บทที่ 3

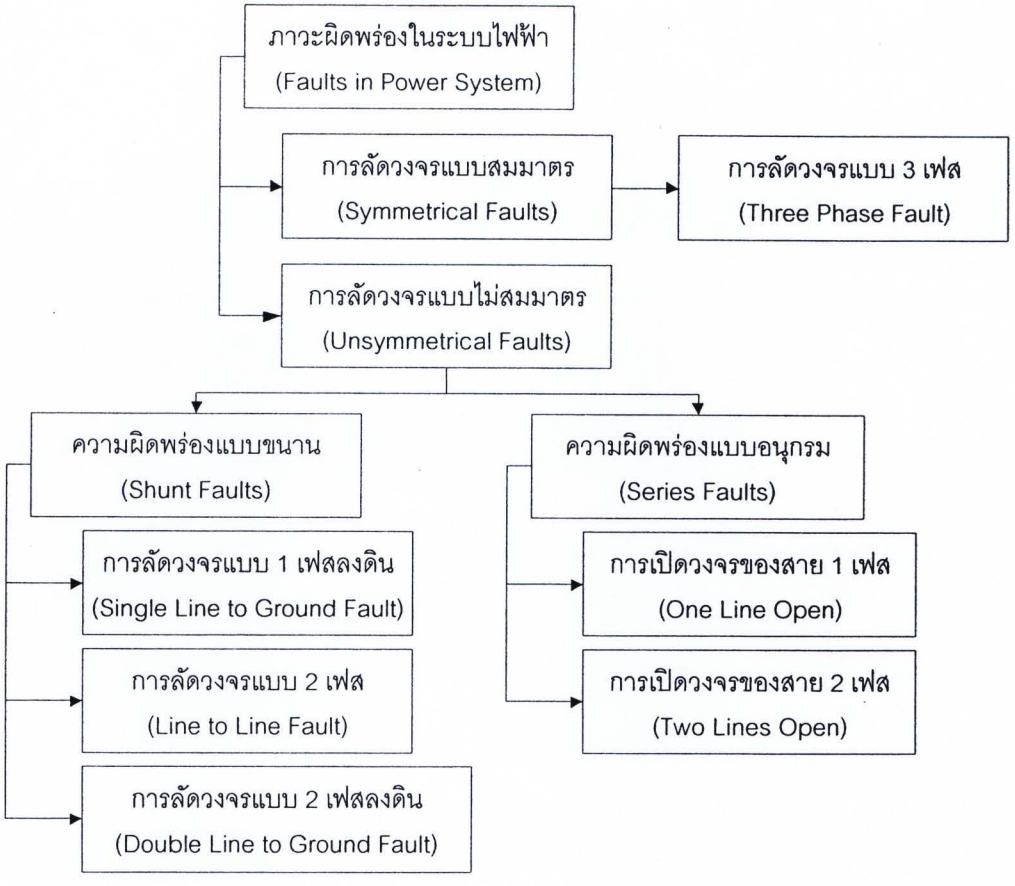
การจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจร โดยจะเริ่มจากการวิเคราะห์ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งนำเสนอหลักการการวิเคราะห์เบื้องต้นจากนั้นนำไปสู่การแสดงปัญหาการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในปัจจุบันแบบต่างๆ การประยุกต์ใช้วิธีการจำกัดปริมาณกระแสลัดวงจรในต่างประเทศ และการประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับบริเวณกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นบริเวณที่พิจารณา

3.1 การวิเคราะห์ความผิดพร่องในระบบส่งไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบการผลิต (Generation) ระบบส่งจ่าย (Transmission) และระบบจำหน่าย (Distribution) โดยในปัจจุบันระบบไฟฟ้ากำลังมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนในแต่ละส่วน ซึ่งมีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่สูง อันเนื่องมาจากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน การวิเคราะห์การทำงานของระบบในภาวะผิดพร่องจึงเป็นประเด็นสำคัญ และต้องนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบระบบป้องกัน รวมไปถึงการออกแบบการขยายของระบบไฟฟ้ากำลังด้วย

การผิดพร่องของระบบไฟฟ้า คือ ภาวะที่ระบบไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปจาก สภาวะปกติ อันเนื่องมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น เกิดจากการชำรุดเองของอุปกรณ์ตามการเวลา ฟ้าผ่า ต้นไม้ทับสายส่ง เป็นต้น จึงทำให้โอกาส การเกิดความผิดพร่องได้หลายแบบด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า

ในความผิดพร่องทั้งหมดนั้น ความผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault) เป็นความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุด คือคิดเป็นประมาณ 70 – 80 % ของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าทั้งหมด ต่อมาคือ ความผิดพร่องแบบสองเฟสลงดิน (Double Line to Ground Fault) ซึ่งเป็นความผิดพร่องที่โดยมากจะเกิดต่อเนื่องจากการผิดพร่องแบบเฟสเดียวลงดินที่ไม่จำกัดความผิดพร่องออกภายในระยะเวลาที่ฉนวนสามารถทนแรงดันที่สูงขึ้นระหว่างเกิดความผิดพร่องแบบลัดวงจรเฟสเดียวลงดินนั้นได้ แต่อย่างไรก็ตามความผิดพร่องแบบลัดวงจร 3 เฟส ซึ่งเป็นความผิดพร่องที่มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความผิดพร่องแบบอื่น คือคิดเป็นประมาณ 5 % ของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าทั้งหมด มักมีความรุนแรงของผลที่ตามมามากกว่า เช่น มีค่าของกระแสผิดพร่องมาก เป็นต้น ดั้งจึงมักใช้ในการพิจารณาในการเลือกพิกัดอุปกรณ์ป้องกัน

ในการพิจารณาเรื่องผลกระทบของกระแสลัดวงจรต่อพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันนี้จึงพิจารณาความผิดพร่องแบบลัดวงจร 3 เฟส ประกอบกับแบบลัดวงจรเฟสเดียวลงดินไปด้วย

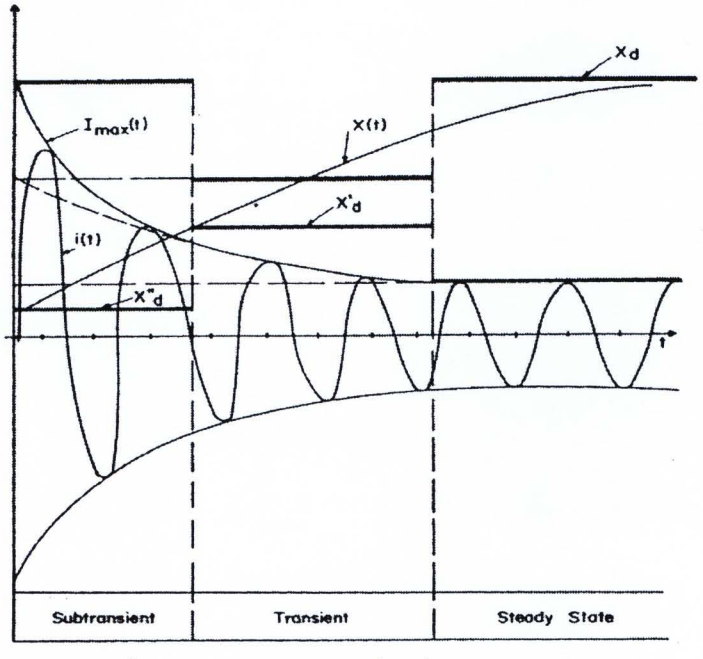
3.1.1 สภาวะชั่วครู่ในขณะเกิดความผิดพร่อง

โดยธรรมชาติระบบไฟฟ้ากำลังมีคุณสมบัติเป็นวงจร RL ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนสภาวะการทำงานอย่างฉับพลัน เช่น การปิดตัวของอุปกรณ์สวิตช์ ยกตัวอย่างเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หรือการลัดวงจรของสายส่ง กระแสที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 3 ช่วง ดังนี้

- ช่วงก่อนสภาวะชั่วครู่ (Subtransient period)
- ช่วงสภาวะชั่วครู่ (Transient period)
- ช่วงสภาวะอยู่ตัว (Steady-state period)

ในการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 ช่วงนี้ พบว่าในช่วงเวลา 1-5 รอบการทำงาน (คาบ) กระแสจะมีค่าสูงมากแล้วค่อยๆ ลดลง ซึ่งพิจารณาอยู่ในช่วง ช่วงก่อนสภาวะชั่วครู่ และ ช่วงสภาวะชั่วครู่ นอกจากนี้ พิจารณาว่า ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบมีค่าเปลี่ยนไปตามช่วงเวลาทำให้กระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อกำหนดให้ X คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรสามารถแบ่งค่ารีแอกแตนซ์ออกเป็น 3 ดังนี้

- X_d'' แทนค่า direct-axis sub-transient reactance
- X_d' แทนค่า direct-axis transient reactance
- X_d แทนค่า direct-axis synchronous reactance

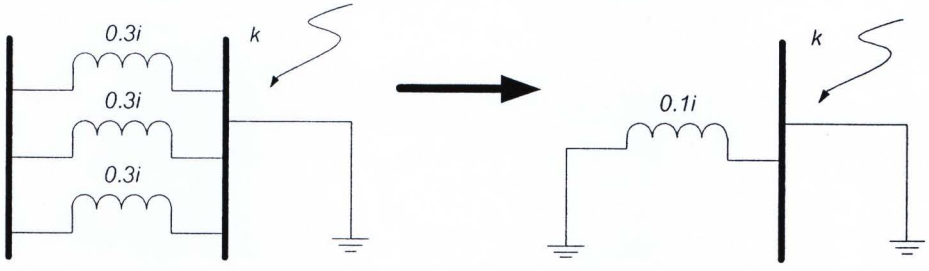


รูปที่ 3.2 กระแสผิดพร่องที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

พิจารณาจากรูปที่ 3.2 พบว่าค่ากระแสผิดพร่องในช่วงก่อนสภาวะชั่วครู่ (Subtransient period) มีค่าที่สูงที่สุดจึงมักนำค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงนี้มาประกอบในการพิจารณาในเรื่องพิกัดของอุปกรณ์ป้องกัน

3.1.2 การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัสใด ๆ

ในเรื่องการคำนวณกระแสลัดวงจรนี้ อิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณนี้จะสามารถหาได้มาจากวงจรสมมูลเทวินิน ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.3 สมมติให้เกิดลัดวงจรที่บัส *k*



รูปที่ 3.3 การหาวงจรสมมูลเทวินิน

จากรูปค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่ทางซ้ายมือของบัส *k* 3 ตัวสามารถคิดเป็นการต่อแบบขนานกันลงดิน ดังรูปที่ 3 ดึงค่าที่ได้นั้น (*0.1i*) คือค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส *k* ที่ใช้ในการคำนวณ

แต่สำหรับการคำนวณระบบที่มีขนาดใหญ่แล้วในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์สมมูลโดยแปลงเป็นวงจรสมมูลเทวินินอาจทำได้ยากจึงใช้การแปลงอิมพีแดนซ์เป็นเมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์สมมูล (Z_{bus}) โดยที่เมื่อพิจารณาที่บัสใด จะนำค่าที่ตำแหน่งทแยงมุมมาใช้ในการคำนวณ ยกตัวอย่างเช่น หากคิดที่ บัส 3 จะใช้ค่า $Z_{3,3}$ มาใช้ในการคำนวณ

3.1.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรแบบอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

การคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีวิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ๆ เป็นการยากที่จะเขียนไดอะแกรมเส้นเดี่ยวเพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูล แต่การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย จัดรูปของระบบให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณได้ คือ จัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งเมทริกซ์ที่นิยมใช้กันมาก และมีความสะดวกมากที่สุดในการคำนวณกระแสลัดวงจร ได้แก่ Z_{bus} ซึ่งการคำนวณ Z_{bus} นิยมแปลงมาจากการอินเวอร์ส Y_{bus} นั่นเอง

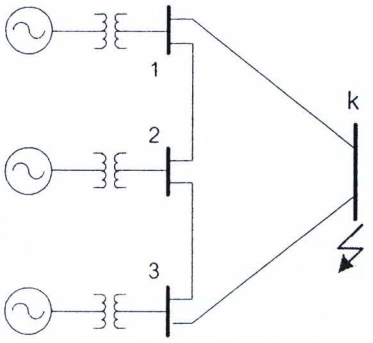
โดยความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่บัสเป็นไปตามสมการที่ 3.1

$$V_{bus} = Z_{bus} * I_{bus} \tag{3.1}$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส

I_{bus} คือ กระแสจากแหล่งจ่ายเข้าที่บัส

ตัวอย่าง. ระบบที่พิจารณามี k บัส ตามรูปที่ 3.4 สมมติว่าเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟสที่บัส k



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 3.4 ระบบไฟฟ้า k บัส

สามารถคำนวณความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า และกระแสที่บัสดังสมการที่ 3.2 และเมื่อกำหนดให้แรงดันก่อนเกิดความผิดพร่องที่บัส k มีค่าเท่ากับ $V_{pre,k}$ ได้สมการทั่วไปในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรที่บัส k โดยไม่คิดกระแสก่อนเกิดความผิดพร่อง ดังสมการที่ 3.3

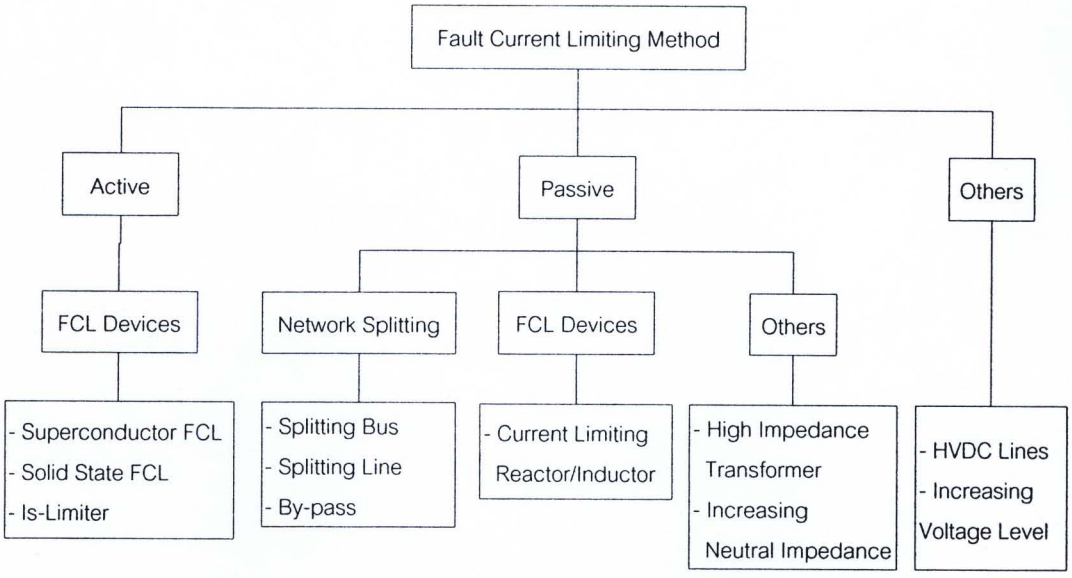
$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ . \\ . \\ . \\ V_{pre,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{1k} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{2k} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{3k} \\ . & & & . \\ . & & & . \\ . & & & . \\ Z_{k1} & Z_{k2} & Z_{k3} & Z_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ . \\ I_f'' \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$I_f = \frac{V_{pre,k}}{Z_{kk}} \tag{3.3}$$

3.2 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในปัจจุบัน

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี สามารถแบ่งแยกตามลักษณะของค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทำงานของระบบ [31, 32 และ 33] ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ดังนี้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 29 พ.ค. 2555
เลขทะเบียน 246251
เลขเรียกหนังสือ



รูปที่ 3.5 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

3.1.1 การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ

การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ในการจำกัดกระแสลัดวงจร โดยอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ จะมีคุณสมบัติพิเศษคือ

สภาวะที่ระบบทำงานปกติ (Normal condition) อุปกรณ์จะมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยมากจนไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ

สภาวะที่ระบบเกิดลัดวงจร (Fault condition) อุปกรณ์จะเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์อย่างรวดเร็วเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของระบบ ทำให้ไม่ส่งผลกระทบกับการทำงานของระบบในสภาวะปกติ ซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีการลดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟ

วิธีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรแบบแอคทีฟที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้

Superconductor Fault Current Limiter (SCFCL)

Superconductor Fault Current Limiter [34, 35 และ 36] เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่อาศัยหลักการทำงานของวัสดุตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าโดยปราศจากความต้านทาน ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิค่าหนึ่งที่เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) รวมถึงปัจจัยของปริมาณกระแส และสนามแม่เหล็ก ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (Critical current level) และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical field) โดยถ้าอุปกรณ์มีค่าใดค่าหนึ่งเกินค่าวิกฤต จะทำให้อุปกรณ์เกิดการเปลี่ยนสภาวะ (Quenching) จากสภาวะตัวนำยิ่งยวด (Superconductor state) เป็นสภาวะความต้านทาน (Resistive state)

โดยวิธีการประยุกต์ใช้ SCFCL มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

1) อุปกรณ์ไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ในระบบ เมื่อระบบอยู่ในช่วงสภาวะทำงานปกติ จึงไม่มีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้า
2) ช่วงอุณหภูมิการทำงานมีความยืดหยุ่นสูง
3) มีประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรได้ดี

ข้อเสีย

1) ปัจจุบันระดับแรงดันในช่วงทำงานสูงสุด เท่ากับ 145 kV จึงทำให้ไม่สามารถใช้ในระดับแรงดัน 230 kV หรือมากกว่านั้นได้
2) มีการนำมาใช้ไม่แพร่หลาย เนื่องจากอยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนา
3) มีราคาสูงเนื่องจากทำมาจากวัสดุประเภท Superconductor จึงอาจไม่คุ้มกับการลงทุน

Solid-State Fault Current Limiter (SSFCL)

Solid-State Fault Current Limiter [37] เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่มีโครงสร้างโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่จำกัดกระแสและแรงดัน และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย Solid-state switch เช่น GTO (Gate Turn-off) thyristors ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานของสวิทช์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ

โดยวิธีการประยุกต์ใช้ SSFCL มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

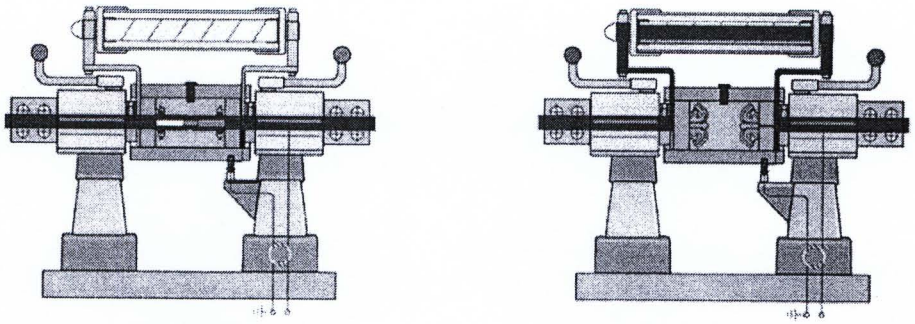
1) อุปกรณ์ไม่ปรากฏค่าอิมพีแดนซ์ในระบบ เมื่อระบบอยู่ในช่วงสภาวะทำงานปกติ
2) มีประสิทธิภาพในการลดกระแสลัดวงจรได้ดี
3) ทำให้คุณภาพไฟฟ้ากำลังดีขึ้น จากการช่วยลดขนาดของกระแสไหลพุ่ง (Inrush current) ที่เกิดจากการสับต่อหม้อแปลงเข้าไปในระบบ

ข้อเสีย

1) ราคาสูงมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ
2) มีความซับซ้อนในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์
3) มีการนำมาใช้ไม่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเชื่อถือได้ในการแก้ปัญหาต่ำ

Is-Limiter

Is-Limiter เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่มีกลไกการจำกัดกระแสลัดวงจรถูกพัฒนาและผลิตขึ้นโดยบริษัท ABB ซึ่งแสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หลักการทำงานของ Is-Limiter [31 และ 32]

Is-Limiter ประกอบด้วยตัวนำ 2 ชนิดขนานกัน จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าในสภาวะการทำงานปกติ กระแสจะไหลผ่านอุปกรณ์ โดยผ่านตัวนำหลักซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก ทำให้มีผลกระทบต่อระบบน้อยมาก ส่วนในสภาวะที่เกิดการลัดวงจร กลไกการทริปของอุปกรณ์จะทำงาน ทำให้กระแสไหลผ่านตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งส่งผลให้กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านอุปกรณ์มีค่าลดลง

โดยวิธีการประยุกต์ใช้ Is-Limiter มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

1) ใช้เงินลงทุนไม่สูงมาก

2) มีความเชื่อถือได้สูง

ข้อเสีย

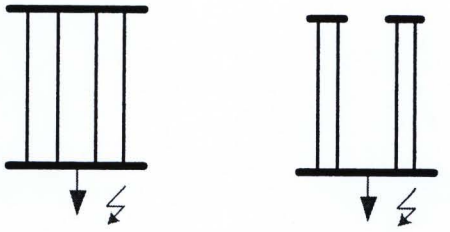
1) ใช้งานกับระดับแรงดันไม่สูง จึงมักประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่าย

3.1.2 การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟ

การจำกัดกระแสลัดวงจรแบบพาสซีฟมีคุณสมบัติ คือ จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปทั้งในสภาวะที่ระบบทำงานปกติ และสภาวะที่ระบบเกิดลัดวงจร โดยค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะเพิ่มขึ้นเพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นให้มีค่าลดลง ซึ่งจะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะการทำงานของระบบ ทำให้ส่งผลกระทบกับการทำงานของระบบในสภาวะปกติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาการทำงานของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรอบคอบก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งวิธีการลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบพาสซีฟที่มีการนำมาใช้ในปัจจุบัน มี ดังนี้

การแบ่งแยกบัส (Bus Splitting)

การปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าโดยวิธีการแบ่งแยกบัสในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเป็นหนึ่งในวิธีการลดกระแสลัดวงจร โดยเทคนิคการลดกระแสลัดวงจรที่สำคัญ คือ การเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบ [31] ซึ่งการแบ่งแยกบัสสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบได้ โดยลดการเชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าลง ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์บริเวณจุดที่เกิดการลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังจากการแบ่งแยกบัส แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.7



ก) ก่อนแบ่งแยก ข) หลังแบ่งแยก

รูปที่ 3.7 การแบ่งแยกบัส

โดยวิธีการแบ่งแยกบัส มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

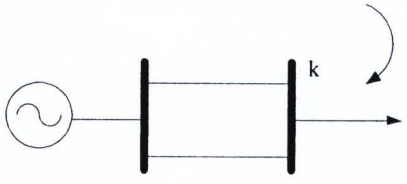
1) ลดความรุนแรงของกระแสลัดวงจร โดยแบ่งแยกแหล่งกำเนิดของกระแสลัดวงจร
2) ไม่ต้องนำอุปกรณ์จำกัดกระแสมาเชื่อมต่อส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบ
3) เป็นวิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในปัจจุบัน โดยใช้เวลาดำเนินการไม่มาก
4) ค่าใช้จ่ายต่ำมากเมื่อเทียบกับการแก้ปัญหาด้วยการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรต่างๆ

ข้อเสีย

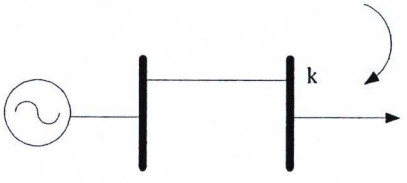
1) ต้องมีการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัสที่แบ่งแยก (Bus transfer equipment)
2) เมื่อบัสที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายหลักให้โหลดจุดหนึ่งในระบบถูกแบ่งแยก จะทำให้ความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดนั้นลดลง จึงต้องทำการศึกษาผลกระทบในส่วนของโหลดอย่างรอบคอบ
3) เป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือน้อย
4) ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง ในกรณีที่ต้องทำการเปลี่ยนชุดบัสบาร์ใหม่ หากชุดบัสบาร์เดิมไม่สามารถทำการแบ่งแยกได้

<u>การเปิดวงจรสายส่ง</u>

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าด้วยการปลดวงจรสายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดการเชื่อมต่อขนานของสายส่งในระบบดังรูปที่ 3.8 ซึ่งส่งผลทำให้ระบบมีอิมพีแดนซ์โดยรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจร ณ จุดต่างๆ ในระบบลดลง



ก) ระบบก่อนมีการเปิดวงจร



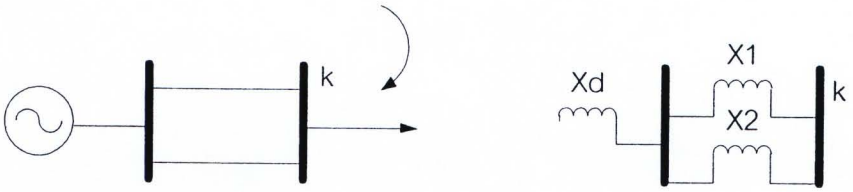
ข) ระบบหลังมีการเปิดวงจร

รูปที่ 3.8 การเปิดวงจรสายส่ง

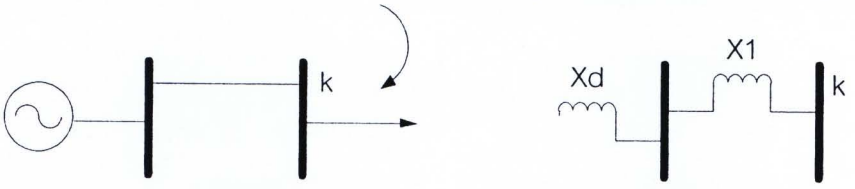
เนื่องจากปริมาณกระแสลัดวงจรเป็นสัดส่วนแบบผกผันกับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่ติดอยู่ที่จุดที่เกิดการลัดวงจร ดังนั้นหากต้องการให้กระแสลัดวงจรมีค่าลดลงจึงอาจใช้วิธีการเปิดวงจรสายส่งเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าเพิ่มขึ้นได้

<u>ตัวอย่าง.</u> การลดกระแสลัดวงจรอันเนื่องมาจากการปลดสายส่ง

เมื่อกำหนดให้ส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้า และ ค่าอิมพีแดนซ์สมมูล เมื่อก่อนและหลังปลดสายส่งโดยที่สมมติให้เกิดลัดวงจรที่บัส k เป็นดังรูปที่ 3.9



ก) ระบบก่อนมีการเปิดสาย และ อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบเมื่อมองจากจุดที่เกิดการลัดวงจร



ข) ระบบหลังมีการเปิดสาย และ อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบเมื่อมองจากจุดที่เกิดการลัดวงจร

รูปที่ 3.9 ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของระบบ ก่อน/หลัง การเปิดวงจร

จากรูปที่ 3.9 ก) เมื่อก่อนปลดสายส่งค่าอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าคือ

$$Z_{eq} = X_d + (X_1 // X_2)$$

แต่เมื่อหลังจากปลดสายส่งออกพบว่าอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าคือ

$$Z_{eq} = X_d + X_1$$

เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์สมมูลทั้งก่อนและหลังพบว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นอันส่งผลให้กรแสลัดวงจรมีค่าลดลงมาจากกระแสลัดวงจรเป็นสัดส่วนแบบผกผันกับค่าอิมพีแดนซ์สมมูลดังที่กล่าวมาในข้างต้น

วิธีการเปิดวงจรสายส่ง เพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี

1) แทบไม่มีความจำเป็นในการใช้เงินลงทุน
2) ดำเนินการแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
3) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีทางเลือกในการแก้ไขปัญหาได้มาก
4) สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายระดับแรงดัน

ข้อเสีย

1) วงจรสายส่งที่เปิดวงจรเปรียบเสมือนการหายไปของวงจรสายส่ง จึงต้องทำการศึกษาผลกระทบต่อการ ทำงานของระบบอย่างรอบคอบ

2) ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง

การ By-pass สายส่ง

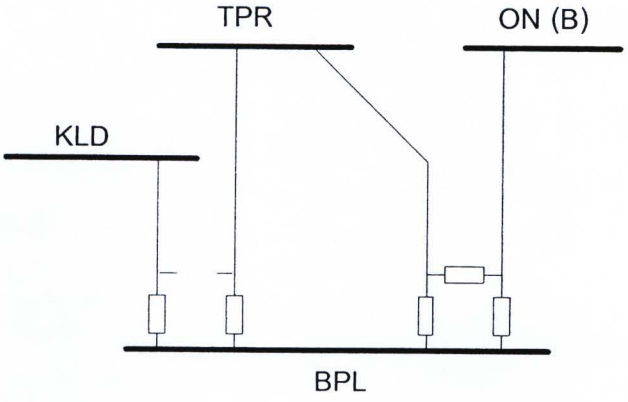
วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าด้วยการ By-pass สายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรไม่ให้ไหลสู่บริเวณที่มีปริมาณกระแสลัดวงจรมากดังรูปที่ 3.10 ซึ่งส่งผลทำให้บริเวณที่ทำการ By-pass สายส่ง มีปริมาณกระแสลัดวงจรลดลง

ข้อดี

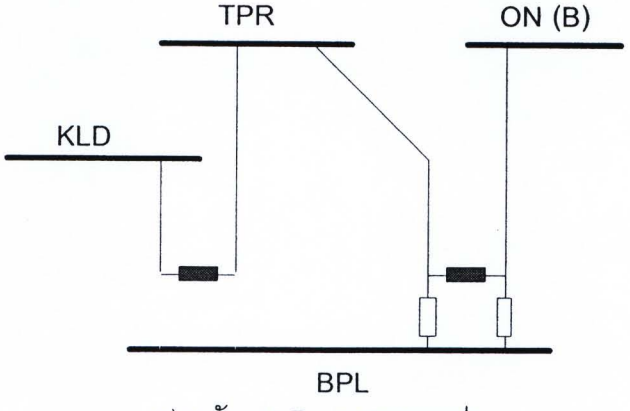
1) แทบไม่มีความจำเป็นในการใช้เงินลงทุน
2) ดำเนินการแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
3) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้สูง
4) ผลกระทบต่อระบบที่ตามมามีน้อยกว่าวิธี การเปิดวงจร

ข้อเสีย

1) วงจรสายส่งที่ทำการ By-pass ต้องทำการศึกษาผลกระทบต่อการ ทำงานของระบบอย่างรอบคอบ
2) ความเชื่อถือได้ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าลดลง
3) บางระบบสามารถเลือกตำแหน่งในการทำการ By-pass ได้จำกัด



ก) ก่อนการ By-pass สายส่ง



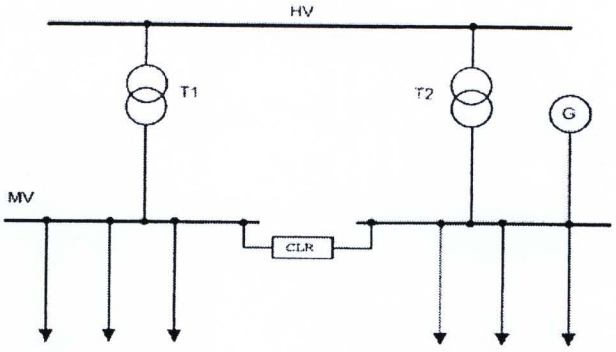
ข) หลังการ By-pass สายส่ง

รูปที่ 3.10 การ By-passสายส่ง

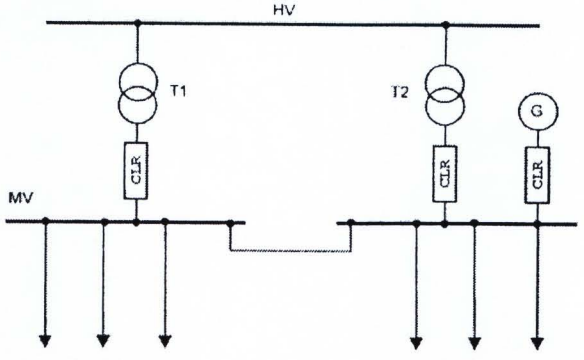
Current Limiting Inductor/Reactor

Current Limiting Reactor (CLR) [38-39] เป็นอุปกรณ์จำกัดกระแสลัดวงจรที่ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความต้านทานโดยรวมสูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะการต่อแบบอนุกรมเข้าไปภายในระบบไฟฟ้า การใช้งานของ CLR สามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบแล้วแต่จุดประสงค์ของผู้ใช้งาน เช่น ใช้เพื่อป้องกันกระแสลัดวงจรลงดิน หรือป้องกันกระแสลัดวงจรระหว่างเฟส นอกจากนี้ CLR ที่ใช้งานมีหลายประเภท

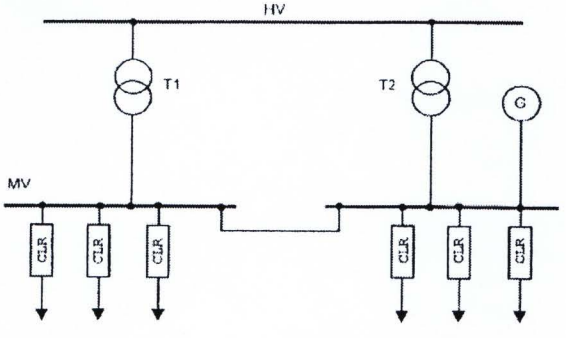
การใช้งานของ CLR จะต้องเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้าอย่างเหมาะสมที่สุด และสามารถต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้หลายลักษณะ ดังแสดงดังรูปที่ 3.11 แสดงการต่อ CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์ รูปที่ 3.12 แสดงการต่อ CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า และรูปที่ 3.13 แสดงการต่อ CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก การต่อ CLR กับบัสบาร์ในสถานีไฟฟ้าในลักษณะที่แตกต่างกันนี้ ซึ่งจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 3.11 CLR เชื่อมโยงระหว่างบัสบาร์ [39]



รูปที่ 3.12 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาเข้า [39]



รูปที่ 3.13 CLR อนุกรมกับสายป้อนไฟฟ้าฝั่งขาออก [39]

ข้อดี

1) มีราคาไม่สูงมาก

2) สามารถช่วยจำกัดอุณหภูมิไม่ให้สูง เพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้า

3) มีความสามารถในการป้องกันกระแสลัดวงจรในระดับแรงดันสูงได้ดี

ข้อเสีย

1) มีปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม กำลังสูญเสีย เนื่องจากอุปกรณ์มีค่าอิมพีแดนซ์สูงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของกำลังที่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์

2) เกิด Magnetic flux ซึ่งส่งผลต่อสุขภาวะของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ใกล้เคียง และสภาวะการทำงานของอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ต่างๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

3) จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก เนื่องจากอุปกรณ์ยังมีขนาดใหญ่

High Impedance Transformer

วิธีการนี้สามารถจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการเพิ่มอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อจำกัดขนาดกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อมและกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงขึ้นเมื่อระบบทำงานในสภาวะปกติ และแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิไม่เป็นไปตามพิกัดที่ถูกต้อง นอกจากนี้ราคาหม้อแปลงค่าอิมพีแดนซ์สูงจะแพงกว่าหม้อแปลงที่ใช้งานโดยทั่วไป

ข้อดี

1) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เข้าใจได้อย่างชัดเจน ไม่มีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้

2) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่มีความเชื่อถือได้

ข้อเสีย

1) มีปัญหาเรื่องแรงดันตกคร่อม และกำลังสูญเสีย

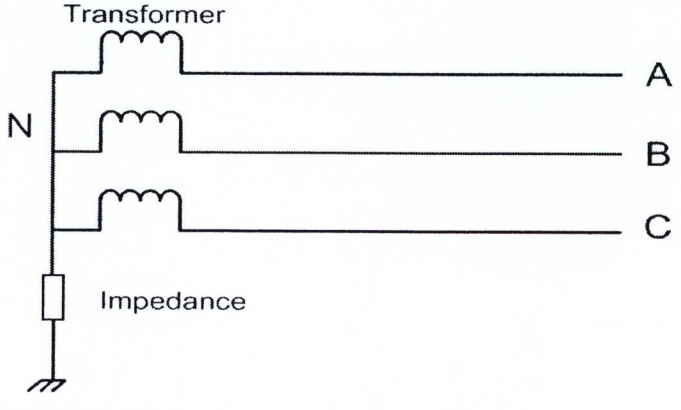
2) ไม่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าที่มีพื้นที่จำกัด

3) แรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิไม่เป็นไปตามพิกัดที่ถูกต้อง

4) ราคาสูงกว่าหม้อแปลงที่ใช้งานโดยทั่วไป

Increasing Neutral Impedance

วิธีจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรอล [40] วิธีการนี้ไม่ส่งผลต่อการทำงานในสภาวะปกติ แต่เมื่อเกิดการลัดวงจรประเภท Single-phase-to-ground fault วิธีการนี้จะช่วยลดกระแสลัดวงจรได้สูงถึง 40% ดังรูปที่ 3.14 แสดงการต่ออิมพีแดนซ์ผ่านนิวทรอลลงกราวด์ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 การต่ออิมพีแดนซ์ลงกราวด์ผ่านสายนิวทรอลของหม้อแปลงไฟฟ้า [40]

ข้อดี

1) เป็นวิธีแก้ปัญหาที่เข้าใจได้อย่างชัดเจน ไม่มีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้

2) ประยุกต์ใช้ได้สะดวก และใช้เงินลงทุนต่ำ

3) ได้ผลดี กรณีกระแสลัดวงจรลงกราวด์มีค่าสูง

ข้อเสีย

1) ความไวต่อการทำงานของรีเลย์กระแสเกินลดลง

2) ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากในทางปฏิบัตินิยมให้อิมพีแดนซ์ของนิวทรอลมีค่าต่ำๆ

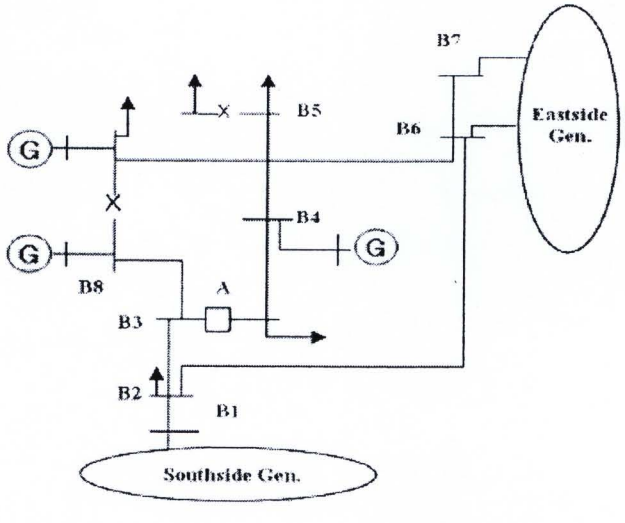
3) ระดับแรงดันนิวทรอลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงขึ้น อุปกรณ์ป้องกันต้องใช้ฉนวนในระดับที่สูงขึ้น

3.3 การประยุกต์ใช้วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรในต่างประเทศ

ปัญหาการจำกัดกระแสลัดวงจรเพื่อไม่ให้ขนาดกระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในหลายประเทศ โดยในปัจจุบันมีงานวิจัยที่นำเสนอกรณีศึกษารวมไปถึงกรณีการนำไปประยุกต์ใช้จริงในการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงของประเทศต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

3.2.1 ประเทศเกาหลี [41]

ปัญหาขนาดกระแสลัดวงจรสูงเกินพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 40 kA ในเพาเวอร์กริดระดับแรงดัน 345 kV ถูกนำมาศึกษาเพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสม โดยนำวิธีการติดตั้ง CLR วิธีการแบ่งแยกบัส วิธีการติดตั้ง SCFCL มาประยุกต์ใช้ที่บัสภายในสถานีไฟฟ้าตำแหน่ง A [41] ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลของเพาเวอร์กริดระดับแรงดัน 345 kV [41]

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแต่ละวิธีการลดกระแสลัดวงจรเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง โดยเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบ ในด้านเสถียรภาพสภาวะชั่วครู่ และเวลากำจัดความผิดพร่องวิกฤต ซึ่งมีรายละเอียดของการประยุกต์ใช้แต่ละวิธีดังนี้

1) ติดตั้ง SCFCL เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ตำแหน่ง A

2) ติดตั้ง CLR เชื่อมต่อระหว่างบัสที่ตำแหน่ง A

3) แบ่งแยกบัสที่ตำแหน่ง A

ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า การประยุกต์ใช้ SCFCL ให้ผลการพิจารณาดีที่สุด

3.2.2 ประเทศคูเวต [42]

ประเทศคูเวตมีความต้องการทางไฟฟ้ามากขึ้น จึงจำเป็นต้องขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ซับซ้อนขึ้น เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในระบบส่งกำลังไฟฟ้า ทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่ามากขึ้น หากค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงเกินกว่าพิกัดของอุปกรณ์ป้องกันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านั้นได้ [42]

การศึกษาเพื่อลดระดับกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้นในประเทศคูเวตมีดังนี้

<u>การเปลี่ยนสายส่งจาก AC Lines เป็น DC Lines</u>

การเปลี่ยนสายส่งจาก AC Lines เป็น DC Lines ทำให้เพิ่มความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้คุณสมบัติอีกอย่างของ DC Transmission คือ สามารถลดระดับกระแสลัดวงจรได้ โดยจะใช้การเชื่อมต่อผ่าน HVDC แต่วิธีการนี้จะใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เพราะราคาของอุปกรณ์ที่ใช้งานมีราคาที่สูง (อินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์) ดังนั้นการเลือกเส้นที่จะเชื่อมต่อต้องมีความเหมาะสมมากที่สุด

<u>ติดตั้งอุปกรณ์ Current Limiter Reactor</u>

ปัจจุบันประเทศคูเวตมีความสนใจการใช้งาน Current Limiter Reactor (CLR) มากขึ้น ซึ่งการใช้งานของ CLR ก็มีหลากหลายวิธี โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดและตำแหน่งของการติดตั้งภายในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

<u>แบ่งแยกบัส</u>

การแบ่งแยกบัสในสถานีไฟฟ้าให้เป็น 2 บัส หรือมากกว่านั้น จะช่วยให้ค่าความต้านทานในระบบส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ระดับกระแสลัดวงจรในระบบมีค่าลดลง

วิธีการนี้เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ มีข้อดีคือราคาต่ำกว่า แต่มีข้อจำกัดที่มากกว่า เพราะวิธีนี้ส่งผลกระทบกับโหลดในระบบ

แบ่งแยกระบบ (Splitting the network)

การทำแบ่งแยกระบบจะต้องหาตำแหน่งในการแบ่งแยกที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระบบยังรักษาความสมดุลของกำลังไฟฟ้าด้านการผลิตและความต้องการไฟฟ้าไว้ได้ และต้องสอดคล้องกับข้อบังคับด้านขีดจำกัดของสายส่งอีกด้วย หากระบบส่งไฟฟ้ายิ่งมีขนาดใหญ่มากขึ้น ความยากและซับซ้อนในการแก้ปัญหาก็ยิ่งมีมากยิ่งขึ้น

วางแผนระบบส่งใหม่

ในปัจจุบันนี้ระบบส่งไฟฟ้าในประเทศคูเวตใช้สายส่งกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 275 kV และ 132 kV ซึ่งจากการศึกษาและวางแผนการลดระดับกระแสลัดวงจร พบว่าวิธีการสร้างสายส่งกำลังไฟฟ้าในระดับแรงดันที่สูงขึ้น สามารถลดกระแสลัดวงจรได้ดี และมีความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ โดยสายส่งที่วางแผนจะสร้างเพิ่มขึ้นอยู่ที่ระดับแรงดัน 400 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่สูงขึ้นจากเดิม

วิธีการที่ประเทศคูเวตจะใช้ในอนาคตเพื่อการลดทอนกระแสลัดวงจรคือ การวางแผนสร้างสายส่งไฟฟ้าในระดับแรงดันที่สูงขึ้นเพิ่ม ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ระดับกระแสลัดวงจรน้อยลง และไม่เกินระดับการป้องกันของอุปกรณ์ป้องกันในระบบ

3.4 วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

จากวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่มีอยู่ในปัจจุบันที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าในหลายๆ วิธีไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลได้ โดยปัญหาอุปสรรคที่สำคัญ ดังนี้

1. ระดับแรงดันการที่ใช้งานที่สูงกว่า 230 kV และหลายๆ เทคโนโลยียังอยู่ในระหว่างการศึกษาและพัฒนา จึงยังไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรม
2. ข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ในบริเวณกรุงเทพฯ ที่ไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมที่มีขนาดใหญ่ได้

จากเหตุผลดังกล่าววิธีการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส การเปิดวงจรสายส่ง และ การ By-pass วายส่ง เป็นวิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรที่ กฟผ. นำมาใช้ในทางปฏิบัติ โดยอาศัยหลักการเลือกตำแหน่งที่มีกำลังผลิตมากที่สุดในระบบเป็นบริเวณที่จะทำการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการแบ่งแยกบัส ซึ่ง กฟผ. มีแผนการ

ที่จะทำการแบ่งแยกบัสที่สถานีไฟฟ้าพระนครเหนือ และสถานีไฟฟ้าพระนครใต้ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งหลักการดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดปัญหามีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนมาก รวมไปถึงการพิจารณาการ By-pass ในบริเวณที่มีกระแสลัดวงจรมาก เช่น บริเวณสถานีรังสิต เป็นต้น

การคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าภายหลังจากการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ควบคู่ไปกับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในระบบด้วย ดังนั้นคณะนักวิจัยจึงนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหากระแสลัดวงจรสูงในระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการแบ่งแยกบัส การเปิดวงจรสายส่ง และการ By-pass สายส่ง

3.3.1 การประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งแยกบัส

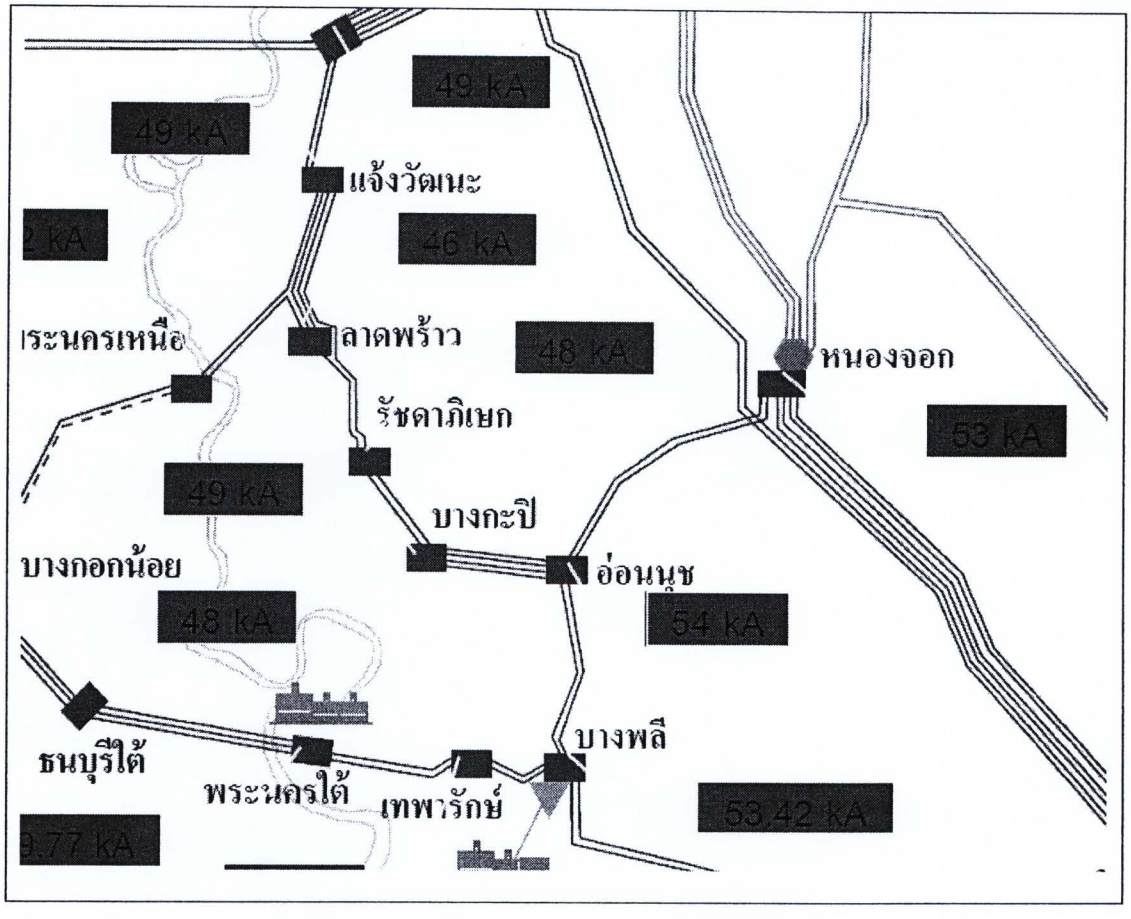
การแบ่งแยกบัสเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ใช้กันในหลายๆ ประเทศ ใช้เงินลงทุนไม่สูงมากและมีความเชื่อถือได้สูง อย่างไรก็ตาม ควรนำการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่บัส การส่งผ่านกำลัง ความมั่นคงของระบบ (Contingency) และความเชื่อถือได้ของระบบ (Reliability) ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งแยกบัส มาร่วมพิจารณาหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม ซึ่งถือเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งและจำนวนการแบ่งแยกบัสที่เหมาะสม แต่ข้อจำกัดที่สำคัญคือ วิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับระบบของประเทศไทยได้อย่างจำกัดเนื่องจากในระบบมีบริเวณที่สามารถทำการแบ่งแยกบัสได้เพียงไม่กี่จุด

3.3.2 การประยุกต์ใช้วิธีการเปิดวงจรสายส่ง

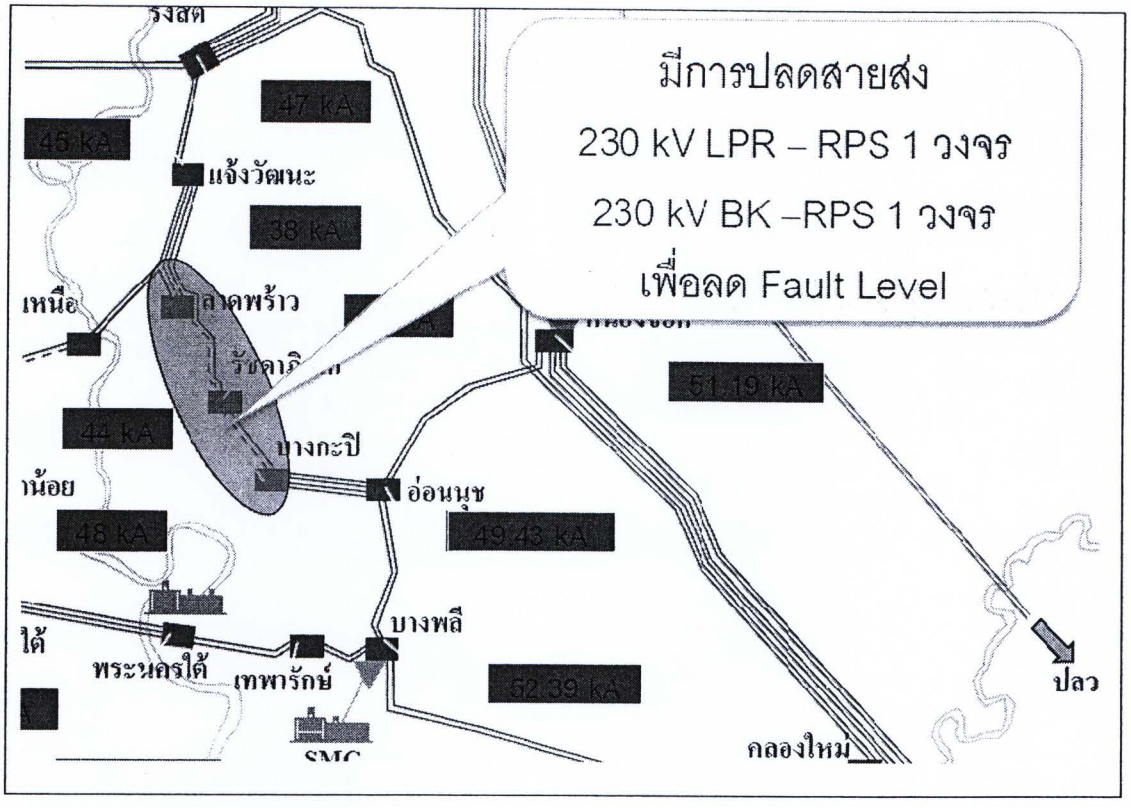
การเปิดวงจรสายส่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในกรณีที่ฉุกเฉิน โดยการเปิดวงจรสายส่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และไม่ใช้ต้นทุนในการแก้ปัญหา อย่างไรก็ตาม เปรียบเสมือนการหายไปของวงจรสายส่ง ซึ่งทำให้ภาพรวมของระบบดูอ่อนแอลง ดังนั้นในการพิจารณาเปิดวงจรสายส่ง ต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นที่สามารถยอมรับได้ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้ แต่ข้อดีที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับการแบ่งแยกบัส คือมีตัวเลือกหรือบริเวณที่สามารถเปิดวงจรได้มากกว่า

ตัวอย่าง การประยุกต์ใช้การเปิดวงจรสายส่งทางการไฟฟ้าฯ ได้ดำเนินการเปิดวงจรสายส่ง tie line ที่ระดับแรงดัน 230 kV ระหว่าง สถานีไฟฟ้าบางกะปิ และสถานีไฟฟ้ารัชดาภิเษก และระหว่าง

สถานีไฟฟ้ารัชดาภิเษกและสถานีไฟฟ้าลาดพร้าว เป็นต้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวแต่เมื่อระบบไฟฟ้ามีการขยายตัวขึ้นตามความต้องการไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 ระบบก่อนการพิจารณาเปิดวงจร



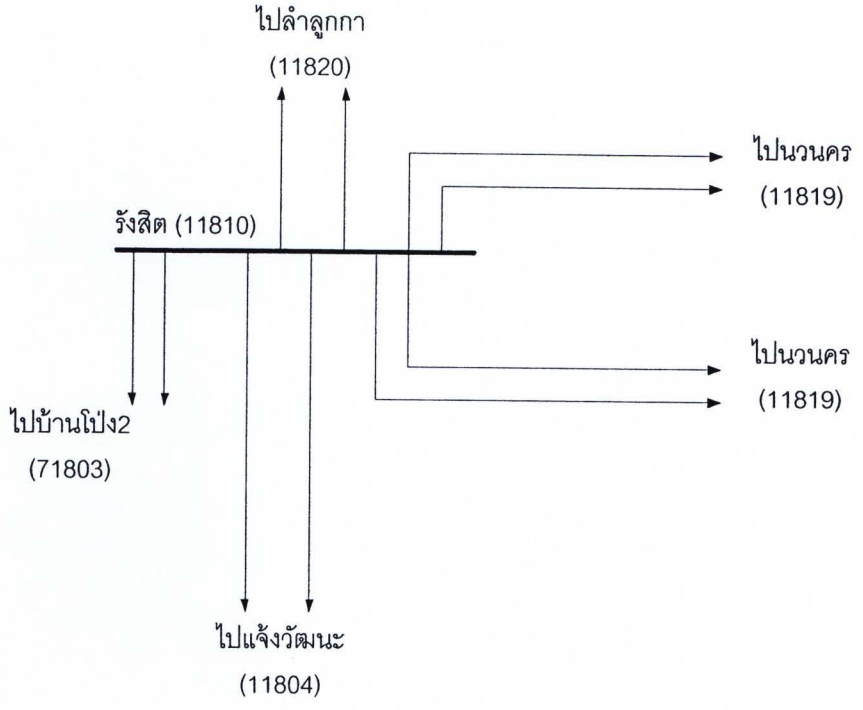
รูปที่ 3.17 ระบบหลังการพิจารณาเปิดวงจร

จากกรณีการเปิดวงจรนี้สามารถแสดงได้ว่า การลดกระแสลัดวงจรโดยวิธีนี้สามารถลดกระลัดวงจรในบริเวณใกล้เคียง และบริเวณที่อยู่ห่างออกไปได้

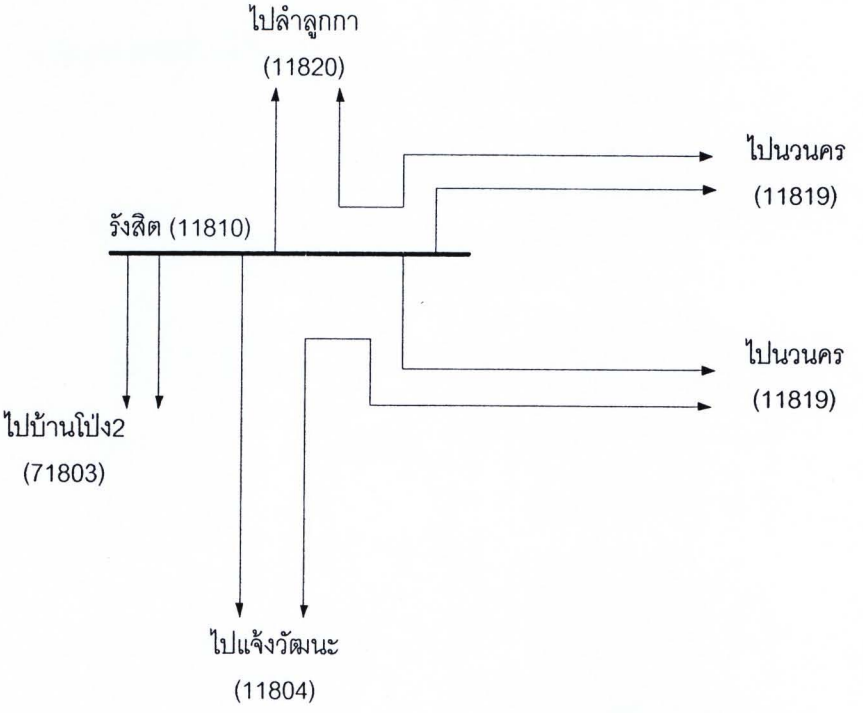
3.3.3 การประยุกต์ใช้วิธีการ By-pass สายส่ง

วิธีการจำกัดกระแสลัดวงจรโดยการปรับปรุงโครงข่ายไฟฟ้าด้วยการ By-pass สายส่งในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสลัดวงจรไม่ให้ไหลสู่บริเวณที่มีปริมาณกระแสลัดวงจรมากดัง การ By-pass สายส่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะสั้น และในกรณีที่ฉุกเฉิน โดยการสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และมีผลกระทบที่ตามมาน้อยกว่าการเปิดวงจรสายส่ง แต่มีทางเลือกในการแก้ไขปัญหาที่น้อยกว่า

<u>ตัวอย่าง</u> กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้การ By-pass สายส่งบริเวณสถานีรังสิต ที่ทำการ By-pass การเชื่อมต่อระหว่างสถานีแจ้งวัฒนะ ไปสถานีนวนคร ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งสามารถลดปริมาณกระแสลัดวงจรจาก 47 kA ลงไปสู่ 45 kA ที่บริเวณรังสิตได้



ก) ระบบก่อนทำการ By-pass
บริเวณรังสิต



ข) ระบบหลังทำการ By-pass
บริเวณรังสิต

รูปที่ 3.18 ระบบที่ทำการ By-pass สายส่ง