pi(50)t - 30^o) \quad \text{kV}$$

1.5.2 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จะใช้ระบบในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะปกติ เราจะถือว่าระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแบบ 3 เฟส ได้ดุลพิจารณาระบบ 3 เฟส ดังรูป 1.15 โดยมีสัญญาณแรงดันแสดงดังรูปที่ 1.16

แรงดันในระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะมีมุมเฟสต่างกันอยู่ 120 องศา โดยสามารถแสดงได้ดังสมการ

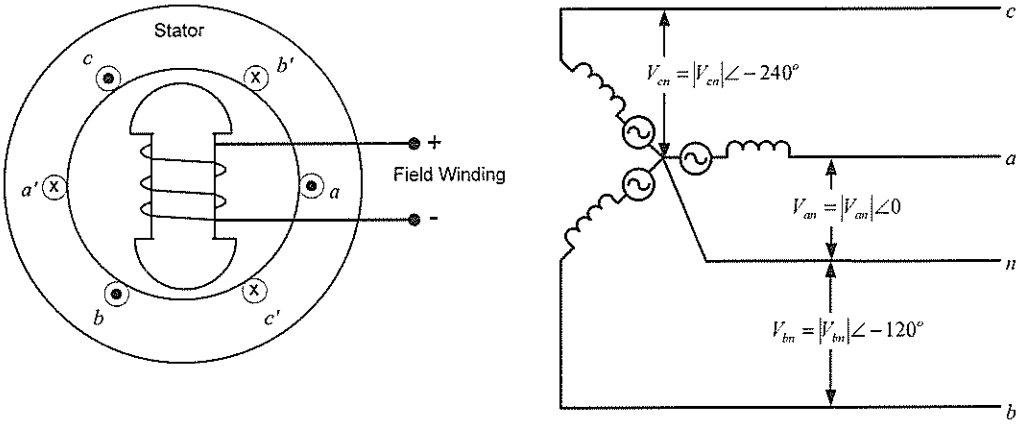
$$V_{an} = |V_{an}|\angle 0^o \quad \text{V} \qquad (1.7)$$

$$V_{bn} = |V_{bn}|\angle -120^o \quad \text{V} \qquad (1.8)$$

$$V_{cn} = |V_{cn}|\angle -240^o \quad \text{V} \qquad (1.9)$$

โดยที่

V_{an} V_{bn} และ V_{cn} คือค่าแรงดันระหว่างเฟส *a* *b* และ *c* กับจุดนิวทรัล *n* ตามลำดับ



รูปที่ 1.15 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟสและวงจรสมมูล

รูปเฟสเซอร์ของแรงดันในระบบไฟฟ้า 3 เฟสและสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.17 เมื่อพิจารณาแรงดันระหว่างเฟส a-b, b-c, c-a จะสามารถแสดงได้ดังรูป 2.15b จะเห็นว่าแรงดันระหว่างเฟส จะมีการเลื่อนเฟสไปจากแรงดันเฟส (ระหว่างเฟสกับนิวตรอล)ไป 30 องศา นั่นคือ V_{ab} จะนำหน้า V_{an} อยู่ 30 องศา และมีขนาดเป็น $\sqrt{3}$ เท่าของ V_{an} ด้วย นั่นคือ

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} \angle 30^o \quad \text{V} \quad (1.10)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3} V_{bn} \angle 30^o = \sqrt{3} V_{an} \angle 30^o - 120^o = V_{ab} \angle -90^o \quad \text{V} \quad (1.11)$$

$$V_{ca} = \sqrt{3} V_{cn} \angle 30^o = \sqrt{3} V_{an} \angle 30^o - 240^o = V_{ab} \angle -210^o \quad \text{V} \quad (1.12)$$

โดยที่

V_{ab} V_{bc} และ V_{ca} คือค่าแรงดันระหว่างเฟส a กับเฟส b ระหว่างเฟส b กับเฟส c และ เฟส c กับเฟส a ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จ่ายแก่โหลด 3 เฟสได้ดุล ดังแสดงในรูปที่ 1.18 ค่ากำลังที่จ่ายจะเป็น

$$S_{3\phi} = V_{an} I_a^* + V_{bn} I_b^* + V_{cn} I_c^* \quad \text{VA} \quad (1.13)$$

เมื่อ

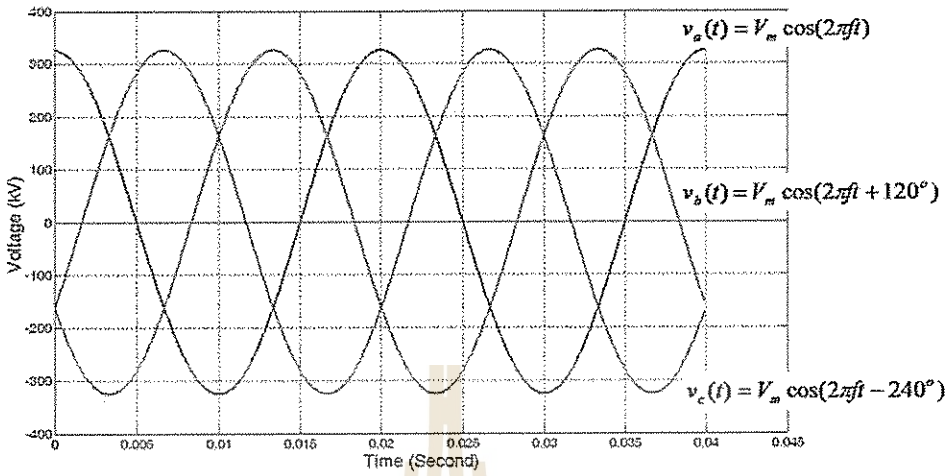
$S_{3\phi}$ คือกำลังปรากฏที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุลจ่ายแก่โหลดไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล มีหน่วยเป็น วีเอ (VA) หรือ เมกกะวีเอ (MVA)

ในกรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุลจ่ายโหลดแบบ 3 เฟสได้ดุล และกระแสล้าหลัง (Lagging) แรงดันเป็นมุม θ จะได้ว่า

$$I_a = |I_a| \angle -\theta \quad \text{A} \quad (1.14)$$

$$I_b = |I_a| \angle -\theta - 120^o \quad \text{A} \quad (1.15)$$

$$I_c = |I_a| \angle -\theta - 240^o \quad \text{A} \quad (1.16)$$



รูปที่ 1.16 สัญญาณแรงดันในระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล

ดังนั้น

$$\begin{aligned} S_{3\phi} &= V_{an} I_a^* + V_{bn} I_b^* + V_{cn} I_c^* \\ &= \left[|V_{an}| \angle 0^o \right] \left[|I_a| \angle -\theta\right]^* + \left[|V_{an}| \angle -120^o \right] \left[|I_a| \angle -\theta - 120^o\right]^* + \\ &\qquad \left[|V_{an}| \angle -240^o \right] \left[|I_a| \angle -\theta - 240^o\right]^* \\ &= \left[|V_{an}| \angle 0^o \right] \left[|I_a| \angle \theta\right] + \left[|V_{an}| \angle -120^o \right] \left[|I_a| \angle \theta + 120^o\right] + \\ &\qquad \left[|V_{an}| \angle -240^o \right] \left[|I_a| \angle \theta + 240^o\right] \\ &= |V_{an}| |I_a| \angle \theta + |V_{an}| |I_a| \angle \theta + |V_{an}| |I_a| \angle \theta \\ &= 3|V_{an}| |I_a| \angle \theta \quad \text{VA} \quad (1.17) \end{aligned}$$

นั่นคือ

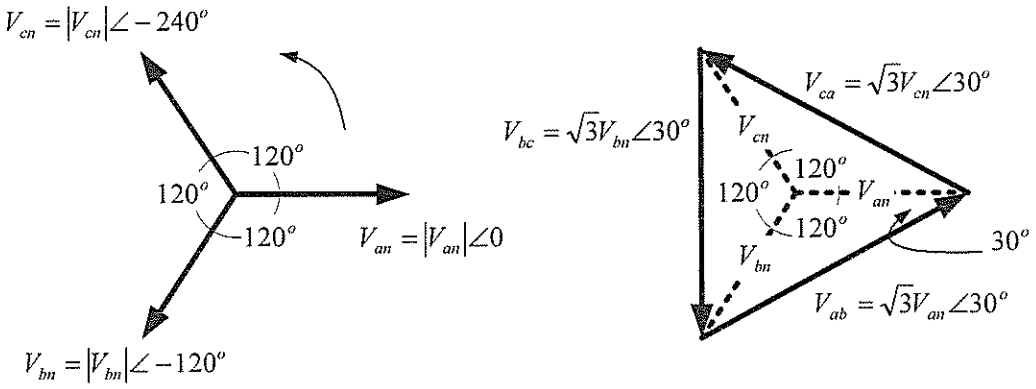
$$P_{3\phi} = 3|V_{an}| |I_a| \cos\theta \quad \text{W} \quad (1.18)$$

$$Q_{3\phi} = 3|V_{an}| |I_a| \sin\theta \quad \text{Var} \quad (1.19)$$

โดยที่

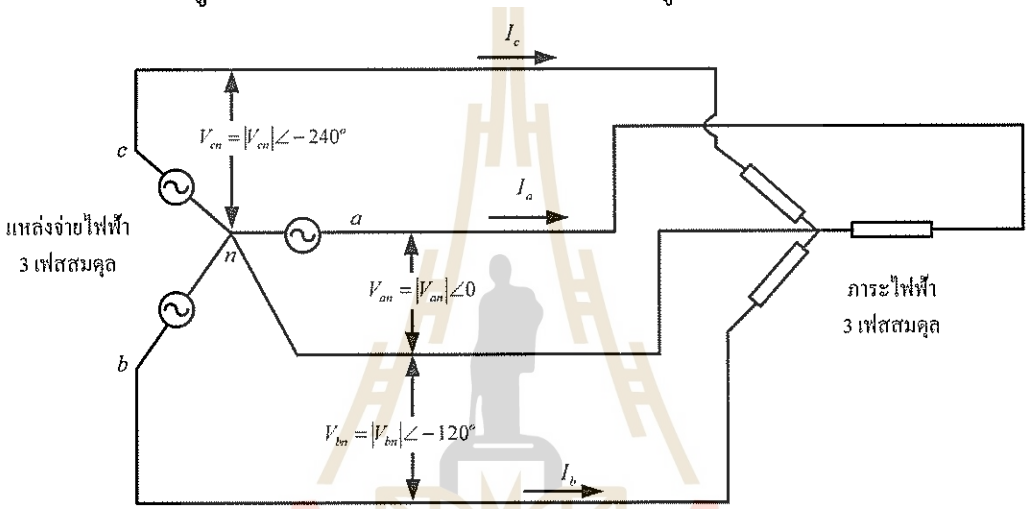
$P_{3\phi}$ คือกำลังจริงที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุลจ่ายแก่โหลดไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล มีหน่วยเป็น วัตต์ (W) หรือ เมกกะวัตต์ (MW)

$Q_{3\phi}$ คือกำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุลจ่ายแก่โหลดไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล มีหน่วยเป็น วาร์ (Var) หรือ เมกกะวาร์ (MVar)



a แรงดันเฟส b แรงดันระหว่างเฟส

รูปที่ 1.17 แรงดันในระบบไฟฟ้า 3 เฟสในรูปของเฟสเซอร์



รูปที่ 1.18 การจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสแก่โหลดไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล

เมื่อแทนค่าขนาดของแรงดันระหว่างเฟส $|V_{an}|$ ในรูปขนาดแรงดันระหว่างเฟส $|V_{ab}|$ คือ $|V_{an}| = \frac{|V_{ab}|}{\sqrt{3}}$ จะได้ว่า

$$S_{3\phi} = 3\frac{|V_{ab}|}{\sqrt{3}}|I_a| \angle \theta$$
$$= \sqrt{3}|V_{ab}||I_a| \angle \theta \quad \text{VA} \quad (1.20)$$

และ

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}|V_{ab}||I_a| \cos\theta \quad \text{W} \quad (1.21)$$
$$Q_{3\phi} = \sqrt{3}|V_{ab}||I_a| \sin\theta \quad \text{Var} \quad (1.22)$$

โดยปกติแล้วเมื่อกล่าวถึง ค่าแรงดัน จะหมายถึงแรงดันระหว่างเฟส (Line to Line Voltage) และเมื่อกล่าวถึงค่ากำลังจะหมายถึงค่ากำลังทั้ง 3 เฟส ดังนั้นเมื่อเขียนสมการกำลังไฟฟ้า 3 เฟสในรูปแบบที่นิยมทั่วไป จะได้ว่า

$$S = S_{3\phi} = 3|V_p||I_p|\angle\theta = \sqrt{3}|V||I|\angle\theta \quad \text{VA} \quad (1.23)$$

$$P = P_{3\phi} = 3|V_p||I_p|\cos\theta = \sqrt{3}|V||I|\cos\theta \quad \text{W} \quad (1.24)$$

$$Q = Q_{3\phi} = 3|V_p||I_p|\sin\theta = \sqrt{3}|V||I|\sin\theta \quad \text{Var} \quad (1.25)$$

เมื่อ

S หมายถึง กำลังปรากฏที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุลจ่ายแก่โหลดไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล ($S_{3\phi}$)

P หมายถึง กำลังจริงที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุลจ่ายแก่โหลดไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล ($P_{3\phi}$)

Q หมายถึง กำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุลจ่ายแก่โหลดไฟฟ้า 3 เฟสได้ดุล ($Q_{3\phi}$)

V_p คือ แรงดันเฟสหรือระหว่างเฟสกับนิวทรัล (Phase Voltage)

V คือ แรงดันระหว่างเฟส (Line to Line Voltage)

I_p คือ กระแสที่ไหลในเฟส (Line Current)

I คือ กระแสที่ไหลในสาย (Line Current)

ซึ่งในกรณีต่อแบบ Y จะได้ว่า $I = I_p$ และ $V = \sqrt{3}V_p\angle 30^\circ$ และสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้เป็น

$$S = P + jQ \quad \text{VA} \quad (1.26)$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{VA} \quad (1.27)$$

ดังนั้นในระบบไฟฟ้าเป็นแบบ 3 เฟสได้ดุล การคำนวณสามารถพิจารณาโดยไม่จำเป็นต้องใช้ค่าแรงดันหรือกระแสของทุกเฟส แต่สามารถคำนวณจากค่าแรงดันและกระแสระหว่างเฟส หรือระหว่างเฟสกับนิวตรอลเพียงตัวใดตัวหนึ่งแทน เรียกว่า การคำนวณแบบต่อเฟส (Per-Phase) การคำนวณด้วยวิธีต่อเฟสจะต้องพิจารณาแรงดันเป็นแรงดันระหว่างเฟสกับนิวตรอล และแปลงโหลดที่เป็นแบบเดลตา (Delta) ให้เป็นวงจรสมมูลแบบวาย (Y)

1.5.3 การคำนวณแบบต่อหน่วย (Per Unit Calculation)

การคำนวณในระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นระบบใหญ่จะนิยมใช้วิธีการคำนวณโดยเปลี่ยนหน่วยของตัวแปร ไม่ว่าจะเป็น กำลัง แรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์ ให้อยู่ในหน่วยที่เรียกว่าค่าต่อหน่วย (Per-Unit, p.u.) วิธีการนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่อยู่คนละด้านของหม้อแปลงโดยไม่ต้องอ้างอิงค่าตามอัตราส่วนหม้อแปลง และสามารถวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงโดยไม่ต้องคำนึงว่าเป็นค่าวงจรสมมูลทางด้านปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ

การคำนวณแบบต่อหน่วย ทำได้โดยเลือกค่าฐาน (Base) ก่อนเพื่อนำไปคำนวณหาค่าต่อหน่วยของค่าต่าง ๆ ในระบบค่าต่อหน่วยเป็นค่าที่เทียบกับค่าฐานโดยอาจแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์หรือค่าต่อหน่วยก็ได้ โดยมีวิธีการคำนวณค่าต่อหน่วยดังต่อไปนี้

- เลือกค่าฐาน (Base Value) โดยมากจะเลือกกำหนด ค่าฐานของแรงดัน (Base Voltage, Base kV) ซึ่งจะเป็นค่าแรงดันระหว่างเฟส (Line-to-Line Voltage) ที่ใช้อ้างอิง และค่าฐานกำลัง (Base kVA, Base MVA) ซึ่ง

เป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิง เช่น ถ้าเลือกค่าฐานเป็น 230 kV, 100 MVA แรงดันที่มีค่าเป็น 220 kV จะแสดงได้เป็นค่า 220/230 = 0.957 p.u. กำลังค่า 102 MVA จะแสดงได้เป็นค่า 102/100 = 1.02 p.u.

- คำนวณค่าฐานของกระแส (Base Current) และ ค่าฐานของอิมพีแดนซ์ (Base Impedance) จากค่าฐานของแรงดัน (Base Voltage) และ ค่าฐานกำลัง (Base MVA) ที่เลือกไว้ โดย

ค่าฐานกระแส (Base Current)

$$\text{Base Current} = \frac{\text{Base kVA}}{\sqrt{3}\ \text{Base kV}} = \frac{\text{Base MVA} \times 1000}{\sqrt{3}\ \text{Base kV}} \quad \text{A} \qquad (1.28)$$

ค่าฐานอิมพีแดนซ์ (Base Impedance)

$$\text{Base Impedance} = \frac{(\text{Base kV})^2 \times 1000^2}{\text{Base kVA} \times 1000} = \frac{(\text{Base kV})^2 \times 1000}{\text{Base kVA}} = \frac{(\text{Base kV})^2}{(\text{Base MVA})} \quad \text{Ohm} \qquad (1.29)$$

การเปลี่ยนค่าฐานในการคำนวณต่อหน่วยสามารถทำได้ดังสมการ

$$\text{New Per - Unit Value} = \frac{\text{Old Per - Unit Value}}{\text{New Base}} \times (\text{Old Base}) \qquad (1.30)$$

โดยทั่วไปการบอกค่าอิมพีแดนซ์หรือรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลังจะนิยมบอกด้วยค่าเปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ (Percent Impedance) ซึ่งก็คือค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วย (Per-Unit Impedance) ที่คำนวณโดยใช้พิกัดกำลังและพิกัดแรงดันของหม้อแปลงเป็นค่าฐาน

ตัวอย่างที่ 1.3 หม้อแปลง 100 MVA 6.6 kV/380 V มีค่าอิมพีแดนซ์ 10 % จงหาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงนี้เป็น Ohm

วิธีทำ ค่าอิมพีแดนซ์ 10 % หมายถึงมีค่าอิมพีแดนซ์ 0.1 p.u. ที่คำนวณจาก

- ค่าฐานกำลังงาน (Base MVA) = 100 MVA ค่าฐานแรงดัน (Base Voltage) = 6.6 kV ด้านแรงสูง หรือ
- ค่าฐานกำลังงาน (Base MVA) = 100 MVA ค่าฐานแรงดัน (Base Voltage) = 380 V ด้านแรงต่ำ

คำนวณโดยใช้ค่าฐานพิกัดแรงดันด้านแรงสูง (6.6 kV)

$$\text{Base Impedance} = \frac{(\text{Base kV})^2}{\text{Base MVA}} = \frac{6.6^2}{100} = 0.4356 \quad \text{Ohm}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{6.6kV} = 0.1$ p.u.

จะมีค่าเป็น $Z_{6.6kV} = 0.1 \times \text{Base Impedance} = 0.1 \times 0.4356 = 0.04356$ Ohm

ในกรณีคำนวณโดยใช้ค่าฐานพิกัดแรงดันด้านแรงต่ำ (380 V)

$$\text{Base Impedance} = \frac{(\text{Base kV})^2}{(\text{Base MVA}} = \frac{0.38^2}{100} = 0.001444 \quad \text{Ohm}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{380V} = 0.1$ p.u.

จะมีค่าเป็น $Z_{380V} = 0.1 \times (\text{Base Impedance}) = 0.1 \times 0.001444 = 0.0001444$ Ohm

จะเห็นได้ว่า $Z_{6.6kV} = 0.04356 = \frac{(6.6 \times 1000)^2}{380^2} 0.0001444 = \frac{N_1^2}{N_2^2} Z_{380V}$

จะเห็นว่าในการคำนวณสามารถใช้ค่าเปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง เปลี่ยนเป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วย (Per-Unit Impedance) โดยหารด้วย 100 ได้ทันทีซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยที่สามารถอ้างอิงได้ทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ ถ้าในการคำนวณระบบไฟฟ้าที่วิเคราะห์อยู่ใช้ค่าฐานที่ต่างจากพิกัดของหม้อแปลง จะต้องทำการแปลงค่า Per-unit ของหม้อแปลงเป็นค่าที่ใช้ค่าฐานเดียวกันกับในการคำนวณ และในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจะสามารถใช้สมการ

$$S = VI^* \qquad (1.31)$$

โดยใช้ค่าตัวแปรในสมการเป็นค่าต่อหน่วย (Per Unit) นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าฐานแรงดันเฟส (Line to Neutral Voltage) และค่ากำลังไฟฟ้าต่อเฟสได้คือ

ค่าฐานแรงดันเฟส (Base Line to Neutral Voltage) คำนวณได้จาก

$$\text{Base kV}_{\text{LN}} = \frac{\text{Base kV}}{\sqrt{3}} \quad \text{kV} \qquad (1.32)$$

ค่าฐานกำลังต่อเฟส (Base per Phase MVA) คำนวณได้จาก

$$\text{Base MVA}_{1\phi} = \frac{\text{Base MVA}}{3} \quad \text{MVA} \qquad (1.33)$$

ตัวอย่างที่ 1.4 ที่สถานีไฟฟ้ามีแรงดัน 110 kV มีกำลังจริงไหลเข้า 15000 kW จงแสดงค่าแรงดันเฟส แรงดันระหว่างเฟส กำลังจริง และกำลังจริงต่อเฟส เป็นค่าต่อหน่วย (Per Unit) โดยใช้ค่าฐานกำลัง 100 MVA และค่าฐานแรงดัน 115 kV

วิธีทำ

ค่าแรงดันระหว่างเฟส 110 kV $V = \frac{110}{115} = 0.9565$ p.u.

ค่ากำลังไฟฟ้า 15000 kW = 15 MW $P = \frac{15}{100} = 0.15$ p.u.

ค่าฐานแรงดันเฟส (Base Line to Neutral Voltage)

$$\text{Base kV}_{\text{LN}} = \frac{\text{Base kV}}{\sqrt{3}} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.3953 \quad \text{kV}$$

$$V_{LN} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63.5085 \quad \text{kV}$$

แสดงเป็นค่าต่อหน่วย

$$V_{LN} = \frac{63.5085}{\text{Base kV}_{\text{LN}}} = \frac{63.5085}{66.3953} = 0.9565 \quad \text{p.u.}$$

ค่ากำลังไฟฟ้าต่อเฟส

$$\text{Base MVA}_{1\varphi} = \frac{\text{Base MVA}}{3} = \frac{100}{3} = 33.3333 \quad \text{MVA}$$

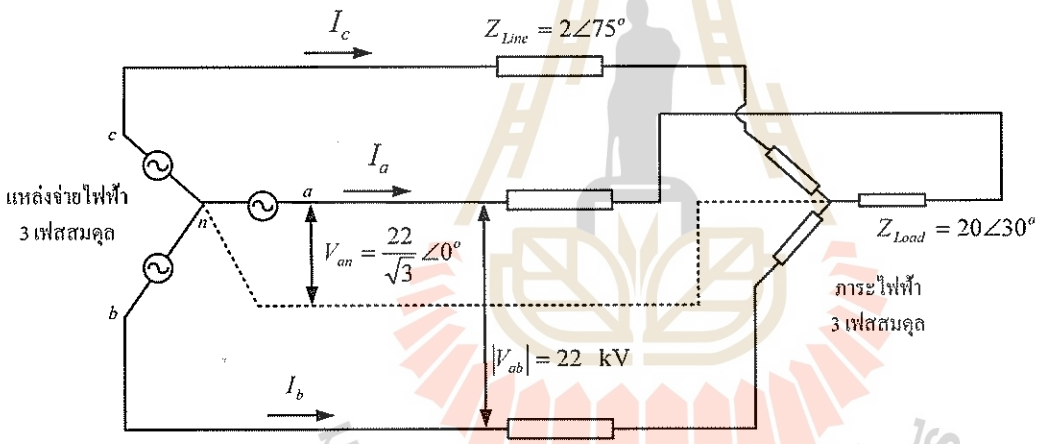
$$P_{1\phi} = \frac{15}{3} = 5 \quad \text{MVA}$$

แสดงเป็นค่าต่อหน่วย

$$P_{1\phi} = \frac{5}{\text{Base MVA}_{1\phi}} = \frac{5}{33.3333} = 0.15 \quad \text{p.u.}$$

จะเห็นว่าค่าต่อหน่วย (Per Unit) ของแรงดันระหว่างเฟสและแรงดันเฟสจะเท่ากัน และค่าต่อหน่วย (Per Unit) ของกำลังงานต่อเฟสและกำลังงานรวม 3 เฟสจะเท่ากัน

ตัวอย่างที่ 1.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสแรงดัน 22 kV จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ $20\angle 30^o$ Ohm ต่อแบบวายโดยผ่านสายตัวนำมีค่าอิมพีแดนซ์ $2\angle 75^o$ Ohm ดังรูปที่ 1.19 จงหาค่าแรงดันที่ขั้วของโหลดและกำลังที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายออกมาโดยใช้วิธีคำนวณแบบต่อหน่วย โดยใช้ค่าฐานแรงดัน 22 kV ค่าฐานกำลังไฟฟ้า 100 MVA



รูปที่ 1.19 วงจรไฟฟ้า 3 เฟสในตัวอย่างที่ 1.5

วิธีทำ

ใช้ค่าฐานแรงดัน 22 kV ค่าฐานกำลังไฟฟ้า 100 MVA ดังนั้น

$$\text{Base Current} = \frac{\text{Base MVA} \times 1000}{\sqrt{3}\,\text{Base kV}} = \frac{100 \times 1000}{\sqrt{3}(22)} = 2624.3194 \quad \text{A}$$

$$\text{Base Impedance} = \frac{(\text{Base kV})^2}{(\text{Base MVA})} = \frac{22^2}{100} = 4.84 \quad \text{Ohm}$$

เมื่อใช้มุมเฟสของแรงดันแหล่งจ่ายเป็นค่าอ้างอิง ค่าแรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าเป็น

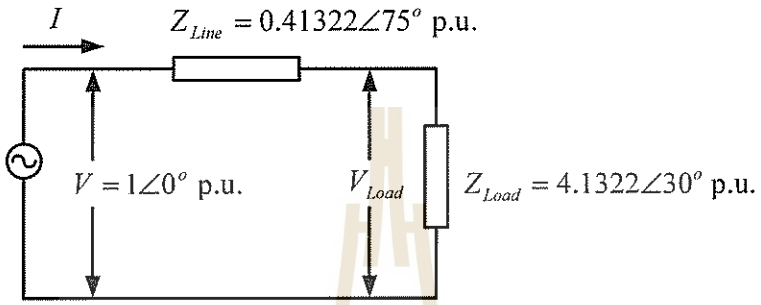
$$V = \frac{22\angle 0^o}{22} = 1\angle 0^o \quad \text{p.u.}$$

สามารถเขียนรูปวงจรได้ดังรูปที่ 1.20 โดยสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและของสายตัวนำเป็นค่าต่อหน่วยได้ดังนี้

$$Z_{Load} = 20\angle 30^o\ \Omega = \frac{20\angle 30^o}{4.84} = 4.1322\angle 30^o \quad \text{p.u.}$$

$$Z_{Load} = 2\angle 75^o\ \Omega = \frac{2\angle 75^o}{4.84} = 0.41322\angle 75^o \quad \text{p.u.}$$

สามารถเขียนแสดงวงจรสมมูลต่อเฟสต่อหน่วย (Per Phase Per Unit) ได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 1.20 วงจรสมมูลต่อเฟสต่อหน่วย (Per Phase Per Unit) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ 1.5

จากรูปที่ 1.20 กระแสจะมีค่าเป็น

$$I = \frac{1\angle 0^o}{0.41322\angle 75^o + 4.1322\angle 30^o} = 0.1875 - j0.1254 = 0.2255\angle -33.778^o \quad \text{p.u.}$$

ดังนั้นแรงดันเฟสที่ขั้วของโหลดจะเป็น

$$V_{Load} = IZ_{Load} = 0.9299 - j0.0614 = 0.9319\angle -3.778^o \quad \text{p.u.}$$

กำลังที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายออกมาคือ

$$S = VI^* = (1\angle 0^o)(0.2255\angle 33.778^o) = 0.2255\angle 33.778^o \quad \text{p.u.}$$

ตัวประกอบกำลังมีค่าเป็น $PF = \cos(33.778^o) = 0.831$ สภาวะล้าหลัง (Lagging)

$$I = (0.2255\angle -33.778^o)(\text{Base Current}) \quad \text{A}$$
$$= (0.2255\angle -33.778^o)(2624.3194) = 591.784\angle -33.778^o$$
$$V_{Load} = (0.9319\angle -3.778^o)(\text{Base Voltage}) \quad \text{kV}$$
$$= (0.9319\angle -3.778^o)(22) = 20.502\angle -3.778^o$$
$$S = 0.2255\angle 33.778^o\,(\text{Base MVA}) \quad \text{MVA}$$
$$= 0.2255\angle 33.778^o\,(100) = 225.5\angle 33.778^o$$

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1. องค์ประกอบในการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งตามหน้าที่ได้กี่ประเภท อะไรบ้าง แต่ละองค์ประกอบมีหน้าที่อย่างไร
2. จงอธิบายความแตกต่างของระบบไฟฟ้ากำลังแบบแขนงและแบบโครงข่าย พร้อมทั้งอธิบายถึงผลที่เกิดเมื่อมีการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละแบบ
3. จงอธิบายวิธีการจัดบัส พร้อมทั้งข้อดี ข้อเสีย ของแต่ละแบบ
4. เหตุใดในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังจึงให้ความสำคัญของการป้องกันการลัดวงจร (Short circuit) เป็นหลัก ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วยังมีความผิดพร่องแบบอื่นอีกเช่น การเปิดวงจร (Open circuit fault)
5. จงอธิบายพร้อมทั้งเสนอความคิดเห็นถึงผลที่เกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อระบบป้องกันไม่ทำงานหรือทำงานช้าเกินไปเมื่อเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
หลักการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง
(Principle of Power System Protection)

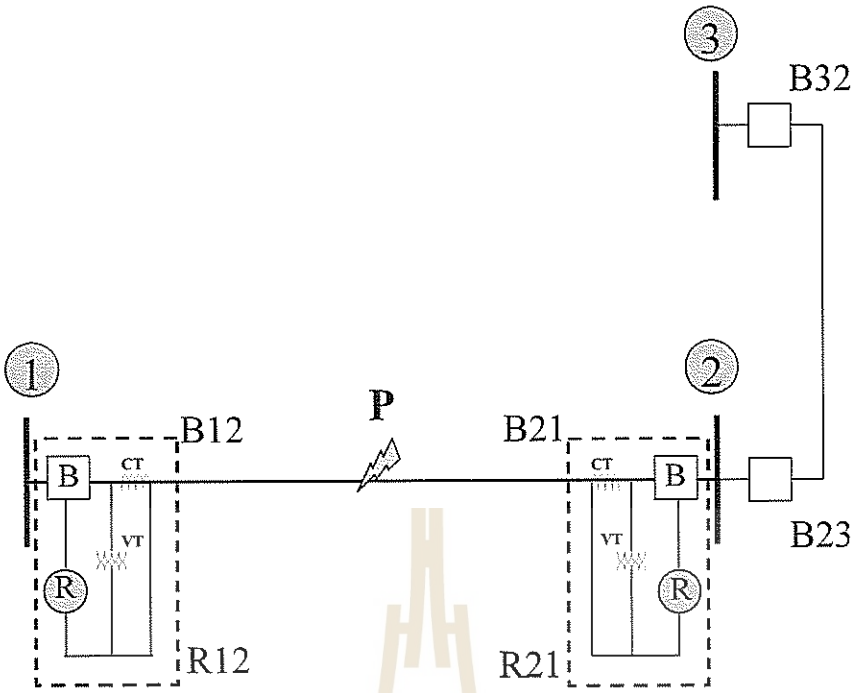
หลักการสำคัญในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังคือการตัดแยกวงจรแยกส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบให้เร็วที่สุดและให้เกิดผลกระทบกับอุปกรณ์อื่นในระบบน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้จะต้องมั่นใจด้วยว่าการตัดวงจรนี้ทำได้อย่างถูกต้องและไม่ตัดวงจรในส่วนที่ไม่จำเป็น อุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในระบบป้องกันจึงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ประมวลผลว่าค่าที่ตรวจวัดมานั้นผิดปกติหรือไม่ รวมถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตัดแยกส่วนที่เกิดการผิดพร่องออกจากระบบ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและอุปกรณ์พื้นฐานในระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง

ในการตัดแยกส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบไฟฟ้ากำลังได้ทันเวลานั้นจะต้องอาศัยการทำงานของส่วนย่อยต่าง ๆ ในระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังที่ถูกต้องแม่นยำ โดยหน้าที่ของส่วนย่อยหรืออุปกรณ์ย่อยแต่ละส่วนจะทำหน้าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของการเกิดความผิดพร่อง ซึ่งอุปกรณ์ในระบบป้องกันบางอย่างอาจจะมีโอกาสได้ทำงานไม่บ่อยนัก ในส่วนนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วย

- เซอร์กิตเบรกเกอร์(Circuit Breaker)
- อุปกรณ์ตรวจวัดและแปลงสัญญาณ(Transducer) และ
- รีเลย์(Relay)

รูปที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่ออยู่ที่ปลายสายส่งไฟฟ้าทั้งสองข้างโดยสายส่งไฟฟ้าต่อระหว่างบัส 1 และ 2 โดยเส้นประแสดงชุดย่อยของระบบป้องกัน ทั้งนี้เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัด-ต่อวงจร ส่วนรีเลย์จะเป็นอุปกรณ์ที่จะส่งสัญญาณไปยังเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้ตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบไฟฟ้าโดยจะรับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดและแปลงสัญญาณ โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ จะกล่าวถึงต่อไป ทั้งนี้หลักการพื้นฐานในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

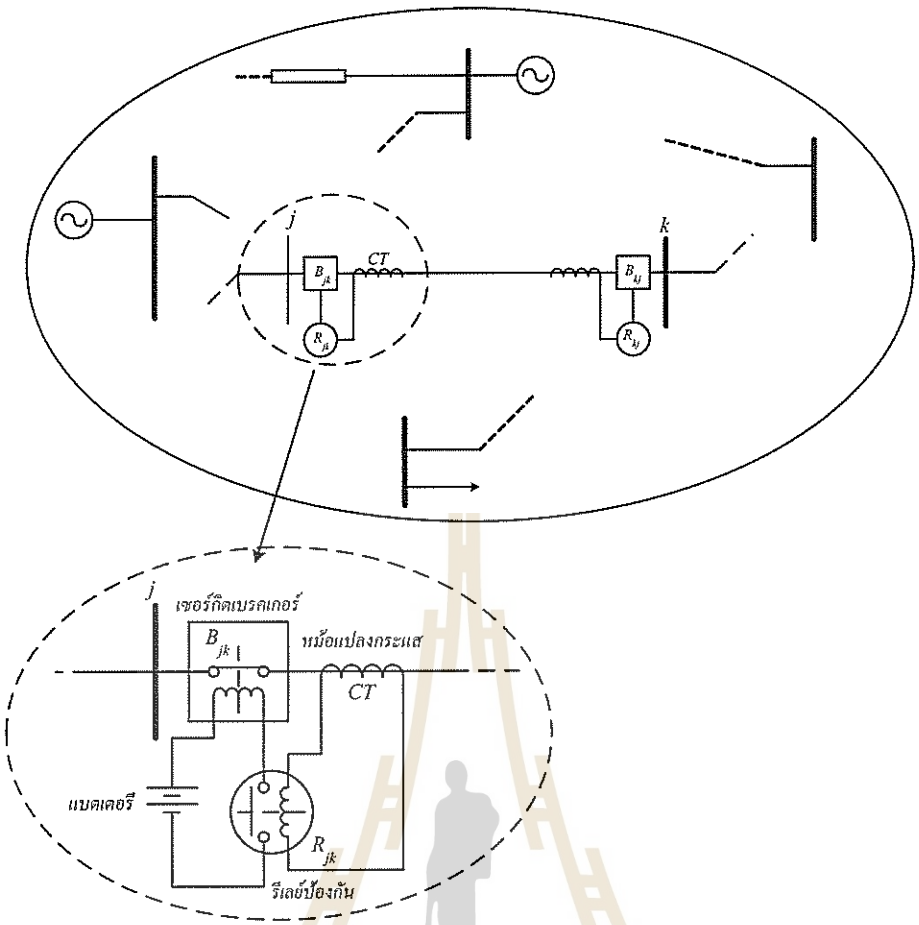


รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมเส้นเดียวแสดงอุปกรณ์ป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไปเซอร์กิตเบรกเกอร์และรีเลย์จะกำหนดหมายเลขโดยสอดคล้องกับบัสและสายส่งไฟฟ้า จากรูปสายส่งมักจะเรียกว่า สายส่ง 1-2 และสำหรับเบรกเกอร์และรีเลย์จะใช้สัญลักษณ์ B12 และ R12 สำหรับเบรคเกอร์และรีเลย์ที่ต่ออยู่ที่ปลายสายส่งด้านบัส 1 และใช้สัญลักษณ์ B21 และ R21 สำหรับเบรคเกอร์และรีเลย์ที่ต่ออยู่ที่ปลายสายส่งด้านบัส 2 อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจมีการกำหนดที่แตกต่างออกไปขึ้นอยู่กับการทำงาน ในการทำงานของเบรกเกอร์อาจทำงานแยกกันแต่ละเฟสหรืออาจทำงานพร้อมกันโดยใช้เบรกเกอร์แบบสามเฟสที่ถูกสั่งการจากรีเลย์ตัวเดียว

จากรูปที่ 2.1 เมื่อเกิดการผิดพร่องในลักษณะลัดวงจรที่จุด P ก็จะทำให้เกิดกระแสปริมาณมากไหลจากทั้งสองด้านของสายส่ง ในที่นี้เราจะพิจารณาว่ามีแหล่งกำเนิดกำลังงานไฟฟ้าอยู่ทั้งสองด้านของจุดลัดวงจร (เป็นแบบโครงข่าย) การไหลของกระแสปริมาณมากนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของขนาดของแรงดันไฟฟ้าในระบบ

กระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีค่าหลายกิโลA (kA) และหลายกิโลโวลต์ (kV) ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้งานกับระบบป้องกัน จึงต้องมีการแปลงค่ากระแสและแรงดันเป็นค่าที่ต่ำลงโดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Transducer, T) ซึ่งมักจะเป็นหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดันซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 3 โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสและการลดลงของแรงดันจะเป็นสัญญาณที่บอกว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ตรวจจับความผิดปกติดังกล่าวจะเรียกว่า รีเลย์ (Relay, R) โดยจะรับสัญญาณจากอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (T) ในรูปที่1.14 รีเลย์ R12 และ R21 จะประมวลผลจากกระแสและแรงดันได้ว่าเกิดการลัดวงจรที่สายส่ง 1-2 การประมวลผลนี้จะทำในเวลาประมาณ 0.008-0.04 วินาที ขึ้นอยู่กับการออกแบบและปรับตั้งรีเลย์



รูปที่ 2.2 หลักการพื้นฐานในการป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลัง

การประมวลผลการเกิดลัดวงจรของรีเลย์ R12 และ R21 จะส่งสัญญาณ (Trip signal) ไปยังเบรกเกอร์ B12 และ B21 ตัดวงจร (Trip) แยกสายส่ง 1-2 ออกจากระบบทำให้จุดที่ลัดวงจรถูกตัดออกจากระบบหรือเรียกว่าการ Clear Fault ระยะเวลาในการตัดวงจรส่วนที่ลัดวงจรออกจากระบบจะใช้เวลาประมาณ 0.030-0.1 วินาที ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบป้องกัน

จากกระบวนการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังข้างต้น จะเห็นว่าคุณลักษณะที่สำคัญของรีเลย์คือจะต้องมีความเร็วในการทำงาน (Speed) และความน่าเชื่อถือได้ (Reliability) ในการตัดวงจรส่วนที่เกิดความผิดพร่องออกจากระบบ นอกจากนี้ยังต้องมีคุณสมบัติในการแยกแยะ (Selectivity) ด้วยว่าการลัดวงจรอยู่ในส่วนใดและจะตัดวงจรส่วนไหนบ้างออกจากระบบในการที่จะแยกส่วนที่ลัดวงจรออกไป จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่ารีเลย์ R23 จะตรวจจับกระแสลัดวงจรที่จุด P ด้วยเช่นกันเพราะจะมีกระแสไหลผ่านที่สูงมากเช่นกัน แต่รีเลย์ R23 ไม่ควรจะส่งสัญญาณตัดวงจรไปยัง B23 เนื่องจากการเกิดลัดวงจรนี้อยู่นอกขอบเขตการป้องกันของรีเลย์ R23

ทั้งนี้คุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันสามารถแบ่งตามยุคของเทคโนโลยีได้เป็น ยุคสมัยที่เป็นแอนะล็อกและยุคสมัยที่เป็นรีเลย์แบบดิจิทัล

คุณลักษณะของรีเลย์ที่ต้องการมี 6 ประการคือ

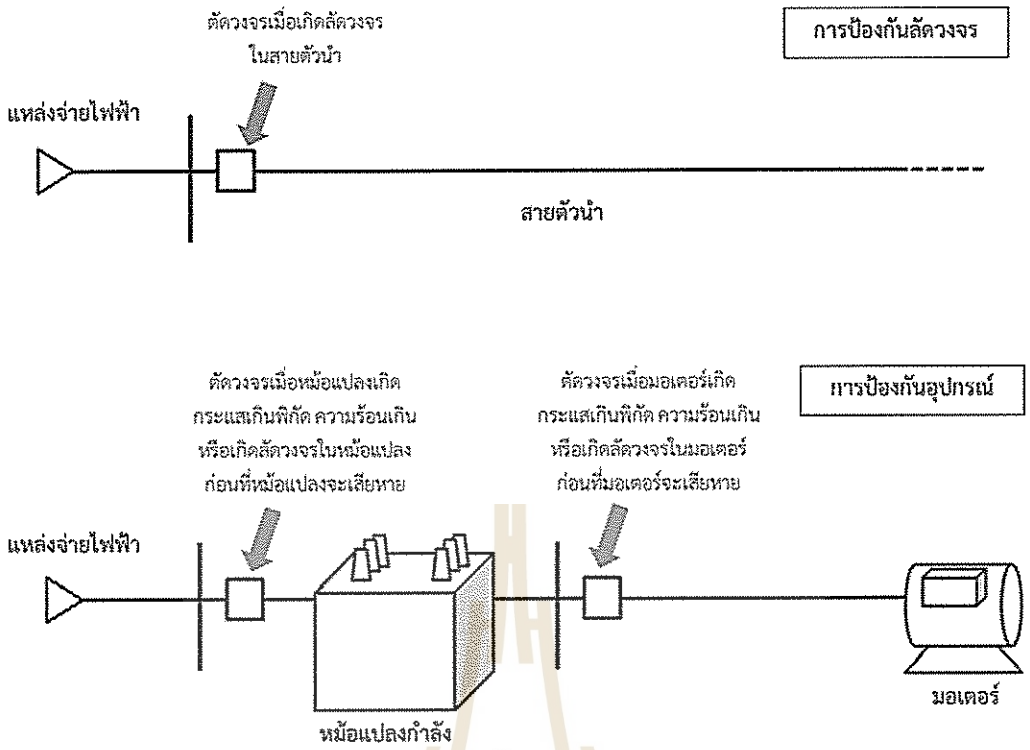
1. ความน่าเชื่อถือ (Reliability) แบบออกเป็น ความวางใจได้ (Depensbility) และความมั่นคง (Security)
2. ความเร็วในการทำงาน (Speed)
3. ความสามารถในการแยกแยะได้อย่างถูกต้อง (Selectivity)
4. ความไวต่อสัญญาณที่ป้อนให้ (Sensitivity)
5. ความง่าย (Simplicity)
6. ความประหยัด (Economy)

ในปัจจุบันรีเลย์ป้องกันจะเป็นรีเลย์แบบดิจิทัลซึ่งจะมีความสามารถพิเศษ (feature) ต่าง ๆ เพิ่มขึ้นอีกหลายอย่าง เช่น

1. ความสามารถในการบอกตำแหน่งของการผิดพร่อง
2. ความสามารถในการเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาเข้า เหตุการณ์ผิดปกติ สถิติข้อมูลทางไฟฟ้า
3. มีช่องทางสำหรับรับส่งข้อมูลการสื่อสาร

นอกจากนี้การป้องกันยังแบ่งออกได้เป็นการป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit Protection) และการป้องกันอุปกรณ์ (Equipment Protection) ซึ่งอุปกรณ์หลักในระบบไฟฟ้ากำลังคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ และหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดย

- การป้องกันการลัดวงจรจะใช้ค่ากระแสลัดวงจรมาพิจารณาในการปรับตั้งอุปกรณ์ป้องกันให้ทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งจะใช้รีเลย์ป้องกันกระแสเกินเป็นหลักที่จะกล่าวถึงในบทที่ 4 และในระบบที่มีความซับซ้อนจะใช้รีเลย์ระยะทางและรีเลย์แบบนำสัญญาณซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5 และ 6 ตามลำดับ
- การป้องกันอุปกรณ์จะพิจารณาจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ป้องกัน เช่น ความสามารถในการทนกระแส ความสามารถในการทนความร้อน ฯลฯ ในการปรับอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งจะใช้รีเลย์กระแสเกินเป็นหลักเช่นเดียวกัน และจะมีการป้องกันเฉพาะตัวอุปกรณ์ เช่น การป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protection) การป้องกันโหลดเกินซึ่งสามารถตรวจวัดจากค่ากระแสและอุณหภูมิได้ (Overload Protection) รวมทั้งการป้องกันเฉพาะอื่นๆ ที่จะกล่าวถึงในบทที่ 9-12 ซึ่งเป็นเรื่องป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ หม้อแปลง และบัสบาร์ เป็นรายอุปกรณ์



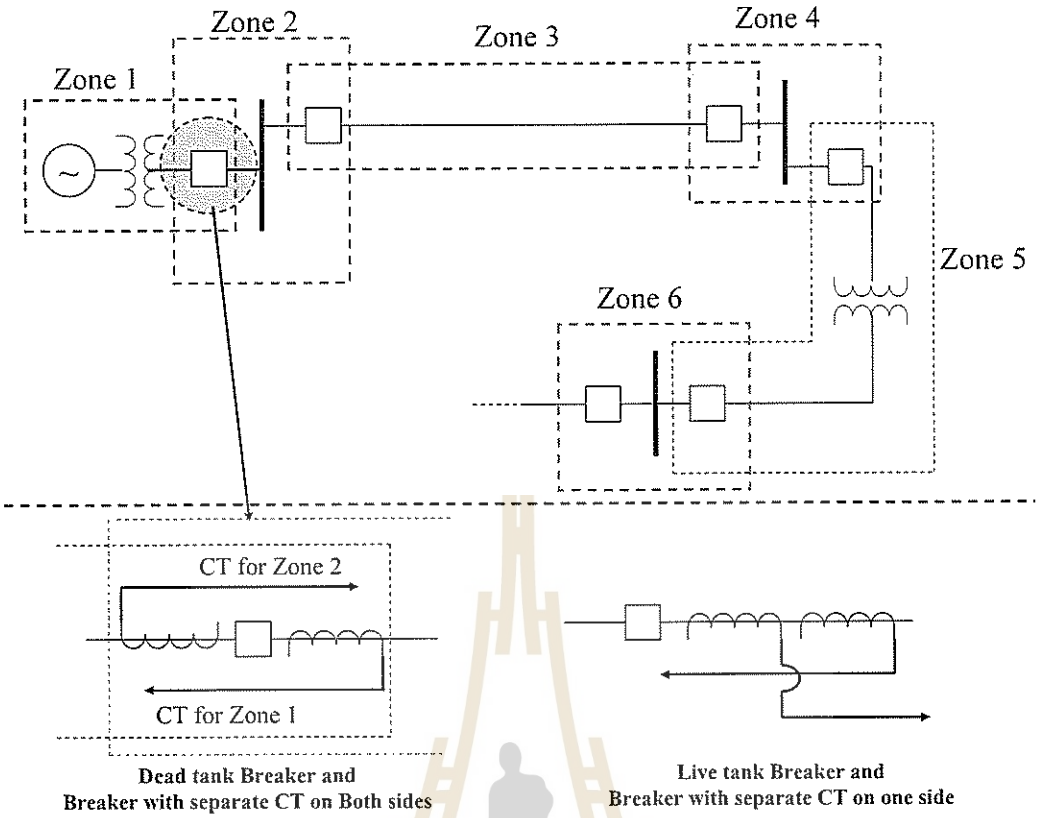
รูปที่ 2.3 การป้องกันการลัดวงจรและการป้องกันอุปกรณ์

2.2 การแบ่งขอบเขตการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง (Zones of Protection)

เพื่อให้รีเลย์สามารถตัดวงจรเฉพาะส่วนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ในการแยกส่วนที่ลัดวงจรออกจากระบบ การทำงานของรีเลย์จะต้องมีการแบ่งขอบเขตการป้องกัน (Zones of Protection) ที่รีเลย์ต้องรับผิดชอบ รูปที่ 2.4 เป็นตัวอย่างแสดงขอบเขตการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง เส้นปะวงปิดจะแสดงขอบเขตการป้องกันแต่ละเขต โดยในแต่ละเขตจะประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง (สายส่ง หรือ หม้อแปลง) และเบรกเกอร์ โดยเบรกเกอร์แต่ละตัวจะอยู่ในขอบเขตการป้องกันสองเขต จากรูปจะเห็นว่าในขอบเขตที่ 1 (Zone 1) จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลง และเบรกเกอร์หนึ่งตัว ส่วนในขอบเขตที่ 3 จะประกอบด้วยสายส่งไฟฟ้าและเบรกเกอร์สองตัว เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขอบเขตใด เบรคเกอร์จะทำการตัดวงจรหรืออุปกรณ์ในขอบเขตนั้นออกจากระบบ ดังนั้นการแบ่งขอบเขตการป้องกันจะมีเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการกำหนดขอบเขต

การแบ่งขอบเขตการป้องกันสามารถทำได้ทั้งแบบปลายปิดที่เป็นขอบเขตจำกัดและแบบปลายเปิด ในกรณีที่เป็นการป้องกันที่ไม่กำหนดขอบเขตแน่นอน เช่น การกำหนดขอบเขตของสายส่งที่มีระยะไกลมาก หรือเป็นแบบปิดหรือแบบหนึ่งหน่วยที่เป็นการป้องกันเฉพาะอุปกรณ์

สิ่งที่ต้องการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องจัดให้ได้รับการป้องกันจากอย่างน้อย 2 ชนิดของการป้องกัน ซึ่งประกอบด้วย การป้องกันหลัก 1 ชนิด และการป้องกันสำรองอีก 1 ชนิด การป้องกันหลักและการป้องกันสำรองจะต้องจัดให้ประสานการทำงานให้สัมพันธ์อย่างเหมาะสม



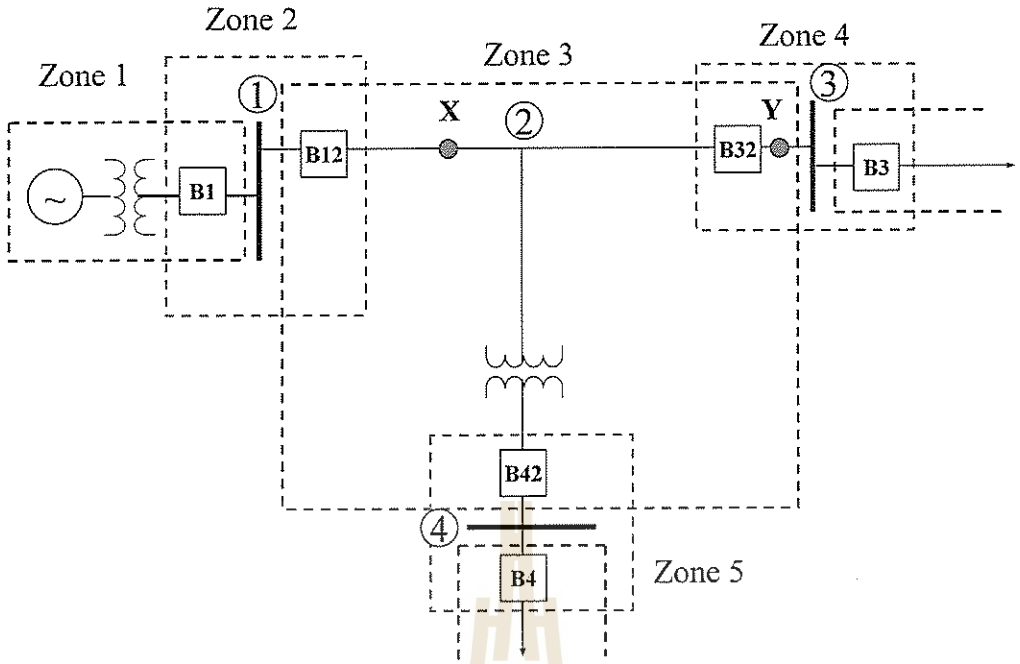
รูปที่ 2.4 การแบ่งขอบเขตการป้องกัน (Zone of Protection) ของระบบไฟฟ้ากำลัง

สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการแบ่งขอบเขตการป้องกันก็คือ ขอบเขตในการป้องกันจะต้องมีการเหลื่อมกัน (Overlap) เพื่อไม่ให้เกิดส่วนใดส่วนหนึ่งในระบบไม่ได้อยู่ในขอบเขตการป้องกันใด ๆ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการลัดวงจรในบริเวณที่เหลื่อมขอบเขตกันจะทำให้เกิดการตัดแยกทั้งสองขอบเขตที่เหลื่อมกันออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นการเหลื่อมกันของขอบเขตในการป้องกันจะต้องเป็นบริเวณที่เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้

ตัวอย่างที่ 2.1 จากระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 2.5 จะสามารถระบุขอบเขตการป้องกันได้ดังแสดงด้วยเส้นประและถ้าเกิดการลัดวงจรที่จุด X และ Y จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ใดบ้างทำการตัดวงจร

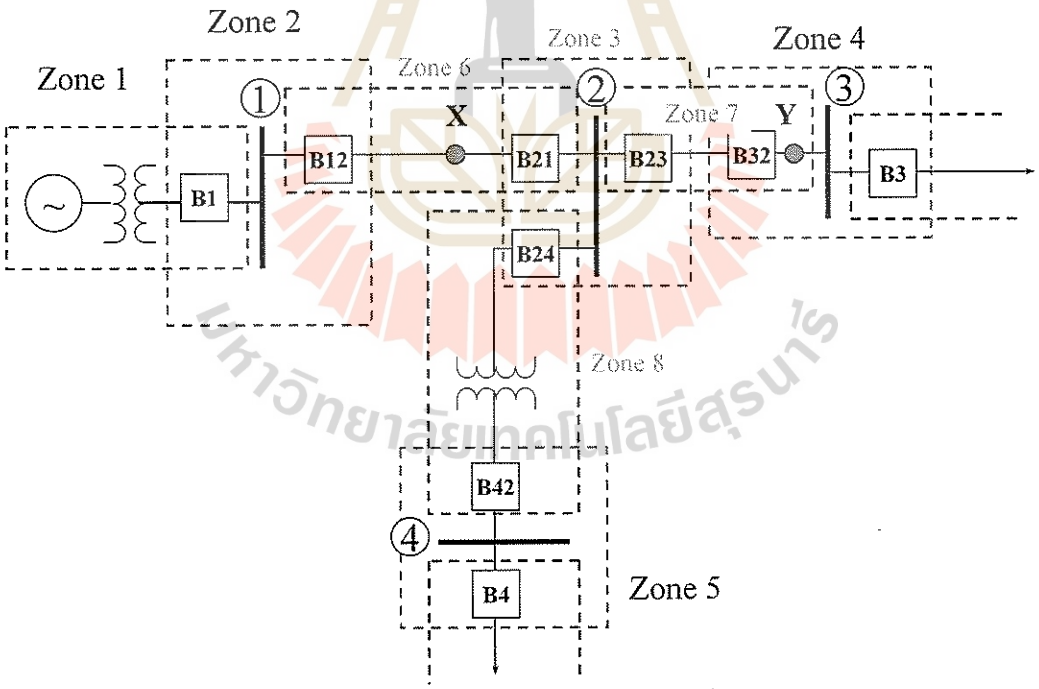
ในกรณีนี้ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด X จะเป็นการลัดวงจรในขอบเขตที่ 3 (Zone 3) เบรกเกอร์ B12, B32 และ B42 ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันภายในขอบเขตดังกล่าวจะทำการเปิดวงจร (Trip) ออกเพื่อแยกส่วนที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบ

ส่วนเมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด Y จะเป็นจุดที่อยู่ภายในขอบเขตที่ 3 (Zone 3) และขอบเขตที่ 4 (Zone 4) ทำให้เบรกเกอร์ที่ทำหน้าที่ป้องกันในขอบเขตทั้งสองทำการเปิดวงจร (Trip) ซึ่งก็คือเบรกเกอร์ B12, B32, B3 และ B42 ซึ่งจะอุปกรณ์ออกจากระบบจำนวนมาก ดังนั้นจะเห็นว่าการเหลื่อมกันของขอบเขตในการป้องกันควรจะมีบริเวณที่เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว



รูปที่ 2.5 ระบบไฟฟ้ากำลังในตัวอย่างที่ 2.1

ตัวอย่างที่ 2.2 เมื่อเพิ่มเซอร์กิตเบรกเกอร์ระบบไฟฟ้ากำลังในตัวอย่างที่ 2.1 อีก 3 ตัวจะทำให้ขอบเขตการป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 2.6 และเมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด X และ Y จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ใดบ้างทำการตัดวงจร



รูปที่ 2.6 ระบบไฟฟ้ากำลังในตัวอย่างที่ 2.2

ในกรณีที่เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด X จะมีเบรกเกอร์ทำการเปิดวงจรเพียงสองตัวคือ B12 และ B21 เพื่อทำการแยกจุดลัดวงจรออกจากระบบ

ส่วนเมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด Y ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ 4 และ 7 ก็จะทำให้เบรกเกอร์ B23, B32 และ B3 ทำการเปิดวงจรออก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบในตัวอย่างที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าระบบนี้จะสามารถตัดแยกส่วนที่ลัดวงจรออกจากระบบได้โดยตัดอุปกรณ์ไฟฟ้าออกจากระบบน้อยกว่า แต่ในระบบนี้จะต้องลงทุนติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์เพิ่มอีก 3 ตัว

2.3 ประเภทและหลักการทำงานรีเลย์

หน้าที่ของรีเลย์คือการระบุว่าระบบเกิดการผิดพร่องขึ้นหรือไม่ นั่นคือรีเลย์จะต้องสามารถแยกความแตกต่างระหว่างสภาวะการทำงานปกติ (ไม่เกิดการผิดพร่องหรือการผิดพร่องนั้นอยู่นอกขอบเขตการป้องกัน) กับสภาวะที่เกิดการผิดพร่องได้ รีเลย์ได้ถูกพัฒนามากว่า 70 ปีและในปัจจุบันรีเลย์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้เป็น

- รีเลย์แบบไฟฟ้ากล (Electromechanical Relays)
- รีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electroctronic or Solid-state Relays)
- รีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor or Computer Based Relays)

2.3.1 รีเลย์แบบไฟฟ้ากล

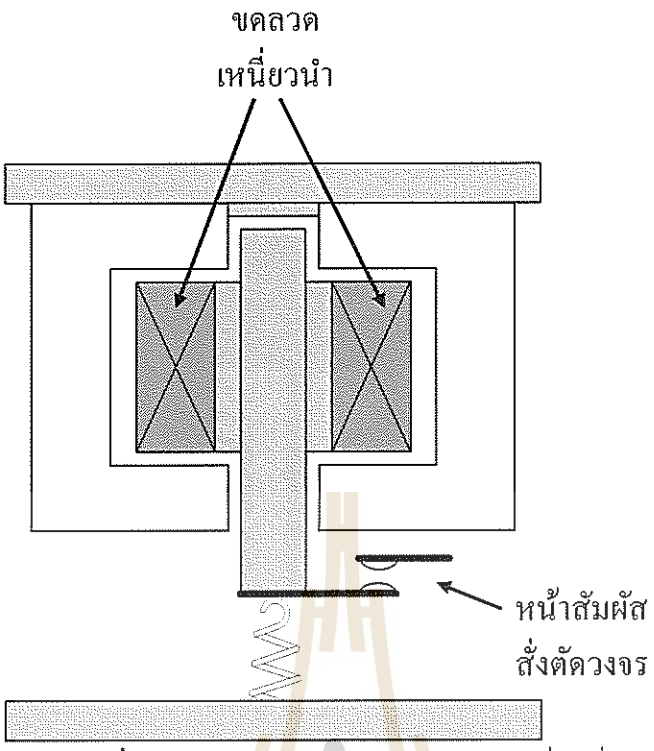
รีเลย์แบบเหนี่ยวนำเป็นการใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจากการไหลของกระแสไฟฟ้า แบบเดียวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน รีเลย์แบบเหนี่ยวนำเป็นแบบที่ใช้มากที่สุดโดยสามารถแบ่งได้เป็น

- รีเลย์แบบแกนเคลื่อนที่ (Plunger Type Relay)
- รีเลย์แบบเหนี่ยวนำ (Induction Type Relay)

2.3.1.1 รีเลย์แบบแกนเคลื่อนที่ (Plunger Type Relay)

รีเลย์แบบแกนเคลื่อนที่ (Plunger Type Relay) มีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยในสภาวะปกติที่ไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวด แกนเหล็กจะมีแรงกระทำเป็น F_s โดยสปริงจะทำให้หน้าสัมผัสที่จะส่งสัญญาณตัดวงจร (Trip) เมื่อเกิดการผิดพร่อง จะไม่แตะกัน เมื่อเกิดกระแสไหลผ่านขดลวดมากพอจนทำให้เกิดแรงแม่เหล็กผลักให้แกนเคลื่อนที่เข้าไปเป็นแรง F_m ที่มากกว่า F_s ก็จะทำให้หน้าสัมผัสเคลื่อนไปแตะกันและส่งสัญญาณตัดวงจรไปยังเบรกเกอร์

ค่ากระแสต่ำสุดที่ทำให้แกนเริ่มเคลื่อนที่จะเรียกว่าค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick Up Current, I_p) และเมื่อแกนเคลื่อนจนเกิดสัญญาณตัดวงจรแล้ว กระแสต้องลดลงจะถึงค่ากระแสที่เรียกว่ากระแสคืนตัว (Drop Out Current, I_d) จึงจะทำให้แกนเริ่มเคลื่อนกลับ ทั้งนี้ I_p จะมากกว่า I_d เสมอ ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานนี้สามารถปรับตั้งได้จากแท็บที่มีผลต่อจำนวนขดของขดลวดที่กระแสไหลผ่านได้

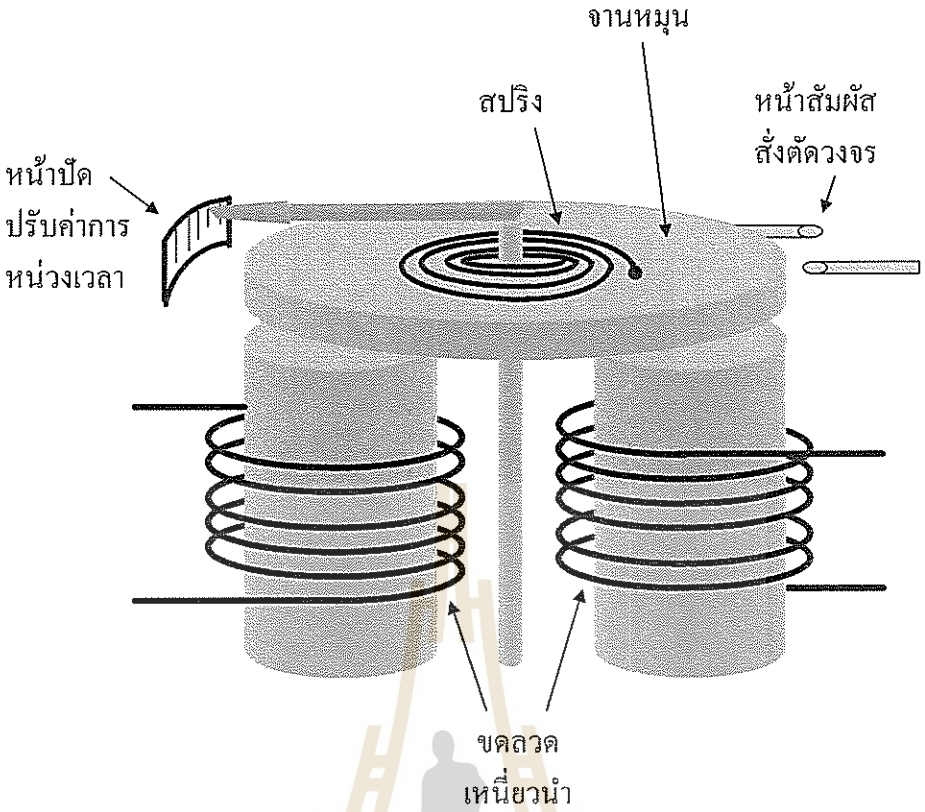


รูปที่ 2.7 หลักการทำงานรีเลย์แบบแกนเคลื่อนที่

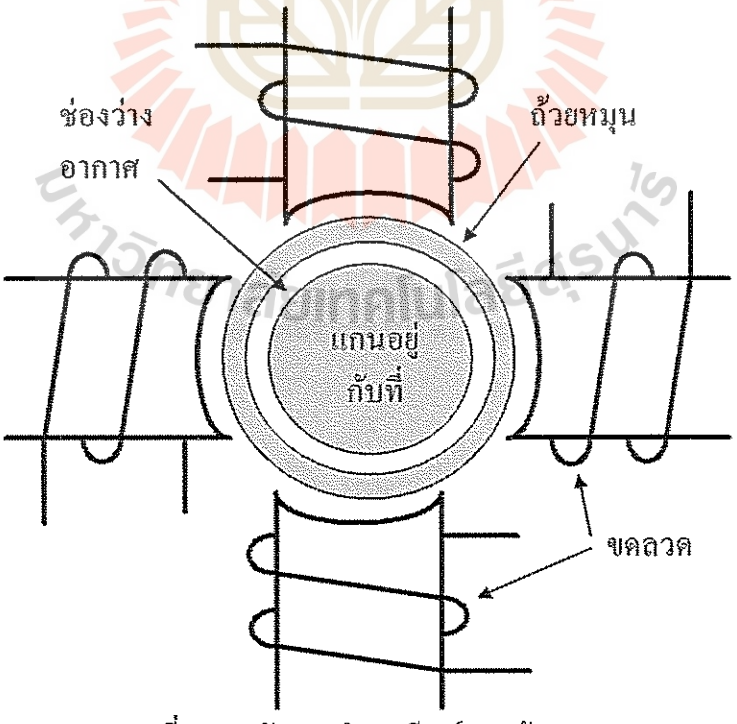
2.3.1.2 รีเลย์แบบเหนี่ยวนำ (Induction Type Relay)

รีเลย์แบบเหนี่ยวนำ (Induction Type Relay) มีหลักการทำงานทำงานในลักษณะเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งออกได้เป็นแบบจานหมุน (Induction Disk Type Relay) และแบบถ้วยหมุน (Induction Cup Type Relay) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 รีเลย์ชนิดนี้จะต้องมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก 2 ขด ที่มีมุมเฟสไม่ตรงกันเพื่อทำให้เกิดแรงบิดต่อส่วนที่หมุน นอกจากนี้บางครั้งในการออกแบบก็มีการนำแม่เหล็กถาวรมาช่วยให้มีการทำงานที่ดีขึ้น

รีเลย์แบบเหนี่ยวนำสามารถออกแบบให้รับสัญญาณได้ทั้งที่เป็นแรงดันและกระแส จึงสามารถออกแบบให้เป็นรีเลย์ป้องกันแรงดันเกิน (Overvoltage Relay) หรือแรงดันตก (Undervoltage Relay) ได้ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้ขดหนึ่งรับสัญญาณแรงดันส่วนอีกขดหนึ่งรับสัญญาณกระแสให้มีการทำงานเป็นรีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) หรือรีเลย์อิมพีแดนซ์ (Impedance Relay) ได้ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของรีเลย์ชนิดนี้ภายหลัง



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานรีเลย์แบบจานหมุน

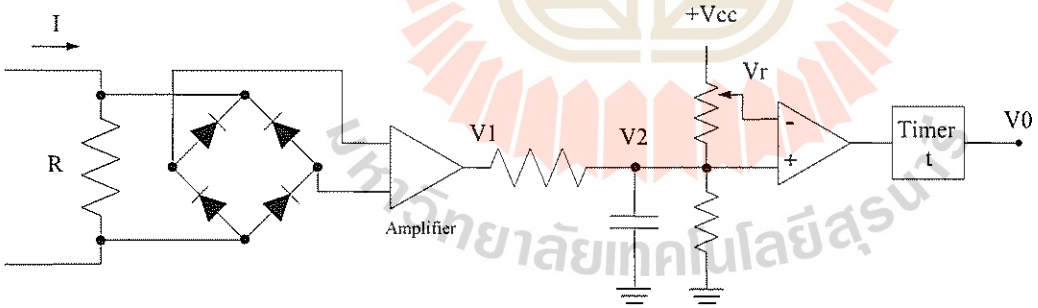


รูปที่ 2.9 หลักการทำงานรีเลย์แบบถ้วยหมุน

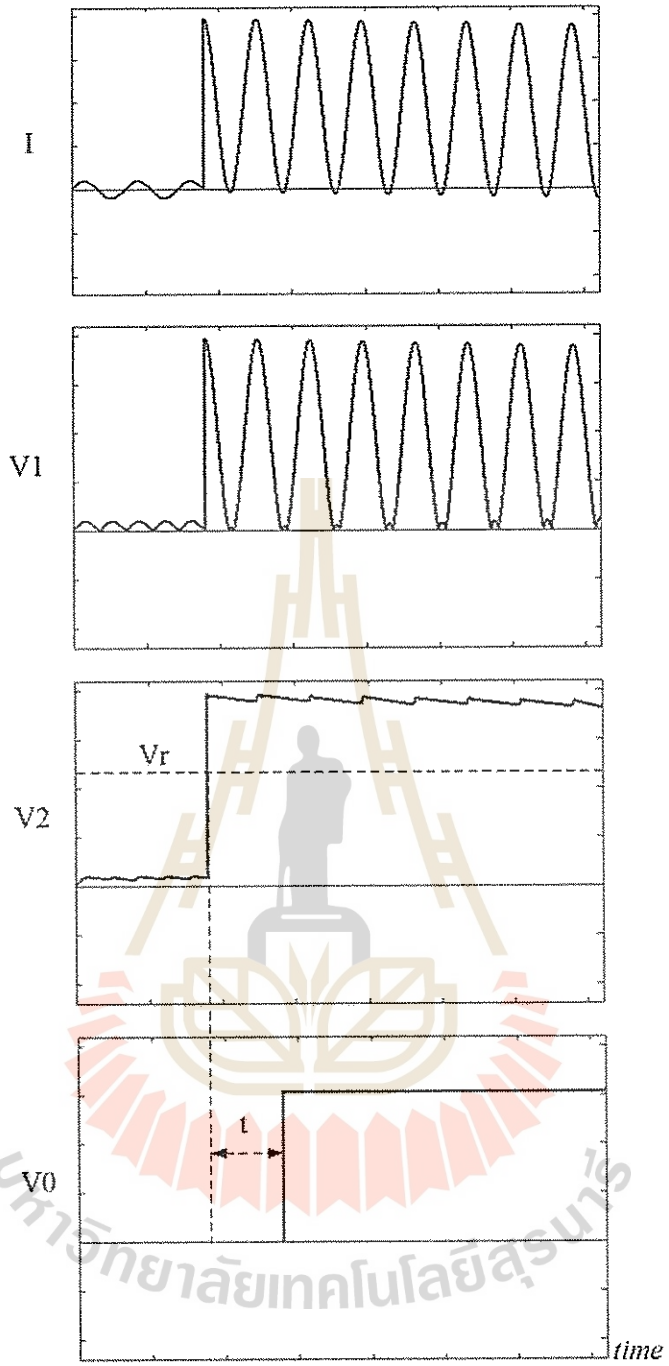
2.3.2 รีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์

จากความต้องการการทำงานของรีเลย์ที่สลับซับซ้อนรวมถึงคุณสมบัติในการระบุการผิดพร่องที่มีความแม่นยำสูง ทำให้มีการพัฒนารีลย์ที่เรียกว่ารีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์หรือแบบโซลิดสเตท ซึ่งใช้เทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในการทำงานของรีเลย์ รีเลย์ชนิดนี้จะทำงานกับสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็ก ค่อนข้างบอบบาง มีความทนทานต่อแรงดันหรือกระแสเกินได้ไม่มาก และทนต่อสภาพอากาศที่มีความร้อนหรือความชื้นได้ไม่สูงนัก นอกจากนี้รีเลย์ชนิดนี้จะต้องมีชุดจ่ายไฟแยกออกมาต่างหากเนื่องจากเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามรีเลย์ชนิดนี้จะมีความแม่นยำกว่ารีเลย์แบบไฟฟ้ากลที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว รวมถึงมีความยืดหยุ่นในการใช้งานและปรับตั้งค่ามากกว่า นอกจากนี้ยังมีราคาต่ำกว่า และต้องการเนื้อที่ในการติดตั้งน้อยกว่าด้วย

รูปที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นรีเลย์กระแสเกิน เมื่อกระแสขาเข้า (Input) I ซึ่งมีลักษณะที่เป็นลูกคลื่นที่ยกตัวสูงขึ้นจากองค์ประกอบกระแสตรงในการลัดวงจร (ดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 1.4 และในบทที่ 5) ไหลผ่านตัวต้านทาน R จะเกิดแรงดันตกคร่อมและจะถูกเรกติฟลายผ่านวงจรกรองสัญญาณดังรูปที่ 2.9 จากนั้นสัญญาณจะผ่านไปยังวงจรขยายสัญญาณ เมื่อสัญญาณนี้มีค่าสูงกว่าแรงดันอ้างอิง V_r ก็จะทำให้เกิดสัญญาณแบบขั้น (Step) ที่มีการประวิงเวลาไว้ด้วยวงจรประวิงเวลา (Time delay ciruit) โดยค่าแรงดัน V_1, V_2 จะมีรูปสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.11 ค่า V_0 เป็นแรงดันที่ส่งออกจากวงจรเพื่อเป็นสัญญาณสั่งตัดวงจรของระบบ



รูปที่ 2.10 รีเลย์กระแสเกินแบบอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.11 รูปสัญญาณไฟฟ้าที่ผ่านรีเลย์กระแสเกินแบบอิเล็กทรอนิกส์

2.3.3 รีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์

จากหน้าที่ของรีเลย์ที่ต้องมีการรับสัญญาณเข้า (Input) มาประมวลผลและตัดสินใจ จะเห็นว่ารีเลย์ในหัวข้อที่ผ่านมาเปรียบได้กับคอมพิวเตอร์แบบแอนะล็อกชนิดหนึ่ง ดังนั้นเราสามารถออกแบบให้คอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์ที่ประมวลผลแบบดิจิทัลทำหน้าที่นี้ได้เช่นกัน แต่การรับสัญญาณของรีเลย์ชนิดจะต้องทำการแปลงสัญญาณให้เป็นดิจิทัลก่อน หลักการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.12 [*Horowit and Phadke, 1993*]

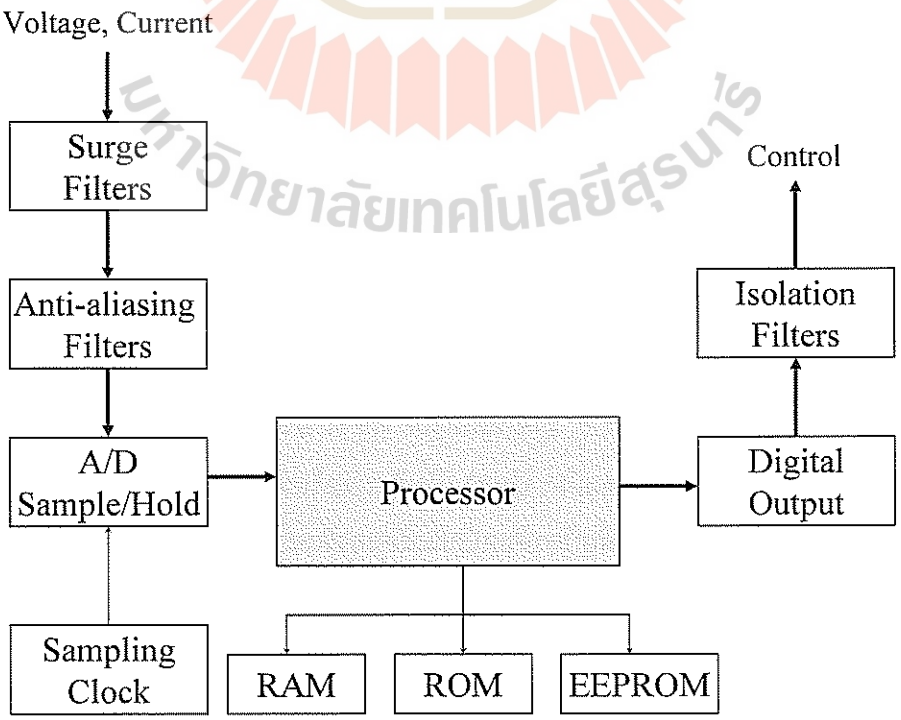
ระบบไมโครโปรเซสเซอร์มีโครงสร้างการทำงานคล้ายกับคอมพิวเตอร์ซึ่งจะทำงานตามคำสั่งทางตรรกที่โปรแกรมไว้ในหน่วยความจำ หน่วยความจำของไมโครโปรเซสเซอร์อาจเป็นหน่วยความจำอ่านอย่างเดียว (Read Only Memory, ROM) ในการเก็บส่วนประมวลผลหลัก หรืออาจเป็นหน่วยความจำแบบชั่วคราวหรือหน่วยความจำแบบเข้าถึงโดยสุ่ม (Random Access Memory, RAM) ในส่วนของการจัดเก็บข้อมูลตัวแปรและการตั้งค่าต่าง ๆ

ไมโครโปรเซสเซอร์ติดต่อกับหน่วยความจำด้วยระบบบัส (Bus System) ซึ่งจะเชื่อมต่อสัญญากับส่วนสัญญาณเข้า (Input) และสัญญาออก (Output) หรือสัญญาณสั่งการผ่านชุดแปลงสัญญาณ (Interface Adaptor)

หากมีการใช้หน่วยความจำที่ผู้ใช้สามารถโปรแกรมได้ เช่น หน่วยความจำอ่านอย่างเดียวชนิดโปรแกรมและลบได้ด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrically Erasable Programable Read Only Memory, EEPROM) ก็จะมีการทำงานในแบบของเครื่องควบคุมแบบตรรกที่สามารถโปรแกรมได้ (Programable Logic Controller) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการควบคุมในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย

การใช้รีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์นั้นมีทั้งข้อดีและข้อควรระวังหลายอย่าง เนื่องจากรีเลย์ชนิดนี้มีความสะดวกหลายอย่างในการใช้งานในขณะเดียวกันก็มีความซับซ้อนในการใช้งานด้วย

รีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์จะสามารถเก็บข้อมูลย้อนหลังและสามารถนำกลับมาแสดงผลได้ทำให้การวิเคราะห์สภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังทำได้สะดวกขึ้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่รีเลย์ได้บันทึกไว้เป็นข้อมูลที่รับผ่านส่วนแปลงสัญญาณ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วจึงควรมีการตรวจสอบค่าที่บันทึกด้วยว่าในขณะที่เกิดผิดปกตินั้นรีเลย์ยังทำงานรับสัญญาณต่าง ๆ อย่างเป็นปกติหรือไม่ เนื่องจากรีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์อาจทำงานผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนหรือจากสภาวะชั่วขณะ (Transient) ในขณะที่ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดผิดปกติได้



รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของรีเลย์แบบคอมพิวเตอร์หรือแบบไมโครโปรเซสเซอร์

รีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์จะสามารถปรับตั้งค่าการทำงานโดยมีความสะดวกในการเชื่อมต่อกับระบบการแสดงผลที่เป็นดิจิทัลหรือคอมพิวเตอร์ สามารถทำการตรวจสอบและปรับตั้งค่าได้ทั้งที่ตัวรีเลย์เองและจากระยะไกล รีเลย์ชนิดนี้ยังมีความสามารถในการตรวจสอบและสื่อสารระหว่างรีเลย์ด้วยกัน อย่างไรก็ตามการปรับตั้งค่ารีเลย์ไม่ได้ทำบ่อยนักหลังจากที่ได้ติดตั้งไปแล้ว และการปรับตั้งค่าที่ทำได้ง่ายเกินไปอาจทำให้ต้องมีการระมัดระวังเป็นพิเศษในการผิดพลาดด้วย

รีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์สามารถออกแบบให้มีฟังก์ชั่นการทำงานที่ครอบคลุมเงื่อนไขที่ต้องใช้รีเลย์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าหลายชุดช่วยกัน ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ในการติดตั้ง อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาด้วยว่าค่าใช้จ่ายในส่วนของรีเลย์อาจถือว่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าทั้งหมดและหากเกิดความเสียหายของรีเลย์ก็จะส่งผลต่อการทำงานทั้งหมดได้

นอกจากนี้การใช้งานรีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์มีการใช้งานที่ซับซ้อนจึงต้องมีการศึกษาการทำงานและการโปรแกรมเป็นอย่างดี และต้องมีการฝึกอบรมผู้ใช้เป็นพิเศษด้วย

ในปัจจุบัน การออกแบบระบบป้องกันจะใช้ทั้งรีเลย์แบบแอนะล็อกและแบบคอมพิวเตอร์ผสมกัน แต่ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานของรีเลย์แบบคอมพิวเตอร์ขึ้น รีเลย์แบบคอมพิวเตอร์หรือแบบไมโครโปรเซสเซอร์จะมีบทบาทมากขึ้นในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังอย่างมากในอนาคต

2.4 อุปกรณ์ควบคุมเสริมการทำงานของรีเลย์ป้องกัน

ในการใช้งานรีเลย์ป้องกันจะมีการใช้รีเลย์และหน้าสัมผัสเสริม เพื่อใช้ในจุดประสงค์ต่าง ๆ เช่นเป็นการทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์แทนหน้าสัมผัสของรีเลย์ ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังชุดส่งสัญญาณเตือน (Alarm) ทำหน้าที่แสดงสถานการณ์ทำงานของรีเลย์ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

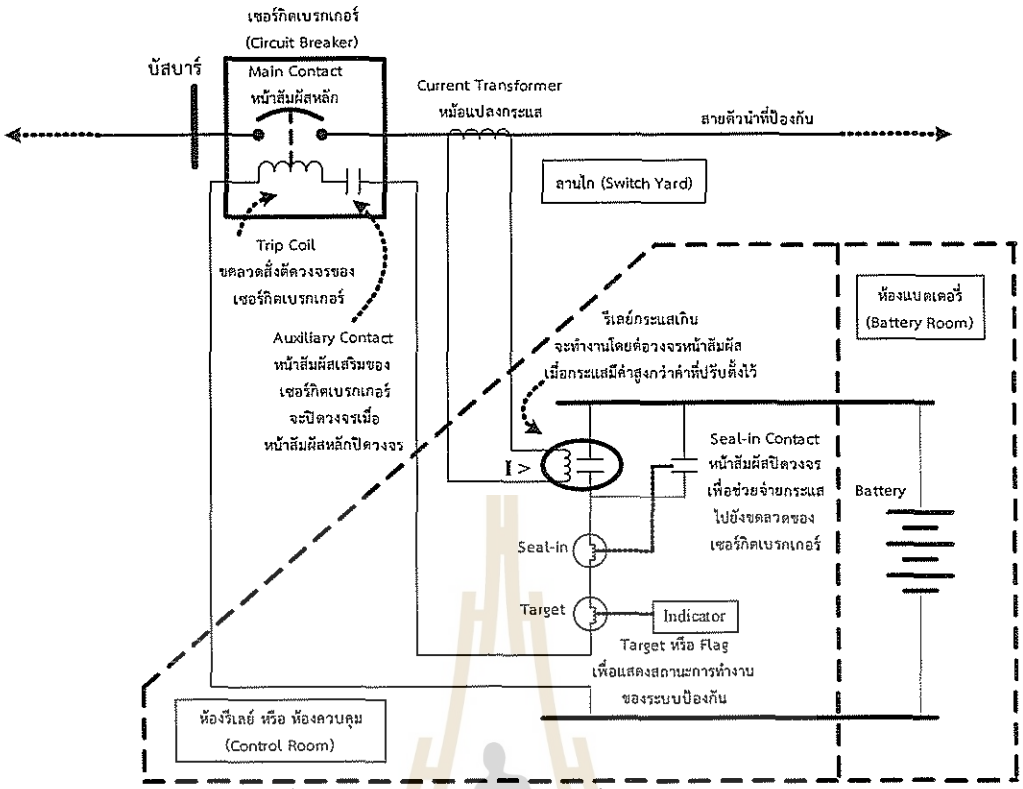
1. การออกแบบรีเลย์ป้องกันจะเป็นการออกแบบให้มีความเชื่อถือได้และแม่นยำสูงหน้าสัมผัสจึงมีน้ำหนักเบาทำให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ป้องกันไม่สามารถนำกระแสที่สูงมากได้
2. รีเลย์ป้องกันมีจำนวนหน้าสัมผัสไม่เพียงพอในการใช้งาน

ทั้งนี้สัญลักษณ์มาตรฐานของรีเลย์และอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. และ ข. รูปที่ 2.13 แสดงการต่อวงจรป้องกันที่มีอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ อุปกรณ์เสริมการทำงานของรีเลย์ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

- **รีเลย์ปิดวงจร (Seal-in Relay, Seal-in Unit)** เป็นรีเลย์เสริมที่ช่วยในการต่อวงจรให้ครบวงจรหลังจากที่หน้าสัมผัสของรีเลย์ป้องกันทำงานเพื่อป้องกันหน้าสัมผัสของรีเลย์ป้องกันจากการทำงานที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านในปริมาณมาก

- **รีเลย์ประวิงเวลา (Time-lag Relay)** เป็นรีเลย์ที่ใช้ในกรณีที่มีการออกแบบให้มีแบบแผนการทำงานประวิงเวลาเป็นขั้นตอน
- **รีเลย์ส่งสัญญาณเตือน (Alarm Relay)** เป็นรีเลย์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณเสียงหรือสัญลักษณ์เตือน โดยการทำงานของระบบป้องกันจะมีทั้งที่เป็นแบบส่งสัญญาณเตือนเพียงอย่างเดียว และแบบที่ส่งสัญญาณเตือนพร้อมทั้งตัดวงจร สัญญาณเตือนจะหยุดโดยการกดปุ่ม (Push Botton) และเมื่อทำการรีเซต (Reset) วงจรก็พร้อมที่จะรับสัญญาณและส่งสัญญาณเตือนใหม่
- **รีเลย์ทำซ้ำ (Repeat Relay)** เป็นรีเลย์หรือหน้าสัมผัสที่ทำงานพร้อมกับรีเลย์ป้องกันเพื่อเสริมการใช้งาน โดยอาจเป็นหน้าสัมผัสที่เสริมอยู่ในตัวรีเลย์เอง รีเลย์หรือหน้าสัมผัสทำซ้ำจะต้องทำงานด้วยความเร็วสูงและต้องมีความเชื่อถือได้สูง นอกจากนี้ยังมักจะมีพิกัดและความคงทนสูงกว่าหน้าสัมผัสหลักของรีเลย์ป้องกัน
- **สัญญาณแสดงสถานะการทำงาน (Flag, Target, Indicator)** เป็นสัญญาณที่แสดงสถานการณ์ทำงานของรีเลย์ป้องกันว่าได้ส่งสัญญาณตัดวงจรออกไปแล้วหรือไม่ อุปกรณ์นี้จะมีประโยชน์อย่างมากในการช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถทราบถึงสาเหตุในการสั่งตัดวงจรได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากจะทราบว่าสัญญาณตัดวงจรส่งมาจากรีเลย์ตัวใด สัญญาณแสดงสถานการณ์ทำงานของรีเลย์จะมีทั้งแบบที่เป็นสัญญาณทางกลและสัญญาณทางไฟฟ้า
- **หน้าสัมผัสเสริม (Auxiliary Contact, Auxiliary Switch)** เป็นหน้าสัมผัสที่ต่ออนุกรมกับขดลวดตัดวงจร (Trip Coil) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งจะทำงานปิดวงจร (Close) เมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ปิดวงจร และเมื่อเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรหน้าสัมผัสนี้จะเปิดออกเพื่อตัดวงจรป้องกันไม่ให้ทำงานโดยไม่จำเป็น เป็นการป้องกันการใช้พลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยไม่จำเป็นและยืดอายุการทำงานของอุปกรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.13 การต่อวงจรป้องกันที่มีอุปกรณ์เสริม

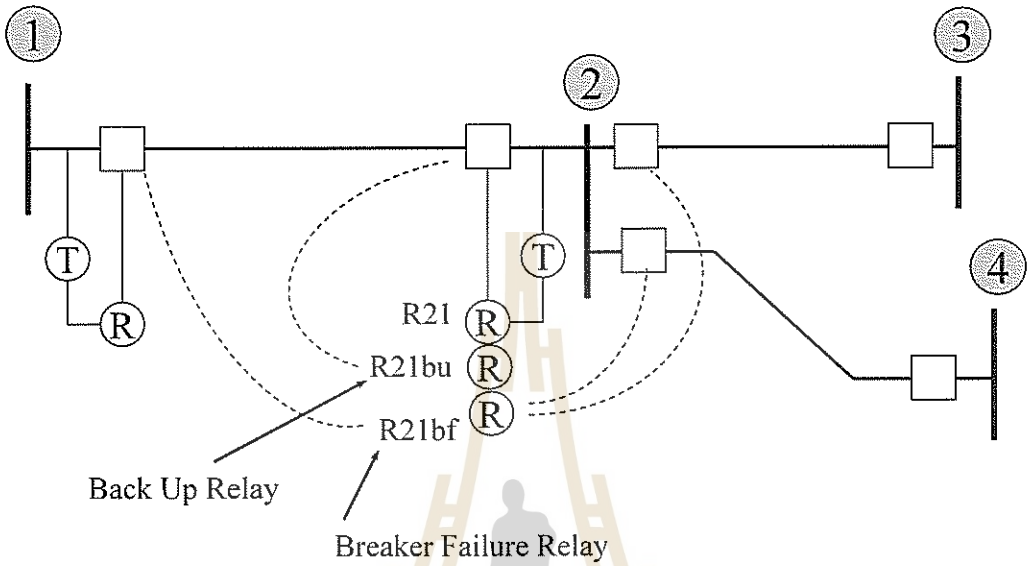
2.5 การป้องกันระดับปฐมภูมิและการป้องกันสำรอง

ระบบป้องกันที่ทำหน้าที่ป้องกันหลักในขอบเขตที่รับผิดชอบเรียกว่า ระบบป้องกันระดับปฐมภูมิ (Primary Protection System) ซึ่งจะทำงานตัดแยกส่วนที่เกิดการผิดพร่องออกจากระบบโดยกระทบกระเทือนส่วนอื่นของระบบไฟฟ้ากำลังน้อยที่สุดในเวลาที่เร็วที่สุด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติระบบป้องกันมีโอกาสที่จะทำงานผิดพลาดได้คือไม่สามารถตัดแยกส่วนที่ผิดพร่องออกจากระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นจึงต้องมีการให้อุปกรณ์ป้องกันชุดอื่นทำหน้าที่แทนในกรณีที่เกิดการผิดพลาดขึ้น เรียกว่าการป้องกันสำรอง (Back Up Protection) โดยรีเลย์ป้องกันสำรองอาจอยู่ในสถานีย่อยเดียวกันหรืออยู่ห่างออกไปในสถานีย่อยอื่น (Remote Back Up)

ในกรณีที่ใช้รีเลย์ในสถานีย่อยอื่นทำหน้าที่ป้องกันสำรองนั้นมีข้อดีคืออุปกรณ์ต่าง ๆ จะเป็นอิสระจากระบบป้องกันปฐมภูมิทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น รีเลย์ หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน แบตเตอรี่ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ทำให้การทำงานที่ผิดพลาดจากอุปกรณ์ดังกล่าวในระบบป้องกันปฐมภูมิไม่มีผลต่อการป้องกันสำรอง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง และจะทำให้ต้องมีการตัดแยกส่วนของระบบออกมากขึ้นในการป้องกัน ในขณะที่การป้องกันสำรองด้วยรีเลย์สำรองในสถานีไฟฟ้าย่อยเดียวกันจะไม่เกิดปัญหาข้างต้น แต่จะเกิดปัญหาการทำงานคือไม่สามารถทำหน้าที่ป้องกันสำรองได้ในกรณีที่เป็นการผิดพลาดที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ร่วมกัน เช่น หม้อแปลงกระแส หม้อแปลงแรงดัน แบตเตอรี่ และเซอร์กิตเบรกเกอร์

นอกจากนี้ยังมีการป้องกันการผิดพลาดในการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Breaker Failure Protection) ซึ่งเป็นการป้องกันสำรองภายในสถานีไฟฟ้าย่อยและสามารถออกแบบได้หลายวิธี วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการใช้ตัวประวิง

เวลา (Timer) ที่จะเริ่มจับเวลาเมื่อขดลวดตัววงจร (Trip Coil) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้รับสัญญาณสั่งตัดวงจรจากรีเลย์โดยสัญญาณตัดวงจรจะหยุดเมื่อไม่มีกระแสลัดแล้ว ถ้ากระแสลัดวงจรยังคงอยู่จนถึงเวลาที่ตั้งไว้ก็จะส่งสัญญาณให้เซอร์กิตเบรกเกอร์อื่นทั้งในและนอกสถานีไฟฟ้าทำการตัดวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้ รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างการป้องกันสำรองในระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.14 การป้องกันสำรองในระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 2.14 พิจารณาการป้องกันสายส่ง 1-2

- เบรกเกอร์ B12 และ B21 จะทำหน้าที่ป้องกัน โดยรับสัญญาณจาก R12 และ R21 ตามลำดับ เป็นการป้องกันระดับปฐมภูมิ
- มีการติดตั้ง R21ub จะทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R21 ซึ่งจะใช้อุปกรณ์อื่นร่วมกัน คือ หม้อแปลงกระแส และแบตเตอรี่ (ในกรณีแรงดันสูงพิเศษอาจใช้หม้อแปลงกระแส และแบตเตอรี่คนละชุด)
- มีการติดตั้ง R21bf ที่จะทำงานช้ากว่า R21 และ R21ub โดยในตอนแรกจะพยายามสั่งตัดวงจรที่ B21 ก่อน และถ้ายังไม่สามารถทำได้ก็จะสั่งตัดวงจรที่ B12, B23, B24 เรียกว่าการป้องกันการผิดพลาดในการตัดวงจร (Breaker Failure Protection)ของ B21
- ในที่นี้ R32 และ R42 จะทำหน้าที่ป้องกันสำรองระยะไกลจากบัสอื่น โดยสั่งตัดวงจรที่ B32 และ B42 ซึ่งจะมีการทำงานส่วนของการป้องกันสำรองช้ากว่า R21 และ R21bu, R21bf และไม่ได้ใช้หม้อแปลงกระแสและแบตเตอรี่ร่วมกับ R21 โดยการตัดวงจรจาการป้องกันสำรองจะทำให้สายส่ง 2-3 และ 2-4 ถูกตัดออกจากระบบด้วย

ในการตัดวงจรเพื่อแยกส่วนที่เกิดการผิดพร่องออกจากระบบนั้น อาจมีทั้งการตัดวงจรสามเฟสพร้อมกันไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรแบบใดหรืออาจมีการตัดวงจรเพียงเฟสที่เกิดลัดวงจรลงดินและตัดวงจรทั้งสามเฟสในกรณีที่มีการ

ผิดพร่องมากกว่าหนึ่งเฟสก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ทั้งนี้การเกิดการผิดพร่องหรือการลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังมีหลายกรณีที่เป็นการผิดพร่องแบบชั่วคราว (Temporaly Faults) และระบบไฟฟ้ากำลังสามารถกลับสู่สภาวะปกติได้ถ้ามีการปิดวงจรกลับ (Reclosing) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ไม่ช้าเกินไป การปิดวงจรกลับสามารถทำได้โดยผู้ปฏิบัติงาน (Manual Reclosing) โดยผู้ปฏิบัติงานสามารถควบคุมผ่านระบบ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

การปิดวงจรกลับด้วยผู้ปฏิบัติงานจะใช้เวลามากกว่าการปิดวงจรกลับแบบอัตโนมัติ (Automatic Reclosing) นอกจากนี้การปิดวงจรกลับยังต้องมีการตรวจสอบที่รอบคอบก่อนที่จะทำการปิดวงจรกลับด้วย เรียกว่า การยึดระหว่างกัน (Interlock) เพื่อยืนยันความพร้อมในการปิดวงจร โดยวิธีการตรวจสอบที่ใช้ทั่วไปประกอบด้วย

1. การตรวจสอบแรงดัน (Voltage Check) การตรวจสอบแรงดันจะใช้ในกรณีที่จะทำการปิดวงจรกลับในอุปกรณ์ที่ทราบแน่ชัดว่ามีการจ่ายไฟฟ้าจากด้านใดด้านหนึ่ง เช่นหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบแบบแขนง ซึ่งมักจะมีการรับกำลังงานไฟฟ้าทางด้านแรงสูง ดังนั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์ด้านแรงต่ำจะปิดวงจรก็ต้อเมื่อมีการตรวจสอบพบว่ามีแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงสูงแล้ว
2. การตรวจสอบการซิงโครไนซ์ (Synchronizing Check) การตรวจสอบนี้จะใช้เมื่อทำการปิดวงจรที่น่าจะมีไฟฟ้าทั้งสองข้าง ในกรณีนี้จะต้องมีการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าทั้งสองด้านและจะต้องทำการปิดวงจรในขณะที่แรงดันทั้งสองข้างซิงโครไนซ์กัน
3. การตรวจสอบอุปกรณ์ (Equipment Check) การตรวจสอบนี้จะเป็นการตรวจสอบความพร้อมที่จะทำงานของอุปกรณ์

การตรวจสอบเพื่อยืนยันความพร้อมในการปิดวงจร (Interlock) จะสามารถทำได้โดยทั้งผู้ปฏิบัติงาน (Manual) และอัตโนมัติหรือทั้งสองอย่างร่วมกัน โดยอาจเป็นการปิดวงจรกลับอัตโนมัติความเร็วสูง (ภายใน 1 วินาที) หรืออาจมีการประวิงเวลาเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขตามที่ออกแบบไว้

2.6 แบตเตอรี่สำหรับระบบป้องกันไฟฟ้ากำลัง

เงื่อนไขการทำงานเบื้องต้นของระบบไฟฟ้ากำลังก็คือ การตัดแยกส่วนที่ผิดพร่องออกจากระบบ ดังนั้นการทำงานของรีเลย์และการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าจึงควรเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับภายในสถานีไฟฟ้าเอง เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าอาจมีการผิดปกติไปด้วยในขณะที่มีการผิดพร่องขึ้น แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับรีเลย์และสำหรับตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้แม้ว่าไฟฟ้ากระแสสลับในสถานีไฟฟ้าผิดปกติไป แบเตอรี่จะต่อเข้ากับชุดอัดประจุไฟฟ้า (Charger) ซึ่งจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากภายในสถานีไฟฟ้าเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยทั่วไปแบตเตอรี่จะถูกออกแบบให้สามารถจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบป้องกันได้ 8-12 ชั่วโมงแม้ว่าระบบไฟฟ้าในสถานีจะดับไป

สิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบแบตเตอรี่สำหรับรีเลย์ก็คือการที่รีเลย์แบบไฟฟ้ากล (Electromagnetic Relays) มักจะก่อให้เกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ (Trainsient) ต่อแบตเตอรี่และอาจทำให้รีเลย์อื่นทำงาน

ผิดพลาดได้โดยเฉพาะรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นในทางปฏิบัติมักจะใช้แบตเตอรี่คนละชุดในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้แก่รีเลย์แบบไฟฟ้ากลและรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์

2.7 เซอร์กิตเบรกเกอร์

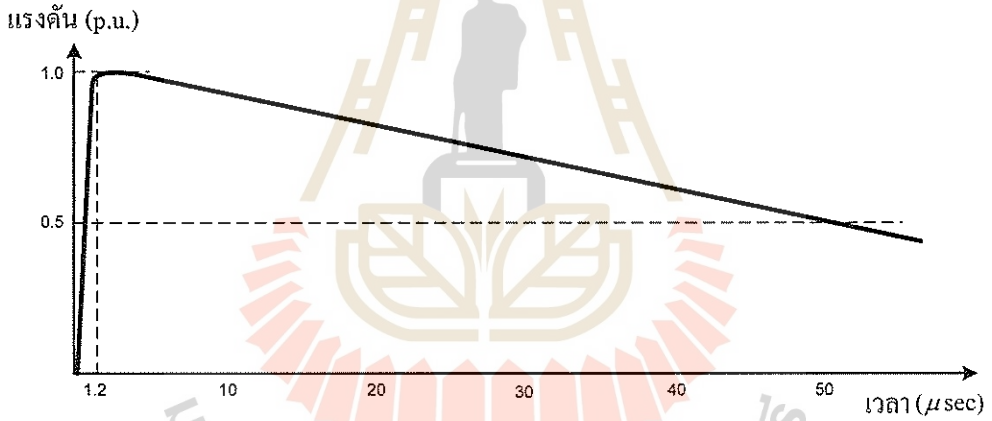
เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการตัดวงจร โดยจะรับสัญญาณตัดวงจรจากรีเลย์ป้องกัน ทั้งนี้ในการป้องกันเซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องทำการตัดวงจรในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจร ซึ่งเป็นกระแสที่สูงมากและยังมีส่วนขององค์ประกอบกระแสตรง (DC Component) ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 1.4 การออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์จะมีสองส่วนใหญ่ ๆ คือ การดับอาร์ก (Arc Interruption) และการฉนวน (Insulation) เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดที่สำคัญคือ

1. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอากาศ (Air Break Circuit Breaker) ซึ่งจะใช้การดับอาร์กโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการดับอาร์ก ซึ่งเป็นหลักการที่ง่ายที่สุด เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จะใช้กับแรงดันที่ไม่สูงนัก
2. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบเป่าอากาศ (Air Blast Circuit Breaker) ซึ่งจะใช้การดับอาร์กด้วยการเป่าพ่นอัดอากาศไปที่ลำของอาร์ก ช่วยให้สามารถดับอาร์กได้เร็วขึ้น แต่มีข้อเสียคือทำงานเสียงดัง และการบำรุงรักษามีความยุ่งยากขึ้น
3. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบสุญญากาศ (Vacuum Circuit Breaker) ซึ่งจะออกแบบให้ห้องดับอาร์คเป็นสุญญากาศเพื่อช่วยในการดับอาร์ค เหมาะสมสำหรับระดับแรงดันไม่สูงนัก การเปิดวงจรจะทำให้มีแรงดันไฟฟ้ากระชาก (Switching Surge) ที่สูง ไม่เหมาะสมที่จะใช้งานกับตัวเก็บประจุขนาน (Capacitor Bank) โดยเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบสุญญากาศมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาทำให้สามารถติดตั้งในพื้นที่ที่จำกัดได้ มีข้อควรระวังคือหากมีอากาศรั่วไหลเข้าในในห้องดับอาร์คก็อาจเกิดการระเบิดได้
4. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบน้ำมัน (Oil Circuit Breaker) ซึ่งจะใช้น้ำมันเป็นตัวกลางในการดับอาร์ก เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้เป็นหนึ่งในเซอร์กิตเบรกเกอร์ในยุคแรก แต่ก็ยังมีการใช้งานกันมากในปัจจุบัน มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนคือมีหน้าสัมผัสจุ่มอยู่ในน้ำมันโดยน้ำมันจะทำหน้าที่ระบายความร้อนและดับอาร์คที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบใช้น้ำมันมาก (Bulk oil circuit breaker) และเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบใช้น้ำมันน้อย (Minimum oil circuit breaker) ซึ่งจะมีน้ำมันในปริมาณที่น้อยกว่าแบบแรกมาก ข้อเสียของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบน้ำมันคือการทำงานจะมีเสียงดังและมีการสั่นสะเทือน และมีโอกาสลุกติดไฟได้
5. เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบก๊าซ (Gas Circuit Breaker) ซึ่งจะใช้ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulphur Hexafluoride, SF6) เป็นตัวกลางในการดับอาร์ก โดยก๊าซ SF6 มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานคือ มีความเป็นฉนวนสูง เป็นสารประกอบที่ไม่ทำปฏิกริยากับสารอื่น ไม่ติดไฟ และไม่มีพิษ

2.8 การป้องกันแรงดันเกิน

จากการที่ระบบส่งไฟฟ้ากำลังมีโอกาสที่จะได้รับสภาวะแรงดันเกินทั้งจากฟ้าผ่าและจากการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งจะทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ การออกแบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังจะต้องคำนึงถึงการเกิดสภาวะแรงดันเกินที่สูงกว่าแรงดันในการทำงานตามปกติของระบบไฟฟ้ากำลัง

ค่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวนจะกำหนดด้วยค่าระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน (Basic Impulse Insulation Level or Basic Insulation Level, BIL) ซึ่งเป็นค่าระดับแรงดันยอดคลื่นของรูปคลื่นอิมพัลส์ (Impulse) ที่จำลองตามรูปคลื่นฟ้าผ่าโดยมีรูปมาตรฐานคือ 1.2/50 ไมโครวินาที ซึ่งหมายถึงมีระยะหน้าคลื่น 1.2 ไมโครวินาที และท้ายคลื่น 50 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และค่าระดับการฉนวนอิมพัลส์สวิตชิงมูลฐาน (Basic Switching Impulse Insulation Level, BSL) ซึ่งมีรูปมาตรฐานคือ 250/2500 ไมโครวินาที นอกจากนี้ยังมีการทดสอบฉนวนที่ค่าแรงดันตามความถี่กำลัง (Power Frequency) ด้วย อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันเกินที่สัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวด้วย โดยค่าความคงทนต่อแรงดัน (Withstand Voltage) ของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าจะถูกออกแบบให้ทั้งระบบสามารถทนต่อสภาวะแรงดันเกินได้ เรียกว่าการประสานสัมพันธ์ฉนวน (Insulation Coordination) ในระบบไฟฟ้ากำลัง



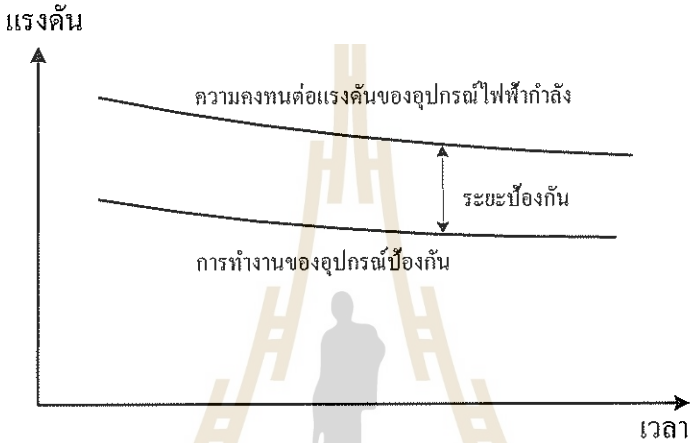
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดันทดสอบมาตรฐานแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 ไมโครวินาที

การประสานสัมพันธ์ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นการเลือกใช้ระดับความคงทนต่อแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังให้สอดคล้องกันโดยไม่เกิดความเสียหายเมื่อเกิดสภาวะแรงดันเกินที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังและคำนึงถึงการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โดยที่มีค่าใช้จ่ายที่สมเหตุสมผลตามหลักเศรษฐศาสตร์ที่สอดคล้องกับความเป็นไปได้ของการเกิดแรงดันเกิน โดยสามารถแสดงเป็นกราฟแรงดัน-เวลา (*V-t* curve) ดังในรูปที่ 2.16

ทั้งนี้หลักการประสานสัมพันธ์ฉนวนประกอบด้วย

1. การเลือกระดับความคงทนต่อแรงดันเกินของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า
2. ระยะห่าง (Clearance) ระหว่างตัวนำด้วยกันและระหว่างตัวนำกับดิน
3. ระยะของฉนวนอุปกรณ์

4. ชนิด จำนวน และตำแหน่งของกับดักฟ้าผ่าหรือกับดักเสิร์จ (Surge) และอุปกรณ์ป้องกันอื่น
ทั้งนี้ฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังมีการออกแบบตามลักษณะการใช้งานหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งได้เป็น
   1. ฉนวนภายนอกอุปกรณ์ (External Insulation) หรือลูกถ้วย มักทำจากเซรามิค หรือแก้ว โดยฉนวนชนิดนี้เมื่อไม่สามารถรักษาความคงทนได้จะเกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) ซึ่งเมื่อการวาบไฟตามผิวถูกกำจัดไปแล้วจะกลับมาคงสภาพเดิมได้ หรือเรียกว่าฉนวนที่คืนสภาพได้ (Self-Restoring Insulator)
   2. ฉนวนภายในอุปกรณ์ (Internal Insulator) มักทำจากน้ำมัน กระดาษ ไม้ หรือโพลีเมอร์ โดยฉนวนชนิดนี้เมื่อไม่สามารถรักษาความคงทนได้จะเกิดการเสียสภาพจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (Break Down) และเมื่อเกิดขึ้นแล้วฉนวนจะไม่สามารถกลับมาคงสภาพเดิมได้ (Nonself-Restoring Insulator)

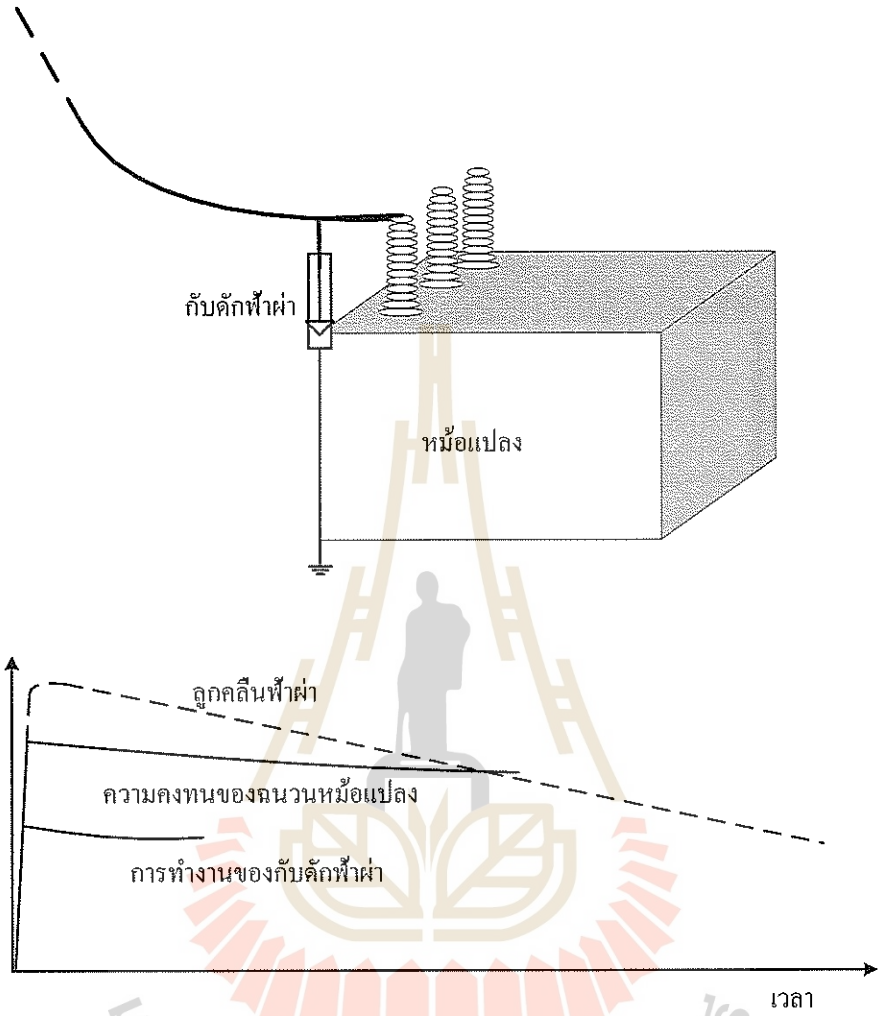


รูปที่ 2.16 กราฟแรงดัน-เวลา (V-t curve) แสดงค่าความคงทนของฉนวน
และการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน

เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังในสถานีย่อยจะมีราคาที่สูงมาก ดังนั้นโดยหลักการแล้วการเลือกใช้ฉนวนภายในสถานีไฟฟ้าจะออกแบบให้มีความคงทนต่อแรงดันเกินที่มากกว่าความคงทนต่อแรงดันของสายส่งไฟฟ้าซึ่งฉนวนด้วยลูกถ้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจว่าเมื่อการฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นได้แล้วจะเกิดการวาบไฟตามผิวที่ลูกถ้วยของสายส่งที่อยู่นอกสถานีไฟฟ้าซึ่งคืนสภาพเดิมได้แทนที่จะเกิดการเสียสภาพฉนวนของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า ในระบบส่งที่มีแรงดันระดับไม่สูงที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าจะใช้วิธีการประสานสัมพันธ์ฉนวนให้ได้เงื่อนไขดังกล่าว

อย่างไรก็ตามในกรณีที่อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการฉนวนแบบไม่สามารถกลับมาคงสภาพเดิมได้ซึ่งมักเป็นการฉนวนภายในอุปกรณ์ (Internal Insulator) เช่น การฉนวนหม้อแปลง ซึ่งเมื่อเกิดการเสียสภาพของฉนวนแล้วจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่สูงและใช้ระยะเวลานาน โดยเฉพาะในระบบไฟฟ้ากำลังแรงดันสูง ดังนั้นในกรณีที่ไม่สามารถทำการประสานสัมพันธ์ฉนวนในลักษณะดังรูปที่ 2.17 จึงต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการทำหน้าที่กำจัดรูปคลื่นแรงดันเกินออกจากระบบแทนการไหลผ่านฉนวน (Break Down) ซึ่งจะทำให้ฉนวนเสียสภาพ อุปกรณ์ที่สำคัญในการป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้ากำลังคือกับดักฟ้าผ่า (Lightning Arresters) หรือกับดักแรงดันกระชาก (Surge Arresters) ซึ่งจะทำหน้าที่ต่อวงจรในกรณีที่เกิดสภาวะแรงดันเกินให้ไหลสู่ดินเพื่อป้องกันฉนวนของอุปกรณ์ โดยการ

เลือกกับดักฟ้าผ่านจะเลือกให้ทำงานก่อนค่าความคงทนของฉนวนอุปกรณ์ที่ป้องกันและติดตั้งไว้ใกล้กับอุปกรณ์ที่ป้องกัน



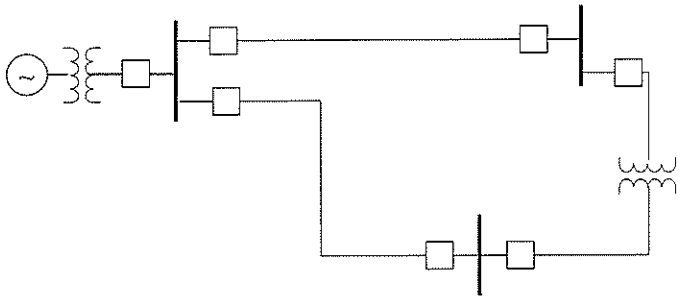
รูปที่ 2.17 การทำงานของกับดับฟ้าผ่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบฝึกหัดบทที่ 2

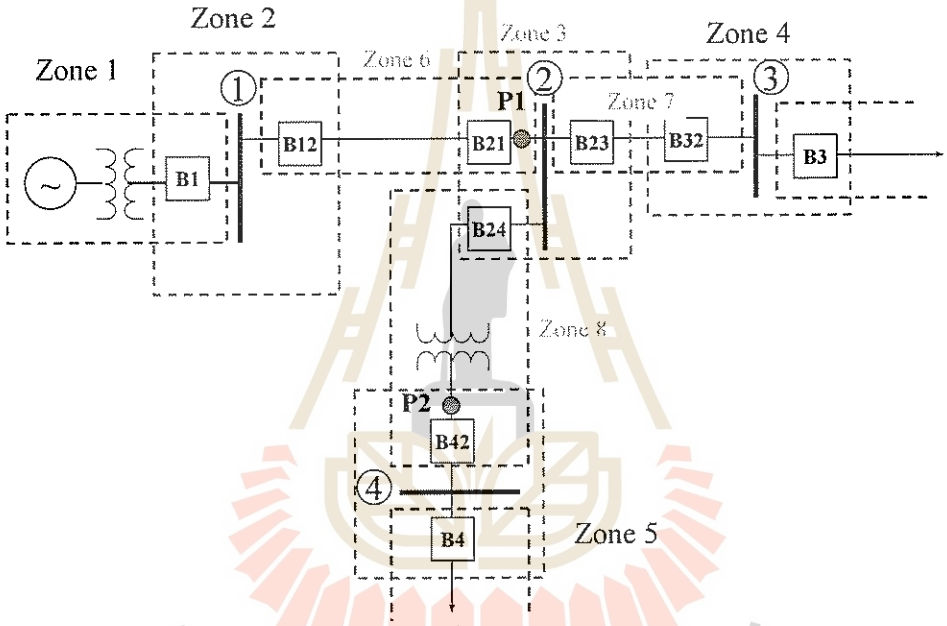
1. คุณลักษณะที่สำคัญของรีเลย์คืออะไรบ้างจงอธิบาย
2. เหตุใดจึงต้องมีการเหลื่อม (Overlap) ในการแบ่งขอบเขตการป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง
3. จงอธิบายหลักการทำงานและคุณสมบัติของรีเลย์แบบเหนี่ยวนำ
4. จงอธิบายหลักการทำงานและคุณสมบัติของรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์
5. จงอธิบายหลักการทำงานและคุณสมบัติของรีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์

6. จงกำหนดหมายเลขบัสและเบรกเกอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ P2.6.1 พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตการป้องกัน



รูปที่ P2.6.1

7. จากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการแบ่งขอบเขตการป้องกันดังรูปที่ P2.7.1 จงอธิบายว่าจะมีเบรกเกอร์ตัวใดบ้างที่ตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด P1 และเมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด P2



รูปที่ P2.7.1

8. รีเลย์ปิดวงจร (Seal-in Relay, Seal-in Unit) มีหน้าที่อย่างไร
9. สัญญาณแสดงสถานการณ์ทำงาน (Flag, Target, Indicator) มีหน้าที่อย่างไร
10. จงอธิบายวิธีการป้องกันสำรองโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันสำรองในสถานีไฟฟ้าเดียวกันและการป้องกันสำรองระยะไกลด้วยอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าอื่น
11. จงอธิบายวิธีการป้องกันการผิดพลาดในการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Breaker Failure Protection)
12. จงอธิบายวิธีการทำงานและข้อดีข้อเสียของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอากาศ
13. จงอธิบายวิธีการทำงานและข้อดีข้อเสียของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบเป่าอากาศ
14. จงอธิบายวิธีการทำงานและข้อดีข้อเสียของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบสุญญากาศ
15. จงอธิบายวิธีการทำงานและข้อดีข้อเสียของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบน้ำมัน
16. จงอธิบายวิธีการทำงานและข้อดีข้อเสียของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบก๊าซ

บทที่ 3
หม้อแปลงและอุปกรณ์ตรวจจับเครื่องมือวัด
(Instrument Transformers)

กระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องแปลงให้มีขนาดที่เล็กลงก่อนที่จะส่งไปยังเครื่องมือวัดหรือรีเลย์ด้วยเหตุผลสำคัญ 2 ประการคือ

1. สามารถออกแบบรีเลย์ให้มีขนาดเล็ก สะดวกในการใช้งาน และราคาต่ำกว่า
2. มีความปลอดภัยต่อผู้ทำงานในระบบป้องกันมากกว่า

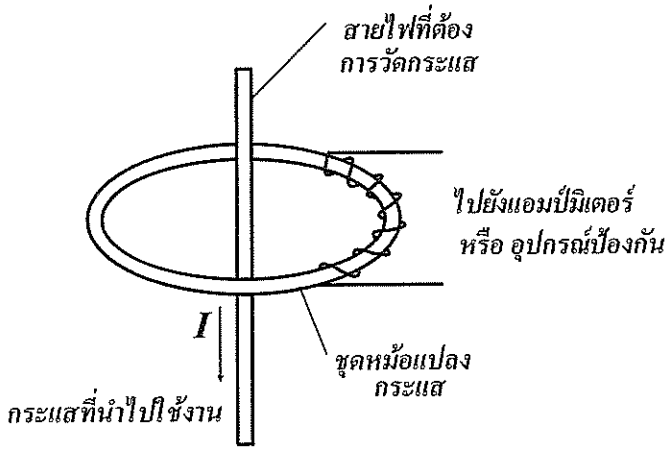
การแปลงขนาดของกระแสและแรงดันในระบบป้องกันจะใช้หม้อแปลงเพื่อการวัดที่เรียกว่า หม้อแปลงกระแส (Current Transformer, CT) และหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer, VT; Potential Transformer, PT) ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงกำลังทั่วไปแต่การออกแบบจะมีความเฉพาะเจาะจงมากกว่า เป็นต้นว่าในการออกแบบหม้อแปลงกระแสจะต้องทำให้กระแสทางด้านทุติยภูมิมีรูปสัญญาณเหมือนกับทางด้านปฐมภูมิให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และเช่นเดียวกับหม้อแปลงแรงดันที่ต้องมีรูปสัญญาณของแรงดันทางด้านทุติยภูมิเหมือนกับทางด้านปฐมภูมิ พิกัดกำลังของหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดันจะไม่สูงเนื่องจากภาระที่ต้องจ่ายจะมีเพียงเครื่องมือวัดและระบบป้องกันคือรีเลย์ พิกัดกำลังของหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดันจะเรียกว่า ค่าเบอร์เดน (Burden) ของหม้อแปลง

ค่าเบอร์เดนของหม้อแปลงจะสะท้อนถึงค่าอิมพีแดนซ์ของภาระที่หม้อแปลงต้องจ่าย ซึ่งหมายถึงอิมพีแดนซ์ของรีเลย์หรือเครื่องมือวัด แต่มักจะบอกเป็นค่าของกำลังงาน (VA) เช่น หม้อแปลงจ่ายกระแส 5 A ไปยังตัวต้านทานขนาด 0.1 ohm จะกล่าวได้ว่าหม้อแปลงนี้มีค่าเบอร์เดน 2.5 VA ($S = (5^2)(0.1) = 2.5$) ที่กระแส 5 A

3.1 หม้อแปลงกระแส (Current Transformers)

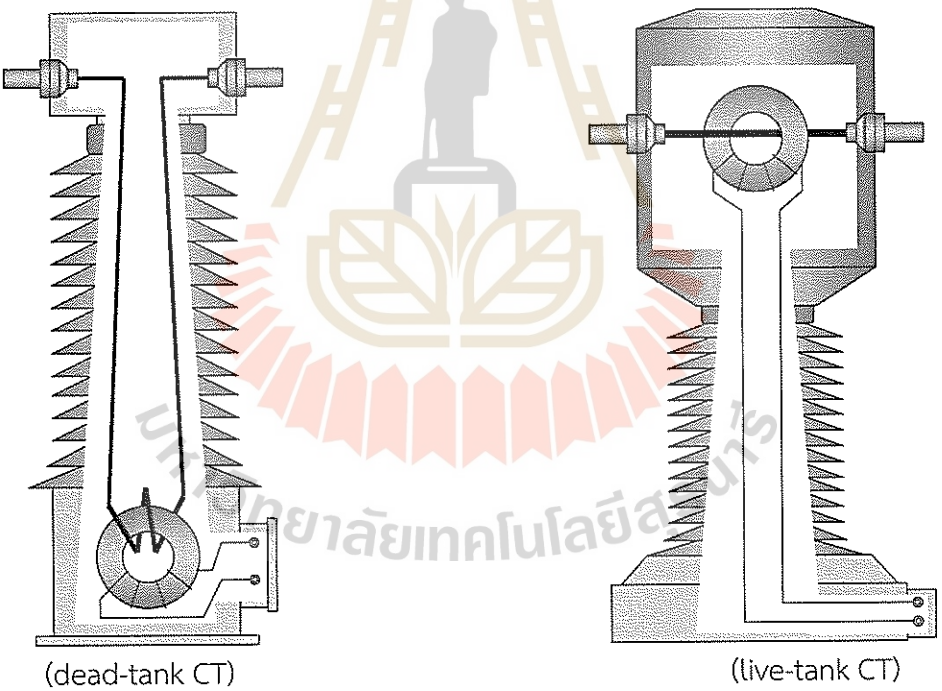
หม้อแปลงกระแส (current transformer, CT) จะช่วยลดกระแสไฟฟ้าสูง ๆ ก่อนที่จะส่งไปให้แก่อุปกรณ์วัดโดยมีหลักการดังแสดงในรูปที่ 3.1

หม้อแปลงกระแสสามารถแบ่งตามโครงสร้างการติดตั้งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบบรรจุในถังซึ่งจะติดตั้งอิสระ แยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังอื่น (Free standing) เช่นเดียวกับ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงกำลัง หรือรีแอกเตอร์ โดยถังจะเป็นโลหะที่มีการต่อลงดิน ภายในบรรจุตัวกลางฉนวนซึ่งมักจะเป็นน้ำมัน อุปกรณ์แบบนี้จะมีปลอกขั้วต่อ (Bushing) ยื่นออกมาสำหรับต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หม้อแปลงกระแสอีกชนิดหนึ่งคือแบบที่ติดตั้งภายในปลอกขั้วต่อ (Bushing) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าเรียกว่า (Bushing CT) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

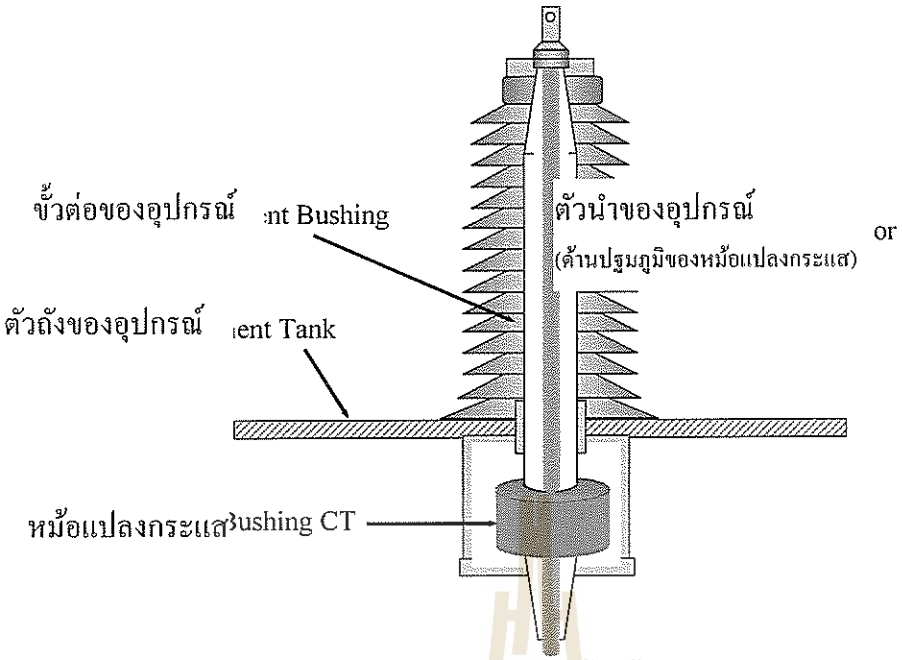


รูปที่ 3.1 แสดงหลักการทำงานหม้อแปลงกระแส

ส่วนในแง่ของการใช้งานนั้นหม้อแปลงกระแสยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทเช่นกัน คือหม้อแปลงกระแสเพื่อการวัดซึ่งการออกแบบจะเน้นความถูกต้องแม่นยำในการทำงานสภาวะปกติ (Steady state) และหม้อแปลงกระแสเพื่อการป้องกัน ซึ่งการออกแบบจะเน้นความแม่นยำในสภาวะการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ (Transient)



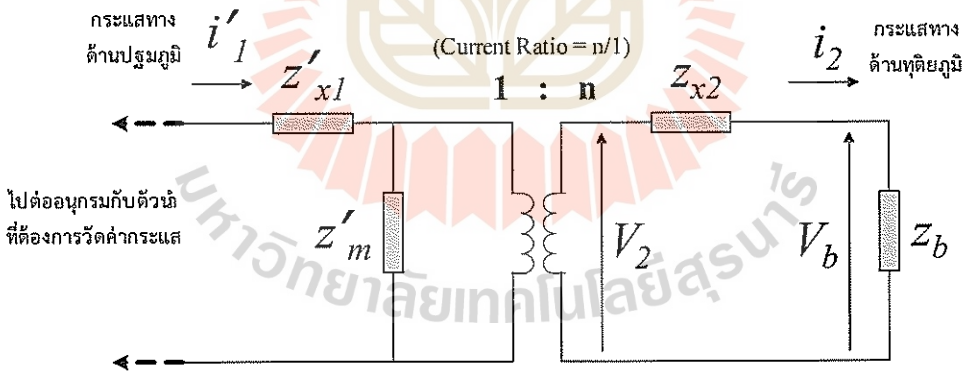
รูปที่ 3.2 หม้อแปลงกระแสแบบบรรจุในถัง



รูปที่ 3.3 หม้อแปลงกระแสแบบติดตั้งที่ขั้วต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า

3.1.1 คุณลักษณะของหม้อแปลงกระแสในสภาวะการทำงานปกติ (Steady state)

วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสสามารถพิจารณาได้แบบเดียวกับหม้อแปลงกำลังทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสที่มีอัตราส่วนขดลวดเป็น 1 : n หรือมีอัตราส่วนกระแสเป็น n/1



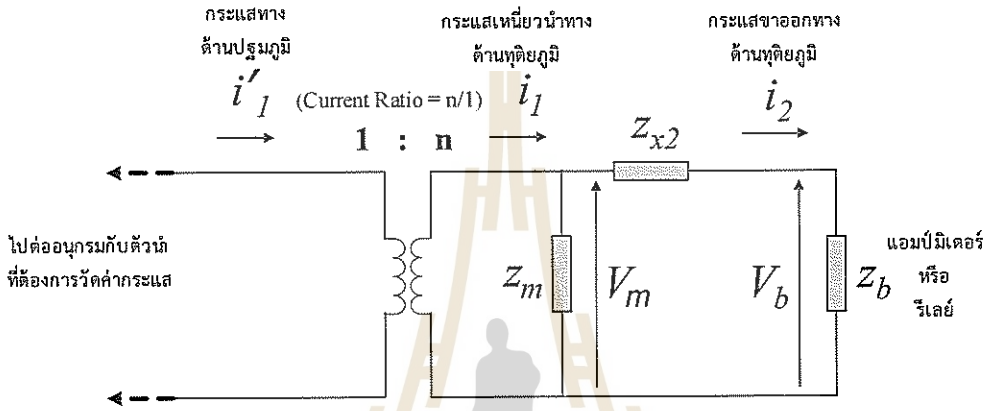
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแส

จากรูปที่ 3.4 z'_{x1} เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิซึ่งจะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ ส่วน z_b คือค่าอิมพีแดนซ์ภาระ (Load) ของหม้อแปลงกระแสซึ่งก็คือค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือวัดและรีเลย์ที่ต่ออยู่ด้านทุติยภูมิรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำที่ต่อจากหม้อแปลงกระแสมายังเครื่องมือวัดและรีเลย์ด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำดังกล่าวมีค่าที่ไม่สามารถตัดทิ้งได้เพราะมีค่าที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากมักจะต้องต่อระหว่างหม้อแปลงกระแสซึ่งอยู่ในลานไกกับเครื่องมือวัดและรีเลย์ซึ่งอยู่ในห้องควบคุม

เมื่อทำการอ้างอิงค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิมาทางด้านทุติยภูมิจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 โดยที่

$$i_1 = \frac{i_1'}{n} \quad \text{A} \quad (3.1)$$

$$Z_m = n^2 Z_m' \quad \text{Ohm} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสเมื่ออ้างอิงค่าอิมพีแดนซ์มาทางด้านทุตยภูมิ และไม่คำนึงถึงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิ

z_m คือค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำของแกนแม่เหล็กหรือ Magnetizing impedance ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ภาระของหม้อแปลงกระแสหรือ z_b จะเรียกว่าเบอร์เดน (Burden) ของหม้อแปลงกระแสโดยสามารถระบุเป็น z_b Ohm หรือเป็น $I^2 z_b$ VA เช่นถ้าหม้อแปลงกระแสมีพิกัดด้านทุติยภูมิเป็น 5 A ก็จะมีค่าเบอร์เดนพิกัดเป็น $25\, z_b$ VA

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.5 จะได้ว่า

$$V_m = V_b + Z_{x2} i_2 \quad \text{V} \quad (3.3)$$

$$i_m = \frac{V_m}{Z_m} \quad \text{A} \quad (3.4)$$

$$i_1 = i_2 + i_m \quad \text{A} \quad (3.5)$$

ในกรณีที่เป็นหม้อแปลงในอุดมคติ i_2 จะมีค่าเท่ากับ i_1 (ไม่มีความคลาดเคลื่อน) แต่ในความเป็นจริงจะเห็นว่า i_2 จะแตกต่างจาก i_1 อยู่เท่ากับ i_m ซึ่งก็คือค่าความคลาดเคลื่อน (error) ของหม้อแปลงกระแสนั่นเอง ดังนั้นสามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนต่อหน่วย (per unit error) ได้เป็น

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_2}{i_1} = \frac{i_m}{i_1} \qquad (3.6)$$

ข้อสังเกต

1. ในกรณีที่ z_b มีค่าน้อยจะทำให้มีค่าต่ำ กระแส i_1 จะไหลมาทางด้าน i_2 ได้มาก (i_2 ใกล้เคียงกับ i_1) ทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง การใช้งานหม้อแปลงกระแสจึงควรมีค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือวัดและรีเลย์ที่ต่ำ จึงจะทำให้เกิดความผิดพลาดของหม้อแปลงกระแสต่ำ
2. พิจารณาถ้ามีกระแสไหลในด้านปฐมภูมิ i_1 แต่ด้านทุติยภูมิเปิดวงจรอยู่ ($i_2 = 0$) กระแสจะไหลวนในแกนเหล็กทั้งหมด ($i_m = i_1$) ทำให้เกิดความร้อนและสร้างความเสียหายแก่หม้อแปลงกระแสได้

การบอกค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสสามารถบอกด้วยค่าตัวประกอบอัตราส่วนความถูกต้อง หรือ Ratio Correction Factor (RCF) หรือบางครั้งใช้สัญลักษณ์ *R* ได้ โดยค่านี้จะเป็นค่าที่นำไปคูณกับอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสเพื่อปรับค่าให้ถูกต้อง โดยค่า RCF หาได้ดังนี้

จาก $$\varepsilon = \frac{i_1 - i_2}{i_1} \qquad (3.7)$$

$$\varepsilon i_1 = i_1 - i_2 \qquad (3.8)$$

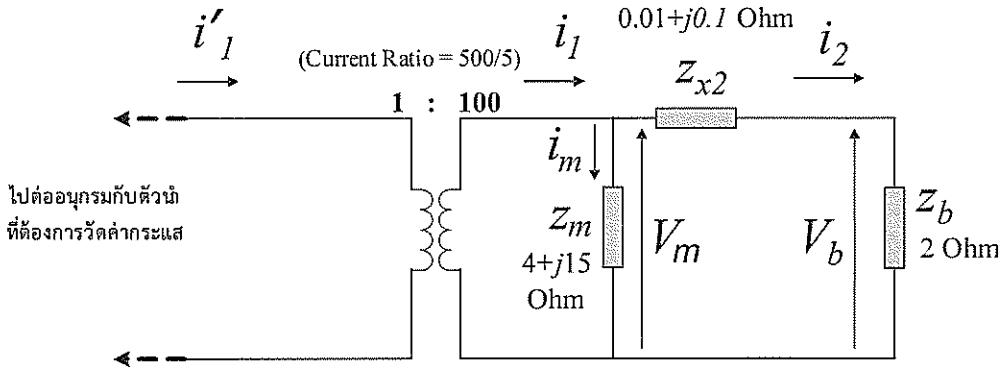
$$i_2 = i_1(1-\varepsilon) \quad \text{A} \qquad (3.9)$$

$$i_1 = \frac{1}{(1-\varepsilon)} i_2 = RCF \cdot i_2 \quad \text{A} \qquad (3.10)$$

$$RCF = \frac{1}{(1-\varepsilon)} \qquad (3.11)$$

ตัวอย่างที่ 3.1 หม้อแปลงกระแสมีอัตราส่วน 500/5 A ด้านทุติยภูมิต่ออยู่กับเบอร์เดน (z_b) 2 Ohm โดยผ่านสายตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 0.01+*j*0.1 Ohm ถ้าค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำของหม้อแปลง (z_m) เท่ากับ 4+*j*15 Ohm จงคำนวณหาค่า Ratio Correction Factor ของหม้อแปลงกระแส

วิธีทำ สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสในตัวอย่างที่ 3.1

จากวงจรสมมูลจะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_m &= i_1\left[(4+j15)//(0.01+j0.1+2)\right] \\ &= i_1\frac{(2.01+j0.1)(4+j15)}{(2.01+j0.1)+(4+j15)} \\ &= i_1(1.922\angle 9.62^\circ) \end{aligned}$$

และ $$i_m = \frac{V_m}{4+j15} = \frac{i_1(1.922\angle 9.62^\circ)}{4+j15} = i_1(0.1238\angle -65.45^\circ)$$

Per unit error จะคำนวณได้จาก

$$\varepsilon = \frac{i_m}{i_1} = \frac{i_1(0.1238\angle -65.45^\circ)}{i_1} = 0.1238\angle -65.45^\circ$$

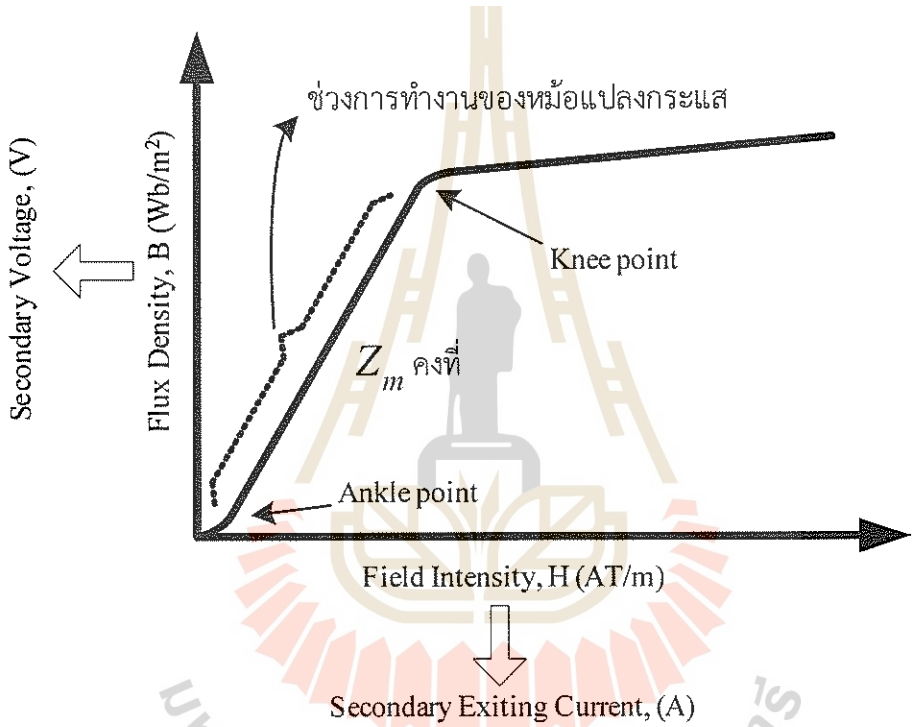
ดังนั้น

$$RCF = \frac{1}{(1-\varepsilon)} = \frac{1}{1-0.1238\angle -65.45^\circ} = 1.0468\angle -6.79^\circ \text{ (สำหรับ } z_b = 2 \text{ Ohm)}$$

จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสจะขึ้นอยู่กับเบอร์เดนที่ต่ออยู่ นอกจากนี้ในทางปฏิบัติค่าความคลาดเคลื่อนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการตอบสนองของแกนแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย ซึ่งจะทำให้ค่า Z_m ไม่ใช่ค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux density, Wb/m^2) ซึ่งจะสอดคล้องกับแรงดันทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (Secondary Voltage, V) กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระตุ้น (Field Intensity or Excitation, H, AT/m) ซึ่งจะสอดคล้องกับกระแสกระตุ้นทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (Secondary Exiting Current, A) โดยจุดที่หม้อแปลงกระแสเริ่มอิ่มตัวเรียกว่าจุดเริ่มอิ่มตัวหรือจุด

ข้อเข่า (knee point) ของหม้อแปลงกระแส นอกจากนี้ยังมีจุดข้อเท้า (ankle point) ที่เป็นจุดการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็กเช่นกันในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีค่าต่ำ

จากกราฟในรูปที่ 3.7 จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่าง i_m และ V_m ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Z_m ไม่คงที่) เมื่อแกนเหล็กอิ่มตัว ซึ่งในการคำนวณที่คำนึงถึงการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กจะมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก นอกจากนี้บางกรณีไม่สามารถหากราฟแสดงคุณสมบัติการตอบสนองทางแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสได้ อย่างไรก็ตามเราสามารถพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสจากการดูที่มาตรฐานของหม้อแปลงกระแสที่ได้กำหนดไว้เรียกว่า Standard Class Designation ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.7 คุณลักษณะการตองสนองทางแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส (log-log scale)

3.1.2 มาตรฐานความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแส (Standard Class Designation)

ในกรณีที่ต้องการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสแต่ไม่สามารถหากราฟหรือข้อมูลการตอบสนองทางแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแสได้ก็สามารถใช้การประมาณจาก Standard Class Designation ซึ่งเป็นการกำหนดประเภทของหม้อแปลงกระแสตามค่าความคลาดเคลื่อน ตัวอย่างเช่นในกรณีของ American National Standard Institute (ANSI) และ the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) ได้กำหนดมาตรฐาน ANSI/IEEE ของหม้อแปลงกระแสเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม 2 ตัวแยกออกจากกันด้วยตัวอักษร C หรือ T เช่น 10C400 หรือ 10T300 เป็นต้น โดยตัวเลขด้านหน้าแสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเมื่อแรงดันด้านทุติยภูมิมีค่าเท่ากับตัวเลขที่สองในขณะที่กระแสของหม้อแปลงกระแสมีค่าเป็น 20 เท่าของพิกัด

ตัวอักษร C จะหมายถึงการกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสจะสามารถพิจารณาได้จากการคำนวณ (Calculate) ส่วนตัวอักษร T หมายถึงการพิจารณาคุณสมบัติของหม้อแปลงกระแสจะต้องหาจากการทดสอบ (Test) เนื่องจากความไม่แน่นอนของตัวแปรบางตัวในการออกแบบ

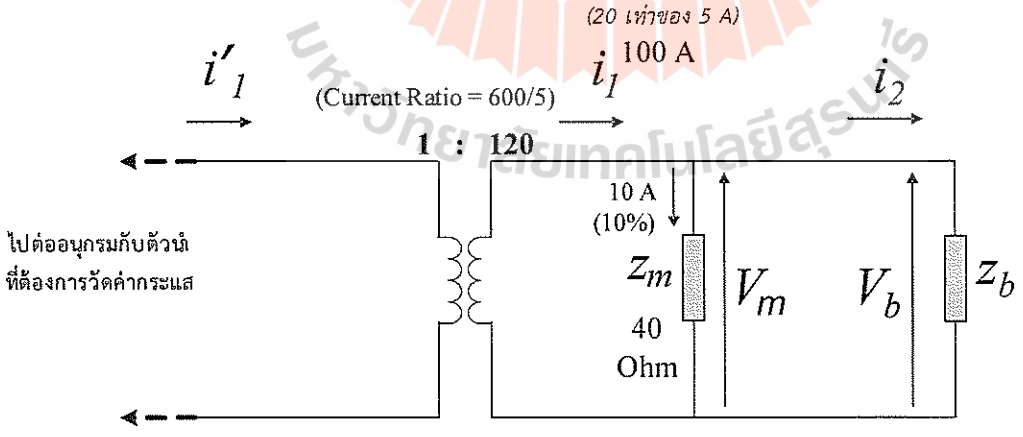
ตัวอย่างเช่น ถ้าหม้อแปลงกระแสมีพิกัดด้านทุติยภูมิ 5 A จัดอยู่ใน Class 10C400 หมายถึงหม้อแปลงกระแสจะมีความผิดพลาดไม่เกิน 10% ในขณะที่มีกระแสด้านทุติยภูมิ 5(20) = 100 A เมื่อต่ออยู่กับเบอร์เดนที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม 400 V ถ้าเราสมมติว่าหม้อแปลงกระแสมีการตอบสนองทางแม่เหล็กเป็นเชิงเส้นก็จะสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดได้โดยจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันตกคร่อมด้านทุติยภูมิ

ในมาตรฐาน IEC หม้อแปลงกระแสเพื่อการป้องกันจะกำหนดด้วยตัวอักษร P ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 5% หรือ 10% ขึ้นอยู่กับค่าเบอร์เดนและกระแสพิกัด เช่น 5P10 โดยตัวเลขด้านหน้าแสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด (Permissible Total Error) ตัวเลขตัวหลังจะเป็นค่า ตัวประกอบจำกัดค่าความแม่นยำ (Accuracy Limit Factor, *ALF*) ซึ่งเป็นจำนวนเท่าของกระแสพิกัด ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงกระแส 600/5 A, 30 VA, 5P10, 5A จะหมายถึงหม้อแปลงกระแสพิกัด 30 VA, 600/5 A หรือหมายถึงแรงดันพิกัดด้านทุติยภูมิ 30/5 = 6 V ที่ค่ากระแสพิกัด โดยจะมีค่าความคลาดเคลื่อน (error) ไม่เกิน 5% ที่ค่ากระแสด้านปฐมภูมิมีค่าไม่เกิน 10 เท่าของพิกัดคือ 10x600 = 6,000 A

ตัวอย่างที่ 3.2 พิจารณาหม้อแปลงกระแส600/5 A Class 10C400 จงหาค่าเบอร์เดนที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 10% ขณะที่กระแสด้านปฐมภูมิมีค่าเป็น 5000 A

วิธีทำ

CT 600/5 A Class 10C400 จะมีกระแสด้านทุติยภูมิ 5(20) = 100 A โดยที่มีความผิดพลาดไม่เกิน 10% ถ้าต่ออยู่กับเบอร์เดนที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมไม่เกิน 400 V ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของหม้อแปลงกระแสในตัวอย่างที่ 3.2

สมมติให้มีการตอบสนองทางแม่เหล็กเป็นเชิงเส้น (Z_m คงที่) จะได้ว่า

$$Z_m = \frac{400}{(0.1)(100)} = 40 \qquad \text{Ohm}$$

ถ้ากระแสด้านปฐมภูมิเป็น 5000 A กระแสด้านทุติยภูมิจะมีค่าเป็น

$$i_1 = \frac{5}{600} \cdot 5000 = 41.66 \qquad \text{A}$$

จากการที่มีความผิดพลาดสูงสุด 10% นั่นคือกระแสด้านทุติยภูมิจะคลาดเคลื่อนไป 10% หรือเท่ากับ 4.166 A หรือ

$$i_m = 4.166 \qquad \text{A}$$

ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม

$$V_m = i_m Z_m = (4.166)(40) = 166.64 \text{ V}$$

ค่าเบอร์เดนจะเป็น

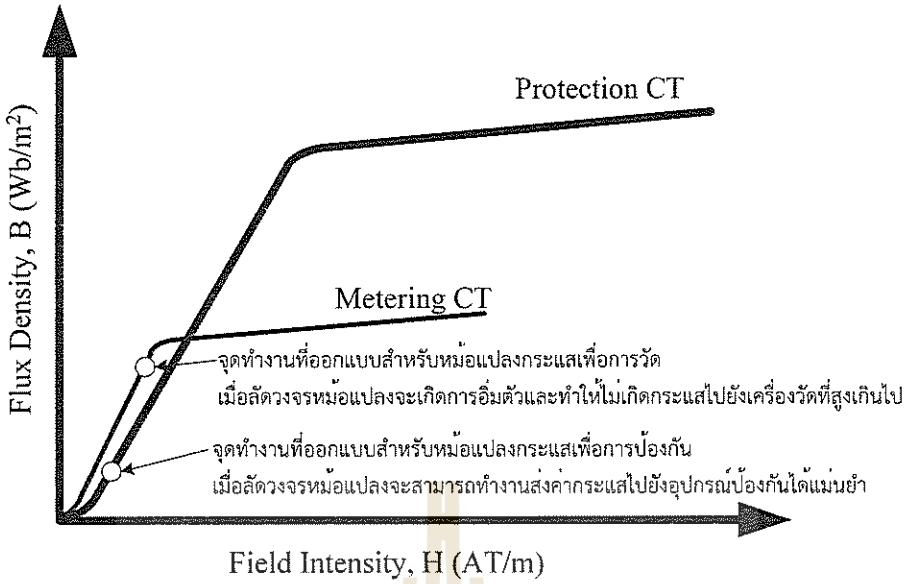
$$Z_b = \frac{V_b}{i_2} = \frac{166.64}{41.66 - 4.166} = 4.44 \qquad \text{Ohm}$$

ค่าเบอร์เดน 4.44 Ohm จะทำให้เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 10% และค่าเบอร์เดนที่ต่ำกว่านี้จะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยกว่า 10%

3.1.3 จุดอิ่มตัวหรือจุดข้อเข่า (Knee-Point) ของหม้อแปลงกระแส

หม้อแปลงกระแสเพื่อการวัดและหม้อแปลงกระแสเพื่อการป้องกันจะออกแบบให้มีจุดทำงานที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยหม้อแปลงกระแสเพื่อการวัดจะทำงานที่จุดใกล้จุดอิ่มตัว (knee point) และมีความแม่นยำสูงในสภาวะของกระแสปกติที่แกนเหล็กของหม้อแปลงยังไม่อิ่มตัว และเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นหม้อแปลงกระแสเพื่อการวัดจะเกิดการอิ่มตัวทำให้ไม่มีกระแสไหลไปที่มิเตอร์ในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อไม่ทำให้มิเตอร์เกิดความเสียหาย ส่วนหม้อแปลงกระแสเพื่อการป้องกัน จะทำงานที่สภาวะค่ากระแสที่ห่างจากจุดอิ่มตัวมาก และอาจไม่มีความแม่นยำสูงในสภาวะกระแสปกติ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรแล้วหม้อแปลงจะไม่เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กและจะให้ค่ากระแสที่ถูกต้องไปยังรีเลย์ป้องกันได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.9 แสดงจุดทำงานในการออกแบบหม้อแปลงกระแสเพื่อการวัดและเพื่อการป้องกัน

ในการคำนวณจุด knee point ของหม้อแปลงกระแส สามารถอ้างอิงได้จากมาตรฐาน IEC และ IEEE ซึ่งมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน โดยในมาตรฐาน IEEE ถือว่าจุดที่หม้อแปลงอิ่มตัวเป็นจุดที่เส้นโค้งแสดงคุณลักษณะของแกนเหล็ก B-H curve มีความชันเป็น 45 องศา ส่วนในมาตรฐาน IEC จุด knee point จะระบุจากจุดซึ่งถ้าค่าของ B ที่จุดนั้นเพิ่มขึ้น 10% แล้วค่าของ H จะเพิ่มขึ้น 50% ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยแรงดันที่จุด knee point จะมีความสัมพันธ์กับค่า ALF ด้วยตามสมการ

$$V_k = ALF\left(\frac{VA}{I_n}\right) \quad \text{V} \qquad (3.12)$$

โดยที่

V_k เป็นค่าแรงดันที่จุดหัวเข่า (knee point) ของหม้อแปลงกระแส (V)

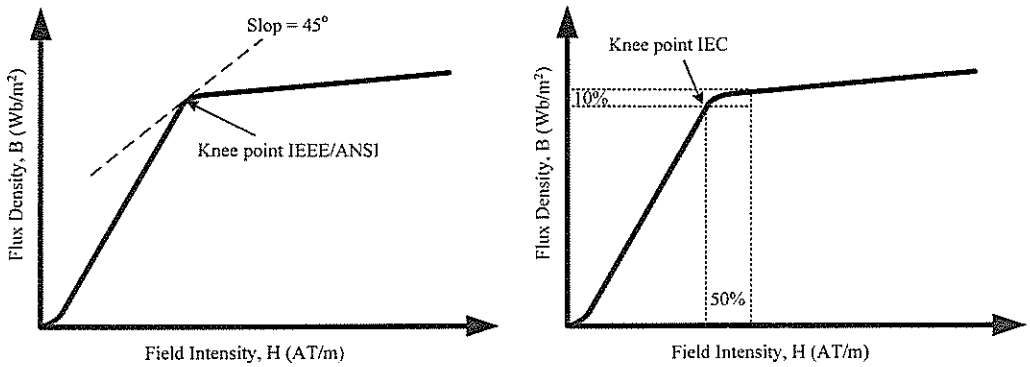
ALF เป็นค่า Accuracy Limit Factor

VA เป็นค่าเบอร์เดนพิกัดของหม้อแปลงกระแส (VA)

I_n เป็นค่ากระแสพิกัดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแส (A)

ในกรณีที่ทราบค่าความต้านทานของหม้อแปลงกระแส (R_{CT}) จะสามารถหาค่าแรงดันที่จุดหัวเข่าได้จากสมการ

$$V_k = ALF\left(I_n \cdot R_{CT} + \frac{VA}{I_n}\right) \quad \text{V} \qquad (3.13)$$



รูปที่ 3.9 จุดเริ่มอิ่มตัวหรือจุดหัวเข่าของหม้อแปลงกระแส

ตัวอย่างที่ 3.3 หม้อแปลงกระแสตามมาตรฐาน IEC 400/1 A พิกัดเบอร์เดน 15VA Class 10P20 มีความต้านทาน 15 Ohm จงหาค่าแรงดันที่จุดหัวเข่า (knee point voltage)

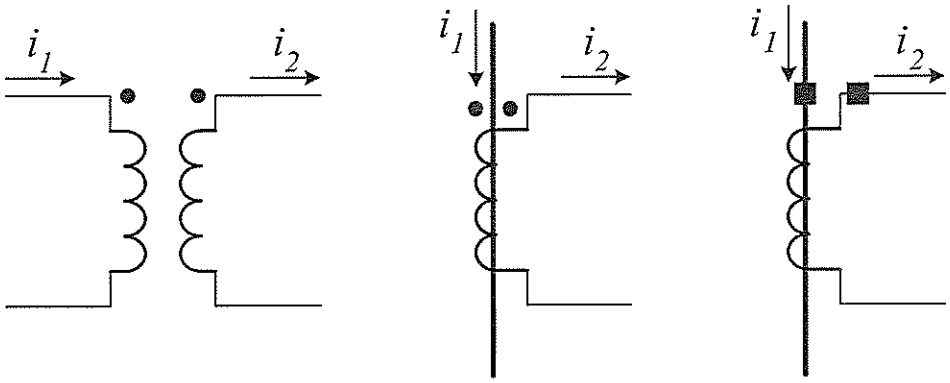
วิธีทำ $$V_k = ALF\left(I_n \cdot R_{CT} + \frac{VA}{I_n}\right) \quad \text{V}$$

$$= 20\left(1\times 1.5 + \frac{15}{1}\right) = 330 \quad \text{V}$$

ดังนั้นหม้อแปลงกระแสจะมีค่าแรงดันที่จุดหัวเข่า (knee point voltage) ไม่ต่ำกว่า 330 V

3.1.4 การกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแส

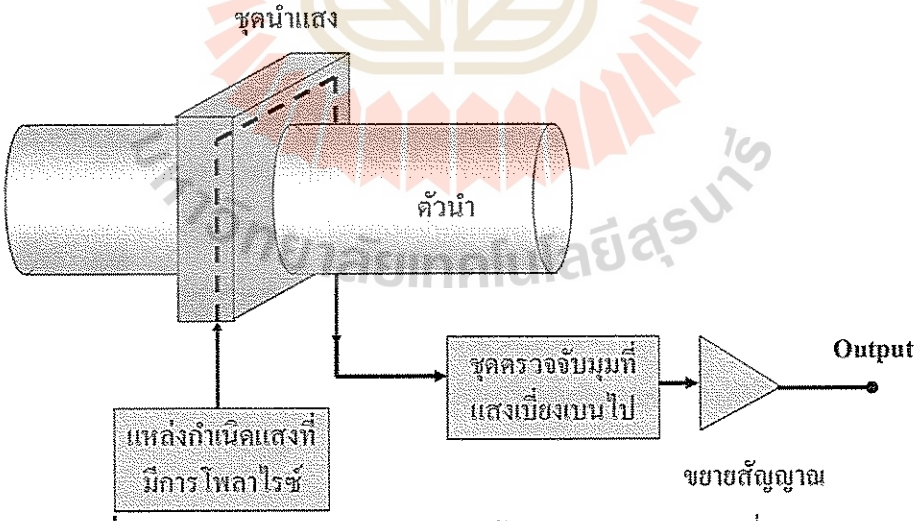
เนื่องจากขดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสจะต่ออยู่กับวงจรป้องกันที่มีความสำคัญและค่อนข้างซับซ้อน จึงต้องให้ความสำคัญในการกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแสให้ชัดเจน การกำหนดขั้วหรือการกำหนด Dot หรือ Polarity ของหม้อแปลงกระแสเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ การกำหนดขั้วของหม้อแปลงกระแสสามารถให้เป็นจุดทึบ (dot) ที่แสดงปลายด้านเริ่มต้นของขดทั้งสอง และจากปลายด้านนี้จะเป็นการพันไปในแกนด้วยทิศทางเดียวกัน (ตามเข็มหรือทวนเข็มเหมือนกัน) ดังนั้นถ้ากระแสไหลเข้าด้านจุดกำหนด (Dot) ของด้านปฐมภูมิก็จะทำให้กระแสไหลออกทางด้านจุดกำหนด (Dot) ของด้านทุติยภูมิ (กระแสทั้งสองมีมุมเฟสเดียวกัน) ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดขั้วของ CT

3.1.5 หม้อแปลงกระแสแบบเหนี่ยวนำแสง (Electrocnic CT or Optical CT)

ในปัจจุบันหม้อแปลงกระแสแบบเหนี่ยวนำแสงหรือแบบอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาและมีการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีข้อดีกว่าหม้อแปลงกระแสแบบแกนแม่เหล็กหลายข้อ การทำงานของหม้อแปลงกระแสแบบเหนี่ยวนำแสงจะให้หลักการของความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในตัวนำด้านปฐมภูมิและการเกิดโพราไลเซชั่น (Poralization) ในระนาบของแสงที่พุ่งผ่านใยแก้วนำแสง (fiber-optic) ที่ติดตั้งอยู่ข้างตัวนำหรือบางครั้งก็พันรอบตัวนำด้านปฐมภูมิ จากนั้นทำการตรวจจับมุมโพราไลเซชั่นที่แสงหมุนไป (angular shift) และทำการแปลงสัญญาณเป็นแรงดัน ที่สอดคล้องกับกระแสทางด้านปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 สัญญาณแรงดันนี้อาจถูกขยายหรือผ่านวงจรกรองสัญญาณตามความเหมาะสม หรืออาจใช้วิธีสุ่มค่าเป็นช่วง (sampling) ในอัตราที่เหมาะสมหม้อแปลงกระแสแบบเหนี่ยวนำแสงจะเหมาะสำหรับรีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์หรือคอมพิวเตอร์ที่รับสัญญาณในลักษณะสุ่มเป็นช่วง (sampling) หรือกับเครื่องวัดที่เป็นดิจิทัลหรืออิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



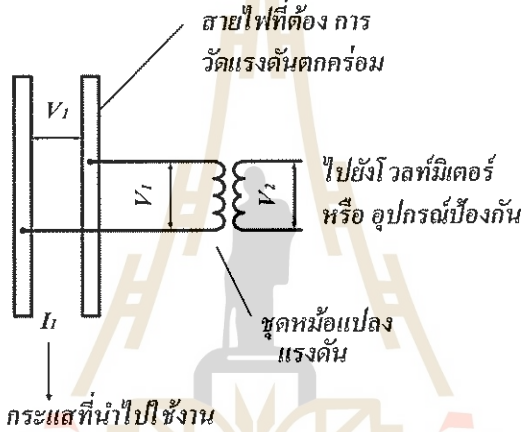
รูปที่ 3.11 แสดงหลักการทำงานของหม้อแปลงกระแสแบบเหนี่ยวนำแสง

CT แบบเหนี่ยวนำแสงมีช่วงการวัดที่กว้างและแม่นยำตั้งแต่กระแสต่ำ ๆ ไปถึงกระแสที่สูง นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ไม่ต้องใช้ฉนวนน้ำมันซึ่งจะปลอดภัยจากการระเบิด และมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามการใช้งานหม้อแปลงกระแสชนิดนี้จะต้องมีแหล่งจ่ายไฟให้แก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

3.2 หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformers)

3.2.1 หม้อแปลงแรงดัน

หม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer, VT หรือ Potential Transformer, PT) เป็นหม้อแปลงที่ใช้ในการแปลงค่าแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังให้มีขนาดที่ต่ำลง โดยมีหลักการทำงานเหมือนหม้อแปลงกำลังทั่วไป ค่าความผิดพลาดของหม้อแปลงแรงดันโดยปกติจะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ในทางปฏิบัติ (ถ้าใช้งานในช่วง 0-110% ของพิกัด) รูปที่ 3.12 แสดงหลักการทำงานของ VT

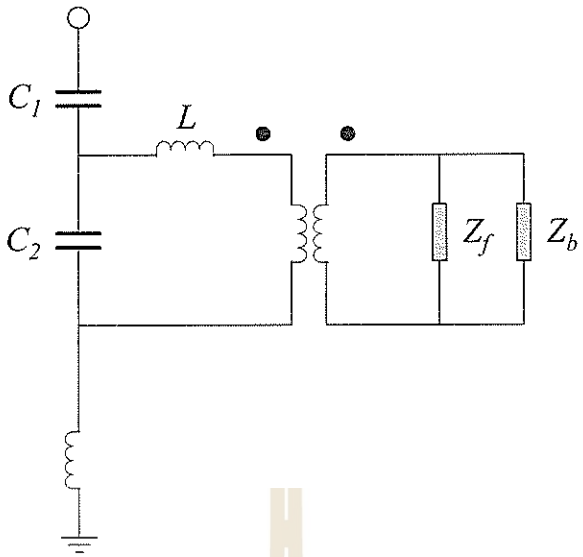


รูปที่ 3.12 แสดงหลักการทำงานของหม้อแปลงแรงดัน (VT)

หม้อแปลงแรงดันที่ใช้วัดแรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage, EHV) จะมีราคาแพงมาก จึงมีการใช้หม้อแปลงแรงดันแบบต่อกับตัวเก็บประจุ (Coupling Capacitor Voltage Transformer) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2.2 หม้อแปลงแรงดันแบบต่อกับตัวเก็บประจุ (Coupling Capacitor Voltage Transformer, CCVT)

หม้อแปลงแรงดันแบบต่อกับตัวเก็บประจุเป็นการวัดแรงดันสูงโดยใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 การออกแบบจะทำให้มีแรงดันที่ตกคร่อม C_2 จะมีค่าประมาณ 1-4 kV จากนั้นจะต่อเข้ากับหม้อแปลงแรงดัน โดยผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L) ค่าอิมพีแดนซ์ Z_f และ Z_b จะออกแบบให้มีการชดเชยการเกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ ซึ่งอาจเกิดได้ในบางสภาวะการทำงาน



รูปที่ 3.13 แสดงหลักการทำงานของหม้อแปลงแรงดันแบบต่อกับตัวเก็บประจุ

ในการทำงานปกติ กระแสที่ไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจาก Z_f ขนานกับ Z_b จะมีค่าน้อยมาก แต่ก็ทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (Phase shift) ระหว่างแรงดันด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิได้

จากวงจรในรูปที่ 3.13 จะสามารถเขียนวงจรสมมูลแบบเทวินินได้ดังรูปที่ 3.14 โดย

$$V_{TH} = V_1 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \tag{3.14}$$

และ

$$Z_{TH} = \frac{1}{j\omega C_1 + j\omega C_2} \tag{3.15}$$

ถ้ากระแสด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิเป็น i_1 และ i_2 ตามลำดับ จะได้ว่า

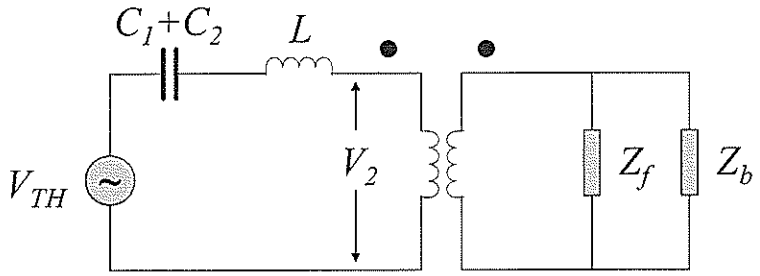
$$V_2 = V_{TH} - i_1\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1 + j\omega C_2}\right) \tag{3.16}$$

นั่นคือ V_2 จะมีมุมเฟสที่เลื่อนออกไปจากแรงดันที่ต้องการวัด นอกจากว่า L จะชดเชย C_1+C_2 ได้พอดี นั่นคือ

$$j\omega L = \frac{-1}{j\omega C_1 + j\omega C_2} \tag{3.17}$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 (C_1 + C_2)} \tag{3.18}$$

บางครั้งการออกแบบหม้อแปลงที่ดีก็สามารถทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์รั่วไหล (Leakage Impedance) เท่ากับ L ได้ซึ่งจะชดเชยการเลื่อนเฟสได้พอดี



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรสมมูลแบบเทวินินของหม้อแปลงแรงดันแบบต่อกับตัวเก็บประจุ

แบบฝึกหัดบทที่ 3

1. เหตุใดจึงต้องมีการแปลงกระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลังก่อนที่จะส่งไปยังเครื่องมือวัดหรือรีเลย์
2. จงอธิบายความหมายของคำว่า เบอร์เดนของหม้อแปลงเพื่อการวัด
3. เหตุใดจึงต้องมีการแยกประเภทหม้อแปลงกระแสเพื่อการวัดและเพื่อการป้องกัน
4. หม้อแปลงกระแสมีอัตราส่วน 600/5 A ด้านทุติยภูมิต่ออยู่กับเบอร์เดน (z_b) 1 Ohm โดยผ่านสายตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์ $0.01+j0.1$ Ohm ถ้าค่าอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำของหม้อแปลง (z_m) เท่ากับ $2+j5$ Ohm จงคำนวณหาค่า Ratio Correction Factor ของหม้อแปลงกระแส
5. ค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสจะขึ้นอยู่กับอะไรบ้างจงอธิบาย
6. หม้อแปลงกระแสตามมาตรฐาน IEEE มีอัตราส่วน 900/5 A Class 10C600 จงหาค่าเบอร์เดนที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 5% ขณะที่กระแสด้านปฐมภูมิมีค่าเป็น 6000 A
7. หม้อแปลงกระแส (CT) ขนาดพิกัดเบอร์เดน 15 VA อัตราการทดกระแส 300/5 A มี Accuracy Class เป็น 10 P 20 ค่า Accuracy Limit Factor (ALF) และ Knee Point Voltage (Vk) มีค่าใด
8. หม้อแปลงกระแสตามมาตรฐาน IEC 600/5 A พิกัดเบอร์เดน 30VA Class 10P20 มีความต้านทาน 20 Ohm จงหาค่าแรงดันที่จุดหัวเข่า (knee point voltage) ของหม้อแปลงกระแส
9. จงอธิบายหลักการของหม้อแปลงแรงดันแบบต่อกับตัวเก็บประจุ (CCVT)
10. จงอธิบายหลักการแก้ไขปัญหาการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ในหม้อแปลงแรงดันแบบต่อกับตัวเก็บประจุ (CCVT)

บทที่ 4

การป้องกันกระแสเกินและความผิดพร่องลงดิน

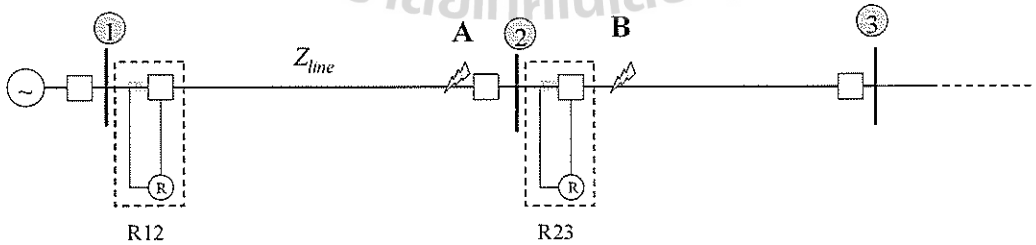
(Overcurrent and Ground Fault Pretections)

การป้องกันกระแสเกินหรือกระแสลัดวงจรถือว่าเป็นการป้องกันพื้นฐานของอุปกรณ์ทุกชนิดในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการเกิดลัดวงจรจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้อย่างมาก สิ่งที่ต้องพิจารณาในการป้องกันกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าคือ ปริมาณของกระแสลัดวงจรที่จะเกิดขึ้นได้ ทิศทางการไหลและโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงการทำงานสัมพันธ์กับระบบป้องกันอื่น ๆ (Coordination) ด้วย ทั้งนี้การพิจารณาสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจร (Short Citcuit Current) ด้วยวิธีการองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Components) และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (System Stability) ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังมักจะเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายที่ซับซ้อนทำให้ในทางปฏิบัติมักจะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

4.1 สิ่งที่ต้องพิจารณาในการป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง

โดยทั่วไปแล้วรีเลย์กระแสเกินจะไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างการลัดวงจรที่ปลายขอบเขตการป้องกันกับการลัดวงจรที่ต้นขอบเขตที่อยู่ถัดไป และปัญหานี้จะแก้ไขได้ยากขึ้นเมื่ออิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มีค่าต่ำ เนื่องจากสิ่งที่มีผลโดยตรงต่อค่ากระแสลัดวงจรคือค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ ทำให้ไม่สามารถใช้รีเลย์กระแสเกินเพียงอย่างเดียวในการป้องกันได้ โดยรีเลย์ประเภทอื่น ๆ จะกล่าวถึงในบทต่อ ๆ ไป

พิจารณาระบบสายส่งดังรูปที่ 4.1 เป็นการเชื่อมต่อระหว่างสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น (Z_{line}) ต่อ ซึ่งค่ากระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่ต้นทางและค่า Z_{line} โดยในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรที่จุด A และ B จะใกล้เคียงกันมาก และรีเลย์ R12 จะแยกแยะความแตกต่างระหว่างกระแสลัดวงจรทั้งสองจุดได้ยากมาก (หรืออาจไม่ได้เลย) การปรับตั้งค่าของรีเลย์ R12 ให้ทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์ R23 จึงเป็นสิ่งสำคัญในการป้องกันกระแสลัดวงจร



รูปที่ 4.1 การเกิดลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำให้รีเลย์กระแสเกินแยกแยะได้ยาก

นอกจากค่ากระแสลัดวงจรแล้ว ระดับของแรงดันก็เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาในระบบป้องกัน โดยปกติในระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงกว่ามักจะต้องมีการป้องกันที่ซับซ้อนและมีราคาแพงกว่า เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบที่มี

แรงดันสูงมักจะมีราคาแพง และจะมีผลกระทบต่อระบบโดยรวมมากกว่าเมื่อเกิดปัญหาขึ้น จึงต้องให้ความสำคัญในความปลอดภัยมากกว่าระบบที่มีแรงดันต่ำ อย่างไรก็ตามบางครั้งระบบป้องกันของสายส่งในระบบแรงดันสูง (HV) ที่เป็นสายส่งส่วนที่สำคัญมากของระบบก็อาจมีการลงทุนไม่น้อยไปกว่าสายส่งในระบบแรงสูงพิเศษ (EHV)

4.2 รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาตามมาตรฐาน IEC60255

รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาหรือหน่วงเวลา (Time-Delay Overcurrent Relays) ในมาตรฐาน IEC จะใช้สัญญลักษณ์ หรือเรียกว่ารีเลย์กระแสเกินแบบแปรผกผันกับเวลา (Inverse Time Overcurrent Relay) โดยการแสดงคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$t = \frac{K}{I^n - 1} \cdot TMS \qquad (4.1)$$

โดยที่

$$I = \frac{I_R}{I_P} \qquad (4.2)$$

เมื่อ t เป็นเวลาที่หน่วงของรีเลย์

I เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ ซึ่งจะแสดงเป็นสัดส่วนของกระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ เป็นค่าต่อหน่วย (per unit) ในมาตรฐาน IEC เรียกว่า ค่าหมุดตัวคูณปรับตั้ง (Plug Setting Multiplier, PSM)

I_R เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ (จากหม้อแปลงกระแส) เป็นA (A)

I_P เป็นค่ากระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ ในมาตรฐาน IEC เรียกว่า ค่ากระแสปรับตั้งรีเลย์ (Relay Current Setting)

K, n เป็นค่าคงที่ของคุณสมบัติรีเลย์

TMS เป็นค่าการปรับค่าตัวคูณประวิงเวลา (Time Multiplier Setting)

รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาผกผันจะทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ เรียกว่าค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current, Plug Setting, I_P) เวลาที่รีเลย์ใช้ในการทำงานจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เกินจากกระแสเริ่มต้นทำงานว่ามีค่ามากเท่าใดโดยเวลาจะลดลงเมื่อกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์มากขึ้น

นอกจากนี้ รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันโดยปกติจะมีการจำกัดเวลาต่ำสุดเรียกว่า Inverse Definite Minimum Time Overcurrent Relay (IDMT Relay) รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบ IDMT จะทำงานในลักษณะของรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาผกผันในช่วงกระแสลัดวงจรต่ำ ๆ และจะทำงานในลักษณะของรีเลย์กระแสเกินแบบแน่นอนถ้าค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูง โดยปกติเวลาจะคงที่ที่กระแสเป็น 20 เท่าของกระแสปรับตั้ง (I = 20 p.u.)

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมาตรฐาน

(Standard Inverse Time Overcurrent Relay, SI)

การทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมาตรฐานเป็นไปตามสมการ

$$t = \frac{0.14}{I^{0.02} - 1} \cdot TMS \qquad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.3)$$

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมาก

(Very Inverse Time Overcurrent Relay, VI)

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากจะมีการทำงานที่ตอบสนองต่อกระแสลัดวงจรเร็วกว่ารีเลย์แบบ IDMT รีเลย์ชนิดนี้จะถูกเลือกใช้ในกรณีที่ไม่สามารถปรับตั้งรีเลย์ IDMT ให้ทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์ตัวอื่นได้ การทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากเป็นไปตามสมการ

$$t = \frac{13.5}{I - 1} \cdot TMS \qquad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.4)$$

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากที่สุด

(Extremely Inverse Time Overcurrent Relay)

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากที่สุด จะมีการตอบสนองต่อค่ากระแสลัดวงจรที่เร็วขึ้นกว่ารีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมาก คุณสมบัติการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้จะทำงานสัมพันธ์กับฟิวส์ได้ดี นอกจากนี้รีเลย์ชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้ในการป้องกันการทำงานเกินพิกัด (Overload) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า การทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากที่สุดเป็นไปตามสมการ

$$t = \frac{80}{I^2 - 1} \cdot TMS \qquad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.5)$$

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันเวลานาน

(Lone Inverse Time Overcurrent Relay, LI)

การทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันเวลานานจะมีการทำงานที่มีความชันไม่มาก ซึ่งจะเหมาะในการใช้ป้องกันกระแสเกินในกรณีที่มอเตอร์ทำงานโหลดเกิน โดยจะมีสมการการทำงานเป็น

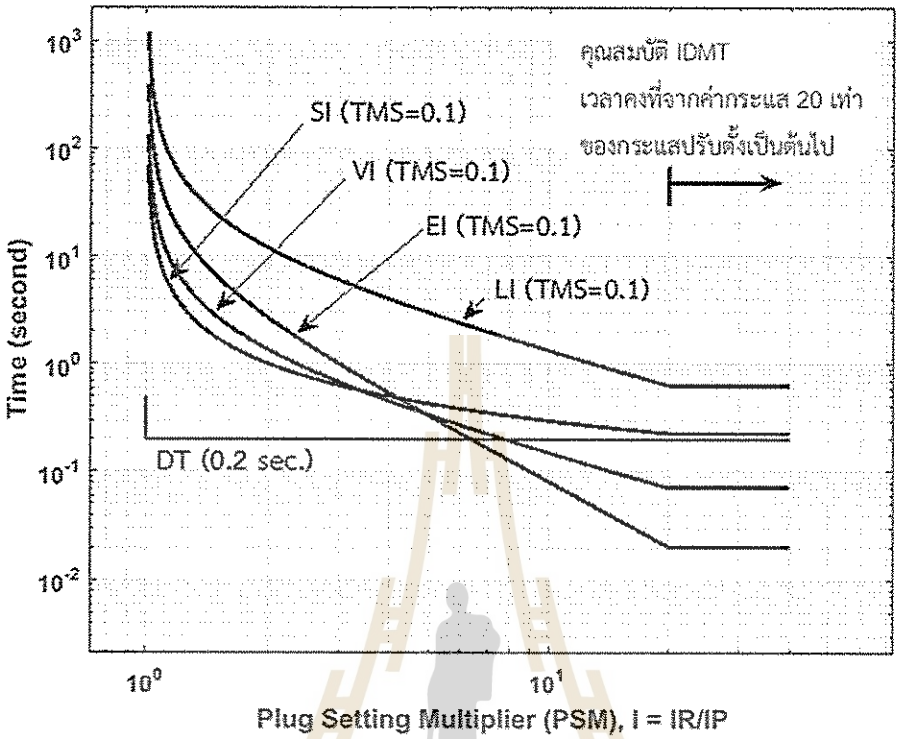
$$t = \frac{120}{I - 1} \cdot TMS \qquad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.6)$$

รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาแน่นอน

(Definite Time Over Current Relay, DT)

รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาแน่นอนจะทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้เช่นเดียวกัน แต่ระยะเวลาที่รีเลย์ทำงานนั้นจะมีค่าที่แน่นอนไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่เกินจากกระแสเริ่มต้นทำงานว่ามีค่ามากเท่าใด โดยระยะเวลาในการทำงานของรีเลย์จะขึ้นอยู่กับการปรับตั้ง

ตัวอย่างคุณลักษณะการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาแต่ละชนิดตามมาตรฐาน IECสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยกราฟแสดงการทำงานของรีเลย์จะเรียกกว่า กราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC)



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างคุณลักษณะของรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาตามมาตรฐาน IEC (Time-Current Curve, TCC)

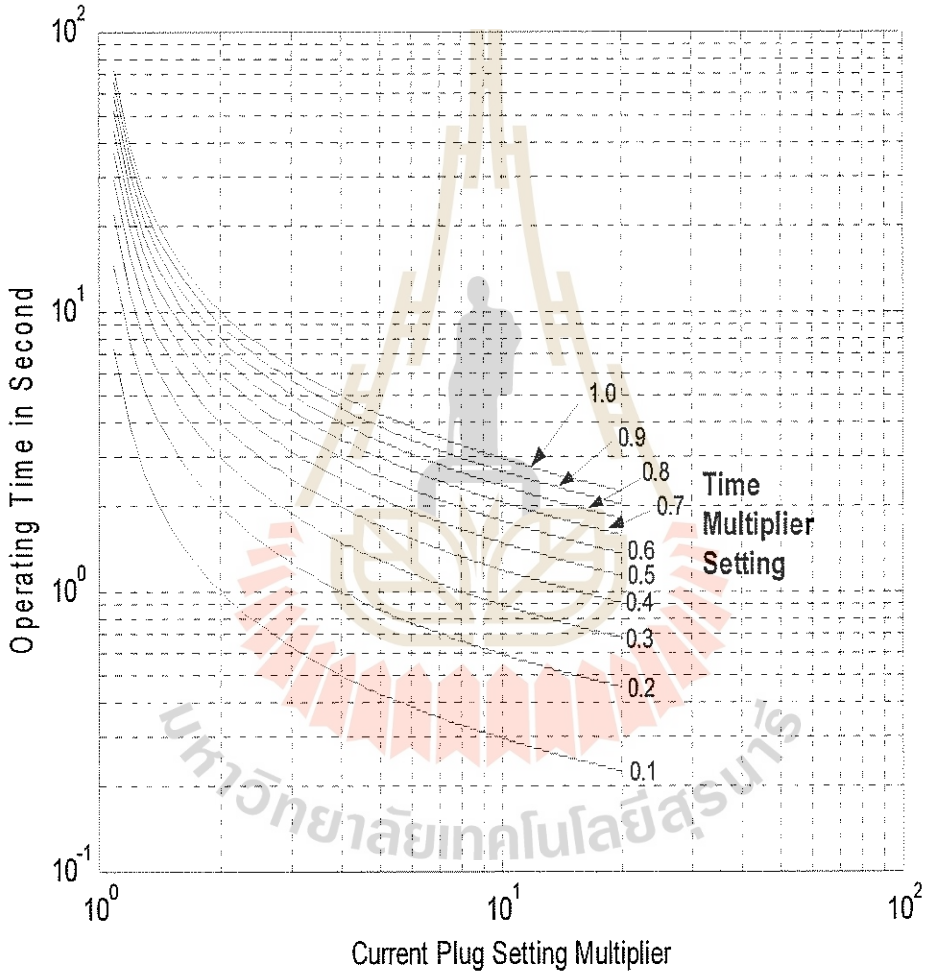
ในมาตรฐาน IEC รีเลย์กระแสเกินจะมีคุณสมบัติการประวิงเวลาเป็นกราฟตามหัวข้อที่ 6.2.1 หลายเส้นโดยปรับตั้งที่ค่าตัวคูณเวลา (Time Multiplier Setting, TMS) ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1 มาตรฐาน IEC จะมีการปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกัดรีเลย์ โดยในกรณีการป้องกันการลัดวงจรระหว่างเฟสจะมีปรับตั้งกระแสของรีเลย์ ได้ตั้งแต่ 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, และ 200% นั่นคือถ้ารีเลย์มีพิกัดเป็น 5 A ก็จะสามารถปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้เป็น 2.5 A (50%), 3.75 (75%), 5 A (100%), ..., 10 A (200%) ถ้ากระแสเริ่มต้นทำงานเป็น 2.5 A ก็จะเริ่มต้นทำงานเมื่อกระแสเกิน 2.5 A ไหลผ่านรีเลย์ ส่วนการลัดวงจรลงดินจะปรับตั้งกระแสพิกัดของรีเลย์ (Rated Current Setting) ได้ตั้งแต่ 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% และ 80% รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติของรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาตามมาตรฐาน IEC

ในรีเลย์รุ่นใหม่ที่เป็นเป็นแบบดิจิทัลหรือแบบไมโครโปรเซสเซอร์จะสามารถปรับตั้งค่าได้ละเอียดมากขึ้น เช่น สามารถเลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้ในช่วง 10 – 240% ห่างกันช่วงละ 5%

จากรูปที่ 6.3 ค่าบนแกน y จะเป็นเวลาที่รีเลย์หน่วงไว้ตามการปรับตั้ง TMS แต่ละเส้น ส่วนค่าบนแกน x จะเป็นค่าหมุดตัวคูณปรับตั้ง (Plug Setting Multiplier, PSM) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนของกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์กับค่าพิกัดของรีเลย์หรือเป็นค่ากระแส / ในสมการการทำงานของรีเลย์

$$PSM = I = \frac{I_R}{I_P} \tag{4.8}$$

ตัวอย่างเช่น รีเลย์พิกัด 5 A ถ้าทำการปรับตั้งพิกัดกระแสของรีเลย์ไว้ที่ 50% จะได้เป็น 2.5 A และถ้าค่ากระแสที่ไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 10 A จะมีค่า PSM = 10/2.5 = 4 กล่าวคือมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เป็น 4 เท่าของค่ากระแสปรับตั้ง ทั้งนี้การทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลามาตรฐาน IEC สามารถแสดงโดยสรุปได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างคุณสมบัติของรีเลย์ตามมาตรฐาน IEC (SI, $t = \frac{0.14}{I^{0.02}-1} \cdot TMS$)

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่แสดงคุณสมบัติของรีเลย์ตามมาตรฐาน IEC60255 ($t = \frac{K}{I^n - 1} \cdot TMS$)

Characteristic	*K*	*n*
Standard Inverse	0.14	0.02
Very Inverse	13.5	1
Extremely Inverse	80	2
Long Invers	120	1

ตัวอย่างที่ 4.1 รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาผกผันมีคุณสมบัติการทำงานแบบ SI ดังสมการ $t = \frac{0.14}{I^{0.02} - 1} \cdot TMS$ (IEC) ถ้าใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 1000/5 A พิกัดรีเลย์ที่มีค่า 5 A ปรับตั้งค่ากระแสของรีเลย์ไว้ที่ 100% ของพิกัด ตั้งค่า TMS ไว้ที่ 0.5 เมื่อเกิดกระแสผิดพร่องมีค่าเท่ากับ 5000 A รีเลย์จะทำงานที่เวลาเท่าใด

วิธีทำ ตัวอย่างที่ 6.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

ค่ากระแสพิกัดของรีเลย์เป็น 5 A ปรับตั้งที่ 100% ของ 5 A นั่นคือกระแสปรับตั้งเท่ากับ 5 A

เมื่อกระแสทางด้านปฐมภูมิเป็น 5000 A

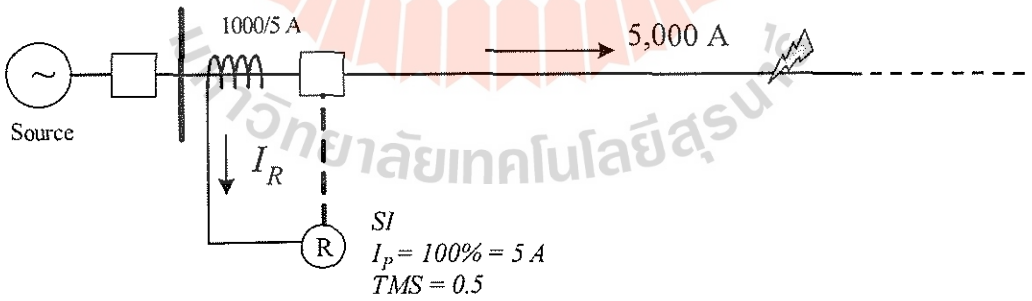
จะมีกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ 5000(5/1000) = 25 A

ค่ากระแส 25 A จะเท่ากับค่า PSM = 25/5 = 5

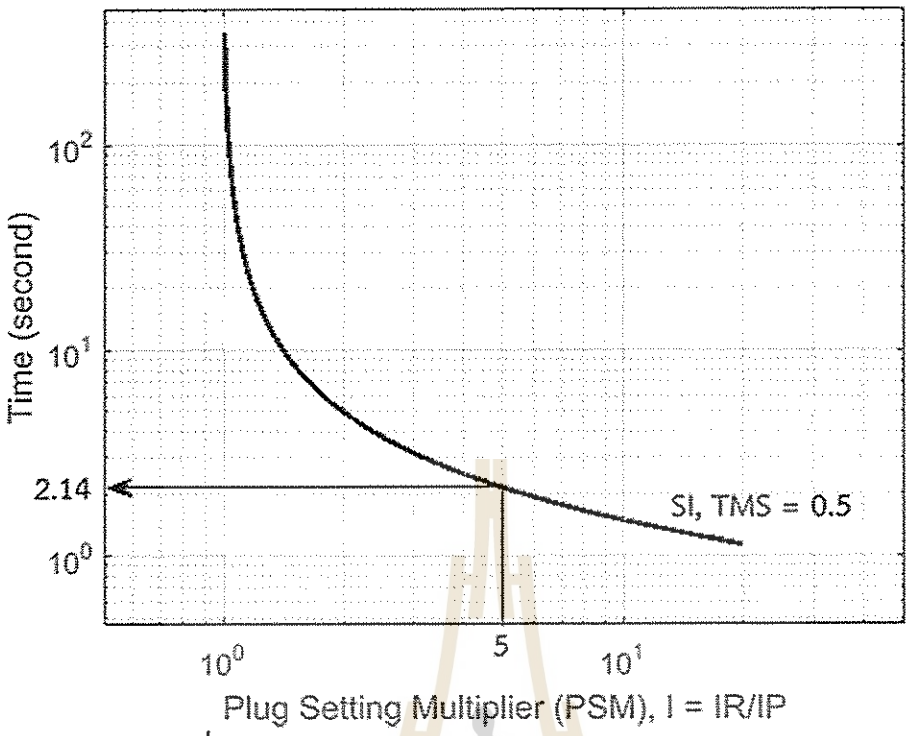
ถ้าปรับค่า TMS ไปที่ 0.5 จะมีการประวิงเวลาเป็น

$$t = \frac{0.14}{5^{0.02} - 1} \cdot 0.5 = 2.14 \text{ sec.}$$

โดยสามารถแสดงจุดทำงานบนกราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC) ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 การทำงานของรีเลย์กระแสเกินในตัวอย่างที่ 4.1



รูปที่ 4.5 กราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC)
ของรีเลย์กระแสเกินในตัวอย่างที่ 4.1

ตัวอย่างที่ 4.2 รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาผกผันมากที่สุด มีคุณสมบัติการทำงานแบบ EI ตามสมการ $t = \frac{80}{I^2 - 1} \cdot TMS$ (IEC) ใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 1000/5 A พิกัดรีเลย์ที่มีค่า 5 A ปรับตั้งค่ากระแสของรีเลย์ไว้ที่ 125% ของพิกัด ถ้าต้องการให้รีเลย์ทำงานที่เวลา 2 วินาที เมื่อเกิดกระแสผิดพร่องมีค่าเท่ากับ 6000 A จะต้องปรับตั้งค่า TMS เท่าใด

วิธีทำ ตัวอย่างที่ 4.2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

ค่ากระแสพิกัดของรีเลย์เป็น 5 A ปรับตั้งที่ 125% ของ 5 A นั่นคือกระแสปรับตั้งเท่ากับ 6.25 A

เมื่อกระแสทางด้านปฐมภูมิเป็น 6000 A

จะมีกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ 6000(5/1000) = 30 A

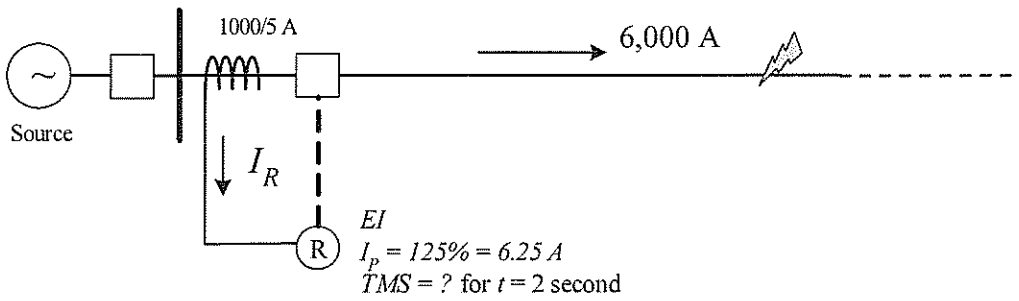
ค่ากระแส 30 A จะเท่ากับค่า PSM เป็น I = 30/6.25 = 4.8

ถ้าต้องการประวิงเวลา 2 วินาที จะได้ว่า

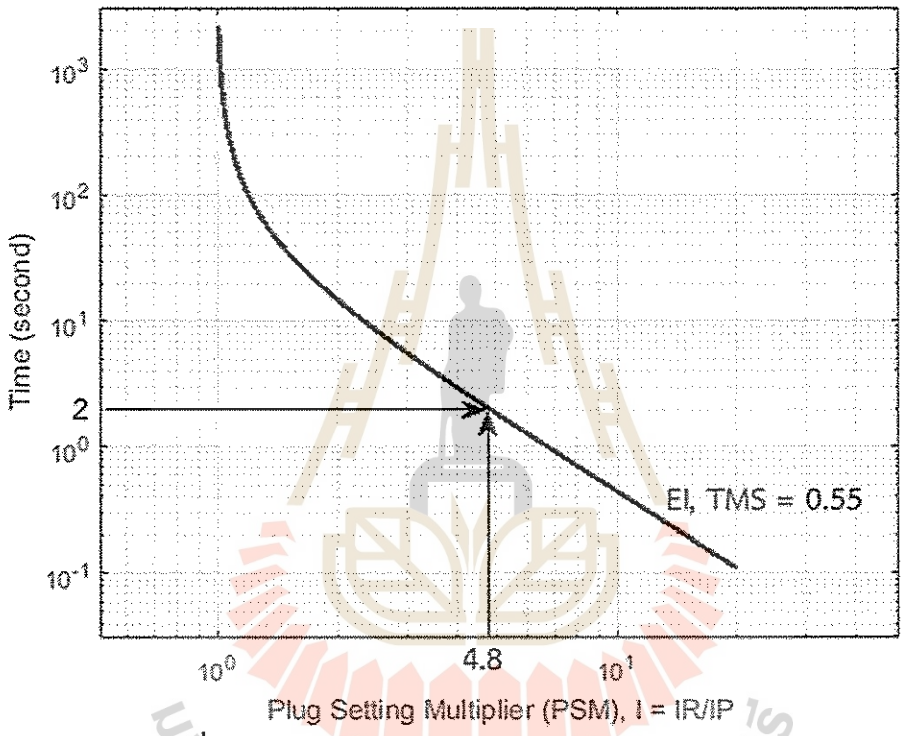
$$2 = \frac{80}{4.8^2 - 1} \cdot TMS = 3.63 \cdot TMS$$

ดังนั้นต้องปรับตั้ง $TMS = \frac{2}{3.63} = 0.55$

โดยสามารถแสดงจุดทำงานบนกราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC) ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 การทำงานของรีเลย์กระแสเกินในตัวอย่างที่ 4.2



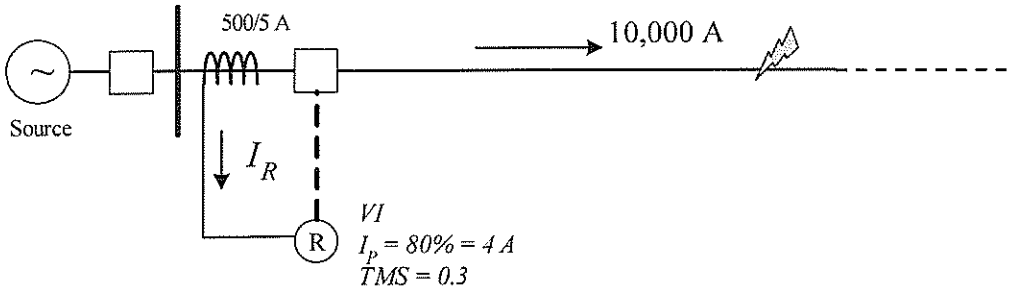
รูปที่ 4.7 กราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC) ของรีเลย์กระแสเกินในตัวอย่างที่ 4.2

ตัวอย่างที่ 4.3 รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาผกผันมีคุณสมบัติการทำงานแบบ VI ดังสมการ $t = \frac{13.5}{I-1} \cdot TMS$ (IEC) โดยเป็นรีเลย์แบบจำกัดเวลาต่ำสุด (IDMT) ที่ค่า PSM = 20 ถ้าใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 500/5 A พิกัดรีเลย์ที่มีค่า 5 A ปรับตั้งค่ากระแสของรีเลย์ไว้ที่ 80% ของพิกัด ตั้งค่า TMS ไว้ที่ 0.3 เมื่อเกิดกระแสผิดพร่องมีค่าเท่ากับ 10000 A รีเลย์จะทำงานที่เวลาเท่าใด

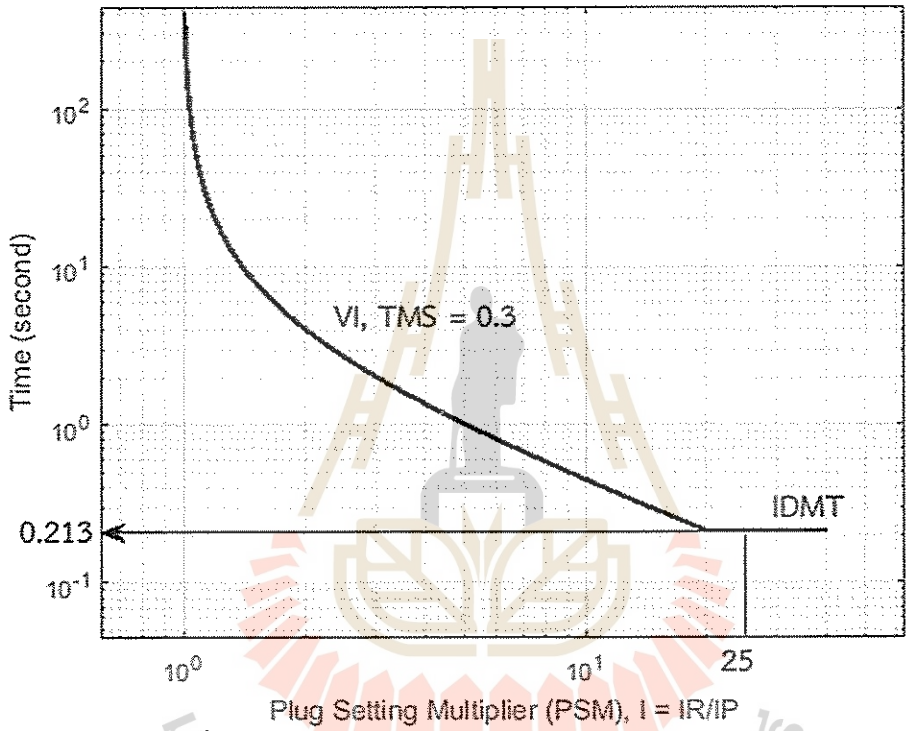
วิธีทำ ตัวอย่างที่ 4.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

ค่ากระแสพิกัดของรีเลย์เป็น 5 A ปรับตั้งที่ 80% ของ 5 A

นั่นคือกระแสปรับตั้งเท่ากับ 4 A



รูปที่ 6.8 การทำงานของรีเลย์กระแสเกินในตัวอย่างที่ 6.3



รูปที่ 4.9 กราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC)
ของรีเลย์กระแสเกินในตัวอย่างที่ 4.3

เมื่อกระแสทางด้านปฐมภูมิเป็น 10000 A

จะมีกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ 10000(5/500) = 100 A

ค่ากระแส 100 A จะเท่ากับค่า PSM เป็น I = 100/4 = 25 (> 20)

เป็นรีเลย์แบบ IDMT ดังนั้นคำนวณที่ค่า PSM = 20

ถ้าปรับค่า TMS ไปที่ 0.3 จะมีการประวิงเวลาเป็น

$$t = \frac{13.5}{20-1} \cdot 0.3 = 0.213 \text{ sec.}$$

โดยสามารถแสดงจุดทำงานบนกราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC) ได้ดังรูปที่ 4.9

4.3 รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาตามมาตรฐาน IEEE C37.112

สำหรับมาตรฐาน IEEE รีเลย์กระแสเนแบบประวิงเวลาจะใช้สัญลักษณ์เป็นหมายเลข “51” และได้กำหนดคุณลักษณะของรีเลย์โดยใช้สมการในลักษณะคล้ายกันกับมาตรฐาน IEC เป็น

$$t = \left(\frac{A}{I^p - 1} + B \right) \cdot TDS \qquad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.9)$$

โดยที่ A, B, p เป็นค่าคงที่แสดงคุณสมบัติของรีเลย์

TDS เป็นค่าการปรับตั้งค่าหน้าปัดเวลา (Time Dial Setting)

โดยในมาตรฐาน IEEE มีการแบ่งประเภทของรีเลย์ออกเป็น

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันปานกลาง (Moderately Inverse-Time Overcurrent Relay)

การทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันปานกลางเป็นไปตามสมการ

$$t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02} - 1} + 0.1140 \right) \cdot TDS \quad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.10)$$

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมาก (Very Inverse-Time Overcurrent Relay)

การทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากเป็นไปตามสมการ

$$t = \left(\frac{19.6}{I^2 - 1} + 0.491 \right) \cdot TDS \quad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.11)$$

รีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากที่สุด (Extremely Inverse-Time Overcurrent Relay)

หม้อแปลงไฟฟ้า การทำงานของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาแบบผกผันมากที่สุดเป็นไปตามสมการ

$$t = \left(\frac{28.2}{I^2 - 1} + 0.1217 \right) \cdot TDS \quad \text{เมื่อ } I > 1 \qquad (4.12)$$

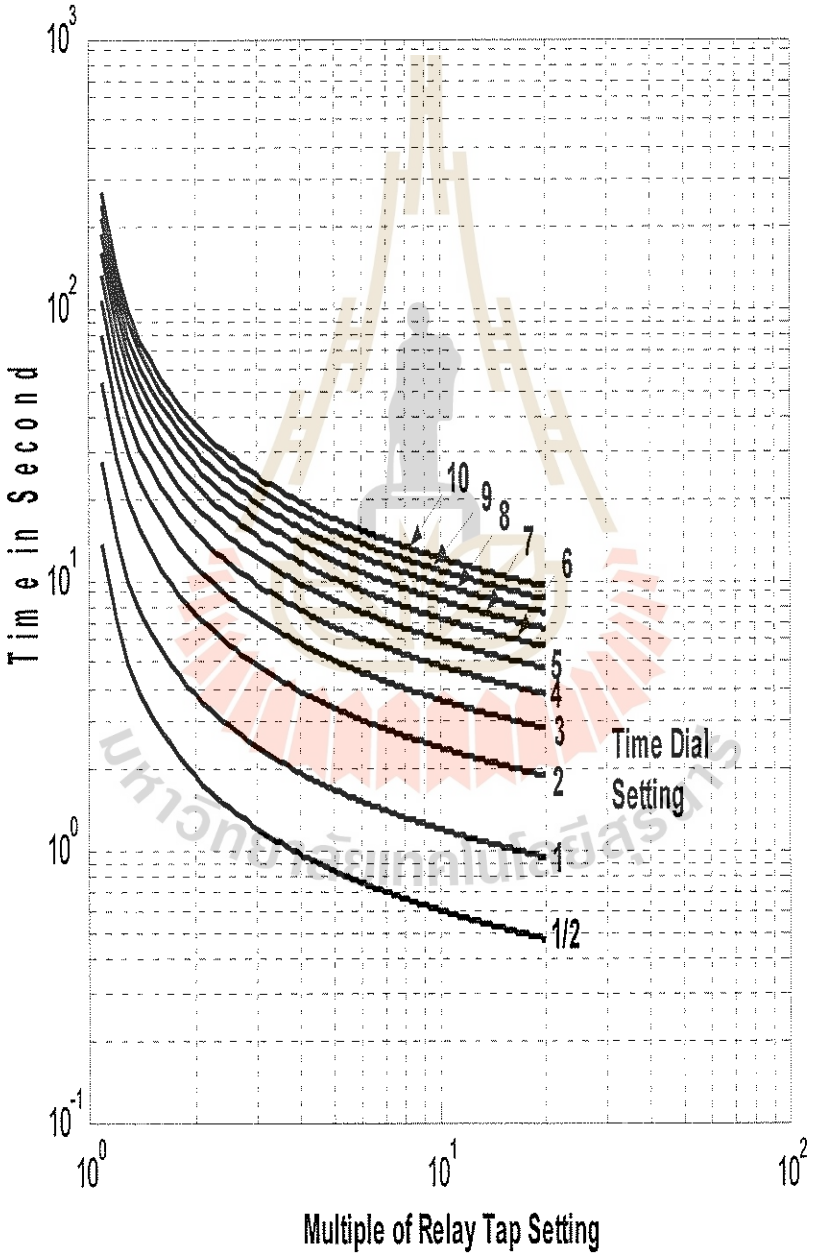
ทั้งนี้การทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลามาตรฐาน IEEE สามารถแสดงโดยสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่แสดงคุณสมบัติของรีเลย์ตามมาตรฐาน IEEE C37.112 $t = \left(\frac{A}{I^p - 1} + B \right) \cdot TDS$

Characteristic	A	B	p
Moderately Inverse	0.0515	0.1140	0.02
Very Inverse	19.610	0.4910	2.00
Extremely Inverse	28.200	0.1217	2.00

คุณสมบัติของรีเลย์กระแสเกินตามมาตรฐาน IEEE/ANSI จะแสดงเป็นกราฟหลายเส้นโดยแต่ละเส้นจะมีค่าการประวิงเวลาเรียกว่า การปรับตั้งค่าหน้าปัดเวลา (Time Dial Setting, TDS) ตั้งแต่ 1/2, 1, 2, 3, ...,10 ดังแสดงในรูปที่

4.10 จากรูปที่ 4.10 จะสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ค่า TDS เท่ากับ 1/2 ซึ่งเป็นการทำงานที่เร็วที่สุด (ประวิงเวลาน้อยที่สุด) ไปถึงค่า TDS เท่ากับ 10 ซึ่งเป็นการทำงานที่ช้าที่สุด (ประวิงเวลามากที่สุด) แกน x จะแสดงค่ากระแสที่ตรวจจับได้โดยเทียบกับกระแสเริ่มต้นทำงานหรือเป็นค่าต่อหน่วย (per unit, p.u.) ของกระแสเริ่มต้นทำงานหรือเรียกว่าการปรับตั้งแท็ป (Tab Setting) ส่วนแกน y จะเป็นค่าเวลาที่รีเลย์หน่วงได้ก่อนส่งสัญญาณออกไป ในกรณีของรีเลย์แบบไฟฟ้ากลไฟฟ้า การทดสอบการทำงานในช่วงที่กระแสใกล้เคียงกับกระแสเริ่มต้นทำงานจะทำได้ไม่แม่นยำ จึงมักไม่แสดงคุณลักษณะในกรณีที่กระแสใกล้เคียงกระแสเริ่มต้นทำงานไว้ในกราฟ โดยปกติแล้วกราฟแสดงคุณสมบัติของรีเลย์จะเริ่มที่ 1.5 เท่าของกระแสเริ่มต้นทำงาน (1.5 p.u.) เป็นต้นไป



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างคุณสมบัติของรีเลย์ตามมาตรฐาน IEEE/ANSI - Moderately Inverse

ตัวอย่างที่ 4.4 รีเลย์มีคุณสมบัติ IEEE/ANSI C37.112 - Moderately Inverse ถ้าทำการปรับตั้งให้เริ่มตรวจจับกระแสเกินเริ่มต้นที่ 4 A และเลือกการประวิงเวลาตามกราฟ TDS = 1 ถ้ากระแสที่ตรวจจับได้ (Input) มีค่าไปที่รีเลย์เป็น 12 A จะเกิดสัญญาณ (Output) จากรีเลย์เมื่อเวลาผ่านไปนานเท่าใด

วิธีทำ จากกระแสที่รีเลย์ตรวจจับได้มีค่าเป็น 12 A จะมีค่าเป็น 12/4 = 3 p.u.

ดังนั้น $t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02}-1}+0.1140\right)\cdot TDS = \left(\frac{0.0515}{3^{0.02}-1}+0.1140\right)\cdot 1 = 2.43$ วินาที

หรือเมื่อลากเส้นจาก 3 p.u. ไปตัดกราฟ TDS = 1 ดังรูปที่ 4.11

จะพบว่ารีเลย์จะประวิงเวลาไว้เท่ากับ 2.43 วินาที

ตัวอย่างที่ 4.5 รีเลย์มีคุณสมบัติ IEEE/ANSI C37.112 - Moderately Inverse ถ้าปรับตั้งให้ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานเป็น 5 A และปรับการประวิงเวลาเป็นกราฟ TDS = 2 ถ้ากระแสที่ตรวจจับได้มีค่าไปที่รีเลย์เป็น 15 A รีเลย์จะประวิงเวลาไว้เท่าใด

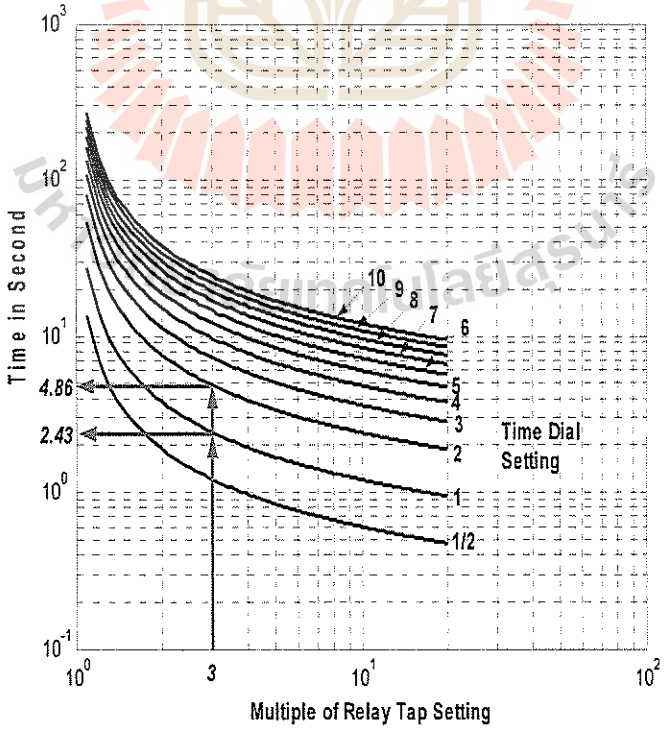
วิธีทำ จากกระแสที่รีเลย์ตรวจจับได้มีค่าเป็น 15 A จะมีค่าเป็น 15/5 = 3 p.u.

ดังนั้น $t = \left(\frac{0.0515}{I^{0.02}-1}+0.1140\right)\cdot TDS = \left(\frac{0.0515}{3^{0.02}-1}+0.1140\right)\cdot 2 = 4.86$ วินาที

หรือเมื่อลากเส้นจาก 3 p.u. ไปตัดกราฟ TDS = 2 ดังรูปที่ 4.11

จะพบว่ารีเลย์จะประวิงเวลาไว้เท่ากับ 4.86 วินาที

ตัวอย่างที่ 4.4 และ 6.5 สามารถแสดงการทำงานของรีเลย์บนกราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curev, TCC) ได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการประวิงเวลาของรีเลย์จากค่าในตัวอย่างที่ 4.4 และ 4.5

ตัวอย่างที่ 4.6 รีเลย์มีคุณสมบัติ IEEE/ANSI C37.112 - Moderately Inverse ถ้าต้องการปรับให้รีเลย์เริ่มต้นทำงานที่ 10 A และส่งสัญญาณเมื่อมีกระแสตรวจจับได้ 50 A ในเวลา 5 วินาที จะต้องทำการปรับค่าการประวิงเวลาไปที่กราฟเส้นใด

วิธีทำ จากกระแสที่รีเลย์ตรวจจับได้มีค่าเป็น 50 A จะมีค่าเป็น 50/10 = 5 p.u.

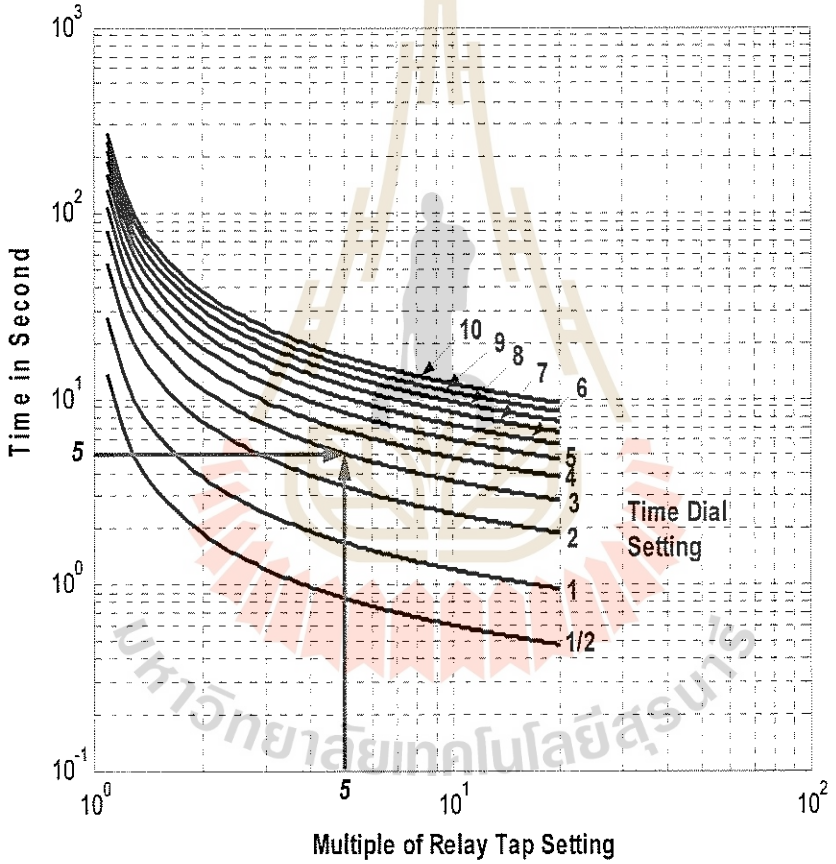
$$5 = \left(\frac{0.0515}{5^{0.02} - 1} + 0.1140 \right) \cdot TDS$$

$$TDS = 2.962$$

หรือเมื่อลากเส้นจาก 5 p.u. ไปพบกับค่าการประวิงเวลา 5 วินาที

จะไปพบกันที่กราฟ TDS = 2.962 ดังรูปที่ 4.6

ดังนั้นต้องปรับตั้งการประวิงเวลาไปที่กราฟ TDS = 2.962



รูปที่ 4.12 การประวิงเวลาของรีเลย์จากค่าในตัวอย่างที่ 4.3

ตัวอย่างที่ 4.7 จากรีเลย์ที่มีคุณสมบัติ IEEE/ANSI C37.112 - Moderately Inverse ถ้าต้องการปรับให้รีเลย์เริ่มต้นทำงานที่ 5 A และส่งสัญญาณเมื่อมีกระแสตรวจจับได้ 35 A ในเวลา 2 วินาที จะต้องทำการปรับค่าการประวิงเวลาไปที่กราฟเส้นใด

วิธีทำ จากกระแสที่รีเลย์ตรวจจับได้มีค่าเป็น 35 A จะมีค่าเป็น 35/5 = 7 p.u.

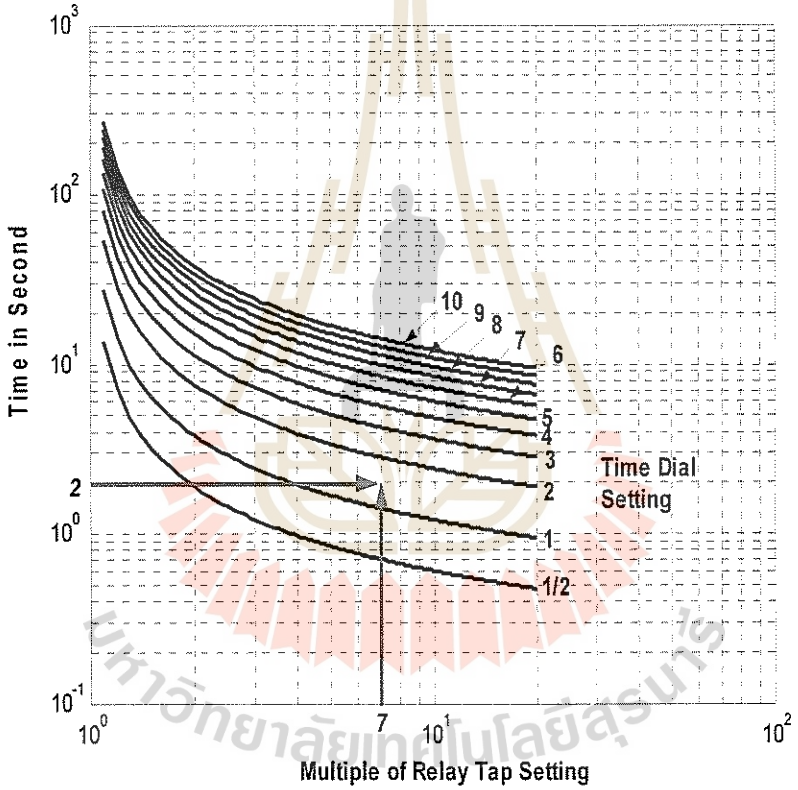
$$2 = \left(\frac{0.0515}{7^{0.02} - 1} + 0.1140 \right) \cdot TDS$$

$$TDS = 1.417$$

หรือเมื่อลากเส้นจาก 7 p.u. ไปพบกับค่าการประวิงเวลา 2 วินาที

จะไปพบกันที่จุดระหว่างกราฟ TDS = 1 และ TDS = 2 ดังรูปที่ 4.7

ดังนั้นต้องปรับตั้งการประวิงเวลาไปที่ระหว่างกราฟ TDS = 1 และ TDS = 2



รูปที่ 4.13 การประวิงเวลาของรีเลย์จากค่าในตัวอย่างที่ 4.4

ในตัวอย่างที่ 4.7 ถ้ารีเลย์เป็นแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า การปรับตั้งจะสามารถทำให้อยู่ระหว่างกราฟ 1 และ 2 โดยการอินเตอร์โพเลทระหว่างกราฟทั้งสอง อย่างไรก็ตามค่าการประวิงเวลาที่แน่นอนจะได้จากการทดสอบและปรับแต่งละเอียดอีกครั้ง โดยรีเลย์ของแต่ละผู้ผลิตจะมีวิธีการปรับตั้งที่แตกต่างกัน

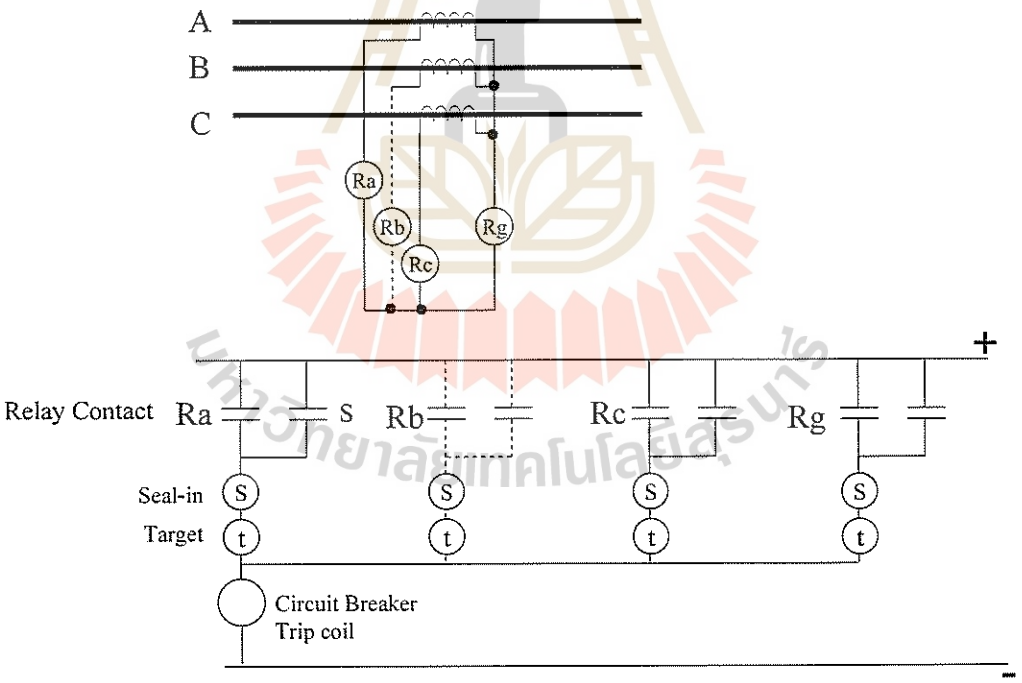
สำหรับรีเลย์กระแสเกินในเฟสค่ากระแสเริ่มต้นทำงานที่ปรับตั้งจะต้องอยู่ระหว่างค่ากระแสสูงสุดในการทำงานปกติกับค่ากระแสลัดวงจรที่น้อยที่สุด ในทำนองเดียวกันรีเลย์ป้องกันการลัดวงจรลงดินจะต้องปรับตั้งให้มีค่ากระแส

เริ่มต้นทำงานระหว่างค่ากระแสไหลผ่านลงดินปกติที่เกิดจากผลของการไม่สมดุล (unbalance) ของระบบกับค่ากระแสลัดวงจรลงดินที่น้อยที่สุด

4.4 การประยุกต์ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา

พื้นฐานการใช้งานรีเลย์กระแสเกินก็คือการป้องกันระบบไฟฟ้าแบบแขนง (Redial System) ซึ่งแสดงในหัวข้อ 1.1.1 โดยจะมีการป้องกันทั้งการลัดวงจรระหว่างเฟสและลัดวงจรลงดิน รีเลย์กระแสเกินมีการใช้งานทั้งในอุตสาหกรรมและระบบสายส่งย่อย (Subtransmission) ด้วย เนื่องจากมีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกันรีเลย์แบบระยะทางและแบบนำสัญญาณซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

รีเลย์กระแสเกินมีทั้งแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์และแบบไมโครโปรเซสเซอร์ รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างการต่อวงจรป้องกันกระแสเกินและป้องกันการลัดวงจรลงดิน โดยการต่อวงจรในลักษณะดังกล่าวจะสามารถป้องกันการลัดวงจรระหว่างเฟสใด ๆ และการลัดวงจรลงดินได้ครอบคลุมทุกกรณีโดยใช้รีเลย์กระแสเกินที่สองเฟสใด ๆ และรีเลย์ตรวจจับการลัดวงจรลงดินอีกหนึ่งตัวโดยตรวจจับผลรวมของกระแสทั้งสามรวมกัน การเพิ่มรีเลย์จนครบทั้งสามเฟสจะทำให้มีการป้องกันที่รัดกุมยิ่งขึ้น และเมื่อต้องมีการถอดรีเลย์ตัวใดตัวหนึ่งออกเพื่อซ่อมบำรุงหรือปรับตั้งค่า ก็ยังทำให้ระบบมีการป้องกันที่ครอบคลุมอยู่



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างวงจรป้องกันกระแสเกินพร้อมด้วยการป้องกันลัดวงจรลงดิน

4.5 หลักการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา

การปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาจะมีการปรับตั้งค่าสองอย่างคือ

1. ค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pickup Current) หรือเรียกว่าการปรับแท็ป (Tap Setting) หรือการปรับหมุดตัวคูณ (Plug Setting Multiplier, PSM)
2. ค่าการประวิงเวลา (Time Delay) หรือเรียกว่าการปรับหน้าปัดเวลา (Time Dial Setting) หรือ การปรับตัวคูณเวลา (Time Multiplier Setting, TMS)

วัตถุประสงค์ในการปรับตั้งค่าทั้งสองดังกล่าวก็คือการทำให้รีเลย์สามารถตรวจจับค่ากระแสเกินหรือกระแสลัดวงจรในสายส่งหรืออุปกรณ์ที่รับผิดชอบอยู่และทำหน้าที่ป้องกันสำรอง (Backup) รีเลย์ในสายส่งหรืออุปกรณ์ที่อยู่ถัดไปด้วย เรียนว่าการทำงานสัมพันธ์กัน (Coordination)

การปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานหรือการปรับแท็ปเป็นการกำหนดค่ากระแสขั้นต่ำที่รีเลย์จะตรวจจับ (Input) ว่าผิดปกติและเริ่มทำงานจนกระทั่งส่งสัญญาณออกไป (Output) สัญญาณนี้อาจเป็นหน้าสัมผัสหรือสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

การปรับค่าการประวิงเวลาหรือการปรับหน้าปัดเวลา เป็นการปรับตั้งคุณสมบัติการประวิงเวลาเมื่อรีเลย์ตรวจพบว่าเกิดกระแสเกินหรือลัดวงจรขึ้นก่อนที่จะมีการส่งสัญญาณออกไป รูปที่ 2.8 (ในบทที่ 2) แสดงให้เห็นหลักการปรับตั้งการประวิงเวลาของรีเลย์แบบไฟฟ้ากลไฟฟ้าโดยการปรับระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสที่จะส่งสัญญาณให้ตัดวงจร การปรับการประวิงเวลาในรีเลย์แบบไฟฟ้ากลไฟฟ้าจะสามารถปรับตั้งได้ต่อเนื่องกัน (Contineous) ส่วนในรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์อาจทำได้ต่อเนื่องหรืออาจเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ก็ได้

สรุปการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินได้ดังนี้

การปรับตั้ง	มาตรฐาน	
	IEEE	IEC
1. ปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current, I_p)	Tap Setting	Relay Current Setting
2. ปรับตั้งค่าการประวิงเวลา	Time Dial Setting (TDS)	Time Multiplier Setting (TMS)

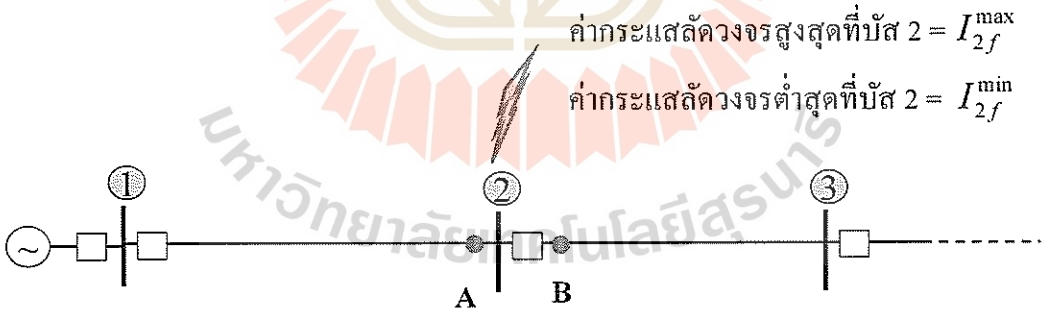
หลักการในการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาจะเป็นการพิจารณาให้รีเลย์ทำงานสัมพันธ์กันด้วยเวลาที่หน่วงหรือเรียกว่า Time-Graded System โดยในทางปฏิบัตินั้น การปรับตั้งค่ารีเลย์จะมีความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์อยู่ด้วย เช่น

- การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรโดยปกติจะคิดเฉพาะค่ารีแอคแตนซ์ของระบบโดยไม่นำค่าความต้านทานมาคำนวณ
- การหาคำตอบการไหลของกำลังงานไฟฟ้า (Power Flow Solution) จะมีส่วนที่เป็นการคาดการณ์คือค่าของกำลังงานไฟฟ้าของภาระ

- ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณมาจากคุณลักษณะ (Specification) ที่เสนอโดยผู้ผลิต และความยาวของสายส่งเป็นค่าจากการออกแบบซึ่งมักไม่ใช่ค่าที่ติดตั้งจริง นั่นคือค่าอิมพีแดนซ์ไม่ใช่ค่าที่ทดสอบจริง
- ตัวรีเลย์มีความคลาดเคลื่อนในการทำงาน

ดังนั้นการปรับตั้งรีเลย์จะมีการเผื่อระยะไว้ส่วนหนึ่ง โดยในทางปฏิบัติ

- การวิเคราะห์ค่ากระแสลัดวงจรจะใช้ค่ากระแสลัดวงจรที่บัสต่าง ๆ และโดยพิจารณาได้ว่าค่ากระแสลัดวงจรที่แต่ละด้านของเบรกเกอร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่จุด A และ B จะใช้ค่ากระแสลัดวงจรจากการวิเคราะห์การลัดวงจรที่บัส 2
- ทั้งนี้การปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง โดยในรีเลย์กระแสเกินในเฟสจะปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานให้อยู่ระหว่างสองเท่าของกระแสสูงสุดในการทำงานปกติกับค่า 1/3 เท่าของกระแสลัดวงจรต่ำสุดที่เป็นไปได้ หรือในรีเลย์รุ่นใหม่อาจใช้เกณฑ์กำหนดค่าปรับตั้งรีเลย์จะใช้ค่าประมาณ 1.1-2.0 เท่าของกระแสสูงสุดในการทำงานปกติ
- ในรีเลย์ป้องกันลัดวงจรลงดินจะปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานให้อยู่ระหว่างสองเท่าของกระแสไหลผ่านดินในการทำงานปกติกับค่า 1/3 เท่าของกระแสลัดวงจรลงดินต่ำสุดที่เป็นไปได้ โดยในกรณีที่ไม่สามารถหาค่ากระแสไหลผ่านดินในการทำงานปกติได้อาจใช้ค่า 10% ของกระแสทำงานปกติ
- ทั้งนี้โดยปกติจะมีการใช้**รีเลย์ป้องกันลัดวงจรเฟส (Phase Fault Relay, 51 หรือ 51P)** คือป้องกันการระหว่างเฟส (Line-to-Line Fault) และการลัดวงจรแบบ 3 เฟส (Three-Phase Fault) และใช้**รีเลย์ป้องกันลัดวงจรลงดิน (Ground Fault Relay, 51G)** แยกจากกันซึ่งจะมีการจัดลำดับความสัมพันธ์แยกกัน โดยในที่นี้จะเน้นตัวอย่างกรณีการป้องกันลัดวงจรในเฟสเป็นหลัก

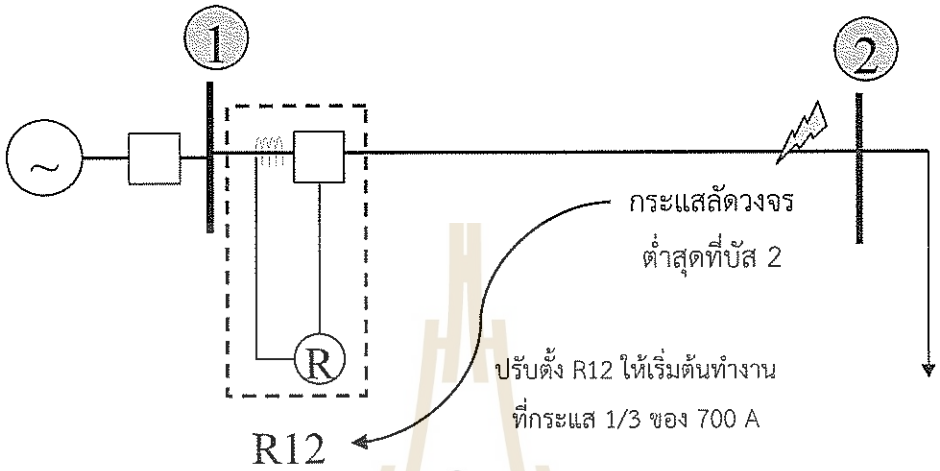


ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุด A $\cong$ ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุด B $\cong I_{2f}^{\max}$

ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่จุด A $\cong$ ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่จุด B $\cong I_{2f}^{\min}$

รูปที่ 4.15 การพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรที่ใช้ในการปรับตั้งรีเลย์

ตัวอย่างที่ 4.8 จากรูปที่ 4.16 จงคำนวณค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสและกระแสเริ่มต้นทำงานที่เหมาะสมของรีเลย์ R12 โดยจากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพบว่าสายส่ง 1-2 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าจ่ายแก่ภาระสูงสุด 90 A และค่ากระแสลัดวงจรระหว่างเฟสคำนวณได้เท่ากับ 700 A และค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟสคำนวณได้เท่ากับ 1000 A ตามลำดับ โดยรีเลย์สามารถเลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Tap Setting) ได้เป็น 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 และ 12.0 A และรีเลย์ไม่ต้องทำงานสัมพันธ์ (Coordinate) กับรีเลย์อื่น



รูปที่ 4.16 ระบบไฟฟ้ากำลังในตัวอย่างที่ 4.8

วิธีทำ

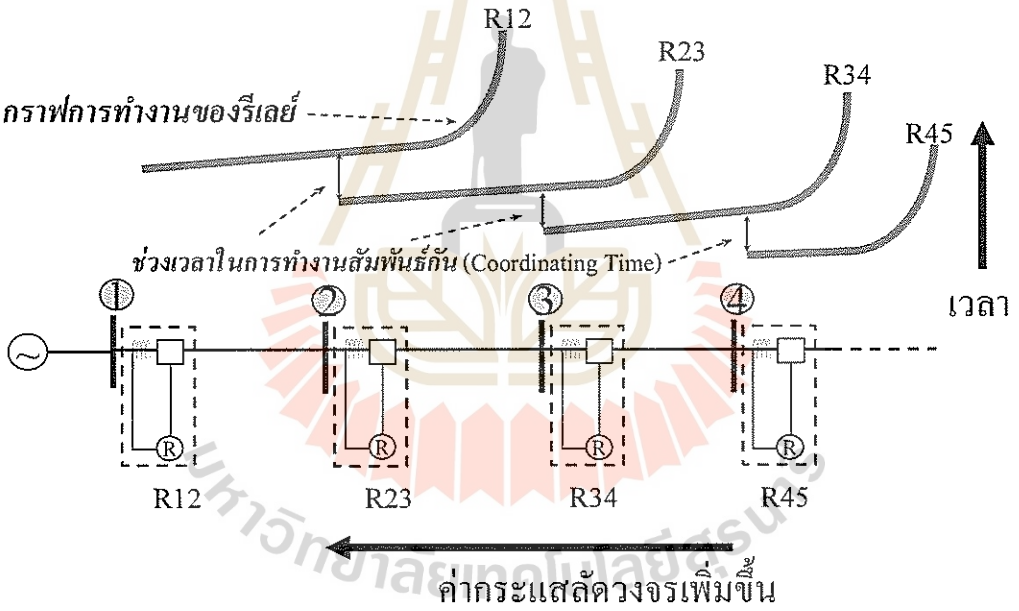
1. เลือกออกแบบให้หม้อแปลงกระแสมีกระแสพิกัดด้านทุติยภูมิเป็น 5 A
2. จากค่ากระแสไฟฟ้าไหลสูงสุด 90 A อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสควรจะเป็น 90/5 A ซึ่งไม่ใช่อัตราส่วนมาตรฐาน ดังนั้นเลือกใช้หม้อแปลงกระแส 100/5 A
3. ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ควรอยู่ระหว่างสองเท่าของกระแสสูงสุดในการทำงานปกติกับค่า 1/3 เท่าของกระแสลัดวงจรต่ำสุด นั่นคือระหว่าง 2x90 = 180 A และ (1/3)x700 = 233.33 A
4. จากอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส 100/5 A หรือ 20/1
    a. สองเท่าของกระแสสูงสุดในการทำงานปกติจะทำให้เกิดกระแสผ่านรีเลย์เท่ากับ 180(5/100) = 9.0 A
    b. ค่า 1/3 เท่าของกระแสลัดวงจรต่ำสุดจะทำให้เกิดกระแสผ่านรีเลย์เท่ากับ 233.33(5/100) = 11.66 A
5. **ดังนั้นปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานหรือ Tap setting ของรีเลย์ไปที่ 10 A**
6. รีเลย์ไม่ต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์อื่น **ดังนั้นปรับค่าการประวิงเวลา (TMS หรือ TDS) ไปที่การตัดวงจรเร็วที่สุด**

จากตัวอย่างที่ 4.8 เป็นการป้องกันที่รีเลย์ไม่มีการทำงานสัมพันธ์หรือเรียกว่า Coordination กับรีเลย์ตัวอื่น จึงทำการปรับตั้งค่าการประวิงเวลาให้น้อยที่สุด ในกรณีที่รีเลย์ต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์อื่นจะต้องการปรับค่าการประวิงเวลาที่เหมาะสม รูปที่ 4.17 แสดงการทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์ในระบบไฟฟ้าแบบแขนง (Radial System)

จากรูปที่ 4.17 กระแสลัดวงจรที่มีค่าเพิ่มขึ้นที่เมื่อเกิดลัดวงจรใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น โดยการทำงานของรีเลย์จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- รีเลย์ R45 จะต้องตัดวงจรในสายส่ง 4-5 ให้เร็วที่สุด
- รีเลย์ R34 จะต้องจะมีการประวิงเวลาในการทำงานมากขึ้นจากรีเลย์ R45 เรียกว่า ช่วงเวลาการทำงานสัมพันธ์ (Coordinating Time) โดยจะรับผิดชอบการป้องกันการลัดวงจรในสายส่ง 3-4 และทำการป้องกันสำรอง (Backup) การลัดวงจรในสายส่ง 4-5 ในกรณีที่รีเลย์ R45 หรือเบรคเกอร์ B45 ไม่ทำงาน
- รีเลย์ R23 จะต้องมีการประวิงเวลาในการทำงานมากขึ้นจากรีเลย์ R34 โดยจะรับผิดชอบการป้องกันการลัดวงจรในสายส่ง 2-3 เป็นหลักและทำการป้องกันสำรอง (Backup) การลัดวงจรในสายส่ง 3-4 และ 4-5 ในกรณีที่รีเลย์และเบรคเกอร์ในสายส่ง 3-4 และ 4-5 ไม่ทำงาน

รีเลย์ R12 จะต้องมีการประวิงเวลาในการทำงานมากขึ้นจากรีเลย์ R23 โดยจะรับผิดชอบการป้องกันการลัดวงจรในสายส่ง 1-2 เป็นหลัก และทำหน้าป้องกันสายส่งตลอดทางในกรณีที่เกิดลัดวงจรและไม่มีรีเลย์หรือเบรกเกอร์ตัวใดทำงานเลย



รูปที่ 4.17 การทำงานสัมพันธ์ (Coordination) ของรีเลย์

ในการจัดลำดับเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินหลายตัวให้ทำงานสัมพันธ์กันได้อย่างถูกต้องเหมาะสมนั้นจะต้องมีเกณฑ์ในการกำหนดว่าส่วนต่างเวลาทำงานขั้นต่ำในการประวิงเวลาของรีเลย์ที่ป้องกันสำรองควรเป็นค่าใด เกณฑ์ในการกำหนดค่าส่วนต่างเวลาขั้นต่ำ (grading Margin) นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันตามเทคโนโลยีของบริภัณฑ์ที่ใช้ในระบบป้องกัน ประกอบด้วย

- ค่าช่วงเวลาการตัดตอนของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker Operating Time)
- ค่าความคลาดเคลื่อนของส่วนต่างเวลาการทำงานของรีเลย์ที่มากที่สุดที่จะเป็นไปได้ (Relay Error)

- ค่าเวลาการทำงานเกินของรีเลย์ (Overshoot)
- ค่าช่วงเวลาที่เผื่อไว้เพื่อให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดการผิดพลาดอย่างแน่นอน (Safty Margin)

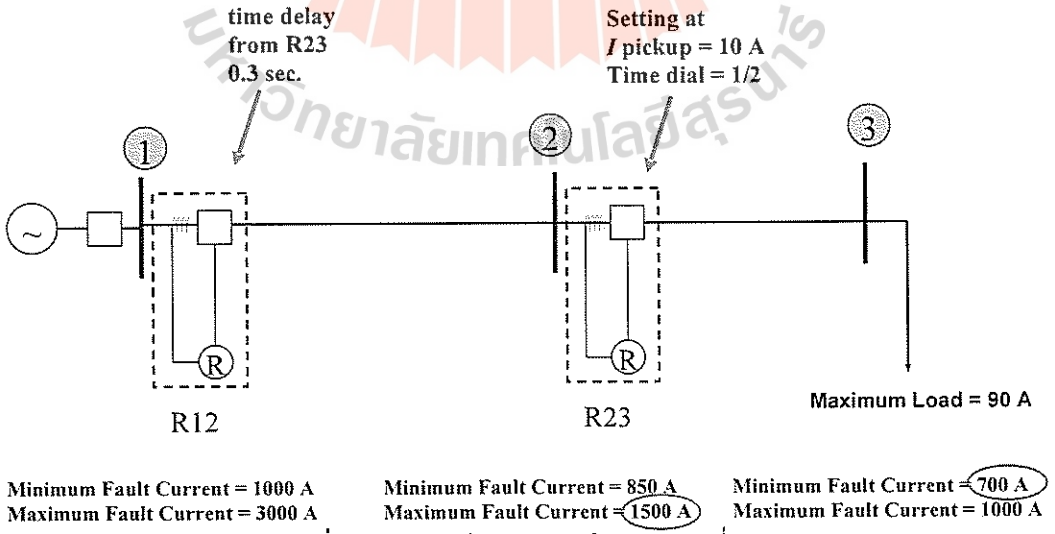
เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นที่สายส่ง 4-5 รีเลย์ R45 จะเริ่มต้นทำงาน (Pick up) โดยในกรณีของรีเลย์แบบไฟฟ้ากลไฟฟ้าจะมีการเริ่มต้นหมุนของจานเหนี่ยวนำ และจะสั่งเบรกเกอร์ B45 ตัดวงจรเมื่อถึงเวลาที่ปรับตั้งไว้ ในขณะเดียวกันรีเลย์ R34 ก็จะตรวจจับกระแสลัดวงจรและเริ่มต้นทำงานและจานเหนี่ยวนำก็จะเริ่มหมุนด้วยเช่นกันแต่จะมีการประวิงเวลาที่มากกว่า และจะกลับสู่สภาวะเดิมก่อน (Reset) ที่จะส่งสัญญาณตัดวงจรออกไปเมื่อเบรกเกอร์ B45 ได้ตัดวงจร (Clear Fualt) แล้ว ถ้ากระแสลัดวงจรยังคงอยู่รีลย์ R34 ก็จะหมุนต่อไปจนหน้าสัมผัสส่งสัญญาณตัดวงจรออกไป

ในทางปฏิบัติ การทำงานของเบรกเกอร์จะมีระยะเวลาในการทำงานตัดวงจรช่วงหนึ่ง และตัวรีเลย์เองก็ไม่ได้หยุดหมุนทันทีคือมีการหมุนเกินไปเล็กน้อยหลังจากที่เบรกเกอร์ B45 ตัดวงจรไปแล้ว เรียกว่า Overtravel ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะรีเลย์แบบไฟฟ้ากลไฟฟ้าไม่มีในรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์และแบบไมโครโปรเซสเซอร์ที่ไม่มีการเคลื่อที่ทางกลในการทำงาน ดังนั้นเพื่อให้รีเลย์ R34 ไม่ทำงานก่อนที่รีเลย์ R45 รวมทั้งเบรกเกอร์ R45 ทำการตัดวงจร จะต้องทำการปรับตั้งค่าการประวิงเวลาของรีเลย์ R34 ให้เผื่อเวลาต่าง ๆ ข้างต้นไว้ด้วย โดยทั่วไปช่วงเวลาในการทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์จะมีค่าประมาณ 0.3-0.5 วินาที

ตัวอย่างที่ 4.9 จากรูปที่ 4.18 จากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพบว่าสายส่ง 2-3 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลสู่ภาระสูงสุด 90 A และ

- ค่ากระแสลัดวงจรบนสายส่ง 2-3 ต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 700 A และ 1000 A ตามลำดับ
- ค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 2 ต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 850 A และ 1500 A ตามลำดับ
- ค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 1 ต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 1000 A และ 3000 A ตามลำดับ

โดยใช้รีเลย์มีคุณสมบัติ IEEE/ANSI C37.112 - Moderately Inverse ที่ทั้งบัส 1 และบัส 2



รูปที่ 4.18 ระบบไฟฟ้ากำลังในตัวอย่างที่ 4.9

วิธีทำ

การปรับตั้งรีเลย์ R23 คำนวณในทำนองเดียวกับตัวอย่างที่ 4.8 ได้ดังนี้

1. เลือกออกแบบให้หม้อแปลงกระแสมีกระแสพิกัดด้านทุติยภูมิเป็น 5 A
2. จากค่ากระแสไฟฟ้าไหลสูงสุด 90 A อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสควรจะเป็น 90/5 A ซึ่งไม่ใช่อัตราส่วนมาตรฐาน ดังนั้นเลือกใช้หม้อแปลงกระแส 100/5 A
3. ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ควรอยู่ระหว่างสองเท่าของกระแสสูงสุดในการทำงานปกติกับค่า 1/3 เท่าของกระแสลัดวงจรต่ำสุด นั่นคือระหว่าง 2x90 = 180 A และ (1/3)x700 = 233.33 A
4. จากอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส 100/5 A หรือ 20/1
    a. สองเท่าของกระแสสูงสุดในการทำงานปกติจะทำให้เกิดกระแสผ่านรีเลย์เท่ากับ 180(5/100) = 9.0 A
    b. ค่า 1/3 เท่าของกระแสลัดวงจรต่ำสุดจะทำให้เกิดกระแสผ่านรีเลย์เท่ากับ 233.33(5/100) = 11.66 A
5. **ดังนั้นปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานหรือ Tap setting ของรีเลย์ไปที่ 10 A**
6. รีเลย์ไม่ต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์อื่น ดังนั้น**ปรับค่าการประวิงเวลา (Time dial setting) ไปที่การตัดวงจรเร็วที่สุดคือกราฟ 1/2** (TDS = 0.5)

การปรับตั้งรีเลย์ R12 ต้องมีการประวิงเวลาในการทำงานสัมพันธ์กับ R23 คำนวณได้ดังนี้

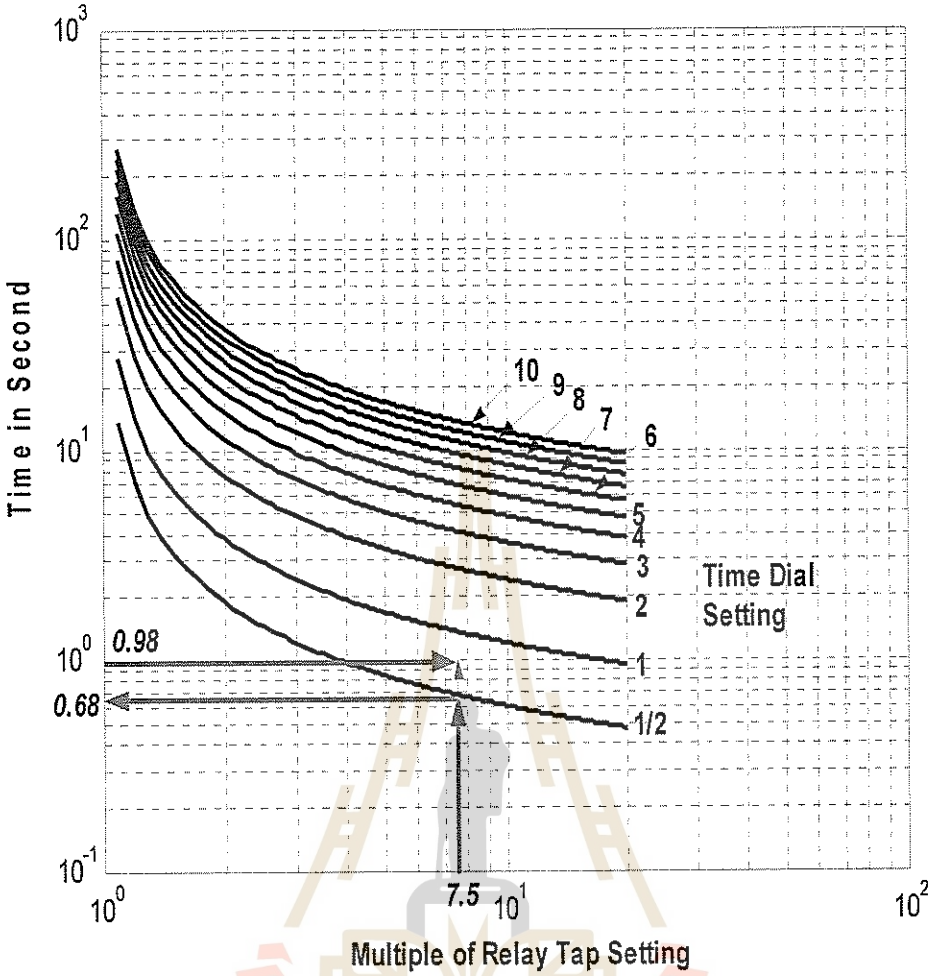
1. R12 ต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R23 ด้วย ดังนั้นปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (pickup หรือ tap setting) ที่ค่าเดียวกับ R23 คือ 10 A
2. เมื่อเกิดลัดวงจรในสายส่ง 2-3 ที่ตำแหน่งใกล้ที่บัส 2 จะมีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้คือ 1500 A ซึ่ง **R12 จะต้องไม่ทำงานสั่งตัดวงจรก่อน R23 เมื่อเกิดกรณีนี้ขึ้น** โดยจะมีกระแสไหลผ่านรีเลย์ทั้งสองเท่ากับ 1500 x (5/100) = 75 A ซึ่งจะเท่ากับ 75/10 = 7.5 p.u. บนกราฟการทำงานของรีเลย์
3. เมื่อพิจารณาที่ค่ากระแส 7.5 p.u. ที่กราฟ 1/2 พบว่ารีเลย์จะประวิงเวลาเท่ากับ 0.68 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 หรือหาได้จาก

$$t=\left(\frac{0.0515}{I^{0.02}-1}+0.1140\right)\cdot TDS=\left(\frac{0.0515}{7.5^{0.02}-1}+0.1140\right)\cdot 0.5=0.68 \text{ วินาที}$$

4. เพื่อไม่ให้ R12 ทำงานก่อน R23 เมื่อเกิดลัดวงจรที่สายส่ง 2-3 ที่ใกล้บัส 2 จึงพิจารณาให้รีเลย์ R12 ประวิงเวลามากขึ้นไปอีก 0.3 วินาที เท่ากับ 0.3+0.68 = 0.98 วินาที
5. หรือจากกราฟในรูปที่ 4.19 พบว่าจะต้องปรับค่าการประวิงเวลา (Time dial) ของ R12 ไปที่ระหว่างกราฟ 1/2 และ 1 (การใช้งานจริงต้องทำการทดสอบค่าการประวิงเวลาจริงของรีเลย์ด้วย) หรือสามารถคำนวณได้จากการปรับตั้งค่า TDS ให้เป็นไปตามตามสมการ

$$0.98=\left(\frac{0.0515}{I^{0.02}-1}+0.1140\right)\cdot TDS \qquad \text{นั่นคือ} \quad TDS=0.717$$

6. สำหรับการปรับตั้งรีเลย์ที่มีค่าการทำงานตามมาตรฐาน IEC ก็สามารถทำได้ในลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยจะแสดงในตัวอย่างต่อไป



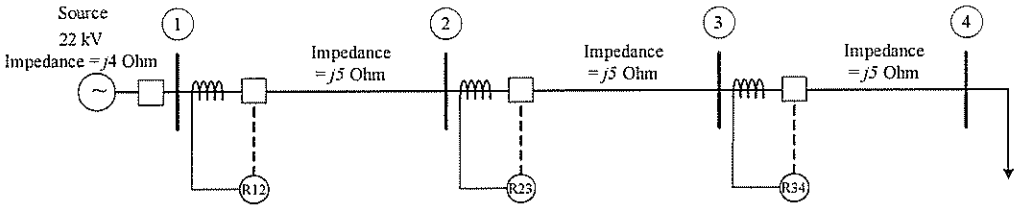
รูปที่ 4.19 การประวิงเวลาของรีเลย์จากค่าในตัวอย่างที่ 4.9

ตัวอย่างที่ 4.10 ส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังแบบแขนง (Radial Network) ระดับแรงดัน 22 kV ดังรูปที่ 4.20 ต้องการออกแบบการป้องกันการลัดวงจรในกรณีที่เกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส (Three phases fault) และลัดวงจรระหว่างเฟส (Line-to-Line fault)

- จงคำนวณค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุดเพื่อใช้ในการปรับตั้งรีเลย์
- จงกำหนดขนาดของ CT ที่เหมาะสม และทำการปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Tap setting) และตัวคูณเวลา (Time Multiplier setting) เมื่อใช้รีเลย์ที่มีกราฟคุณลักษณะการทำงานดังสมการ

  $$t = \frac{0.14}{I^{0.02} - 1} TMS \quad \text{(IEC)}$$

  - รีเลย์มีพิกัด 5 A สามารถสามารถเลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้ในช่วง 10 – 240% ห่างกันช่วงละ 5% เลือกค่าตัวคูณเวลาได้เป็น 0.1 - 1.0
  - เลือกใช้ CT จากอัตราส่วนมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ *50/5, 100/5, 150/5, 200/5, 250/5, 300/5, 400/5, 450/5, 500/5, 600/5, 800/5, 900/5, 1000/5, 1200/5, 1500/5*



รูปที่ 4.20 ระบบไฟฟ้าในตัวอย่างที่ 4.10

วิธีทำ

1. ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดลัดวงจรแบบสามเฟสในขณะที่หม้อแปลงต่ออยู่ในระบบทั้งสองตัว (ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่ำกว่ากรณีที่ต่ออยู่หนึ่งตัว)

   a. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 1 จะได้ว่า

$$I_{2f}^{3\phi} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}\cdot Z_{2f}} = \frac{22000}{\sqrt{3}(4)} = 3175.426 \text{ A}$$

   b. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 2 จะได้ว่า

$$I_{2f}^{3\phi} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}\cdot Z_{2f}} = \frac{22000}{\sqrt{3}(4+5)} = 1411.301 \text{ A}$$

   c. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 3 จะได้ว่า

$$I_{3f}^{3\phi} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}\cdot Z_{3f}} = \frac{22000}{\sqrt{3}(4+5+5)} = 907.265 \text{ A}$$

   d. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรแบบสามเฟสที่บัส 4 จะได้ว่า

$$I_{4f}^{3\phi} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}\cdot Z_{4f}} = \frac{22000}{\sqrt{3}(4+5+5+5)} = 668.511 \text{ A}$$

2. ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดลัดวงจรระหว่างเฟสในขณะที่หม้อแปลงต่ออยู่ในระบบหนึ่งตัว (ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสูงกว่ากรณีที่ต่ออยู่สองตัว) โดยค่ากระแสลัดวงจรระหว่างเฟสจะมีค่าเป็น $\sqrt{3}/2$ เท่าของกระแสลัดวงจรแบบสามเฟส

   a. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรระหว่างเฟสที่บัส 1 จะได้ว่า

$$I_{1f}^{L-L} = \frac{V_{L-L}}{2\cdot Z_{1f}} = \frac{22000}{2(4)} = 2750.00 \text{ A}$$

   b. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 2 จะได้ว่า

$$I_{2f}^{L-L} = \frac{V_{L-L}}{2\cdot Z_{2f}} = \frac{22000}{2(4+5)} = 1222.222 \text{ A}$$

   c. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 3 จะได้ว่า

$$I_{3f}^{L-L} = \frac{V_{L-L}}{2\cdot Z_{3f}} = \frac{22000}{2(4+5+5)} = 785.714 \text{ A}$$

   d. คำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 4 จะได้ว่า

$$I_{4f}^{L-L} = \frac{V_{L-L}}{2 \cdot Z_{4f}} = \frac{22000}{2(4+5+5+5)} = 578.947 \text{ A}$$

สามารถสรุปค่ากระแสลัดวงจรได้ดังตารางที่ 4.3 และในรูปที่ 4.21

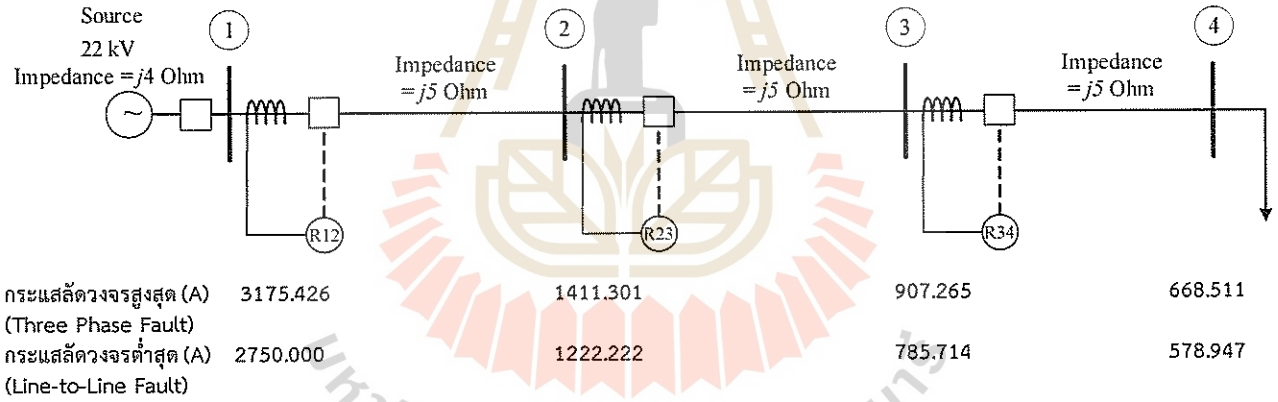
ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสลัดวงจร

Line	*0-1*	*1-2*	*2-3*	*3-4*
L-L Voltage (kV) =	*22*	*22*	*22*	*22*
Line Impedance (j ohm) =	*4*	*5*	*5*	*5*

Bus	*1*	*2*	*3*	*4*
Total Impedance (j ohm) =	*4*	*9*	*14*	*19*
3 Phases Fault Current (j A) =	*3175.426*	*1411.301*	*907.265*	*668.511*
L-L Fault Current (j A) =	*2750.000*	*1222.222*	*785.714*	*578.947*

ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในการออกแบบระบบป้องกันใช้ค่ากระแสลัดวงจรแบบ 3 เฟส (Three Phase Fault)

ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดในการออกแบบระบบป้องกันใช้ค่ากระแสลัดวงจรระหว่าง 2 เฟส (Line-to-Line Fault)



รูปที่ 4.21 แสดงค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดและสูงสุด

3. ทำการปรับตั้งรีเลย์ จากข้อมูลรีเลย์สามารถเลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้ดังนี้ 5%(5A) = 0.25 A, 10%(5A) = 0.5 A, 15%(5A) = 0.75 A, ..., 235%(5A) = 11.75A, 240%(5A) = 12 A

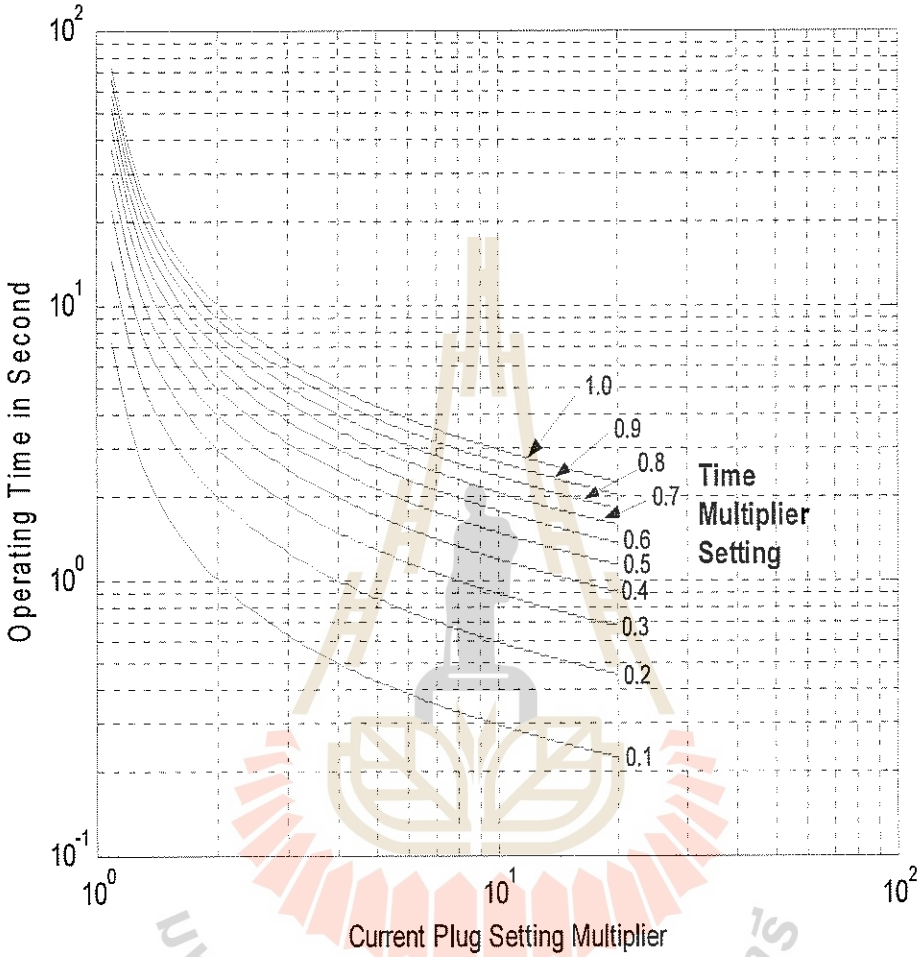
ปรับตั้ง R34

a. จากค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่บัส 4 มีค่าเป็น 578.947 A ดัง นั้นรีเลย์ R34 จะต้องd.ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดลัดวงจรในสภาวะดังกล่าว โดยไม่ต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์อื่น

b. R34 จะเริ่มต้นทำงานที่กระแสด้านทุตยภูมิเป็น (1/3) 578.947 = 192.982 A

c. เลือกใช้หม้อแปลงกระแส (CT34) อัตราส่วน 200/5 ดังนั้นจะเริ่มทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 192.982 (5/200) = 4.825 A

d. เลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current) ของ R34 เป็น 95% (ของพิกัด 5 A) หรือ 4.75 A และค่าการประวิงเวลาไปที่ TMS = 0.1 เนื่องจากไม่ต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์อื่น



รูปที่ 4.21 กราฟการทำงานของรีเลย์ในตัวอย่างที่ 4.10

ปรับตั้ง R23

a. R23 จะต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R34 ด้วยดังนั้น R23 จะต้องเริ่มต้นทำงานที่ค่ากระแส 192.982 A ด้วย

b. เลือกใช้หม้อแปลง กระแส (CT23) อัตราส่วน 200/5 ดังนั้นจะเริ่มทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 192.982 (5/200) = 4.825 A

c. เลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current) ของ R23 เป็น 4.75 A (95%)

d. จากค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่บัส 3 มีค่าเป็น 907.265 A ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วรีเลย์ R23 จะต้องไม่สั่งตัดวงจรก่อน R34 ในกรณีนี้ R34 จะมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 907.265(5/200) = 22.682 A

e. จากการที่ปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานไว้ที่ 4.75 A ดังนั้นค่ากระแส 22.682 A ที่ผ่าน R34 จะมีค่าเท่ากับ 22.682/4.75 = 4.775 p.u. และจะทำให้รีเลย์ประวิงเวลาเป็น $t = \left(\frac{0.14}{4.775^{0.02}-1}\right)\cdot 0.1 = 0.441$ วินาที หรือบนกราฟการทำงานของรีเลย์สามารถอ่านค่าการประวิงเวลาของ R34 ได้เป็น 0.441 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.17

f. R23 จะต้องประวิงเวลาไปอีก 0.3 วินาที เป็น 0.441+0.3 = 0.741 วินาที

g. ในสภาวะนี้จะมีกระแสผ่านรีเลย์ R23 เป็น 4.775 p.u. เช่นเดียวกัน **(ใช้ CT อัตราส่วนเดียวกัน)**

โดยจาก $t = \left(\frac{0.14}{I^{0.02}-1}\right)\cdot TMS$

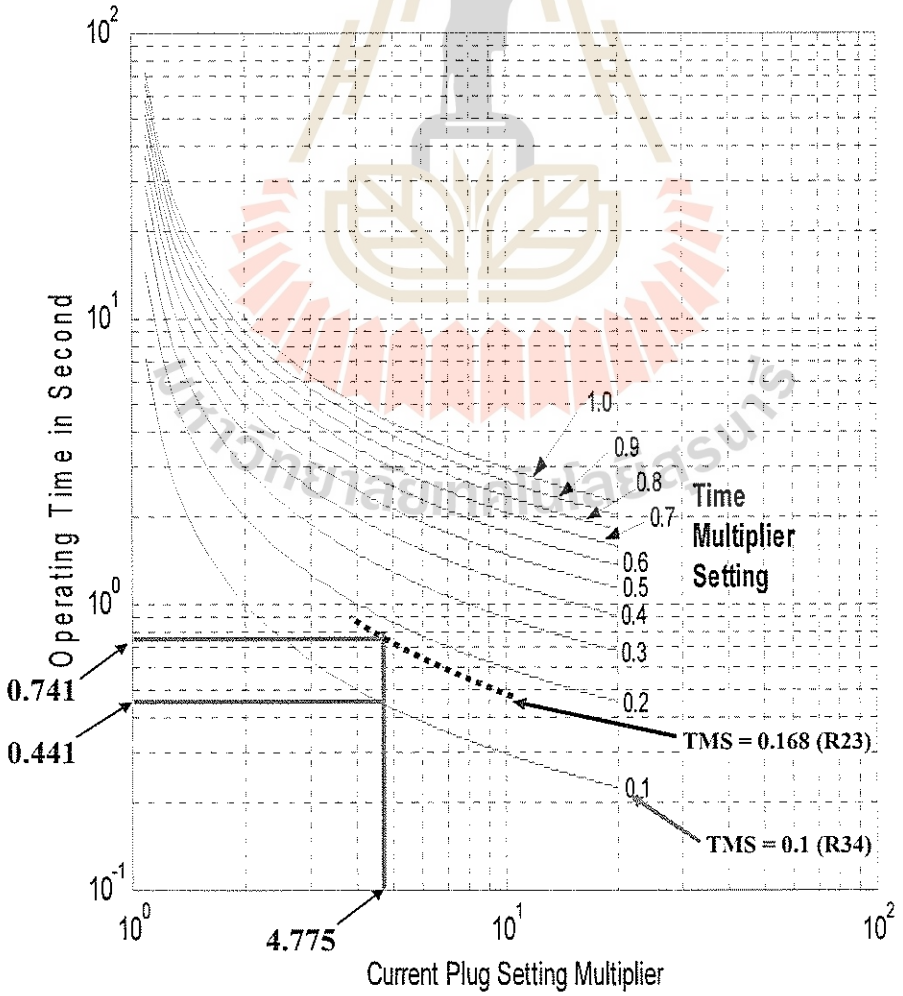
ต้องการประวิงเวลา 0.883 วินาที ที่ค่ากระแส 5.292 p.u. จะได้ว่า

$$0.741 = \left(\frac{0.14}{4.775^{0.02}-1}\right)\cdot TMS$$

$$0.741 = (4.408)\cdot TMS$$

$$TMS = 0.168$$

h. ดังนั้นต้องปรับตั้งค่ากการประวิงเวลาของ R23 ไปที่ค่า TMS = 0.168 ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงการทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์ R23 และ R34 ในการป้องกันสายส่ง 3-4 ในตัวอย่างที่ 4.10

ปรับตั้ง R12

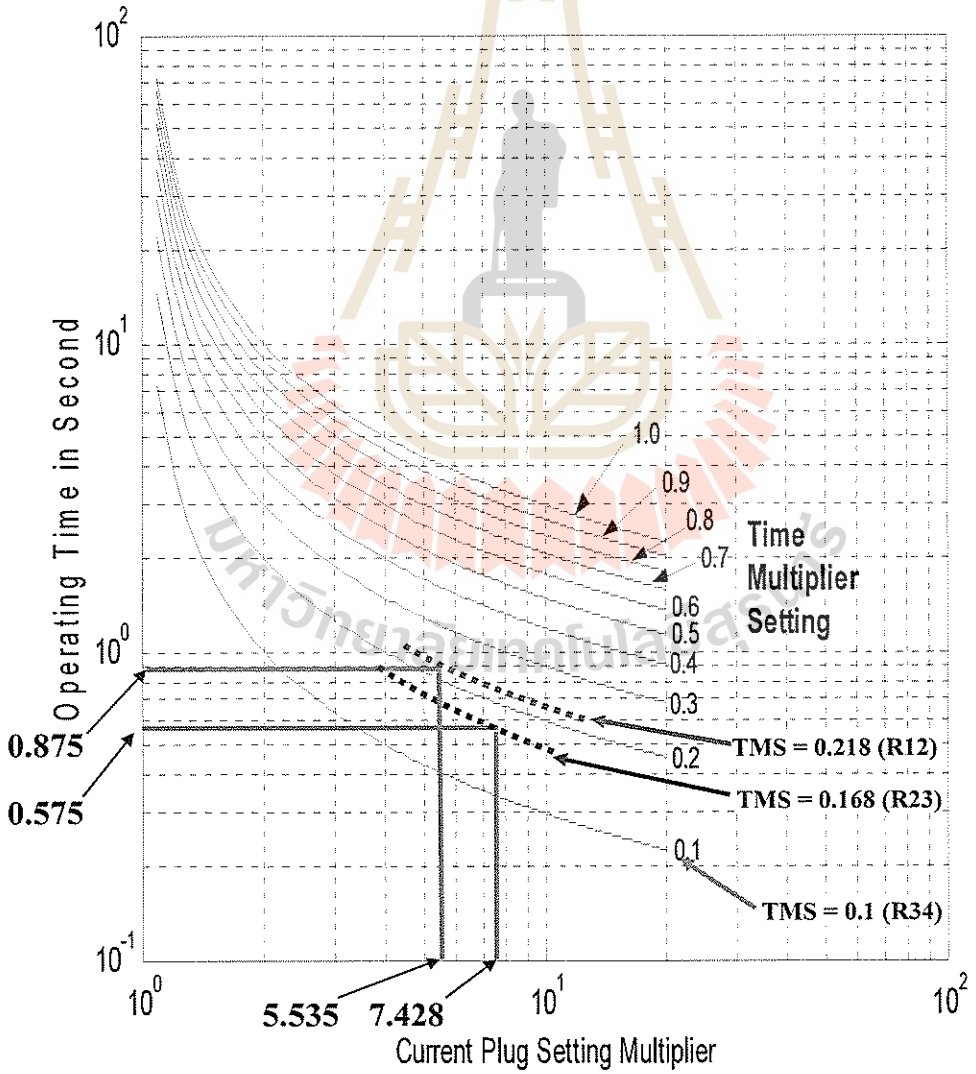
a. R12 จะต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R23 ด้วยดังนั้น R12 จะต้องเริ่มต้นทำงานที่ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่บัส 2 คือ 785.741 A

b. R12 จะต้องเริ่มทำงานที่ค่ากระแสลัดวงจรเท่ากับ (1/3) 785.741 A = 261.905 A

c. เลือกใช้หม้อแปลง กระแส (CT12) อัตราส่วน 300/5 ดังนั้นจะเริ่มทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 261.905 (5/300) = 4.365 A

d. เลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current) ของ R12 เป็น 4.25 A

e. จากค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่บัส 2 มีค่าเป็น 1411.301 A ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วรีเลย์ R12 จะต้องไม่สั่งตัดวงจรก่อน R23 ในกรณีนี้ R23 จะมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 1411.301(5/200) = 35.283 A



รูปที่ 4.23 แสดงการทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์ R12 และ R23 ในการป้องกันสายส่ง 2-3

ในตัวอย่างที่ 4.10

f. จากการที่ปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานไว้ที่ 4.75 A ดังนั้นค่ากระแส 35.283 A ที่ผ่าน R23 จะมีค่าเท่ากับ 35.283/4.75 = 7.428 p.u. และจะทำให้รีเลย์ประวิงเวลาเป็น $t = \left(\frac{0.14}{7.428^{0.02}-1}\right)\cdot 0.168 = 0.575$ วินาที หรือบนกราฟการทำงานของรีเลย์สามารถอ่านค่าการประวิงเวลาของ R23 ได้เป็น 0.575 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.23

g. R12 จะต้องประวิงเวลาไปอีก 0.3 วินาที เป็น 0.575+0.3 = 0.875 วินาที

h. ในสภาวะนี้จะมีกระแสผ่านรีเลย์ R12 เป็น 1411.301(5/300) = 23.522 A และจะการที่ปรับค่ากระแสลัดวงจรของ R12 ที่ 4.25 A ค่ากระแสดังกล่าวจะมีค่าเป็น 23.522/4.25 = 5.535 p.u.

i. ต้องการให้ R12 ประวิงเวลา 0.875 วินาที เมื่อมีกระแสไหลผ่าน 5.535 p.u.

โดยจาก $t = \left(\frac{0.14}{I^{0.02}-1}\right)\cdot TMS$

ต้องการประวิงเวลา 0.875 วินาที ที่ค่ากระแส 5.535 p.u. จะได้ว่า

$$0.875 = \left(\frac{0.14}{5.535^{0.02}-1}\right)\cdot TMS$$

$$0.875 = (4.021)\cdot TMS$$

$$TMS = 0.218$$

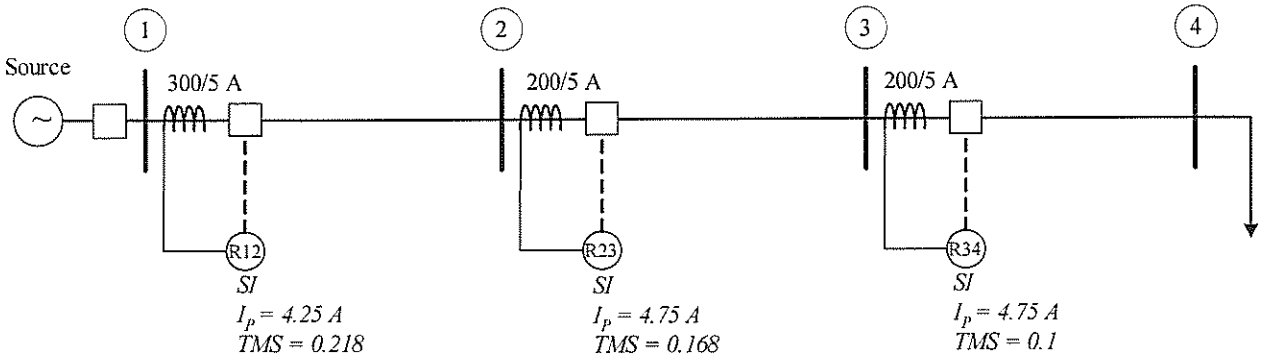
j. ดังนั้นต้องปรับค่าการประวิงเวลาไปที่ TMS = 0.218 ดังแสดงในรูปที่ 4.23

4. สามารถสรุปการคำนวณได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.4 สรุปการคำนวณในตัวอย่างที่ 4.10

Bus	**1**	**2**	**3**	**4**
Maximum Fault Currents (3 phase fault)	3175.426	1411.301	907.265	668.511
Minimum Fault Currents (L-L fault)	2750.000	1222.222	785.714	578.947
Max. Fault Current (A) (ต้นสายส่ง)	3175.426	1411.301	907.265	
Min. Fault Current (A) (ปลายสายส่ง)	1222.222	785.714	578.947	
Coordinated Fault Current (A)	1411.301	907.265	-	
1/3 of Min. Fault Current (A) (ด้านปฐมภูมิของ CT)	407.407	261.905	192.982	
* Pick Up Current That Relay Must See (A) (ด้านปฐมภูมิของ CT)	261.905	192.982	-	
CT Ratio (/5 A)	**300**	**200**	**200**	
1/3 of Min. Fault Current to Relay (A) (ด้านทุติยภูมิของ CT)	6.790	6.548	4.825	
** Pick Up Current That Relay Must See (A) (ด้านทุติยภูมิของ CT)	4.365	4.825	4.825	
Tap Setting (A) (Relay Current Setting)	**4.25**	**4.75**	**4.75**	
Coordinated Fault Current (A) (ด้านทุติยภูมิของ CT)	23.522	22.682	-	
*** Coordinated Fault Current (p.u.) (ด้านทุติยภูมิของ CT เทียบกับ Tap setting)	7.428	4.775	-	
Prefered Delay Time Coordination (sec.)	0.875	0.741		
Actual Delay Time When See Max. Fault (From relay curve)	-	0.575	0.441	
Time Multiplier Setting	**0.218**	**0.168**	**0.10**	
			+ 0.3	

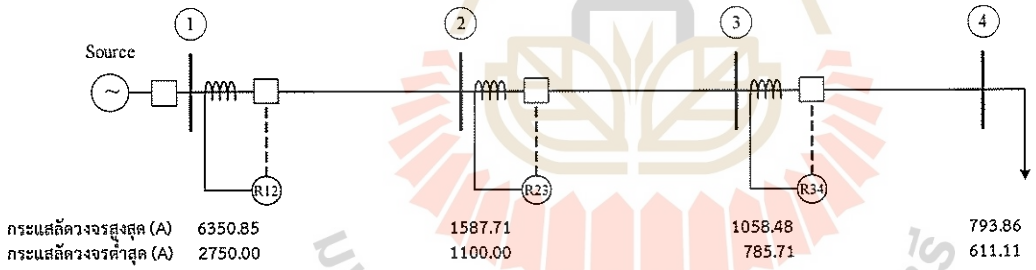
* ค่าที่ใช้ประกอบการเลือก CT
** ค่าที่ใช้ประกอบการเลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน
*** ค่าที่ใช้อ่านกราฟการหน่วงเวลาของรีเลย์ตัวที่ถูก Back up (ใช้ Ratio CT ที่ถูก Back up)



รูปที่ 4.24 แสดงการปรับตั้งทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์ในตัวอย่างที่ 4.10

ตัวอย่างที่ 4.11 จากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดและต่ำสุดคำนวณได้ดังรูปที่ 4.25 จงกำหนดขนาดของหม้อแปลงกระแสที่เหมาะสมเมื่อใช้รีเลย์ที่มีกราฟคุณลักษณะการทำงานแบบ IEEE/ANSI C37.112 - Extremely Inverse ดังรูปที่ 4.26 (ซึ่งเป็นไปตามสมการ $t = \left(\frac{28.2}{I^2 - 1} + 0.1217\right) \cdot TDS$) และทำการปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Tap setting) และค่าเวลาหน่วง (Time dial setting) ของรีเลย์ R12, R23, และ R34

- รีเลย์สามารถปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้เป็น 1, 2, 3, ..., 10 A ค่าตัวคูณเวลาได้เป็น 0.5 - 10
- เลือกใช้ CT จากอัตราส่วนมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ *50/5, 100/5, 150/5, 200/5, 250/5, 300/5, 400/5, 450/5, 500/5, 600/5, 800/5, 900/5, 1000/5, 1200/5, 1500/5*

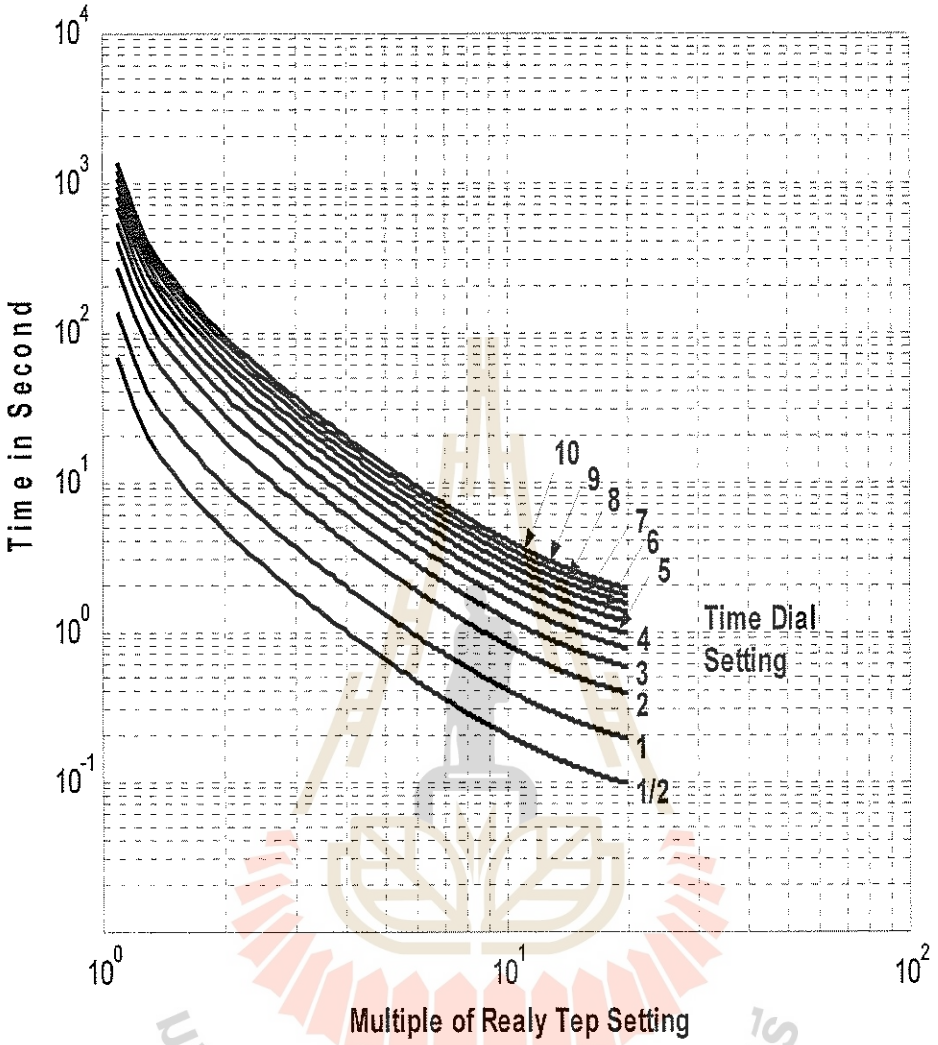


รูปที่ 4.25 ค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังในตัวอย่างที่ 4.11

วิธีทำ

1. ปรับตั้ง R34
   a. จากค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่บัส 4 มีค่าเป็น 611.111 A ดัง นั้นรีเลย์ R34 จะต้องd.ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดลัดวงจรในสภาวะดังกล่าว โดยไม่ต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์อื่น
   b. R34 จะเริ่มต้นทำงานที่กระแสด้านทุตยภูมิเป็น (1/3) 611.111 = 203.704 A
   c. เลือกใช้หม้อแปลงกระแส (CT34) อัตราส่วน 200/5 ดังนั้นจะเริ่มทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 203.704 (5/200) = 5.093 A

d. เลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current) ของ R34 เป็น 5 A และค่าการประวิงเวลาไปที่กราฟ (TDS = 1/2) เนื่องจากไม่ต้องทำงานสัมพันธ์กับรีเลย์อื่น

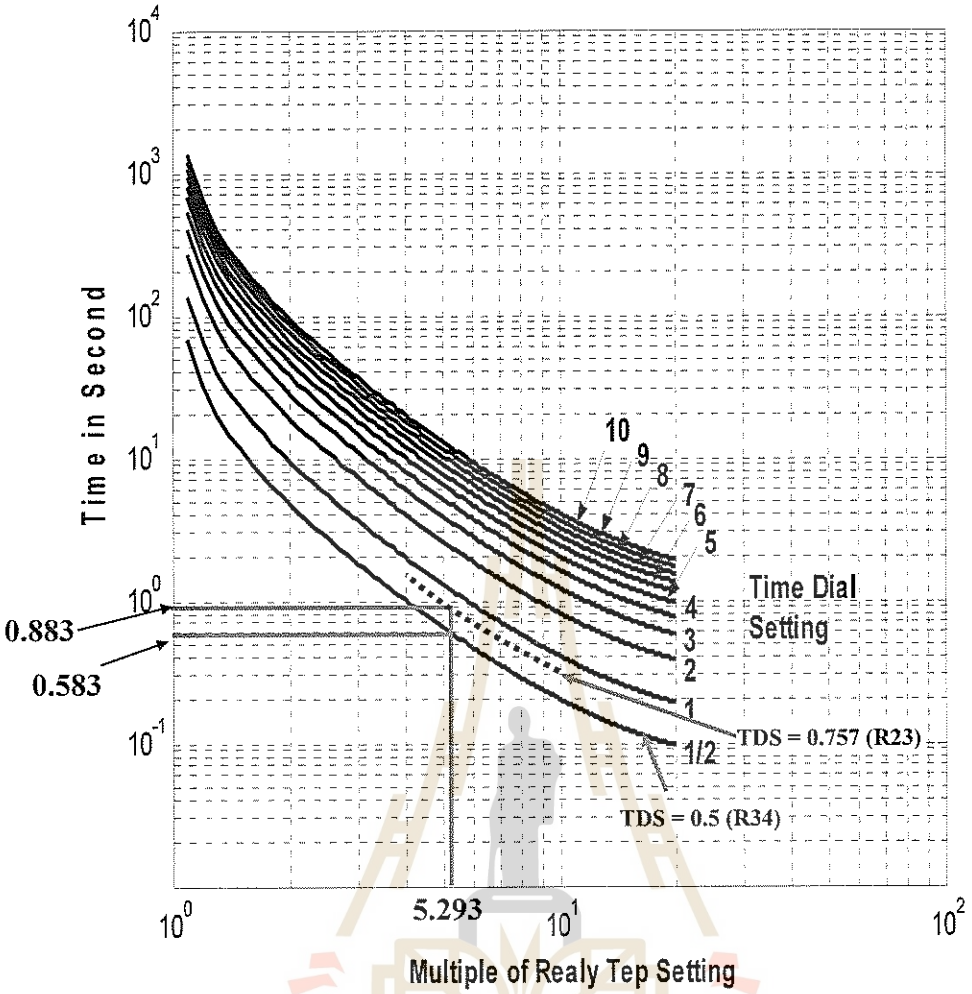


รูปที่ 4.26 กราฟการทำงานของรีเลย์ในตัวอย่างที่ 4.11

2. ปรับตั้ง R23

a. R23 จะต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R34 ด้วยดังนั้น R23 จะต้องเริ่มต้นทำงานที่ค่ากระแส 203.704 A ด้วย

b. เลือกใช้หม้อแปลง กระแส (CT23) อัตราส่วน 200/5 ดังนั้นจะเริ่มทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 203.704 (5/200) = 5.093 A



รูปที่ 4.27 แสดงการทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์ R23 และ R34 ในการป้องกันสายส่ง 3-4 ในตัวอย่างที่ 4.11

c. เลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current) ของ R23 เป็น 5 A

d. จากค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่บัส 3 มีค่าเป็น 1058.475 A ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วรีเลย์ R23 จะต้องไม่สั่งตัดวงจรก่อน R34 ในกรณีนี้ R34 จะมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 1058.475(5/200) = 26.462 A

e. จากการที่ปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานไว้ที่ 5 A ดังนั้นค่ากระแส 26.462 A ที่ผ่าน R34 จะมีค่าเท่ากับ 26. 462/ 5 = 5. 292 p. u. และจะทำให้รีเลย์ประวิงเวลาเป็น $t=\left(\frac{28.2}{5.292^2-1}+0.1217\right)\cdot 0.5=0.583$ วินาที หรือบนกราฟการทำงานของรีเลย์สามารถอ่านค่าการประวิงเวลาของ R34 ได้เป็น 0.583 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.27

f. R23 จะต้องประวิงเวลาไปอีก 0.3 วินาที เป็น 0.583+0.3 = 0.883 วินาที

g. ในสภาวะนี้จะมีกระแสผ่านรีเลย์ R23 เป็น 5.292 p.u. เช่นเดียวกัน **(ใช้ CT อัตราส่วนเดียวกัน)**

โดยจาก $t = \left(\frac{28.2}{I^2 - 1} + 0.1217\right) \cdot TDS$

ต้องการประวิงเวลา 0.883 วินาที ที่ค่ากระแส 5.292 p.u. จะได้ว่า

$$0.883 = \left(\frac{28.2}{5.292^2 - 1} + 0.1217\right) \cdot TDS$$

$$0.883 = (1.166) \cdot TDS$$

$$TDS = 0.757$$

h. ดังนั้นต้องปรับตั้งค่ากการประวิงเวลาของ R23 ไปที่ค่าระหว่างกราฟที่ 1/2 และ 1 (TDS = 0.838) ดังแสดงในรูปที่ 4.27

3. ปรับตั้ง R12

a. R12 จะต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง R23 ด้วยดังนั้น R12 จะต้องเริ่มต้นทำงานที่ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่บัส 2 คือ 785.741 A

b. R12 จะต้องเริ่มทำงานที่ค่ากระแสลัดวงจรเท่ากับ (1/3) 785.741 A = 261.905 A

c. เลือกใช้หม้อแปลง กระแส (CT12) อัตราส่วน 300/5 ดังนั้นจะเริ่มทำงานเมื่อมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 261.905 (5/300) = 4.365 A

d. เลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up current) ของ R12 เป็น 4 A

e. จากค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่บัส 2 มีค่าเป็น 1587.731 A ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วรีเลย์ R12 จะต้องไม่สั่งตัดวงจรก่อน R23 ในกรณีนี้ R23 จะมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ 1587.731(5/200) = 39.69 A

f. จากการที่ปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงานไว้ที่ 5 A ดังนั้นค่ากระแส 39.69 A ที่ผ่าน R23 จะมีค่าเท่ากับ 39. 69/ 5 = 7. 939 p. u. และจะทำให้รีเลย์ประวิงเวลาเป็น $t = \left(\frac{28.2}{7.939^2 - 1} + 0.1217\right) \cdot 0.757 = 0.509$ วินาที หรือบนกราฟการทำงานของรีเลย์สามารถอ่านค่าการประวิงเวลาของ R23 ได้เป็น 0.509 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.18

g. R12 จะต้องประวิงเวลาไปอีก 0.3 วินาที เป็น 0.509+0.3 = 0.809 วินาที

h. ในสภาวะนี้จะมีกระแสผ่านรีเลย์ R12 เป็น 1587.713(5/300) = 26.462 A และจะการที่ปรับค่ากระแสลัดวงจรของ R12 ที่ 4 A ค่ากระแสดังกล่าวจะมีค่าเป็น 26.462/4 = 6.615 p.u.

i. ต้องการให้ R12 ประวิงเวลา 0.809 วินาที เมื่อมีกระแสไหลผ่าน 6.615 p.u.

โดยจาก $t = \left(\frac{28.2}{I^2 - 1} + 0.1217\right) \cdot TDS$

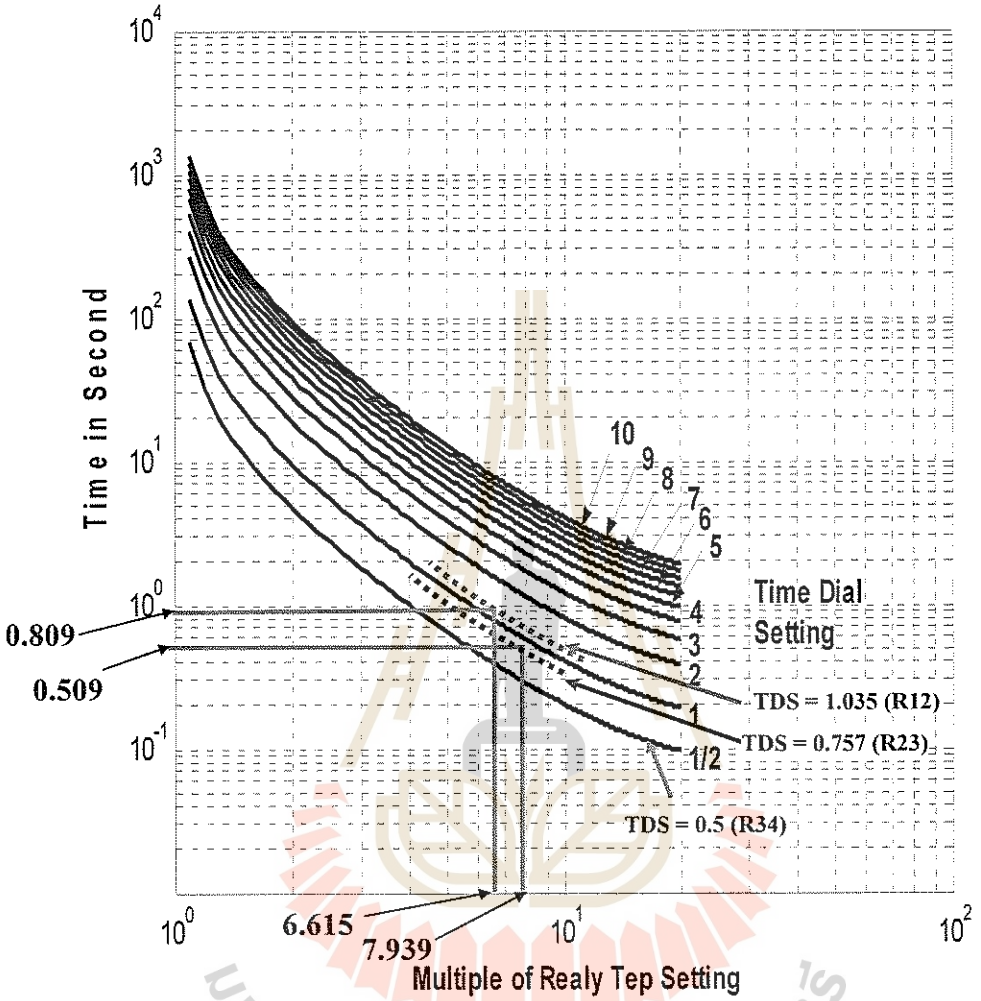
ต้องการประวิงเวลา 0.809 วินาที ที่ค่ากระแส 6.615 p.u. จะได้ว่า

$$0.809 = \left(\frac{28.2}{6.615^2 - 1} + 0.1217\right) \cdot TDS$$

$$0.809 = (0.781) \cdot TDS$$

$$TDS = 1.035$$

j. ดังนั้นต้องปรับค่าการประวิงเวลาไปที่ค่าระหว่างกราฟที่ 1 และ 2 (TDS = 1.035) ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แสดงการทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์ R12 และ R23 ในการป้องกันสายส่ง 2-3 ในตัวอย่างที่ 4.11

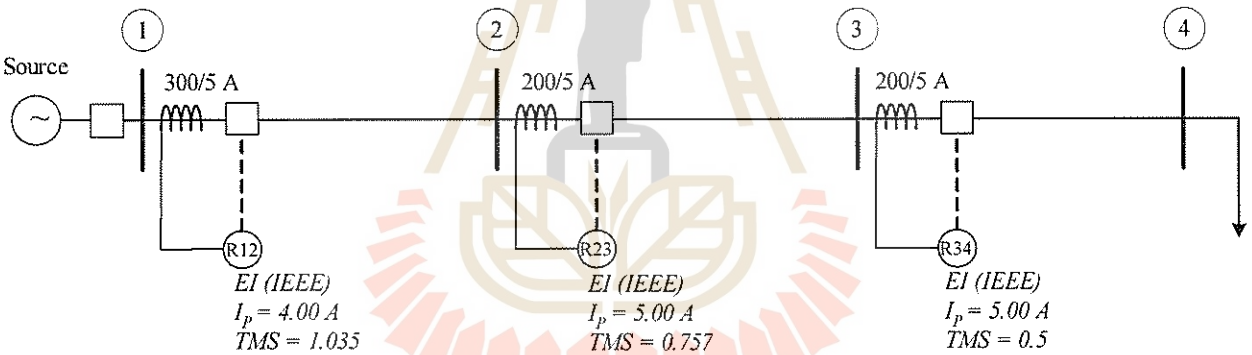
4. สามารถสรุปการคำนวณได้ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.29

ตารางที่ 4.5 สรุปการคำนวณในตัวอย่างที่ 4.11

Bus	1	2	3	4
Maximum Fault Currents (3 phase fault)	6350.853	1587.713	1058.475	793.857
Minimum Fault Currents (L-L fault)	2750.000	1100.000	785.714	611.111
Max. Fault Current (A) (ต้นสายส่ง)	6350.853	1587.713	1058.475	
Min. Fault Current (A) (ปลายสายส่ง)	1100.000	785.714	611.111	
Coordinated Fault Current (A)	1587.713	1058.475	-	
1/3 of Min. Fault Current (A) (ด้านปฐมภูมิของ CT)	366.667	261.905	203.704	
* Pick Up Current That Relay Must See (A) (ด้านปฐมภูมิของ CT)	261.905	203.704	-	
CT Ratio (/5 A)	**300**	**200**	**200**	
1/3 of Min. Fault Current to Relay (A) (ด้านทุติยภูมิของ CT)	6.111	6.548	5.093	
** Pick Up Current That Relay Must See (A) (ด้านทุติยภูมิของ CT)	4.365	5.093	5.093	
Tap Setting (A) (Relay pick up current)	**4**	**5**	**5**	
Coordinated Fault Current (A) (ด้านทุติยภูมิของ CT)	26.462	26.462	-	
*** Coordinated Fault Current (p.u.) (ด้านทุติยภูมิของ CT เทียบกับ Tap setting)	7.939	5.292	-	
Prefered Delay Time Coordination (sec.)	0.809	0.883		
Actual Delay Time When See Max. Fault (From relay curve)	-	0.509	0.583	
Time Dial Setting	**1.035**	**0.757**	**1/2**	

+ 0.3

* ค่าที่ใช้ประกอบการเลือก CT
** ค่าที่ใช้ประกอบการเลือกค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน
*** ค่าที่ใช้อ่านกราฟการหน่วงเวลาของรีเลย์ตัวที่ถูก Back up (ใช้ Ratio CT ที่ถูก Back up)



รูปที่ 4.29 แสดงการปรับตั้งทำงานสัมพันธ์กันของรีเลย์ในตัวอย่างที่ 4.11

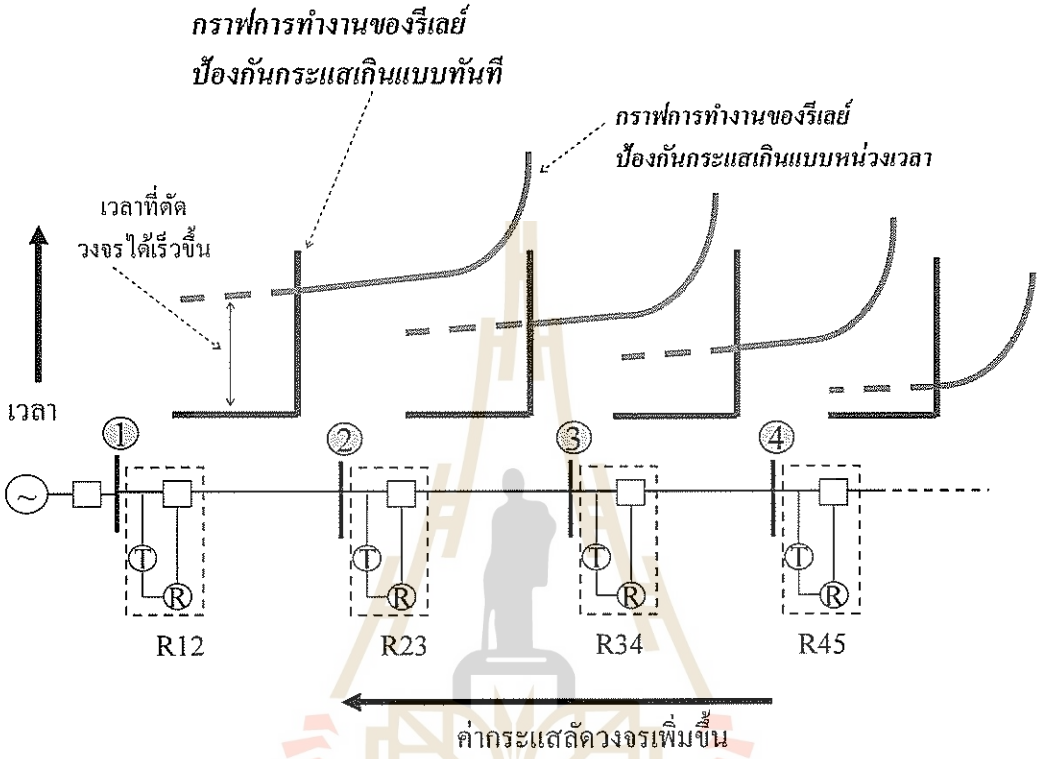
4.6 รีเลย์กระแสเกินแบบทันที

รีเลย์กระแสเกินแบบทันที (Instantaneous Overcurrent Relays, IEC I>> , IEEE No. “50”) จะทำงานเมื่อเกิดกระแสไหลผ่านรีเลย์เกินค่าที่ปรับตั้งไว้โดยทันที โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการทำงาน 0.1 วินาทีหรือต่ำกว่า หลักการในการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีจะเป็นการพิจารณาให้รีเลย์ทำงานสัมพันธ์กันจากค่ากระแสลัดวงจร หรือเรียกว่า Current-Graded System และโดยทั่วไปการใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันทีจะใช้ร่วมกับรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาเรียกว่า Current/Time-Graded System

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.6.1 การประยุกต์ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันที

รีเลย์กระแสเกินแบบทันทีจะใช้ในการทำงานร่วมกับรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา เพื่อให้การป้องกันการลัดวงจรในสายส่งทำได้เร็วขึ้น โดยรีเลย์จะทำการป้องกันเฉพาะการเกิดลัดวงจรในสายส่งที่รับผิดชอบอยู่เท่านั้น และจะทำการตัดวงจรอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น



รูปที่ 4.30 การใช้งานรีเลย์กระแสเกินแบบทันที

รูปที่ 4.30 แสดงหลักการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบทันที ที่ตำแหน่งใกล้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น กระแสลัดวงจรก็จะมากขึ้น แต่จากรูปจะเห็นว่าการปรับตั้งเวลาของรีเลย์กระแสเกินกลับต้องมีการประวิงเวลามากขึ้นในการทำงานร่วมกับรีเลย์ที่อยู่ถัดออกไป ดังนั้นการใช้เพียงรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาจึงไม่เพียงพอที่จะทำงานได้รวดเร็ว การเพิ่มรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีจะช่วยให้การตัดวงจรทำได้เร็วขึ้นในกรณีที่การลัดวงจรอยู่ในสายส่งที่รีเลย์รับผิดชอบเท่านั้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันทีจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสลัดวงจรของระบบและการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาด้วย

4.6.2 หลักการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบทันที

การปรับตั้งค่าของรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีจะสนใจเฉพาะค่ากระแสลัดวงจรโดยไม่นำค่ากระแสในสภาวะการจ่ายภาระปกติมาพิจารณา ทั้งนี้เพื่อไม่ให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดคือสั่งตัดวงจรในกรณีที่ไม่จำเป็นเมื่อเกิดการลัดวงจรนอกขอบเขตที่รีเลย์รับผิดชอบอยู่จากผลของต่อสนองต่อสัญญาณที่ไวเกินไป (Transient Overeach) โดยปกติการ

ปรับตั้งจึงให้รีเลย์ทำงานที่ค่า 125-135% ของกระแสลัดวงจรสูงสุดที่เป็นไปได้ และค่า 90% ของกระแสต่ำสุดที่รีเลย์ไม่ควรทำงาน หรือในกรณีที่เป็นรีเลย์แบบอิเล็กทรอนิกส์หรือไมโครโปรเซสเซอร์อาจจะให้มีค่าทำงานที่ 110% ของกระแสลัดวงจรสูงสุด

สาเหตุของการเกิดการสั่งตัดวงจรจากการเกิดการลัดวงจรนอกขอบเขตที่รีเลย์รับผิดชอบ มักเกิดขึ้นจากค่ากระแสที่รีเลย์จะทำงานเนื่องจากคุณสมบัติการตอบสนองของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะในสายส่งที่มีค่า X/R สูง ๆ และเกิดจากความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสในสภาวะชั่วขณะ (Transient) ด้วย

ตัวอย่างที่ 4.12 จากรูปที่ 4.18 ในตัวอย่างที่ 4.8 ถ้าทำการเพิ่มรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีที่บัส 1 และ 2 จงทำการปรับตั้งค่ารีเลย์ดังกล่าว

วิธีทำ

การปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีที่บัส 2 พิจารณาได้ดังนี้

1. เพื่อป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานเร็วเกินไป ทำการปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานที่ค่ากระแส 135% ของกระแสลัดวงจรสูงสุดที่จะเกิดขึ้นได้คือ 1000 A
    a. ดังนั้นปรับตั้งค่ากระแสที่ 135% x 1000 = 1350 A
    b. ที่ค่ากระแส 1350 A จะมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 1350(5/100) = 67.5 A ปรับตั้งรีเลย์ที่ค่าดังกล่าว
2. ตรวจสอบกรณีเกิดลัดวงจรที่บัส 2
    a. ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่เป็นไปได้คือ 850 A ซึ่งรีเลย์จะไม่ทำงาน
    b. ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่เป็นไปได้คือ 1500 A สูงกว่า 1350 A เพียงเล็กน้อย

การติดตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีนี้จะป้องกันได้เฉพาะกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรมากเท่านั้น คือเกือบถึงค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่เป็นไปได้เท่านั้น ดังนั้นรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีนี้อาจไม่จำเป็นต้องใช้ในทางปฏิบัติ

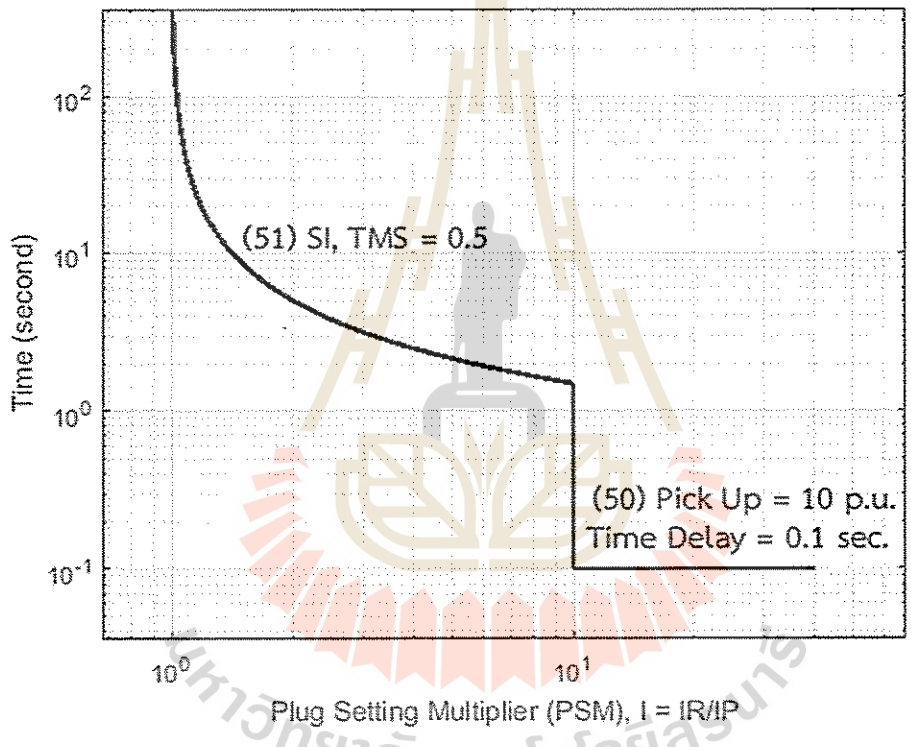
การปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีที่บัส 1 พิจารณาได้ดังนี้

1. เพื่อป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานนอกขอบเขตเลยไปถึงบัส 2 ทำการปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานที่ค่ากระแส 135% ของกระแสลัดวงจรสูงสุดที่จะเกิดขึ้นได้คือ 1500 A
    a. ดังนั้นปรับตั้งค่ากระแสที่ 135% x 1500 = 2025 A
    b. ที่ค่ากระแส 2025 A จะมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เท่ากับ 2025(5/100) = 101.25 A
    c. **ค่ากระแส 101.25 A เป็นค่าที่สูงมากสำหรับรีเลย์และหม้อแปลงกระแสทั่วไป**
2. ตรวจสอบกรณีเกิดลัดวงจรที่บัส 1
    a. ค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่เป็นไปได้คือ 1000 A ต่ำกว่า 2025 A ซึ่งรีเลย์จะไม่ทำงาน
    b. ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่เป็นไปได้คือ 3000 A สูงกว่า 2025 A รีเลย์จะทำงาน

การติดตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีนี้จะป้องกันได้เฉพาะกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจร 2025 – 3000 A เท่านั้น แต่กระแสลัดวงจรที่เป็นไปได้อาจมีค่าต่ำกว่า 2025 A ได้ อย่างไรก็ตามกรณีนี้ที่บัส 1 เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่จึงอาจพิจารณาติดตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบทันที

ค่ากระแสที่รีเลย์ทำงานมีค่า 101.25 A ซึ่งสูงมากจึงอาจพิจารณาให้ปรับเปลี่ยนหม้อแปลงกระแสจาก 100/5 เป็น 200/5 โดยจะทำให้มีกระแสไหลผ่านรีเลย์ที่ 2025 A เท่ากับ 2025(5/200) = 50.63 A และการเปลี่ยนหม้อแปลงกระแสนี้อาจทำให้ต้องทำการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาที่บัส 1 ใหม่ด้วย

ทั้งนี้ในทางปฏิบัติรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีจะไม่ทำงานได้โดยทันที แต่จะมีเวลาในการทำงานที่เร็วมาก และเมื่อนำรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีมาทำงานร่วมกับรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลา จะมีกราฟการทำงานร่วมกันดังตัวอย่างในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ตัวอย่างคุณลักษณะของการทำงานร่วมกันของรีเลย์กระแสเกินประวิงเวลาและรีเลย์กระแสเกินแบบทันที (50/51)

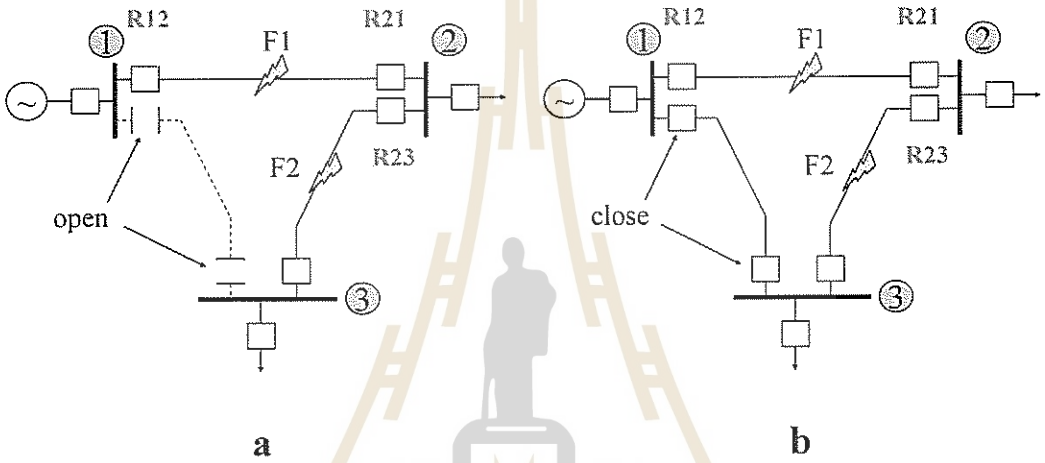
4.7 รีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง (Directional Overcurrent Relay)

รีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง (IEC

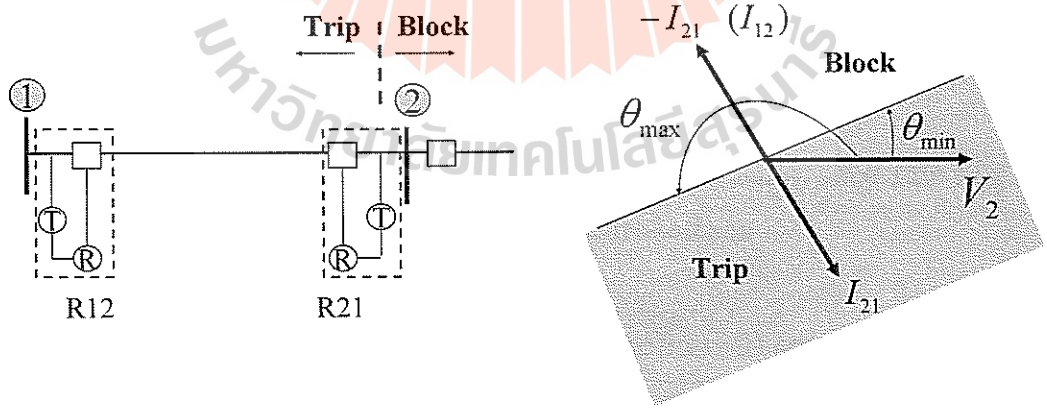
, IEEE No. “67”) จะมีความจำเป็นในกรณีที่ต้องการให้มีการสั่งตัดวงจรเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรไหลในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น เพื่อช่วยในการทำงานสัมพันธ์ร่วมกันของรีเลย์ (Coordination) รูปที่ 4.32 แสดงตัวอย่างระบบไฟฟ้าที่มีความจำเป็นต้องใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง จากรูปถ้าสายส่ง 1-3 เปิดวงจรอยู่ (รูปที่ 4.32a) จะทำให้โครงข่ายมีลักษณะเป็นแบบแขนง (Radial System) ในกรณีนี้หากเกิด

ลัดวงจรที่ F1 ก็จะอยู่ในขอบเขตการป้องกันที่ R12 ต้องสั่งเบรกเกอร์ B12 ตัดวงจร โดยที่ R21 และ R23 จะไม่รับรู้ถึงการเกิดลัดวงจร และหากเกิดลัดวงจรที่ F2 ก็จะอยู่ในขอบเขตการป้องกันของ R23 ที่จะสั่งตัดวงจร และไม่มีความจำเป็นต้องใช้รีเลย์ R21 (ถ้า R21 เป็นรีเลย์กระแสเกินแบบไม่มีทิศทางก็จะต้องปรับตั้งค่ากระแสลัดวงจรของ R21 ให้มีค่าสูงกว่า R23 เพื่อไม่ให้ทำงานก่อน R23)

เมื่อสายส่ง 1-3 ต่อวงจรอยู่ (รูปที่ 4.32b) การเกิดลัดวงจรที่ F1 จะต้องตัดเพียงวงจรสายส่ง 1-3 ออกด้วยรีเลย์ R12 และ R21 ซึ่งกรณีนี้อาจมีค่ากระแสลัดวงจรไหลผ่าน R21 ต่ำกว่ากรณีการลัดวงจที่ F2 ดังนั้นจะเห็นว่ารีเลย์ R21 จะต้องระบุได้ว่าการเกิดลัดวงจรอยู่ในทิศทางด้านสายส่ง 1-2 นั่นคือจะตัดวงจรเฉพาะกรณีที่กระแสลัดวงจรไหลไปทางบัส 1



รูปที่ 4.32 ตัวอย่างระบบไฟฟ้ากำลังที่ต้องใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง



รูปที่ 4.33 หลักการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง

รูปที่ 4.33 แสดงหลักการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง โดยจะมีการเปรียบเทียบมุมของกระแสลัดวงจรกับค่ามุมอ้างอิง (reference) หรือเรียกว่า ปริมาณอ้างอิงทิศ (polarizing quantity) ซึ่งอาจเป็นแรงดันหรือกระแส (มักจะเป็นแรงดันหรือบางครั้งก็ใช้กระแสลำดับศูนย์) ที่มีมุมไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร

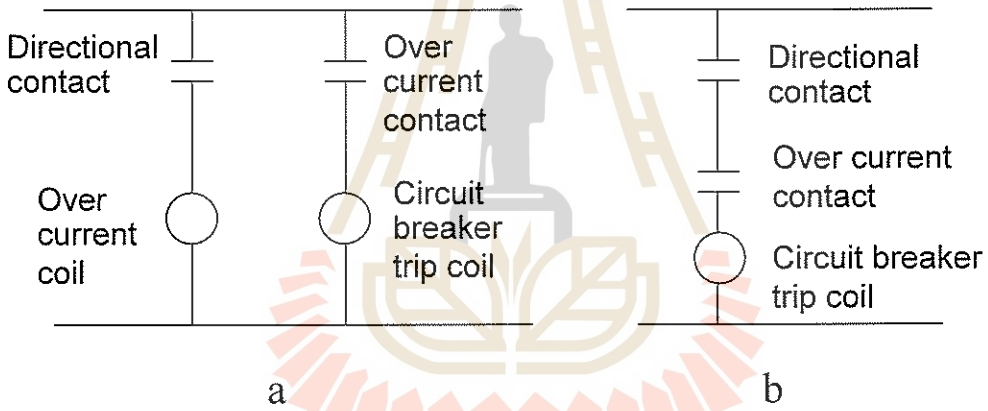
การทำงานรีเลย์กระแสเกินจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$\theta_{min} > \theta > \theta_{max}$ Trip (4.13)

$\theta_{min} < \theta < \theta_{max}$ Block (4.14)

โดย θ เป็นค่ามุมของกระแสที่วัดได้เทียบกับค่ามุมอ้างอิง ส่วน θ_{min} และ θ_{max} เป็นค่ามุมที่กำหนดขอบเขตการทำงานของรีเลย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.34 การทำงานของรีเลย์ป้องกันแบบทิศทางสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

- **การควบคุมแบบทิศทาง** เป็นการใช้หน้าสัมผัสที่ทำงานตามทิศทางของกระแสไปควบคุมขดลวดป้องกันกระแสเกินอีกที ทำให้การทำงานในส่วนป้องกันกระแสเกินไม่ทำงานนอกจากว่าส่วนแสดงทิศทางได้ทำงานแล้ว ในรีเลย์กระแสเกินแบบที่ทางที่เป็นแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้วิธีต่อขดป้องกันกระแสเกินอนุกรมกับหน้าสัมผัสแสดงทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 4.34a
- **การป้องกันกระแสเกินแบบทิศทาง** เป็นการใช้หน้าสัมผัสของรีเลย์ที่อิสระจากกันต่ออนุกรมไปยังขดลวดตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยทั้งหน้าสัมผัสแสดงทิศทางและหน้าสัมผัสแสดงการเกิดกระแสเกินต้องทำงานทั้งคู่จึงจะสั่งเบรกเกอร์ตัดวงจรได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.34b

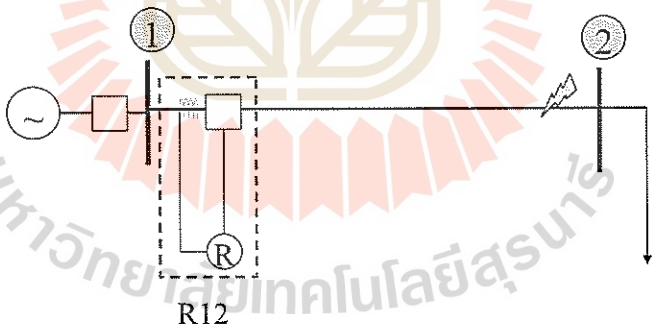


รูปที่ 4.34 วงจรการป้องกันแบบทิศทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบฝึกหัดบทที่ 4

1. จงอธิบายสิ่งที่ต้องพิจารณาในการป้องกันกระแสเกินในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เหตุใดการปรับตั้งรีเลย์จะมีการเผื่อระยะไว้ส่วนหนึ่งในทางปฏิบัติ จงอธิบายพร้อมแสดงความคิดเห็น
3. รีเลย์มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEEE C37.112 แบบ Moderately Inverse ถ้าทำการปรับตั้งให้เริ่มตรวจจับกระแสเกินเริ่มต้นที่ 5 A และเลือกการประวิงเวลา TDS = 1 ถ้ากระแสที่ตรวจจับได้ (Input) มีค่าเป็น 10 A จะเกิดสัญญาณ (Output) จากรีเลย์เมื่อเวลาผ่านไปนานเท่าใด
4. จากคุณสมบัติของรีเลย์ในข้อ 3. ถ้าปรับตั้งให้ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานเป็น 5 A และปรับการประวิงเวลา TDS = 4 ถ้ากระแสที่ตรวจจับได้มีค่าเป็น 10 A รีเลย์จะประวิงเวลาไว้เท่าใด
5. จากรีเลย์ที่มีคุณสมบัติในข้อ 3. ถ้าต้องการปรับให้รีเลย์เริ่มต้นทำงานที่ 5 A และส่งสัญญาณเมื่อมีกระแสตรวจจับได้ 40 A ในเวลา 0.4 วินาที จะต้องทำการปรับค่าการประวิงเวลาไปที่ค่า TDS เท่าใด
6. จากรูปที่ P4.6.1 จงคำนวณค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสและกระแสเริ่มต้นทำงานที่เหมาะสมของรีเลย์ R12 โดยจากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพบว่าสายส่ง 1-2 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลสูงสุด 100 A และค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 800 A และ 1200 A ตามลำดับ โดยรีเลย์ไม่ต้องทำงานสัมพันธ์ (Coordinate) กับรีเลย์อื่น
   - รีเลย์สามารถปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้เป็น 2.5 A (50%), 3.75 (75%), 5 A (100%), ..., 10 A (200%) ค่าตัวคูณเวลาได้เป็น 0.1 - 1.0
   - เลือกใช้ CT จากอัตราส่วนมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ *50/5, 100/5, 150/5, 200/5, 250/5, 300/5, 400/5, 450/5, 500/5, 600/5, 800/5, 900/5, 1000/5, 1200/5, 1500/5*

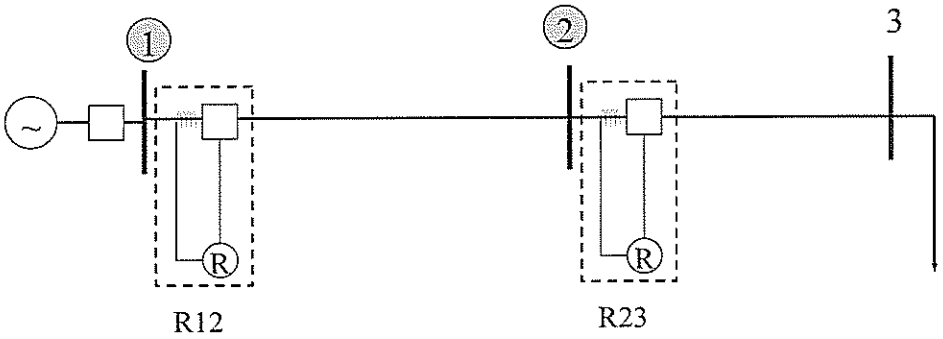


R12

รูปที่ P4.6.1

7. จากรูปที่ P4.7.1 จากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพบว่าสายส่ง 2-3 จะมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลสู่ภาระสูงสุด 100 A และ ค่ากระแสลัดวงจรบนสายส่ง 2-3 ต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 800 A และ 1200 A ตามลำดับ ค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 2 ต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 900 A และ 1500 A ตามลำดับ ค่ากระแสลัดวงจรที่บัส 1 ต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 1000 A และ 3000 A ตามลำดับ จงแสดงวิธีการปรับตั้งค่ารีเลย์ที่บัส 1 และ 2 โดยรีเลย์ที่ใช้มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC60255 แบบ Standard Invers (SI)
   - รีเลย์สามารถปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้เป็น 2.5 A (50%), 3.75 (75%), 5 A (100%), ..., 10 A (200%) ค่าตัวคูณเวลาได้เป็น 0.1 - 1.0

- เลือกใช้ CT จากอัตราส่วนมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ *50/5, 100/5, 150/5, 200/5, 250/5, 300/5, 400/5, 450/5, 500/5, 600/5, 800/5, 900/5, 1000/5, 1200/5, 1500/5*



รูปที่ P4.7.1

8. รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาผกผันมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน IEC60255 แบบ Standard Invers (SI) ถ้าใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 900/5 A พิกัดรีเลย์ที่มีค่า 5 A ปรับตั้งค่ากระแสของรีเลย์ไว้ที่ 75% ของพิกัด ตั้งค่า TMS ไว้ที่ 0.5 เมื่อเกิดกระแสผิดพร่องมีค่าเท่ากับ 4000 A รีเลย์จะทำงานที่เวลาเท่าใด
9. รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาผกผันมากที่สุด มีคุณสมบัติการทำงานตามมาตรฐาน IEC60255 แบบ Very Invers (VI) ถ้าใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 1000/5 A พิกัดรีเลย์ที่มีค่า 5 A ปรับตั้งค่ากระแสของรีเลย์ไว้ที่ 125% ของพิกัด ถ้าต้องการให้รีเลย์ทำงานที่เวลา 0.5 วินาที เมื่อเกิดกระแสผิดพร่องมีค่าเท่ากับ 5000 A จะต้องปรับตั้งค่า TMS ไปที่ค่าใด
10. จากข้อ 7. ถ้าทำการเพิ่มรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีที่บัส 1 และ 2 จงแสดงวิธีการปรับตั้งค่ารีเลย์กระแสเกินแบบทันทีดังกล่าว
11. จงอธิบายความจำเป็นที่ต้องใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง และอธิบายหลักการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5

การป้องกันแบบระยะทาง

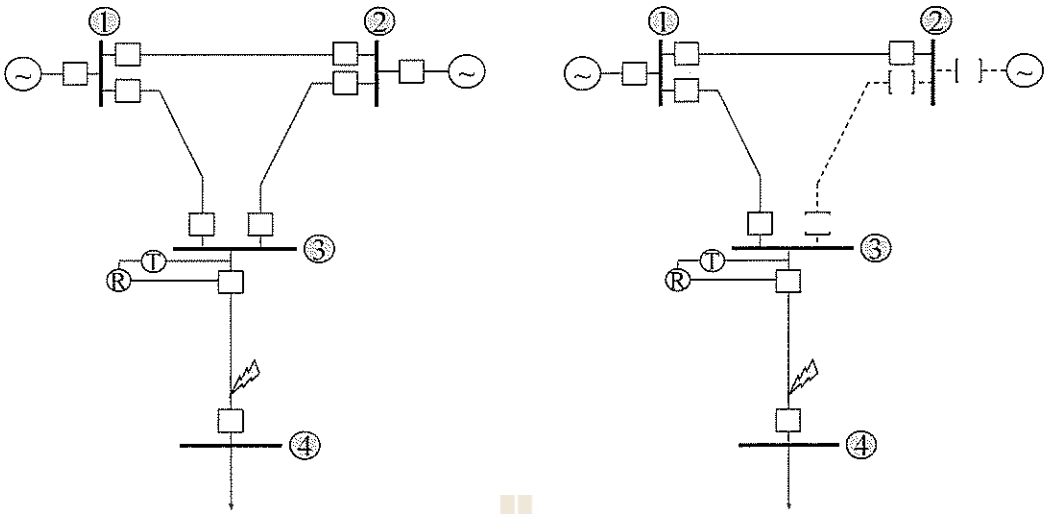
(Distance Protection)

บ่อยครั้งที่การป้องกันการลัดวงจรด้วยรีเลย์กระแสเกินเพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถทำการปรับตั้งค่าที่เหมาะสมได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนเปิด-ปิดวงจรของโครงข่ายซึ่งจะทำให้ค่าตัวแปรสำคัญคือกระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลังโดยเฉพาะแบบโครงข่ายเปลี่ยนแปลงไปทำให้การปรับตั้งรีเลย์ต้องมีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงวงจรของโครงข่าย และในทางปฏิบัติจะไม่สามารถปรับตั้งรีเลย์ได้ทุกครั้งที่มีการสั่งเปิด-ปิดวงจรของโครงข่าย ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงรีเลย์แบบระยะทาง (IEC Z>, IEEE No. “21”) ที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า

5.1 ความจำเป็นของการป้องกันแบบระยะทาง

ในไฟฟ้ากำลังแบบโครงข่ายขนาดใหญ่จะมีการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานของระบบ เช่น การปิด-เปิดเบรกเกอร์ของสายส่งอยู่เสมอทำให้ค่ากระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งหากมีการใช้รีเลย์กระแสเกินเพียงอย่างเดียวก็จะต้องทำการปรับตั้งรีเลย์ใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบ ซึ่งไม่สะดวกและเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นในระบบโครงข่ายขนาดใหญ่จึงจำเป็นต้องใช้รีเลย์แบบระยะทางซึ่งสามารถตรวจจับการเกิดลัดวงจรได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่ากระแสลัดวงจรเพียงอย่างเดียวแต่ตรวจจับจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งขณะลัดวงจร พิจารณารูปที่ 5.1 ถ้ามีการแบ่งสภาวะการทำงานของระบบเป็นสองกรณีคือ กรณีที่1 มีความต้องการใช้กำลังงานไฟฟ้ามาก และกรณีที่ 2 มีการใช้กำลังงานไฟฟ้าน้อย

ในกรณีที่ 1 จะมีการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมดดังรูปที่ 5.1 a แต่ในกรณีที่ 2 มีการหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 2 และเปิดวงจรสายส่ง 2-3 ดังรูปที่ 5.1b ค่ากระแสลัดวงจรในกรณีที่ 1 ค่ากระแสในสภาวะปกติจะมีค่าสูงและค่ากระแสลัดวงจรก็จะมีค่าสูงจึงต้องทำการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกิน R34 ไว้ที่ค่าสูง แต่ในกรณีที่ระบบอยู่ในกรณีที่ 2 ค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าต่ำซึ่งหากปรับตั้ง ตามค่ากระแสลัดวงจรของกรณีที่ 1 ก็จะทำให้รีเลย์ไม่สั่งตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น แต่ถ้าปรับตั้งตามค่ากระแสลัดวงจรของกรณีที่ 2 ก็จะทำให้รีเลย์สั่งตัดวงจรในกรณีที่มีการใช้กำลังงานไฟฟ้าสูงในกรณีที่ 1 ได้



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า

a. กรณีที่ 1 มีการใช้กำลังงานไฟฟ้ามาก b. กรณีที่ 2 มีการใช้กำลังงานไฟฟ้าน้อย

5.2 หลักการป้องกันแบบระยะทาง

รีเลย์แบบระยะทางมักใช้ในการป้องกันสายส่งไฟฟ้า โดยจะใช้วิธีตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างตำแหน่งที่รีเลย์รับสัญญาณกับตำแหน่งที่เกิดลัดวงจร ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะสะท้อนถึงระยะทางระหว่างตำแหน่งที่รีเลย์รับสัญญาณกับตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรนั่นเอง หลักการวัดค่าอิมพีแดนซ์จะใช้วิธีวัดค่าแรงดันและกระแสเพื่อแปลงเป็นสัดส่วนกันดังสมการ

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} \qquad (5.1)$$

หรือ

$$|Z_s|\angle\theta_Z = \frac{|V_s|\angle\theta_V}{|I_s|\angle\theta_I} \qquad (5.2)$$

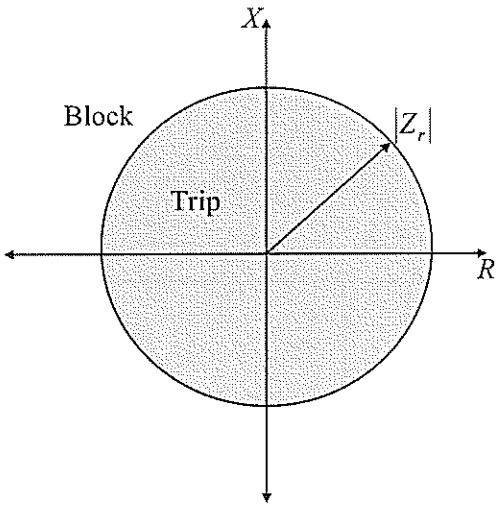
โดย

Z_s เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์วัดได้ หรือเป็นค่าอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ

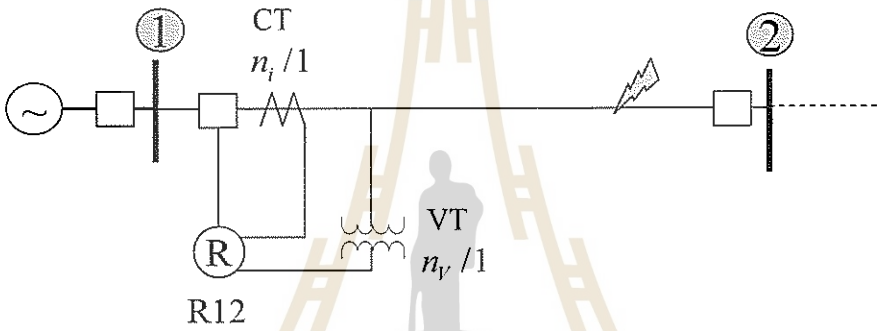
V_s เป็นค่าแรงดันที่รีเลย์รับจากหม้อแปลงแรงดันหรือเป็นค่าแรงดันด้านทุติยภูมิ

I_s เป็นค่ากระแสที่รีเลย์รับจากหม้อแปลงกระแสหรือเป็นค่ากระแสด้านทุติยภูมิ

โดยรีเลย์จะสั่งให้เบรกเกอร์ตัดวงจร (Trip) เมื่อค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ปรับตั้งไว้คือ $|Z_s| < |Z_r|$ → Trip หรือสามารถแสดงเป็น**แผนผังความต้านทาน-รีแอคแตนซ์ หรือ** R-X Diagram ได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 R-X Diagram แสดงการป้องกันของรีเลย์แบบระยะทาง



รูปที่ 5.3 การตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสของรีเลย์ระยะทาง

จากการที่รีเลย์แบบระยะทางจะรับสัญญาณแรงดันและกระแสจากหม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแสดังแสดงในรูปที่ 5.3 ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์จริงของสายส่งหรือเรียกว่าค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าแตกต่างจากค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ได้รับสัญญาณตามค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแสดังสมการ

$$V_s = \frac{V_p}{n_v} \tag{5.3}$$

$$I_s = \frac{I_p}{n_i} \tag{5.4}$$

ดังนั้น

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} = \frac{V_p}{n_v} \cdot \frac{n_i}{I_p} = \frac{V_p}{I_p} \cdot \frac{n_i}{n_v} = Z_p \cdot \frac{n_i}{n_v} \tag{5.5}$$

เมื่อ Z_p เป็นค่าอิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิ

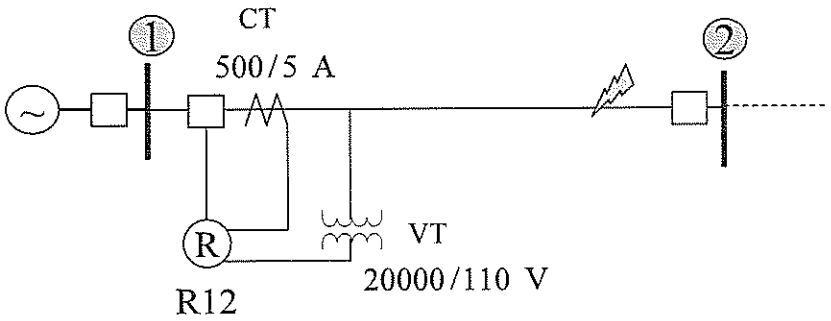
V_p เป็นค่าแรงดันด้านปฐมภูมิ

I_p เป็นค่ากระแสด้านปฐมภูมิ

n_v เป็นค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงแรงดัน

n_i เป็นค่าอัตราส่วนของ CT

ตัวอย่างที่ 5.1 พิจารณารีเลย์แบบระยะทางดังรูปที่ 5.4 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิมีค่า 1+ *j*3 Ohm จงหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 5.4 การป้องกันแบบระยะทางในตัวอย่างที่ 5.1

วิธีทำ จากหม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 500/5 = 100/1 ดังนั้น $n_i = 1$

จากหม้อแปลงแรงดันอัตราส่วน 20000/110 = 181.82/1 ดังนั้น $n_v = 181.82$

$$Z_s = Z_p \frac{n_i}{n_v} = (1+j3)\left(\frac{100}{181.82}\right) = 0.55 + j1.65 \quad \Omega$$

ตัวอย่างที่ 5.2 สายส่งช่วงหนึ่งค่าอิมพิแดนซ์รวมของสายส่งทั้งเส้นมีค่าเป็น 3 + j25 Ohm CTและ VT ที่ใช้มีค่า CT Ratio = 500/5 A และ VT Ratio = 20,000 / 69.3 V ถ้าต้องการปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานที่ 85% ของความยาวสายส่ง ค่าอิมพิแดนซ์ที่ใช้ปรับตั้งรีเลย์ควรมีค่าขนาดเป็นเท่าใด

วิธีทำ อิมพีแดนซ์ของสายส่งที่รีเลย์เห็นด้านทุติยภูมิมีค่าเป็น

$$Z_s = Z_p \frac{n_i}{n_v} = (3+j25)\left(\frac{500/5}{20000/69.3}\right) = 1.039 + j8.663 \quad \Omega$$

เมื่อปรับตั้งรีเลย์ที่ 85% ของความยาวสายส่งจะเป็นการปรับตั้งที่ค่า

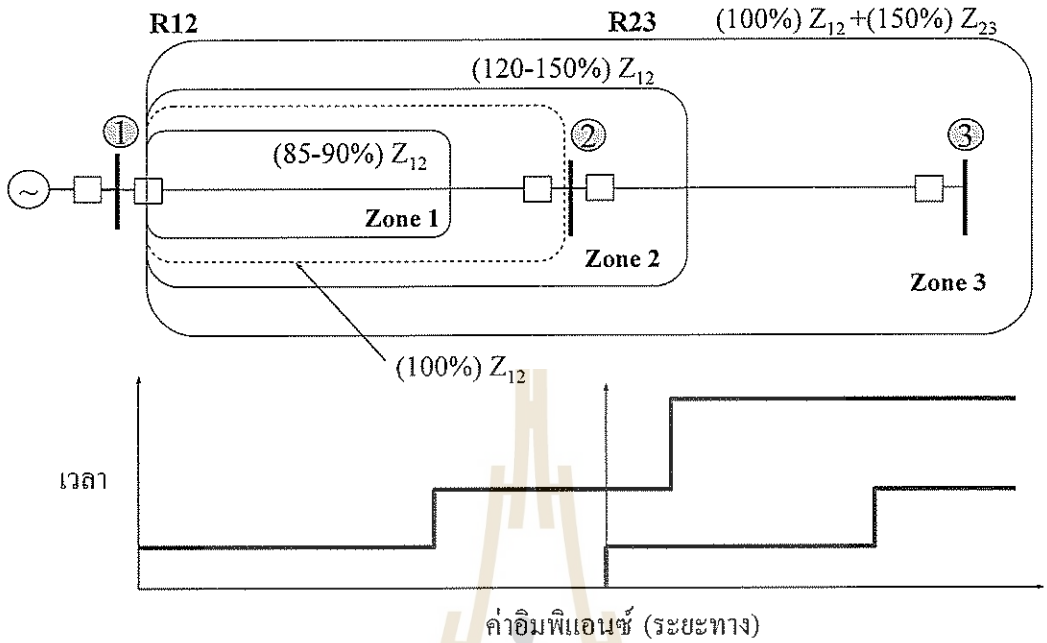
$$Z_{setting} = 0.85(1.039 + j8.663) = 0.884 + j7.363 \quad \Omega$$

5.3 หลักการปรับตั้งรีเลย์แบบระยะทาง

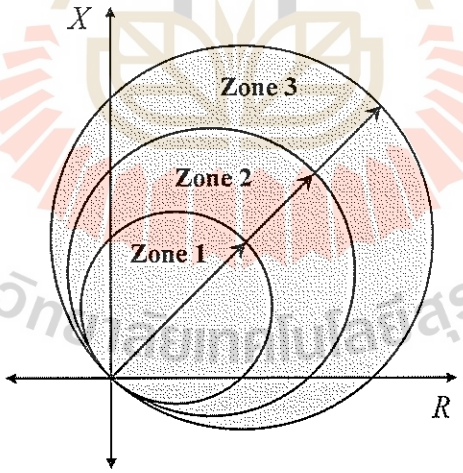
รีเลย์แบบระยะทางจะมีหน้าที่หลักในการป้องกันสายส่งที่ต่อยู่และจะทำหน้าที่ป้องกันสำรองสายส่งที่อยู่ถัดออกไปด้วย ดังแสดงดังรูปที่ 5.5 โดยเพื่อให้แน่ใจว่ารีเลย์ (R12) จะไม่สั่งตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรในสายส่งที่อยู่ถัดไป (สายส่ง 2-3) ก่อนรีเลย์ที่รับผิดชอบอยู่ (R23) ดังนั้นจะปรับตั้งค่าให้รีเลย์ R12 มีขอบเขตในการป้องกันอยู่ที่ระยะ 85-90% ของความยาวสายส่ง 1-2 ซึ่งจะเรียกว่าขอบเขตที่ 1 (Zone 1) และจะมีการป้องกันขอบเขตที่ 2 (Zone 2) ที่ระยะ 120-150% ของความยาวสายส่ง 1-2 แต่ต้องไม่เกินขอบเขตที่ 1 ของรีเลย์ R23 ซึ่งการเกิดลัดวงจรในขอบเขตที่สองจะมีการสั่งตัดวงจรด้วยเวลาที่นานกว่าขอบเขตที่ 1 โดยปกติจะปรับตั้งค่าการประวิงเวลาจากขอบเขตที่ 1 อยู่ประมาณ 0.3 วินาทีและเพื่อให้มีการป้องกันที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นจะกำหนดขอบเขตที่ 3 ซึ่งทำงานช้าที่สุดที่ระยะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

150% ของความยาวสายส่งที่อยู่ถัดไป (สายส่ง 2-3) ระยะเวลาในการป้องกันของขอบเขตที่ 3 จะปรับตั้งที่ค่าประมาณ 1 วินาทีโดยรูปที่ 5.6 แสดงขอบเขตการป้องกันของรีเลย์แบบระยะทางด้วย R-X Diagram

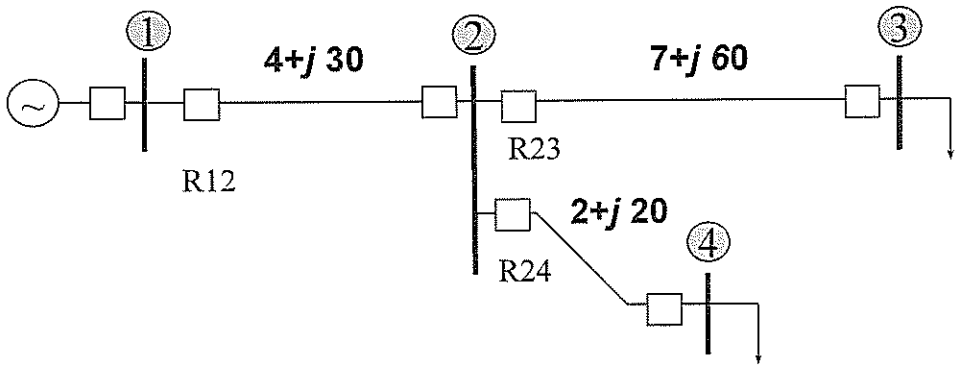


รูปที่ 5.5 ขอบเขตการป้องกันของรีเลย์แบบระยะทาง



รูปที่ 5.6 ขอบเขตการป้องกันของรีเลย์แบบระยะทางแสดงด้วย R-X Diagram

ตัวอย่างที่ 5.3 พิจารณาระบบในรูปที่ 5.7 โดยสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูป ถ้าติดตั้งรีเลย์แบบระยะทางที่บัส 1 (R12)โดยใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 2000/5 A และหม้อแปลงแรงดันอัตราส่วน 20000/110 V และถ้าต้องการปรับตั้งรีเลย์แบบระยะทางที่บัส 1 (R12) ให้ป้องกันสายส่ง 1-2 และทำหน้าที่ป้องกันสำรองสำหรับสายส่ง 2-3 และสายส่ง 2-4



รูปที่ 5.7 ระบบในตัวอย่างที่ 5.2

วิธีทำ

คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิ

$$Z_{s12} = Z_{p12}\frac{n_i}{n_v} = (4+j30)\left(\frac{1000/5}{20000/110}\right) = 4.4+j33 \quad \text{Ohm}$$

$$Z_{s22} = Z_{p23}\frac{n_i}{n_v} = (7+j60)\left(\frac{1000/5}{20000/110}\right) = 7.7+j66 \quad \text{Ohm}$$

$$Z_{s24} = Z_{p24}\frac{n_i}{n_v} = (2+j20)\left(\frac{1000/5}{20000/110}\right) = 2.2+j22 \quad \text{Ohm}$$

ปรับตั้งระยะป้องกันขอบเขตที่ 1 ที่ 85% ของสายส่ง 1-2 คือ

$$Z_{r1} = 0.85(4.4+j33) = 3.74+j28.05$$
$$|Z_{r1}| = 28.298 \quad \text{Ohm}$$

ปรับตั้งระยะป้องกันขอบเขตที่ 2 ที่ 120% ของสายส่ง 1-2 คือ

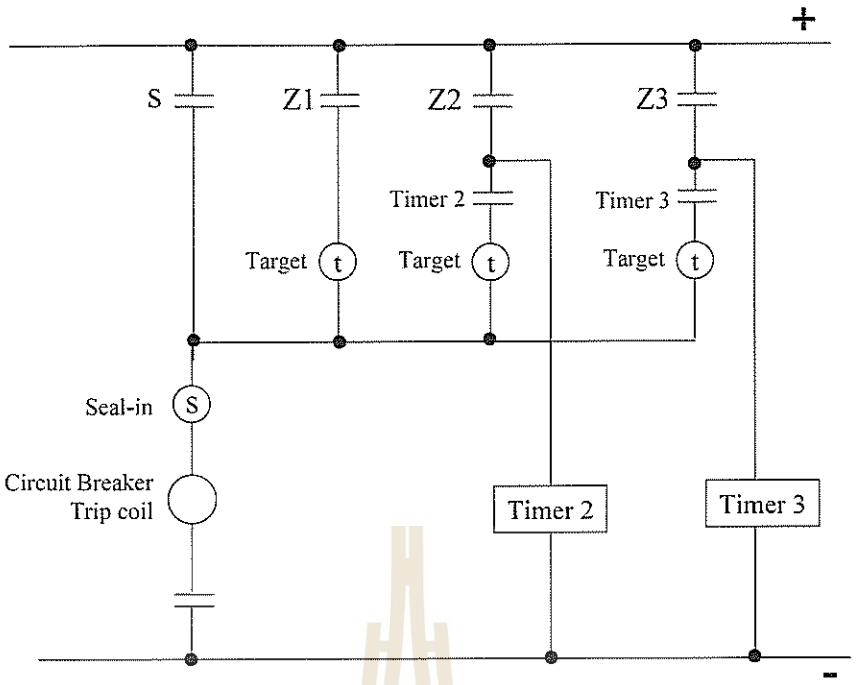
$$Z_{r2} = 1.2(4.4+j33) = 5.28+j39.6$$
$$|Z_{r2}| = 39.950 \quad \text{Ohm}$$

สายส่ง 2-3 มีระยะที่ไกลกว่า 2-4 ดังนั้นเพื่อให้รีเลย์มีการป้องกันที่ครอบคลุมจึง ปรับตั้งระยะป้องกันขอบเขตที่ 3 ที่ 150% ของสายส่ง 2-3 คือ

$$Z_{r3} = (4.4+j33)+1.5(7.7+j66) = 12.1+j132$$
$$|Z_{r3}| = 132.553 \quad \text{Ohm}$$

โดยระยะเวลาที่หน่วงสำหรับขอบเขตที่ 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.3 และ 1 วินาที ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.8 วงจรควบคุมของรีเลย์แบบระยะทาง

ในกรณีที่สายส่ง 2-4 มีระยะที่สั้นมากและทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยกว่าในตัวอย่างที่ 5.2 มาก การปรับตั้งขอบเขตที่ 2 ของรีเลย์ R12 อาจจะเกินระยะของสายส่ง 2-4 ออกไป ในกรณีนี้อาจต้องลดระยะของขอบเขตที่ 2 ของรีเลย์ R12 ลง หรือหากไม่สามารถทำได้ขอบเขตที่ 2 ของรีเลย์ R12 อาจต้องยกเว้นและมีเพียงขอบเขตที่ 3 ที่เป็นการป้องกันสำรองสำหรับรีเลย์ R23 และ R24

รูปที่ 5.8 แสดงวงจรควบคุมของรีเลย์แบบระยะทางอันประกอบด้วยขอบเขตการป้องกันทั้ง 3 โดยในการป้องกันขอบเขตที่ 1 จะเป็นการสั่งตัดวงจรทันที ส่วนในการป้องกันขอบเขตที่ 2 และ 3 จะมีการประวิงเวลา

การปรับตั้งรีเลย์แบบระยะทางนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของการลัดวงจร เนื่องจากจะใช้การวัดค่าแรงดันและกระแสในส่วนขององค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก (Positive sequence) เพื่อหาองประกอบสมมาตรของอิมพีแดนซ์ลำดับบวกระหว่างจุดที่รีเลย์วัดกับจุดที่เกิดการลัดวงจรดังจะแสดงต่อไป ในส่วนของส่วนประกอบสมมาตร (Symetrical Component) ในระบบไฟฟ้ากำลังได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

5.3.1 กรณีการลัดวงจรระหว่างเฟส (L-L)

พิจารณาการลัดวงจรระหว่างเฟส B กับเฟส C ที่จุด F ของระบบสายส่งแบบ 3 เฟส ซึ่งสามารถแทนด้วยองค์ประกอบสมมาตร โดยเป็นโครงข่ายลำดับบวก (Positive sequence network) และลำดับลบ (Negative sequence network) ต่อขนานกันอยู่ดังรูปที่ 5.9

พิจารณาค่าแรงดันที่จุด F

$$V_{1f} = V_{2f} = V_1 - Z_{1f} I_1 = V_2 - Z_{1f} I_2 \qquad (5.6)$$

จัดรูปได้เป็น $$\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} = Z_{1f} \quad (5.7)$$

โดย $$V_A = V_0 + V_1 + V_2 \quad (5.8)$$

$$V_B = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \quad (5.9)$$

$$V_C = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \quad (5.10)$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2 \quad (5.11)$$

$$I_B = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \quad (5.12)$$

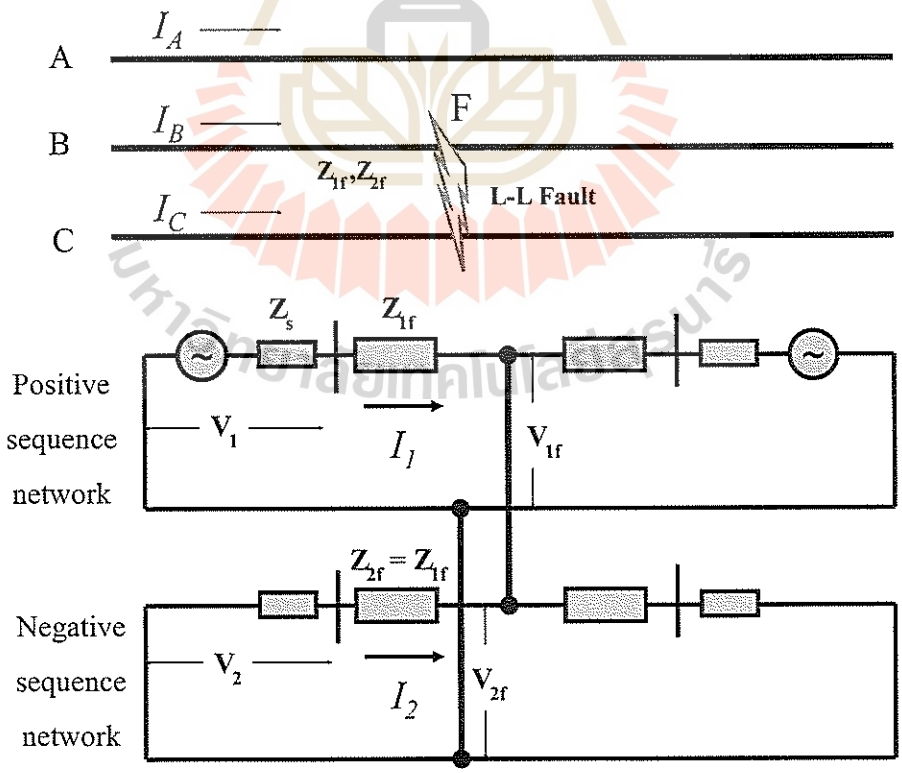
และ $$I_C = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \quad (5.13)$$

ดังนั้นจะได้ว่า $$V_B - V_C = (a^2 - a)(V_1 - V_2) \quad (5.14)$$

และ $$I_B - I_C = (a^2 - a)(I_1 - I_2) \quad (5.15)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{V_B - V_C}{I_B - I_C} = \frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} = Z_{1F} \quad (5.16)$$

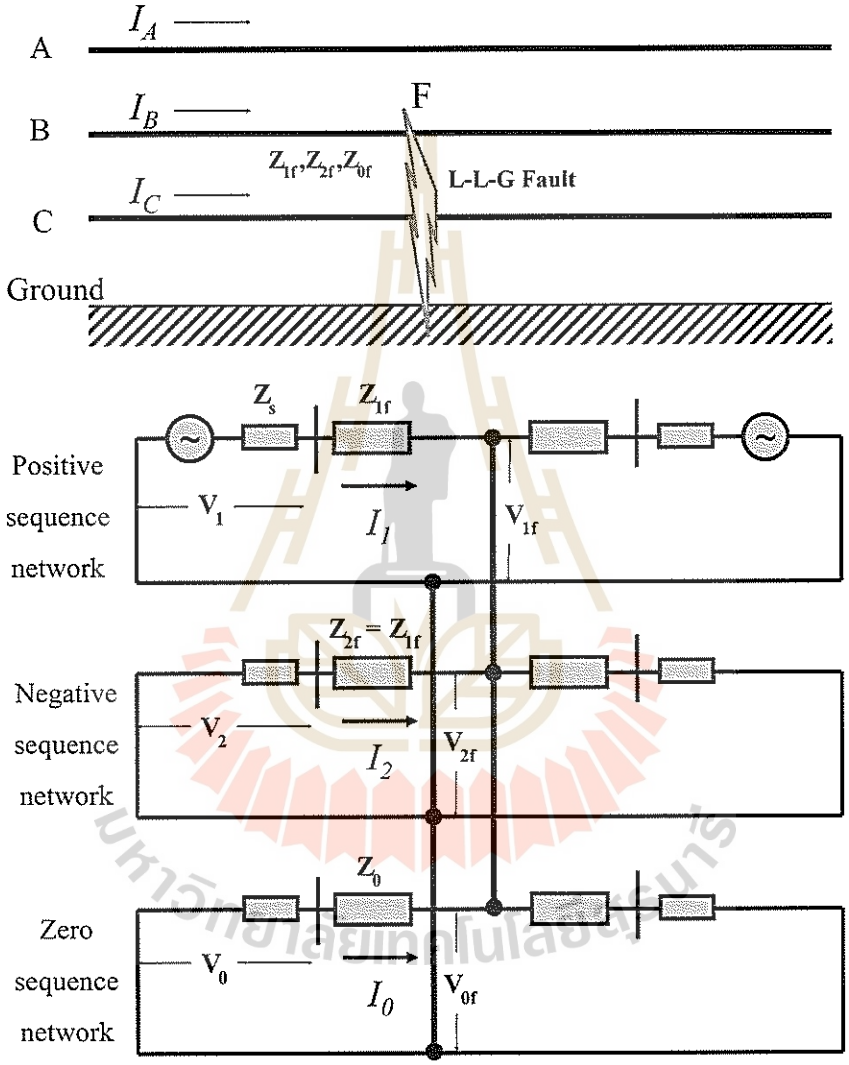


รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลที่แสดงด้วยองค์ประกอบสมมาตรของการลัดวงจรระหว่างเฟส

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสเมื่อใช้แรงดันสายระหว่างเฟสที่เกิดการลัดวงจรกับผลต่างของกระแสในสองเฟสนั้น จะสามารถวัดอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (Positive Sequence Impedance) ได้

5.3.2 กรณีการลัดวงจรสองเฟสลงดิน (L-L-G)

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสและลงดิน จะสามารถเขียนแสดงด้วยองค์ประกอบสมมาตรที่มีการต่อขนานกันของโครงข่ายลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ ได้ดังรูปที่ 5.10 ซึ่งจะสามารถใช้การวิเคราะห์ในทำนองเดียวกับในกรณีการลัดวงจรระหว่างเฟสที่ได้กล่าวถึงไปแล้ว



รูปที่ 5.10 วงจรสมมูลที่แสดงด้วยองค์ประกอบสมมาตรของการลัดวงจรระหว่างเฟสและลงดิน

5.3.3 กรณีการลัดวงจร 3 เฟส (3 phase fault)

ในกรณีการลัดวงจรแบบ 3 เฟสจะมีเพียงโครงข่ายลำดับบวกต่อลัดวงจรดังแสดงรูปที่ 5.11 และจากแผนผังลำดับจะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V_1 = Z_{1f} I_1 \qquad (5.16)$$

และ $V_2 = V_0 = 0\,,\; I_2 = I_0 = 0$ (5.17)

ดังนั้น $V_1 = V_a = Z_{1f} I_1 = Z_{1F} I_a$ (5.18)

และ $V_A = V_0 + V_1 + V_2 = V_1$ (5.19)

$V_B = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 = a^2 V_1$ (5.20)

$V_C = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 = a V_1$ (5.21)

$I_A = I_0 + I_1 + I_2 = I_1$ (5.22)

$I_B = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = a^2 I_1$ (5.23)

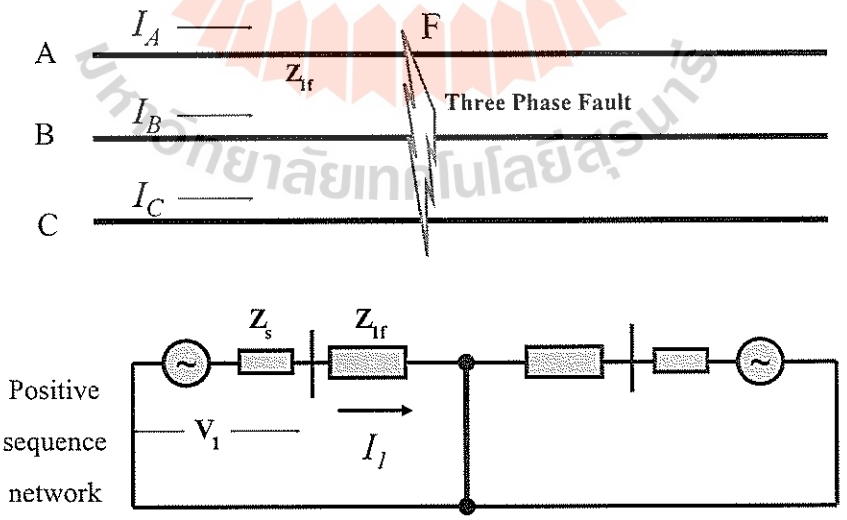
$I_C = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = a I_1$ (5.24)

ดังนั้นจะได้ว่า $V_B - V_C = (a^2 - a)V_1$ (5.25)

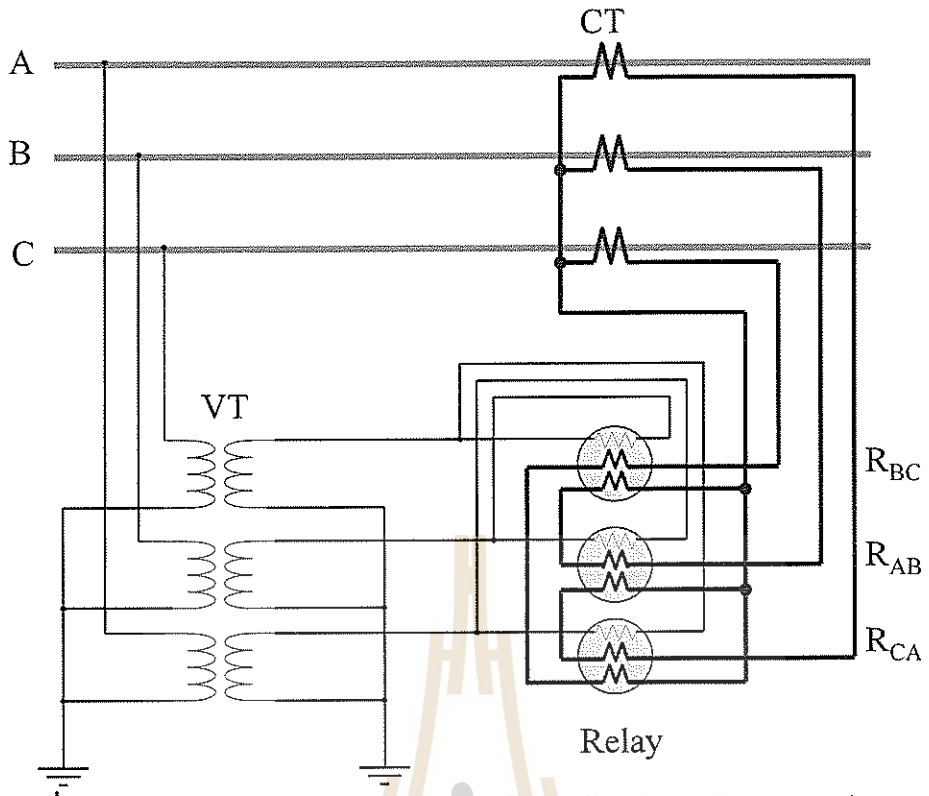
และ $I_B - I_C = (a^2 - a)I_1$ (5.26)

ดังนั้น $\dfrac{V_B - V_C}{I_B - I_C} = \dfrac{(a^2 - a)V_1}{(a^2 - a)I_1} = \dfrac{V_1}{I_1} = Z_{1F}$ (5.27)

จะเห็นว่าในกรณีของการลัดวงจรระหว่างเฟส และสองเฟสลงดิน และลัดวงจรแบบสามเฟสจะสามารถใช้ผลต่างของแรงดันและผลต่างของกระแสในการหาค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของการลัดวงจรได้ รูปที่ 5.12 แสดงการต่อวงจรในการป้องกันการลัดวงจรระหว่างเฟส



รูปที่ 5.11 วงจรสมมูลที่แสดงด้วยองค์ประกอบสมมาตรของการลัดวงจร 3 เฟส



รูปที่ 5.12 การต่อวงจรป้องกันแบบระยะทางในการป้องกันการลัดวงจรระหว่างเฟส

5.3.4 กรณีการลัดวงจรลงดิน (SLG)

วงจรสมมูลเมื่อเกิด Single Line to Ground Fault สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 จากรูปวงจรสมมูล จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน และกระแสดังนี้

$$V_{1F} = V_1 - Z_{1F} I_1 \qquad (5.27)$$

$$V_{2F} = V_2 - Z_{1F} I_2 \qquad (5.28)$$

$$V_{0F} = V_0 - Z_{0F} I_0 \qquad (5.29)$$

แรงดันที่เฟส A จะมีค่าเป็นศูนย์ (0) และสามารถเขียนได้ในรูปองค์ประกอบสมมาตรได้เป็น

$$\begin{aligned} V_{AF} &= V_{0F} + V_{1F} + V_{2F} \\ &= (V_0 + V_1 + V_2) - Z_{1F}(I_1 + I_2) - Z_{0F} I_0 \\ &= V_A - Z_{1F} I_A - (Z_{0F} - Z_{1F}) I_0 \\ &= 0 \end{aligned} \qquad (5.30)$$

ดังนั้นจะได้ว่า $V_A = Z_{1F}\left(I_A + \frac{Z_{0F} - Z_{1F}}{Z_{1F}} I_0\right)$ (5.30)

จากนั้นนิยาม $V_A = Z_{1F} I'_A$

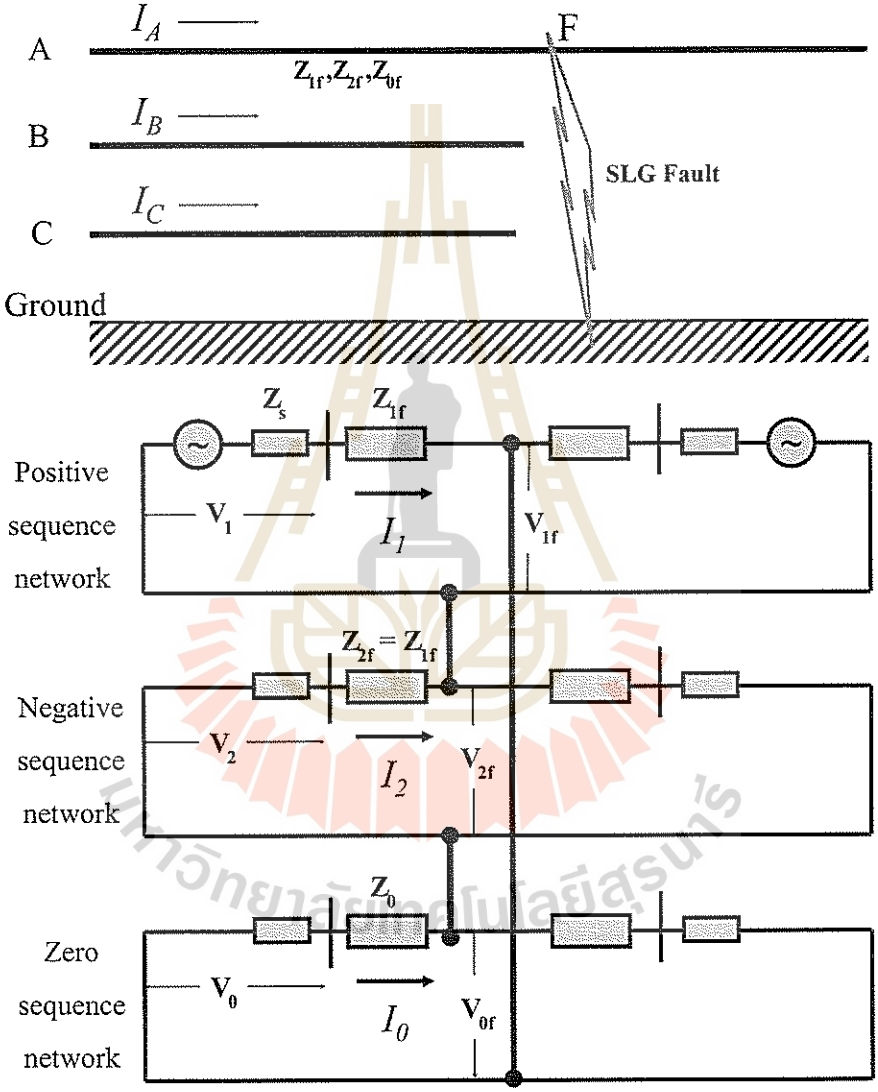
จะได้ $I'_A = I_A + \left(\frac{Z_{0F} - Z_{1F}}{Z_{1F}}\right) I_0 = I_A + \left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}\right) I_0$ (5.31)

เนื่องจาก $I_A = I_0 + I_1 + I_2$ โดย $I_0=I_1=I_2$ (5.32)

$$I_A = 3I_0 \quad (5.33)$$

จะได้ $I'_A = I_A + \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}\right) I_A$ (5.34)

$$I'_A = I_A\left(1 + \frac{m}{3}\right) \quad (5.35)$$

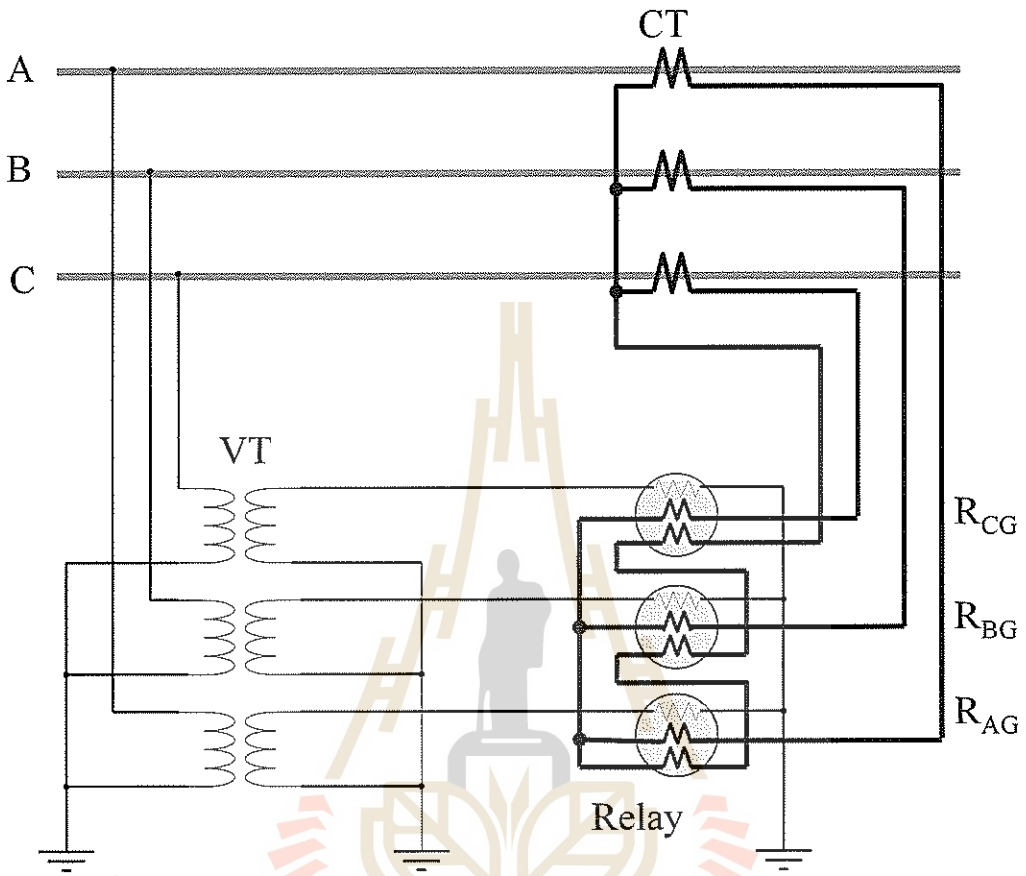


รูปที่ 5.13 วงจรสมมูลที่แสดงด้วยองค์ประกอบสมมาตรของการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน

เมื่อ Z_0 และ Z_1 เป็นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์และลำดับบวกของสายส่งตามลำดับ และ m คือตัวประกอบการชดเชย (Compensation Factor) ซึ่งเป็นตัวชดเชยผลของกระแสในเฟสที่ไม่เกิดการลัดวงจร โดยปกติ m จะมีค่าประมาณ 1.5-2.5 โดยในทางปฏิบัติค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมคือ 2.0 ซึ่งจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์มีค่าเป็น 3 เท่าของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก และจะได้ว่า

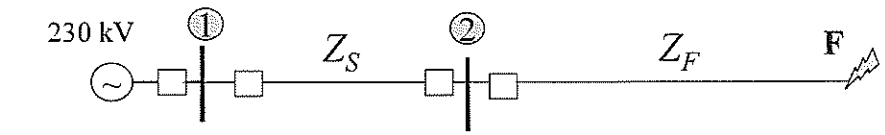
$$\frac{V_A}{I'_A} = Z_{1F} \qquad (5.36)$$

จะเห็นว่ากรณีการลัดวงจรแบบเฟสลงดินจะสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ได้โดยการใช้ตัวประกอบการชดเชย (m)



รูปที่ 5.14 การต่อวงจรป้องกันแบบระยะทางในการป้องกันการลัดวงจรเฟสลงดิน

ตัวอย่างที่ 5.3 การคำนวณอิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่รีเลย์มองเห็นในกรณีที่เกิดลัดวงจรแบบสามเฟส ลัดวงจรระหว่างเฟสและการลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน ของระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 5.15 ระบบตัวอย่างทำงานที่ระดับแรงดัน 230 kV โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งดังแสดงในรูป



Positive and negative sequence impedance	**0+*j* 4**	**2+*j* 30**
Zero sequence impedance	**0+*j* 6**	**5+*j* 50**

รูปที่ 5.15 ระบบไฟฟ้ากำลังในตัวอย่างที่ 5.3

วิธีทำ

แรงดันระหว่างสาย $V_{LL} = 230$ kV

ดังนั้นแรงดันเฟส $V_{ph} = \frac{230000}{\sqrt{3}} = 132790.56$ V

กรณีการลัดวงจร 3 เฟส จะสามารถแสดงได้เป็นวงจรของโครงข่ายลำดับบวกที่ต่อลัดวงจร ดังนั้น

$$I_A = I_1 = \frac{230000}{\sqrt{3}(0 + j4 + 2 + j30)} = 3898.87\angle -86.63^\circ \text{ A}$$

แรงดันเฟสที่ตำแหน่งรีเลย์เท่ากับ

$$V_A = V_1 = 132790.56 - j(4)(3898.87\angle -86.63^\circ) = 117225.59\angle -0.448^\circ \text{ V}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์จะตรวจจับได้จะมีค่าเป็น

$$Z_f = \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} = \frac{V_A}{I_A} = \frac{117225.59\angle -0.448^\circ}{3898.87\angle -86.63^\circ} = 2 + j30 \text{ Ohm}$$

กรณีการลัดวงจรระหว่างเฟส จะสามารถแสดงได้เป็นวงจรของโครงข่ายลำดับบวกและลบต่อขนานกัน ดังนั้น

$$I_1 = -I_2 = \frac{132790.56}{2(0 + j4 + 2 + j30)} = 1949.43\angle -86.63^\circ \text{ A}$$

และจะได้ว่า

$$I_B = -I_C = I_1(a^2 - a) = -j\sqrt{3}I_1 = 3376.51\angle -1.77^\circ \text{ A}$$

และ $I_B - I_C = 6753.02\angle -1.77^\circ$ A

ส่วนแรงดันลำดับบวกและแรงดันลำดับลบที่รีเลย์หาได้ดังนี้

$$V_1 = V_{ph} - Z_{s1}I_1 = 132790.56 - (j4)(1949.43\angle -86.63^\circ) = 125007.13\angle -0.21^\circ \text{V}$$

$$V_2 = -Z_{s2}I_2 = -(j4)(1949.43\angle -86.63^\circ) = 7797.73\angle 3.37^\circ \text{ V}$$

และแรงดันเฟส B และ C ที่ตำแหน่งของรีเลย์จะเป็น

$$V_B = a^2V_1 + aV_2 = -67188.38 - j101517.24 \text{ V}$$

$$V_C = aV_1 + a^2V_2 = -65602.18 - j101517.24 \text{ V}$$

ดังนั้น $V_B - V_C = 203040.68\angle -90.44^\circ$ และ

$$\frac{V_B - V_C}{I_B - I_C} = \frac{203040.68\angle -90.44^\circ}{6753.02\angle -1.77^\circ} = 2 + j30 \text{ Ohm}$$

กรณีการลัดวงจรลงดิน จะแสดงเป็นโครงข่ายลำดับบวก ลำดับลบและลำดับศูนย์ต่ออนุกรมกันทั้งหมด และจะได้ว่า

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{132790.56}{j4+2+j30+j4+2+j30+j6+5+j50} = 1068.08\angle -85.85^\circ \text{ A}$$

ค่าแรงดันขององค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์จะเป็น

$$V_1 = V_{ph} - Z_s I_1 = 132790.56 - (j5)(1068.08\angle -85.85^\circ) = 128529.44 - j309.27 \text{ V}$$

$$V_2 = -Z_{s2} I_2 = -(j5)(1068.08\angle -85.85^\circ) = -4261.12 j309.27 \quad \text{V}$$

$$V_0 = -Z_{s0} I_0 = -(j10)(1068.08\angle -85.85^\circ) = -6391.68 - j463.91 \quad \text{V}$$

แรงดันและกระแสของเฟส A จะหาได้จาก

$$V_A = V_1 + V_2 + V_0 = 117881.61\angle -0.53^\circ \quad \text{V}$$

$$I_A = I_1 + I_2 + I_0 = 3204.25\angle -85.85^\circ \quad \text{A}$$

ค่าตัวประกอบการชดเชย m จะหาได้จาก

$$m = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} = \frac{5+j50-2-j30}{2+j30} = 0.673\angle -4.72^\circ$$

กระแสที่ชดเชยแล้วจะมีค่าเป็น

$$I_A' = I_A + mI_0 = 3204.25\angle -85.85^\circ + (0.673\angle -4.72^\circ)(1068.08\angle -85.85^\circ)$$
$$= 3920.68\angle -86.72^\circ \quad \text{A}$$
$$\frac{V_A}{I_A'} = \frac{117881.61\angle -0.53^\circ}{3920.68\angle -86.72^\circ} = 2 + j30 \text{ Ohm}$$

จากตัวอย่างจะเห็นว่ารีเลย์แบบระยะทางจะสามารถปรับตั้งให้ตรวจสอบค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรขององค์ประกอบลำดับบวกได้ ไม่ค่าจะเป็นการลัดวงจรประเภทใดก็ตาม จากตัวอย่างเป็นการแสดงการคำนวณที่ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ซึ่งจะต่างจากค่าที่คำนวณจริงเล็กน้อย

5.4 ประเภทของรีเลย์ป้องกันแบบระยะทาง

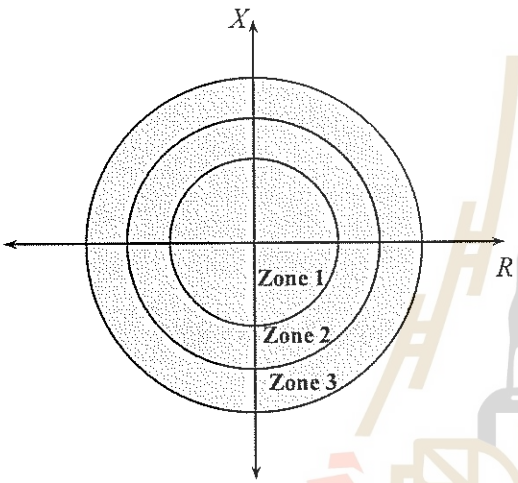
รีเลย์แบบระยะทางสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของขอบเขตในการป้องกัน โดยพื้นฐานแล้วรูปร่างของขอบเขตบน R-X Diagram จะเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด อย่างไรก็ตามรีเลย์แบบระยะทางจะสามารถทำการออกแบบให้มีรูปร่างที่แตกต่างออกไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานได้โดยการชดเชยที่เหมาะสมและใช้รีเลย์หลายตัวทำงานร่วมกัน นอกจากนี้ในปัจจุบันรีเลย์ระยะทางแบบอิเล็กทรอนิกส์หรือแบบไมโครโปรเซสเซอร์จะสามารถออกแบบให้มีรูปร่างของขอบเขตการป้องกันที่ซับซ้อนได้มากขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

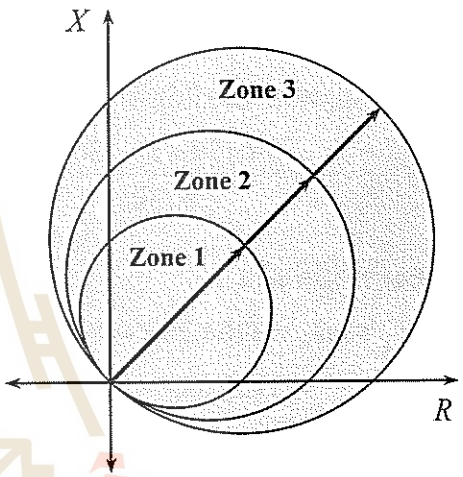
รีเลย์แบบระยะทางที่สำคัญมีอยู่ 4 ประเภทคือ

1. รีเลย์อิมพีแดนซ์ (Impedance relay)
2. รีเลย์แอดมิแตนซ์ (Admittance relay หรือ mho relay)
3. รีเลย์รีแอคแตนซ์ (Reactance relay)
4. รีเลย์ควอดรีลาเทอรอล หรือรีเลย์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Qruadrilateral relay)
5. รีเลย์รูปเลนส์ (Lenticular relay)

รีเลย์อิมพีแดนซ์ (Impedance relay) เป็นรีเลย์ระยะทางที่มีขอบเขตการป้องกันแบบพื้นฐานคือมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิดดังแสดงดังรูปที่ 5.16



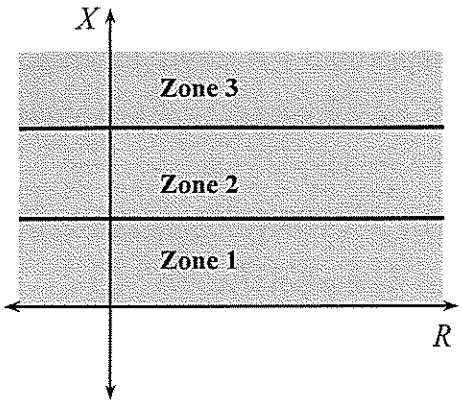
รูปที่ 5.16 รีเลย์อิมพีแดนซ์ (Impedance relay)



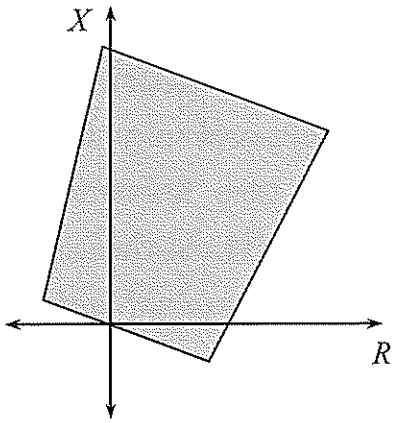
รูปที่ 5.17 รีเลย์แอดมิแตนซ์ (Admittance relay)

รีเลย์แอดมิแตนซ์ (Admittance relay หรือ mho relay) จะวัดค่าแอดมิแตนซ์ระหว่างจุดที่รีเลย์ตรวจวัดกับจุดที่เกิดการลัดวงจรคล้ายกับรีเลย์แบบอิมพีแดนซ์ แต่จะมีลักษณะของวงกลมขอบเขตการป้องกันเมื่อเขียนบน R-X Diagram แล้วเส้นรอบวงผ่านจุดกำเนิด ดังแสดงในรูปที่ 5.17 จากลักษณะดังกล่าวรีเลย์จะสั่งตัดวงจรเฉพาะเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรในทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ทำให้มีการทำงานในลักษณะของรีเลย์แบบทิศทาง

รีเลย์รีแอคแตนซ์ (Reactance relay) จะพิจารณาเฉพาะค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างรีเลย์กับจุดที่เกิดการลัดวงจร ดังแสดงดังรูปที่ 5.18 และจากคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้ไม่มีผลของความต้านทานเมื่อเกิดการลัดวงจร (arc resistance) ขอบเขตของรีเลย์รีแอคแตนซ์จะมีลัษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนของความต้านทาน



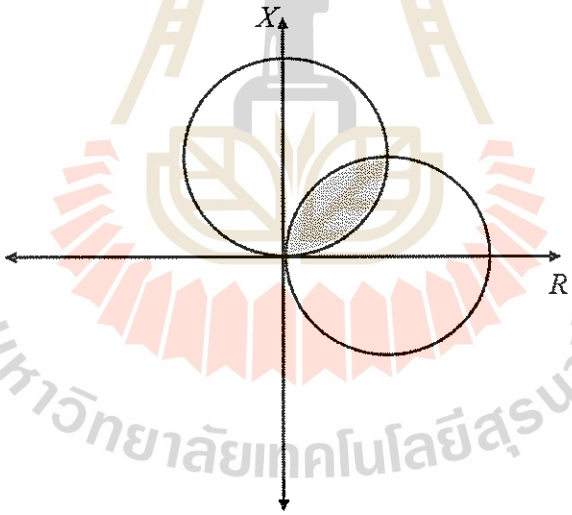
รูปที่ 5.18 รีเลย์รีแอคแตนซ์ (Reactance relay)



รูปที่ 5.19 รีเลย์ควอดรีลาเทอรอล (Qruadrilateral relay)

รีเลย์ควอดรีลาเทอรอล หรือรีเลย์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Qruadrilateral relay) มีขอบเขตการป้องกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าดังแสดงดังรูปที่ 5.19 รีเลย์ชนิดนี้จะสามารถกำหนดขอบเขตได้แม่นยำและลดผลกระทบจากกำลังงานกระชาก (power surge) ในระบบได้ดี

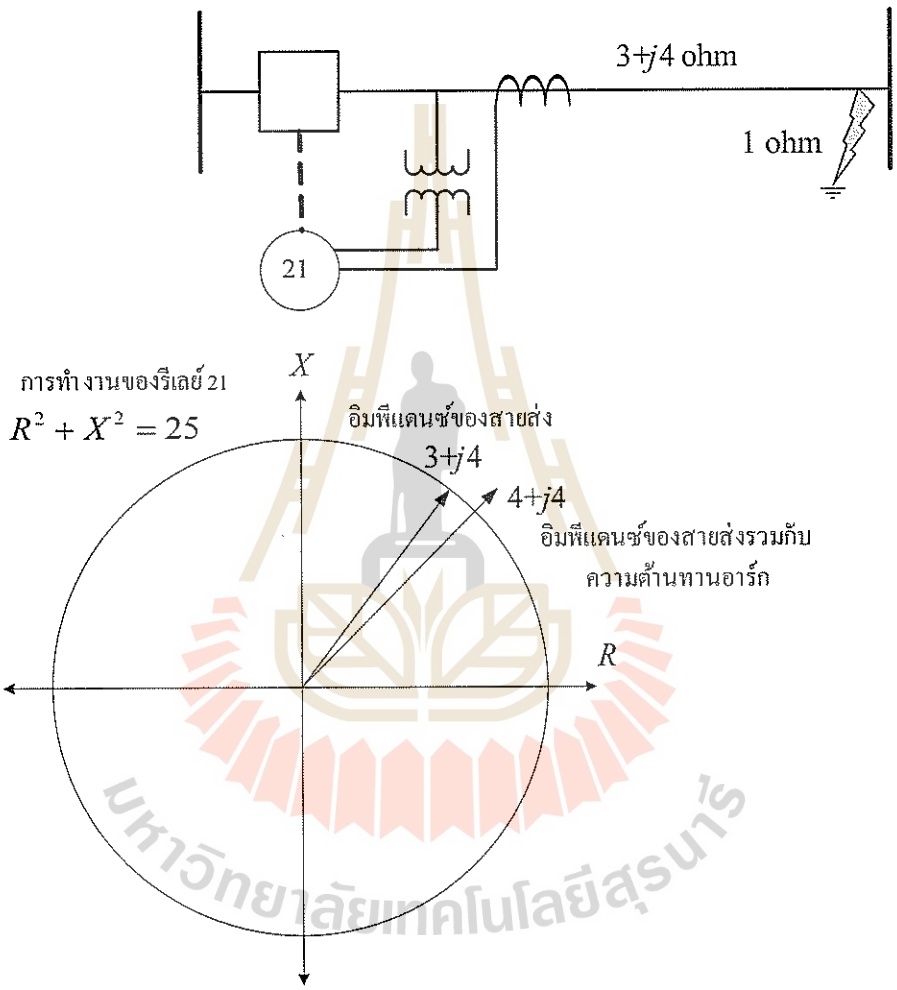
รีเลย์รูปเลนส์ (Lenticular relay) เป็นรีเลย์ระยะทางที่มีขอบเขตการป้องกันที่เกิดจากการซ้อนกันของรีเลย์แอดมิแตนซ์ 2 ตัวในลักษณะตรรกะแบบ “และ” (AND) ทำให้มีพื้นที่ทำงานที่เรียวยาวเหมาะสำหรับป้องกันสายส่งที่มีระยะทางไกล ดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 รีเลย์รูปเลนส์ (Lenticular relay)

ตัวอย่างที่ 5.4 สายส่งเส้นหนึ่งมีอิมพีแดนซ์รวมของสายส่งทั้งเส้นมีค่าเป็น $3 + j4$ Ohm ปรับตั้งรีเลย์ให้มีลักษณะการทำงานมองเห็นค่าอิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิตามสมการ $R^2 + X^2 = 25$ เมื่อเกิดลัดวงจรที่ปลายสายส่งโดยมีค่าความต้านทานอาร์กเท่ากับ 1.0 Ohm รีเลย์จะทำงานหรือไม่

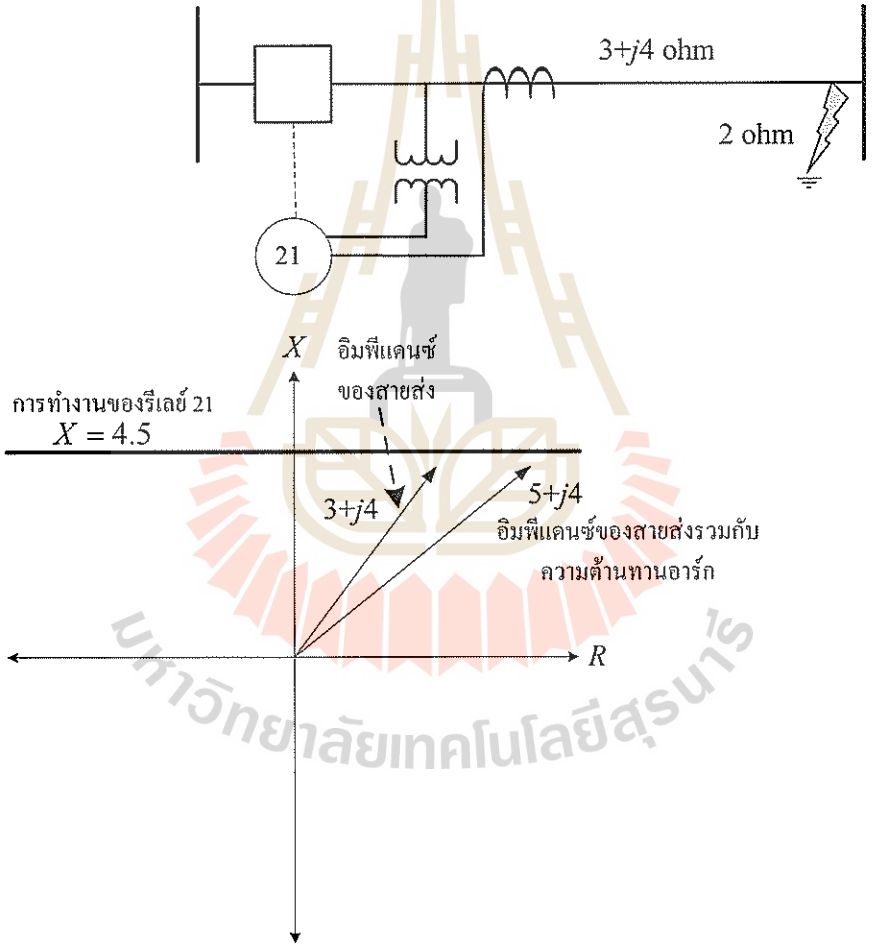
วิธีทำ จากการปรับตั้งการทำงานของรีเลย์จะสามารถแสดงแผนผัง R-X ได้ดังรูปที่ 5.21 และจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดลัดวงจรปลายสายส่งโดยมีค่าความต้านทานอาร์กเท่ากับ 1.0 Ohm รีเลย์จะไม่ทำงาน



รูปที่ 5.21 การปรับตั้งรีเลย์และการเกิดลัดวงจรในตัวอย่างที่ 5.4

ตัวอย่างที่ 5.5 รีแอกแตนซ์รีเลย์มีลักษณะการทำงานบนแผนผัง R-X ตามสมการ $X = 4.5$ ถ้าสายส่งเส้นหนึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์รวมเป็น $3+j4$ Ohm เมื่อเกิดลัดวงจรที่ปลายสายส่งโดยมีค่าความต้านทานอาร์กเท่ากับ 2.0 Ohm รีเลย์จะทำงานหรือไม่

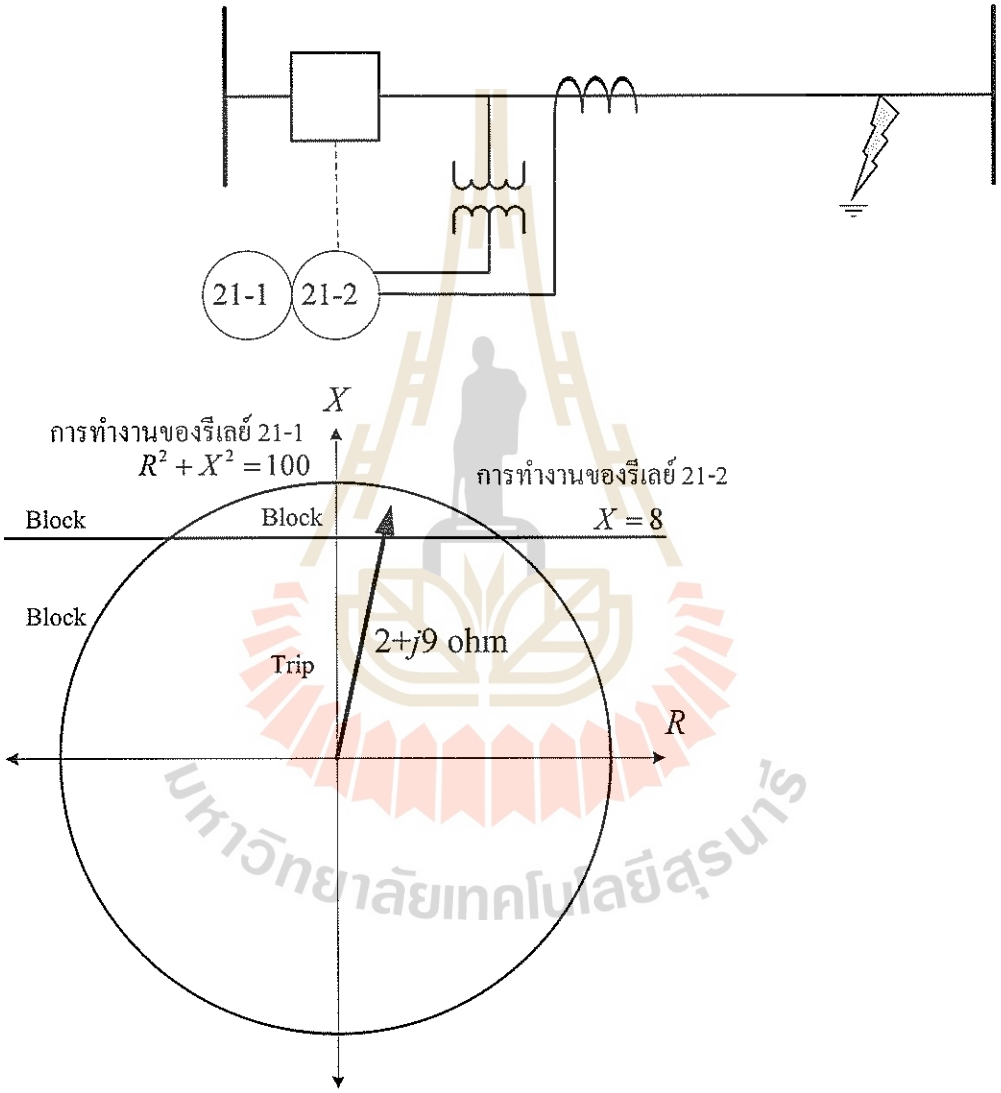
วิธีทำ จากการปรับตั้งการทำงานของรีเลย์จะสามารถแสดงแผนผัง R-X ได้ดังรูปที่ 5.22 และจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดลัดวงจรปลายสายส่งโดยมีค่าความต้านทานอาร์กเท่ากับ 2.0 Ohm รีเลย์จะทำงานสั่งตัดวงจร



รูปที่ 5.22 การปรับตั้งรีเลย์และการเกิดลัดวงจรในตัวอย่างที่ 5.5

ตัวอย่างที่ 5.6 อิมพีแดนซ์รีเลย์ 21-1 มีลักษณะการทำงานบนแผนผัง R-X ตามสมการ $R^2 + X^2 = 100$ ทำงานร่วมกับรีแอกแตนซ์รีเลย์ 21-2 มีลักษณะการทำงานบนแผนผัง R-X ตามสมการ $X = 8$ ถ้าเกิดการลัดวงจรบนสายส่งที่ทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์มองเห็นเป็น $2+j9$ Ohm จะมีการสั่งตัดวงจรหรือไม่

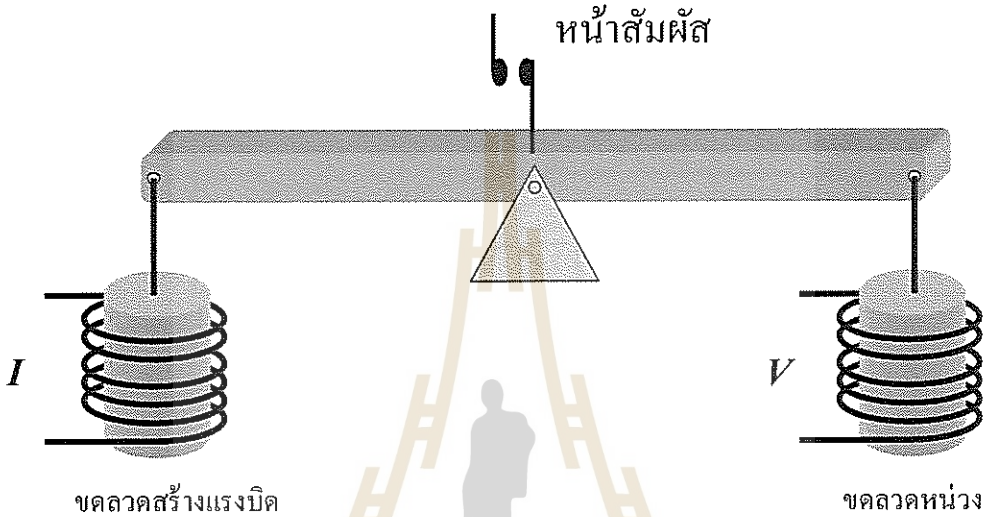
วิธีทำ จากการปรับตั้งการทำงานของรีเลย์จะสามารถแสดงแผนผัง R-X ได้ดังรูปที่ 5.23 และจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดลัดวงจรดังกล่าวจะมีเพียงรีเลย์ 21-1 ที่เห็นการลัดวงจรจึงไม่มีการสั่งตัดวงจร



รูปที่ 5.23 การปรับตั้งรีเลย์และการเกิดลัดวงจรในตัวอย่างที่ 5.6

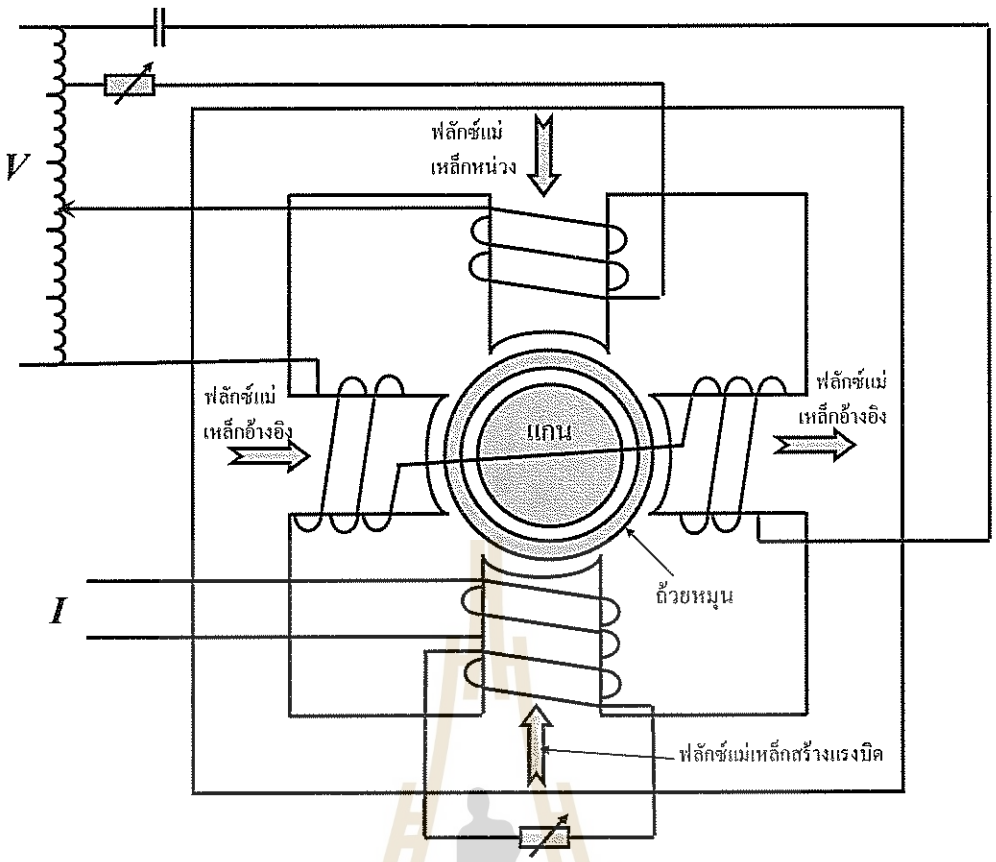
5.5 หลักการทำงานของรีเลย์ระยะทาง

หลักการทำงานของรีเลย์ระยะทางจะใช้การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันและกระแสของสายส่งที่ป้องกัน รีเลย์แบบระยะทางที่มีโครงสร้างแบบพื้นฐานที่สุดคือรีเลย์ระยะทางแบบคานกระดก (Balance Beam Type Impedance Relay) ดังแสดงในรูปที่ 5.24 โดยเป็นการทำงานของรีเลย์ที่เปรียบเทียบเฉพาะขนาดของแรงดันและกระแสเพียงอย่างเดียวไม่รวมผลของความต่างเฟสในการทำงาน โดยถ้ากระแสเพิ่มขึ้นและแรงดันลดลงก็จะทำให้เกิดแรงบิดให้หน้าสัมผัสแตะกันส่งสัญญาณตัดวงจรออกไป การทำให้รีเลย์ทำงานโดยคำนึงถึงผลของความต่างเฟสระหว่างกระแสและแรงดันก็สามารถทำได้โดยใช้โครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น



รูปที่ 5.24 รีเลย์ระยะทางแบบคานกระดก (Balance Beam Type Impedance Relay)

ในกรณีที่ต้องการให้รีเลย์ทำงานในลักษณะที่ซับซ้อนขึ้น เช่น ตรวจสอบทิศทางหรือมีการเลื่อนบริเวณการทำงานบนแผนผังความต้านทาน-รีแอคแตนซ์ก็สามารถออกแบบด้วยรีเลย์แบบเหนี่ยวนำได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.25 เป็นรีเลย์ระยะทางแบบถ้วยเหนี่ยวนำ (Induction Cup Impedance Relay) ซึ่งสามารถพิจารณามุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสโดยใช้หลักสนามแม่เหล็ก ค่ามุมเฟสของแรงดันระหว่างเฟสจะใช้เป็นแรงดันอ้างอิงและใช้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากแรงดันระหว่างเฟสในการสร้างสนามแม่เหล็กหน่วง และใช้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเฟสสร้างสนามแม่เหล็กที่ทำมุมให้เกิดแรงบิดกับฟลักซ์แม่เหล็กอ้างอิง การทำงานแบบนี้เป็นการทำงานในลักษณะของรีเลย์รีเลย์แอดมิแตนซ์ (Admittance relay หรือ mho relay) ซึ่งได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 5.4



รูปที่ 5.25 รีเลย์ระยะทางแบบถ้วยเหนี่ยวนำ (Induction Cup Impedance Relay)

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 จากเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์และด้านไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีการพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน จึงได้มีการใช้งานรีเลย์ระยะทางแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Impedance Relay) และรีเลย์ระยะทางแบบไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor-Based Impedance Relay) ซึ่งจะมีการทำงานที่สามารถปรับรูปร่างการทำงานบนแผนผังความต้านทาน-รีแอคแตนซ์ได้หลากหลายและมีการทำงานในรูปแบบที่ซับซ้อนและมีฟังก์ชั่นพิเศษ เช่น การบันทึกข้อมูล การเชื่อมต่อสัญญาณต่าง ๆ เพิ่มขึ้น โดยยังคงมีหลักการคือเป็นการประมวลผลจากสัญญาณของแรงดันและกระแสของสายส่งที่ทำการป้องกัน

5.6 ปัญหาในการใช้งานรีเลย์ระยะทาง

รีเลย์ระยะทางมีความซับซ้อนในการใช้งานหลายอย่าง ซึ่งปัญหาหลายประการได้รับการแก้ไขในรีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์แล้ว อย่างไรก็ตามยังมีรีเลย์รุ่นเก่าติดตั้งอยู่ ปัญหาดังกล่าวได้แก่

ค่าแรงดันต่ำสุดที่ขั้วของรีเลย์

ในการที่จะให้รีเลย์ทำงานได้อย่างแม่นยำจะต้องมีแรงดันที่ส่งให้รีเลย์ไม่ต่ำกว่าค่าตามคุณลักษณะของรีเลย์ ซึ่งจะต้องคำนวนจากข้อมูลต่าง ๆ ของระบบ เป็นต้นว่า ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับ ค่าพิกัดกำลังงานลัดวงจร(Fault MVA) ของ

ระบบ วิธีการต่อลงดิน เพื่อให้ทราบค่าแรงดันต่ำสุดที่รีเลย์จะได้รับในขณะที่เกิดลัดวงจรและพิจารณาว่าเป็นค่าที่เหมาะสมในการทำงานของรีเลย์หรือไม่

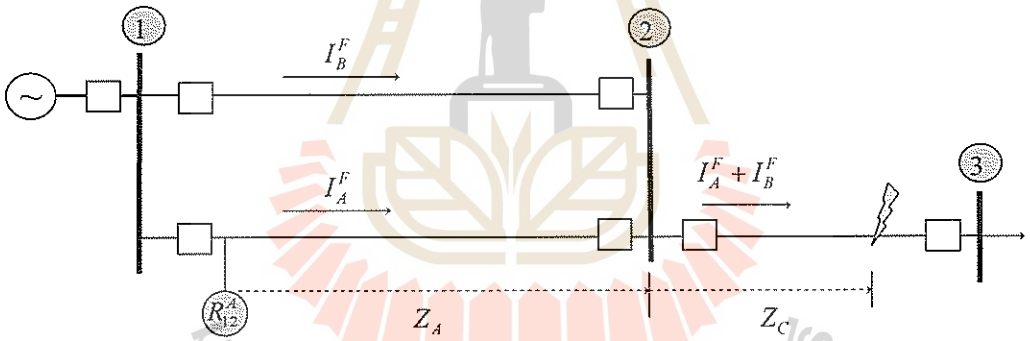
ความยาวต่ำสุดของสายส่ง

ในการระบุความยาวต่ำสุดของสายส่งที่จะป้องกันด้วยรีเลย์ระยะทางจะต้องตรวจสอบก่อนว่ารีเลย์ต้องการแรงดันต่ำสุดเท่าใดในการทำงานเมื่อเกิดลัดวงจรในขอบเขตที่ 1 จากนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งซึ่งเทียบมาเป็นค่าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสและหม้อแปลงแรงดันจะต้องอยู่ภายในขอบเขตที่ 1 ของรีเลย์ ทั้งนี้ในสายส่งที่สั้นมาก ๆ โดยเฉพาะสายเคเบิ้ล อาจพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายมีค่าต่ำกว่าค่าที่ปรับตั้งไว้

ในกรณีดังกล่าวอาจแก้ไขโดยการใช้วิธีการป้องกันแบบผลต่างแทน อย่างไรก็ตามปัญหานี้มักไม่เกิดขึ้นในรีเลย์แบบดิจิทัลรุ่นใหม่ซึ่งสามารถปรับช่วงการทำงานได้กว้างและสามารถทำงานที่แรงดันต่ำได้ดี

การตรวจจับไม่ถึงระยะ (Under-Reach)

การตรวจจับไม่ถึงระยะ (Under-Reach) เป็นการที่รีเลย์ตรวจจับพบค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสูงกว่าความเป็นจริง ทำให้คิดว่าจุดลัดวงจรอยู่ไกลกว่าความเป็นจริง ซึ่งเกิดจากระบบที่มีวงจรจากจุดที่มีต้นทางเดียวกันไปต่อถึงกันที่ปลายทางอีกด้านหนึ่ง หรือเป็นสายส่งคู่ขนาน ดังแสดงในรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 การเกิดสภาวะตรวจจับไม่ถึงระยะ

จากรูปที่ 5.26 กระแสลัดวงจรจะไหลทั้งส่วนของกระแส I_A^F และ I_B^F และไปรวมกันที่สายส่ง 23 ซึ่งรีเลย์จะตรวจพบค่าอิมพีแดนซ์ถึงจุดเกิดลัดวงจร ($Z_A + Z_C$) ได้สูงกว่าความเป็นจริง การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการคำนวนหาสัดส่วนของกระแส I_A^F และ I_B^F และทำการปรับตั้งรีเลย์ให้มีการชดเชยค่าในสภาวะดังกล่าว จากเดิม $Z_A + Z_C$ เป็น $Z_A + k\,Z_C$ โดยจะต้องมีการพิจารณาปรับตั้งอย่างระมัดระวังผลกระทบในกรณีอื่น ๆ ด้วย

การตรวจจับเกินระยะ (Over-Reach)

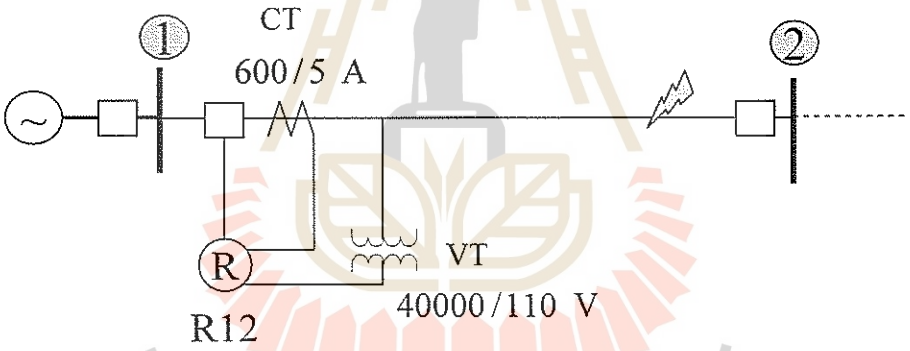
การตรวจจับเกินระยะ (Over-Reach) เป็นการที่รีเลย์ตรวจจับพบค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งต่ำกว่าความเป็นจริง ทำให้คิดว่าจุดลัดวงจรอยู่ใกล้กว่าความเป็นจริง ซึ่งอาจเกิดจากการใช้รีเลย์ระยะทางในสายส่งคู่ขนานในขณะที่มีสายส่งที่เป็นคู่ขนานวงจรหนึ่งปลดออกจากวงจร

กำลังงานแกว่ง (Power Swing)

กำลังงานแกว่งในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุในการไหลของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง การเกิดลัดวงจรและการตัดวงจรของระบบป้องกัน การเกิดกำลังงานแกว่งอาจทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์ตรวจจับได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่พิจารณาว่าเกิดลัดวงจร และรีเลย์จะทำการสั่งตัดวงจรได้ ทั้งที่ความเป็นจริงระบบสามารถกลับสู่สภาวะปกติได้ ดังนั้นในรีเลย์ระยะทางจะต้องมีการป้องกันไม่ให้ตัดวงจรจากกำลังงานแกว่งในระบบซึ่งจะใช้วิธีการต่อวงจรกลับอัตโนมัติ (Autoreclosing) ในการตรวจสอบสภาวะกำลังงานแกว่ง

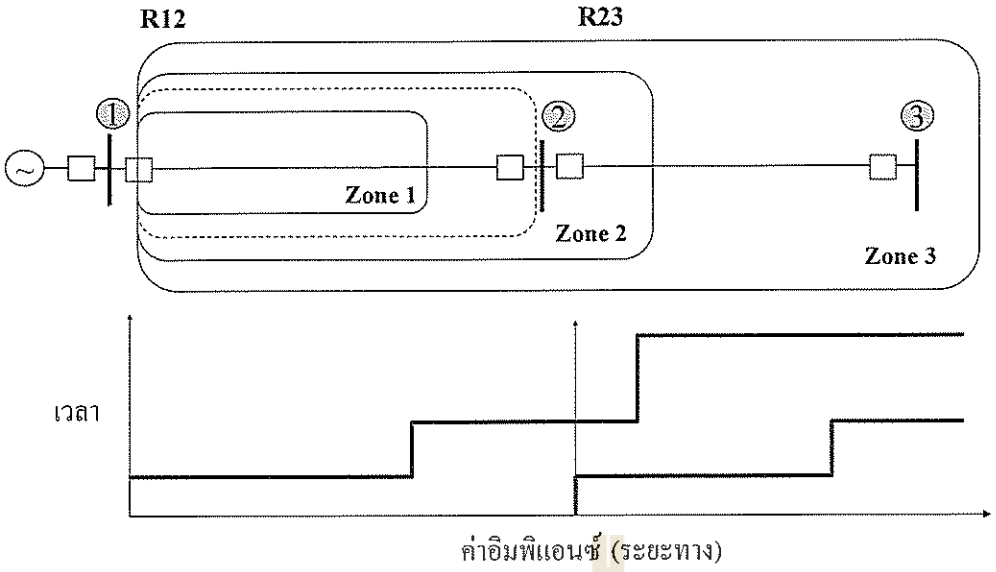
แบบฝึกหัดบทที่ 5

1. จงอธิบายถึงความจำเป็นในการใช้การป้องกันแบบระยะทาง
2. พิจารณารีเลย์แบบระยะทางดังรูปที่ P5.2.1 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ด้านปฐมภูมิมีค่า 5+ *j*15 Ohm จงหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ



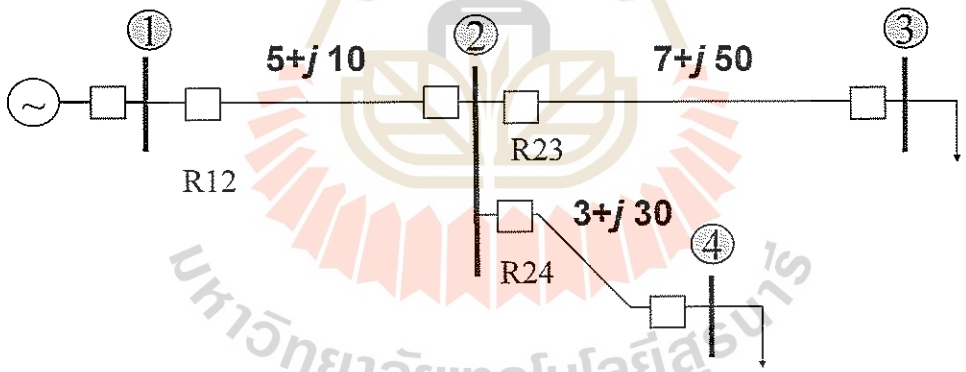
รูปที่ P5.2.1

3. จงอธิบายหลักการในการกำหนดขอบเขตการป้องกัน (Zone of Protection) ของรีเลย์แบบระยะทาง
4. จากรูปที่ P5.4.1 แสดงขอบเขตการป้องกันของรีเลย์แบบระยะทาง จงเขียนแผนผัง R-X ที่แสดงขอบเขตการป้องกันดังกล่าว



รูปที่ P5.4.1

5. พิจารณาระบบในรูปที่ P5.5.1 โดยสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูป ถ้าต้องการปรับตั้งรีเลย์แบบระยะทางที่บัส 1 (R12) ให้ป้องกันสายส่ง 1-2 และทำหน้าที่ป้องกันสำรองสำหรับสายส่ง 2-3 และสายส่ง 2-4 โดยรีเลย์แบบระยะทางที่ใช้ต่อผ่านหม้อแปลงกระแสอัตรส่วน 600/5 A และหม้อแปลงแรงดันอัตราส่วน 115000/110 V



รูปที่ P5.5.1

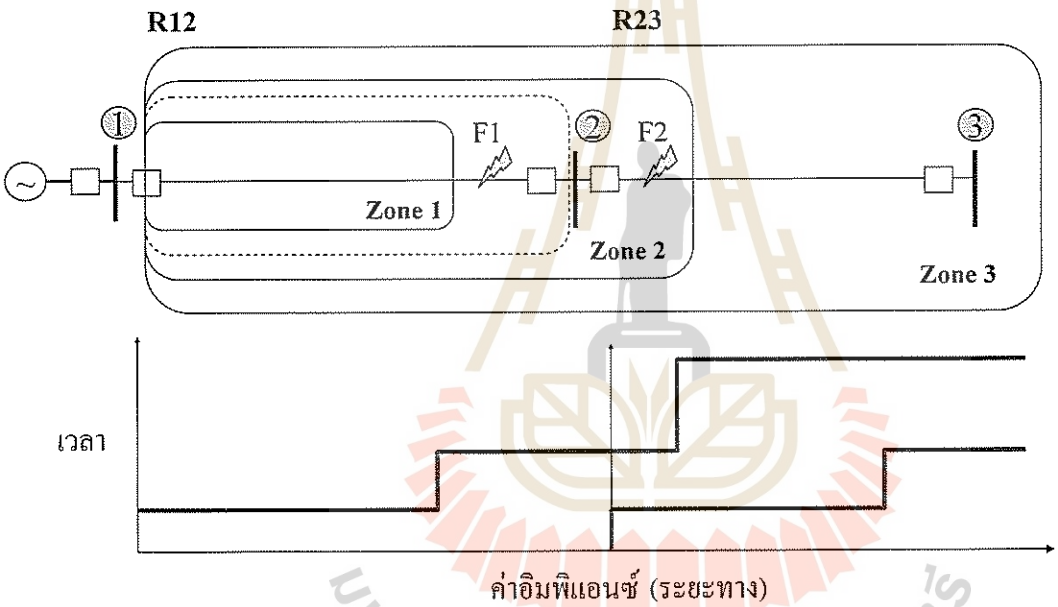
6. จงแสดงให้เห็นว่าการปรับตั้งรีเลย์แบบระยะทางจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของการลัดวงจร เนื่องจากจะใช้การวัดค่าแรงดันและกระแสในส่วนขององค์ประกอบสมมาตรลำดับบวก (Positive sequence) โดยให้แสดงการพิจารณากรณีลัดวงจรหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault) และกรณีลัดวงจรสามเฟส (Three Phases Faults) พร้อมทั้งเขียนวงจรในการต่อวงจรป้องกัน
7. จงบอกประเภทของรีเลย์ป้องกันแบบระยะทางที่สำคัญพร้อมทั้งอธิบายหลักการทำงาน

บทที่ 6

การป้องกันแบบนำสัญญาณ หรือ แบบไพล็อต

(Pilot Protection)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วถึงการป้องกันกระแสเกินและการป้องกันแบบระยะทาง จะเห็นว่าในกรณีของการป้องกันกระแสเกินด้วยรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา จะไม่สามารถตัดวงจรได้ทันทีที่มีการลัดวงจรขึ้น เนื่องจากต้องทำหน้าที่ป้องกันสำรอง (Backup) รีเลย์ของสายส่งที่อยู่ถัดไป และในกรณีที่ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันที (Instantaneous overcurrent relay) และรีเลย์แบบระยะทาง จะไม่สามารถตัดวงจรได้รวดเร็วเช่นกันถ้าเกิดการลัดวงจรขึ้นที่ส่วนปลายของสายส่ง หรือปลายขอบเขตป้องกัน ดังแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างขอบเขตการป้องกันที่ทำให้ไม่สามารถตัดวงจรได้ทันทีเมื่อเกิดลัดวงจร

จากรูปที่ 6.1 ในกรณีที่เกิดลัดวงจรที่จุด F2 และรีเลย์ R23 ไม่ทำงาน รีเลย์ R12 จะต้องทำหน้าที่สั่งเบรกเกอร์ B12 ตัดวงจรแทนเป็นการป้องกันในขอบเขตที่ 2 ซึ่งจะป้องกันสำรองรีเลย์ R23 ทั้งนี้ค่าที่ปรับตั้งไว้ในการป้องกันขอบเขตที่ 2 จะต้องมีการประวิงเวลาไว้ และในการปรับตั้งรีเลย์จะต้องมีการเผื่อระยะจากความคลาดเคลื่อนด้วย (ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 5) โดยการปรับตั้งขอบเขตที่ 1 ของ R12 จะไม่ปรับตั้งที่ 100% ของความยาวสายส่งเพื่อไม่ให้เกิดการตัดวงจรก่อน R23 ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรที่ F2 และทำให้เกิดปัญหาขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด F1 ก็จะต้องถูกประวิงเวลาไปด้วย

ดังนั้นในสายส่งที่สำคัญและต้องการความรวดเร็วในการตัดวงจรเมื่อเกิดลัดวงจรจะต้องใช้รีเลย์ที่เรียกว่ารีเลย์แบบนำสัญญาณ (Pilot relay) ซึ่งจะมีการตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ปลายด้านหนึ่งของสายส่งแล้วส่งสัญญาณติดต่อกันกับรีเลย์ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง

การป้องกันแบบนำสัญญาณเป็นการป้องกันด้วยหลักการเดียวกันกันการป้องกันแบบผลต่าง ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง คำว่า “นำสัญญาณ” หรือ “Pilot” หมายถึงการติดต่อสื่อสารกันระหว่างสองด้านของสายส่ง เพื่อให้เกิดการป้องกันตลอดความยาวของสายส่ง การป้องกันแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Teleprotection

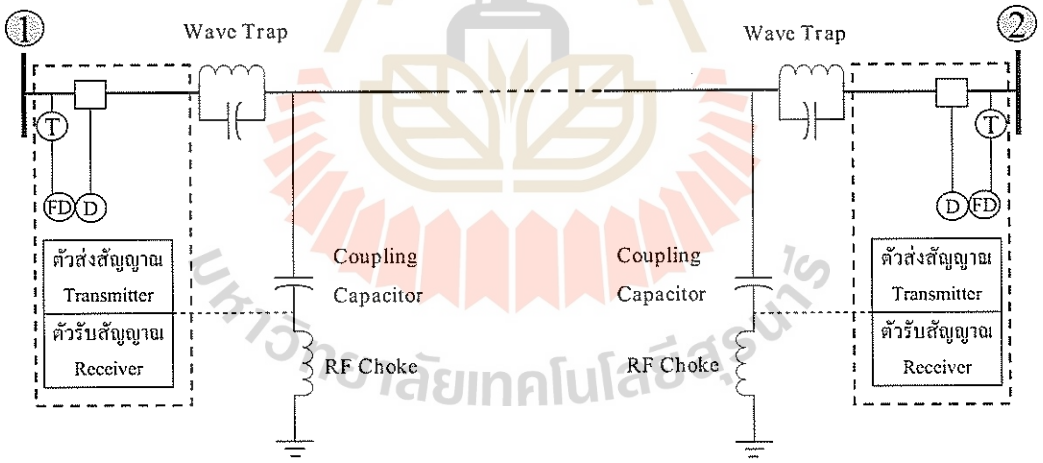
โดยปกติการสื่อสารในการป้องกันแบบนำสัญญาณมีหลายวิธี เช่น

1. การส่งสัญญาณร่วมไปกับสายตัวนำกำลัง (Power Line Carrier, PLC)
2. การส่งสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave)
3. การส่งสัญญาณด้วยใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)
4. การส่งสัญญาณด้วยสายเคเบิล (Communication Cable)

6.1 การสื่อสารในการป้องกันแบบนำสัญญาณ

6.1.1 การส่งสัญญาณร่วมไปกับสายตัวนำกำลัง (Power Line Carrier, PLC)

รูปที่ 6.2 แสดงแผนผังการส่งสัญญาณร่วมไปกับสายตัวนำกำลัง โดยจะเป็นการส่งสัญญาณที่ความถี่ 10-490 kHz ไปตามสายส่งไฟฟ้ากำลัง กำลังที่ใช้ส่งสัญญาณจะขึ้นอยู่กับระยะทางเช่น กำลังส่ง 10 W จะใช้ในการส่งระยะทางประมาณ 150 กิโลเมตร และกำลังส่ง 100 W จะใช้ในกรณีที่สายส่งมีระยะทางมากกว่า 250 กิโลเมตร



รูปที่ 6.2 แผนผังการทำงานของการส่งสัญญาณร่วมไปกับตัวนำกำลัง

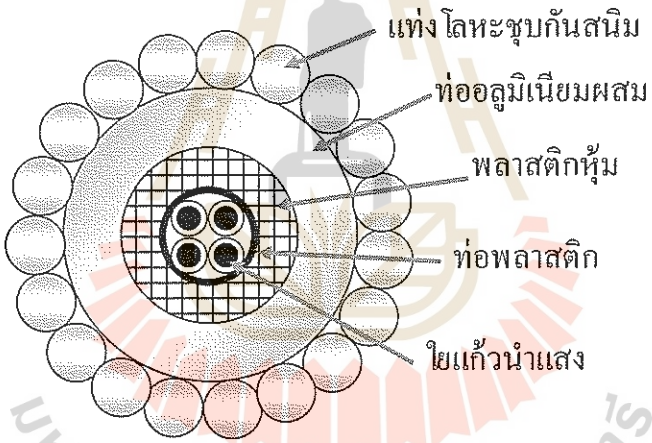
การส่งสัญญาณผ่านสายส่งไฟฟ้าจะส่งผ่านตัวเก็บประจุ (Coupling capacitor) ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับสัญญาณความถี่สูง แต่จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสำหรับความถี่ไฟฟ้า (50 Hz) และที่หลังจุดต่อของตัวเก็บประจุจะมีอุปกรณ์ดักคลื่น (Wave trap) ที่จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงสำหรับสัญญาณความถี่สูงแต่จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับความถี่ไฟฟ้ากำลัง (50 Hz) ทำให้สัญญาณถูกดักให้อยู่เฉพาะระหว่างสายส่งไฟฟ้า ข้อเสียของการส่งสัญญาณวิธีนี้คือจะมีผลกระทบจากการเกิดฟ้าผ่าหรือการสับสวิตช์ที่มีการอาร์คต่าง ๆ ทำให้การทำงานผิดพลาดได้

6.1.2 การส่งสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave)

การส่งสัญญาณไมโครเวฟจะอยู่ในช่วงความถี่ 150 MHz – 20 GHz ในช่วงความถี่นี้สามารถแบ่งเป็นช่องสัญญาณ 4 kHz ขนานกันได้หลายช่อง โดยการใช้ช่วงสัญญาณขนาดใหญ่จะช่วยให้ส่งสัญญาณได้มากขึ้น เช่น สัญญาณเตือน หรือเสียงพูดได้ สัญญาณไมโครเวฟจะไม่มีผลกระทบจากการทำงานของสายส่ง แต่จะมีผลกระทบจากสภาพอากาศ และในกรณีที่สายส่งมีระยะทางไกลจะต้องมีตัวส่งต่อสัญญาณเป็นช่วง ๆ ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้นและความน่าเชื่อถือได้ลดลง

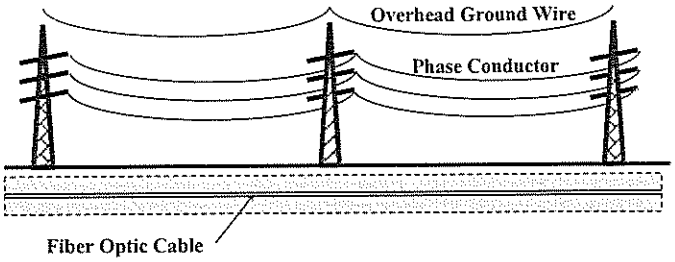
6.1.3 การส่งสัญญาณด้วยใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)

การส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลใยแก้วนำแสงได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลได้หลายช่องสัญญาณ โดยสายใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นสามารถส่งได้ถึง 8,000 ช่องสัญญาณ และยังสามารถขยายได้โดยใช้สายใยแก้วนำแสงหลายเส้นขนานกัน รูปที่ 6.3 แสดงภาคตัดขวางของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ทั้งนี้จำนวนของสายใยแก้วนำแสงในเคเบิลจะขึ้นอยู่กับการออกแบบใช้งาน

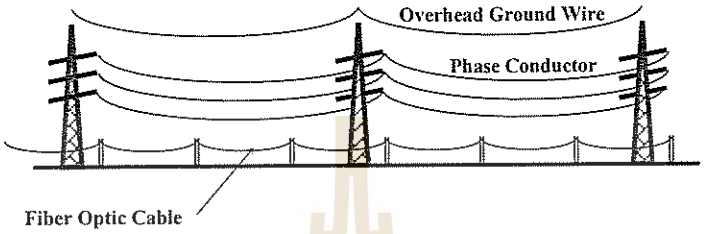


รูปที่ 6.3 โครงสร้างของสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

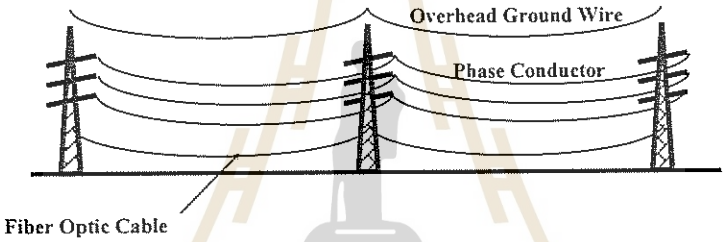
การส่งสัญญาณด้วยใยแก้วนำแสงจะไม่มีผลกระทบจากสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก และสามารถส่งในระยะทางหลายร้อยกิโลเมตรด้วยการใช้ตัวทำซ้ำสัญญาณ รูปที่ 6.4 แสดงวิธีการติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสง โดยวิธีที่นิยมคือการฝังสายใยแก้วนำแสงไปในสายตัวนำดินเหนือศีรษะ (Overhead ground wire) ดังรูปที่ 6.4d และการตีเกลียวไปกับสายตัวนำ ดังรูปที่ 6.4c



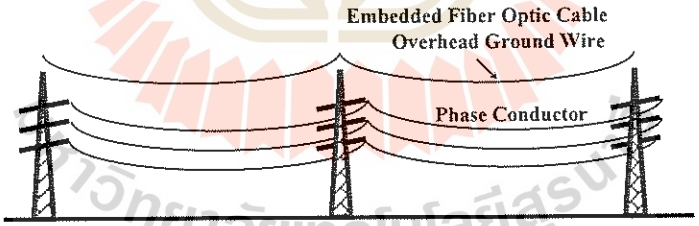
a. การติดตั้งสายเคเบิ้ลใยแก้วนำแสงแบบฝังใต้ดิน



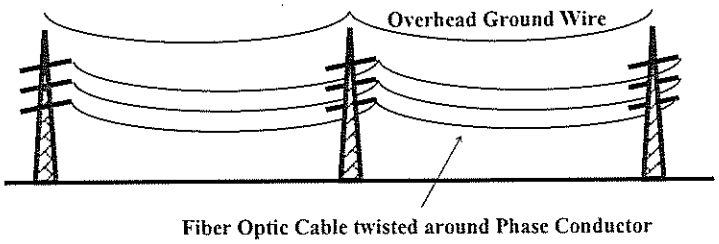
b. การติดตั้งสายเคเบิ้ลใยแก้วนำแสงแบบปักเสาพาดสาย



c. การติดตั้งสายเคเบิ้ลใยแก้วนำแสงแบบใช้เสาของสายส่งไฟฟ้า (Self-support)



d. การติดตั้งสายเคเบิ้ลใยแก้วนำแสงโดยใช้สายตัวนำลงดินที่มีสายใยแก้วนำแสง

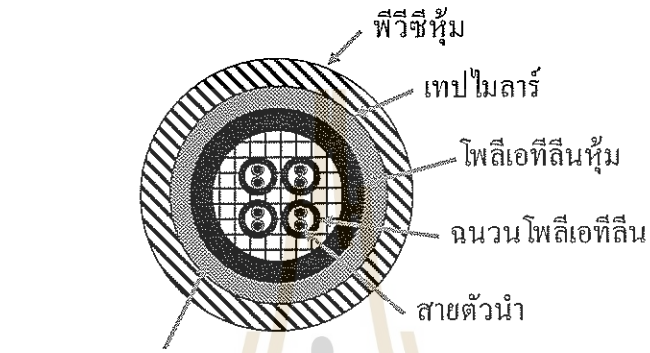


e. การติดตั้งสายเคเบิ้ลใยแก้วนำแสงโดยใช้สายตัวนำเฟสที่มีสายใยแก้วนำแสง

รูปที่ 6.4 การติดตั้งสายเคเบิลใยแก้วนำแสงแบบต่าง ๆ

6.1.4 การส่งสัญญาณด้วยสายเคเบิล (Communication Cable)

สายเคเบิลที่ใช้ในระบบป้องกันแบบนำสัญญาณจะเป็นสายโทรศัพท์ที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวน (Shield) ไว้ โดยจะใช้ฉนวนที่มีความคงทนต่อแรงดันได้ถึง 15 kV ดังแสดงในรูปที่ 6.5 การใช้สายเคเบิลในการนำสัญญาณจะนิยมใช้เฉพาะในกรณีที่เป็นระบบป้องกันสายส่งระยะใกล้เนื่องจากการติดตั้งระยะไกลจะมีค่าใช้จ่ายสูงมาก นอกจากนี้การติดตั้งในลักษณะเหนือศรีษะจะมีผลกระทบจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเกิดความผิดพร่องหรือการสับสวิตช์ ในขณะที่ติดตั้งแบบฝังดินก็อาจเกิดความเสียหายจากการขุดเจาะของมนุษย์หรือสัตว์ต่าง ๆ ได้



รูปที่ 6.5 โครงสร้างของสายเคเบิลนำสัญญาณ

6.2 แบบแผนการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบนำสัญญาณ

การเลือกวิธีการติดต่อสื่อสารในการป้องกันแบบนำสัญญาณจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเป็นต้นว่า ค่าใช้จ่าย ความน่าเชื่อถือได้ จำนวนและระยะทางของสายส่ง จำนวนช่องสัญญาณ และคลื่นความถี่ที่จะขออนุญาตใช้ได้ นอกจากนี้สิ่งที่จะต้องพิจารณาอีกอย่างหนึ่งก็คือแบบแผนการทำงานว่าจะเป็น “**แบบสั่งให้ไม่ตัดวงจร (Blocking)**” หรือว่าเป็น “**แบบสั่งให้ตัดวงจร (Triping)**” การส่งสัญญาณสั่งให้ไม่ตัดวงจรจะเป็นการส่งสัญญาณไม่ให้เกิดการตัดวงจรในอีกด้านหนึ่งของสายส่งเมื่อตรวจจับได้ว่าการเกิดลัดวงจรอยู่ภายนอกขอบเขตการป้องกัน ส่วนการสั่งให้ตัดวงจรจะเป็นการสั่งให้เบรกเกอร์ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของสายส่งตัดวงจรเมื่อตรวจจับได้ว่าการลัดวงจรเกิดขึ้นในขอบเขตการป้องกัน โดยรายละเอียดของแบบแผนการป้องกันนำสัญญาณทั้งสองแบบจะกล่าวถึงภายหลัง

แบบแผนการป้องกันแบบสั่งให้ไม่ตัดวงจรจะนิยมใช้กับการสื่อสารที่ใช้การส่งสัญญาณร่วมไปกับสายตัวนำกำลัง (PLC) เนื่องจากการใช้วิธีสั่งให้ตัดวงจรอาจส่งสัญญาณไปไม่ถึงอีกด้านหนึ่งเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายส่ง ส่วนในกรณีที่ใช้การส่งสัญญาณทางไมโครเวฟ สายใยแก้วนำแสง หรือสายเคเบิล จะสามารถใช้แบบแผนการป้องกันแบบสั่งให้ตัดวงจรได้

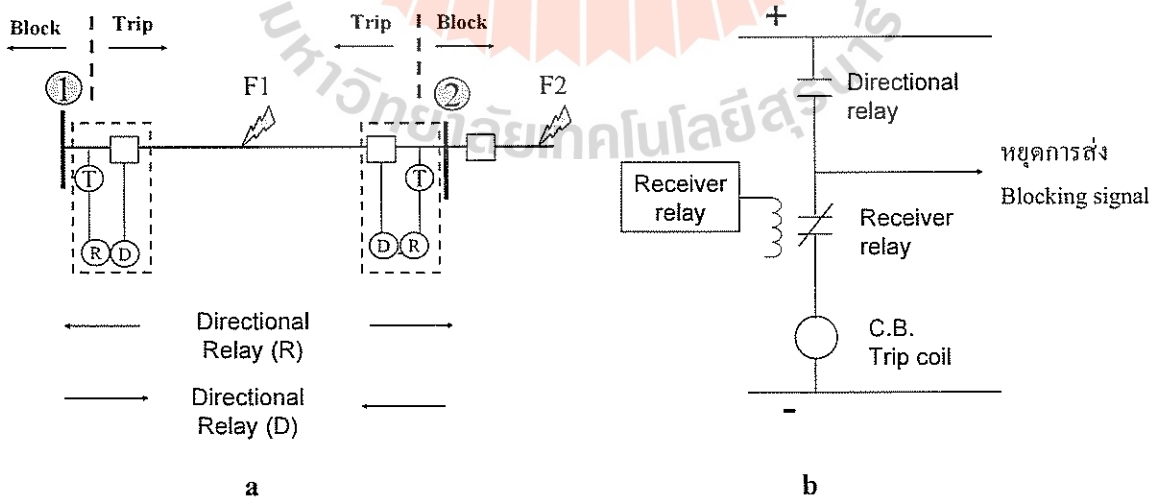
6.3 การเปรียบเทียบทิศทางเพื่อสั่งให้ไม่ตัดวงจร (Directional Comparison - Blocking)

การเ ปรียบเทียบทิศทางเพื่อสั่งให้ไม่ตัดวงจรจะเป็นการส่งสัญญาณจากอีกด้านหนึ่งของสายส่งเมื่อตรวจจับได้ว่าการเกิดลัดวงจรนั้นอยู่ภายนอกขอบเขตการป้องกันหรือภายนอกสายส่งโดยจะเป็น**สัญญาณสั่งให้ไม่ตัดวงจร (Blocking signal)** วิธีนี้จะนิยมใช้ในกรณีที่เลือกระบบติดต่อสื่อสารเป็นแบบส่งสัญญาณร่วมไปกับตัวนำกำลัง (Power line carrier) หลักการของวิธีนี้จะใช้วิธีตรวจจับทิศทางของกระแสลัดวงจรจากทั้งสองด้านของสายส่งนำมาเปรียบเทียบกันทำให้สามารถระบุได้ว่าการเกิดลัดวงจรอยู่ในสายส่งที่ป้องกันหรือไม่ โดยมีวงจรตรรกที่ออกแบบไว้ให้ไม่ตัดวงจรเมื่อได้รับสัญญาณจากอีกด้านหนึ่งของสายส่ง (Blocking signal)

การตัดวงจร (Triping) ของแต่ละด้านของสายส่งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อไม่ได้รับสัญญาณสั่งให้ไม่ตัดวงจร (Blocking signal) และตรวจจับได้ว่าเกิดการลัดวงจรในทิศทางที่จะสั่งตัดวงจร อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับทิศทางสามารถใช้รีเลย์แบบทิศทางหรือรีเลย์แบบระยะทางที่เป็นรีเลย์แอดมิแตนซ์ (Admittance relay หรือ mho relay) หรือรีเลย์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Qruadrilateral relay)

หลักการทำงานของวิธีการเปรียบเทียบทิศทางเพื่อสั่งให้ไม่ตัดวงจรสามารถสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือ

1. แบบที่ใช้ตัวตรวจจับการลัดวงจรที่ไม่มีทิศทางซึ่งอาจเป็นรีเลย์กระแสเกิน
   - เมื่อเกิดการลัดวงจรที่สายส่งที่ป้องกัน ตัวตรวจจับการลัดวงจรจะทำการส่งสัญญาณสั่งให้ไม่ตัดวงจร (Blocking signal) ไปยังอีกด้านหนึ่งของสายส่ง แต่ถ้าการไหลของกระแสมีทิศทางที่สอดคล้องกับรีเลย์ป้องกันแบบทิศทางก็จะถูกยับยั้งการส่งสัญญาณสั่งให้ไม่ตัดวงจรนี้ด้วยรีเลย์ป้องกันแบบทิศทาง
   - เมื่อเกิดการลัดวงนอกขอบเขตสายส่งที่ป้องกัน ตัวตรวจจับการลัดวงจรจะทำการส่งสัญญาณสั่งให้ไม่ตัดวงจรไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณที่อยู่ปลายอีกด้านหนึ่งของสายส่งผ่านทางรีเลย์รับสัญญาณ (Receiver relay, R) โดยไม่ถูกยับยั้งโดยรีเลย์ป้องกันแบบทิศทางเพราะทิศทางไม่สอดคล้องกับที่กำหนดไว้ ทำให้ไม่เกิดการตัดวงจรที่ปลายสายส่งทั้งสอง



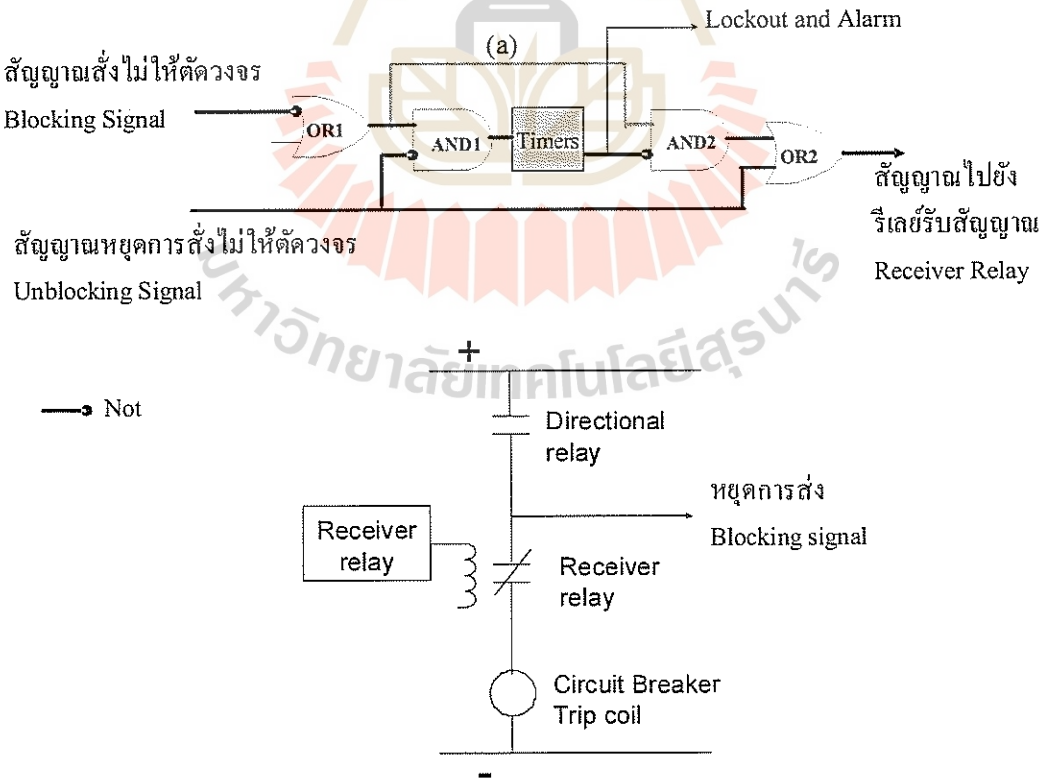
รูปที่ 6.6 วิธีการเปรียบเทียบทิศทางเพื่อสั่งให้ไม่ตัดวงจร
แบบที่ใช้ตัวตรวจจับการลัดวงจรที่ไม่มีทิศทาง

2. แบบที่ใช้ตัวตรวจจับการลัดวงจร (FD) ที่มีทิศทาง ซึ่งอาจเป็นรีเลย์กระแสเกินแบบทิศทางแทนที่จะเป็นรีเลย์กระแสเกินแบบไม่มีทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 6.6
   - เมื่อเกิดการลัดวงจรที่จุด F1 สัญญาณสั่งให้ไม่ตัดวงจรจะไม่ถูกส่งระหว่างปลายทั้งสองด้านของสายส่งและรีเลย์แบบทิศทางของทั้งสอง (D12, D21) ก็จะสั่งให้ตัดวงจร
   - เมื่อเกิดการลัดวงจรที่ F2 รีเลย์แบบทิศทางที่บัส 2 (D21) จะไม่ตัดวงจรเพราะทิศทางกระแสไม่ตรงกับที่กำหนดไว้ นอกจากนี้รีเลย์ FD21 ก็จะส่งสัญญานสั่งให้ไม่ตัดวงจรไปยังรีเลย์รับสัญญาณที่บัส 1 ทำให้ไม่มีการตัดวงจรที่บัส 1 เช่นกัน

   ข้อดีของการใช้รีเลย์แบบทิศทางในการสั่งไม่ให้ตัดวงจรของระบบป้องกันแบบนำสัญญาณก็คือไม่มีความจะเป็นต้องใช้สัญญาณหยุดการส่งสัญญาณไม่ให้ตัดวงจร เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวจะไม่ถูกส่งอยู่แล้วหากทิศทางของกระแสสอดคล้องกับการเกิดการลัดวงจรในสายส่งที่ป้องกัน

6.4 การเปรียบเทียบทิศทางเพื่อหยุดการสั่งไม่ให้ตัดวงจร (Directional Comparison - Unblocking)

เนื่องจากการเปรียบเทียบทิศทางเพื่อสั่งไม่ให้ตัดวงจร จะเป็นการส่งสัญญาณเฉพาะในกรณีที่เกิดลัดวงจรเท่านั้น ดังนั้นหากเกิดความผิดพลาดในการส่งสัญญาณดังกล่าวก็จะทำให้เกิดการตัดวงจรโดยไม่จำเป็นได้ การป้องกันข้อผิดพลาดดังกล่าวทำได้โดยการส่งสัญญาณต่อเนื่องไว้ตลอดเวลาเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบสื่อสาร สัญญาณต่อเนื่องนี้จะหยุดส่งเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น การทำงานของกระบวนการนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบทิศทางเพื่อหยุดการสั่งไม่ให้ตัดวงจร (Directional Comparison - Unblocking)

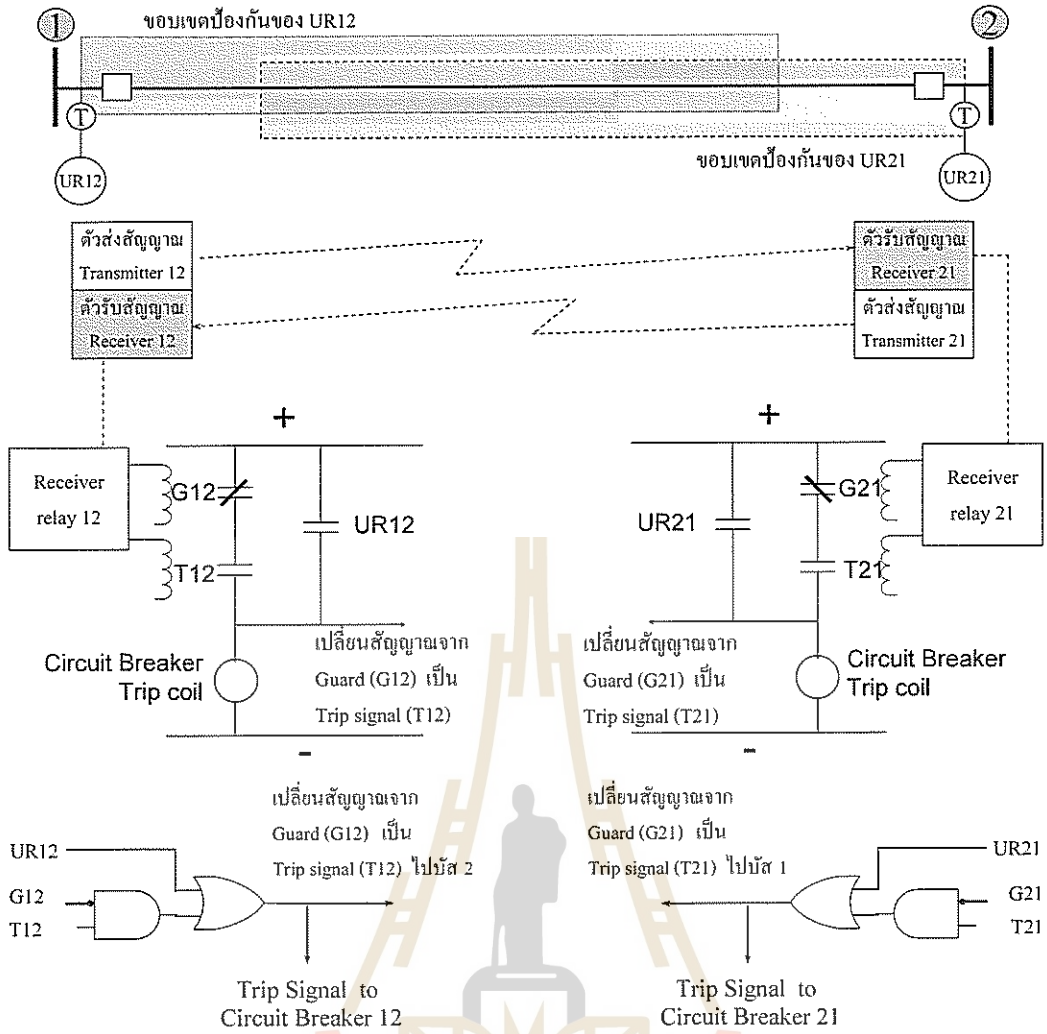
จากรูปที่ 6.7 สัญญาณสั่งไม่ให้ตัดวงจรจะถูกส่งอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไม่มีสัญญาณความถี่สั่งไม่ให้ตัดวงจร (Blocking Frequency) ออกจากเกต OR1 ดังนั้น เกต AND1 และ AND2 จะไม่มีสัญญาณเข้า เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในสายส่งที่ป้องกัน (Internal Fault) รีเลย์ตัดวงจร (D) จะส่งสัญญาณไปยับยั้งสัญญาณสั่งไม่ให้ตัดวงจร (ทำการ Unblocking) ทำให้เกิดสัญญาณเข้าที่เกต OR2 ไปสั่งการที่รีเลย์รับสัญญาณ (Receiver Relay, R) และทำให้มีการสั่งให้เบรกเกอร์ตัดวงจร นอกจากนี้จะมีส่วนของการเฝ้าระวังคือเส้นทาง a ในรูปที่ 6.7 ซึ่งจะเป็นการป้องกันในกรณีที่สัญญาณสั่งไม่ให้ตัดวงจร (Blocking) หายไปแต่มีสัญญาณยับยั้งการสั่งไม่ให้ตัดวงจร (Unblocking) เกิดขึ้น โดยถ้าสัญญาณสั่งไม่ให้ตัดวงจรหายไปก็จะมีสัญญาณส่งไปที่ OR2 ผ่าน AND1 และตัวจัดเวลา (Timer) หลังจากที่เวลาผ่านไปตามที่ตั้งไว้ (โดยปกติจะตั้งเวลาประมาณ 150 ms) และจะยอมให้ตัดวงจรได้

6.5 การส่งสัญญาณสั่งตัดวงจรโดยการตรวจจับที่ไม่เต็มระยะสายส่ง (Underreaching Transfer Trip)

ในกรณีที่มีช่องทางการสื่อสารที่ไม่ขึ้นกับสายส่งกำลังการใช้วิธีการสั่งตัดวงจร (Tripping Scheme) จากอีกด้านหนึ่งของสายส่งจะสามารถทำได้ ซึ่งจะมีข้อดีกว่าการใช้วิธีการในหัวข้อ 8.3 และ 8.4 คือสามารถตัดวงจรได้เร็วขึ้น เนื่องจากในลักษณะของการสั่งไม่ให้ตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรนอกขอบเขตนั้น การทำงานของรีเลย์ตัดวงจร (D) จะต้องมีการประวิงเวลาให้ทำงานช้ากว่าการทำงานของรีเลย์รับสัญญาณ (R) เพื่อป้องกันการตัดวงจรที่ผิดพลาดนอกขอบเขตการป้องกัน การใช้วิธีส่งสัญญาณเพื่อให้ตัดวงจรจะมีการส่งสัญญาณ 2 ส่วนคือสัญญาณเฝ้าระวัง(Guard signal) ซึ่งจะส่งไว้ตลอดเวลาและจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณสั่งตัดวงจร (Trip Signal) เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น

เพื่อป้องกันการตัดวงจรผิดพลาดจากการลัดวงจรนอกขอบเขตป้องกัน เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นสัญญาณเฝ้าระวังจะหยุดก่อนเพื่อให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ต่อวงจร (85G1) และสัญญาณตัดวงจรจึงจะได้รับเพื่อตัดวงจรได้ นอกจากนี้สัญญาณเฝ้าระวังยังทำหน้าที่ในการตรวจสอบการทำงานของระบบสื่อสารด้วย

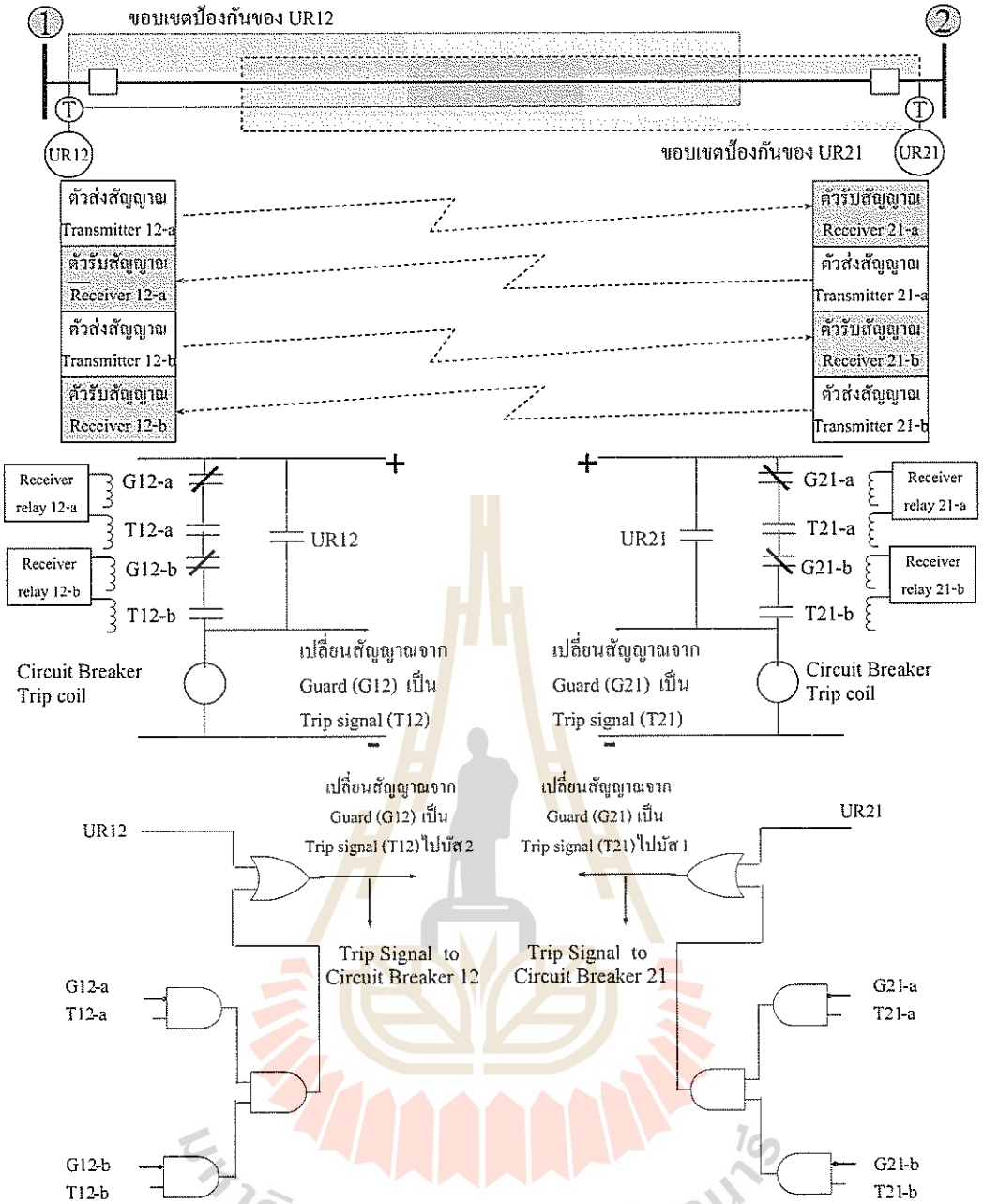
รูปที่ 6.8 แสดงหลักการป้องกันแบบสั่งตัดวงจรโดยการตรวจจับที่ไม่เต็มระยะสายส่งที่เป็นการสั่งการโดยตรง (Direct Underreaching Transfer Trip, DUTT) ซึ่งเป็นวิธีการสั่งตัดวงจรแบบนำสัญญาณพื้นฐานที่ใช้รีเลย์ที่ปรับตั้งให้ทำงานไม่เต็มระยะของสายส่ง (Underreaching Relay) ที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่ง สัญญาณเฝ้าระวังจะส่งจากปลายสายส่งแต่ละด้านไปที่อีกรีเลย์รับสัญญาณ (Receiving Relay) อีกด้านหนึ่ง เพื่อให้หน้าสัมผัสเปิดไว้ตลอดเวลา เมื่อเกิดการลัดวงจรในขอบเขตการป้องกันของรีเลย์ที่ทำงานไม่เต็มระยะสายส่ง (Underreaching Relay, UR12 หรือ UR21) รีเลย์จะทำการสั่งตัดวงจรและทำการส่งสัญญาณสั่งตัดวงจรแทนสัญญาณเฝ้าระวังไปยังอีกด้านหนึ่งทำให้มีการตัดวงจรทั้งสองด้านของสายส่ง



รูปที่ 6.8 การป้องกันแบบสั่งตัดวงจรโดยการตรวจจับที่ไม่เต็มระยะสายส่ง

รีเลย์ที่ทำหน้าที่สั่งตัดวงจรจะใช้รีเลย์แบบทิศทางความเร็วสูงในการตรวจจับทั้งการลัดวงจรระหว่างเฟส และการลัดวงจรลงดิน ปรับตั้งให้มีขอบเขตการป้องกันที่เหลื่อมกันแต่จะไม่เต็มระยะของสายส่ง และสามารถปรับตั้งให้ทำหน้าที่ป้องกันสำรอง (Backup) สายส่งที่อยู่ถัดไปได้ด้วย เช่น กรณีที่ใช้รีเลย์แบบทิศทางที่เป็นรีเลย์ระยะทาง จะใช้ขอบเขตการป้องกันที่ 1 ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ที่ทำงานไม่เต็มระยะสายส่ง (Underreaching Relay) และใช้ขอบเขตการป้องกันที่ 2 และ 3 ทำหน้าที่ป้องกันสำรองรีเลย์ของสายส่งที่อยู่ถัดไป หรือกรณีที่ใช้รีเลย์ป้องกันแบบทิศทางที่มีฟังก์ชั่นทำงานทันที (Instantaneous Relay) และประวิงเวลา (Time Delay Relay) ร่วมกันก็สามารถปรับตั้งให้ส่วนของการทำงานทันทีเป็นรีเลย์ที่ทำงานไม่เต็มระยะสายส่ง (Underreaching Relay) และส่วนของการตัดวงจรประวิงเวลาเป็นการป้องกันสำรองสายส่งที่อยู่ถัดไปได้

ในกรณีที่ไม่สามารถปรับตั้งรีเลย์ให้มีขอบเขตเหลื่อมกันได้ เช่นสายส่งมีระยะสั้นมากเกินไปทำให้รีเลย์ไม่สามารถแยกแยะว่าการลัดวงจรเกิดขึ้นภายในหรือภายนอกสายส่งได้ ก็จะไม่สามารถใช้วิธีการนี้ได้



รูปที่ 6.9 การป้องกันแบบสั่งตัดวงจรโดยการตรวจจับที่ไม่เต็มระยะสายส่งที่ใช้ชุดรับส่ง 2 ชุด

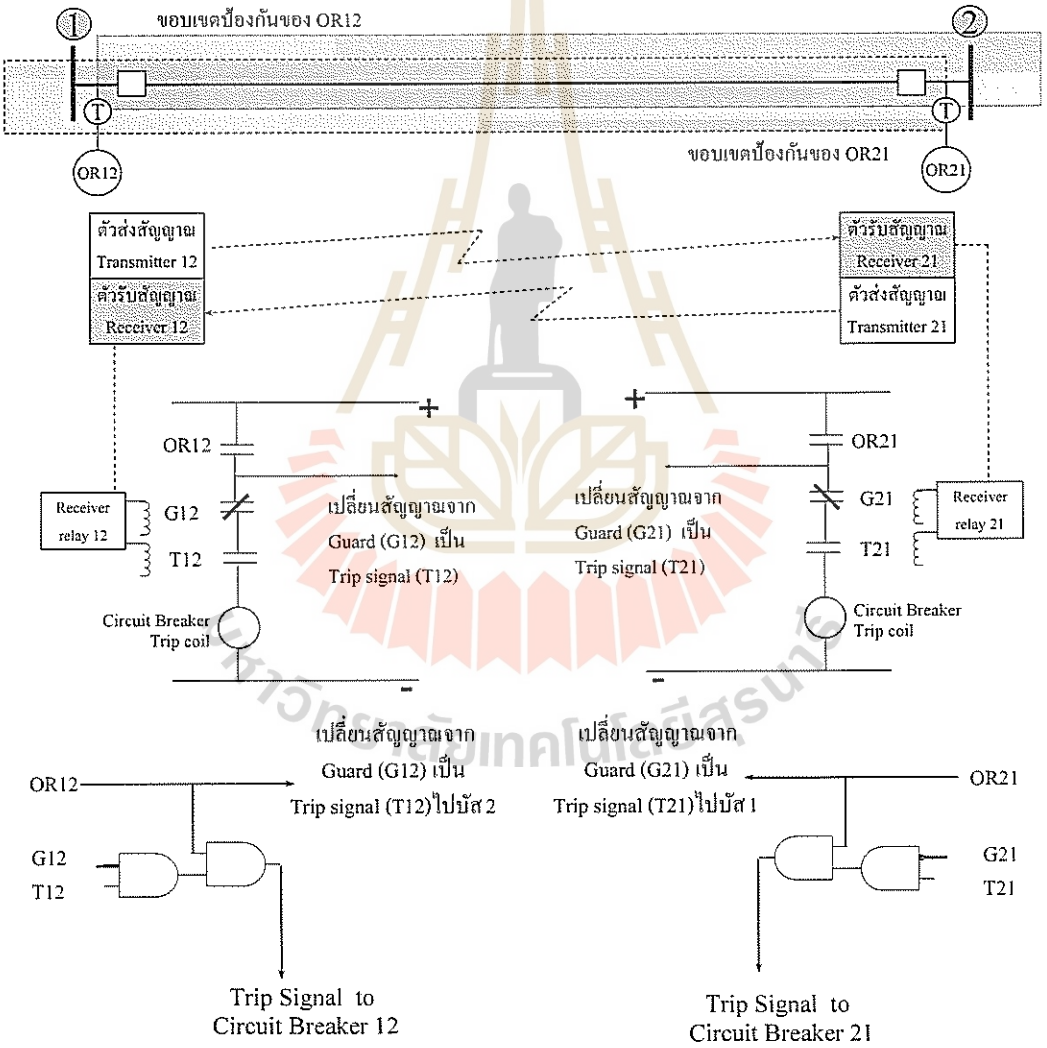
ความแตกต่างระหว่างสัญญาณเฝ้าระวังกับสัญญาณสั่งตัดวงจรคือจะส่งด้วยความถี่ที่ต่างกัน และอยู่คนละช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้อาจเกิดการทำงานสั่งตัดวงจรที่เกิดจากสัญญาณรบกวน เช่นการสับสวิตช์หรือสภาวะทรานเซียนในระบบได้ บางครั้งจึงมีการใช้ชุดรับส่งสัญญาณ 2 ชุดแยกจากกันดังแสดงในรูปที่ 6.9 ซึ่งชุดรับส่งทั้งสองจะทำงานที่ความถี่แตกต่างกันและการสั่งตัดวงจรจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อตัวรับสัญญาณทั้ง 2 ชุดได้รับสัญญาณสั่งตัดวงจร

การสั่งตัดวงจรผิดพลาดจากการลัดวงจรนอกขอบเขตก็จะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยลง ในทางกลับกันหากอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งไม่ทำงานก็จะไม่เกิดการตัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันได้ทำให้มีความปลอดภัยน้อยลงในการตัดวงจร ดังนั้นจะเห็นว่าระบบนี้มีความน่าเชื่อถือ (Reliability) ได้มากขึ้น (โอกาสสั่งตัดวงจรผิดพลาดจากการผิด

พร่องนอกขอบเขตป้องกันน้อยลง) แต่มีความวางใจได้ (Dependability) น้อยลง (มีโอกาสไม่ตัดวงจรจากความผิดพร่องในขอบเขตป้องกันมากขึ้น)

6.6 การส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่เกินระยะสายส่ง (Permissive Overreachign Transfer Trip)

วิธีการนี้จะใช้หลักการที่คล้ายกับการเปรียบเทียบทิศทางเพื่อสั่งให้ไม่ตัดวงจร (Directional Comparison Blocking Scheme) การส่งสัญญาณในการป้องกันวิธีนี้จะเป็นสัญญาณที่ยอมให้ตัดวงจรได้ โดยจะใช้รีเลย์ป้องกันแบบทิศทางที่ปรับตั้งในมีขอบเขตป้องกันเกินระยะสายส่งที่ปลายทั้งสองด้านของสายส่ง (Overreaching Relay) ดังแสดงในรูปที่ 6.10 และสัญญาณจะเปลี่ยนเป็นคำสั่งให้ตัดวงจรได้เมื่อตรวจจับได้ว่าเกิดการลัดวงจรขึ้น การปรับตั้งรีเลย์ด้วยวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องให้ทำงานสัมพันธ์ (Coordinate) กับรีเลย์ในสายส่งที่อยู่ถัดไป

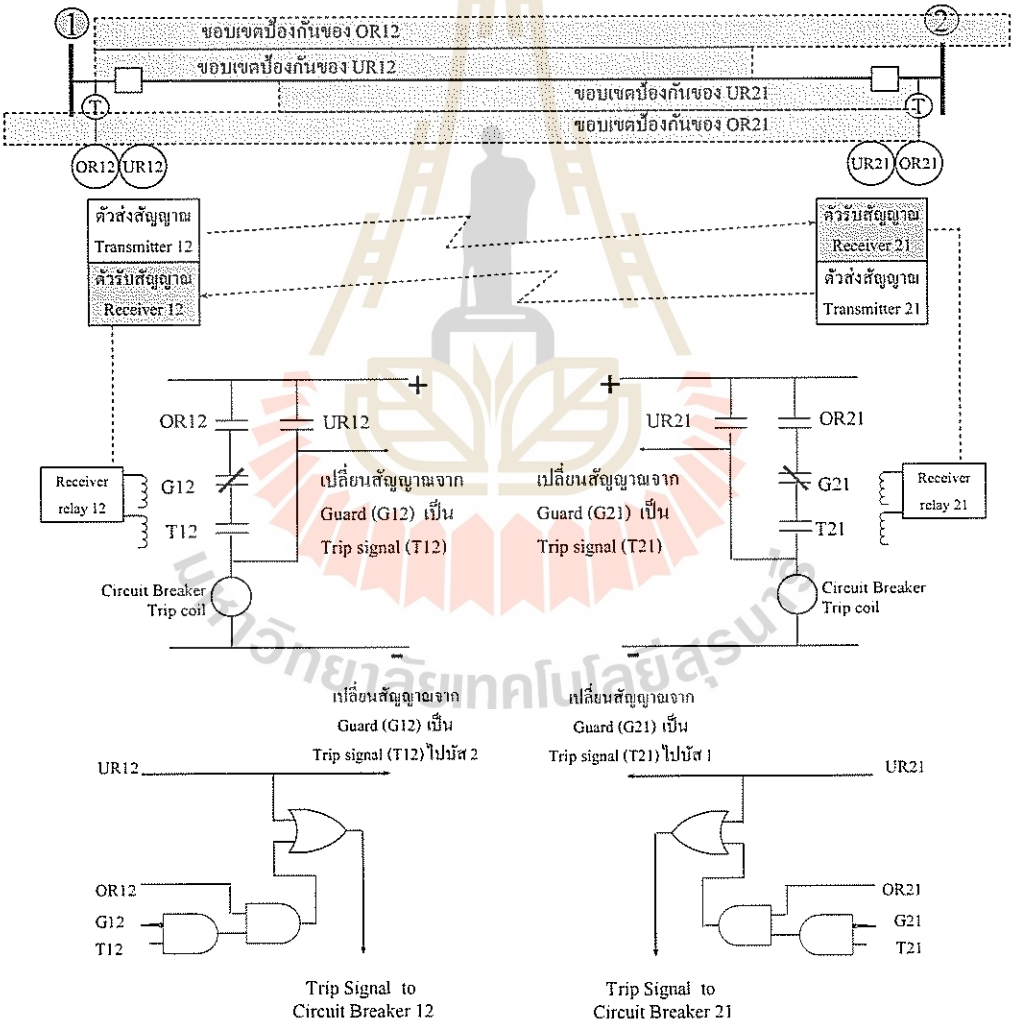


รูปที่ 6.10 การป้องกันแบบนำสัญญาณด้วยวิธีส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่เกินระยะสายส่ง

จากรูปที่ 6.10 เมื่อเกิดการลัดวงจรระหว่างสายส่ง รีเลย์ OR12 และ OR21 จะเปลี่ยนการส่งสัญญาณจากสัญญาณเฝ้าระวัง (Guard Signal) เป็นสัญญาณตัดวงจร (Trip Signal) ไปยังรีเลย์รับสัญญาณ ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของสายส่ง และการตัดวงจรจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อรีเลย์ OR12 และ OR21 ทำงานทั้งคู่เท่านั้น นั่นคือเฉพาะในกรณีที่เกิดลัดวงจรระหว่างสายส่งที่ป้องกัน

6.7 การส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่ไม่เต็มและเกินระยะสายส่ง (Permissive Underreachign Transfer Trip)

การส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่ไม่เต็มและเกินระยะสายส่ง (Permissive Underreachign Transfer Trip) เป็นวิธีที่เพิ่มความเชื่อถือได้ให้แก่ระบบป้องกันดังแสดงดังรูปที่ 6.11 โดยรีเลย์ UR12 และ UR21 (Underreaching Relay) จะสั่งตัดสัญญาณโดยเปลี่ยนจากสัญญาณเฝ้าระวังเป็นสัญญาณตัดวงจรไปยังอีกด้านหนึ่งของสายส่ง ในขณะที่รีเลย์ OR12 และ OR21 (Overreaching Relay) ที่แต่ละด้านของสายส่งจะทำหน้าที่สั่งตัดวงจรอีกครั้ง ทำให้เป็นการตรวจสอบเพื่อยืนยันอีกครั้งว่าเกิดการลัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันหรือไม่

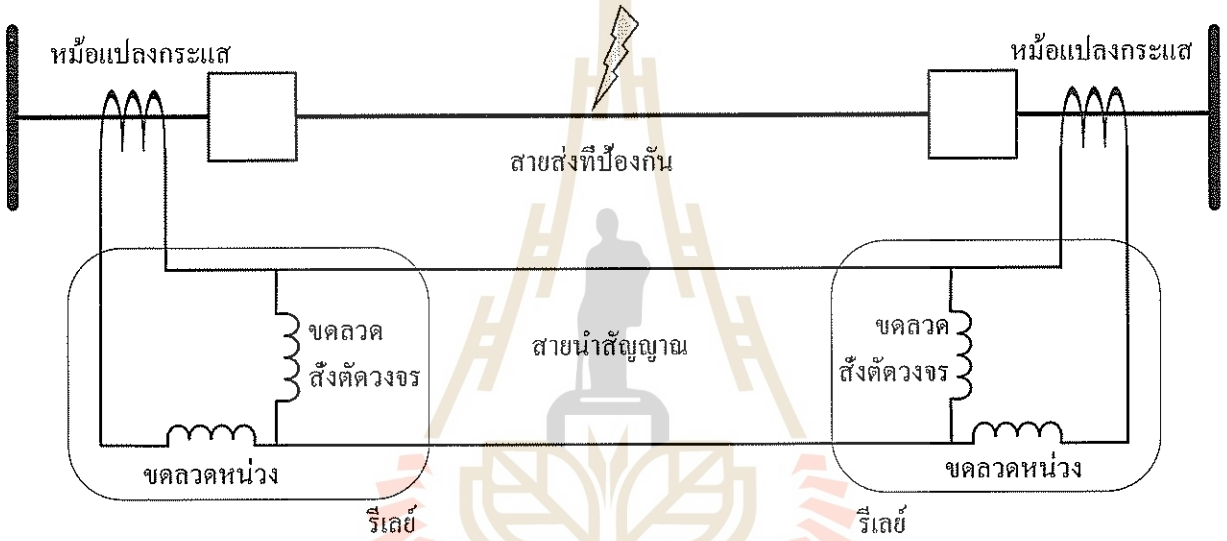


รูปที่ 6.11 การส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่ไม่เต็มและเกินระยะสายส่ง

นอกจากนี้รีเลย์ UR12 และ UR21 (Underreaching Relay) ยังสามารถสั่งตัดวงจรที่เบรกเกอร์ในด้านเดียวกันของสายส่งได้ทันทีด้วยส่วนรีเลย์ OR12 และ OR21 (Overreaching Relay) ที่เพิ่มการประวิงเวลาในการทำงานก็จะสามารถทำหน้าที่ป้องกันสำรอง (Backup) สายส่งที่อยู่ถัดไปด้วย

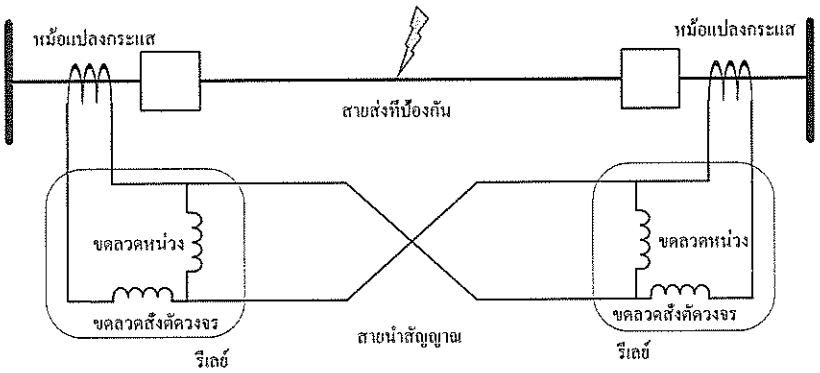
6.8 การป้องกันด้วยสายนำสัญญาณ (Pilot-Wire Protection)

การป้องกันสายส่งโดยใช้สายนำสัญญาณเป็นการใช้หลักการเปรียบเทียบค่ากระแสผลต่างที่ไหลผ่านหม้อแปลงกระแสที่อยู่ทั้งสองข้างของสายส่ง ซึ่งเป็นหลักการคล้ายการป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protection) โดยวงจรนำสัญญาณสามารถออกแบบได้หลายลักษณะ เช่น แบบกระแสไหลวน (Circulating Current Scheme) แบบสมดุลแรงดัน (Balance Voltage Scheme)

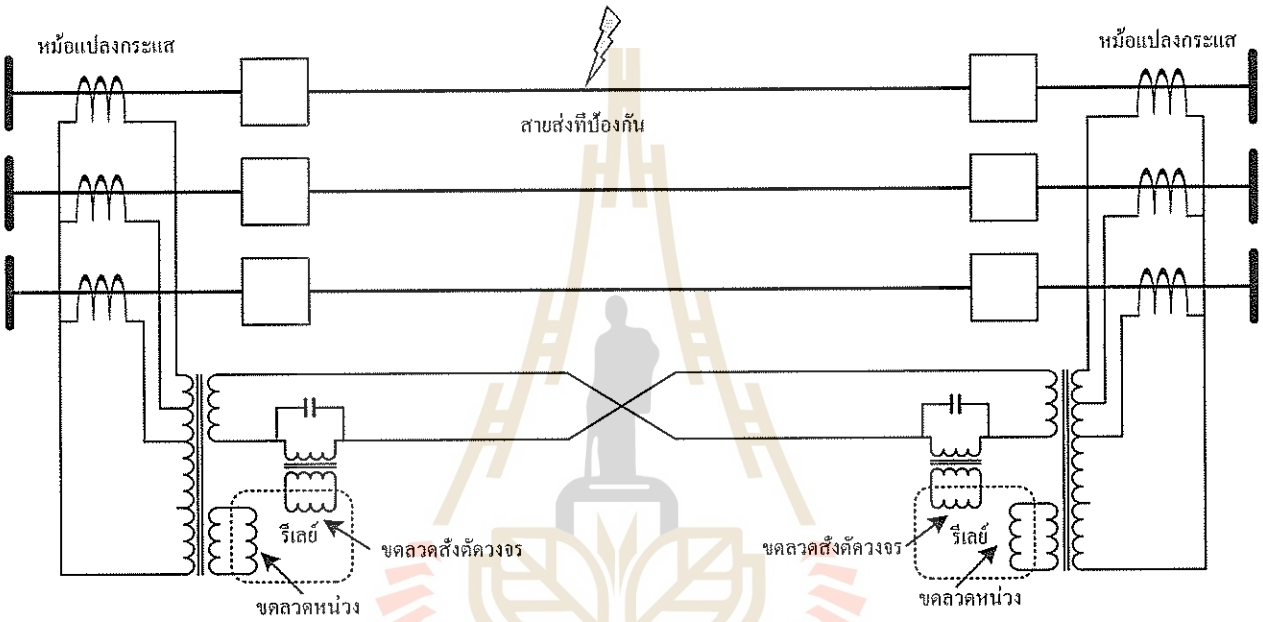


รูปที่ 6.12 หลักการป้องกันด้วยสายนำสัญญาณแบบกระแสไหลวน

รูปที่ 6.12 แสดงหลักการป้องกันด้วยสายนำสัญญาณแบบกระแสไหลวน โดยหากเกิดการลัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันก็จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขดลวดสั่งตัดวงจร (Operating Coil) ของรีเลย์ทั้งสองด้านของสายส่ง ซึ่งจะมีขดลวดหน่วง (Restraint Coil) ในการหน่วงการตัดวงจรไว้เพื่อป้องกันการตัดวงจรจากความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแส ส่วนในรูปที่ 6.13 จะเป็นหลักการป้องกันด้วยสายนำสัญญาณแบบสมดุลแรงดัน ซึ่งจะทำงานในลักษณะที่คล้ายกันคือหากเกิดการลัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันก็จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขดลวดสั่งตัดวงจรของรีเลย์ทั้งสองด้านของสายส่ง และในกรณีที่ไม่เกิดลัดวงจรหรือเกิดลัดวงจรภายนอกขอบเขตป้องกันก็จะไม่มีการสั่งตัดวงจรจากขดลวดสั่งตัดวงจรของรีเลย์ทั้งสองด้าน ซึ่งวงจรในทางปฏิบัติจะมีอุปกรณ์เสริมที่ซับซ้อนกว่านี้ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.13 หลักการป้องกันด้วยสายนำสัญญาณแบบสมดุลแรงดัน

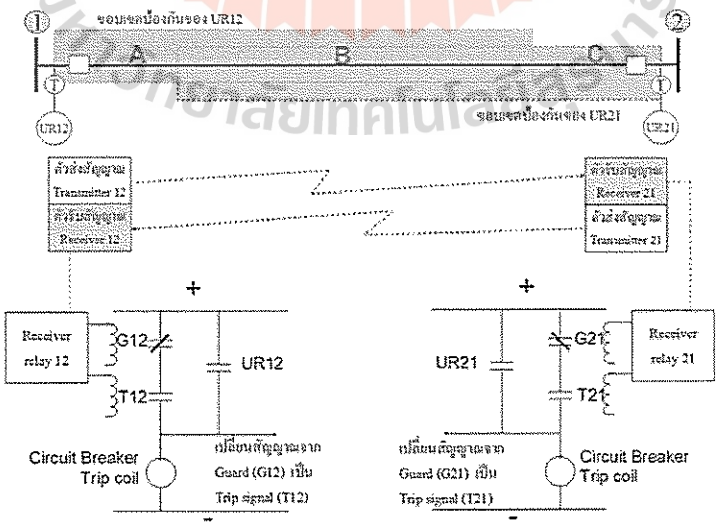


รูปที่ 6.14 ตัวอย่างวงจรการป้องกันด้วยสายนำสัญญาณแบบสมดุลแรงดันที่มีรายละเอียดวงจร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

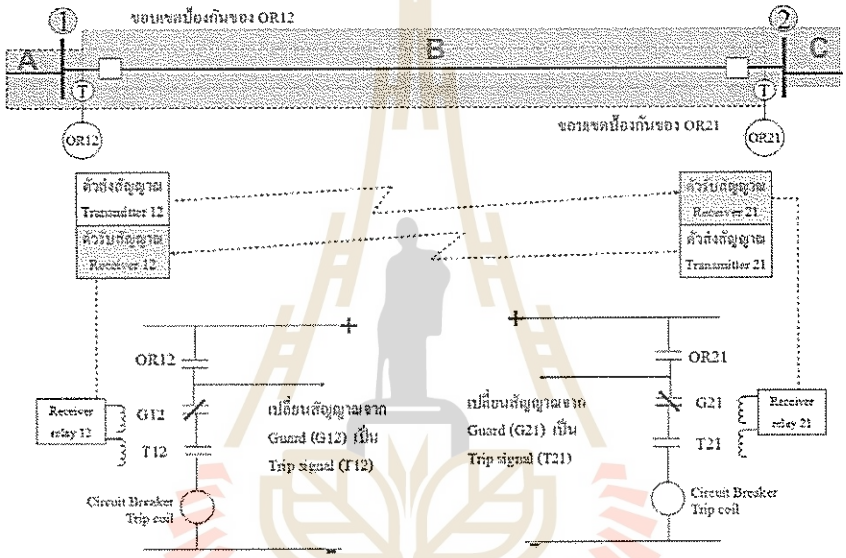
แบบฝึกหัดบทที่ 6

1. จงอธิบายถึงความจำเป็นในการใช้การป้องกันแบบนำสัญญาณ (Pilot Relay) ในสายส่งไฟฟ้ากำลัง
2. วิธีการสื่อสารในการป้องกันแบบนำสัญญาณมีอะไรบ้าง จงอธิบายพร้อมยกตัวอย่าง ข้อดีและข้อเสีย
3. จงอธิบายหลักการป้องกันแบบ การเปรียบเทียบทิศทางเพื่อสั่งให้ไม่ตัดวงจร (Directional Comparison - Blocking) พร้อมเขียนแผนผังวงจรประกอบ
4. จงอธิบายหลักการป้องกันแบบ การเปรียบเทียบทิศทางเพื่อหยุดการสั่งไม่ให้ตัดวงจร (Directional Comparison - Unblocking) พร้อมเขียนแผนผังวงจรประกอบ
5. จงอธิบายหลักการป้องกันแบบการส่งสัญญาณสั่งตัดวงจรโดยการตรวจจับที่ไม่เต็มระยะสายส่ง (Underreaching Transfer Trip) พร้อมเขียนแผนผังวงจรประกอบ
6. จงอธิบายหลักการป้องกันแบบการส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่เกินระยะสายส่ง (Permissive Overreachnign Transfer Trip) พร้อมเขียนแผนผังวงจรประกอบ
7. จงอธิบายหลักการป้องกันแบบการส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่ไม่เต็มและเกินระยะสายส่ง (Permissive Underreachnign Transfer Trip) พร้อมเขียนแผนผังวงจรประกอบ
8. จากรูปที่ P8.1 เป็นการป้องกันแบบการส่งสัญญาณสั่งตัดวงจรโดยการตรวจจับที่ไม่เต็มระยะสายส่ง (Underreaching Transfer Trip) สัญญาณ (Guard Signla, G) จะส่งไว้ตลอดเวลา ดังนั้นในสภาวะปกติหน้าสัมผัสของรีเลย์ทุกตัวจะเปิดอยู่
   8.1 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด A จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่
   8.2 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด B จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่
   8.3 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด C จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่



รูปที่ P8.1 ป้องกันแบบการส่งสัญญาณสั่งตัดวงจรโดยการตรวจจับที่ไม่เต็มระยะสายส่ง

9. จากรูปที่ P9.1 เป็นการป้องกันแบบการส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่เกินระยะสายส่ง (Permissive Overreachnign Transfer Trip) สัญญาณ (Guard Signla, G) จะส่งไว้ตลอดเวลา ดังนั้นในสภาวะปกติหน้าสัมผัสของรีเลย์ทุกตัวจะเปิดอยู่
   9.1 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด A จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่
   9.2 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด B จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่
   9.3 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด C จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่

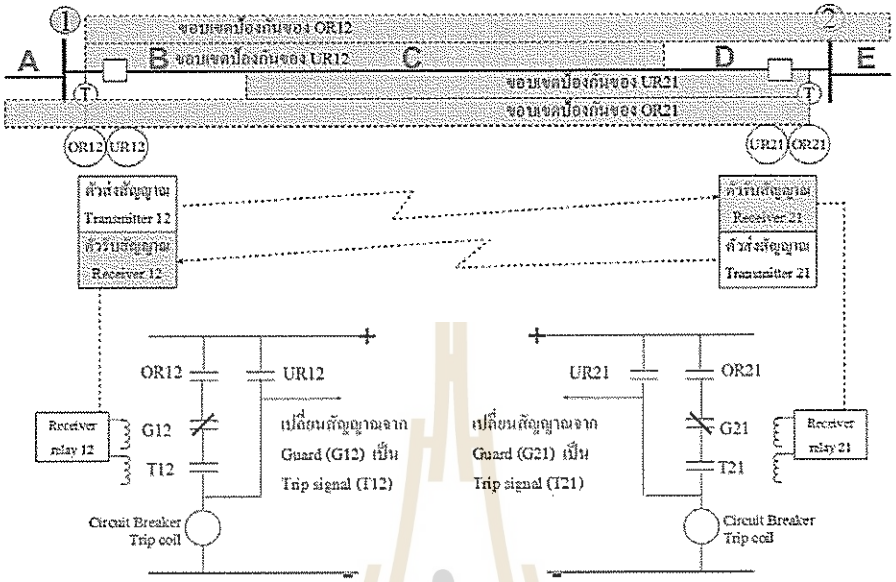


รูปที่ P9.1 การป้องกันแบบการส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่เกินระยะสายส่ง

10. จากรูปที่ P10.1 เป็นการป้องกันแบบการส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่ไม่เต็มและเกินระยะสายส่ง (Permissive Underreachnign Transfer Trip) สัญญาณ (Guard Signla, G) จะส่งไว้ตลอดเวลา ดังนั้นในสภาวะปกติหน้าสัมผัสของรีเลย์ทุกตัวจะเปิดอยู่
   10.1 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด A จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่
   10.2 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด B จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่
   10.3 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด C จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่

10.4 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด D จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่

10.5 เมื่อเกิดลัดวงจรที่จุด E จะมีหน้าสัมผัสไหนบ้างที่ปิดวงจร และการตัดวงจรในสายส่งที่ป้องกันจะเกิดขึ้นหรือไม่



รูปที่ P10.1 การป้องกันแบบการส่งสัญญาณให้ตัดวงจรได้โดยการตรวจจับที่ไม่เต็มและเกินระยะสายส่ง (Permissive Underreachnign Transfer Trip)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 7

การป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(Protection of Generator)

ในบทนี้จะกล่าวถึงการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดใหญ่ โดยในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนดังกล่าวจะต้องมีการพิจารณาความผิดพร่องหรือความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้หลายอย่างนอกเหนือจากการผิดปกติในอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป และถึงแม้ว่าโอกาสในการเกิดการผิดพร่องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่จะมีน้อยมาก แต่ถ้าหากเกิดขึ้นแล้วจะสามารถสร้างความเสียหายทั้งในด้านค่าใช้จ่ายและการทำงานของระบบโดยรวมเป็นอย่างมาก ตัวอย่างความผิดปกติที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังนี้

- การลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์ระหว่างเฟสและลัดวงจรลงดิน (Stator Fault)
- การลัดวงจรในโรเตอร์ (Rotor Fault)
- การทำงานเกินพิกัดกำลัง (Overload)
- การทำงานเกินพิกัดความเร็วรอบ (Overspeed)
- การกระตุ้นต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (Underexcitation)
- การทำงานในสภาวะมอเตอร์ (Motoring)

การผิดพร่องดังกล่าวอาจส่งผลที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น การทำงานเกินพิกัดกำลังกับการลัดวงจร, แรงดันไม่ครบเฟสกับสภาวะไม่สมดุล (Unbalance) เป็นต้น ดังนั้นรีเลย์ที่ออกแบบสำหรับทำหน้าที่ป้องกันการผิดพร่องอย่างหนึ่งอาจทำงานเมื่อเกิดความผิดพร่องอีกอย่างหนึ่ง

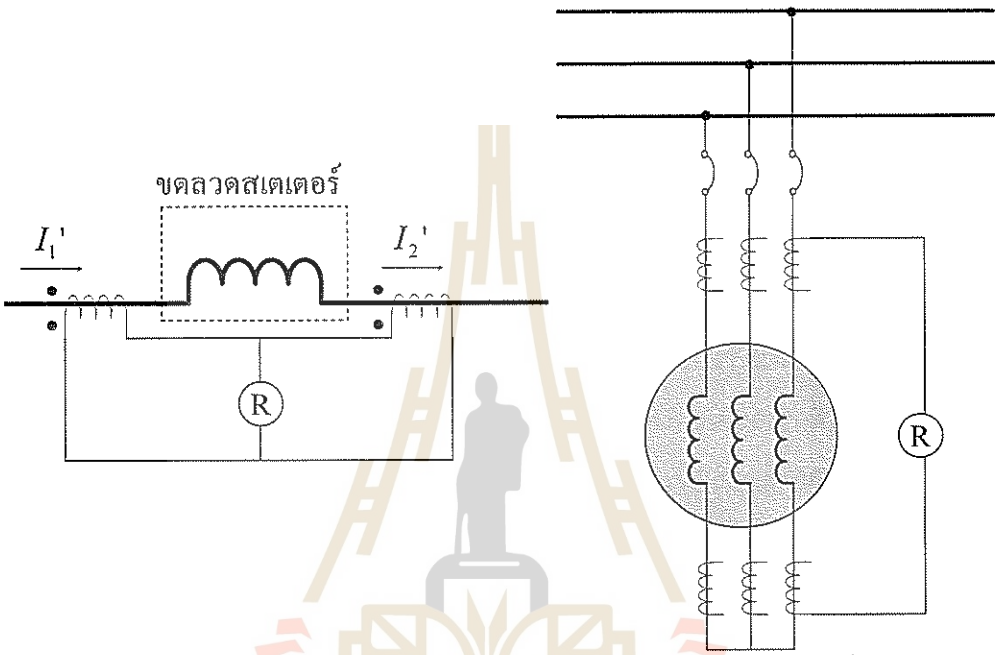
ในบางครั้งการสั่งตัดวงจรเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นอาจสร้างความเสียหายโดยรวมมากกว่าการปล่อยให้เครื่องจักกรกลไฟฟ้าเดินเครื่องแบบฉุกเฉินไปก่อน แต่บางครั้งหาไม่สั่งตัดวงจรให้ทันท่วงทีก็อาจทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเสียหายและมีค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงต้องมีการพิจารณาในการออกแบบในเรื่องดังกล่าวด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันบางอย่างจึงทำหน้าที่ส่งสัญญาณเตือน (Alarm) แทนการสั่งตัดวงจร เพื่อให้ทำการป้องกันด้วยวิธีอื่นเช่น ลดภาระลง หรือ หยุดการทำงานของอุปกรณ์บางอย่าง เป็นต้น การออกแบบให้อุปกรณ์ป้องกันตัดวงจรหรือเพียงส่งสัญญาณเตือนจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของระบบและลักษณะของการผิดพร่อง

7.1 การป้องกันการลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์

การลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนสามารถแบ่งได้เป็น การลัดวงจรระหว่างเฟส และการลัดวงจรลงดิน

7.1.1 การป้องกันการลัดวงจรระหว่างเฟสในขดลวดสเตเตอร์

โดยทั่วไปในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีขนาด 1000 kVA ขึ้นไป (หรือมอเตอร์ที่มีขนาด 1500 hp ขึ้นไป) หรือใช้แรงดัน 5 kV ขึ้นไปจะมีการใช้รีเลย์แบบผลต่าง (Different relay, IEC $\boxed{I_d >}$, IEEE No. “87”) ซึ่งจะมีการติดตั้งหม้อแปลงกระแสที่ปลายทั้งสองด้านของขดลวดสเตเตอร์ก่อนที่จะทำการต่อร่วมนิวทรัล โดยขอบเขตการป้องกันจะอยู่ระหว่างหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 การป้องกันแบบผลต่างในเครื่องจักรกลไฟฟ้า (แสดงเพียงหนึ่งเฟส)

จากรูปที่ 7.1 ในสภาวะปกติหรือเมื่อเกิดการลัดวงจรนอกขอบเขตป้องกันคือไม่อยู่ระหว่างหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 7.2 จะมีกระแสไหลผ่านหม้อแปลงกระแสในทิศทางเดียวกันและมีปริมาณเท่ากัน เมื่อคำนึงถึงค่าความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสจะได้ว่า

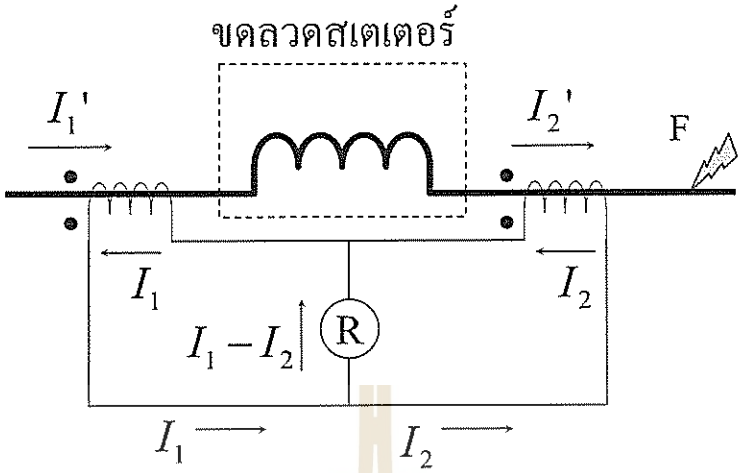
$$I_1 \cong I_2 \qquad (9.1)$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ (R) จะมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแส I_1 และ I_2 ซึ่งจะมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์

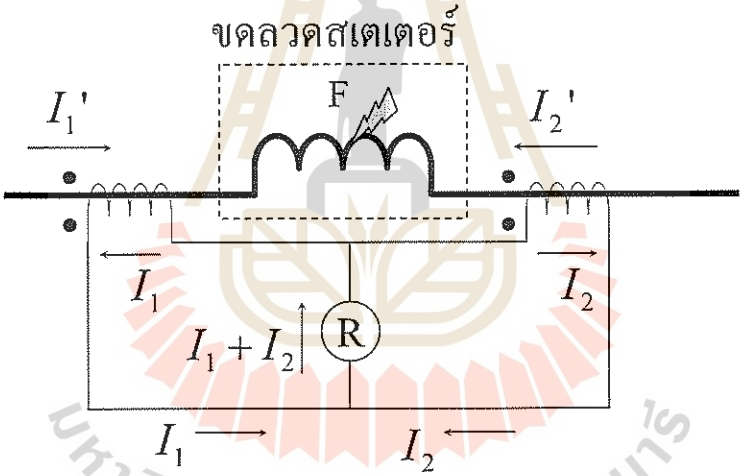
$$I_1 - I_2 \cong 0 \qquad (9.2)$$

เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในขอบเขตป้องกันคืออยู่ระหว่างหม้อแปลงกระแสทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 7.3 กระแสที่ไหลผ่านรีเลย์จะมีค่าสูงมากเนื่องจาก I_1 และ I_2 จะมีทิศทางที่เสริมกันเมื่อไหลผ่านไปยังรีเลย์ ทำให้รีเลย์สั่งตัดวงจร นั่นคือ

$$I_1 + I_2 >> 0 \qquad (9.3)$$



รูปที่ 7.2 ทิศทางของกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรนอกขอบเขตการป้องกัน ในการป้องกันแบบผลต่าง



รูปที่ 7.3 ทิศทางของกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรในขอบเขตการป้องกัน ในการป้องกันแบบผลต่าง

7.1.2 การป้องกันการลัดวงจรลงดินในขดลวดสเตเตอร์

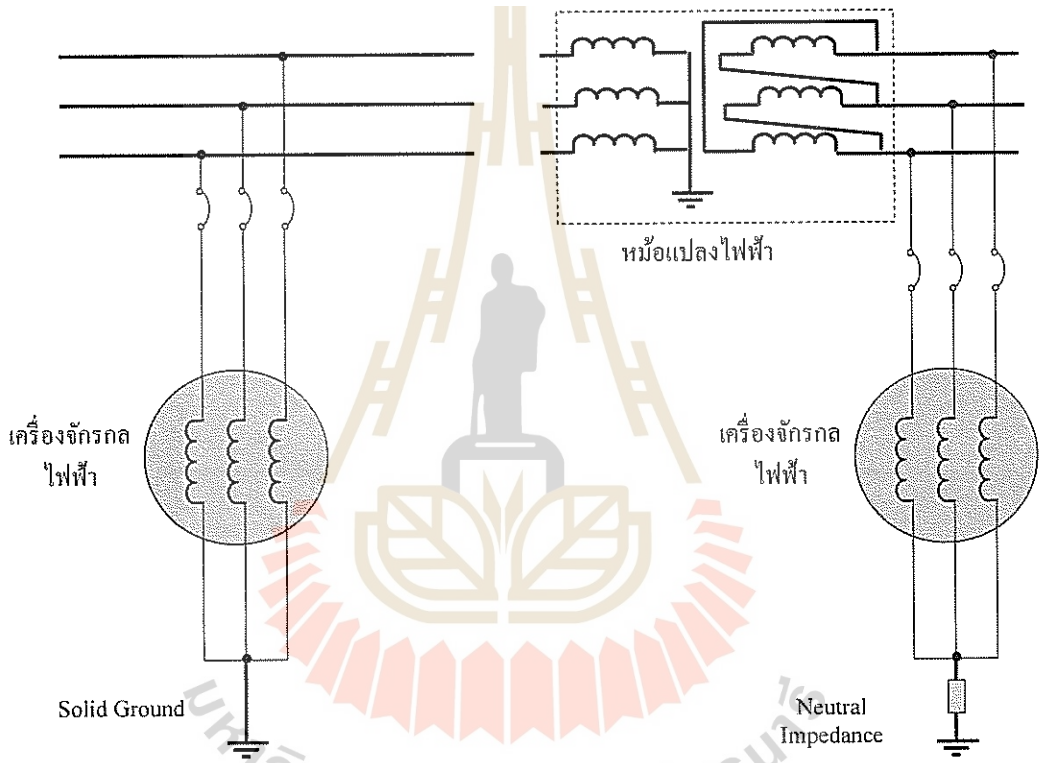
จุดนิวทรัลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามักจะถูกต่อลงดินเพื่อเป็นการป้องกันขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การต่อลงดินจะช่วยป้องกันความเสียหายจากแรงดันเกินชั่วขณะในกรณีที่เกิดลัดวงจรและความผิดพร่องอื่น ๆ

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง โดยมากจะต่ออิมพีแดนซ์ระหว่างจุดนิวทรัลกับจุดต่อลงดินเพื่อจำกัดค่ากระแสลัดวงจรลงดิน การทำให้กระแสลัดวงจรลงดินต่ำลงเป็นการป้องกันความเสียหายในขณะเกิดลัดวงจร แต่ก็เป็นการทำให้ตรวจจับการลัดวงจรทำได้ยากขึ้น

การใช้อิมพีแดนซ์ที่ต่อผ่านหม้อแปลงเรียกว่า หม้อแปลงต่อลงดิน (Earthing Transformer) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง โดยจะมีขนาดในช่วง 5-250 kVA ขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะต่อกับตัวต้านทานที่มีขนาดสอดคล้องกับอัตราส่วนของหม้อแปลง ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้มีค่ากระแสประมาณ 5-20 A

การป้องกันการลัดวงจรลงดินในขดลวดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับวิธีการต่อลงดิน (Grounding) ของตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้าด้วย

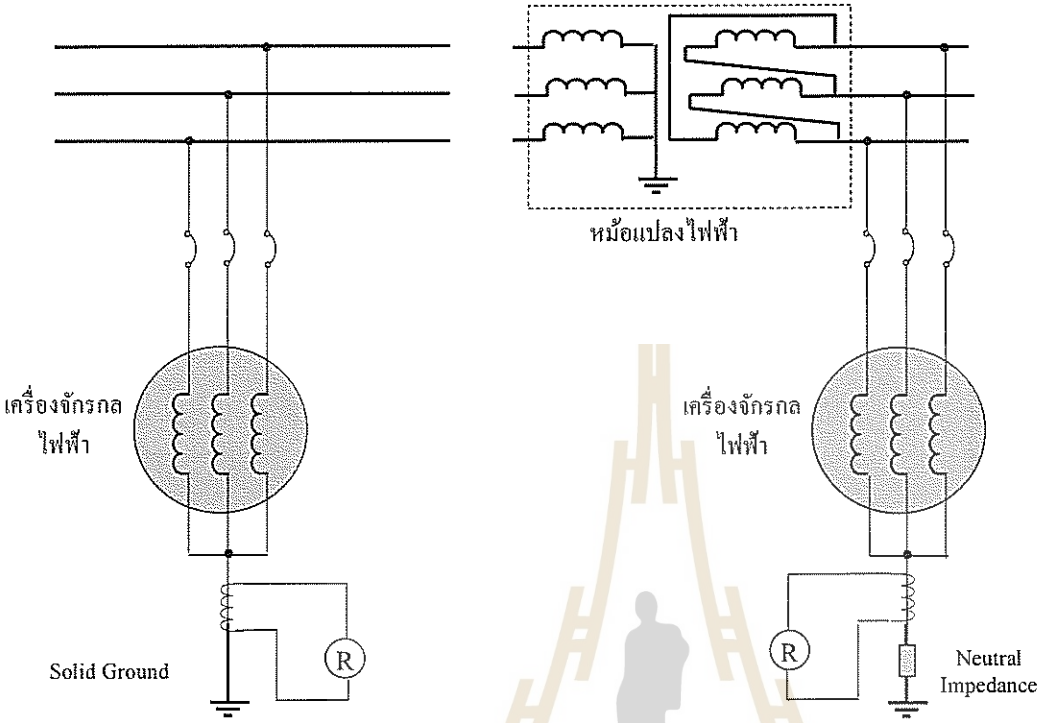
ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการต่อลงดินโดยตรง (Solid Ground) ก็จะมีกระแสลัดวงจรที่สูงแต่ถ้าเป็นการต่อลงดินโดยผ่านอิมพีแดนซ์เพื่อจำกัดกระแสไหลผ่านลงดินก็จะทำมีกระแสลัดวงจรลงดินที่ต่ำและทำให้การออกแบบปรับตั้งรีเลย์ทำได้ยากขึ้นในกรณีที่ใช้รีเลย์แบบผลต่าง รูปที่ 7.4 แสดงการต่อลงดินแบบโดยตรงและแบบมีอิมพีแดนซ์



รูปที่ 7.4 การต่อลงดินแบบโดยตรงและแบบมีอิมพีแดนซ์

เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดิน (Phase to Ground) จะทำให้เกิดกระแสไหลในสาย นิวทรัล เนื่องจากการลัดวงจรดังกล่าวจะทำให้กระแสไหลในแต่ละเฟสไม่สมดุล (Unbalance) ดังนั้นถ้าติดตั้งหม้อแปลงกระแสไว้ที่สายนิวทรัลก่อนที่จะต่อลงดินก็จะสามารถตรวจจับได้ว่ามีกระแสไหลผ่านสายนิวทรัลเกินกว่าที่ควรจะเป็นหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 รีเลย์ที่ต่ออยู่ที่นิวทรัลจะทำการสั่งตัดวงจรในกรณีที่เกิดกระแสไหลผ่านสายนิวทรัลเกินกว่าที่ตั้งไว้ โดยค่าที่ปรับตั้งไว้นี้จะต้องไม่ทำให้รีเลย์ทำงานจากผลของสภาวะไม่สมดุลของการทำงานของเครื่องจักรตามปกติ เช่น กระแสไม่สมดุลจากผลของฮาร์มอนิก ซึ่งจะมีค่าประมาณ 10-15 % ของกระแสพิกัด หรือ ผลจากความไม่สมดุลของระบบที่เชื่อมต่ออยู่ และในกรณีที่ใช้ค่าอิมพีแดนซ์ในการต่อลงดินที่มีค่าสูงก็จะทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำทำให้การ

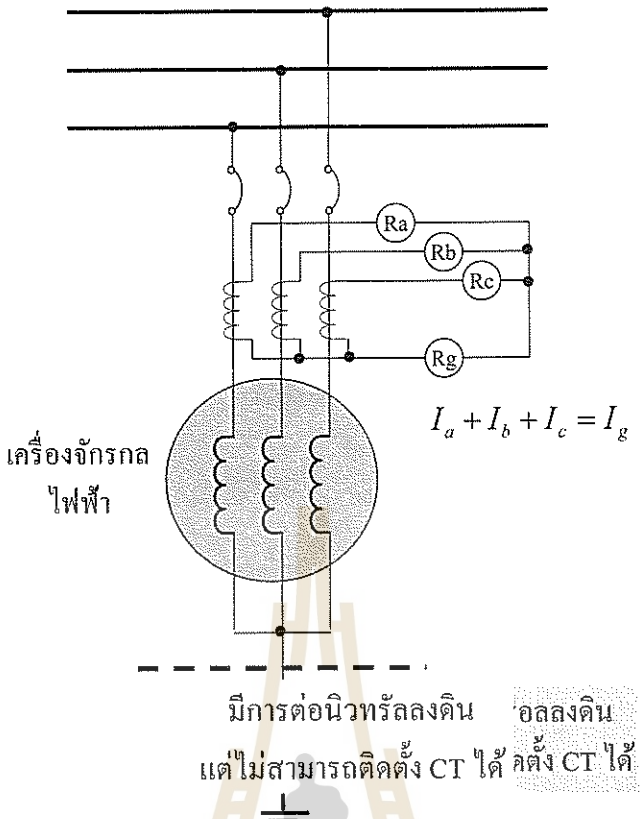
ปรับตั้งรีเลย์ให้แยกแยะระหว่างกระแสไหลผ่านนิวทรัลปกติกับกระแสลัดวงจรลงดินทำได้ค่อนข้างยาก อย่างไรก็ตาม กระแสที่ไหลผ่านนิวทรัลในสภาวะปกติจะมีค่าไม่สูงนักจึงไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของหม้อแปลงกระแสด้วย (แกนเหล็กไม่อิ่มตัว)



รูปที่ 7.5 การป้องกันกระแสลัดวงจรลงดินในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีการต่อลงดินโดยตรง หรือใช้อิมพีแดนซ์ต่อลงดินที่มีค่าต่ำ การป้องกันการลัดวงจรลงดินโดยการตรวจจับที่นิวทรัลจะสามารถใช้รีเลย์ป้องกันแบบทันที (Instantaneous Relay) ในกรณีที่ใช้อิมพีแดนซ์ต่อลงดินที่มีค่าสูง กระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าต่ำและทำให้เกิดความเสียหายที่น้อยกว่า จะใช้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา เนื่องจากจะสามารถปรับตั้งให้มีค่ากระแสทำงานเริ่มต้นที่ต่ำกว่ารีเลย์กระแสเกินแบบทันที โดยจะปรับตั้งให้มีการประวิงเวลาประมาณ 5-10 ลูกคลื่น เพื่อป้องกันการตัดวงจรจากผลของการสับสวิตช์ในระบบไฟฟ้าหรือสภาวะทรานเซี้ยนอื่น ๆ

ในกรณีที่ไม่สามารถติดตั้งหม้อแปลงกระแสที่นิวทรัลได้ก็สามารถใช้วิธีการต่อเพื่อหาค่ากระแสที่ไหลในนิวทรัลจากรวมกระแสที่ไหลในเฟสทั้งสามได้ดังรูปที่ 7.6 วิธีการนี้มักใช้ในกรณีของการป้องกันมอเตอร์ ข้อควรระวังในการใช้วิธีการนี้ก็คือกระแสขณะเริ่มต้นหมุน (Starting Current) ของมอเตอร์ที่มีค่าสูงอาจทำให้หม้อแปลงกระแสเกิดการอิ่มตัวเกิดความคลาดเคลื่อนและมีความผิดพลาดในการทำงานได้ ดังนั้นจึงไม่ควรใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันที และมักจะให้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาโดยปรับตั้งค่าเริ่มต้นทำงานที่ประมาณ 1/5 - 1/3 ของกระแสลัดวงจรต่ำสุดที่เป็นไปได้โดยมีการประวิงเวลาไว้ด้วย

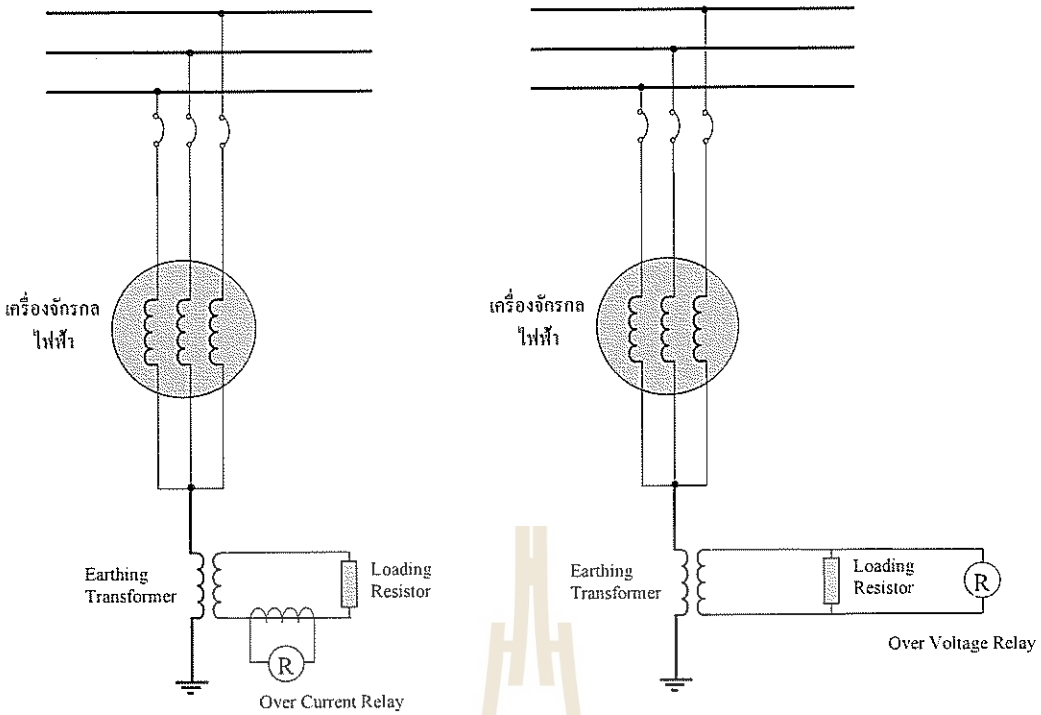


รูปที่ 7.6 การป้องกันการลัดวงจรลงดิน
ในกรณีที่ไม่สามารถติดตั้งหม้อแปลงกระแสที่นิวทรัลได้

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ต่อเข้าระบบโดยผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน (Step-up Transformer) ที่ต่อแบบเดลต้า-สตาร์ จะนิยมใช้วิธีการต่อลงดินโดยผ่านหม้อแปลง (Transformer Ground) และใช้สัญญาณทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงในการตรวจจับกระแสไหลลงดิน

ในกรณีที่มีการต่อลงดินผ่านหม้อแปลงต่อลงดิน (Earthing Transformer) ก็จะตรวจจับการลัดวงจรลงดินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงต่อลงดินดังแสดงในรูปที่ 7.7

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าไม่มีการต่อลงดินที่นิวทรัล (มักจะเป็นมอเตอร์) จะทำให้ไม่มีกระแสไหลในนิวทรัล และการลัดวงจรในตอนแรกจะไม่สามารถตรวจจับได้ด้วยการใช้รีเลย์กระแสเกิน แต่ถ้าเกิดการลัดวงจรเกิดขึ้นอีกจุดก็จะมีผลให้เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสหรือระหว่างขดลวดเดียวกันขึ้น ซึ่งจะสร้างความเสียหายต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่รุนแรงได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจจับสภาวะการลัดวงจรลงดินที่เกิดขึ้นตั้งแต่การเกิดในจุดแรก การตรวจจับการลัดวงจรลงดินในกรณีนี้จะสามารถใช้ PT ที่ต่อด้านปฐมภูมิแบบสตาร์และด้านทุติยภูมิแบบเปิดเดลต้า (Broken delta)



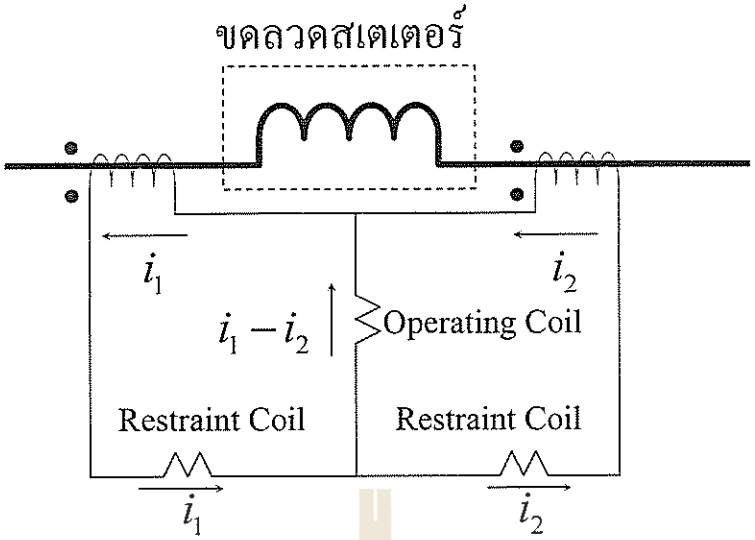
รูปที่ 7.7 การป้องกันลัดวงจรลงดินในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อลงดินผ่านหม้อแปลง

7.2 การป้องกันแบบเปอร์เซ็นต์ผลต่าง

การป้องกันแบบผลต่างในหัวข้อที่ 7.1 ค่อนข้างจะเป็นในทางอุดมคติมากกว่าในทางปฏิบัติ เนื่องจากในทางปฏิบัติจริงหม้อแปลงกระแสแต่ละตัวจะมีความคลาดเคลื่อน (error) ที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้จังมีผลของสายตัวนำด้านทุติยภูมิที่อาจยาวไม่เท่ากันหรืออาจมีอุปกรณ์อื่นต่ออยู่ทางด้านทุติยภูมิทำให้มีค่าเบอร์เดนที่ไม่เท่ากัน ทำให้มีกระทางด้านทุติยภูมิไม่เท่ากันถึงแม้ว่ากระแสทางด้านปฐมภูมิจะเท่ากันก็ตาม

การปรับตั้งรีเลย์จึงต้องให้มีค่ากระแสเริ่มต้นทำงานที่สูงกว่ากระแสที่เกิดเจากความคลาดเคลื่อนนี้ แต่ให้น้อยกว่าค่ากระแสลัดวงจรต่ำสุดที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากค่ากระแสที่คลาดเคลื่อนนี้ยังเกิดขึ้นในขณะที่เกิดลัดวงจรด้วย

การแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นสามารถทำได้โดยการใช้รีเลย์แบบเปอร์เซ็นต์ผลต่าง (Percentage Differential Relay or Bias Differential Relay) โดยรีเลย์แบบเปอร์เซ็นต์ผลต่างจะมีการออกแบบให้มีขดลวดหน่วง (Restraint coil) ดังแสดงในรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 รีเลย์ป้องกันแบบเปอร์เซ็นต์ผลต่าง

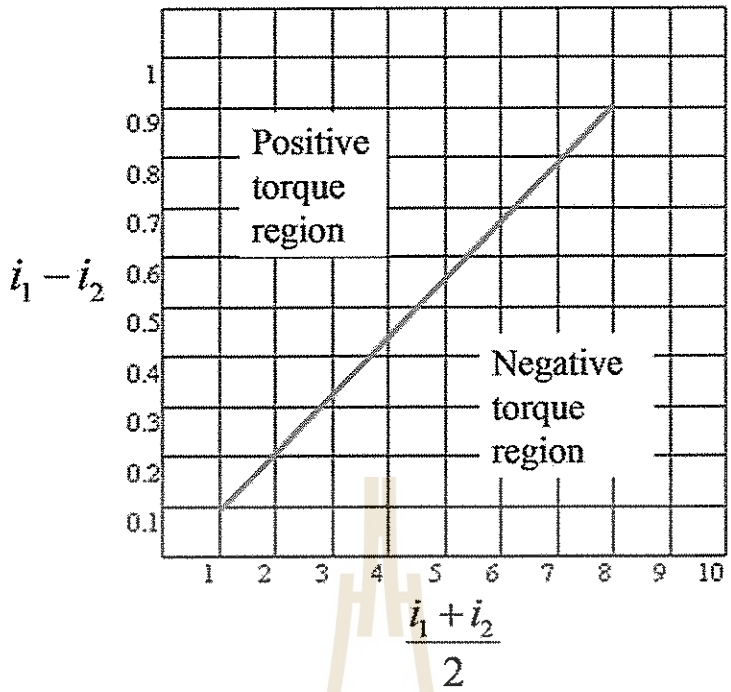
โดยรีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อค่าผลต่างของกระแสมีค่ามากกว่าสัดส่วนที่ตั้งไว้เมื่อเทียบกับกระแสที่ไหลทั้งหมด หรือสามารถแสดงด้วยสมการได้ว่า

รีเลย์จะทำงานก็ต่อเมื่อ $i_d \geq k \cdot i_r$ (9.4)

เมื่อ $i_d = i_1 - i_2$ เป็นค่ากระแสผลต่าง

$i_r = \dfrac{i_1 + i_2}{2}$ เป็นค่ากระแสหน่วง

ตัวอย่างเช่น รีเลย์แบบเปอร์เซ็นต์ผลต่างตั้งการทำงานไว้ที่ 10% จะต้องมีกระแสผลต่างอย่างน้อย 2 A จึงจะทำงาน เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดหน่วงเฉลี่ยทั้งสองขดเท่ากับ 20 A ดังแสดงในรูปที่ 7.9 ค่าสัดส่วนนี้อาจคงที่หรือไม่ก็ได้



รูปที่ 7.9 ตัวอย่างคุณลักษณะของรีเลย์ป้องกันแบบเปอร์เซ็นต์ผลต่าง

ตัวอย่างที่ 7.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 11 kV, 100 MVA ต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานขนาด 5 Ohm ใช้หม้อแปลงกระแส 1000/5 A ปรับตั้งรีเลย์ให้ทำงานเมื่อเกิดกระแสผลต่าง 1 A จะทำให้มีการป้องกันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้กี่เปอร์เซนต์

วิธีทำ เมื่อเกิดลัดวงจรที่ทำให้เกิดกระแสผลต่าง 1 A ไปที่รีเลย์ จะเกิดจากกระแสผลต่างทางด้านปฐมภูมิ (ที่ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) เท่ากับ

$$i_{d_pri} = 1 \cdot \frac{1000}{5} = 200 \quad \text{A}$$

กรณีที่เกิดลัดวงจรที่ตำแหน่ง p% ของขดลวดจากจุดนิวทรัล จะทำให้เกิดกระแสผลต่างจากการลัดวงจรเท่ากับ

$$i_{d_p\%} = \frac{p}{100} \cdot \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 5} \quad \text{A}$$

โดยที่รีเลย์จะทำงานเมื่อ

$$i_{d_p\%} > i_{d_pri}(200 \text{ A})$$

นั่นคือ

$$\frac{p}{100} \cdot \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 5} > 200$$

$$p > 15.75\,\%$$

ซึ่งหมายถึงรีเลย์จะทำงานเมื่อมีกระแสผลต่าง 1 Aด้านทุติยภูมิ หรือ 200 Aด้านปฐมภูมิขึ้นไป ซึ่งเกิดจากการลัดวงจรที่จุดห่างจากจุดนิวทรัลตั้งแต่ 15.75% ขึ้นไป หรือหมายถึงขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้รับการป้องกัน 84.25% (อย่างไรก็ตามที่จุดใกล้นิวทรัลจะไม่เกิดการลัดวงจรได้ง่ายเนื่องจากแรงดันตกคร่อมระหว่างจุดดังกล่าวกับจุดนิวทรัลมีค่าไม่สูง)

ตัวอย่างที่ 7.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 11 kV, 100 MVA มีการป้องกันโดยใช้รีเลย์ผลต่างโดยมีการป้องกันการลัดวงจรลงดินที่ 85% ของขดลวดสเตเตอร์ โดยปรับตั้งรีเลย์ให้ทำงานที่ค่ากระแสไม่สมดุลเท่ากับ 20% ของกระแสพิกัด จะต้องติดตั้งตัวต้านทานต่อลงดินที่จุดนิวทรัลขนาดเท่าใด

วิธีทำ ค่ากระแสผลต่างจากการลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิที่ต้องการให้รีเลย์ทำงานคือ

$$i_{d_pri} = \frac{20}{100} \cdot \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 11 \times 10^3} = 1049.76 \text{ A}$$

ในกรณีนี้ต้องการให้มีการป้องกัน 85% ของขดลวด นั่นคือส่วนที่ไม่ได้รับการป้องกันจะเท่ากับ 15% นั่นคือค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าเป็น 1049.76 A

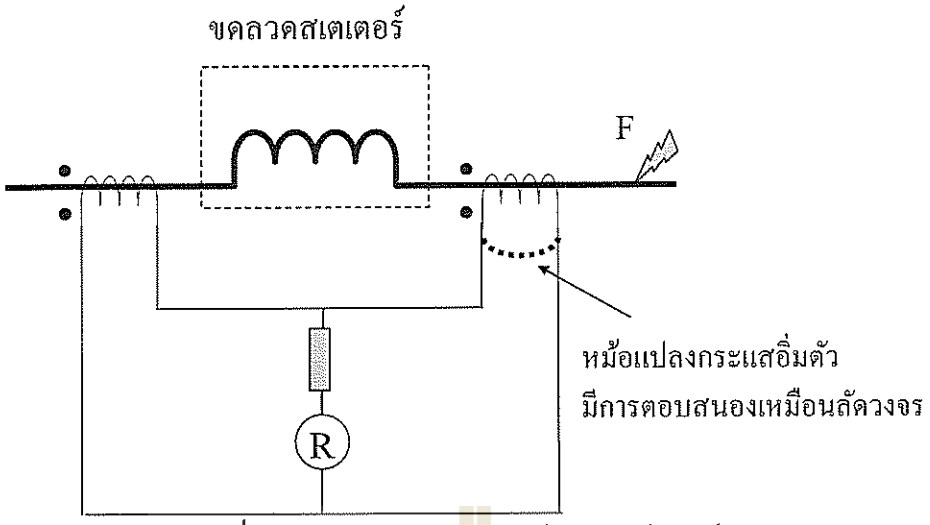
$$\frac{15}{100} \cdot \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot R_G} = 1049.76$$

$$R_G = 0.91 \ \Omega$$

ถ้าต่อความต้านทานลงดินไม่เกิน 0.91 Ohm จะทำให้การลัดวงจรลงดินที่ระยะ 15% ห่างจากจุดนิวทรัลมีค่ากระแสไม่ต่ำกว่า 1049.76 A

7.3 รีเลย์แบบอิมพีแดนซ์สูง

การใช้รีเลย์แบบอิมพีแดนซ์สูงเป็นการป้องกันแบบผลต่างที่มีการแก้ปัญหาการทำงานผิดพลาดของรีเลย์จากความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสในขณะที่เกิดการลัดวงจรอีกวิธีหนึ่ง โดยเป็นการใช้หลักการที่หม้อแปลงกระแสที่อิ่มตัวจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำมากและถ้าต่ออิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงอนุกรมกับรีเลย์ก็จะทำให้กระแสไหลผ่านไปยังหม้อแปลงกระแสที่เกิดอิ่มตัวแทนที่จะไหลไปรีเลย์ ทำให้ไม่เกิดการตัดวงจรผิดพลาดนอกขอบเขตป้องกัน ดังรูปที่ 7.10

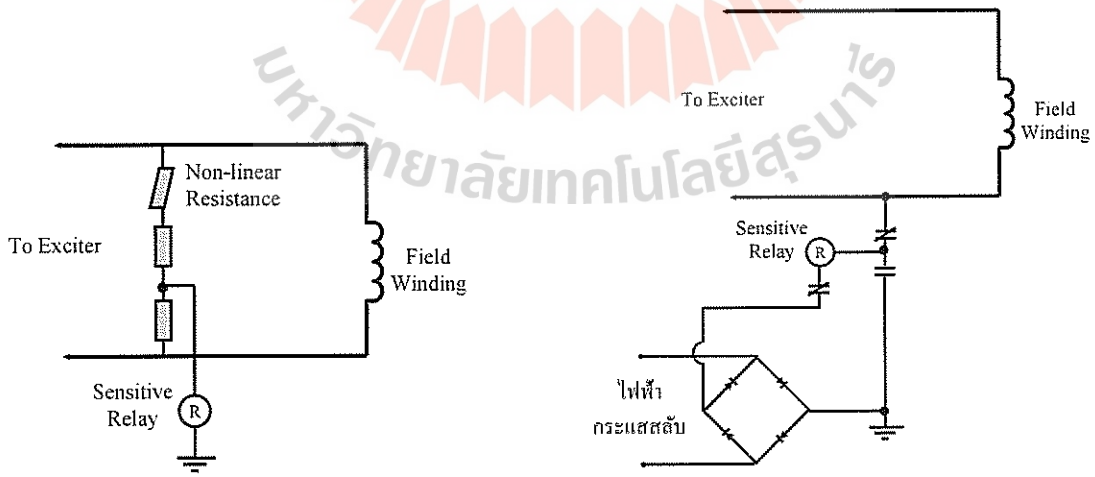


รูปที่ 7.10 การป้องกันด้วยรีเลย์แบบอิมพีแดนซ์สูง

7.4 การป้องกันการลัดวงจรในโรเตอร์

โดยทั่วไปการจ่ายกระแสกระตุ้นสนาม (Exiting current) ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะไม่มีการต่อลงดินของระบบ ทำให้การลัดวงจรลงดินเพียงหนึ่งจุดจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายในทันที แต่อาจเกิดความเครียดทางไฟฟ้าต่อฉนวนในส่วนอื่นและทำให้ลัดวงจรลงดินในจุดอื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเกิดผลจากสภาวะไม่สมดุลของแรงแม่เหล็กทำให้โรเตอร์เสียสมดุลเกิดความร้อนและการสั่นสะเทือน ผลที่ตามมาคือจะทำให้โรเตอร์บิดเบี้ยวได้

การป้องกันโดยมากจะออกแบบให้มีการส่งสัญญาณเตือน (Alarm) เมื่อเกิดการลัดวงจรลงดินที่จุดแรกขึ้น เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานได้เตรียมหยุดการเดินเครื่องให้ทันท่วงที รูปที่ 7.11 แสดงการตรวจสอบการลัดวงจรลงดินโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Detector) และใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Detector) โดยวงจรตรวจจับการลัดวงจรลงดินจะต่อผ่านค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงมากของรีเลย์ เมื่อเกิดการลัดวงจรในขดลวดกระตุ้นสนาม (Field winding) จะมีกระแสไหลผ่านรีเลย์และจะทำให้มีสัญญาณเตือนขึ้น



a b

รูปที่ 7.11 a การตรวจสอบการลัดวงจรลงดินโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Detector)
b การตรวจสอบการลัดวงจรลงดินโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Detector)

ในกรณีที่จ่ายกระแสกระตุ้นโดยไม่ใช้แปรงถ่าน (Brushless Synchronous Machine) จะไม่สามารถต่อวงจรเพื่อตรวจสอบการลัดวงจรในโรเตอร์ได้ตลอดเวลาแต่จะสามารถใช้แปรงถ่านวัดสัญญาณ (Pilot Brush) เคลื่อนเข้าไปแตะที่จุดวัดตามระยะเวลาที่กำหนด หรือใช้การวัดค่าความต้านทานของขดลวดกระตุ้นสนามในขณะที่ไม่ได้เดินเครื่อง

7.5 การป้องกันการทำงานในสภาวะกระแสไม่สมดุล (Unbalance Current)

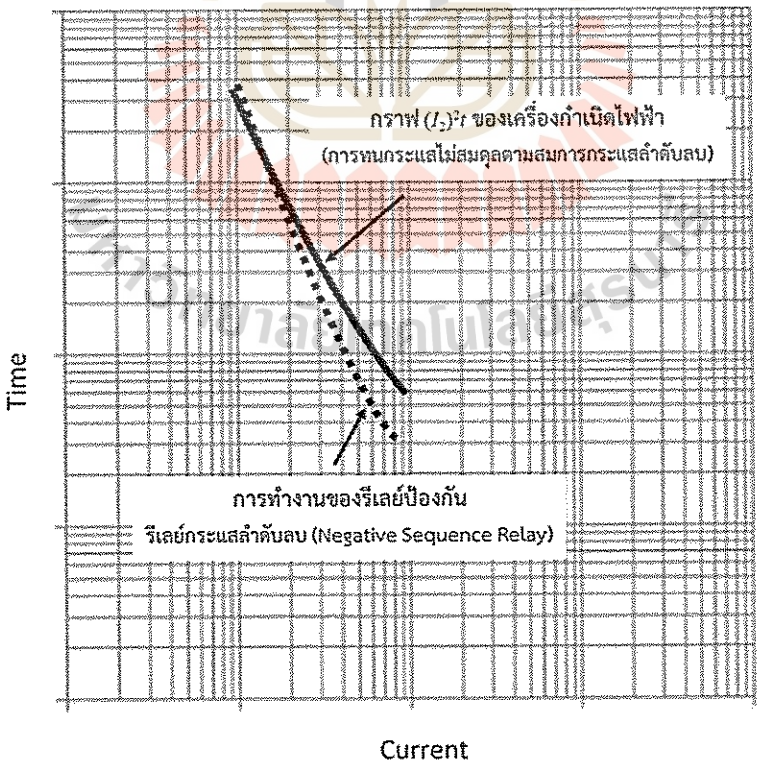
การเกิดกระแสไหลอย่างไม่สมดุลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือการลัดวงจรแบบไม่สมมาตร จะทำให้เกิดความเสียหายจากความร้อน โดยกระแสลำดับลบ (Negative Sequence Impedance) ที่เกิดขึ้น จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสความถี่สูงในโรเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลในบริเวณผิวของโรเตอร์ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และหากไม่ได้รับการป้องกันที่ทันเวลาก็จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของโรเตอร์

หลักการป้องกันโดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่ากระแสลำดับลบมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$(I_2)^2 t \le K \qquad (9.5)$$

โดย I_2 เป็นกระแสลำดับลบที่เกิดขึ้น (p.u.)

t เป็นระยะเวลาที่เกิดกระแสไหล



รูปที่ 7.12 กราฟการทนกระแสลำดับลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

และการทำงานของรีเลย์ป้องกัน

K เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดและวิธีระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งอาจพิจารณาอย่างง่ายว่าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 800 MVA จะใช้ค่า K = 10 ส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่กว่า 800 MVA จะสามารถใช้ค่า *K* ตามสมการ

$$K = [10 - (0.00625)(MVA - 800)] \quad (9.6)$$

เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1000 MVA จะมีค่า *K* = 8.75 และในกรณีของมอเตอร์โดยปกติจะใช้ค่า K เท่ากับ 40 อย่างไรก็ตามค่า K อาจสูงถึง 60 ได้ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำที่เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Saliant Pole) จึงควรดูข้อมูลจากผู้ผลิตเป็นหลัก

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ขนาดใหญ่จะป้องกันสภาวะไม่สมดุลโดยการใช้รีเลย์ตรวจจับกระแสลำดับลบ (Negative Sequence Relay) ดังตัวอย่างในรูปที่ 7.12 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเตือนให้ผู้ปฏิบัติงานได้ทราบถึงสภาวะที่ผิดปกติ และทำการเตรียมพร้อมก่อนที่จะหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในมอเตอร์ขนาดเล็กมักจะใช้รีเลย์ตรวจจับความมสมดุลของเฟส (Phase Balance Relay)

7.6 การป้องกันการทำงานเกินพิกัดกำลัง (Overload)

การป้องกันการทำงานเกินพิกัดกำลังในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถ้าหากมีก็จะเป็นการป้องกันสำรองระบบป้องกันบัสที่ต่ออยู่ ทั้งนี้การป้องกันการทำงานเกินพิกัดกำลังในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถใช้รีเลย์กระแสเกินเพียงอย่างเดียวได้เนื่องจากกระแสที่ไหลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกจำกัดโดยค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถึงแม่ว่าจะเกิดลัดวงจรก็ยังมีกระแสลัดวงจรที่ใกล้เคียงกับกระแสพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การป้องกันจึงต้องใช้รีเลย์แบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Relay) ซึ่งจะสามารถปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานให้ต่ำกว่ากระแสพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้โดยที่ยังไม่ทำงานนอกจากว่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลงจากผลของการผิดพร่อง

7.7 การป้องกันการทำงานเกินพิกัดความเร็วรอบ (Overspeed)

การป้องกันสภาวะทำงานเกินพิกัดความเร็วรอบในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้วิธีติดตั้งอุปกรณ์ที่ชุดขับเคลื่อน (Prime Mover) ซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (Cebtrifugal) ของแกนหมุนหรือเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในลักษณะเดียวกันคือจะทำงานเมื่อความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกินพิกัดความเร็วรอบการทำงานในสภาวะความเร็วรอบเกิดพิกัดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ากำลัง และจะเกิดอันตรายต่อกังหัน (Turbine) มากกว่าต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในกรณีของมอเตอร์การทำงานเกินพิกัดความเร็วรอบจะไม่มีปัญหามากนัก เนื่องจากรีเลย์กระแสเกินจะทำหน้าที่ป้องกันทางอ้อมให้อยู่แล้ว

7.8 การป้องกันจากแรงดันและความถี่ไฟฟ้าที่ผิดปกติ

สภาวะผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่อาจเกิดขึ้นได้มีดังต่อไปนี้

- แรงดันเกิน (Overvolatge)
- แรงดันต่ำ (Undervoltage)
- ความถี่เกิน (Overfrequency)
- ความถี่ต่ำ (Underfrequency)

7.8.1 สภาวะแรงดันเกินพิกัด (Overvoltage)

แรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ และกระแสกระตุ้น (Exitation) การเกิดแรงดันเกินจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กคล้องผ่านแกนเหล็กในปริมาณที่สูงและทำให้เกิดความเสียหายจากความร้อนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ฟลักซ์แม่เหล็กที่มากเกินไปจะทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวและไหลผ่านส่วนอื่น ๆ ที่เป็นตัวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนในแกนเหล็กและส่วนอื่น ๆ ที่เป็นตัวนำที่ต่ออยู่ การกระตุ้นที่มากเกินไปจะสามารถทำให้เกิดความเสียหายได้ในระยะเวลาอันสั้น

เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันและแปรผกผันกับความถี่ ดังนี้การพิจารณาสภาวะแรงดันเกินจะใช้ค่าสัดส่วนแรงดันเป็น p.u. ต่อความถี่เป็น p.u. เรียกว่า โวลต์ต่อเฮิร์ต (V/Hz) โดยถ้าหากมีค่า V/Hz สูงกว่าค่าที่ออกแบบไว้จะหมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในสภาวะแรงดันเกิน ตัวอย่าง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกออกแบบให้สามารถทนสภาวะ V/Hz ได้ 105% ของค่า V/Hz พิกัด หมายถึง สภาวะแรงดันเกินจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันมีค่าเป็น 105% ที่ความถี่พิกัด หรือจะเกิดเมื่อแรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันพิกัดแต่ความถี่มีค่าเป็น 95% ของความถี่พิกัด การป้องกันลักษณะนี้บางครั้งเรียกว่าการป้องกันฟลักซ์เกิน (Overfluxing Protection)

7.8.2 สภาวะแรงดันต่ำกว่าพิกัด (Undervoltage)

การเกิดสภาวะแรงดันต่ำกว่าพิกัดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่ก่อให้เกิดปัญหากับตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ยกเว้นต่ออยู่กับระบบและมีการจ่ายกระแสกระตุ้นน้อยเกินไปซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป) แต่จะทำให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่มากกว่า

ส่วนในกรณีของมอเตอร์จะทำให้มีความเร็วรอบต่ำลงและมีกระแสไหลสูงกว่าพิกัดซึ่งรีเลย์กระแสเกินจะทำหน้าที่ป้องกันในกรณีนี้ได้ อย่างไรก็ตามยังมักจะมีการติดตั้งรีเลย์ป้องกันแรงดันตกไว้ด้วย เพื่อป้องกันความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และดิจิทัล

7.8.3 สภาวะความถี่เกินพิกัด (Overfrequency)

ความถี่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะสัมพันธ์กับความเร็วรอบ ทั้งนี้จะมีอุปกรณ์ป้องกันความเร็วรอบเกินพิกัดอยู่แล้ว แต่ก็ยังสามารถมีรีเลย์ป้องกันความถี่เกินเป็นการป้องกันสำรองอุปกรณ์ป้องกันความเร็วรอบเกินพิกัดได้ โดยรีเลย์ป้องกันความถี่เกินอาจทำหน้าที่ส่งสัญญาณเตือน (Alarm) เมื่อเกิดสภาวะความถี่เกิน

7.8.4 สภาวะความถี่ต่ำกว่าพิกัด (Underfrequency)

การเกิดสภาวะความถี่ต่ำจะเป็นการที่ความเร็วรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลงซึ่งจะมีผลให้การระบายความร้อนจะลดลง ดังนั้นที่สภาวะความถี่ต่ำกว่าพิกัดเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะต้องทำงานที่กำลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัด การเกิดสภาวะความถี่ต่ำ (หรือความเร็วรอบต่ำ) จะเป็นอันตรายต่อกังหัน (Turbine) มากกว่าตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากจะผลของแรงเครียดทางกลกระทำต่อตัวกังหันทำให้อายุการใช้งานกังหันลดลงเมื่อเกิดขึ้นบ่อย ๆ จึงต้องมีการป้องกันในลักษณะการเก็บข้อมูลสถิติย้อนหลังเทียบกับข้อมูลคุณลักษณะของกังหันจากผู้ผลิตในการวางแผนการซ่อมบำรุงกังหัน

7.9 การป้องกันเมื่อสูญเสียกระแสกระตุ้น (Loss of Excitation)

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสูญเสียกระแสกระตุ้น (Loss of Excitation) หรือมีกระแสกระตุ้นต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (Under Excitation)ก็จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Generator) ที่มีความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแบบโรเตอร์ทรงกระบอก (Round Rotor) หรือเรียนกว่าแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (Non-Saliant Pole) จะมีขดลวดหน่วง (Damping Winding) ซึ่งจะช่วยทำหน้าที่ในลักษณะเดียวกันกับขดลวดแบบกรงกระรอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงไม่เกิดปัญหาความร้อนในเหล็กโรเตอร์

อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงต้องมีกระแสกระตุ้นในการที่จะรักษาเสถียรภาพในการทำงาน การตรวจสอบสภาวะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับกระแสกระตุ้นต่ำกว่าที่ควรจะเป็นทำได้หลายวิธี ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะสามารถใช้รีเลย์ตัวประกอบกำลัง (Power Factor Relay) หรือรีเลย์การไหลย้อนกลับของกำลังงานไฟฟ้า (Reverse Power Relay) วิธีที่นิยมที่สุดคือการใช้รีเลย์อิมพีแดนซ์ (Impedance Relay) ที่ปรับตั้งให้ตรวจสอบสภาวะการกระตุ้นต่ำกว่าที่ควรจะเป็นทางอ้อมจากค่ากำลังงานรีแอคทีฟที่ไหลโดยเทียบบน R-X Diagram เมื่อตรวจสอบพบความผิดพลาดก็จะส่งสัญญาณเตือน (Alarm) ให้ผู้ปฏิบัติงานทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น หรือส่งสัญญาณหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบฝึกหัดบทที่ 7

1. จงอธิบายหลักการป้องกันการลัดวงจรระหว่างเฟสในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. จงอธิบายหลักการป้องกันการลัดวงจรลงดินในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่สามารถติดตั้งหม้อแปลงกระแสที่สายนิวทรัลและกรณีที่ไม่สามารถติดตั้งหม้อแปลงกระแสที่สายนิวทรัลได้ และในกรณีที่ไม่มีการต่อสายนิวทรัล
3. จงบอกเหตุผลถึงความจำเป็นในการใช้รีเลย์ป้องกันแบบเปอร์เซนต์ผลต่าง (Percentage Differential Relay) พร้อมทั้งอธิบายหลักการทำงาน
4. จงอธิบายหลักการป้องกันการลัดวงจรในโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
5. จงอธิบายหลักการป้องกันการทำงานในสภาวะกระแสไม่สมดุล (Unbalance Current) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
6. จงอธิบายหลักการป้องกันการทำงานเกินพิกัดกำลัง (Overload) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
7. จงอธิบายหลักการป้องกันการทำงานเกินพิกัดความเร็วรอบ (Overspeed)ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
8. จงอธิบายหลักการป้องกันแรงดันและความถี่ไฟฟ้าที่ผิดปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
9. จงอธิบายหลักการป้องกันเมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสสูญเสียกระแสกระตุ้น (Loss of Excitation) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 8
การป้องกันมอเตอร์
(Protection of Motor)

ในการป้องกันมอเตอร์จะมีหลักการเดียวกับการป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในบทที่ 9 ที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน (Rotating Machine) เหมือนกัน และการป้องกันหลักจะเป็นการป้องกันความเสียหายจากกระแสเกินในขดลวดสเตเตอร์เป็นหลัก โดยในมอเตอร์จะต้องมีการป้องกันสภาวะการทำงานเกินพิกัด การป้องกันอุณหภูมิสูง และป้องกันสภาวะโรเตอร์ไม่หมุน (Stalled or Locked Rotor) อย่างรัดกุมด้วย

ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้มอเตอร์เสียหายหรือมีอายุการใช้งานลดลงโดยมากจะเกิดจากฉนวนของขดลวดเตเตอร์ถูกทำลายหรือเสื่อมสภาพลง ปัจจัยที่ทำให้อายุของฉนวนสั้นลงมีหลายอย่าง เช่น ใช้งานในบริเวณที่มีความชื้นสูง ใช้งานเกินพิกัด มีความร้อนสูง (โดยอายุฉนวนจะสั้นลง ถ้าอุณหภูมิขดลวดเพิ่มขึ้น) ดังนั้นในการใช้งานมอเตอร์จึงต้องระมัดระวังในการจำกัดอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไป ความเสียหายต่อขดลวดยังมีสาเหตุอื่นได้ เช่น การเสื่อมสภาพของฉนวนจากสภาวะแรงดันเกิน หรือ จากแรงทางกล

8.1 หลักการป้องกันมอเตอร์

หลักการป้องกันมอเตอร์ประกอบด้วย

- การป้องกันการลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์ (Stator Fault Protection) ประกอบด้วย
  - การป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างเฟส (Phase Over-Current Protection)
  - การป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน (Ground Fault Protection)
  - การป้องกันการลัดวงจรด้วยรีเลย์ผลต่าง (Differential Protection)
- การป้องกันการทำงานเกินพิกัด (Overload Protection)
- การป้องกันสภาวะมอเตอร์ไม่หมุน (Locked Rotor Protection)
- การป้องกันอุณหภูมิสูง (Over Temperature Protection)
- การป้องกันมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องซ้ำ (Frequent or Repetitive Start Protection)
- การป้องกันสภาวะที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าผิดปกติ ประกอบด้วย
  - การป้องกันสภาวะแรงดันต่ำ (Under-Voltage Protection)
  - การป้องกันสภาวะแรงดันเกิน (Over-Voltage Protection)
  - การป้องกันสภาวะแรงดันไม่สมดุล (Unbalance Protection)
  - การป้องกันสภาวะความถี่ผิดปกติ (Abnormal Frequency Protection)

8.2 การป้องกันขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์

การป้องกันขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์อาจแบ่งออกเป็นการป้องกันลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์ การป้องกันการทำงานเกินพิกัด (Overload Protection) การป้องกันอุณหภูมิสูง (Over Temperature Protection) การป้องกันสภาวะโรเตอร์ไม่หมุน (Locked Rotor Protection) และการป้องกันการเริ่มเดินเครื่องซ้ำ (Frequent Start or Repetitive Start Protection)

8.2.1 การป้องกันลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์

ในการป้องกันมอเตอร์ จะต้องมีการป้องกันการลัดวงจรเป็นอุปกรณ์มาตรฐานติดตั้งทุกเฟส ซึ่งอาจใช้รีเลย์หรือฟิวส์ก็ได้ กรณีที่ใช้ฟิวส์จะต้องคำนึงถึงสภาวะไม่สมดุล (Unbalance) ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อฟิวส์ขาดบางเฟส และฟิวส์ต้องไม่ขาดในขณะที่เริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ โดยปกติจะปรับตั้งให้ทำงานที่ 250-300% ของกระแสพิกัด (Full Load Amp, FLA, I_{FL}) สำหรับฟิวส์ขนาดไม่เกิน 600 A อาจปรับตั้งที่ 400% ของกระแสพิกัด เพื่อให้สามารถเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 8.1 การป้องกันผลต่างแบบสมดุลตนเอง (Self-Balancing Differential Protection)

กรณีที่ใช้รีเลย์ ถ้ามอเตอร์มีขนาด kVA เล็กกว่า 50% ของหม้อแปลงที่จ่ายไฟฟ้าให้มอเตอร์ จะสามารถใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันที (Instantaneous Over Current Relay, IOC, 50) ป้องกันการลัดวงจรในเฟส โดยให้ทำงานสัมพันธ์กับกระแสเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ สำหรับมอเตอร์ที่ขนาดใหญ่กว่า 50% ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องใช้รีเลย์ผลต่างช่วยใน

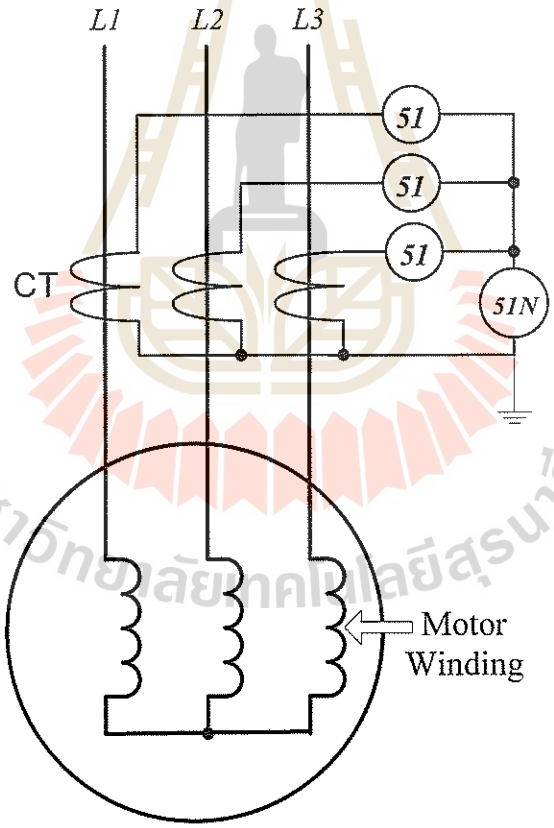
การป้องกันการลัดวงจรในเฟส โดยรีเลย์ที่ใช้จะเป็นรีเลย์เปอร์เซนต์ผลต่าง มีค่าปรับตั้งที่ 10-20% ของค่ากระแสพิกัด โดยทั่วไปมีค่าเปอร์เซนต์หรือความชันที่ 10-25 %

การป้องกันอีกแบบหนึ่งคือการป้องกันผลต่างแบบสมดุลตนเอง (Self-Balancing Differential Protection) โดยคล้องหม้อแปลงกระแสผ่านทั้งขาเข้าและออกของขดลวดแต่ละขด ซึ่งวิธีนี้จะสามารถป้องกันการลัดวงจรลงดินได้รัดกุมขึ้น โดยรีเลย์จะปรับตั้งไว้ที่ประมาณ 0.25-1.0 A การต่อวงจรการป้องกันผลต่างแบบสมดุลตนเอง (Self-Balancing Differential Protection) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.1

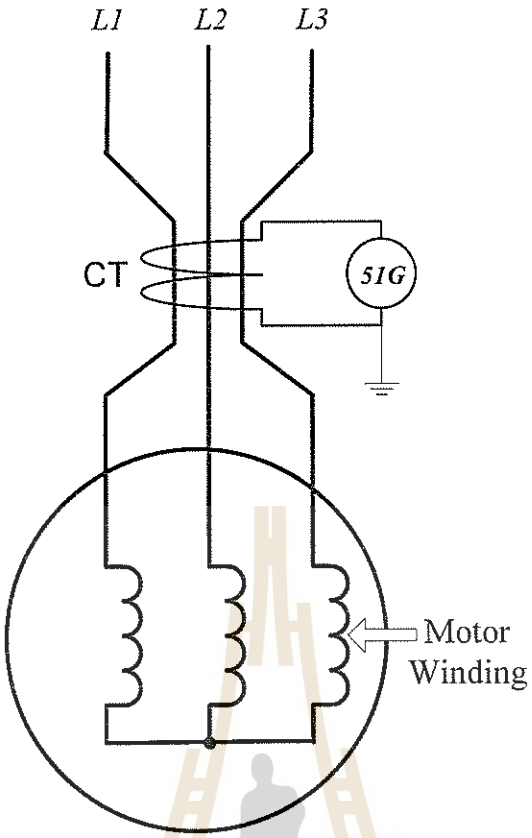
สำหรับการตรวจวัดกระแสลัดวงจรลงดินในมอเตอร์สามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อลงดินของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยหลักการจะเป็นการวัดจากผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟสที่จะไม่รวมกันเป็นศูนย์ในขณะที่เกิดลัดวงจรลงดิน โดยแบ่งออกเป็น

- Residual Connected Ground Overcurrent
- Core Balance Current Transformer Scheme

ซึ่งจะสามารถแสดงวงจรการป้องกันได้ดังรูปที่ 8.2 และ 8.3 ตามลำดับ



รูปที่ 8.2 การป้องกันการลัดวงจรลงดินแบบ Residual Connected Ground Overcurrent



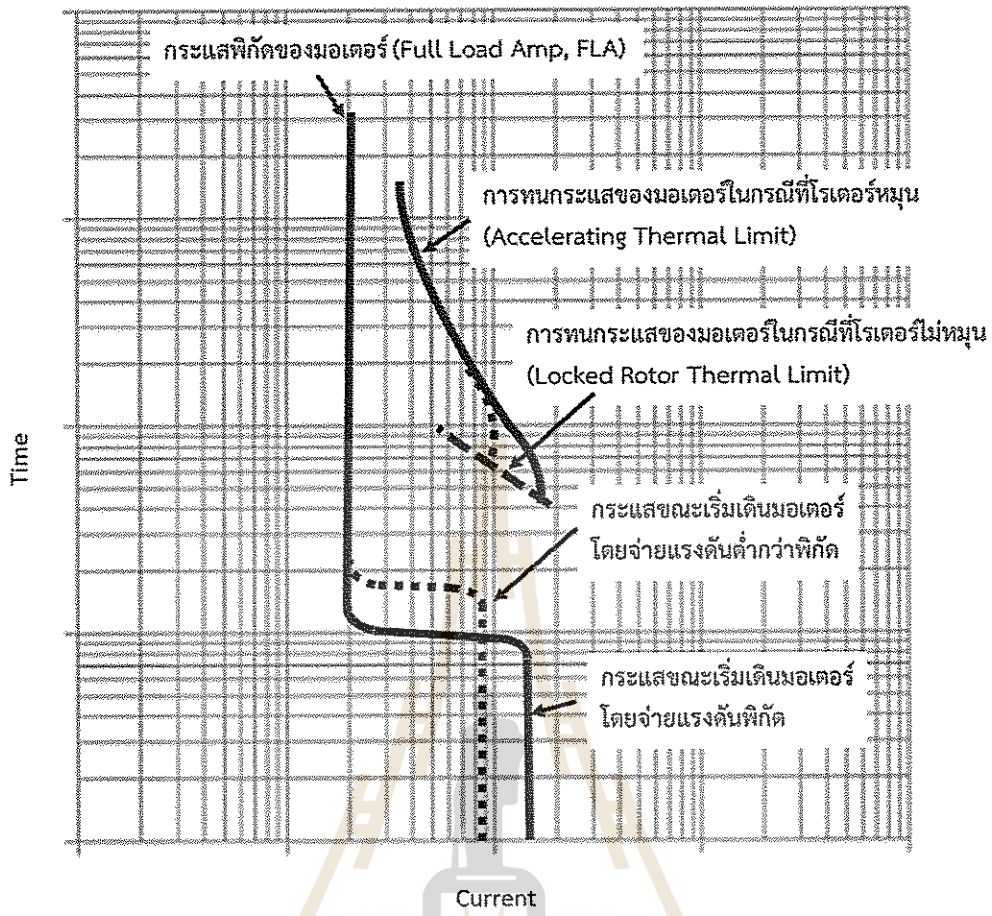
รูปที่ 8.3 การป้องกันการลัดวงจรลงดินแบบ
Core Balance Current Transformer Scheme

8.2.2 การป้องกันโหลดเกินในมอเตอร์

การใช้งานเกินพิกัดจะทำให้กระแสของมอเตอร์สูงกว่าปกติและเกิดความร้อนที่สเตเตอร์ ซึ่งถ้ามีอุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดทางความร้อน (Thermal Limit) ที่ออกแบบไว้ก็จะทำให้ฉนวนของมอเตอร์เสียหายได้ โดยความสามารถในการทนความร้อนของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับสภาวะและระยะเวลาที่เกิดขึ้น รูปที่ 8.4 แสดงตัวอย่างการทนกระแสเกินพิกัดของมอเตอร์เปรียบเทียบกับกระแสเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์บนกราฟเวลา-กระแส (Time-Current Curve, TCC) โดยในมอเตอร์ขนาดใหญ่จะมีการลดค่ากระแสขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ลง ซึ่งอาจเป็นการลดแรงดันลง การลดแรงดันลงจะทำให้กระแสเริ่มเดินเครื่องลดลงแต่จะใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องนานขึ้นตามกราฟเส้นประ

ทั้งนี้ตามมาตรฐาน ANSI/NFPA 70-7996 ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการป้องกันการทำงานเกินพิกัดของมอเตอร์ไว้ในกรณีมอเตอร์ที่ใช้งานต่อเนื่อง ยอมให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 40^{o}C มีพิกัดเกิน 1 Hp และมีอุปกรณ์ป้องกันความร้อนติดมากับมอเตอร์ การป้องกันอุณหภูมิสูงเกินยอมให้มอเตอร์ทำงานเกินพิกัดได้ดังนี้

- เมื่อกระแสพิกัดมอเตอร์ (Full Load Current, Full Load Amp (FLA), I_{FL}) ไม่เกิน 9 A กระแสตัดวงจร (Trip) จะต้องไม่เกิน 170% ของกระแสพิกัดมอเตอร์
- ถ้ากระแสมอเตอร์มีพิกัด 9.1 – 20 A กระแสตัดวงจรจะต้องไม่เกิน 156% ของกระแสพิกัดมอเตอร์
- มอเตอร์ขนาด 20 A ขึ้นไป กระแสตัดวงจรจะต้องไม่เกิน 140% ของกระแสพิกัดมอเตอร์



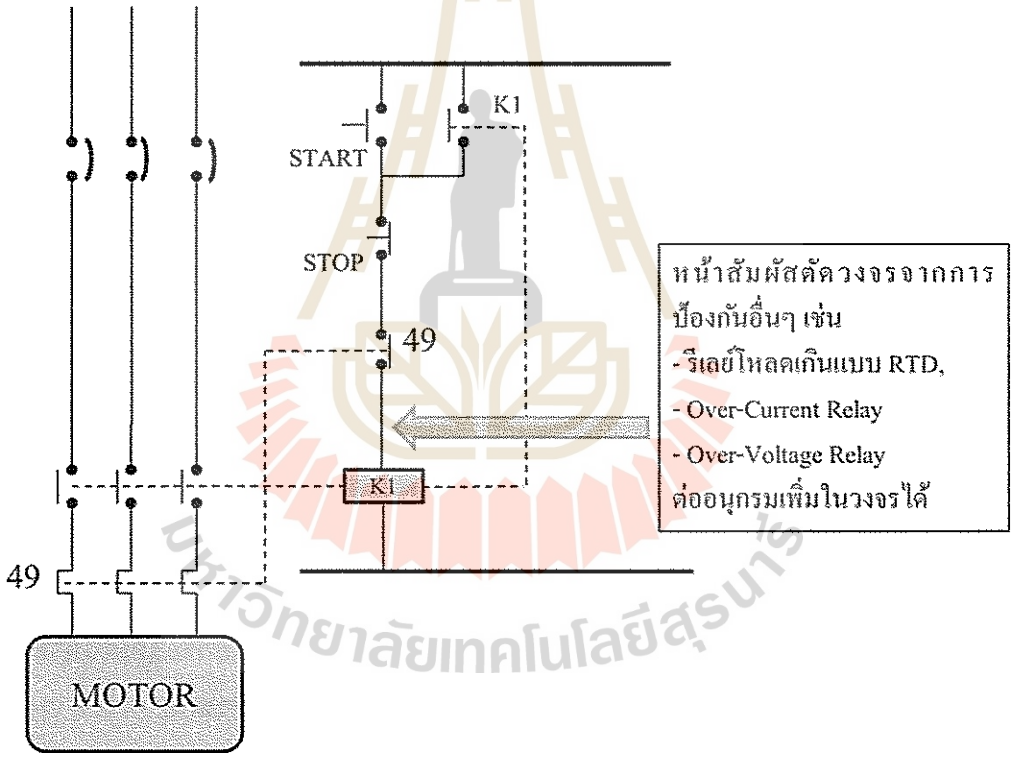
รูปที่ 8.4 ตัวอย่างการทนกระแสเกินพิกัดของมอเตอร์
เปรียบเทียบกับกระแสเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์

สำหรับมอเตอร์ที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันอุณหภูมิเกินติดมาด้วย จะต้องติดตั้งรีเลย์กระแสเกิน (Overload Relay, IEEE No. 49) เพิ่ม โดยค่าปรับตั้งจะต้องไม่เกิน 125% ของกระแสพิกัดมอเตอร์ ซึ่งโดยทั่วไปจะปรับที่ค่า 115% และต้องพิจารณาค่าตัวประกอบในการปรับค่า (Correction Factor) ด้วยเพื่อให้รีเลย์กระแสเกินทำงานเหมาะสมกับมอเตอร์ตามค่าตัวประกอบการบำรุงรักษา (Service Factor, SF) โดยค่าตัวประกอบการบำรุงรักษาหมายถึงความสามารถของมอเตอร์ในการทนการใช้งานเกินพิกัด เช่น มอเตอร์ 1 แรงม้า มี SF = 1.15 หมายถึงมอเตอร์สามารถทนการใช้งานได้ที่ 1.15 แรงม้า และสามารถใช้งานได้ 125% ในระยะเวลาสั้นๆ ได้ ซึ่งจะสามารถปรับตั้งอุปกรณ์ให้ป้องกันไว้ที่จุดทำงานของมอเตอร์ไม่เกิน 115% ของกระแสพิกัดมอเตอร์

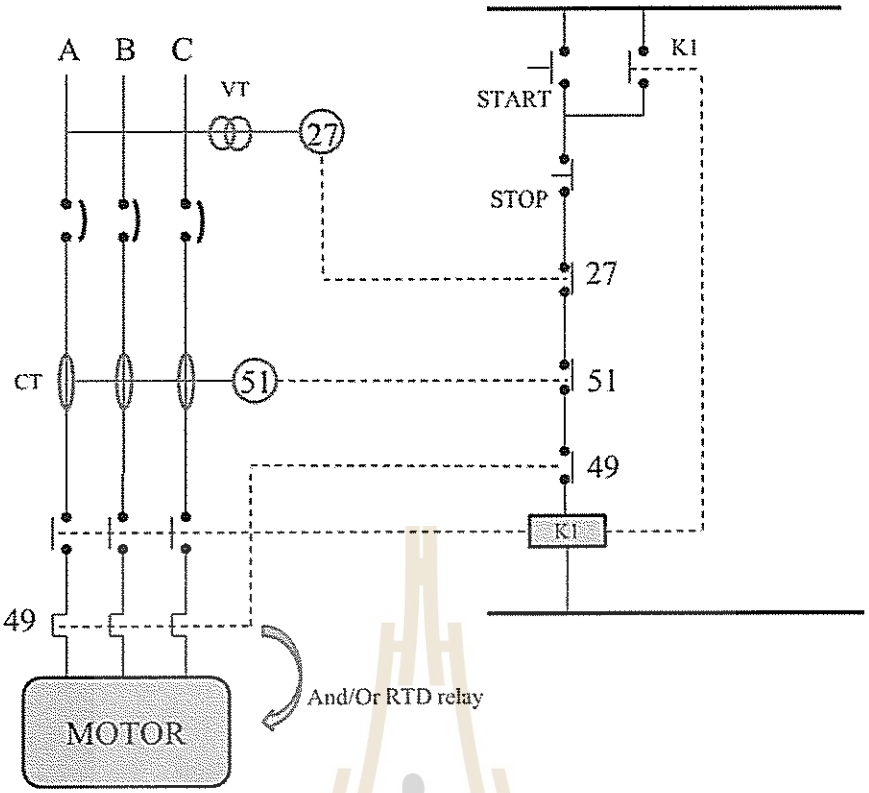
นอกจากนี้ค่าปรับตั้งของรีเลย์กระแสเกินสามารถปรับตั้งได้ตามผู้ผลิตซึ่งอาจแตกต่างกันไป สำหรับค่าปรับตั้งอาจทำได้เป็น

- ปรับตั้งสัญญาณเตือน (Alarm) ที่ 110 – 115% ของกระแสพิกัดมอเตอร์
- บางครั้งออกแบบให้มอเตอร์ทำงานต่ำกว่าพิกัด (ปกติเลือกใช้มอเตอร์ให้ทำงานที่ประมาณ 75-80% ของพิกัด) อาจปรับสัญญาณเตือนไว้ที่ 100% ของกระแสพิกัดมอเตอร์

ในมอเตอร์ขนาดเล็กจะใช้รีเลย์โหลดเกินแบบขดลวดความร้อน (Heater) พันอยู่บนแผ่นไบเมทัล (Bimetal) เมื่อกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์มีค่าสูง ทำให้ชุดขดลวดความร้อนเกิดความร้อนสูงขึ้น เป็นผลให้แผ่นไบเมทัลร้อนและโก่งตัวดันให้หน้าสัมผัสปกติปิดของโอเวอร์โหลดเปิดวงจรตัดกระแสออกจากคอล์ยแม่เหล็กของคอนแทกเตอร์ จึงทำให้หน้าสัมผัสหลัก (Main Contact) ของคอนแทกเตอร์ปลดมอเตอร์ออกจากแหล่งจ่าย ดังแสดงในรูปที่ 8.5 โดยปกติแล้วการปรับตั้งขนาดกระแสของรีเลย์โหลดเกินจะสามารถปรับไว้ที่ประมาณ 115% ของกระแสโหลดเต็มพิกัดของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้รีเลย์ป้องกันอื่นๆในการตัดวงจรเพิ่มเข้าไปในวงจรพื้นฐานดังรูปที่ 8.6



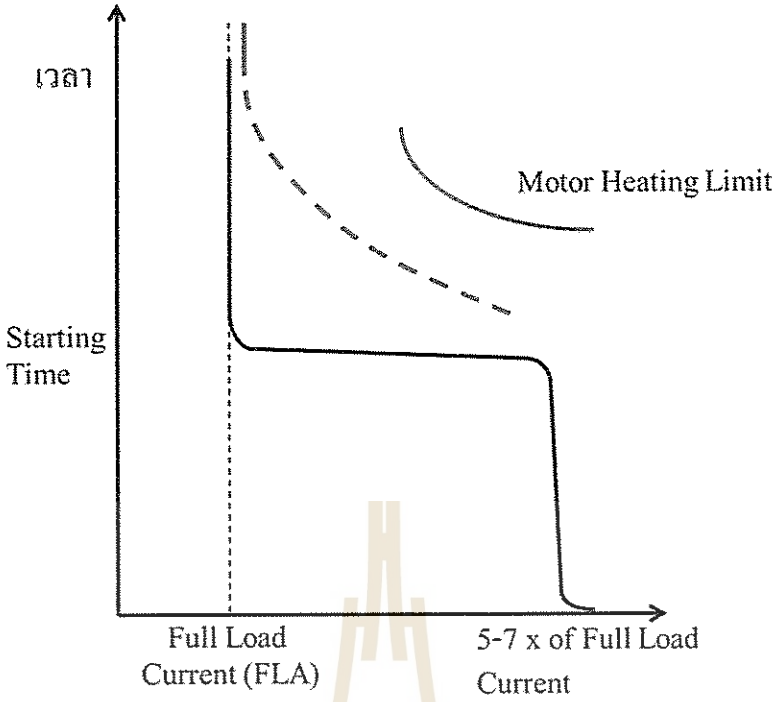
รูปที่ 8.5 การป้องกันโหลดเกินในมอเตอร์ด้วยรีเลย์โหลดเกิน (49)



รูปที่ 8.6 วงจรการป้องกันมอเตอร์ด้วยรีเลย์ประเภทต่างๆ

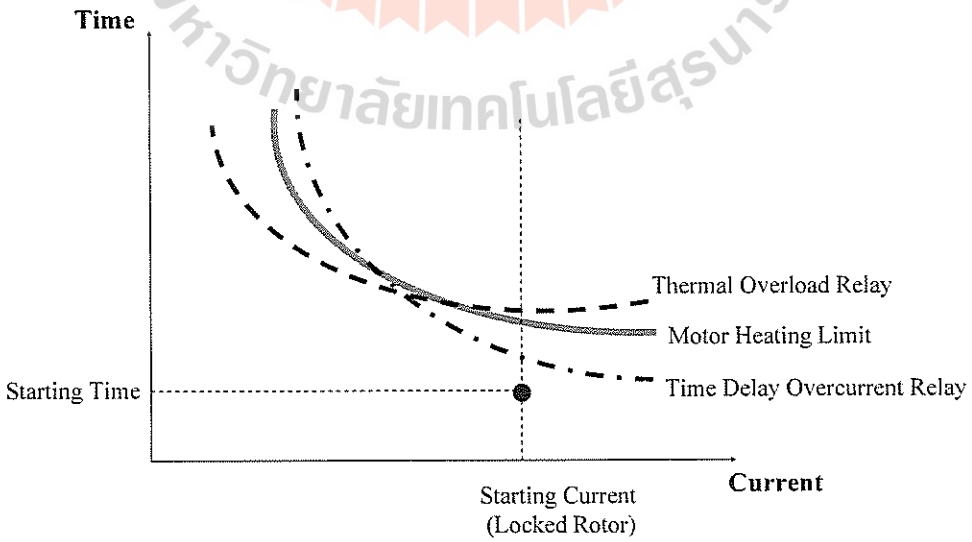
ทั้งนี้ในการป้องกันกระแสเกินในมอเตอร์ไม่ว่าจะเป็นกรณีลัดวงจรหรือโหลดเกิน จะต้องคำนึงถึง การทนกระแสเกินพิกัดของมอเตอร์และกระแสเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 8.7 กล่าวคือรีเลย์ป้องกันจะต้องไม่ทำงานในขณะที่เริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ซึ่งมีกระแสสูงกว่าพิกัดมาก และจะต้องทำงานสั่งตัดวงจรก่อนที่มอเตอร์จะเกิดความเสียหาย นั่นคือมีการทำงานตามเส้นประในรูปที่ 8.7

ทั้งนี้ในบางกรณีจะไม่สามารถใช้รีเลย์กระแสเกินหรือรีเลย์โหลดเกินอย่างใดอย่างหนึ่งได้ก็จะสามารถใช้รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time Delay Overcurrent Relay) ทำงานร่วมกับรีเลย์ที่ทำงานด้วยความร้อน (Thermal Overload Relay) โดยรีเลย์ที่ทำงานด้วยความร้อน (Thermal Overload Relay) จะทำหน้าที่ป้องกันในสภาวะกระแสเกินพิกัดที่ไม่สูง ส่วนรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลา (Time Delay Overcurrent Relay) จะทำหน้าที่ป้องกันในสภาวะกระแสเกินพิกัดมาก ดังแสดงในรูปที่ 8.8



รูปที่ 8.7 การปรับตั้งรีเลย์โหลดเกินในมอเตอร์

สำหรับรีเลย์โหลดเกิน (49) แบบตรวจจับอุณหภูมิโดยตรง จะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่ฝังอยู่ภายในมอเตอร์ เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิแบบตัวต้านทาน (Resistive Temperature Detector, RTD) ซึ่งในมอเตอร์ขนาดใหญ่จะใช้วิธีการฝังอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิไว้ตามจุดต่าง ๆ และส่งสัญญาณให้รีเลย์ทำงาน โดยต้องมีการชดเชยค่าความต้านทานของสายสัญญาณที่ใช้ด้วย และมอเตอร์จะสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ตามระดับของฉนวน (Insulation Class) และจะปรับตั้งให้ตัดวงจรก่อนที่มอเตอร์จะเสียหายซึ่งจะให้ความสำคัญที่จุดที่ร้อนที่สุด (Hot Spot) โดยในมาตรฐาน IEC จะแบ่งระดับของฉนวนได้ดังตารางที่ 8.1



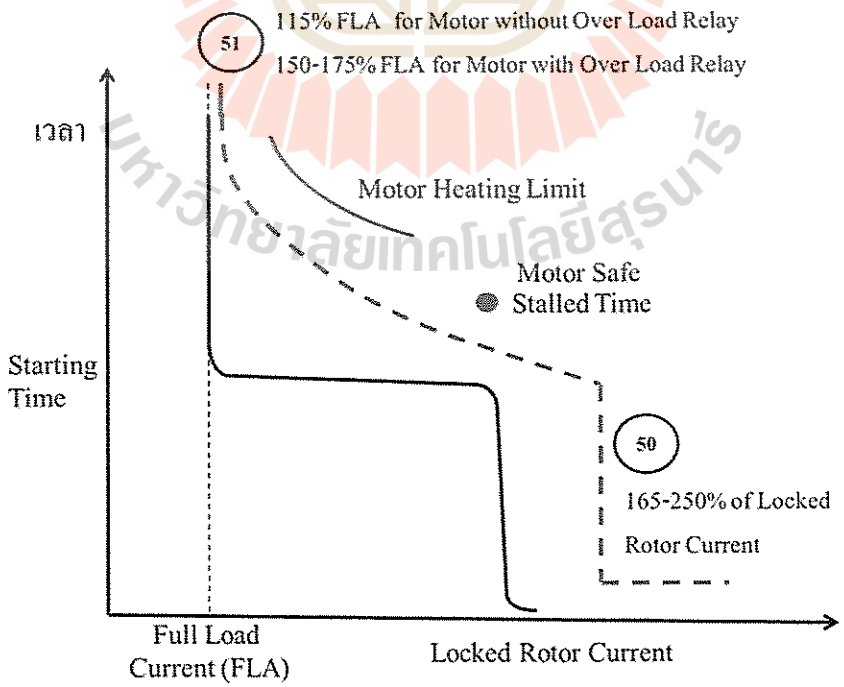
รูปที่ 8.8 การป้องกันการทำงานเกินพิกัดกำลังในมอเตอร์

โดยใช้รีเลย์โหลดเกินร่วมกับรีเลย์กระแสเกิน

ตารางที่ 8.1 คุณสมบัติของฉนวนตามมาตรฐาน IEC

Insulation Class	Temperature Rise from Base 40 ^{O}C	Hot Spot Temperature Rise
A	+ 60 ^{O}C	+ 5 ^{O}C
B	+ 80 ^{O}C	+ 10 ^{O}C
F	+ 105 ^{O}C	+ 10 ^{O}C
H	+ 125 ^{O}C	+ 15 ^{O}C

ในกรณีที่มอเตอร์ไม่หมุนหรือหมุนไม่ถึงความเร็วพิกัดอาจเกิดจากระบบการจ่ายไฟฟ้า เช่น แรงดันต่ำ หรือ ไม่ครบเฟส หรือ อาจเกิดจากข้อขัดข้องทางกล ในกรณีที่มอเตอร์ไม่หมุนจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมอเตอร์จะสามารถทนได้ในช่วงเวลาหนึ่ง เรียกว่า Safe Stall Time (SST) จึงต้องมีระบบป้องกันในการปลดมอเตอร์ออกให้เร็วที่สุด โดยทั่วไปกระแสขณะที่โรเตอร์ไม่หมุนจะมีค่าประมาณ 3-7 เท่าของกระแสพิกัด ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ (Start) ทำให้การวัดกระแสเพียงอย่างเดียวอาจแยกไม่ออกว่าเป็นสภาวะที่เริ่มเดินเครื่องหรือเป็นสภาวะผิดปกติ ในกรณีที่แยกสภาวะที่เริ่มเดินเครื่องกับสภาวะมอเตอร์ไม่หมุนได้ยาก อาจใช้รีเลย์กระแสเกิน (51) ทำงานร่วมกับสวิตช์ความเร็วศูนย์ (Zero-Speed Switch, 12) ถ้าเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์แล้วความเร็วไม่เพิ่มจนทำให้สวิตช์ความเร็วศูนย์ทำงานก็จะมีสัญญาณสั่งตัดวงจรไปปลดมอเตอร์



รูปที่ 8.9 หลักการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินสำหรับมอเตอร์

สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่กรณีที่ใช้รีเลย์ ถ้ามอเตอร์มีขนาด kVA ต่ำกว่า 50% ของหม้อแปลงที่จ่ายไฟฟ้าให้มอเตอร์ จะสามารถใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันที (Instantaneous Over Current Relay, IOC, IEEE No. 50) ป้องกันการลัดวงจรในเฟส โดยให้ทำงานสัมพันธ์กับกระแสเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ ส่วนมอเตอร์ที่ขนาดใหญ่กว่า 50% ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องใช้รีเลย์ผลต่างช่วยในการป้องกันการลัดวงจรในเฟส การใช้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา (Time Over Current Relay, TOC, IEEE No. 51) จะสามารถปรับตั้งให้ป้องกันได้ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์

ในบางกรณีอาจใช้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาและแบบทันทีทำงานร่วมกันเพื่อให้สามารถป้องกันได้ดียิ่งขึ้น การใช้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาร่วมกับรีเลย์กระแสเกินแบบทันที จะปรับตั้งให้รีเลย์กระแสเกินแบบทันทีทำงานที่ 165 – 250 % ของกระแสเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เพื่อไม่ให้ทำงานในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง โดยต้องเผื่อค่ากระแสกระชาก (Inrush Current) ที่มีค่าไม่แน่นอนซึ่งจะมีค่าสูงได้ถึง 110-125% ของกระแสเริ่มต้นเดินเครื่องมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 8.9 บางครั้งจำเป็นต้องปรับตั้งค่าที่ต่ำไว้และทดสอบเดินเครื่องมอเตอร์แล้วค่อยปรับค่าให้สูงขึ้นจนกระทั่งรีเลย์ไม่ทำงานขณะมอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง แล้วทดสอบเดินเครื่องมอเตอร์อีก 3-5 ครั้งให้แน่ใจ แล้วปรับค่าเผื่อไว้อีก 10% (ในการทดสอบต้องระวังเรื่องความร้อนสูงในมอเตอร์ด้วย)

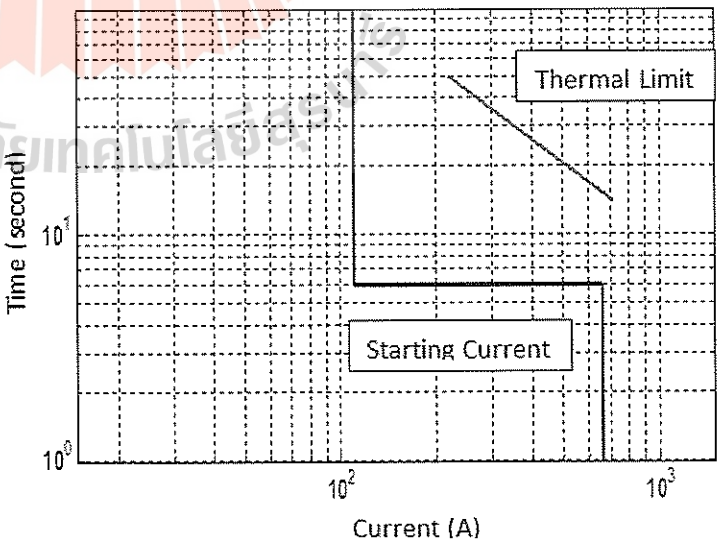
การปรับตั้งค่ารีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา ถ้ามีชุดป้องกันการทำงานเกินพิกัด (Overload) ป้องกันต่างหาก จะปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน ไว้ที่ค่าประมาณ 150-175% ของกระแสพิกัดมอเตอร์ โดยในกรณีมอเตอร์ใช้งานฉุกเฉิน เช่น Fire Pump หรือใช้งานสารเคมีสำคัญจะปรับตั้งให้สูงกว่าปกติได้ ถ้าไม่มีชุดป้องกันการทำงานเกินพิกัด (Overload) ป้องกันต่างหาก จะปรับตั้งค่าค่ารีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา ไว้ที่ค่าประมาณ 115% ของ IFL และสามารถใช้มีรีเลย์กระแสเกินแบบทันที (IOC) ที่เป็นแบบ High Drop Off (HOD) ปรับตั้งให้ทำงานที่ 125-200% ของกระแสพิกัดมอเตอร์

ตัวอย่างที่ 8.1 มอเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้

Motor Specification

Induction Motor

Power Rated	= 1050 kW
Voltage	= 6.6 kV
Rated Current	= 110 A
Starting Time	= 6 second
Power Factor	= 0.85
Thermal Class	= F
Starting Current	= 600 %
Thermal Limit	= As indicated



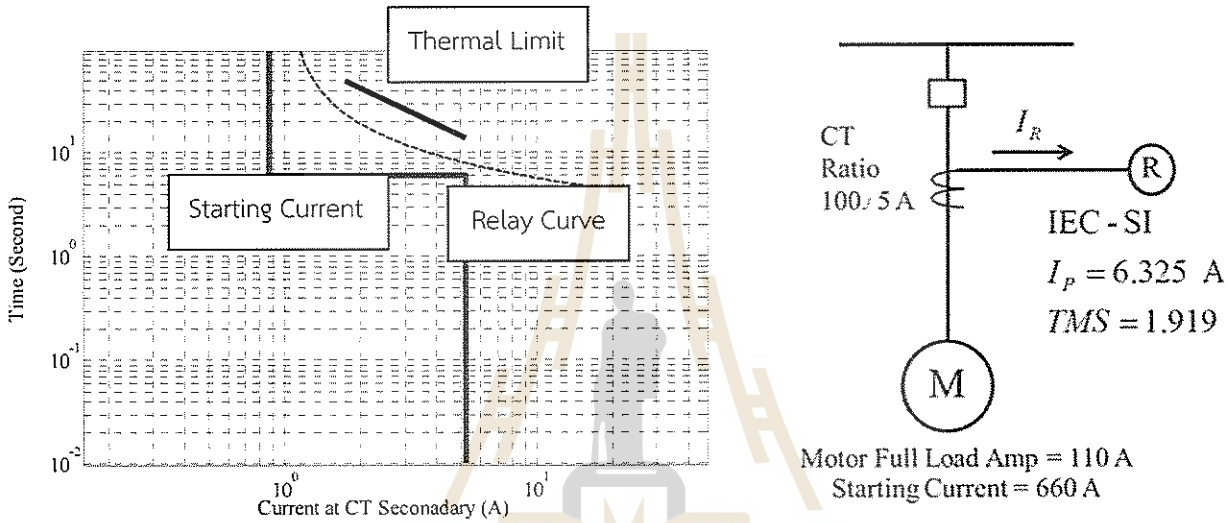
จงคำนวณค่าการปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลาของมอเตอร์ โดยใช้รีเลย์แบบ Standard Invert (SI) ตามมาตรฐาน IEC แบบดิจิทัล สามารถปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานได้ในช่วง 1.000 – 10.000 A เป็นทศนิยม 3 ตำแหน่ง เลือก TMS ได้ในช่วง 0.010 – 2.000 เป็นทศนิยม 3 ตำแหน่ง และ เลือก CT ได้ในอัตราส่วน 50/5, 100/5, 200/5, 300/5, 400/5, 500/5, 600/5, 700/5, 800/5

วิธีทำ จากกระแสพิกัดมอเตอร์ 110 A เลือใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 100/5 A

ปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินไว้ที่ 115% ของกระแสพิกัดคือ 1.15*110 = 126.5 A

นั่นคือที่กระแสไปที่รีเลย์เท่ากับ 126.5 x (5/100) = 6.325 A

ดังนั้นปรับตั้งกระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ไว้ที่ 6.325 A



รูปที่ 8.10 การปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินสำหรับมอเตอร์ในตัวอย่างที่ 8.1

จากการที่รีเลย์มีกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องเท่ากับ 600% ของกระแสพิกัด 110 A คือ 660 A และใช้เวลาเริ่มเดินเครื่อง 6 วินาที

ดังนั้นปรับตั้งในรีเลย์มีการหน่วงเวลา 8 วินาทีที่กระแส 660 A

ที่กระแส 660 A จะมีกระแสไปที่รีเลย์เท่ากัน 660 x (5/100) = 33 A

คิดเป็นค่า Plug Setting Multiplyer (PSM) *I* = 33 / 6.325 = 5.217 (ดูบทที่ 6)

ดังนั้นจากสมการรีเลย์กระแสเกิน SI ตามมาตรฐาน IEC คือ $t = \frac{0.14}{I^{0.02} - 1} \cdot TMS$

$$8 = \frac{0.14}{5.217^{0.02} - 1} \cdot TMS$$

$$TMS = 1.919$$

จากการปรับตั้งข้างต้นจะสามารถแสดงกราฟการทำงานของรีเลย์ได้ดังรูปที่ 8.10

ตัวอย่างที่ 8.2 มอเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้

- Power Rated = 240 kW
- Voltage = 6.6 kV
- Power Factor = 0.85
- Starting Time = 6 second
- Starting Current = 550 %

หากใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 50/5 A ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา Standard Inverst (SI) ตามมาตรฐาน IEC ปรับตั้งไว้กระแสเริ่มต้นทำงานไว้ที่ 115% ของกระแสพิกัดมอเตอร์ TMS = 0.6 รีเลย์จะทำงานในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่องหรือไม่

วิธีทำ ตัวอย่างที่ 8.2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.11 และจากคุณลักษณะมอเตอร์สามารถคำนวณกระแสพิกัดของมอเตอร์ได้เป็น

$$I_{FL} = \frac{P}{\sqrt{3}VPF} = \frac{240\times10^3}{\sqrt{3}\times(6.6\times10^3)\times0.85} = 24.7 \text{ A}$$

ที่กระแสพิกัดมอเตอร์ กระแสที่ไหลไปรีเลย์จะมีค่าเป็น

$$I_{FL,R} = 24.7\times\frac{5}{50} = 2.47 \text{ A}$$

ปรับตั้งกระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ไว้ที่ 115% ของกระแสพิกัดมอเตอร์

$$I_p = 1.15\times2.47 = 2.84 \text{ A}$$

ขณะมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องจะมีกระแสเป็น 550% ของกระแสพิกัดมอเตอร์

$$I_{start} = 5.5\times24.7 = 135.85 \text{ A}$$

คิดเป็นกระแสไปที่รีเลย์เท่ากับ

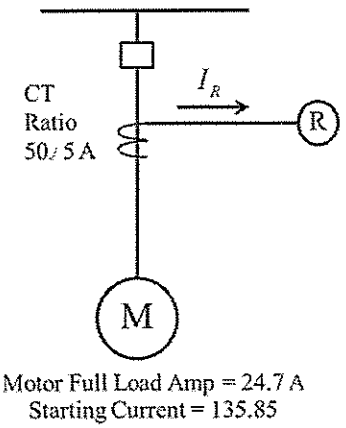
$$I_{start,R} = 135.85\times\frac{5}{50} = 13.585 \text{ A}$$

คิดเป็นค่า Plug Setting Multiplyer (PSM) I = 13.585 / 2.84 = 5.478

รีเลย์จะใช้เวลาในการตัดวงจรเท่ากับ

$$t = \frac{0.14}{I^{0.02}-1}\cdot TMS = \frac{0.14}{5.478^{0.02}-1}\cdot0.6 = 2.428 \text{ วินาที}$$

ซึ่งเร็วกว่าระยะเวลานการเริ่มเดินเครื่อง (6 วินาที) ดังนั้นในกรณีนี้รีเลย์จะตัดวงจรในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง



รูปที่ 8.11 การป้องกันกระแสเกินสำหรับมอเตอร์ในตัวอย่างที่ 8.2

ตัวอย่างที่ 8.3 มอเตอร์มีกระแสพิกัด 245 A กระแสสูงสุดขณะสตาร์ท 1600 A เวลาเริ่มเดินเครื่อง 1.0 วินาที เลือกหม้อแปลงกระแส 400/5 A โดยพิจารณาให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ที่ 115% ของพิกัด และปรับตั้งรีเลย์ให้ทำงานที่ 125% ของกระแสดังกล่าว (115% ของพิกัด) ใช้รีเลย์แบบ IEC Very Inverse (VI) จงแสดงการคำนวณค่ากระแสปรับตั้งของรีเลย์ที่ใช้

วิธีทำ ค่ากระแสที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ 115% ของกระแสพิกัด มีค่าเท่ากับ

$$I_{\max} = 1.15 \times 245 = 282 \quad \text{A}$$

ค่ากระแสปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานทางด้านปฐมภูมิ มีค่าเท่ากับ

$$I_{setting_pri} = 1.25 \times 282 = 352.5 \text{ A}$$

ค่ากระแสปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานทางด้านทุติยภูมิ มีค่าเท่ากับ

$$I_{setting_sec} = 352.5 \times \frac{5}{400} = 4.4 \text{ A}$$

ดังนั้นปรับตั้งรีเลย์ที่ 4.4 A โดยเลือกค่า TMS ที่ไม่ทำให้รีเลย์ทำงานขณะเริ่มเดินเครื่อง (คือกระแส 1600 A ที่เวลา 1 วินาที) โดยในกรณีที่ใช้รีเลย์แบบ IEC Very Inverse (VI) จะมีสมการเป็น (ดูรายละเอียดได้ในบทที่ 6)

$$t = \frac{13.5}{I-1} \cdot TMS$$

ที่ค่ากระแส 1600 A ด้านปฐมภูมิจะมีกระแสไปที่รีเลย์เท่ากับ

$$I_R = 1600 \times \frac{5}{400} = 20 \text{ A}$$

คิดเป็นค่า Plug Setting Multiplier (PSM, I เป็น p.u.)

$$I = \frac{20}{4.4} = 4.455 \quad \text{p.u.}$$

ดังนั้น

$$1 < \frac{13.5}{4.455-1} \cdot TMS$$

$$TMS > 0.255$$

ดังนั้นต้องปรับตั้ง TMS มากกว่า 0.255 จะทำให้รีเลย์ไม่ทำงานขณะเริ่มเดินเครื่อง ทั้งนี้หากมีข้อมูลการทนกระแสของมอเตอร์ (Thermal Limit Curve) ก็ควรนำมาพิจารณาในการปรับตั้งด้วย

8.3 การป้องกันการป้องกันสภาวะที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าผิดปกติในมอเตอร์

การป้องกันสภาวะที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าผิดปกติในมอเตอร์ประกอบด้วย การป้องกันสภาวะแรงดันต่ำ (Under-Voltage Protection) การป้องกันสภาวะแรงดันเกิน (Over-Voltage Protection) การป้องกันสภาวะแรงดันไม่สมดุล (Unbalance Protection) และการป้องกันสภาวะความถี่ผิดปกติ (Abnormal Frequency Protection)

8.3.1 การป้องกันสภาวะแรงดันต่ำ (Under-Voltage Protection)

ปกติมอเตอร์จะถูกออกแบบให้สามารถรับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงได้ +10 % ของแรงดันพิกัด และความถี่ไม่เกิน +5% ของความถี่พิกัด มอเตอร์ขนาดใหญ่โดยทั่วไปหากเริ่มเดินเครื่องโดยไม่ทำให้มอเตอร์เสียหาย แรงดันที่จ่ายต้องไม่ต่ำกว่า 70-85 % ของพิกัด การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ที่แรงดันต่ำเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการเริ่มเดินเครื่องนาน ทำให้เกิดความร้อนสูงได้ การป้องกันแรงดันต่ำในมอเตอร์แรงดันปานกลาง (Medium Voltage) ทำได้โดยวัดค่าแรงดันผ่าน VT ให้รีเลย์แรงดันทำงานเมื่อแรงดันลดลงเหลือประมาณ 80% ของแรงดันปกติ โดยมีการประวิงเวลา 2-3 วินาที สำหรับระบบแรงดันต่ำเซอร์กิตเบรกเกอร์อาจมีชุดป้องกันแรงดันต่ำในตัวอยู่แล้วได้

8.3.2 การป้องกันสภาวะแรงดันเกิน (Over-Voltage Protection)

ในกรณีที่แรงดันสูงกว่าพิกัด จะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในแกนเหล็กที่สูง และยังทำให้เกิดกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องที่สูงด้วย การป้องกันแรงดันเกินในขณะเริ่มเดินเครื่องอาจจะมีรีเลย์ป้องกันกระแสเกินในกรณีที่โรเตอร์ไม่หมุนอยู่แล้ว แต่ถ้ามีโอกาสเกิดสภาวะแรงดันเกินในลักษณะกระชากที่สูงจะต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเสิร์จมาช่วย

8.3.3 การป้องกันสภาวะแรงดันไม่สมดุล (Unbalance Protection)

ในสภาวะที่ไม่สมดุลจะมีกระแสองค์ประกอบลำดับลบ (Negative-Sequence Current) ไหลทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นในมอเตอร์มาก ซึ่งรีเลย์ป้องกันแบบตรวจจับอุณหภูมิสูงจะทำหน้าที่ป้องกัน และหากต้องการป้องกันสภาวะแรงดันเกินโดยตรงก็สามารถใช้วิธีดังต่อไปนี้

- รีเลย์สมดุลกระแสเฟส (Phase-Balance Current Relay) เป็นรีเลย์ที่เปรียบเทียบค่ากระแสในแต่ละเฟสหากแตกต่างกันเกินค่าที่ปรับตั้งไว้ (ปกติประมาณ 15% ของกระแสพิกัดมอเตอร์) ก็จะทำงาน โดยมีการประวิงเวลาไว้เพื่อป้องกันทำงานขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์
- รีเลย์กระแสลำดับลบ (Negative-Sequence Current Relay, IEEE No. 46) จะเป็นการป้องกันโดยตรวจวัดว่ากระแสลำดับลบ โดยจะพิจาณาพิกัดทางความร้อนในการทนกระแสลำดับลบตามสมการ

$$(I_2)^2 t \le K \qquad (10.1)$$

เมื่อ I_2 เป็นกระแสลำดับลบ

t เวลาเป็นวินาที

K เป็นค่าคงที่ ซึ่งโดยปกติค่า K ใช้ค่าเท่ากับ 40

- รีเลย์สมดุลแรงดันเฟส (Phase-Balance Voltage Relay, IEEE No. 47) เป็นการป้องกันโดยวัดค่าแรงดันโดยเมื่อเกิดแรงดันลำดับลบ (Negative-Sequence Voltage) เกินกว่าค่าที่กำหนด (ปกติปรับตั้งที่ 0.05 p.u.) รีเลย์จะทำงาน

8.3.4 การป้องกันสภาวะความถี่ผิดปกติ (Abnormal Frequency Protection)

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นกรณีที่ความถี่สูงเกินไปจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงกว่าปกติ ส่วนในกรณีที่ความถี่ต่ำเกินไปจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าปกติในลักษณะเดียวกับในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะทำให้เกิดความร้อนในแกนเหล็ก ซึ่งในมอเตอร์ขนาดเล็กอุปกรณ์ป้องกันความร้อนเกินจะทำงานป้องกัน และในมอเตอร์ขนาดใหญ่อาจใช้รีเลย์ความถี่ (Frequency Relay, IEEE No. 81) ในการป้องกันได้

แบบฝึกหัดบทที่ 8

1. จงอธิบายหลักการป้องกันสภาวะโหลดเกินในมอเตอร์
2. จงอธิบายการป้องกันผลต่างแบบสมดุลตนเอง (Self-Balancing Differential Protection)
3. จงอธิบายหลักการป้องกันลัดวงจรลงดินในมอเตอร์
4. มอเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้
   - Power Rated = 250 kW
   - Voltage = 3.3 kV
   - Power Factor = 0.85
   - Starting Time = 6 second
   - Starting Current = 600 %

   หากใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 100/5 A ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบประวิงเวลา Standard Inverst (SI) ตามมาตรฐาน IEC ปรับตั้งไว้กระแสเริ่มต้นทำงานไว้ที่ 125% ของกระแสพิกัดมอเตอร์ TMS = 1.0 รีเลย์จะทำงานในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่องหรือไม่
5. จากข้อ 4 หากต้องการให้รีเลย์ทำงานในเวลา 8 วินาที ที่ค่ากระแสเท่ากับกระแสขณะมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องจะต้องปรับตั้งค่า TMS ไว้ที่เท่าใด

บทที่ 9

การป้องกันหม้อแปลงกำลัง

(Protection of Power Transformer)

จากการพัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังทำให้มีการใช้งานหม้อแปลงกำลังที่หลากหลายขึ้น โดยมีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ระดับไม่กี่ kVA ไปจนถึงหลายร้อย MVA ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความต้องการในการใช้งาน การพิจารณาระบบป้องกันของหม้อแปลงกำลังจะขึ้นอยู่กับความสำคัญของหม้อแปลงเป็นหลัก ซึ่งการป้องกันหม้อแปลงกำลังจะอยู่บนพื้นฐานของการตัดวงจรให้กระแสลัดวงจรหยุดในเวลาที่เร็วที่สุดเหมือนกับการป้องกันอุปกรณ์อื่น ๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการหลักในการป้องกันหม้อแปลงกำลังซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง

การลัดวงจรภายในหม้อแปลงมักเป็นการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดิน การป้องกันที่สำคัญในหม้อแปลงกำลังก็คือการป้องกันแบบผลต่าง และการป้องกันด้วยรีเลย์กระแสเกิน อย่างไรก็ตามการเกิดการผิดพร่องในหม้อแปลงเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การลัดวงจรที่ขดลวดหรือที่ขั้ว (Winding faults or Terminal faults) การผิดพร่องที่แกนเหล็ก (Core faults) การผิดพร่องของตัวถังหรืออุปกรณ์เสริม (Tank faults and auxiliary faults) การผิดพร่องของชุดเปลี่ยนแท็ป (On-load tap changer faults) นอกจากนี้ยังอาจเกิดจาก การใช้งานในสภาวะผิดปกติ (Abnormal operating conditions) เช่น สภาวะแรงดันเกิน สภาวะความถี่ตก การลัดวงจรของระบบภายนอกหม้อแปลงที่ไม่ได้ตัดวงจรเร็วพอ เป็นต้น ในการออกแบบจึงยังต้องมีการป้องกันอื่นอีกเช่น การป้องกันแรงดันก๊าซ การป้องกันอุณหภูมิสูงในหม้อแปลง การป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กเกิน และมีวิธีการป้องกันที่เป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวหลายอย่างที่แตกต่างจากอุปกรณ์อื่นในระบบไฟฟ้ากำลัง

9.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการป้องกันหม้อแปลงกำลัง

ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบป้องกันหม้อแปลงกำลังมีหลายปัจจัยด้วยกัน ดังจะกล่าวถึงปัจจัยที่สำคัญต่อไปนี้

9.1.1 ขนาด

โดยทั่วไปหม้อแปลงขนาดต่ำกว่า 2500 kVA ซึ่งส่วนมากจะเป็นหม้อแปลในระบบจำหน่าย (Distribution Transformer) จะใช้ฟิวส์ในการป้องกัน ส่วนในหม้อแปลงขนาด 2500-5000 kVA จะใช้รีเลย์กระแสเกินแบบทันทีและแบบประวิงเวลาทำงานร่วมกัน ทำมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงและสามารถจัดลำดับความสัมพันธ์ในการทำงานของระบบป้องกันแบบแขนงในระบบจำหน่ายได้

อย่างไรก็ตาม การป้องกันการลัดวงจรในหม้อแปลงขนาดใหญ่จะไม่สามารถหน่วงเว เนื่องจากจะทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานและเสถียรภาพของทั้งระบบ มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง รวมทั้งใช้เวลาในการซ่อมบำรุงที่นาน ดังนั้นสำหรับหม้อแปลงขนาด 5000-10000 kVA จะใช้การป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protection) นอกจากนี้ยังมีการป้องกันด้วยรีเลย์ตรวจจับความดัน (Pressure Relay) และรีเลย์ตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature Relay)

9.1.2 ตำแหน่งที่ตั้งและหน้าที่

นอกจากขนาดของหม้อแปลงแล้ว การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันยังขึ้นอยู่กับว่าหม้อแปลงดังกล่าวมีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลังมากน้อยเพียงใดด้วย ถ้าหม้อแปลงเป็นส่วนสำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ก็จะได้รับการออกแบบระบบป้องกันที่รัดกุมและมีการลงทุนมาก แต่ถ้าเป็นหม้อแปลงระบบจำหน่ายก็อาจใช้เพียงรีเลย์ผลต่างและรีเลย์กระแสเกิน ถ้าตำแหน่งที่ตั้งถ้าหม้อแปลงอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่า *X/R* ของระบบสูงก็จะต้องใช้รีเลย์แบบหน่วงฮาร์มอนิก (Harmonic Restraint Relay)

9.1.3 ระดับแรงดัน

โดยทั่วไปหม้อแปลงที่ใช้งานในระดับแรงดันสูงจะต้องมีการป้องกันที่รัดกุมมากกว่าหม้อแปลงที่ใช้ในระดับแรงดันต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการป้องกันที่ผิดพลาดหรือไม่ทันเวลาจะทำเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้ามากและมีค่าใช้จ่ายที่สูงในการซ่อมแซม

9.1.4 การต่อขดลวด

การออกแบบระบบป้องกันหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับการต่อขดลวดของหม้อแปลงด้วย การเลือกวิธีการป้องกันจะแตกต่างกันในหม้อแปลงต่อขดลวดแบบสตาร์และแบบเดลต้า รวมถึงชนิดของการต่อลงดินด้วย

9.2 การป้องกันการลัดวงจรและกระแสเกิน

การลัดวงจรในขดลวดของหม้อแปลงจะทำให้เกิดกระแสลัดวงจรขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย ค่าอิมพีแดนซ์ของการต่อลงดินของจุดนิวทรัล ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของหม้อแปลง (Leakage Reactance) แรงดันที่ลัดวงจร การต่อขดลวด เป็นต้น

เช่นเดียวกับการป้องกันกระแสเกินในอุปกรณ์อื่น ๆ รีเลย์กระแสเกินจะต้องแยกแยะความแตกต่างระหว่างการเกิดลัดวงจรในขอบเขตป้องกันกับการเกิดลัดวงจรภายนอกขอบเขตป้องกันหรือการใช้งานจ่ายภาระที่สูงตามปกติ (heavy load) แต่ไม่เกินพิกัดได้ การป้องกันสามารถทำได้โดยการใช้ฟิวส์ และรีเลย์กระแสเกิน

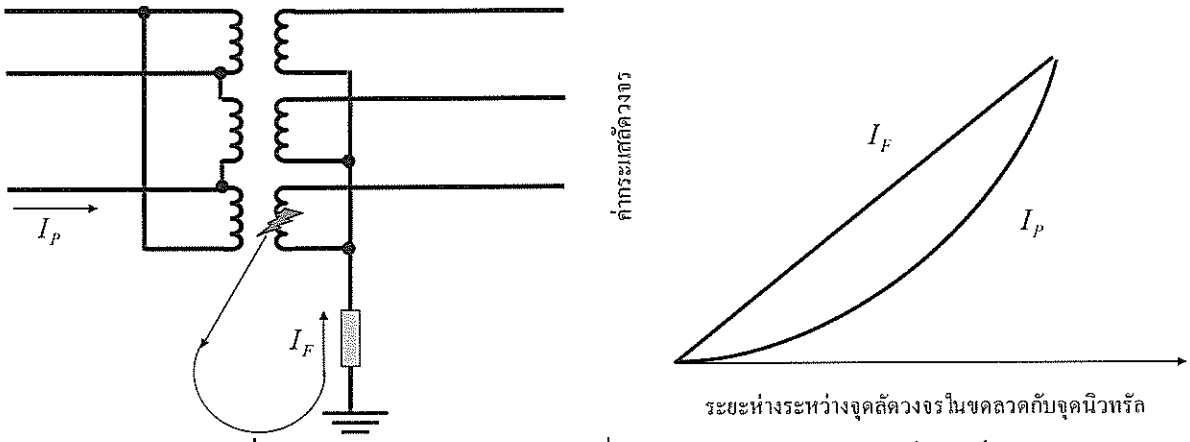
9.2.1 ผลของการต่อขดลวดที่มีต่อกระแสลัดวงจรลงดิน

11.2.1.1 การต่อขดลวดแบบวายโดยต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่านอิมพีแดนซ์

ในกรณีนี้ค่ากระแสลัดวงจร (I_F)จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อลงดินและแปรผันตามระยะระหว่างจุดลัดวงจรที่ขดลวดกับจุดนิวทรัล เนื่องจากแรงดันจะสูงขึ้นที่ระยะห่างจากจุดนิวทรัลมากขึ้น

ในกรณีที่เป็นการลัดวงจรด้านทุติยภูมิลงดิน กระแสทางด้านปฐมภูมิ (I_P) จะมีค่าตามอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิกับจำนวนรอบทางด้านทุติยภูมิที่ตำแหน่งที่ลัดวงจรลงดิน โดยจะแปรผันตามค่ากำลังสองของสัดส่วนจำนวนรอบที่ลัดวงจรของขดลวดทางด้านทุติยภูมิดังรูปที่ 9.1 ทั้งนี้การลัดวงจรในบริเวณใกล้จุดนิวทรัลจะมีค่ากระแสทางด้านปฐมภูมิที่ต่ำ ทำให้การตรวจวัดค่ากระแสลัดวงจรจากทางด้านปฐมภูมิทำได้ยาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

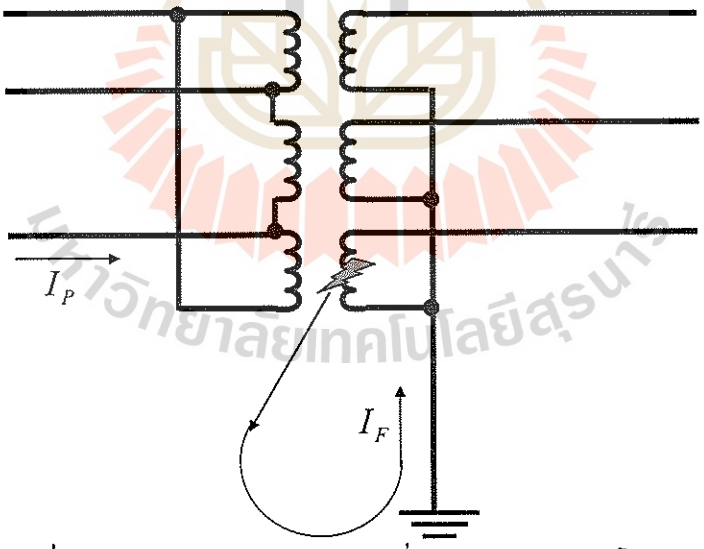


รูปที่ 9.1 การลัดวงจรในหม้อแปลงที่ต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่านอิมพีแดนซ์

11.2.1.2 การต่อขดลวดแบบวายโดยต่อจุดนิวทรัลลงดินโดยตรง

ในกรณีนี้ค่ากระแสลัดวงจรจะขึ้นอยู่กับค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของหม้อแปลงซึ่งส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสลัดวงจรกับตำแหน่งที่ลัดวงจรมีความซับซ้อน โดยระยะห่างจากจุดนิวทรัลบนขดลวดจะมีแรงดันมากขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีที่ต่อลงดินผ่านค่าอิมพีแดนซ์ แต่ในกรณีดังกล่าวจะมีค่ากระแสลัดวงจรที่สูงในตำแหน่งที่ใกล้จุดนิวทรัลเนื่องจากจะมีค่ารีแอคแตนซ์ที่ต่ำดังรูปที่ 9.2

ในกรณีนี้การลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิจะมีค่ากระแสลัดวงจใกล้เคียงกันตลอดความยาวของขดลวด และค่ากระแสที่เกิดขึ้นทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าสูงเกือบตลอดความยาวของขดลวด



รูปที่ 9.2 การลัดวงจรในหม้อแปลงที่ต่อจุดนิวทรัลลงดินโดยตรง

11.2.1.3 การต่อขดลวดแบบเดลต้า

การต่อหม้อแปลงแบบเดลต้าจะมีผลให้เปรียบเสมือนกับมีค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างขดลวดกับดินที่สูงมาก ส่งผลให้เกิดค่ากระแสลัดวงจรลงดินของขดลวดมีค่าต่ำ

9.2.2 การลัดวงจรระหว่างเฟสในขดลวดหม้อแปลง

การลัดวงจรระหว่างเฟสของขดลวดในหม้อแปลงเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดกระแสลัดวงจรที่สูงมากเมื่อเทียบกับการลัดวงจรลงดินของขดลวด

9.2.3 การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (Interturn Faults)

สำหรับหม้อแปลงแรงดันต่ำนั้นการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดมักจะไม่เกิดขึ้นเว้นเสียแต่ว่าจะเกิดแรงทางกลกระทำต่อขดลวดในระหว่างที่เกิดการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวน หรือเกิดจากความชื้นในน้ำมันฉนวนหม้อแปลง

ส่งหม้อแปลงแรงดันสูงที่ต่ออยู่กับระบบส่งจะมีโอกาสได้รับผลกระทบจากแรงดันฟ้าผ่า การลัดวงจครในระบบส่ง และแรงดันกระชากจากการสับสวิตช์ (Switching Suge Voltage)

แรงดันกระชากในสายส่งอาจมีระดับสูงหลายเท่าของแรงดันปกติและมีความถี่ที่สูง ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมในส่วนปลายขดลวดของหม้อแปลงที่สูงและอาจทำให้เกิดอาร์กผ่านฉนวนในบริเวณดังกล่าว และเกิดการลัดวงจรตามมาได้หากไม่มีการตรวจพบปัญหาในเบื้องต้น

9.2.4 การป้องกันด้วยฟิวส์ (Fuse)

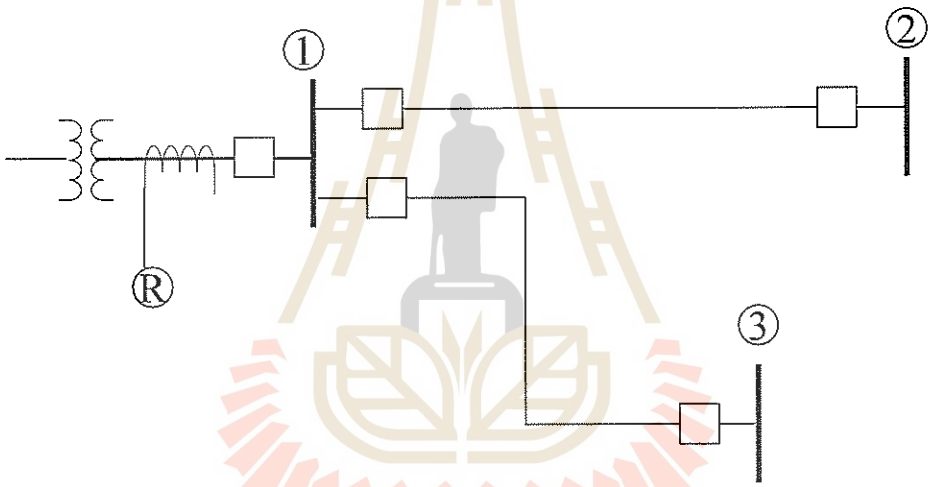
การป้องกันด้วยฟิวส์โดยปกติจะใช้กับหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 2.5 MVA หลักการออกแบบฟิวส์สำหรับหม้อแปลงจะมีหลักการเช่นเดียวกับการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ด้วยฟิวส์ นั่นคือค่าพิกัดกระแสของฟิวส์จะต้องมีค่าเกินกว่าค่าพิกัดกระแสของหม้อแปลง โดยทั่วไปค่าพิกัดกระแสของฟิวส์จะมีค่าประมาณ 150% ของกระแสภาระสูงสุด เพื่อให้มั่นใจว่าฟิวส์จะไม่ตัดวงจรที่ภาระสูงสุดของหม้อแปลง ค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Minimum melt) ของฟิวส์จะต้องสัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกันทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

9.2.5 การป้องกันด้วยรีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay)

ในหม้อแปลงขนาดใหญ่ การป้องกันกระแสเกินหรือการลัดวงจรภายนอกหม้อแปลงจะใช้รีเลย์กระแสเกิน การปรับตั้งโดยทั่วไปจะให้กระแสเริ่มต้นทำงาน (Pick up) อยู่ที่ค่า 115% ของกระแสภาระสูงสุด โดยจะต้องให้ทำงานสัมพันธ์กับอุปกรณ์ป้องกันทางด้านแรงต่ำด้วย นอกจากนี้ยังอาจมีการป้องกันการลัดวงจรด้วยรีเลย์กระแสเกินทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงด้วย

ตัวอย่างที่ 9.1 พิจารณาหม้อแปลงพิกัด 5 MVA 115/22 kV ติดตั้งเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบแบบแขนง ดังรูปที่ 9.3

1. จากพิกัดของหม้อแปลงจะมีค่ากระแสพิกัดเป็น 25.1 A และ 120.28 A ทางด้านแรงดันสูงและทางด้านแรงดันต่ำตามลำดับ
2. พิจารณาให้หม้อแปลงรับภาระสูงสุดได้เกินพิกัด (Overload) เท่ากับ 120% (1.2 p.u.) หรือ 144.34 A ทางด้านแรงดันต่ำ
3. เลือกหม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 150/5 A ติดตั้งทางด้านแรงดันต่ำ
4. ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์จะทำการปรับตั้งไปที่ 115% ของ 144.34 A นั่นคือ 165.98 A หรือเท่ากับ $165.98 \times \frac{5}{150} = 5.53$ A ทางด้านทุติยภูมิของ CT
5. ปรับ Tap setting ของรีเลย์ไปที่ 6 A
6. ปรับค่า Time dial setting ของรีเลย์ให้มีการทำงานสัมพันธ์กับ R12 และ R13



รูปที่ 9.3 การป้องกันหม้อแปลงในตัวอย่างที่ 9.1

ตัวอย่างที่ 9.2 หม้อแปลงขนาด 10 MVA 22/6.6 kV คำนวณค่ากระแสลัดวงจรด้าน 6.6 kV ได้ 10 kA ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบ IEC Standard Inverse (SI) ทางด้าน 6.6 kV ผ่านหม้อแปลงกระแส 1000/5 A จงแสดงการคำนวณปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสเกิน

วิธีทำ กระแสพิกัดทางด้าน 6.6 kV ของหม้อแปลงมีค่าเป็น

$$I_{6.6kV} = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 10^3} = 874.77 \quad \text{A}$$

ทำการปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานให้สูงกว่ากระแสพิกัดของหม้อแปลงเล็กน้อยในที่นี้ปรับตั้งที่ 120% ของกระแสพิกัด

$$I_{P_6.6kV} = 1.2 \times 874.7 = 1049.73 \quad \text{A}$$

คิดเป็นกระแสด้านทุตยภูมิของหม้อแปลงกระแสไปที่รีเลย์เป็น

$$I_P = 1049.73 \times \frac{5}{1000} = 5.248 \quad \text{A}$$

ดังนั้นปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ไว้ที่ 5.248 A

ทำการปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานเมื่อเกิดลัดวงจร 10 kA โดยสั่งตัดวงจรเมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที ซึ่งค่ากระแส 10 kA จะคิดเป็นกระแสไปที่รีเลย์เท่ากับ

$$I_R = 10 \times 10^3 \times \frac{5}{1000} = 50 \,\text{A}$$

คิดเป็นค่า Plug Setting Multiplier (PSM) เท่ากับ

$$I = \frac{50}{5.248} = 9.527$$

ดังนั้นจากการทำงานแบบ IEC Standard Inverse ของรีเลย์

$$1 = \frac{0.14}{9.527^{0.02} - 1} TMS$$

$$TMS = 0.329$$

ตัวอย่างที่ 9.3 จากตัวอย่างที่ 9.2 ถ้าต้องการปรับตั้งรีเลย์กระแสลัดวงจรลงดิน (Ground Current Relay) โดยปรับตั้งกระแสเริ่มต้นทำงานที่ 30% ของกระแสพิกัดหม้อแปลง และกระแสลัดวงจรลงดินที่คำนวณได้มีค่าเป็น 9 kA และต้องการให้รีเลย์ประวิงเวลา 0.5 วินาที จงแสดงการคำนวณปรับตั้งรีเลย์ป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน

วิธีทำ จากค่ากระแสพิกัดทางด้าน 6.6 kV ของหม้อแปลงมีค่าเป็น 874.77 ปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานที่ 30% จะมีค่าเป็น

$$I_{P_6.6kV} = 0.3 \times 874.7 = 262.41 \quad \text{A}$$

คิดเป็นกระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไปที่รีเลย์เป็น

$$I_P = 262.41 \times \frac{5}{1000} = 1.312 \quad \text{A}$$

ดังนั้นปรับตั้งค่ากระแสเริ่มต้นทำงานของรีเลย์ไว้ที่ 1.312 A

ทำการปรับตั้งให้รีเลย์ทำงานเมื่อเกิดลัดวงจรลงดิน 9 kA โดยสั่งตัดวงจรเมื่อเวลาผ่านไป 0.5 วินาที ซึ่งค่ากระแส 9 kA จะคิดเป็นกระแสไปที่รีเลย์เท่ากับ

$$I_R = 9 \times 10^3 \times \frac{5}{1000} = 45 \,\text{A}$$

คิดเป็นค่า Plug Setting Multiplier (PSM) เท่ากับ

$$I = \frac{45}{1.312} = 34.3$$

ดังนั้นจากการทำงานแบบ IEC Standard Inverse ของรีเลย์

$$0.5 = \frac{0.14}{34.3^{0.02} - 1} TMS$$

$$TMS = 0.261$$

หรือในกรณีที่ใช้รีเลย์แบบ IDMT จะจำกัดเวลาต่ำสุดที่ค่า PSM = 20 ดังนั้น

$$0.5 = \frac{0.14}{20^{0.02} - 1} TMS$$

$$TMS = 0.22$$

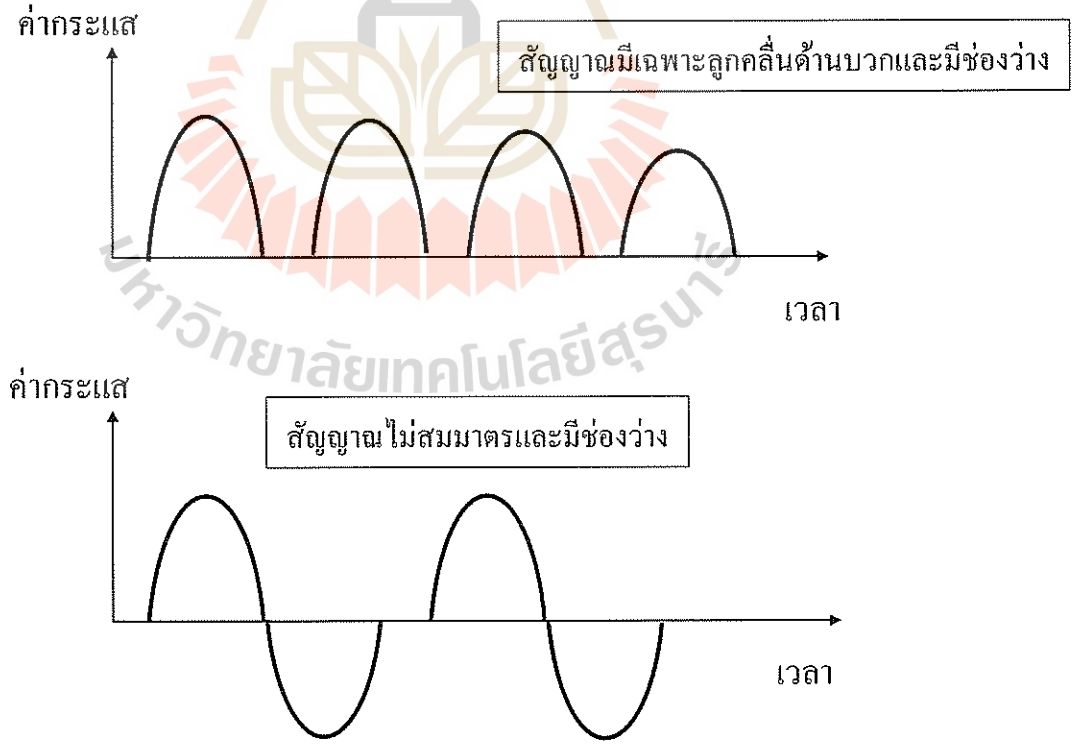
9.2.6 การเกิดสภาวะกระแสเหนี่ยวนำพุ่งเข้า (Inrush Magnetizing Current)

ในสภาวะคงตัว (Steady State) ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าไม่สูง อย่างไรก็ตามในกรณีที่เริ่มจ่ายไฟแก่หม้อแปลงโดยการสับสวิตช์ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กในช่วงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมากส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวและเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำที่มีรูปสัญญาณผิดไปจากสัญญาณไซน์ (Sine Wave) อย่างมาก ค่ากระแสนี้เรียกว่ากระแสเหนี่ยวนำพุ่งเข้า (Inrush Magnetizing Current) ซึ่งอาจคงอยู่เป็นระยะเวลานาน

การเกิดสภาวะการเหนี่ยวนำพุ่งเข้าหม้อแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มจ่ายไฟแก่หม้อแปลงทำให้เกิดกระแสไหลกระชากไหลเข้าหม้อแปลงในปริมาณสูง ปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่ใช่สภาวะผิดปกติ ดังนั้นระบบป้องกันหม้อแปลงจะต้องไม่ทำงานในสภาวะดังกล่าว

โดยปกติแล้วหม้อแปลงจะถูกออกแบบให้ทำงานที่จุดใกล้กับจุดอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก (Knee point) เพื่อจะได้มีขนาด น้ำหนักและราคาต่ำ ผลที่ตามมาคือเมื่อเกิดการฟลักซ์แม่เหล็กเหนี่ยวนำสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเหนือจุดทำงานปกติก็จะส่งผลให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Current) ที่สูง

ขนาดและระยะเวลาของกระแสเหนี่ยวนำพุ่งเข้าจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างในหม้อแปลงก่อนทำการสับสวิตช์ ตำแหน่งลูกคลื่นในขณะที่สับสวิตช์ จำนวนหม้อแปลงที่ขนานกันอยู่ ขนาดและการออกแบบหม้อแปลง ระดับกระแสลัดวงจรของระบบ เป็นต้น รูปที่ 9.4 แสดงตัวอย่างรูปสัญญาณของกระแสพุ่งเข้าเมื่อเริ่มจ่ายไฟแก่หม้อแปลง



รูปที่ 9.4 ตัวอย่างรูปสัญญาณของกระแสพุ่งเข้าเมื่อเริ่มจ่ายไฟแก่หม้อแปลง

รูปคลื่นกระแสเหนี่ยวนำพุ่งเข้ามีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ในสัดส่วนที่มากขึ้นตามค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงขึ้นจากการอิ่มตัวที่มากขึ้นของหม้อแปลง เมื่อแกนเหล็กอิ่มตัวองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ของกระแสจะมีค่าสูงขึ้น โดยในการเริ่มจ่ายไฟแก่หม้อแปลงค่ากระแสเหนี่ยวนำพุ่งเข้าจะมีรูปสัญญาณไม่สมมาตรและมีค่าไม่ต่อเนื่อง รูปสัญญาณของกระแสนี้จะมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์ทั้งอันดับคี่และอันดับคู่ โดยจะมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่สองและสามในปริมาณที่สูง และเมื่อเกิดการอิ่มตัวมากขึ้นสัดส่วนของฮาร์มอนิกส์อันดับสูง ๆ จะมากขึ้น

9.2.7 การแก้ปัญหาผลของกระแสเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าในระบบป้องกัน

การป้องกันไม่ให้ระบบป้องกันทำงานเมื่อเกิดกระแสเหนี่ยวนำพุ่งเข้าในขณะเริ่มจ่ายไฟแก่หม้อแปลงทำได้หลายวิธี เช่น การประวิงเวลา (Time Delay) การใช้รีเลย์แบบหน่วงด้วยฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Restraint) การตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องของกระแสพุ่งเข้า (Gap Detection) หรืออาจเป็นการใช้หลายวิธีร่วมกัน

11.2.7.1 การประวิงเวลา (Time Delay)

จากการที่กระแสพุ่งเข้าเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นชั่วคราว การป้องกันไม่ให้รีเลย์ทำงานในสภาวะดังกล่าวจึงสามารถใช้การประวิงเวลาได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะทำให้ต้องประวิงเวลาในการตัดวงจรไปด้วยแม้ในขณะที่เกิดการผิดพร่องจริง จึงไม่ได้รับความนิยม

11.2.7.2 การใช้รีเลย์แบบหน่วงด้วยฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Restraint)

ถึงแม้ว่ากระแสพุ่งเข้าเมื่อเริ่มจ่ายไฟของหม้อแปลงอาจทำให้รีเลย์เข้าใจว่าเป็นการลัดวงจร แต่รูปสัญญาณของกระแสพุ่งเข้ากับกระแสลัดวงจรมีความแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งเราสามารถใช้รูปสัญญาณที่แตกต่างกันนี้ในการแยกแยะระหว่างกระแสพุ่งเข้ากับกระแสลัดวงจรได้

กระแสพุ่งเข้าจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ในสัดส่วนที่สูง โดยมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่สองด้วย ซึ่งในกระแสลัดวงจรจะมีฮาร์มอนิกส์แต่จะไม่มีฮาร์มอนิกส์อันดับที่สองอยู่ ดังนั้นในทางปฏิบัติมักจะใช้องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ลำดับที่สองในการหน่วงการตัดวงจร การป้องกันด้วยวิธีนี้สามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองกระแส (filter) แยกให้ฮาร์มอนิกส์อันดับที่สองไหลผ่านไปยังขดลวดหน่วงของรีเลย์ทำให้ไม่จำเป็นต้องประวิงเวลาในการตัดวงจรเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรขึ้น

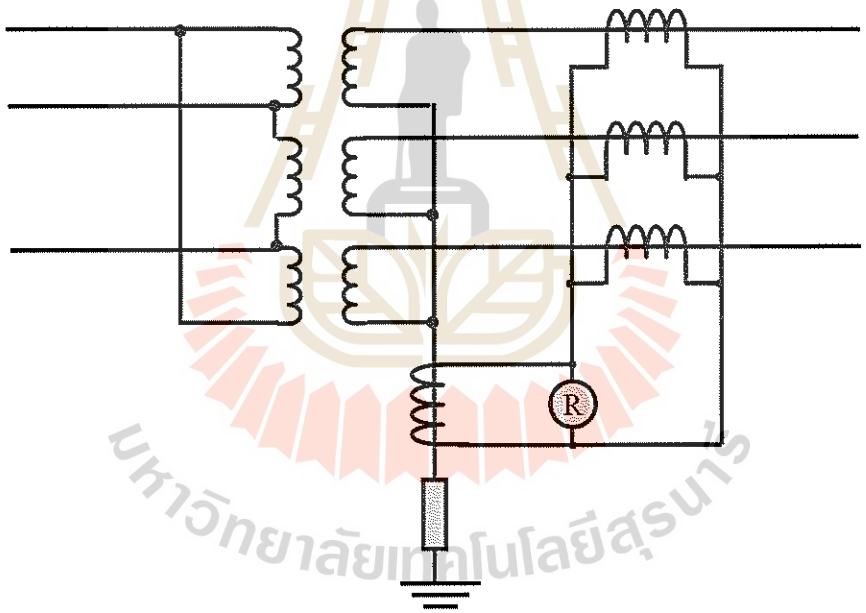
11.2.7.3 การตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องของกระแสพุ่งเข้า (Gap Detection)

วิธีการนี้เป็นการตรวจสอบสภาวะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งเป็นลักษณะของกระแสพุ่งเข้า โดยระยะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์จะมีค่าประมาณ 1/4 ของลูกคลื่น (1/4*f*) ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยการใช้ตัวจับเวลา (Timer) และใช้ตัวจับเวลาอีกตัวหนึ่งประวิงเวลาไว้อีกหนึ่งรอบลูกคลื่น (1/*f*) เพื่อเป็นการยืนยันว่ามีช่วงรูปสัญญาณที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์กลับมาอีก

9.2.8 การป้องกันการลัดวงจรลงดินแบบจำกัด (Restriced Earth Fault Protection)

การป้องกันการลัดวงจรลงดินของหม้อแปลงด้วยวิธีการตรวจวัดกระแสลัดวงจรลงดินทำได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะในหม้อแปลงที่ต่อแบบวาย (Y) และต่อจุดนิวทรัลลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ เพราะค่ากระแสลัดวงจรที่ตำแหน่งใกล้จุดนิวทรัลจะมีค่าต่ำมากดังที่ได้กล่าวไปแล้ว การป้องกันการลัดวงจรลงดินจะทำได้สมบูรณ์ขึ้นได้โดยการใช้การป้องกันการลัดวงจรลงดินแบบจำกัด (Restricted Earth Fault Protection, REF) การป้องกันนี้เป็นการป้องกันการลัดวงจรลงดินในขดลวดแต่ละขดซึ่งหลักการป้องกันจะคล้ายกับการป้องกันแบบผลต่าง โดยรีเลย์ที่ใช้อาจเป็นรีเลย์แบบอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Relay) ซึ่งผลรวมของกระแสในเฟสทั้งสามจะสมดุลกับกระแสในสายนิวทรัลในสภาวะปกติ หรือใช้รีเลย์เปอร์เซ็นต์ผลต่าง (Percentage or Bias Differential Relay) ซึ่งใช้กระแสที่ไหลในเฟสและนิวทรัลเป็นค่าในการหน่วงการทำงานและใช้ค่าผลต่างในการตัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 9.5

การป้องกันแบบนี้จะช่วยให้ตัดวงจรได้เร็วขึ้นและครอบคลุมการเกิดลัดวงจรลงดินได้ดี ช่วยแก้ปัญหาการลัดวงจรในขดลวดที่ตำแหน่งใกล้จุดนิวทรัลซึ่งมีค่ากระแสลัดวงจรต่ำทำให้ตรวจวัดได้ยาก การป้องกันแบบนี้ใช้ในหม้อแปลงที่ต่อแบบลงดินโดยตรง (Solidly Earthed) ได้เช่นกันซึ่งจะทำให้การป้องกันการลัดวงจรลงดินของขดลวดหม้อแปลงทำได้ดีกว่าการวัดกระแสในนิวทรัลเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 9.5 ตัวอย่างวงจรการป้องกันหม้อแปลงลัดวงจรลงดินแบบจำกัด (Restriced Earth Fault Protection)

9.3 การป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลง

พิจารณาหม้อแปลงแบบ 1 เฟสดังรูปที่ 9.6 การป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลงจะทำได้โดยการใช้หม้อแปลงกระแสที่มีอัตราส่วนสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงที่ป้องกัน

จากความสัมพันธ์ของกระแสด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงจะได้ว่า

$$N_1 i_{1p} = N_2 i_{2p} \qquad (11.1)$$

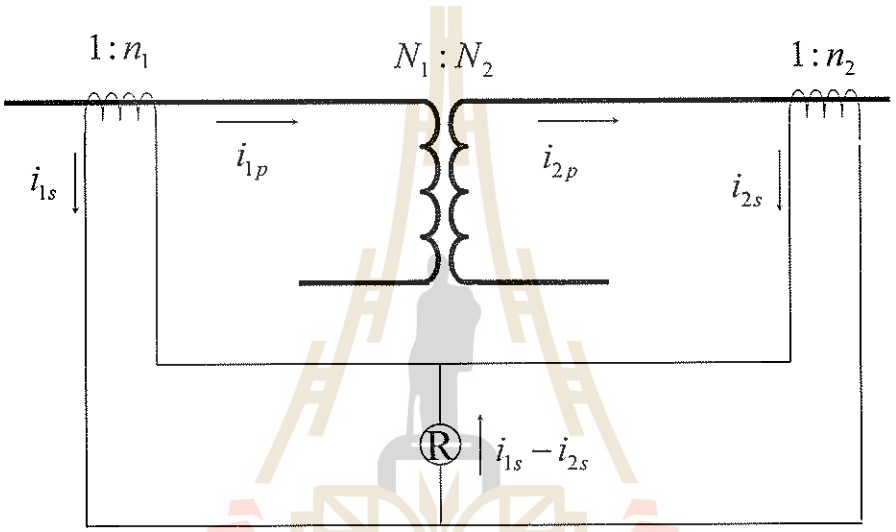
ถ้าเราใช้หม้อแปลงกระแสที่มีอัตราส่วน $n_1/1$ และ $n_2/1$ ค่ากระแสที่ไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสจะมีค่าเป็น

$$i_{1s} = \frac{i_{1p}}{n_1} \quad \rightarrow \quad i_{1p} = n_1 i_{1s} \tag{11.2}$$

$$i_{2s} = \frac{i_{2p}}{n_2} \quad \rightarrow \quad i_{2p} = n_2 i_{2s} \tag{11.3}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$N_1 n_1 i_{1s} = N_2 n_2 i_{2s} \tag{11.4}$$



รูปที่ 9.6 การต่อวงจรป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลง

ถ้าเราเลือกอัตราส่วนหม้อแปลงกระแสที่ทำให้

$$N_1 n_1 = N_2 n_2 \tag{11.5}$$

หรือ $$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_2}{n_1} \tag{11.6}$$

จะได้ว่า

$$i_{1s} = i_{2s} \tag{11.7}$$

ดังนั้น ในสภาวะปกติ

$$i_{1s} - i_{2s} = 0 \tag{11.8}$$

และเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในหม้อแปลงจะทำให้

$$i_{1s} \neq i_{2s} \tag{11.9}$$

และจะเกิดกระแสไหลผ่านรีเลย์เป็น

$$i_d = i_{1s} - i_{2s} \qquad (11.10)$$

ซึ่งจะสามารถระบุการเกิดลัดวงจรได้ว่าเกิดขึ้นในหม้อแปลงและสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรได้

9.4 การป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลงสามเฟส

ในการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส จะต้องคำนึงถึงค่าขนาดและมุมเฟสของกระแสที่แตกต่างกันจากการต่อแบบ Y และ Δของขดลวดด้วย โดยหากการต่อขดลวดของหม้อแปลงกำลังด้านใดต่อแบบ Y ก็จะต่อหม้อแปลงกระแสแบบ Δ และหากการต่อขดลวดของหม้อแปลงด้านใดต่อแบบ Δ ก็จะต่อหม้อแปลงกระแสแบบ Y เพื่อชดเชยขนาดและมุมเฟสที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การเลือกขนาดของหม้อแปลงกระแสเพื่อให้ชดเชยกระแสได้พอดีในทางปฏิบัติจะทำได้ยากมาก จึงต้องมีการใช้หม้อแปลงกระแสเสริมหรือ Auxiliary CT ช่วยในการชดเชยกระแสหรือใช้วิธีการปรับตั้งค่าการทำงานกระแสเริ่มต้นในตัวรีเลย์ ดังจะแสดงในตัวอย่างต่อไป

ตัวอย่างที่ 9.4 หม้อแปลงสามเฟส พิกัดแรงดัน 115 kV/22 kV พิกัด 60 MVA และสามารถทำงานได้สูงสุดที่ 65 MVA ในสภาวะฉุกเฉิน (Short-term emergency limit = 65 MVA) ทางด้าน 115 kV ต่อแบบ Y ส่วนทางด้น 22 kV ต่อแบบ Δ **จงแสดงการต่อวงจรป้องกันแบบผลต่าง พร้อมทั้งระบุอัตราส่วนของ CT ที่ใช้ด้วย** โดยเลือกใช้ CT จากอัตราส่วนมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ *50/5, 100/5, 150/5, 200/5, 250/5, 300/5, 400/5, 450/5, 500/5, 600/5, 800/5, 900/5, 1000/5, 1200/5, 1500/5*

วิธีทำ ค่ากระแสที่ไหลด้าน 115 kV และ 22 kV ที่สภาวะทำงานจ่ายภาระสูงสุดจะหาได้เป็น

ด้าน 115 kV $I_{115kV,\max} = \dfrac{65\times10^6}{\sqrt{3}\times115\times10^3} = 326.33$ A

ด้าน 22 kV $I_{22kV,\max} = \dfrac{60\times10^6}{\sqrt{3}\times22\times10^3} = 1705.81$ A

ดังนั้น ทางด้านแรงดันต่ำ (22 kV) เลือกหม้อแปลงกระแส 1500/5 A และทำการต่อแบบ Y โดยจะมีกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิเป็น

$$I_{CT,22kV} = 1705.81\times\frac{5}{1500} = 5.686 \text{ A}$$

ซึ่งจะเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ทางด้าน 22 kV ในสภาวะการทำงานปกติ ถ้ากระแสไหลผ่านรีเลย์จากทางด้าน 22 kV เป็น 5.686 A

$$I_{relay,22kV} = I_{CT,22kV} = 5.686 \text{ A}$$

กระแสที่ไหลผ่านรีเลย์ทางด้าน 115 kV จะต้องการมีค่าเป็น 5.686 A ด้วย

$$I^{desired}_{relay,115kV} = I_{relay,34.5kV} \cong 5.686 \text{ A}$$

แต่หม้อแปลงกระแสทางด้านแรงสูงจะต่อแบบ Δ(เนื่องจากขดลวดด้าน 115 kV ต่อแบบ Y) จึงต้องออกแบบให้มีกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสเป็น

$$I_{CT,115kV}^{desired} = \frac{I_{relay,115kV}^{desired}}{\sqrt{3}} = \frac{5.686}{\sqrt{3}} = 3.283 \quad \text{A}$$

ดังนั้นต้องใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 326.33/3.283 A หรือ 497/5 A เลือกใช้หม้อแปลงกระแส 500/5 A ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงที่สุด ดังนั้นจะมีกระแสไหลทางด้านทุติยภูมิของรีเลย์เป็น

$$I_{CT,115kV} = 326.33 \times \frac{5}{500} = 3.2633 \quad \text{A}$$

และจะมีกระแสไหลผ่านรีเลย์

$$I_{relay,115kV} = I_{CT,115kV} = \sqrt{3} \times 3.2633 = 5.652 \quad \text{A}$$

ค่ากระแสนี้ไม่สมดุลกับกระแสที่ไหลผ่านรีเลย์จากทางด้าน 115 kV (ซึ่งเท่ากับ 5.686 A) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการเลือกหม้อแปลงกระแสจากอัตราส่วนมาตรฐาน ซึ่งมักจะทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบการป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลงที่ต่อแบบ Y-Δ

วิธีการแก้ปัญหานี้ที่ง่ายที่สุดคือการใช้หม้อแปลงกระแสเสริม (Auxiliary CT) ซึ่งจะมีอัตราส่วนที่สามารถปรับได้ในช่วงที่กว้าง โดยหม้อแปลงกระแสเสริมจะเป็นหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กทำงานที่ค่ากระแสและแรงดันต่ำ ทำให้มีราคาถูกกว่าการใช้หม้อแปลงกระแสหลักที่ออกแบบให้มีอัตราส่วนมาเป็นพิเศษ

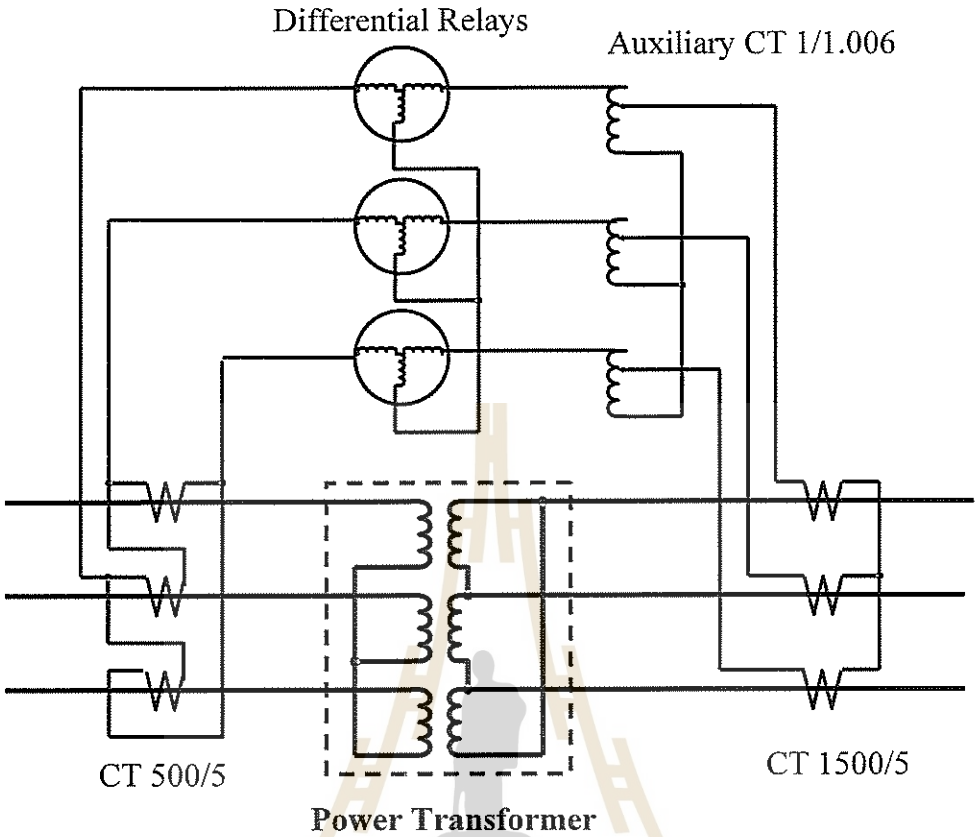
ในกรณีที่แก้ปัญหาด้วยหม้อแปลงกระแสเสริม จะต้องปรับค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสเสริมไปที่

$$\text{Aux. CT Ratio} = \frac{5.652}{5.686} = \frac{1}{1.006} \quad \text{A}$$

ซึ่งจะทำให้กระแสที่ผ่านรีเลย์จากทางด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำสมดุลกันที่สภาวะปกติ ดังแสดงในรูปที่ 9.7 อย่างไรก็ตามการใช้หม้อแปลงกระแสเสริมยังมีข้อเสียอยู่คือ เป็นการเพิ่มค่าเบอร์เดนให้กับหม้อแปลงกระแสหลักและทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้น อีกวิธีหนึ่งที่จะแก้ปัญหาเหมาะสมกว่าคือการปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Tap setting) ของรีเลย์ให้ทำงานที่ค่ากระแสแตกต่างกันมากพอ หากไม่สามารถทำได้จึงค่อยใช้หม้อแปลงกระแสเสริมดังกล่าว

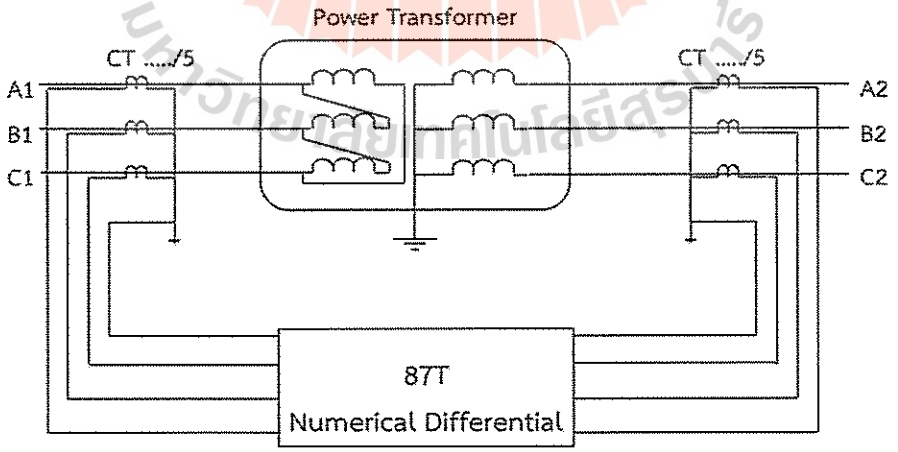
บ่อยครั้งที่การป้องกันหม้อแปลงจะใช้วงจรรวมการป้องกันแบบผลต่างกับการป้องกันการลัดวงจรลงดินแบบจำกัดเข้าด้วยกัน การป้องกันแบบรวมกันลักษณะนี้สามารถทำได้ง่ายในรีเลย์แบบดิจิทัล ซึ่งสามารถบันทึกค่าอัตราส่วนและมุมเฟสในการประมวลได้ โดยในกรณีที่ไม่สามารถชดเชยอัตราส่วนและมุมเฟสด้วยตัวรีเลย์ ก็สามารถใช้หม้อแปลงกระแสเสริม (Auxiliary CT) ช่วยได้

อย่างไรก็ตาม การใช้วงจรป้องกันรวมควรมีการปรับตั้งที่ระวังไม่ให้รีเลย์ป้องกันการลัดวงจรลงดินแบบจำกัดทำงานในกรณีที่เกิดลัดวงจรระหว่างขดลวดที่ไม่ได้ลงดิน เพราะจะทำให้การวิเคราะห์สาเหตุการลัดวงจรทำได้ยากขึ้น



รูปที่ 9.7 การต่อวงจรป้องกันแบบผลต่างในตัวอย่างที่ 9.2

ในรีเลย์ผลต่างที่เป็นแบบไมโครโปรเซสเซอร์อาจไม่จำเป็นต้องทำการต่อหม้อแปลงกระแสเพื่อชดเชยมุมเฟสของหม้อแปลงกำลัง เนื่องจากสามารถปรับตั้งได้ที่ตัวรีเลย์ ดังแสดงในรูปที่ 9.8



รูปที่ 9.8 ตัวอย่างการป้องกันผลต่างในหม้อแปลงด้วยรีเลย์แบบไมโครโปรเซสเซอร์

9.5 การป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กเกิน

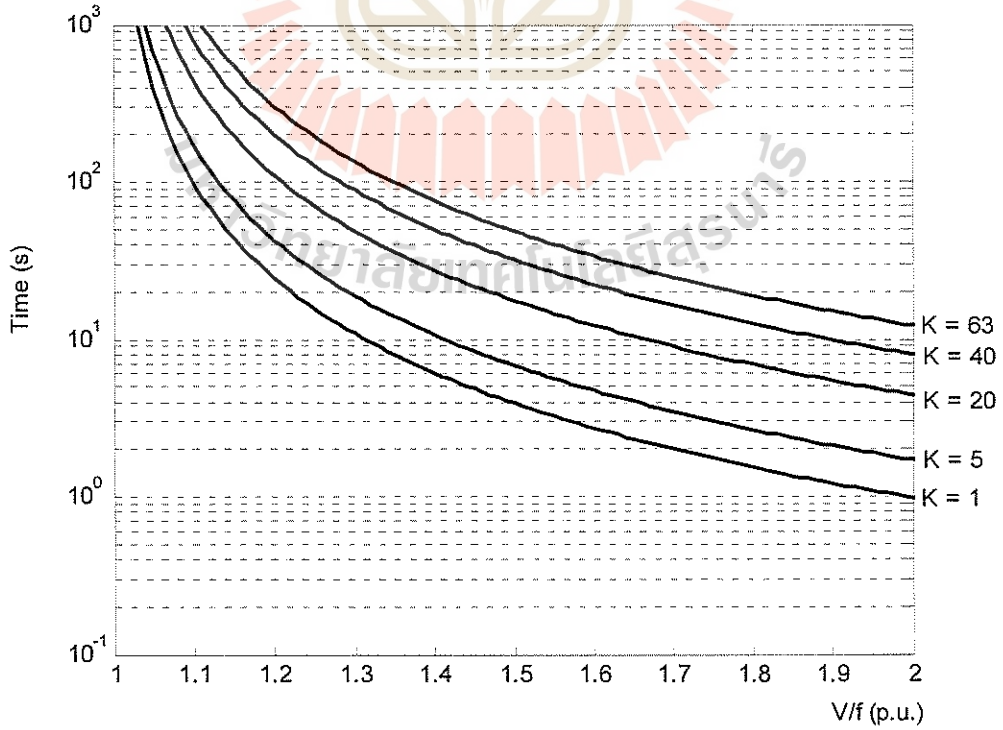
หม้อแปลงกำลังก็มีการป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กเกินในลักษณะเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในหัวข้อ 9.8.1 ทั้งนี้แกนเหล็กของหม้อแปลงกำลังจะมีข้อจำกัดของปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่จะต้องไม่มากเกินกว่าจะทำให้แกนเหล็กอิ่มตัว และถ้าหากเกิดฟลักซ์แม่เหล็กมากเกินไปก็จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กไหลไปในโครงสร้างส่วนอื่น ๆ ของหม้อแปลง และทำให้เกิดกระแสไหลวนในปริมาณมาก ทำให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงได้ ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันสภาวะฟลักซ์แม่เหล็กเกินดังกล่าว ทั้งนี้ฟลักซ์แม่เหล็กจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันตกคร่อมขดลวดและแปรผกผันกับความถี่

สภาวะแรงดันเกินสามารถะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ

- แรงดันกระชากเกิดชั่วขณะ (Transient surge voltage)
- แรงดันเกินความถี่กำลัง (Power frequency overvoltagea)

แรงดันกระชากเกินชั่วขณะเกิดจากการลัดวงจร การสับสวิตช์ และฟ้าผ่า ซึ่งทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวด (ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 9.2.3) แรงดันเกินลักษณะนี้สามารถป้องกันได้โดยการต่อกับดักฟ้าผ่าระหว่างขั้วของหม้อแปลงลงดิน

แรงดันเกินความถี่กำลังเป็นแรงดันความถี่ปกติที่คงอยู่เป็นเวลานากกว่าแรงดันกระชากชั่วขณะ แรงดันเกินลักษณะนี้จะส่งผลให้เกิดความเครียดต่อฉนวนของหม้อแปลงและทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นที่สูง ฟลักซ์แม่เหล็กที่สูงขึ้นจะเหนี่ยวนำไปยังโครงสร้างเหล็กอื่น ๆ เช่น แป้นเกลียว สลักเกลียว ซึ่งไม่ได้ถูกออกแบบไว้ให้รองรับฟลักซ์แม่เหล็กไว้ทำให้เกิดความร้อนต่อฉนวนในบริเวณใกล้เคียงและเกิดความเสียหายตามมาได้ ส่วนความถี่ที่ลดลงก็จะส่งผลให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเกินได้และสร้างความเสียหายในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 9.9 ตัวอย่างคุณสมบัติการประวิงเวลาของรีเลย์ป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กเกิน

โดยการประวิงเวลาเป็นไปตามสมการ $t = \dfrac{0.8 + 0.18K}{\left(\dfrac{(V/f)}{(V/f)^{setting}} - 1 \right)^2}$

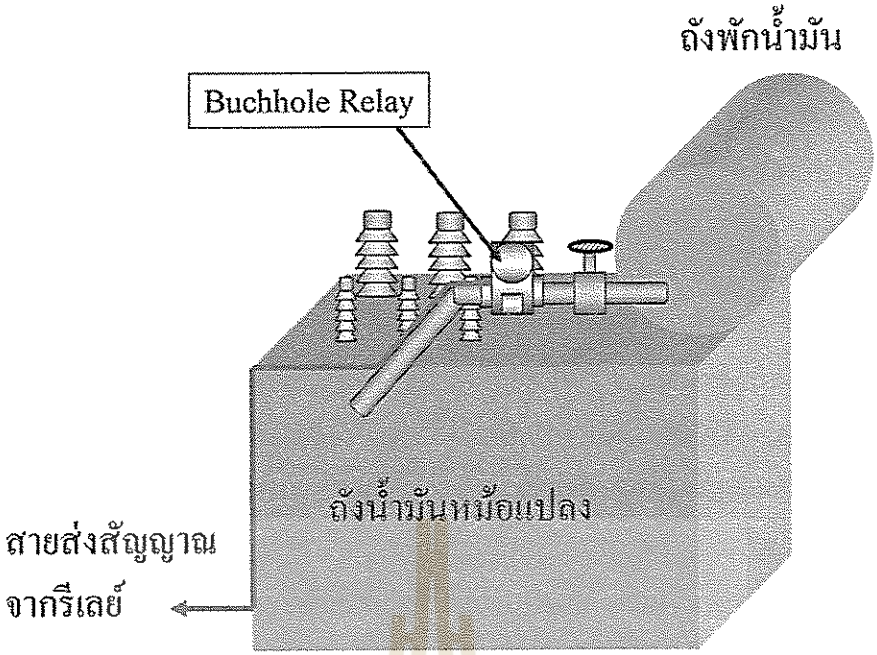
ดังนั้นการป้องกันจะใช้ค่าอัตราส่วนของแรงดันกับความถี่ในลักษณะต่อหน่วย (per unit) เรียกว่าค่าโวลต์ต่อเฮิร์ท (Voltage per Herst, V/Hz) การป้องกันลักษณะนี้เรียกว่าการป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กเกิน (Overfluxing Protection) หรือการป้องกันโวล์ทต่อเฮิร์ท (V/Hz Protection) ทั้งนี้ในการออกแบบจะต้องใช้คุณสมบัติการคงทนต่อฟลักซ์แม่เหล็กของหม้อแปลงซึ่งมักแสดงเป็นกราฟของค่า V/Hz กับเวลาที่หม้อแปลงจะทนได้

จากการที่สภาวะฟลักซ์แม่เหล็กเกินในหม้อแปลงอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระบบภายนอกหม้อแปลง ซึ่งเป็นสภาวะชั่วคราวจึงไม่จำเป็นต้องตัดวงจรหม้อแปลงทันทีที่ตรวจจับฟลักซ์แม่เหล็กเกินได้ ดังนั้นการป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กเกินจึงสามารถใช้วิธีการประวิงเวลา ซึ่งโดยปกติจะใช้คุณสมบัติการประวิงเวลาแบบแน่นอน (Difinite Time) ในการแจ้งเตือน (Alarm) ก่อน และใช้การประวิงเวลาแบบผกผันจำกัดค่าเวลาต่ำสุด (Invers Difnite Minimum Time, IDMT) ในการสั่งตัดวงจร โดยค่าเวลาที่หน่วงจะแปรผกผันกับค่า V/Hz รูปที่ 9.9 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติการประวิงเวลาของรีเลย์ป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กเกิน

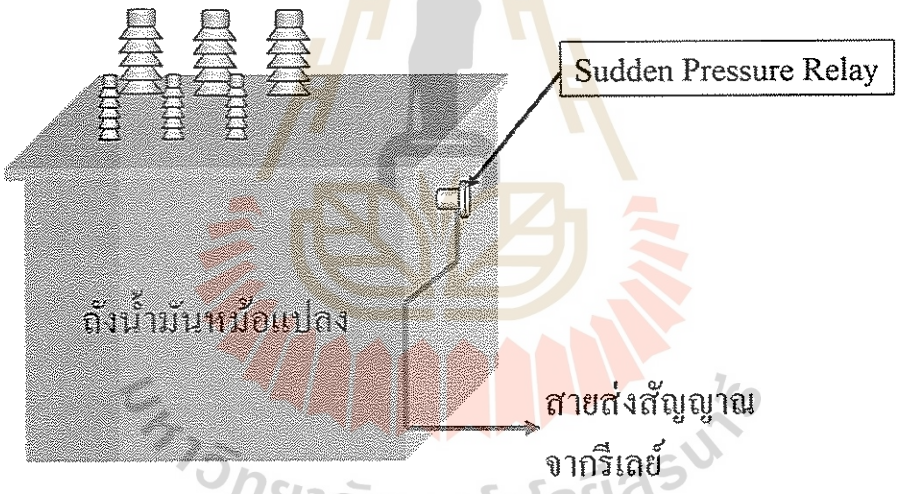
9.6 การป้องกันโดยตรวจจับก๊าซและแรงดันในถังน้ำมันหม้อแปลง

ในหม้อแปลงแบบฉนวนด้วยน้ำมัน เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหม้อแปลงจะทำให้เกิดก๊าซในถังน้ำมันขึ้น ทำให้แรงดันในถังน้ำมันสูงขึ้น ดังนั้นการตรวจจับก๊าซและแรงดันในถังน้ำมันจะช่วยระบุได้ว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นภายในหม้อแปลง ในกรณีที่เป็นหม้อแปลงแบบมีถังรองรับน้ำมัน (Conservator) จะใช้รีเลย์ตรวจจับก๊าซที่เรียกตามชื่อของผู้คิดค้นว่า Buchholz relay ดังแสดงดังรูปที่ 9.10 ในกรณีที่ไม่มีถังรองรับน้ำมันซึ่งก๊าซจะอยู่ส่วนบนของถังจะใช้รีเลย์ที่เรียกว่ารีเลย์ตรวจจับแรงดัน (Sudden Pressure Relay, SPR) ติดตั้งอยู่ด้านข้างของถังน้ำมันหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 9.11 รีเลย์ชนิดนี้จะไม่ทำงานถ้าหากแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งอาจเกิดจากการจ่ายภาระที่สูงของหม้อแปลงไม่ใช่การลัดวงจร

การทำงานของรีเลย์ตรวจจับแรงดันก๊าซจะเป็นการทำให้มั่นใจได้ว่าการเกิดลัดวงจรเกิดขึ้นในขดลวดของหม้อแปลงจริง และทำให้การปรับตั้งรีเลย์ป้องกันแบบผลต่างทำได้ยืดหยุ่นขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถจัดกระบวนการปิดวงจรกลับ (reclosing) ได้ในกรณีที่รีเลย์ป้องกันแบบผลต่างทำงานแต่รีเลย์ตรวจจับแรงดันก๊าซไม่ทำงานได้ เนื่องจากกรณีดังกล่าวจะมีแนวโน้มว่าการลัดวงจรเกิดขึ้นภายนอกหม้อแปลง เช่นบริเวณขั้วต่อ (Bushing) ซึ่งอาจเป็นการลัดวงจรแบบชั่วคราว



รูปที่ 9.10 รีเลย์ตรวจจับก๊าซ (Buchholz relay)



รูปที่ 9.11 รีเลย์ตรวจจับแรงดัน (Sudden Pressure Relay, SPR)

9.7 การป้องกันอุณหภูมิสูงในหม้อแปลง

โดยปกติพิกัดของหม้อแปลงจะกำหนดโดยอุณหภูมิที่หม้อแปลงสามารถทำงานได้โดยไม่เสียหายภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศ (Ambient temperature) ที่สูงที่สุด ซึ่งในสภาวะนี้จะไม่สามารถยอมให้หม้อแปลงทำงานเกินพิกัดได้ แต่ในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ก็อาจยอมให้หม้อแปลงทำงานเกินพิกัดได้บ้าง โดยทั่วไปอุณหภูมิของหม้อแปลงจะกำหนดไว้ไม่เกินค่าประมาณ 95°C การป้องกันการทำงานเกินพิกัดหม้อแปลงจึงเป็นการป้องกันไม่ให้หม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงเกินไปนั่นเอง

การป้องกันอุณหภูมิสูงในหม้อแปลงมักจะสนใจที่จุดที่มีความร้อนสูงสุดเรียกว่า hot-spot การตรวจวัดอุณหภูมิจะใช้ในการควบคุมการทำงานของพัดลมระบายความร้อนและปั๊มหมุนเวียนน้ำมัน นอกจากนี้ยังใช้ในการส่งสัญญาณเตือนสภาวะอุณหภูมิสูงให้แก่ผู้ปฏิบัติงานได้ทราบและทำการแก้ไขป้องกัน บางครั้งซึ่งไม่บ่อยนักก็ใช้การตรวจจับอุณหภูมิในการสั่งตัดหม้อแปลงกำลังออกจากระบบในกรณีที่จำเป็น

9.8 การผิดพร่องของแกนเหล็ก

การติดตั้งหม้อแปลงจะต้องมีการฉนวนระหว่างโครงสร้างของแกนเหล็กกับโครงสร้างอื่นของหม้อแปลง และหากฉนวนเสื่อมสภาพหรือเกิดความเสียหายทำให้เกิดการเชื่อมต่อของแกนเหล็กกับโครงสร้างอื่นที่เป็นโลหะก็จะทำให้เกิด กระแสไหลวน (Eddy Current) ไหลในโครงสร้างอื่นในปริมาณที่สูงและทำให้เกิดความร้อนขึ้น และอาจสร้างความเสียหายต่อขดลวดของหม้อแปลงได้

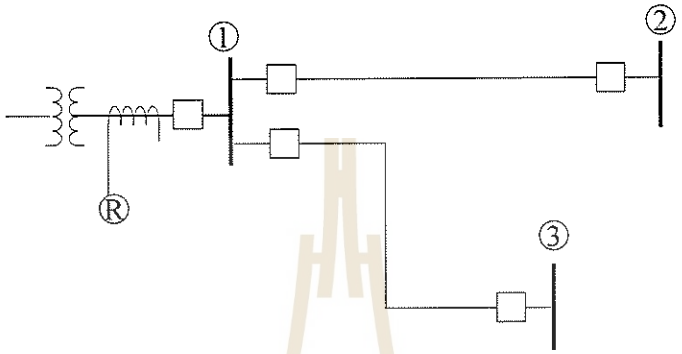
ในกรณีนี้กระแสที่สูงขึ้นในแกนเหล็กจะไม่สามารถตรวจสอบได้จากกระแสของหม้อแปลงและระบบป้องกันจะไม่ทำงานในสภาวะดังกล่าว ซึ่งความผิดปกตินี้ควรตรวจพบในเบื้อต้นก่อนที่จะทำให้เกิดความเสียหายที่มากขึ้น

ในกรณีที่หม้อแปลงเป็นแบบฉนวนด้วยน้ำมัน การเกิดความร้อนในแกนเหล็กอาจทำให้ฉนวนของขดลวดเสียหายได้ และทำให้เกิดเบรกดาวน์ในฉนวนน้ำมัน ซึ่งจะทำให้เกิดฟองก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง ก๊าซดังกล่าวจะไหลขึ้นสู่ถังพักน้ำมัน (Conservator) และสามารถตรวจพบได้ด้วยรีเลย์ตรวจจับก๊าซ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบฝึกหัดบทที่ 9

1. จงอธิบายถึงปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบป้องกันหม้อแปลงกำลัง
2. พิจารณาหม้อแปลงพิกัด 6 MVA 115/24 kV ติดตั้งที่บัส 1 ดังรูปที่ P9.2.1 เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบแบบแขนง ดังรูป จงเลือกขนาดของหม้อแปลงกระแสโดยใช้หม้อแปลงกระแสที่มีค่าตามมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ *50/5, 100/5, 150/5, 200/5, 250/5, 300/5, 400/5, 450/5, 500/5, 600/5, 800/5, 900/5, 1000/5, 1200/5* และแสดงหลักการปรับตั้งค่าของรีเลย์ป้องกันหม้อแปลงที่บัส 1 โดยรีเลย์สามารถปรับค่ากระแสเริ่มต้นทำงาน (Tap setting) ได้ที่ค่า 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12 A



P9.2.1

3. จงอธิบายหลักการป้องกันแบบผลต่างในหม้อแปลงกำลัง
4. หม้อแปลงสามเฟส พิกัดแรงดัน 115 kV/24 kV พิกัด 30 MVA และสามารถทำงานได้สูงสุด 120% ของพิกัดในสภาวะฉุกเฉินระยะเวลาสั้น ทางด้าน 115 kV ต่อแบบ Y ส่วนทางดัน 24 kV ต่อแบบ □ จงแสดงการต่อวงจรป้องกันแบบผลต่าง พร้อมทั้งระบุอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสที่ใช้ด้วยโดยใช้หม้อแปลงกระแสที่มีค่าตามมาตรฐาน ดังต่อไปนี้ *50/5, 100/5, 150/5, 200/5, 250/5, 300/5, 400/5, 450/5, 500/5, 600/5, 800/5, 900/5, 1000/5, 1200/5* และให้เลือกอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสเสริมที่เหมาะสมในการแก้ไขค่ากระแสที่ไม่สมดุล พร้อมทั้งแสดงการต่อวงจรป้องกันทั้งหมดด้วย
5. จงอธิบายหลักการป้องกันแรงดันก๊าซในถังน้ำมันหม้อแปลง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

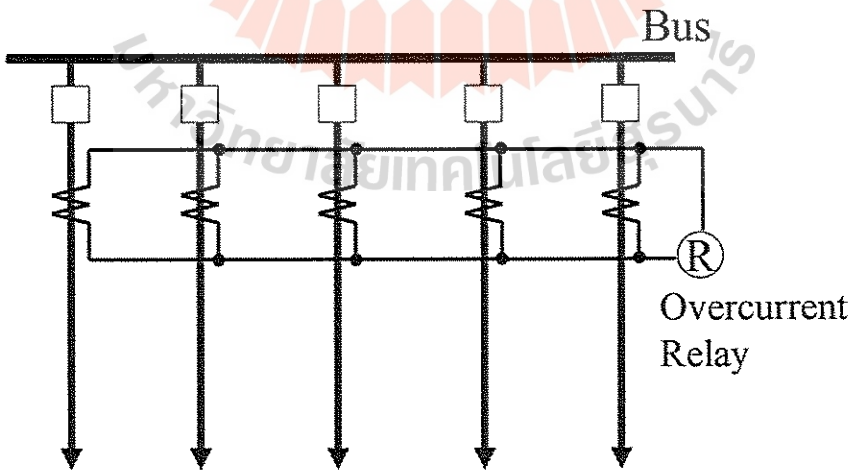
บทที่ 10
การป้องกันบัส
(Bus-Zone Protections)

การป้องกันบัสจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าหม้อแปลงเนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องพิจารณาน้อยกว่าคือไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนหรือมุมเฟสที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการป้องกันบัสจะต้องทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากบัสเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่ออยู่กับหลายอุปกรณ์ การผิดพร่องที่บัสจะทำให้เกิดการปลดวงจรของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับบัสทั้งหมด วิธีการหลักในการป้องกันบัสเจะเป็นการป้องกันแบบผลต่างซึ่งเป็นหลักการที่ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ตรวจสอบผลรวมกระแสที่ไหลเข้าที่บัสจะต้องมีค่าเป็นศูนย์

ปัญหาสำคัญในการป้องกันบัสคือการที่หม้อแปลงกระแสในแต่ละสายส่งหรือแต่ละอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับบัสจะเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กที่ไม่เท่ากัน เมื่อเกินการลัดวงจรภายนอกบัส เช่น ในสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งหม้อแปลงกระแสของสายส่งเส้นนั้นจะมีกระแสลัดวงจรผ่านเท่ากับกระแสลัดวงจรทั้งหมด

10.1 การป้องกันการลัดวงจรในบัส

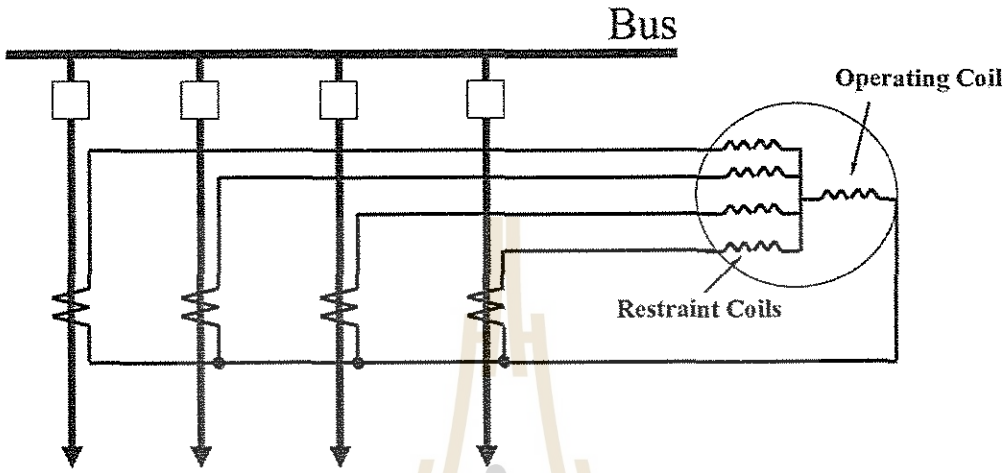
การป้องกันบัสแบบพื้นฐานเป็นการใช้รีเลย์กระแสเกินต่อวงจรป้องกันแบบผลต่างดังแสดงดังรูปที่ 12.1 โดยการต่อวงจรป้องกันแบบผลต่างจะต่อขนานไปกับรีเลย์กระแสเกินของแต่ละสายส่งทั้งสามเฟส โดยในสภาวะการทำงานปกติผลรวมของกระแสที่ไหลเข้าสู่บัสจะมีค่าเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติอาจมีกระแสไหลผ่านรีเลย์เล็กน้อยจากความผิดพลาดของการวัด การปรับตั้งจึงต้องให้รีเลย์ทำงานที่ค่ากระแสสูงกว่าค่ากระแสผิดพลาดดังกล่าว



รูปที่ 12.1 การป้องกันการลัดวงจรในบัสด้วยวงจรแบบผลต่างโดยใช้รีเลย์กระแสเกิน

10.2 การป้องกันแบบเปอร์เซ็นต์ผลต่าง

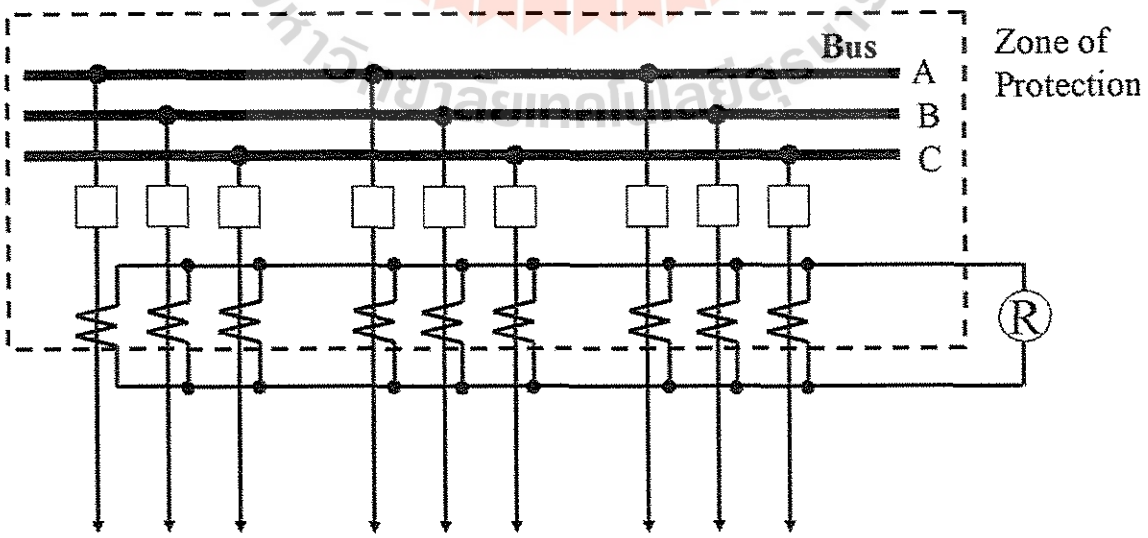
เช่นเดียวกันกับการป้องกันแบบผลต่างในอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ได้กล่าวไปแล้ว การป้องกันแบบเปอร์เซ็นต์ผลต่างจะช่วยลดความผิดพลาดในการทำงาน รูปที่ 12.2 แสดงการใช้รีเลย์แบบเปอร์เซ็นต์ผลต่างในการป้องกันการลัดวงจรที่บัส รีเลย์แบบเปอร์เซ็นต์ผลต่างที่ใช้ในการป้องกันบัสจะมีขดลวดตัดวงจร (Operating Coil) หนึ่งขดและจะมีขดลวดหน่วง (Restraint Coil) ของแต่ละวงจรซึ่งค่ากระแสที่จะทำให้รีเลย์ทำงานจะแปรผันกับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดหน่วง



รูปที่ 12.2 วงจรการป้องกันแบบเปอร์เซ็นต์ผลต่าง

10.3 การแบ่งขอบเขตการป้องกันบัส

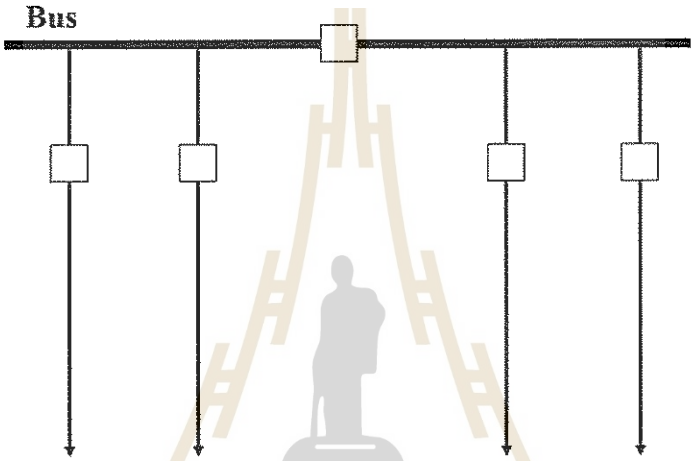
การกำหนดขอบเขตการป้องกันในการป้องกันบัสในกรณีที่มีบัสเดียวจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12.3 แต่ถึงแม้ว่าการเกิดการผิดพร่องในบัสจะเกิดขึ้นน้อยมาก แต่ถ้าหากเกิดขึ้นแล้วจะทำให้อุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับบัสถูกตัดออกจากวงจรทั้งหมด ดังนั้นจึงมีการลดจำนวนของอุปกรณ์ที่จะถูกตัดวงจรเมื่อเกิดการผิดพร่องที่บัสโดยการแบ่งบัสออกเป็นส่วน ๆ โดยมีการเชื่อมต่อด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ รูปแบบการแบ่งส่วนของบัสที่ง่ายและประหยัดที่สุดคือการแบ่งการจัดบัสแบบบัสเดี่ยวเบรกเกอร์เดี่ยว (Single bus, single breaker) ให้เป็นสองส่วนดังแสดงดังรูปที่ 12.4



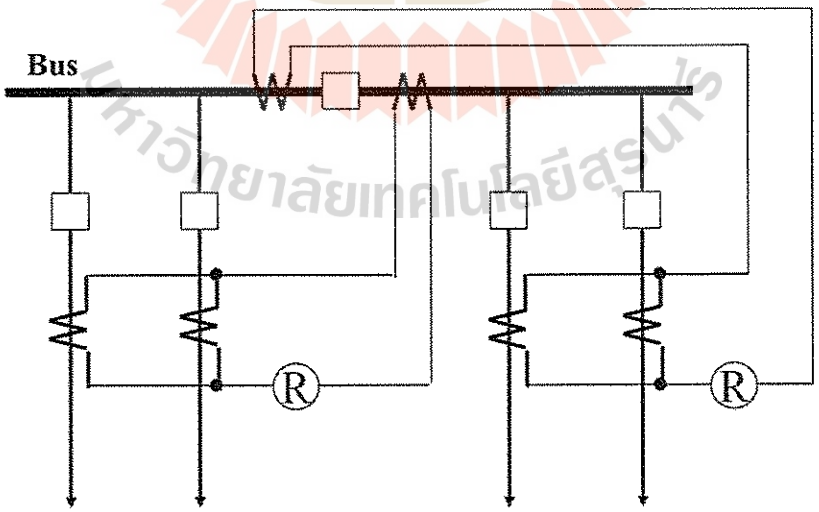
รูปที่ 12.3 ขอบเขตการป้องกันบัสโดยแสดงเป็นสามเฟส

รูปที่ 12.5 แสดงการป้องกันแบบผลต่างในการจัดบัสแบบบัสเดี่ยวเบรกเกอร์เดี่ยวที่มีการแบ่งส่วน ซึ่งจะเห็นว่าการป้องกันจะแบ่งออกเป็นสองขอบเขตป้องกัน และจะช่วยให้มีการตัดอุปกรณ์ออกจากวงจรน้อยลงเมื่อเกิดการผิดพร่องขึ้นในบัส

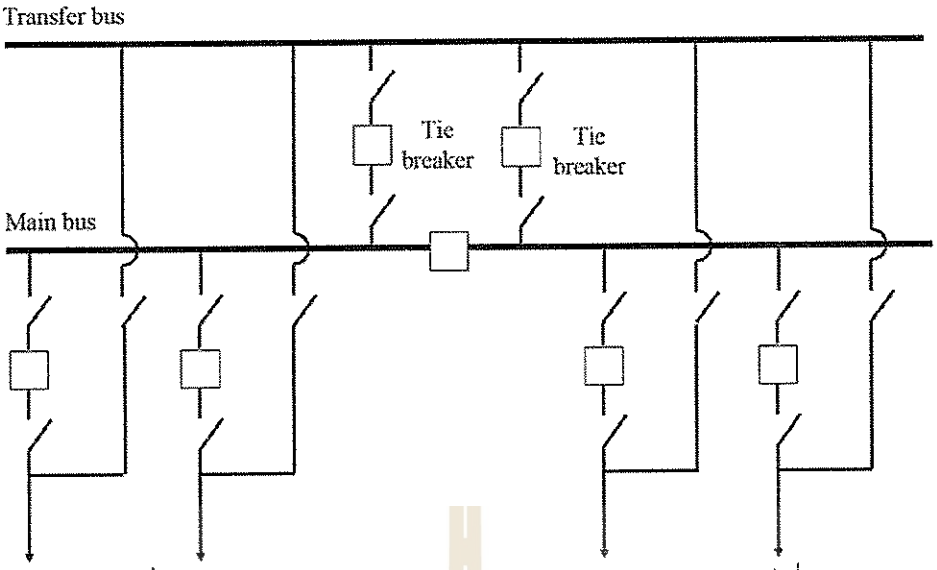
ในการจัดบัสแบบอื่นก็สามารถแบ่งส่วนของบัสได้เช่นการ ตัวอย่างเช่นการจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์เดี่ยว (Two bus, Single breaker หรือ Main and trabsfer bus) ซึ่งจะมีบัสที่เป็นบัสใช้งานหลักและบัสสำรองที่จะใช้ในกรณีซ่อมบำรุงหรือเมื่อเกิดการผิดพร่องขึ้น จะสามารถแบ่งได้ดังแสดงดังรูปที่ 12.6 ในกรณีนี้นอกจากจะต้องมีการลงทุนเพิ่มเบรกเกอร์ที่แบ่งส่วนบัสแล้วยังต้องเพิ่มเบรกเกอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างบัสหลักกับบัสสำรอง (Tie breaker) อีกหนึ่งตัว และจะเห็นว่าการแบ่งขอบเขตการป้องกันจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 12.7



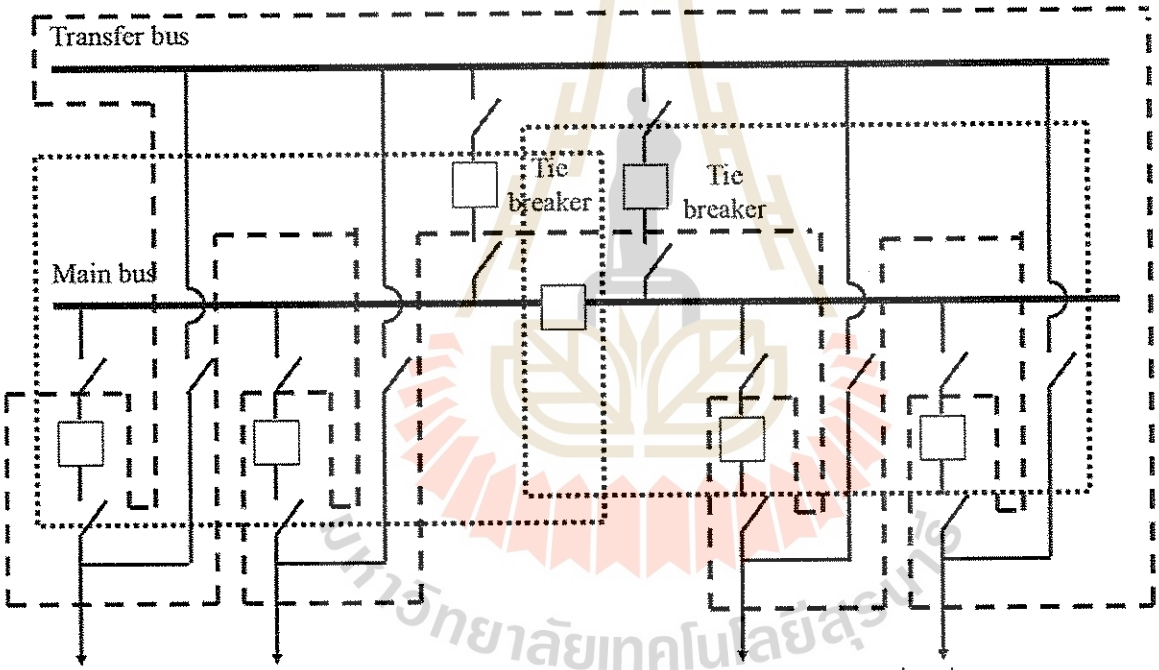
รูปที่ 12.4 การแบ่งส่วนบัสของการจัดบัสแบบบัสเดี่ยวเบรกเกอร์เดี่ยว



รูปที่ 12.5 การป้องกันแบบผลต่างในการจัดบัสแบบบัสเดี่ยวเบรกเกอร์เดี่ยวที่มีการแบ่งส่วน

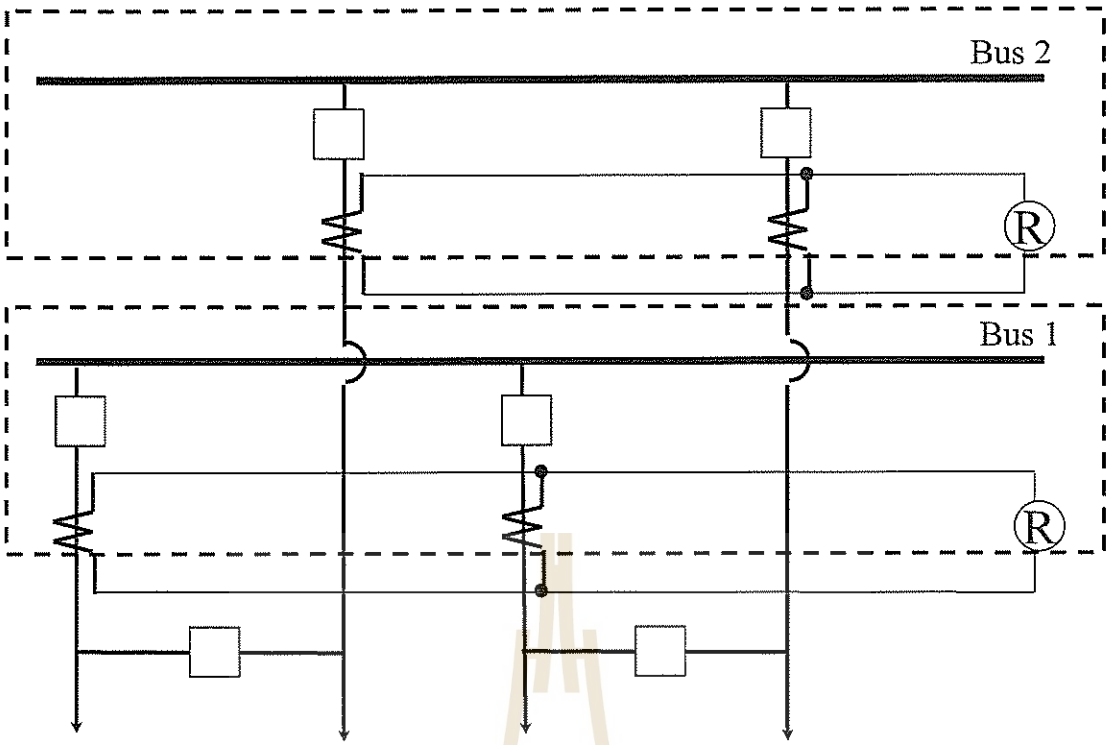


รูปที่ 12.6 การแบ่งส่วนบัสของการจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์เดี่ยว



รูปที่ 12.7 ขอบเขตการป้องกันของการจัดบัสแบบบัสคู่เบรกเกอร์เดี่ยวที่มีการแบ่งส่วนบัส

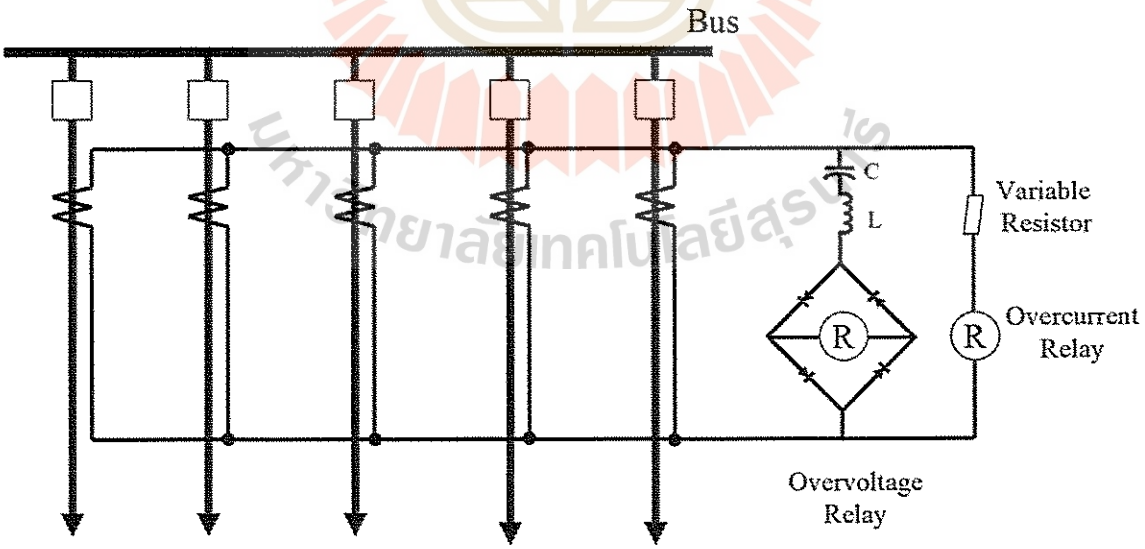
ในกรณีการจัดบัสแบบหนึ่งเบรกเกอร์ครึ่ง (Breaker and a half) ซึ่งเป็นวิธีการจัดบัสที่นิยมใช้ในระบบ EHV มากที่สุดจะสามารถแสดงขอบเขตการป้องกันและตำแหน่งที่ติดตั้งหม้อแปลกระแสดังรูปที่ 12.8



รูปที่ 12.8 ขอบเขตการป้องกันของการจัดบัสแบบหนึ่งเบรกเกอร์ครึ่ง

10.4 การป้องกันด้วยรีเลย์แรงดันแบบอิมพีแดนซ์สูง

ถึงแม้ว่าจะใช้รีเลย์แบบเปอร์เซ็นต์ผลต่างก็ยังเกิดปัญหาจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสในขณะที่เกิดการลัดวงจรภายนอกในตำแหน่งที่ใกล้กับบัสได้ ดังนั้นในระบบแรงดันสูงพิเศษ (EHV) จึงมักใช้รีเลย์แรงดันแบบค่าอิมพีแดนซ์สูง รีเลย์นี้จะออกแบบเพื่อป้องกันผลจากการอิ่มตัวของหม้อแปลงกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจรภายนอกบัส

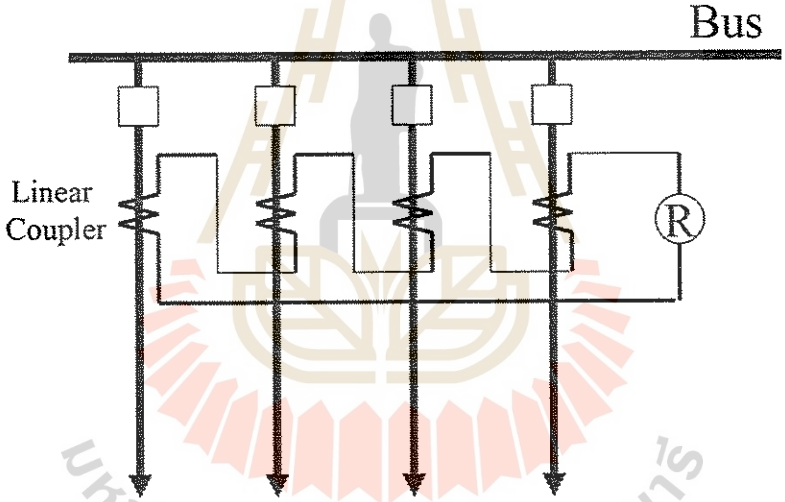


รูปที่ 12.9 วงจรการป้องกันด้วยรีเลย์แรงดันแบบอิมพีแดนซ์สูง

หลักการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 12.9 ซึ่งจะใช้วิธีเปรียบเทียบค่าแรงดันตกคร่อมรีเลย์ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในและภายนอบขอบเขตการป้องกัน การเชื่อมต่อรีเลย์ชนิดนี้จะคล้ายกับการป้องกันแบบผลต่าง แต่รีเลย์ที่ใช้จะเป็นรีเลย์แบบอิมพีแดนซ์สูง จากรูปวงจร L-C จะต่ออนุกรมกับรีเลย์ป้องกันแรงดันเกินเพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดที่เกิดจากผลของส่วนกระแสตรง (DC) เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น และเนื่องจากวิธีการนี้จะทำให้การตัดวงจรช้าลงไปจึงมีส่วนของรีเลย์กระแสเกินที่ต่ออยู่กับตัวต้านทานที่มีค่าเปลี่ยนแปลงคือจะมีความต้านทานลดลงถ้าเกิดแรงดันตกคร่อมมากขึ้นการที่จะป้องกันแรงดันตกคร่อมรีเลย์ที่สูงเกินไปและช่วยตัดวงจรอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรที่สูง

10.5 การใช้ตัวเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น (Linear Couplers)

การป้องกันแบบนี้จะใช้ตัวเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น (Linear Couplers) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กผ่านรีแอกเตอร์แกนอากาศแทนการใช้หม้อแปลงกระแสแบบธรรมดา โดยจะสร้างแรงดันทางด้านทุติยภูมิของชุดเชื่อมต่อแบบเชิงเส้นให้เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับกระแสทางด้านปฐมภูมิ จะช่วยลดปัญหาเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ดังแสดในรูปที่ 12.101



รูปที่ 12.10 การป้องกันด้วยชุดเชื่อมต่อเชิงเส้น

การทำงานของรีเลย์จะสามารถพิจารณาได้จาก

$$V_{\text{sec}} = I_{pri} M \qquad (10.1)$$

โดยที่

V_{sec} คือ แรงดันทางด้านทุติยภูมิของตัวเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น

I_{pri} คือ กระแสทางด้านปฐมภูมิของตัวเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น

M คือ อิมพีแดนซ์ร่วม (Mutual Impedance) ของตัวเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น

ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายนอกขอบเขตการป้องกัน ก็จะทำให้ผลรวมของแรงดันที่เกิดจากจากกระแสที่ไหลเข้าและออกหักล้างกันหมดและจะไม่มีแรงดันตกคร่อมรีเลย์หรือมีน้อยกว่าค่าที่ปรับตั้งไว้ แต่ในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในขอบเขตการป้องกัน กระแสจะไหลเข้าไปที่บัสจากทุกทิศทาง ทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีทิศทางที่เสริมกันและจะทำให้กระแสไหลผ่านรีเลย์เป็น

$$I_{relay} = \frac{V_{sec}}{Z_{relay} + Z_{coupler}} \qquad (10.2)$$

โดยที่

I_{relay} คือ กระแสที่ไหลผ่านรีเลย์

Z_{relay} คือ อิมพีแดนซ์ของรีเลย์

$Z_{coupler}$ คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น

10.6 การเปรียบเทียบทิศทาง

ในกรณีที่ต้องมีการเพิ่มส่วนของการป้องกันบัสเข้าในในสถานีไฟฟ้าย่อยเดิมและการเปลี่ยนหรือเพิ่มหม้อแปลงกระแสมีค่าใช้จ่ายที่สูงเกินไป จะสามารถใช้หม้อแปลงกระแสที่มีอยู่เดิมทำหน้าที่ในการป้องกันบัสได้โดยการใช้รีเลย์ป้องกันแบบทิศทาง ถ้าเกิดกระแสลัดวงจรไหลออกจากบัสอย่างน้อยในสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งจะแสดงว่าการลัดวงจรอยู่นอกขอบเขตป้องกัน แต่ถ้ากระแสลัดวงจรไหลเข้าสู่บัสทั้งหมดก็แสดงว่าเป็นการลัดวงจรที่บัส อย่างไรก็ตามการป้องกันลักษณะนี้จะมีการออกแบบวงจรการป้องกันที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้หน้าสัมผัสของรีเลย์รวมทั้งตัวประวิงเวลาหลายชุด

10.7 การป้องกันรีแอกเตอร์ขนาน

ในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีการต่อรีแอกเตอร์ทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยรีแอกเตอร์อนุกรม (Series Reactor) จะใช้ในปรับค่ารีแอกแตนซ์ของโครงข่ายไฟฟ้าให้เหมาะสม และลดค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนรีแอกเตอร์ขนาน (Shunt Reactor) จะใช้ในการชดเชยค่าแรงดันและชดเชยค่าความจุไฟฟ้าของสายส่ง ทั้งนี้การป้องกันรีแอกเตอร์อนุกรมจะใช้การปรับตั้งรีเลย์ที่ป้องกันสายส่งโดยพิจารณาค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์รวมกับค่าของสายส่ง ส่วนรีแอกเตอร์ขนานจะมีการป้องกันที่คล้ายกับการป้องกันหม้อแปลง โดยรีแอกเตอร์ขนานแบ่งได้เป็น รีแอกแตนซ์ขนานชนิดแห้ง (Dry-Type Shunt Reactor) และ รีแอกแตนซ์ขนานชนิดจุ่มในน้ำมัน (Oil-Immersed Shunt Reactor)

รีแอกเตอร์ขนานชนิดแห้ง (Dry-Type Shunt Reactor) จะต่อวงจรแบบวายไม่ลงดิน ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังโดยผ่านชุดขดลวดตติยภูมิ (Tertiary Winding) ของหม้อแปลง โดยความผิดพร่องที่เกิดในรีแอกเตอร์ขนานชนิดแห้งจะแบ่งได้เป็น

- การลัดวงจรระหว่างเฟส ที่บัสที่ต่อกับชุดขดลวดตติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งเป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นไม่บ่อย เนื่องจากระยะระหว่างเฟสของรีแอกเตอร์จะมีการติดตั้งที่ระยะห่างปลอดภัย

- การลัดวงจรลงดิน ที่ที่บัสที่ต่อกับชุดขดลวดตติยภูมิของหม้อแปลง ซึ่งจะเกิดกระแสลัดวงจรที่ไม่สูงขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อแปลงและความต้านทานต่อลงดินและเป็นการเกิดลัดวงจรที่ไม่บ่อยเช่นกันเนื่องจากรีแอกเตอร์จะติดตั้งบนฉนวนที่มีระยะห่างปลอดภัย
- การลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Turn-to-turn fault) ซึ่งจะทำให้เกิดค่ากระแสในเฟสที่เกิดลัดวงจรเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย การลัดวงจรในกรณีนี้เกิดจากความเสียหายของฉนวนที่จะทำให้เกิดการลัดวงจรลงจุดนิวทรัลตามมาทำให้เกิดกระแสไหลในเฟสที่ไม่ได้ลัดวงจรสูงขึ้น โดยจะสูงสุดเท่ากับ $\sqrt{3}$ เท่าของค่ากระแสปกติ

การป้องกันลัดวงจรในรีแอกเตอร์ชนิดแห้งจะทำได้โดยการใช้รีเลย์กระแสเกิน (50/51) ต่อวงจร โดยรีเลย์กระแสเกินจะปรับตั้งที่กระแสเริ่มต้นทำงานสูงกว่ากระแสปกติของรีแอกเตอร์ รีเลย์กระแสเกินจะสามารถตรวจจับพบกระแสลัดวงจรระหว่างเฟสและลัดวงจรลงดินรวมทั้งการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดในกรณีที่เกิดลัดวงจรในระยะห่างที่มากพอได้ นอกจากนี้การลัดวงจรระหว่างเฟสและลัดวงจรลงดินจะทำให้เกิดกระแสไม่สมดุลที่มีกระแสลำดับลบ การใช้รีเลย์กระแสลำดับลบ (Negative Sequence Relay) ต่อวงจรในลักษณะเดียวกันกับรีเลย์กระแสเกินก็จะสามารถตรวจจับการลัดวงจรดังกล่าวได้โดยการปรับตั้งไม่ต้องคำนึงถึงค่ากระแสทำงานปกติของรีแอกเตอร์ การป้องกันรีแอกเตอร์สามารถใช้การป้องกันแบบผลต่าง (87) ในลักษณะเดียวกับการป้องกันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ (ในหัวข้อที่ 7.2) ได้ แต่การป้องกันแบบผลต่างจะไม่สามารถตรวจพบการลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดได้

รีแอกเตอร์ขนานชนิดจุ่มในน้ำมัน (Oil-Immersed Shunt Reactor) จะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังโดยเป็นวงจรแบบวายลงดินโดยตรงหรือผ่านอิมพีแดนซ์ โดยการผิดพร่องในรีแอกเตอร์ขนานชนิดจุ่มในน้ำมันจะแบ่งได้เป็น

- การลัดวจรที่ขั้วต่อ (Bushing) ซึ่งจะทำให้เกิดค่ากระแสลัดวงจรที่สูง หรือเกิดจากความเสียหายของฉนวนทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสลงดินซึ่งจะทำให้เกิดค่ากระแสลัดวงจรขึ้นอยู่กับจุดที่ลัดวงจร
- การลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด (Turn-to-turn fault) ซึ่งจะทำให้เกิดค่ากระแสในเฟสที่เกิดลัดวงจรเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย
- ความผิดปกติอื่น เช่น การรั่วไหลของน้ำมันฉนวน หรือ การระบายความร้อน

การป้องกันรีแอกเตอร์ขนานชนิดจุ่มในน้ำมันจะใช้รีเลย์กระแสเกิน (50/51) รีเลย์ผลต่าง (87) และรีเลย์อิมพีแดนซ์ (21) โดยรีเลย์กระแสเกินจะปรับตั้งที่ค่ากระแสเริ่มต้นทำงานสูงกว่ากระแสทำงานปกติของรีแอกเตอร์ รีเลย์ผลต่างจะสามารถตรวจจับการลัดวงจรระหว่างเฟสและการลัดวงจรลงดินได้แต่ไม่สามารถตรวจจับการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดได้ ซึ่งการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดจะสามารถตรวจจับได้โดยรีเลย์อิมพีแดนซ์เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างรอบขดลวดจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของรีแอกเตอร์ในเฟสที่ลัดวงจรเปลี่ยนไป

10.8 การป้องกันชุดตัวเก็บประจุขนาน

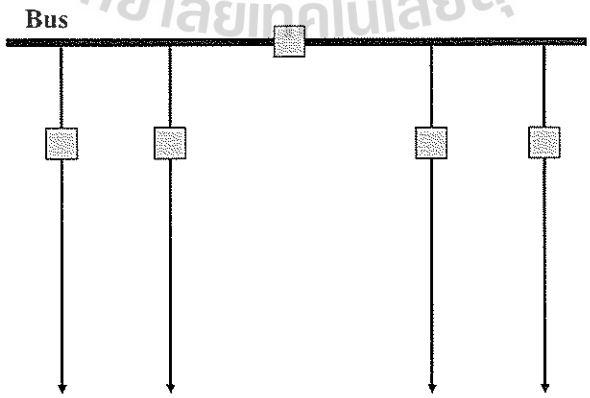
ในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีการต่อตัวเก็บประจุทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยตัวเก็บประจุอนุกรม (Series Capacitor) จะใช้ในกรณีที่ต้องการปรับค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งและปรับปรุงเสถียรภาพหรือการไหลของกำลังงานไฟฟ้าในสายส่ง ซึ่งในการป้องกันตัวเก็บประจุอนุกรมจะสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกับรีแอกเตอร์อนุกรมของสายส่ง ส่วนชุดตัวเก็บประขนาน (Shunt Capacitor Bank) มีทั้งชนิดคงที่ (Fixed) และชนิดสวิตช์ (Switched) จะต้องคำนึงถึงทั้งในเรื่องของพิกัดของชุดตัวเก็บประจุและอุปกรณ์สวิตช์ในการป้องกัน การป้องกันชุดตัวเก็บประจุขนานจะประกอบด้วย

- การลัดวงจรระหว่างบัสและตัวชุดเก็บประจุ จะป้องกันได้โดยใช้รีเลย์กระแสเกินสั่งตัดวงจรที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ของชุดตัวเก็ประจุ
- แรงดันเสิร์จของระบบ จะป้องกันโดยกับดักเสิร์จหรือช่องประกาย (Spark Gap)
- การเกินจากความเสียหายภายในชุดเก็บประจุ จะป้องกันด้วยฟิวส์ที่ติดตั้งภายในชุดตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีค่าการทำงานตัดวงจรที่ 125-135% ของกระแสทำงานปกติของชุดตัวเก็บประจุ

ในชุดตัวเก็บประจุจะเกิดแรงดันเกินภายในได้ในกรณีที่มีฟิวส์ของบางหน่วยเก็บประจุย่อยที่ต่ออนุกรมกันอยู่ตัดวงจรออกไปทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงขึ้นและส่งผลให้เกิดกระแสไหลที่ลดลงเล็กน้อย การตรวจพบกระแสที่ลดลงเล็กน้อยในชุดตัวเก็บประจุจะคาดคะเนได้ว่าหน่วยเก็บประจุย่อยภายในมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงขึ้นและจะมีแรงดันตกคร่อมที่สูงขึ้น

แบบฝึกหัดบทที่ 10

1. ข้อควรระวังพิเศษในการป้องกันบัสมีอะไรบ้าง จงอธิบาย
2. จงอธิบายวิธีการป้องกันการลัดวงจรในบัส
3. จงอธิบายวิธีการป้องกันบัสด้วยรีเลย์แบบเปอร์เซ็นต์ผลต่าง
4. จากรูปที่ P10.4.1 แสดงบัสที่มีการแบ่งส่วนจงเขียนแสดงวงจรป้องกันแบบผลต่างและแสดงขอบเขตการป้องกันบัสดังกล่าว



รูปที่ P10.4.1 บัสที่มีการแบ่งส่วนสำหรับแบบฝึกหัดข้อที่ 4

5. จงอธิบายวิธีการป้องกันบัสด้วยรีเลย์แรงดันแบบอิมพีแดนซ์สูง
6. จงอธิบายวิธีการป้องกันบัสด้วยตัวเชื่อมต่อแบบเชิงเส้น (Linear Couplers)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, **พจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้า ฉบับ วสท.,** พิมพ์ครั้งที่ 2, 2554
2. **IEC-60255:2009, Measuring Relays and Protection Equipment.**
3. **IEEE STANDARD C37.112-1996** - IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent RelaysIEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, 2001, (IEEE Buff Book)
4. **IEC 60909-0:2016**, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents
5. **IEC 60617 - Graphical Symbols for Diagrams**
6. **IEEE STANDARD C37.2-2008** - IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations
7. Badri Ram and D. N. Vishwakarma, **Power System Protection and Switchgear,** TATA McGraw Hill, New Delhi, 1995.
8. A. Wright and C. Christopoulos, **Electrical Power System Protection,** Chapman & Hill, London, 1993.
9. Staynley H. Horowitz and Arun G. Phadke, **Power System Relaying,** John Wiley & Sons, England, 2008.
10. William D. Stevenson Jr., **Element of Power System Analysis,** McGraw-Hill, Singapore, 1982.
11. The Electricity Training Association Services, **Power System Protection Volume 1: Principles and components,** The Institution of Electrical Engineers, London, 1997
12. The Electricity Training Association Services, **Power System Protection Volume 2: Systems and methods,** The Institution of Electrical Engineers, London, 1997
13. The Electricity Training Association Services, **Power System Protection Volume 3: Application,** The Institution of Electrical Engineers, London, 1997
14. The Electricity Training Association Services, **Power System Protection Volume 4: Digital protection and signalling,** The Institution of Electrical Engineers, London, 1997
15. Vladimir Gurevich, **Electric Relays Principles and Applications,** Taylor & Francis, United State, 2006

16. T. S. Sidhu, M. Bajpai, J. Burnworth, A. Darlington, B. Kasztenny, P. G. McLaren, M. Nagpal, M. M. Saha, M. S. Sachdev, M. Swanson, and P. B. Winston, "Bibliography of Relay Literature, 2004 IEEE Committee Report", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July 2006.
17. Working Group G-7 of the Relay Standards Committee of the Power Systems Relaying Committee, "IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.
18. PSRC Working Group, "C37.110 Guide for the Application of Current Transformer Used for Protective Relaying Purposes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, Jan. 1999.
19. Alberto J. Urdaneta, Harold Restrepo, Saul Marquez, and Jorge Sanchez, "Coordination of Directional Overcurrent Relay Timing Using Linear Programming", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, Jan. 1996.
20. H. Katsukawa, H. Ishikawa, H. Okajima, and T.W. Cease, "Development of an Optical Current Transducer with a Bulk Type Faraday Sensor for Metering", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, Apr. 1996.
21. Luis G. Perez and Alberto J. Urdaneta, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Definite Time Backup Relaying", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, Oct. 1991.
22. S. J. Weikel, "Application of Magneto Optic Current Sensors", IEEE Winter Power Meeting, Feb, 1990.
23. "Guide for AC Motor Protection", ANSI/IEEE Standard, 1988.
24. "Guide for AC Generator Protection", ANSI/IEEE Standard, 1987.
25. H.Y. Chu, S. L Cben and C. L Haung, "Fault Impedance Calculation Algorithms for Transmission Line Distance Protection", Electric Power Systems Research, Vol. 10, 1986.
26. B. Jeyasurya and W. J. Smolinski, "Design and Testing of a Microprocessor-Based Distance Relay", IEEE Trans. on PAS, May, 1984.
27. R. E. Bratton, "Optical Fiber Link for Power System Protective Relay: Digitally Multiplexed Transfer Trip Circuits", IEEE Trans. On PAS, Feb, 1984.
28. C. H. Griffin, "Principles of Ground Relaying for High Voltage and Extra High Voltage Transmission Lines", IEEE Trans. on PAS, Feb, 1983.
29. M. Okamura, F. Andow and S. Suzuki, "improved Phase-Comparison Relaying with High Performance", IEEE Trans on PAS, Mar/Apr, 1980.
30. IEEE Power System Communication Committee, "Power Line Carrier Application Guide", IEEE Trans. On PAS, Nov./Dec, 1980.

31. J. S. Thorp, A. G. Phadke, S. H. Horowitz, and J. E. Beehler, “Limite to Impedance Relaying”, IEEE Trans. On PAS, Jan/Fab, 1979.
32. T. F. Gallen, W. D. Breingan and M. M. Chen, “A Digital System for Directional Comparison Relaying”, IEEE Trans on PAS, May/Jun, 1979.
33. A. G. Phadke, M. Ibrahim, and T. Hlibka, “Fundamental Basis for Distance Relaying with Symmetrical Components”, IEEE Trans. On PAS, Mar/April, 1977.
34. H. K. Verma and T. S. M. Rao, “Inverse Time Overcurrent Relay Using Linear Components”, IEEE Trans. On PAS, Sept./Oct., 1976.
35. M. Chamia and S. Liberman, “Ultra High Speed Relay EHV/ UHV Transmission Lines Development Design and Application”, IEEE Trans on PAS, Nov/Dec, 1976.
36. J. Rushton and W. D. Humpage, “Power System Studies for the Determination of Distance Protection Performance”, Proceedings of IEE, Jun, 1972.
37. A.T. Johns, "Generalized Phase Comparator Technique for Distance Protection: Theory and Operation of Multi-Input Devices”, Proceedings of IEE, Nov, 1972.
38. A. T. Johns, "Generalized Phase Comparator Technique for Distance Protection: Basis for Their Operation and Design”, Proceeding of IEE, Jul, 1972.
39. IEEE Committee Report, “Local Backup Relaying Protection”, IEEE Trans. On PAS, Jul/Aug, 1970.
40. H. Haug and M. Foster, “Electronic Bus Zone Protection”, CIGRE 1968 Session, paper31-11, June, 1968.
41. W. D. Humpage, J. Ruston and P.D. Stevenson, "Differential Pilot Wire Protection using Phase Comparators", Proceedings of IEE, Jul, 1966.
42. R. A. Larner, “Protective Relaying Practices for EHV Systems", IEEE Trans. on PAS, Feb, 1963.
43. J. L. Blackburn, “Ground Fault Relay Protection of Transmission Line”, IEEE Trans. on PAS, Aug, 1952.
44. W. A. Lewis and L S. Tippett, “Fundamental Basis for Distance Relaying on 3-Phase Systems", AIEE Transactions, Vol. 66, 1947.
45. W. A. Lewis and L. S. Tippett, “Fundamental Basis for Distance Relaying on 3-Phase Systems”, AIEE Transaction, Vol. 66, 1947.
46. E. L. Harder, E. H. Klemmer, W. K. Sonnemann, and E. C. Wentz, “Linear Couplers for Bus Protection”, AIEE Transactions, Vol. 61, 1942.

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก. ตัวเลขแสดงอุปกรณ์ป้องกันที่สำคัญตามมาตรฐานของ IEEE/ANSI

อุปกรณ์การป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังจะสามารถระบุด้วยตัวเลขแสดงอุปกรณ์หรือรหัสตัวเลขในไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไฟฟ้ากำลังหรือบางครั้งอาจประกอบด้วยตัวอักษรด้วย ตัวเลขแสดงแทนอุปกรณ์ที่จะแสดงต่อไปนี้เลือกมาจากตัวเลขแสดงแทนอุปกรณ์ในระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.2 เฉพาะอุปกรณ์ที่มักจะพบบ่อย

1 Master element that operates to place device in or out of service.

13 Synchronous speed switch that operates at approximately the Synchronous speed of a machine.

20 Electrically operated valve.

21 Distance relay which functions when the circuit admittance, 43 iml>edance or reactance increases or decreases beyond predeterrained limits.

23 Temperature control device.

25 Synchronizing or check synchronizing device that operates when two ac circuits are within desired limits of frequency, phase angle or voltage to permit the paralleling of these two circuits.

26 Thermal device that operates when the temperature of the protected apparatus decreases below a predetermined value.

27 Undervolotage relay.

30 Annunciator relay.

32 Directional power relay that operates on a desired value of power in a given direction.

41 Field circuit breaker that applies or removes field excitation to a machine.

42 Running circuit breaker that connects a machine to its running or operating voltage.

43 Manual transfer switch.

46 Reverse-phase or phase-balance relay that operates when the polyphase currents are of reverse phase sequence, or when the polyphase currents are unbalanced or contain negative sequence currents of a given amount.

47 Phase sequence voltage relay that operates upon a predetermined value of polyphase voltage in the desired phase sequence.

48 Incomplete sequence relay that returns equipment to normal if the normal starting or stopping sequence is not completed within a predetermined time.

49 Thermal relay that operates when the temperature of a machine exceeds a predetermined value.

50 Instantaneous overcurrent or rate-of-rise relay.

51 AC time-delay overcurrent relay that operates when the current exceeds a predetermined' value. The relay operates with either a definite or an inverse time characteristic.

52 AC circuit breaker.

53 Exciter or dc generator relay that forces the dc machine excitation to build up during starting.

55 Power factor relay.

56 Field application relay.

59 Overvoltage relay.

60 Voltage or current balance relay that operates on a given difference in the input or output of two circuits.

62 Time-delay stopping or opening relay.

63 Pressure switch that operates on given values or given rate-ofchange of pressure.

64 Ground protective relay.

65 Governor device used to regulate the flow of water, steam or other meclium.

67 AC directional overcurrent relay.

69 Permissive control device.

72 DC circuit breaker.

76 DC overcurrent relay.

78 Phase-angle measuring or out-ofstep relay that operates at a predetermined phase angle between two currents, two voltages, or between a voltage and a current.

81 Frequency relay.

86 Carrier or pilot wire receiver relay.

86 Lockout relay that is electrically operated and hand or electrically reset to shut down and hold an equipment out of service.

87 Differential protection relay is a protective relay that functions on a percentage or phase angle or other quantative difference of two currents or some other electrical quantities.

90 Regulating device that operates to regulate a quantity at a certain value or between certain limits.

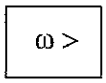
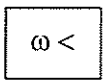
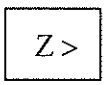
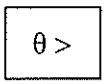
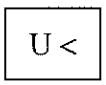
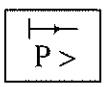
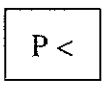
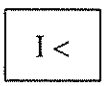
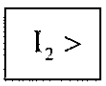
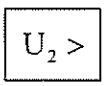
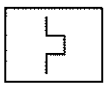
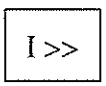
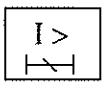
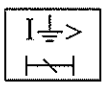
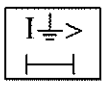
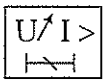
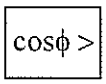
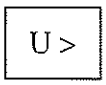
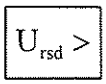
91 Voltage directional relay that operates when the voltage across an open circuit breaker or contactor exceeds a given value in a given direction.

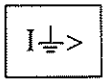
94 Trip-free relay that operates to trip a circuit breaker or contactor.

101 Control switch to open and close a circuit breaker or contactor.

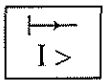
ในกรณีที่อุปกรณ์ป้องกันมีหน้าที่ทำงานมากกว่าหนึ่งอย่างจะใช้ตัวเลขแสดงแทนคุณสมบัติในการทำงานทั้งหมดของอุปกรณ์ เช่น 50/51 จะแสดงแทนรีเลย์กระแสเกินแบบทันทีและประวิงเวลา

ภาคผนวก ข. สัญญลักษณ์แสดงอุปกรณ์ป้องกันที่สำคัญตามมาตรฐานของ IEC

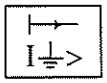
	Overspeed Relay
	Underspeed Relay
	Distance Relay
	Overtemperature Relay
	Undervoltage Relay
	Directional Overpower Relay
	Underpower Relay
	Undercurrent Relay
	Negative Sequence Relay
	Negative Sequence Voltage Relay
	Thermal Relay
	Instantaneous Overcurrent Relay
	Inverse Time Overcurrent Relay
	Inverse Time Earth Fault Overcurrent Relay
	Definite Time Earth Fault Overcurrent Relay
	Voltage Restrained/Controlled Overcurrent Relay
	Power Factor Relay
	Overvoltage Relay
	Neutral Point Displacement Relay



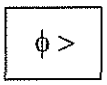
Earth-fault Relay



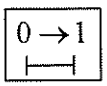
Directional Overcurrent Relay



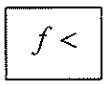
Directional Earth Fault Relay



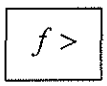
Phase Angle Relay



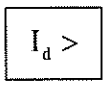
Autoreclose Relay



Underfrequency Relay



Overfrequency Relay



Differential Relay

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี