# บทที่ 2

## การวิเคราะห์การลัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม

ระบบไฟฟ้าใด ๆ ก็ตาม ถึงแม้จะได้รับการออกแบบอย่างดีก็มีโอกาสที่จะเกิดการลัดวงจรที่ทำให้เกิดกระแสสูงผิดปรกติ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์และฟิวส์ จะต้องทำการตัดส่วนที่เกิดการลัดวงจรออกได้ โดยทำให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุดและมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้อยที่สุด อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า เช่น สายเคเบิล บัสดัก และดิสคอนเน็คสวิช จะต้องทนได้ต่อความเค้นทางกลศาสตร์และทางความร้อนที่เกิดจากกระแสลัดวงจรไหลผ่าน

กระแสลัดวงจรในระบบที่จุดใด ๆ จะถูกจำกัดด้วยอิมพิแดนซ์ (impedance) ของวงจร และอุปกรณ์นับจากแหล่งกำเนิดกำลังงาน จนถึงจุดเกิดลัดวงจรรวมกับกระแสลัดวงจรที่มาจากโหลด (load) ถึงแม้ว่ากระแสลัดวงจรไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโหลด แต่การเพิ่มโหลดในระบบอาจทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มมากขึ้นจนเกิดอันตราย ดังนั้นไม่ว่าจะมีการขยายระบบเดิม หรือติดตั้งใหม่ ก็จะต้องมีการวิเคราะห์การเกิดลัดวงจรเพื่อพิจารณาขนาดพิกัดทั้งของอุปกรณ์ใหม่และอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เดิม (1)

การวิเคราะห์การลัดวงจรจะแบ่งออกเป็น 5 ลักษณะคือ

1. กระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรกสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง (First-cycle duties for high-voltage circuit breakers)

2. กระแสลัดวงจรในช่วงคอนแทกแยกจากกัน สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง (Contact-parting (interrupting) duties for high-voltage circuit breakers)

3. กระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรกสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ แรงดันต่ำ (First-cycle duties for low-voltage circuit breakers)

4. กระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรก สำหรับฟิวส์ (First-cycle duties for fuses)

5. กระแสลัดวงจรสำหรับรีเลย์ ที่มีการถ่วงเวลา (Short circuit current for time-delayed relaying devices)

แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร (Sources of short circuit current)

แหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบคือ

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous generator)

2. มอเตอร์แบบซิงโครนัส และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous motor and synchronous condensor)

3. อินดักชันมอเตอร์ (Induction motor)

4. ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (Electric utility system)

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

ถ้าทำการลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส จะเกิดกระแสลัดวงจรซึ่งเริ่มต้นด้วยค่าที่สูง (พิจารณากระแสอาร์เอ็มเอส (rms current)) และลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง (Steady state valve) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงถูกขับด้วยเครื่องจักรต้นกำลัง และยังมีกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ขดลวดสนาม กระแสลัดวงจรก็จะมีต่อไปจนกว่าจะมีการตัดวงจร

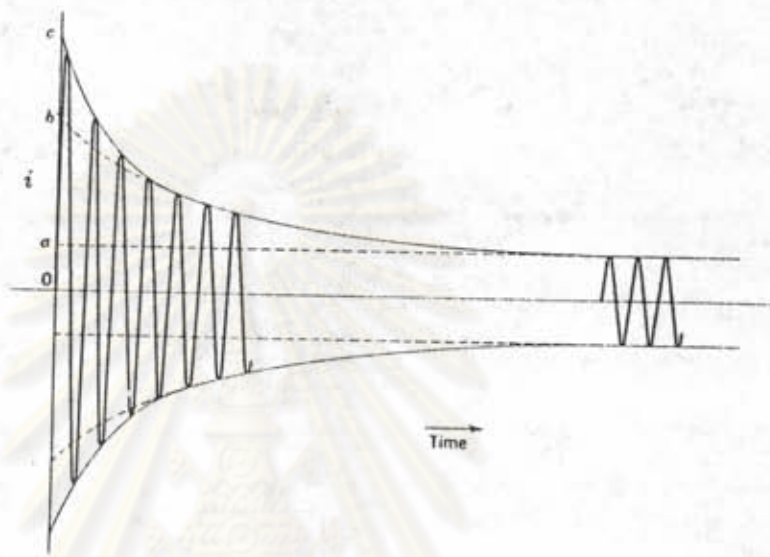
เพื่อที่จะแทนคุณลักษณะดังกล่าวนี้ เราสามารถใช้วงจรสมมูลย์ (Equivalent circuit) ซึ่งประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant driving voltage) ต่ออนุกรมกับอิมพิแดนซ์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา และเพื่อที่จำนำไปใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร จึงได้มีการกำหนดไว้ดังนี้

X"d = ซับทรานเซียนรีแอคแตนซ์ (Subtransient reactance) เป็นค่าของรีแอคแตนซ์ที่ได้จากกระแสในช่วงไซเกิลแรกหลังจากเกิดการลัดวงจร หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 0.1 วินาที ค่าจะเพิ่มขึ้นเป็น

X'd = ทรานเซียนรีแอคแตนซ์ (Transient reactance) เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่ได้จากกระแสในช่วงหลังจากผ่านไปหลายไซเกิล และเมื่อเวลาผ่านไป 0.5 ถึง

2 วินาที ค่าจะเพิ่มขึ้นเป็น

Xd = ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์ (Synchronous reactance) เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่ได้จากกระแสในช่วงคงที่ (Steady state)




Current as a function of time for a synchronous generator short-circuited while running at no load. The unidirectional transient component of current has been eliminated in redrawing the oscillogram.

รูปที่ 2.1 แสดงกระแสลัดวงจรที่เกิดจากการลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

2. <u>มอเตอร์แบบซิงโครนัสและซิงโครนัสคอนเดนเซอร์</u>

ซิงโครนัสมอเตอร์และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ จะเป็นต้นกำเนิดของกระแสลัดวงจรในลักษณะเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เมื่อเกิดการลัดวงจรจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบตกลง ดังนั้นซิงโครนัสมอเตอร์จะได้รับกำลังไฟฟ้าจากระบบน้อยเกินกว่าที่จะไปขับโหลด แรงเฉื่อยของมอเตอร์และโหลดจะทำหน้าที่เป็นเครื่องจักรต้นกำลังและมอเตอร์จะทำตัวเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกระแสเข้าสู่จุดลัดวงจร กระแสลัดวงจรนี้จะลดลงเมื่อสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ลดลง

วงจรสมมูลย์ของซิงโครนัสมอเตอร์ จะเป็นเช่นเดียวกับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบซิงโครนัส ค่ารีแอคแตนซ์จะประกอบด้วย X"d, X'd, Xd เช่นเดียวกัน ส่วนวงจรสมมูลย์ของซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ก็จะเป็นเช่นเดียวกัน (1)

3. อินดักชันมอเตอร์

อินดักชันมอเตอร์แบบสเควอเร็ลเคจ (sqirrel-cage) สามารถเป็นต้นกำเนิดของกระแสลัดวงจรได้ โดยเกิดจากแรงเฉื่อยของโรเตอร์ (rotor) และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสเตเตอร์ (Stator) ในการลัดวงจรที่ขั้วมอเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไม่มีแรงดันไฟฟ้าที่จะไปสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นกระแสลัดวงจรที่เกิดจากการลัดวงจรที่ขั้วมอเตอร์จะลดลงและหายไปภายในเวลาไม่กี่ไซเกิล

วงจรสมมูลย์จะเหมือนวงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส แต่จะมีเฉพาะค่าลับทรานเซียนรีแอคแตนซ์เท่านั้น และมีค่าเท่ากับลอคโรเตอร์รีแอคแตนซ์ (locked-rotor reactance)

ในการคำนวณการลัดวงจร เราจะคิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอินดักชัน เหมือนกับอินดักชันมอเตอร์ สำหรับอินดักชันมอเตอร์แบบวาวนด์โรเตอร์ (wound-rotor) ซึ่งมักจะทำงานโดยการลัดวงจรที่โรเตอร์ ในกรณีนี้การคำนวณการลัดวงจร ก็จะคิดเช่นเดียวกับอินดักชันมอเตอร์แบบสเควอเร็ลเคจ (squirrel cage) แต่ถ้าอินดักชันมอเตอร์แบบวาวนด์โรเตอร์ทำงานโดยมีความต้านทานต่ออยู่ในโรเตอร์ จะทำให้ค่าคงที่เวลา (time constant) สั้นมากจนละทิ้งในการคำนวณได้ ดังนั้นในกรณีนี้ จึงต้องพิจารณาเป็นพิเศษว่าจะนำมาคิดในการคำนวณกระแสลัดวงจรด้วยหรือไม่ (1)

4. ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (Electric utility system)

ต้นกำเนิดของกระแสลัดวงจรของระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ก็คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง เราสามารถใช้วงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แทนระบบผลิตกำลังไฟฟ้าได้ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม กระแสที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดการลัดวงจร เปรียบเสมือนกับการเพิ่มโหลดเพียงเล็กน้อย ดังนั้น กระแสลัดวงจรที่มาจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้า จะคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา

เราจึงสามารถแทนอิมพิแดนซ์ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยค่าค่าเดียว(1)

หลักเบื้องต้นของการคำนวณกระแสลัดวงจร

สูตรพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร คือ $I = E/Z$ โดยที่ I คือ กระแสลัดวงจร E คือแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร (Driving voltage of the source) และ Z เป็นอิมพิแดนซ์จากแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรจนถึงจุดเกิดลัดวงจร โดยรวมอิมพิแดนซ์ของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรไว้ด้วย

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม มักจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรหลายแหล่ง ขั้นหนึ่งของการคำนวณก็คือ การทำให้แหล่งกำเนิดทั้งหลายอยู่ในรูปที่จะสามารถจะใช้สูตรพื้นฐานมาคำนวณได้ (1)

1. ลักษณะการเกิดลัดวงจร (Type of fault)

ในการวิเคราะห์การลัดวงจร ของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม เรามักจะพิจารณาค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสเพียงอย่างเดียว เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วจะเป็นค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในการเกิดลัดวงจรของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม (1,10)

กระแสลัดวงจรแบบลายน์ทูลายน์ (line-to-line) จะมีค่าประมาณ 87% ของกระแสลัดวงจร 3 เฟส กระแสลัดวงจรลงดิน (line-to-ground) ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission system) จะมีค่าตั้งแต่ 2-3% จนถึง 125% ของกระแสลัดวงจร 3 เฟส แต่ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมนั้น มีโอกาสน้อยมากที่ค่ากระแสลัดวงจรลงดิน (line-to-ground) จะมีค่ามากกว่ากระแสลัดวงจร 3 เฟส (1)

ในการคำนวณกระแสลัดวงจรสูงสุด เราจะสมมุติว่าเป็นการเกิดลัดวงจรที่ไม่มีอิมพิแดนซ์ที่จุดลัดวงจร และไม่มีผลจากการจำกัดกระแส (Current limiting effect) ที่เกิดจากการลัดวงจร (1)

กระแสลัดวงจรลงดิน อาจจะมีค่ามากกว่ากระแสลัดวงจร 3 เฟส ก็ต่อเมื่อเกิด

การลัดวงจรในระบบไฟฟ้าใกล้กับอุปกรณ์ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ที่มีการต่อลงดินโดยตรง (Solidly grounded)

2. หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Y solidly grounded ที่ระดับแรงดันมากกว่า 1 กิโลโวลท์

3. หม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต ที่มีการต่อแบบGrounded Y-tertiary ที่ระดับแรงดันมากกว่า 1 กิโลโวลท์

4. หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ Grounded Y-Grounded Y-Tertiary ที่ระดับแรงดันมากกว่า 1 กิโลโวลท์

ระบบไฟฟ้าดังกล่าว เป็นระบบที่ออกแบบแตกต่างไปจากมาตราฐาน IEEE std 142-1982 "IEEE Recommended Practices for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems" (6) ซึ่งได้กำหนดและแนะนำไว้ดังนี้คือ

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการต่อลงดิน ควรมีระบบต่อลงดินผ่านรีแอคเตอร์หรือตัวต้านทาน เพื่อจำกัดกระแสลัดวงจรลงดิน ไม่ให้เกินกระแสลัดวงจร 3 เฟส การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงดินโดยตรง (Solidly grounded) อาจทำให้กระแสลัดวงจรลงดินสูงกว่ากระแสลัดวงจร 3 เฟส ซึ่งเกินกว่าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทนได้ และจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2. ระบบไฟฟ้าแรงดัน 2.4 - 15 กิโลโวลท์ ระบบไฟฟ้าในระดับแรงดัน 2.4 - 15 กิโลโวลท์ มักจะมีอุปกรณ์ไฟฟ้าพวกเครื่องจักรหมุนต่ออยู่ ดังนั้น เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดแก่ขดลวดของเครื่องจักรหมุน อันเนื่องมาจากกระแสลัดวงจรลงดิน ระบบไฟฟ้าระดับแรงดันนี้ จึงควรมีระบบต่อลงดินผ่านรีซีสแตนซ์ (Resistance grounded)

ระบบไฟฟ้าในระดับแรงดัน 2.4 -15 กิโลโวลท์นี้ มีบ้างที่ได้รับการออกแบบให้เป็นระบบที่ไม่ต่อลงดิน (Ungrounded system) เพื่อมิให้มีกระแสลัดวงจรลงดิน เมื่อมีการลัดวงจรลงดินที่จุดใดจุดหนึ่งในระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้านั้นก็ยังคงทำงานต่อไปได้โดยไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น แต่จะเป็นการเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายที่รุนแรงกว่าที่จะติดตามมา นั่นคือ ถ้าเกิดการลัดวงจรลงดินขึ้นเป็นจุดที่สองและต่างเฟสกัน ก็จะเกิดการลัดวงจรแบบลายน์ทูลายน์ ซึ่งจะเกิดกระแสลัดวงจรที่รุนแรง และวงจรที่จะถูกตัดออกจากระบบก็จะมีมากขึ้น

3. ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (ระบบ 600 โวลท์และที่ต่ำกว่า) โดยปรกติ

ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำนี้จะมีการต่อลงดินโดยตรง เพื่อใช้กับโหลดที่รับแรงดันเฟส ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำนี้ ค่าความต้านทานจะมีผลต่อกระแสลัดวงจรมาก ค่าอิมพิแดนซ์ในเส้นทางที่กระแสลัดวงจรลงดินไหลผ่าน จะมีผลมากจนทำให้กระแสลัดวงจรลงดินมีค่าน้อยกว่ากระแสลัดวงจร 3 เฟส ดังนั้น ระบบต่อลงดินของอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งจะเป็นเส้นทางที่กระแสลัดวงจรลงดินไหลผ่าน จะต้องไม่ทำให้เกิดอิมพิแดนซ์สูงเกินไป จนทำให้กระแสลัดวงจรลงดินต่ำเกินกว่าที่ระบบป้องกันจะทำงานได้

ในระบบแรงดันต่ำที่ไม่มีโหลดที่รับแรงดันเฟสต่ออยู่ อาจใช้ระบบต่อลงดินโดยผ่านความต้านทานสูง แทนการใช้ระบบต่อลงดินโดยตรง ทั้งนี้ ขึ้นกับความสำคัญของระบบที่จะต้องทำงานอย่างต่อเนื่องหรือไม่ ในกรณีนี้จะต้องมีระบบป้องกันที่สามารถตรวจสอบจุดที่เกิดลัดวงจรลงดิน และสามารถแก้ไขได้โดยรวดเร็ว

4. ระบบไฟฟ้าแรงดันมากกว่า 15 กิโลโวลท์ ระบบไฟฟ้าระดับแรงดันนี้ ส่วนมากจะเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission System) ซึ่งไม่มีอุปกรณ์พวกเครื่องจักรหมุนต่ออยู่โดยตรง จึงไม่ต้องคำนึงถึงผลเสียหายที่จะเกิดแก่อุปกรณ์เครื่องจักรหมุนต่อกระแสลัดวงจรลงดิน ระบบไฟฟ้าระดับแรงดันนี้จึงควรมีระบบต่อลงดินโดยตรง อุปกรณ์ต่าง ๆ จะมีราคาถูกลงเช่น อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge arrester) และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับตัวต้านทานต่อลงดิน

โดยสรุปแล้ว ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้รับการออกแบบตามมาตรฐานข้างต้น จะไม่มีโอกาสที่กระแสลัดวงจรลงดินจะมากกว่ากระแสลัดวงจร 3 เฟส ดังนั้น ในที่นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การลัดวงจร 3 เฟสแต่เพียงอย่างเดียว

## 2. วงจรสมมูลย์พื้นฐาน (Basic equivalent circuit)

ในการคำนวณโดยใช้สมการพื้นฐาน $I = E/Z$ เพื่อหากระแสโดยมีค่า E หนึ่งค่า และค่า Z หนึ่งค่านั้น ค่า E จะแทนแรงดันไฟฟ้าของต้นกำเนิดกระแสลัดวงจรทุก ๆ ตัว (รวมทั้งมอเตอร์) ค่าแรงดันนี้จะเท่ากับค่าแรงดันก่อนเกิดลัดวงจรที่จุดเกิดลัดวงจร และค่า Z ก็จะเป็นค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ของระบบทั้งหมด [ในการคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้บัสอิมพิแดนซ์เมตริกซ์ ($Z_{BUS}$) ค่า Z นี้จะเป็นสมาชิกตัวหนึ่งซึ่งอยู่ในแนวทะแยง (Diagonal element)ของ $Z_{BUS}$ ดังรายละเอียดในบทที่ 3] วงจรสมมูลย์ดังกล่าวนี้เป็นการแปลงวงจรตามทฤษฎีของเทฟวินิน (Thevenin's Theorem)

ในการคำนวณจะใช้สมมุติฐานที่ว่าระบบไฟฟ้าที่จะทำการคำนวณเป็นระบบ 3

เฟสสมดุลย์ ดังนั้นระบบ 3 เฟส อาจแทนได้ด้วยระบบซิงเกิลเฟส (Single phase) โดยใช้ค่าอิมพิแดนซ์ต่อเฟส และแรงดันเฟส (Line-to neutral system dirving voltage) หน่วยที่ใช้อาจจะใช้ค่าโวลท์และโอห์ม หรือใช้ค่าต่อหน่วย (per unit) แต่ในกรณีที่ในระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันไฟฟ้าหลายระดับ การคำนวณโดยใช้ค่าต่อหน่วยจะง่ายกว่า ในที่นี้จะใช้วิธีคำนวณโดยใช้ค่าต่อหน่วยซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเหมาะสมกว่า

ค่าอิมพิแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร จะเป็นค่าอิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์หลักอันได้แก่ หม้อแปลง (Transformer) บัสดัก (Bus duct) สายเคเบิล (Cable) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมอเตอร์ต่าง ๆ ส่วนค่าอิมพิแดนซ์อื่น ๆ ในระบบ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงกระแส (Current transformer) และจุดเชื่อมต่อ (Connection) อิมพิแดนซ์เหล่านี้จะมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ นอกจากนั้นโหลดที่เป็นสแตติกโหลด (Static load) เช่นแสงสว่างและความร้อน ก็สามารถละทิ้งได้

ค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร จะเป็นผลรวมทางเวคเตอร์ของรีแอคแตนซ์ และความต้านทาน แต่ในการคำนวณในระดับแรงดันปานกลางและแรงดันสูง อาจจะใช้ค่ารีแอคแตนซ์แต่เพียงอย่างเดียว เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น แต่ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าที่สูงกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย (Conservative) อย่างไรตาม ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในระดับแรงดันต่ำ ต้องคิดทั้งค่ารีแอคแตนซ์และค่าความต้านทาน ค่าความต้านทานจะมีผลต่อกระแสลัดวงจรพอควรจนไม่อาจละทิ้งได้ ในที่นี้เพื่อให้การคำนวณเป็นแบบอย่างเดียวกันทั้งหมด จึงใช้ค่าอิมพิแดนซ์ในการคำนวณกระแสลัดวงจรทั้งระดับแรงดันสูงและแรงดันต่ำ

ในการคำนวณกระแสลัดวงจร เพื่อใช้กำหนดขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ และ ฟิวส์ จะต้องคำนวณค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ (X/R ratio) ของระบบไฟฟ้าที่จุดลัดวงจรด้วย

ค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์และค่ารีซีสแตนซ์สมมูลย์ ที่ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ที่จุดลัดวงจร ใช้วิธีคำนวณค่ารีแอคแตนซ์และค่ารีซีสแตนซ์แยกกันคนละวงจร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า คำนวณค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ที่จุดลัดวงจรโดยละค่ารีซีสแตนซ์ และคำนวณค่ารีซีสแตนซ์สมมูลย์ที่จุดลัดวงจรโดยละค่ารีแอคแตนซ์ โดยใช้วงจรสมมูลย์ตามหฤษฎีของเทฟวีนิน เช่นเดียวกัน การคำนวณค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ด้วยวิธีนี้ จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับ

ความจริงมากที่สุด (3)

ข้อจำกัดในการคำนวณ

การคำนวณกระแสลัดวงจรโดยใช้ความสัมพันธ์ $I = E/Z$ จะมีข้อแม้บางประการในการคำนวณ คือ

1. ค่าอิมพิแดนซ์ (Impedance elements)

ในวงจรของระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต้านทาน (Resistance) ความเหนี่ยวนำ (Inductance) และคาปาซิแดนซ์ (Capacitance) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการหาผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าจะต้องทำการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล

ถ้าตั้งสมมุติฐาน 2 ข้อว่า

1. ต้นกำเนิดแรงดันเป็นคลื่นรูปซายน์ (Sine)
2. ค่าความต้านทาน, ความเหนี่ยวนำ และคาปาซิแดนซ์เป็นค่าคงที่

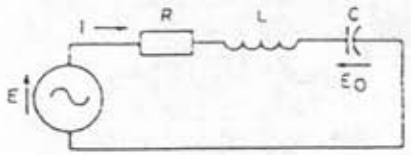
เราสามารถจะนำเอาสมการง่าย ๆ มาแทนได้ คือ

$$E = I \left[ R + j\left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right]$$

หรือ $I = E / Z$

2. สวิชชิงทรานเชียน (Switching transient)

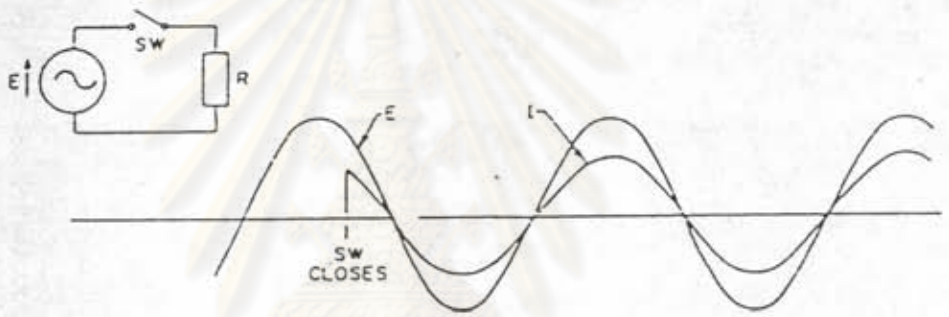
การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าโดยใช้เวคเตอร์ จะให้ผลลัพธ์เฉพาะ ค่าคงที่ (Steady state) ของ ปริมาณทางคลื่นรูปซายน์ (Sine wave) เท่านั้น ไม่รวมถึงผลที่เกิดในช่วงสวิชชิง แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่เกิดจากการเกิดสวิชชิงนี้ เราสามารถแยกออกมาวิเคราะห์และรวมเข้าในภายหลังได้




$$E = L\frac{dI}{dt} + RI + \frac{\int I\,dt}{C} + E_0$$

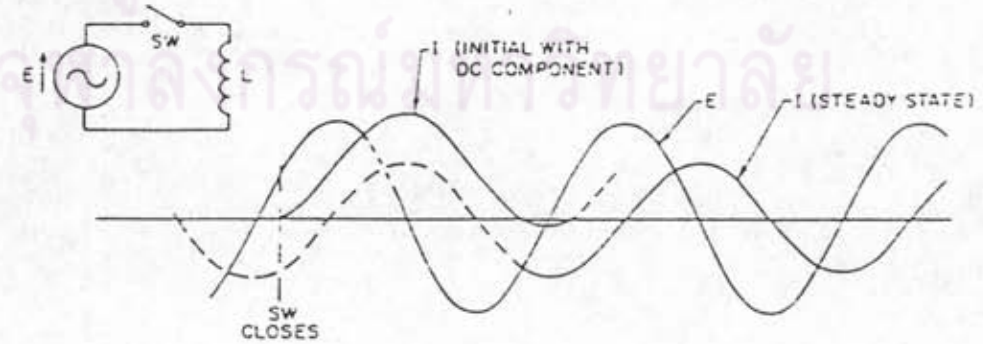
$$= L\frac{d^2Q}{dt^2} + R\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} + E_0$$

**รูปที่** 2.2 วงจร R, L, C




**รูปที่** 2.3 การเกิดสวิชชิงทรานเซียนของวงจรความต้านทาน R

(Switching transient R)




**รูปที่** 2.4 การเกิดสวิชชิงทรานเซียนของวงจรหน่วยนำ L

(Switching transient L)

012510

การเกิดสวิชชิงทรานเซียนของวงจรไฟฟ้าตามรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นวงจรที่มีแต่ความต้านทาน R เมื่อปิดสวิช SW ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นทันที และมีค่าเท่ากับ Steady state โดยไม่มีความแตกต่างในช่วงทรานเซียน

ในกรณีของความเหนี่ยวนำ L ตามรูปที่ 2.4 การปิดสวิช SW จะเกิดสวิชชิ่งทรานเซียน ดังแสดงได้จากสมการ

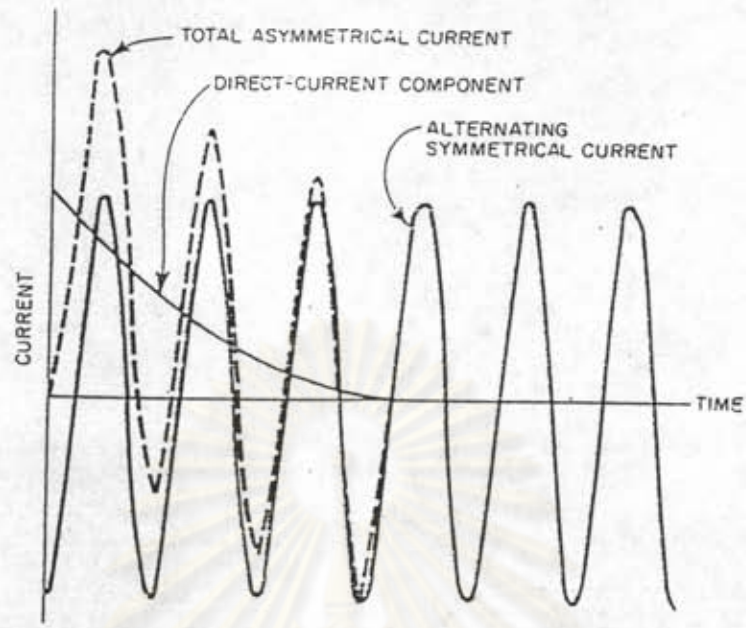
$$E = L\frac{dI}{dt}$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{E}{L}$$

ค่าความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นว่า การปล่อยแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ความเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าไปตามเวลา ความชัน (Slope) ของกราฟระหว่างกระแสและเวลา จะมีค่าเท่ากับ E/L

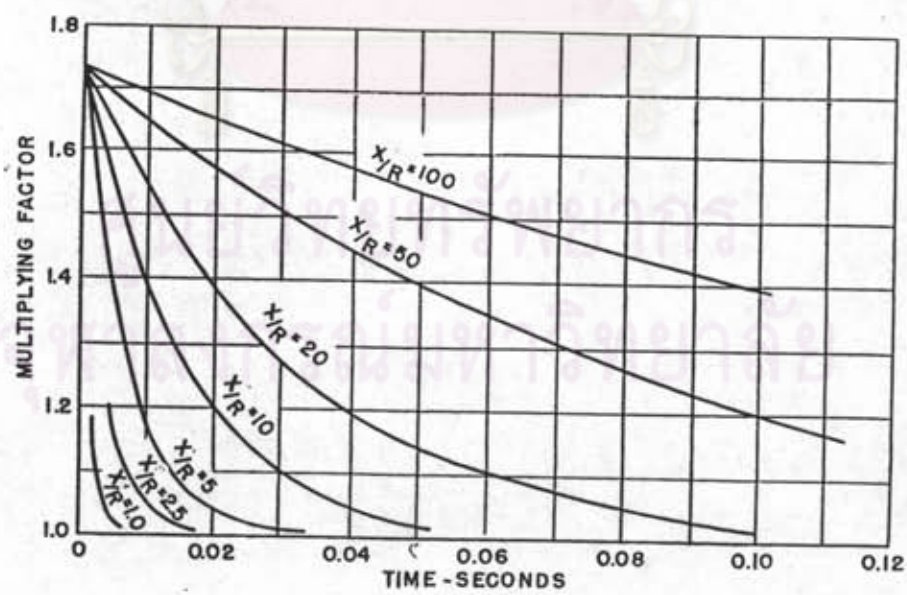
ทางด้านขวามือของรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงกระแสที่สภาวะคงที่ กระแสจะตามแรงดันอยู่ 90° และที่แรงดันสูงสุดทางบวกกระแสก็จะมีอัตราการเพิ่มกระแสไปสู่จุดยอดมากที่สุด และที่แรงดันเป็นศูนย์กระแสไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ที่ค่าค่าหนึ่งโดยไม่มีอัตราการเปลี่ยนแปลง ขณะที่ปิดสวิชจะเกิดกระแสขึ้นเริ่มจากค่าศูนย์โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเท่ากับ E/L ดังกราฟของกระแสไฟฟ้าที่แสดงเป็นเส้นทึบทางซ้ายของรูป จะเห็นได้ว่าเกิดส่วนประกอบของกระแสตรงขึ้น (Direct current component) ซึ่งมีค่าใดค่าหนึ่งระหว่างศูนย์จนถึงค่ายอดของกระแสในสภาวะคงที่ ขึ้นอยู่กับการปิดสวิชว่าปิด ณ ที่เวลาใด

ถ้าในวงจรไม่มีความต้านทานอยู่เลย กระแสไฟฟ้าก็จะมีส่วนประกอบของกระแสตรงอยู่ตลอดไป ความต้านทานที่มีอยู่ในวงจรจะทำให้ส่วนประกอบกระแสตรงค่อย ๆ ลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ดังแสดงได้ในรูปของสมการ (1)

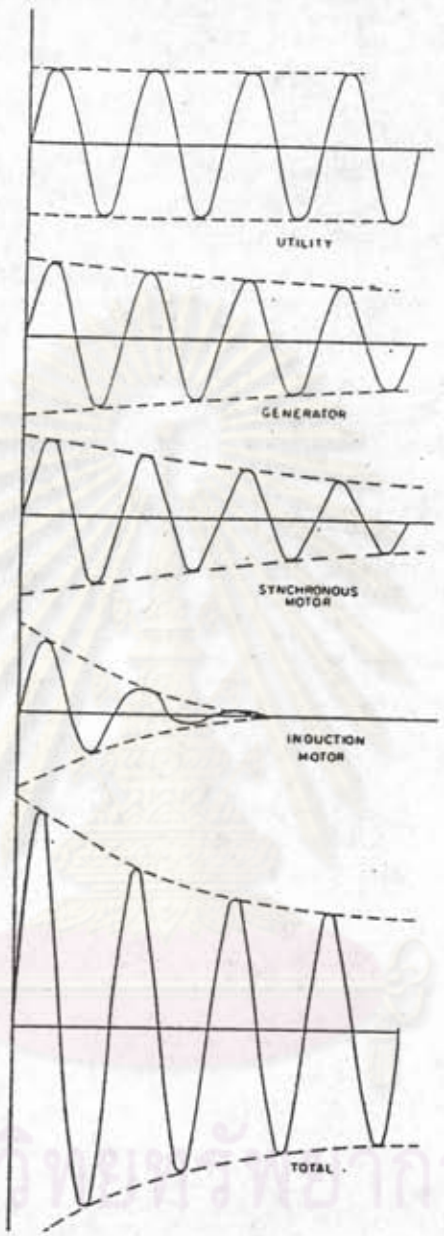



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.5 กระแสสมดุลย์และกระแสไม่สมดุลย์




รูปที่ 2.6 อะซิมเมตริกซ์คอลแฟคเตอร์ที่เวลาและอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ต่าง ๆ กัน




Decreasing Symmetrical Short-Circuit Current

รูปที่ 2.7 การลดลงของกระแสลัดวงจรสมดุลย์ (Symmetrical Short Circuit Current)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$I = \frac{E \sin(\omega t)}{j\omega L} + I_{dc} e^{-(R/L)t}$$

กระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะสมดุลย์ทางแกนศูนย์ เรียกว่า กระแสสมดุลย์ (Symmetrical current) กระแสที่ไม่สมดุลย์ทางแกนศูนย์ดังเช่น กระแสที่มีส่วนประกอบกระแสตรง เรียกว่า กระแสไม่สมดุลย์ (Asymmetrical current) (6) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม จะเป็นลักษณะของวงจรเหนี่ยวนำ ดังนั้น กระแสลัดวงจรก็สามารถจะเกิดในลักษณะกระแสไม่สมดุลย์ได้ กระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์นี้ จะมีส่วนประกอบกระแสตรงซึ่งจะลดลงสู่ศูนย์ หรือกล่าวได้ว่ากระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์จะลดลงสู่กระแสลัดวงจรสมดุลย์ ในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลโดยมีค่าคงที่เวลา(Time constant) เป็นสัดส่วนกับค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร กระแสลัดวงจรสมดุลย์นี้ เราสามารถคำนวณได้จากแรงดันก่อนลัดวงจรที่จุดเกิดลัดวงจร หารด้วยอิมพิแดนซ์สมมูลย์ของระบบไฟฟ้าที่จุดเกิดลัดวงจร (E/Z) และกระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์ก็สามารถคำนวณง่าย ๆ ได้จากการใช้ตัวประกอบ(Factor)คูณกระแสลัดวงจรสมดุลย์ ตัวประกอบนี้เรียกว่า อะซิมเมตริกซ์คอลแฟคเตอร์ (Asymmetrical factor)ซึ่งแปรไปตามเวลาและอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของวงจร ดังในรูปที่ 2.6 แสดงค่าอะซิมเมตริกซ์คอลแฟคเตอร์ที่เวลาและอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ต่าง ๆ กัน

กระแสลัดวงจรสมดุลย์ จะมีค่าลดลงไปตามเวลาด้วย (ดังแสดงในรูปที่ 2.7) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอิมพิแดนซ์ของแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรไปตามเวลา ดังนั้น การคำนวณกระแสลัดวงจรที่เวลาต่าง ๆ กัน ก็สามารถทำได้โดยการเลือกค่าอิมพิแดนซ์เหล่านี้ให้เหมาะสม (1)

<u>รายละเอียดการวิเคราะห์</u>

การวิเคราะห์การลัดวงจร ของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. เตรียมโครงร่างของระบบไฟฟ้า(System diagram) และรวบรวมข้อมูล

เบื้องต้นของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้านั้น

2. แปลงข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ

3. รวมอิมพีแดนซ์

4. คำนวณการลัดวงจร

1. <u>การเตรียมโครงร่างของระบบไฟฟ้า และรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น</u>

ขั้นแรกในการวิเคราะห์การลัดวงจรคือ การเตรียมโครงร่างของระบบไฟฟ้าในรูปของซิงเกิลลายน์ไดอะแกรม (Single line diagram) ซึ่งแสดงแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจร และส่วนประกอบในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณ

เมื่อได้โครงร่างของระบบที่ต้องการวิเคราะห์แล้ว ควรกำหนดหมายเลขประจำบัส (Bus No.) หมายเลขประจำอุปกรณ์เพื่อใช้ในการอ้างอิง และกำหนดแรงดันที่บัสต่าง ๆ แรงดันนี้จะเป็นแรงดันฐาน (Base current) ที่นำไปใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร

แรงดันฐานที่ระดับแรงดันต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า จะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับอัตราส่วนจำนวนรอบ (Turn ratios) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่ออยู่ระหว่างบัสต่าง ๆ วิธีกำหนดแรงดันฐานที่บัสต่าง ๆ นั้นสามารถทำได้โดยเลือกแรงดันฐานที่บัสใดบัสหนึ่ง ให้มีค่าเท่ากับแรงดันพิกัด (rated voltage) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่บัสนั้นต่ออยู่ ส่วนแรงดันฐานที่บัสอื่น ๆ ก็จะเป็นไปตามอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง และวิธีง่าย ๆ ที่จะไม่ทำให้สับสนก็คือกำหนดให้ระดับแรงดันฐานที่บัสต่าง ๆ มีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิงของระบบไฟฟ้า (Nominal system voltage) และมีค่าเท่ากันกับแรงดันพิกัด (Rated voltage) ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้านั้น การกำหนดเช่นนี้ก็จะทำให้แรงดันฐานที่ระดับแรงดันต่าง ๆ สอดคล้องกับอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง และขนาดพิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็จะเป็นค่าที่ระดับแรงดันฐานเดียวกัน

รายละเอียดข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าที่ต้องเตรียมมีดังนี้คือ

1.1 <u>ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (Utility) ข้อมูลที่ต้องการคือ</u>

1. ฟอลท์เลเวล (Fault level) มีหน่วยเป็นเมกกะโวลท์แอมป์
2. อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ (X/R ratio)

1.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ หม้อแปลงแบบ 2 ขดลวด (Two-winding Transformer) และหม้อแปลงแบบ 3 ขดลวด (Three-winding Transformer)

1.2.1 หม้อแปลง 2 ขดลวด ข้อมูลที่ต้องการคือ

1. อัตรากำลังของหม้อแปลง (Rated power) มีหน่วยเป็นเมกกะโวลท์แอมป์ (MVA)
2. รีแอคแตนซ์ (Reactance) มีหน่วยเป็น เปอร์เซนต์ที่อัตรากำลัง (Percent reactance based on rated power)
3. อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของหม้อแปลง (X/R ratio)

1.2.2 หม้อแปลง 3 ขดลวด ข้อมูลที่ต้องการคือ

1. อัตรากำลังของหม้อแปลง (Rated power) ของขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding), ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) และขดลวดตติภูมิ (Tertiary winding) มีหน่วยเป็นเมกกะโวลท์แอมป์ (MVA)
2. รีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิมีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลังของขดลวดปฐมภูมิ (หรือขดลวดทุติยภูมิ หรือขดลวดตติภูมิ)
3. รีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดตติภูมิ มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลังของขดลวดปฐมภูมิ (หรือขดลวดตติภูมิ หรือขดลวดทุติยภูมิ)
4. รีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดทุติยภูมิ และขดลวดตติภูมิมีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลังของขดลวดทุติยภูมิ (หรือขดลวดตติภูมิ หรือขดลวดปฐมภูมิ)
5. อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์

1.3 บัสดักและเคเบิล (Bus duct, cable) ข้อมูลที่ต้องการคือ

1. ค่ารีแอคแตนซ์ต่อหน่วยความยาว มีหน่วยเป็นโอห์มต่อกิโลเมตร
2. ค่ารีซีสแตนซ์ต่อหน่วยความยาว มีหน่วยเป็นโอห์มต่อกิโลเมตร
3. ความยาวของบัสดักหรือเคเบิลมีหน่วยเป็นกิโลเมตร
4. จำนวนวงจร หรือจำนวนสายต่อเฟส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ระดับแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นกิโลโวลท์ (kV)(ระดับแรงดันไฟฟ้านี้ มีค่าเท่ากับแรงดันฐานของบัสที่บัสดักหรือเคเบิลต่ออยู่)

1.4 <u>เครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u> ข้อมูลที่ต้องการคือ

1. ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบ่งเป็น

1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับเทอร์บายน์ (Turbo-generators) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำที่มีขดลวดอะมอทิสซู (Hydro-generators with amortisseur windings) และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous condensers)

1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ ที่ไม่มีขดลวด อะมอทิสซู (Hydro-generators without amortisseur windings)

2. อัตรากำลัง (Rated power) มีหน่วยเป็น เมกกะโวลท์แอมป์ (MVA)

3. ซับทรานเซียนรีแอคแตนซ์ (Subtransient reactance) มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลัง

4. ทรานเซียนรีแอคแตนซ์ (Transient reactance) มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลัง

5. อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์

1.5 <u>มอเตอร์</u> ข้อมูลที่ต้องการคือ

1. ชนิดของมอเตอร์ แบ่งเป็น

1.1 ซิงโครนัสมอเตอร์

1.2 อินดักชันมอเตอร์

1.3 กลุ่มของอินดักชันมอเตอร์

2. อัตรากำลัง (Rated power) มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ (kW)

3. เพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor) มีหน่วยเป็นเปอร์ยูนิต (P.U.)

4. ประสิทธิภาพ (Efficiency) มีหน่วยเป็น เปอร์เซนต์

5. ซับทรานเซียนรีแอคแตนซ์ (Subtransient reactance) มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ (ซับทรานเซียนรีแอคแตนซ์ของมอเตอร์มีค่าเท่ากับส่วนกลับของกระแสลอคโรเตอร์ (Locked rotor current))

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

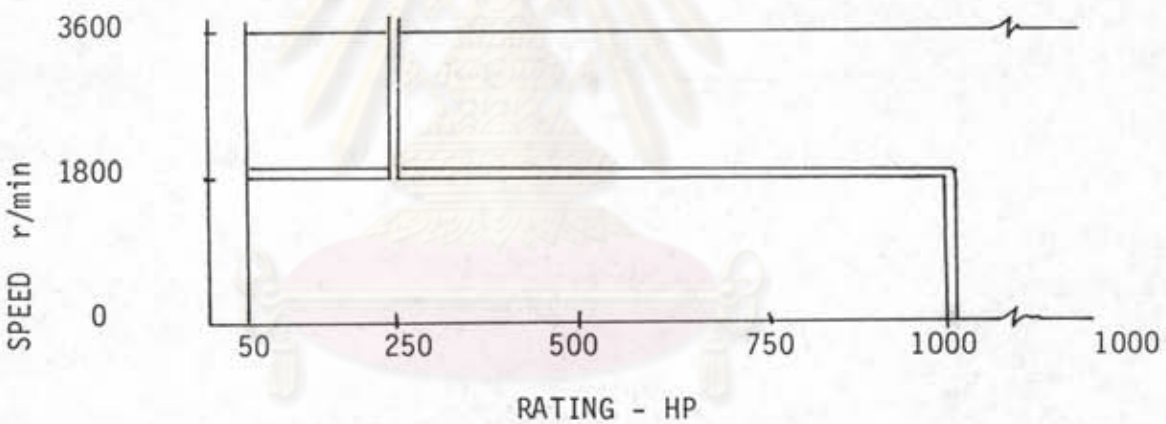
6. ความเร็วมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

เพื่อเป็นการง่ายต่อการประมาณโหลดเบื้องต้น และเป็นการลดจำนวนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าลง สามารถรวมอินดักชันมอเตอร์เข้าเป็นกลุ่มได้ดังนี้คือ

1. มอเตอร์ขนาดมากกว่า 186.5 กิโลวัตต์ (250 hp) ที่ความเร็วมากกว่า 1800 รอบต่อนาทีขึ้นไป (ครอบคลุมทั้ง 50 Hz และ 60 Hz) และมอเตอร์ขนาดมากกว่า 746 กิโลวัตต์ (1000 hp) ขึ้นไป

2. มอเตอร์ขนาดตั้งแต่ 37.3 กิโลวัตต์ (50 hp) ถึง 186.5 กิโลวัตต์ (250 hp) และมอเตอร์ขนาดมากกว่า 186.5 กิโลวัตต์ ถึง 746 กิโลวัตต์ ที่มีความเร็วตั้งแต่ 1800 รอบต่อนาทีลงมา (ครอบคลุมทั้ง 50 Hz และ 60 Hz)

3. มอเตอร์ขนาดน้อยกว่า 37.3 กิโลวัตต์




รูปที่ 2.8 การแบ่งอินดักชันมอเตอร์ออกเป็นกลุ่ม

ข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ต้องเตรียมดังที่กล่าวมานี้ ควรได้จากความเป็นจริง เช่น จากบริษัทผู้ผลิต แต่ในกรณีที่ไม่สามารถหาได้ สามารถพิจารณาได้จากค่ามาตราฐาน ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ง.

2. <u>การแปลงข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ</u>

เมื่อได้โครงร่างของระบบไฟฟ้า และข้อมูลเบื้องต้นต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในระบบ

ไฟฟ้านั้นแล้ว ก็จะทำการแปลงข้อมูลเบื้องต้นเหล่านั้นให้เป็นค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยของอุปกรณ์นั้น ๆ เพื่อนำไปคำนวณการลัดวงจรแบบต่าง ๆ ต่อไป ค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยที่ใช้ในการคำนวณการลัดวงจรแบบต่าง ๆ นั้น จะแตกต่างกันที่ค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ของเครื่องจักรหมุน (Rotating machine) ส่วนค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยของอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการคำนวณการลัดวงจรแบบต่าง ๆ แต่ละแบบจะมีค่าเท่ากันหมด

ในการแปลงข้อมูลเบื้องต้น ก่อนอื่นจะต้องเลือกค่าเอ็มวีเอฐาน (Base MVA) และแปลงข้อมูลเบื้องต้นให้เป็นค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยดังนี้คือ

2.1 <u>ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า</u> คำนวณค่ารีแอคแตนซ์ (X) และค่ารีซีสแตนซ์ (R) สมมูลย์ต่อหน่วยได้ดังนี้

$$R = \frac{\text{base MVA}}{(\text{Utility fault level}) \times (1+(X/R\ \text{ratio})^2)^{1/2}} \qquad (2.1)$$

$$X = R \times (X/R\ \text{ratio}) \qquad (2.2)$$

โดยที่ base MVA คือ เอ็มวีเอฐาน มีหน่วยเป็น เมกกะโวลท์แอมป์

Utility fault level คือ ฟอลท์เลเวลของระบบผลิตกำลังไฟฟ้า

X/R ratio คือ อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบผลิตกำลังไฟฟ้า

2.2 <u>หม้อแปลงไฟฟ้า</u>

2.2.1 <u>หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 2 ขดลวด</u> คำนวณค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (X) และค่ารีซีสแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (R) ดังนี้

$$X = \frac{(\text{base MVA}) \times (\text{percent reactance})}{(\text{rated power}) \times (100)} \qquad (2.3)$$

$$R = \frac{X}{X/R\ \text{ratio}} \qquad (2.4)$$

โดยที่ rated power คือ อัตรากำลังของหม้อแปลงมีหน่วยเป็นเมกกะโวลท์แอมป์

percent reactance คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลัง

X/R ratio คือ อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของหม้อแปลง

2.2.2 <u>หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ขดลวด</u> ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อแปลง 3 ขดลวด จะเป็นค่าระหว่างขดลวด 2 ขดลวด ซึ่งสามารถแปลงเป็นวงจรสมมูลย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นวงจร สมมูลย์แบบ Y สามารถคำนวณได้ดังนี้

คำนวณค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และทุติยภูมิเป็นค่าต่อหน่วย ($X_{ps}$)

$$X_{ps} = \frac{(\text{base MVA}) \times (x_{ps})}{(\text{rated power 1}) \times (100)} \qquad (2.5)$$

โดยที่ rated power 1 คือ อัตรากำลังของขดลวดปฐมภูมิ (หรือทุติยภูมิหรือตติยภูมิ)

$x_{ps}$ คือ รีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลัง (rated power 1)

คำนวณค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และตติยภูมิ เป็นค่าต่อหน่วย ($X_{pt}$)

$$X_{pt} = \frac{(\text{ base MVA }) \times (\text{ } x_{pt} \text{ })}{(\text{ rated power 2 }) \times (\text{ 100 })} \qquad (2.6)$$

โดยที่ rated power 2 คือ อัตรากำลังของขดลวดปฐมภูมิ (หรือตติยภูมิหรือทุติยภูมิ)

$x_{pt}$ คือ รีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและตติยภูมิ มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลัง (rated power 2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำนวณค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดทุติยภูมิ และตติภูมิ เป็นค่าต่อหน่วย ($X_{st}$)

$$X_{st} = \frac{(\text{base MVA}) \times (x_{st})}{(\text{rated power 3}) \times (100)} \qquad (2.7)$$

โดยที่ rated power 3 คือ อัตรากำลังของขดลวดทุติยภูมิ (หรือตติภูมิหรือปฐมภูมิ)

$x_{st}$ คือ รีแอคแตนซ์ระหว่างขดลวดทุติยภูมิ และตติภูมิมีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์ที่อัตรากำลัง (rated power 3)

จาก (2.5), (2.6), และ (2.7) สามารถคำนวณรีแอคแตนซ์สมมูลย์ของหม้อแปลง 3 ขดลวด ในรูปของวงจรสมมูลย์แบบ Y ได้ ดังนี้

$$X_p = (1/2)(X_{ps} + X_{pt} - X_{st}) \qquad (2.8)$$

$$X_s = (1/2)(X_{ps} + X_{st} - X_{pt}) \qquad (2.9)$$

$$X_t = (1/2)(X_{st} + X_{pt} - X_{ps}) \qquad (2.10)$$

วงจรสมมูลย์แบบ Y นี้ จะทำให้จำนวนบัสในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือจุดกลางของ Y และการทำให้จำนวนบัสของระบบไฟฟ้าคงเดิม สามารถทำได้โดยแปลงวงจรสมมูลย์แบบวายให้เป็นเดลต้าดังนี้

$$X_{p-s} = \frac{X_p X_s + X_p X_t + X_s X_t}{X_t} \qquad (2.11)$$

$$X_{p-t} = \frac{X_p X_s + X_p X_t + X_s X_t}{X_s} \qquad (2.12)$$

$$X_{s-t} = \frac{X_p X_s + X_p X_t + X_s X_t}{X_p} \qquad (2.13)$$

โดยที่ Xp-s คือ รีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

Xp-t คือ รีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยระหว่างขดลวดปฐมภูมิและตติยภูมิ

Xs-t คือ รีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยระหว่างขดลวดทุติยภูมิและตติยภูมิ

รูปที่ 2.9 (ก) สัญญลักษณ์ของหม้อแปลง 3 ขดลวด

(ข) วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลง 3 ขดลวด

ค่าความต้านทานสมมูลย์ต่อหน่วยระหว่างขดลวด ของหม้อแปลง 3 ขดลวดคำนวณได้จาก

$$Rp\text{-}s = \frac{Xp\text{-}s}{X/R \text{ ratio } 1} \qquad (2.14)$$

$$Rp\text{-}t = \frac{Xp\text{-}t}{X/R \text{ ratio } 2} \qquad (2.15)$$

$$Rs\text{-}t = \frac{Xs\text{-}t}{X/R \text{ ratio } 3} \qquad (2.16)$$

โดยที่ X/R ratio 1 คือ อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

X/R ratio 2 คือ อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและตติภูมิ

X/R ratio 3 คือ อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ ระหว่างขดลวดทุติยภูมิและตติภูมิ

2.3 <u>บัสดักและเคเบิล</u> คำนวณค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (X) และค่ารีซีสแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยได้ดังนี้

$$X = \frac{\text{รีแอคแตนซ์ต่อหน่วยความยาว} \times \text{ความยาว} \times \text{เอ็มวีเอฐาน}}{\text{จำนวนวงจร} \times (\text{แรงดันฐาน})^2} \qquad (2.17)$$

$$R = \frac{\text{รีซีสแตนซ์ต่อหน่วยความยาว} \times \text{ความยาว} \times \text{เอ็มวีเอฐาน}}{\text{จำนวนวงจร} \times (\text{แรงดันฐาน})^2} \qquad (2.18)$$

2.4 <u>เครื่องกำเนิดไฟฟ้า</u> คำนวณค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (X) และค่ารีซีสแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (R) ได้ดังนี้

$$X = \frac{(\text{base MVA}) \times (\text{Xeq})}{(\text{rated power}) \times (100)} \qquad (2.19)$$

$$R = \frac{X}{(\text{X/R ratio})} \qquad (2.20)$$

โดยที่ base MVA คือ เอ็มวีเอฐาน มีหน่วยเป็นเมกกะโวลท์แอมป์

rated power คือ อัตรากำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีหน่วยเป็นเมกกะโวลท์แอมป์

X/R ratio คือ อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Xeq คือ รีแอคแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามจุดประสงค์ในการวิเคราะห์การลัดวงจรดังแสดงในตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ค่ารีแอคแตนซ์ของเครื่องจักรหมุนในการคำนวณการลัดวงจรแบบต่าง ๆ

| อุปกรณ์ | ค่ารีแอคแตนซ์ของเครื่องจักรหมุนในการคำนวณการลัดวงจร | | | |
|---|---|---|---|---|
| | เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง | | ฟิวส์และเบรกเกอร์แรงต่ำ | รีเลย์ถ่วงเวลา |
| | ไซเกิลแรก | คอนแทกแยกจากกัน | | |
| เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับเทอร์บายน์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำที่มีขดลวดอะมอทิซซู (amortisseur) และซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ | X"d | X"d | X"d | X'd |
| เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำที่ไม่มีขดลวดอะมอทิซซู | 0.75X'd | 0.75X'd | 0.75X'd | X'd |
| มอเตอร์แบบซิงโครนัส | X"d | 1.5X"d | X"d | neglect |
| อินดักชันมอเตอร์: | | | | |
| - >1000 hp at ≤1800 rpm | X"d | 1.5X"d | X"d | |
| - > 250 hp at >1800 rpm | X"d | 1.5X"d | X"d | |
| - 50-1000 hp at ≤1800 rpm | 1.2X"d | 3.0X"d | X"d | neglect |
| - 50-250 hp at >1800 rpm | 1.2X"d | 3.0X"d | X"d | |
| - <50 hp | neglect | neglect | X"d | |

2.5 <u>มอเตอร์</u> คำนวณค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (X) และค่ารีซีสแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (R) ได้ดังนี้

$$X = \frac{(\text{base MVA}) \times (\text{power factor}) \times (\text{efficiency}) \times (\text{Xeq})}{10 \times (\text{rated power})} \qquad (2.21)$$

$$R = \frac{(\quad X \quad)}{(\text{X/R rario})}$$

โดยที่ base MVA คือ เอ็มวีเอฐาน มีหน่วยเป็นเมกกะโวลท์แอมป์

rated power คือ อัตรากำลังของมอเตอร์มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์

power factor คือ เพาเวอร์แฟคเตอร์ของมอเตอร์

efficiency คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเปอร์เซนต์

Xeq คือ รีแอคแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแตกต่างกันตามจุดประสงค์ในการวิเคราะห์การลัดวงจร ดังแสดงในตารางที่ 2.1

3. <u>การรวมอิมพีแดนซ์</u>

หลังจากได้แปลงข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เป็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ต่อหน่วยของอุปกรณ์นั้น ๆ แล้ว ก็จะเป็นการรวมค่าอิมพีแดนซ์ หรือรีแอคแตนซ์ หรือรีซีสแตนซ์ ให้เป็นค่าอิมพีแดนซ์หรือรีแอคแตนซ์ หรือรีซีสแตนซ์สมมูลย์ของระบบไฟฟ้าที่จุดเกิดการลัดวงจร ตามแต่ละประเภทของการวิเคราะห์ การลัดวงจร

ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ของระบบที่จุดลัดจรที่ใช้ในการคำนวณกระแสลัดวงจร ใช้วิธีการรวมทางเวคเตอร์

ค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์และรีซีสแตนซ์สมมูลย์ ของระบบที่จุดลัดวงจรที่ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ที่จุดลัดวงจร ใช้วิธีคำนวณค่า รีแอคแตนซ์และค่ารีซีสแตนซ์แยกกัน

คนละวงจร

4. การคำนวณการลัดวงจร

ขั้นสุดท้าย คือการคำนวณกระแสลัดวงจรค่าอิมพิแดนซ์รีแอคแตนซ์ หรือรีซีสแตนซ์ที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นกับจุดประสงค์ของการวิเคราะห์การลัดวงจรซึ่งแบ่งออกเป็น 5 แบบ ค่าอิมพิแดนซ์ของแต่ละแบบจะต่างกัน เนื่องมาจากค่าอิมพิแดนซ์ของเครื่องจักรหมุน (ดังรายละเอียดการแปลงข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องจักรหมุน)

4.1 การคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรก สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง (มากกว่า 1 กิโลโวลท์) (First-cycle duties for high voltage circuit breakers) (1), (2), (3)

กระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรกนี้ใช้ในการเทียบหาค่าโมเมนตารีเรติง (Momentary ratings) หรือค่าโคลสชิงแอนด์แลทช์ชิงคาปาบิลิตี (Closing and latching capability) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แรงดันสูงตามมาตรฐาน ANSI C37.010-1979 "Application Guide for High Voltage Circuit breakers Rated on a Symmetrical Current Basis"

หลังจากดำเนินการตาม 3 ขั้นตอนข้างต้นแล้ว ก็จะได้อิมพิแดนซ์สมมูลย์ของระบบไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร กระแสลัดวงจรจะคำนวณได้จาก

$$Isc = ( E/Z ) \times 1.6 \times Ibase \qquad (2.23)$$

โดยที่ E คือ แรงดันก่อนลัดวงจรที่จุดลัดวงจร มีค่าเป็นต่อหน่วยเทียบกับแรงดันฐาน (base voltage)

Z คือ อิมพิแดนซ์สมมูลย์ของระบบที่จุดลัดวงจร

Ibase คือ กระแสไฟฟ้าฐานคำนวณจาก $\frac{\text{base MVA}}{\sqrt{3}\ (\text{base voltage})}$

กระแสลัดวงจรที่คำนวณได้นี้ จะเป็นค่ากระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์ของการลัดวงจร 3 เฟส เป็นกระแสลัดวงจรสูงสุดที่ไซเกิลแรกสามารถ นำไปเทียบหาขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง โดยเทียบได้โดยตรงกับค่าโมเมนตารีเรตติ้งหรือโคลสชิงแอนด์แลทช์ชิงคาปาบิลิตี ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง ซึ่งแสดงในหน่วยของกระแสไม่สมดุลย์อาร์เอ็มเอส [Asymmetrical rms current = $\sqrt{I_{ac(rms)}^2 + I_{dc}^2}$ , (21)] ขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เลือกจะต้องมีค่าสูงกว่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้

4.2 <u>การคำนวณกระแสลัดวงจร ในช่วงคอนแทกแยกจากกันสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง (Contact-parting (interrupting) duties for high ge circuit breakers)</u> (1), (2), (3)

กระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ ใช้ในการเทียบค่าอินเตอร์รัปติ้งคาปาบิลิตี (Interrupting capability) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูงซึ่งกำหนดด้วยค่ากระแสลัดวงจรสมดุลย์อาร์เอ็มเอส (Symmetrical rms current) ตามมาตราฐาน ANSI C37.010-1979

หลังจากดำเนินการตาม 3 ขั้นตอนข้างต้นแล้ว ก็จะได้ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย(Z) ของระบบไฟฟ้าที่จุดลัดวงจรสำหรับคำนวณกระแสลัดวงจรและค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (X) และค่ารีซีสแตนซ์สมมูลย์ต่อหน่วย (R) ของระบบไฟฟ้าที่จุดลัดวงจรสำหรับคำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์

อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบที่จุดลัดวงจรคำนวณได้จาก

$$X/R \text{ ratio} = \frac{X}{R} \qquad (2.24)$$

กระแสลัดวงจรคำนวณได้จาก

$$Isc = ( E/Z ) \times Ibase \times \text{Multiplying factor} \qquad (2.25)$$

ค่าฟอลท์เลเวล (Fault level) คำนวณได้จาก

$$\text{Fault level} = \sqrt{3} \times Isc \times (\text{base voltage}) \qquad (2.26)$$

โดยที่ E คือ แรงดันก่อนลัดวงจรที่จุดลัดวงจร มีค่าเป็นต่อหน่วยเทียบกับแรงดันฐาน

Ibase คือ กระแสไฟฟ้าฐานคำนวณจาก $\frac{\text{base MVA}}{\sqrt{3}\ (\text{base voltage})}$

Multiplying factor คือ แฟคเตอร์ตัวคูณ

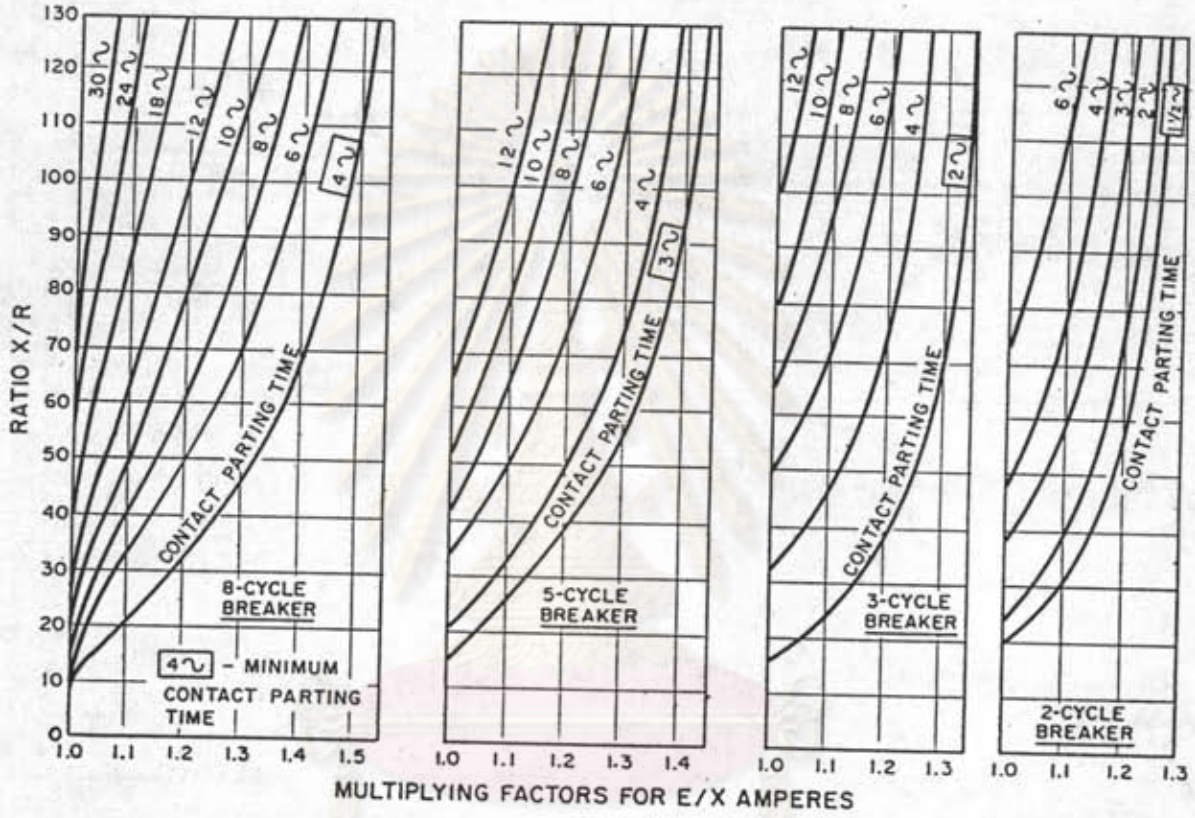
ค่าแฟคเตอร์ตัวคูณ หาได้จากกราฟในรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นกราฟแฟคเตอร์ตัวคูณสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ โดยแบ่งตามอินเตอร์รับติงทามของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Interrupting time of circuit breaker) และคอนแทกพาร์ทติงทามของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Contact-pasting time of circuit breaker)

ความแตกต่างระหว่างกราฟในรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 จะแตกต่างที่ แฟคเตอร์ตัวคูณจากกราฟรูปที่ 2.10 จะรวมผลการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง (DC component) ของกระแสลัดวงจรเพียงอย่างเดียว ส่วนแฟคเตอร์ตัวคูณจากกราฟรูปที่ 2.11 จะรวมผลของการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรงและการลดลงของส่วนประกอบกระแสสลับ (AC component) ของกระแสลัดวงจรด้วย

การเลือกใช้กราฟระหว่างรูปที่ 2.10 และ 2.11 นั้น ขึ้นกับว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจรนั้นอยู่ไกลจากจุดลัดวงจรเท่าไร ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้ คือ (3)

1. ถ้าค่ารีแอคแตนซ์ต่อหน่วย นับจากภายนอกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนถึงจุดลัดวงจร มีค่าน้อยกว่า 1.5 เท่าของลับทรานเซียนรีแอคแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเทียบที่เอ็มวีฐานเดียวกัน ให้ใช้กราฟในรูปที่ 2.11 (รวมผลการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง และส่วนประกอบกระแสสลับด้วย) ในกรณีนี้เรียกได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเป็นโลคอลซอส (Local source)

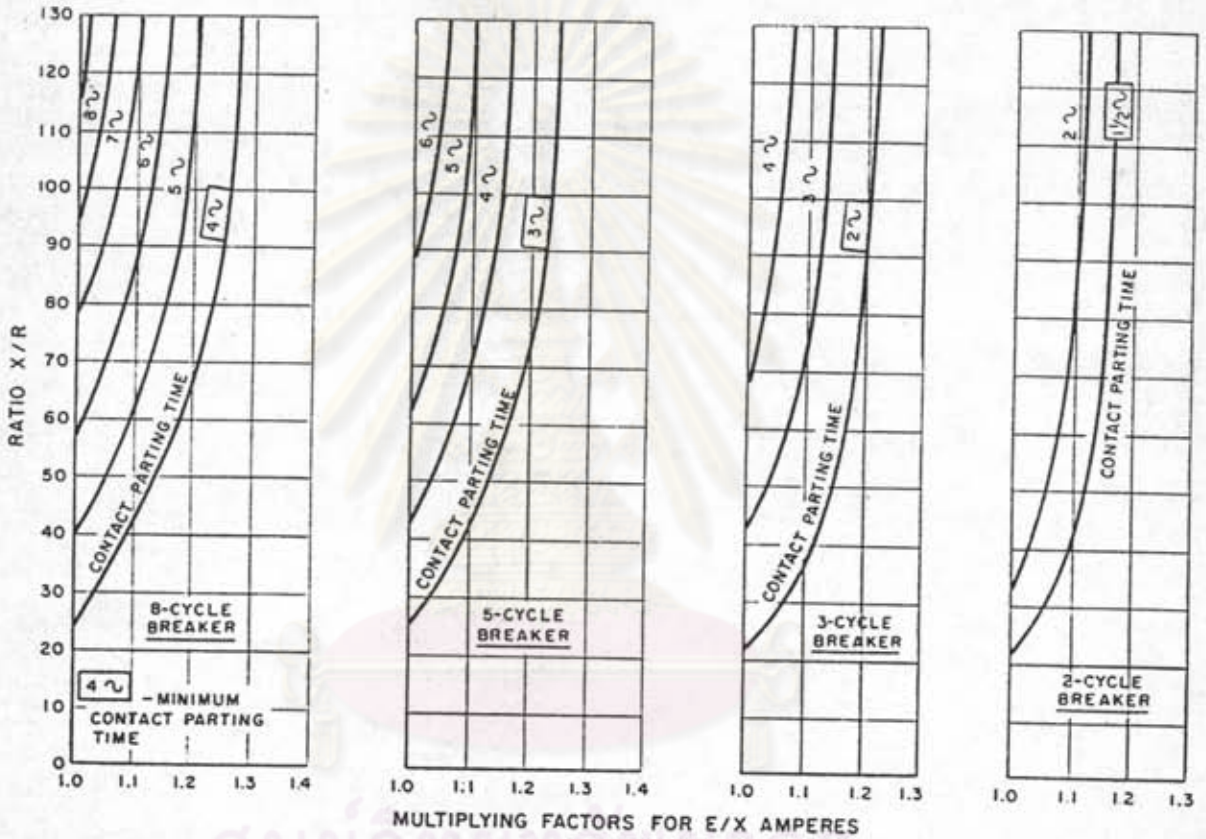
2. ถ้าค่ารีแอคแตนซ์ต่อหน่วย นับจากภายนอกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนถึงจุดลัดวงจร มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1.5 เท่าของลับทรานเซียนรีแอคแตนซ์ของ




รูปที่ 2.10 แฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งรวมผลการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงคอนแทกแยกจากกัน ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 2.11 แฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งรวมผลการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง และการลดลงของส่วนประกอบกระแสสลับ ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงคอนแทกแยกจากกันของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง

I 10295021

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเทียบที่เอ็มวีเอฐานเดียวกัน ให้ใช้กราฟในรูปที่ 2.10 (คิดเฉพาะผลการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง) ในกรณีนี้เรียกได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเป็นรีโมทซอส (Remote source)

สำหรับระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (Utility) ถือว่าเป็นรีโมทซอส ใช้กราฟรูปที่ 2.10 (คิดเฉพาะการลดลงของส่วนประกอบกระแสตรง)

ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายตัว และมีทั้งที่เป็นรีโมทซอสและโลคอลซอส ค่าแฟคเตอร์ตัวคูณจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากกราฟที่ได้จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 โดยเฉลี่ยตามอัตราส่วนของกระแสลัดวงจรที่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นโลคอลซอส และกระแสลัดวงจรที่มาจากรีโมทซอส

ตัวอย่างเช่น ต้องการหาแฟคเตอร์ตัวคูณ เพื่อคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงคอนแทกแยกจากกัน สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งมีอินเตอร์รับติงทาม 2 ไซเกิล และคอนแทกพาร์ทติงทาม 1.5 ไซเกิล สมมุติคำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ที่จุดลัดวงจรได้เท่ากับ30 ระบบไฟฟ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัว ตัวแรกเป็นโลคอลซอส และตัวที่สองเป็นรีโมทซอส

จากกราฟรูปที่ 2.10 ได้แฟคเตอร์ตัวคูณของรีโมทซอส = 1.1

จากกราฟรูปที่ 2.11 ได้แฟคเตอร์ตัวคูณของโลคอลซอส = 1.05

กระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวแรกซึ่งเป็นโลคอลซอส คำนวณได้เท่ากับ 1 ต่อหน่วย กระแสลัดวงจรจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวที่สอง ซึ่งเป็นรีโมทซอส คำนวณได้เท่ากับ 1.5 ต่อหน่วย

$$\frac{\text{กระแสลัดวงจรที่ไหลจากรีโมทซอส}}{\text{กระแสลัดวงจรที่ไหลจากรีโมทซอส + โลคอลซอส}} = \frac{1.5}{1 + 1.5}$$

$$= 0.6$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยของแฟคเตอร์ตัวคูณ} = (0.6 \times 1.1) + (0.4 \times 1.05)$$

$$= 1.08$$

กระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จากสมการ (2.25) เป็นค่าที่ใช้เทียบค่าอินเตอร์รับติงคาปาบิลิตี (Interrupting capability) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดัน

สูง ซึ่งแสดงในหน่วยของกระแสสมดุลย์อาร์เอ็มเอส (Symmetrical rms current) ตามมาตรฐาน ANSI C37.010-1979

โดยสรุปแล้ว การเลือกขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันสูง จะต้องเลือกให้เซอร์กิตเบรกเกอร์มีอินเตอร์รับติงคาปาบิลิตีสูงกว่ากระแสลัดวงจร ที่คำนวณได้จากสมการ (2.25) และมีโมเมนตารีเรติง หรือโคลสชิงแอนด์แลทช์ชิงคาปาบิลิตีสูงกว่ากระแสที่คำนวณได้จากสมการ (2.23)

4.3 <u>การคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรก สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ (First-cycle duties for low-voltage circuit breakers)</u> (1), (4)

กระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ ใช้เทียบค่าอินเตอร์รับติงคาปาบิลิตี (Interrupting capability) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำตามมาตรฐาน ANSI C37.13-1973 "Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures"

หลังจากได้ค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ของระบบที่จุดลัดวงจร (Z) สำหรับคำนวณกระแสลัดวงจร ค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ของระบบที่จุดลัดวงจร (X) และค่ารีซีสแตนซ์ของระบบที่จุดลัดวงจร (R) สำหรับคำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์แล้ว สามารถคำนวณการลัดวงจรสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำได้ดังนี้

คำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบที่จุดลัดวงจรได้จาก

$$X/R \text{ ratio} = \frac{X}{R} \qquad (2.27)$$

กระแสลัดวงจรคำนวณได้จาก

$$Isc = ( E/Z ) \times Ibase \times ( \text{multiplying factor} ) \qquad (2.28)$$

ฟอลท์เลเวล (Fault level) คำนวณได้จาก

$$\text{Fault level} = (E/Z) \times (\text{base MVA})$$

โดยที่ E = แรงดันก่อนลัดวงจรที่จุดลัดวงจร มีค่าเป็นต่อหน่วยเทียบกับแรงดันฐาน

Ibase = กระแสไฟฟ้าฐานคำนวณจาก $\dfrac{\text{base MVA}}{\sqrt{3}\ (\text{base voltage})}$

Multiplying factor คือ แฟคเตอร์ตัวคูณซึ่งสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบที่จุดลัดวงจร ดังแสดงในตาราง 2.2

ถ้าอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบที่จุดลัดวงจร มีค่าน้อยกว่า 6.6 ค่าแฟคเตอร์ตัวคูณจะมีค่าเป็น 1 และที่มาของแฟคเตอร์ตัวคูณสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

การกำหนดขนาดพิกัด ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำตามมาตราฐาน ANSI C37.13-1973 ได้กำหนดความสามารถในการตัดกระแสลัดวงจร หรืออินเตอร์รับติ้งคาปาบิลิตี ด้วยค่ากระแสลัดวงจรสมดุลย์ (Symmetrical short circuit current) และกำหนดเพิ่มเติมว่า เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องสามารถตัดกระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์ (Asymmetrical short circuit current) ที่อาจเกิดขึ้นได้จากระบบไฟฟ้าที่มีค่าอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์เท่ากับ 6.6 หรือน้อยกว่า ดังนั้นในกรณีอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 6.6 ก็อาจจะเกิดกระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์เกินกว่าที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำงานได้ และวิธีง่าย ๆ ที่จะทำได้ก็คือ เลือกค่าอินเตอร์รับติ้งคาปาบิลิตีของเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้สูงขึ้น ซึ่งก็คือที่มาของ แฟคเตอร์ตัวคูณตามตารางที่ 2.2

ค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.28) ใช้ในการเทียบขนาดพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำได้โดยตรง โดยเทียบกับ ค่าอินเตอร์รับติ้งคาปาบิลิตี หรือซอตเซอร์กิตเคอร์เรนท์เรติ้ง (Short circuit current rating) ซึ่งแสดงในหน่วยของกระแสสมดุลย์อาร์เอ็มเอส (Symmetrical rms current) ซึ่งเป็นไปตามมาตราฐาน ANSI C37.13-1973

ฟอลท์เลเวลจากสมการที่ (2.29) ใช้เป็นระดับกำลังงานลัดวงจรอ้างอิงในการคำนวณกระแสลัดวงจร ของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำอื่น ๆ ที่ต่อจากบัสนี้

ตารางที่ 2.2 แฟคเตอร์ตัวคูณสำหรับคำนวณกระแสลัดวงจร ของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันต่ำ

| อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบไฟฟ้า | แฟคเตอร์ตัวคูณสำหรับคำนวณกระแสลัดวงจร |
|---|---|
| 6.6 | 1.00 |
| 8.27 | 1.04 |
| 9.95 | 1.07 |
| 11.72 | 1.09 |
| 14.25 | 1.11 |
| 20.0 | 1.15 |

4.4 <u>การคำนวณกระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรกสำหรับฟิวส์(First-cycle duties for fuses)</u> (1), (5)

กระแสลัดวงจรที่คำนวณได้ ใช้เทียบขนาดพิกัดของฟิวส์ ตามมาตรฐาน ANSI C37.41-1969 (R1974) "Design Tests for Distributions Cutouts and Fuses Links, Secondary Fuses, Distributions Enclosed Single-pole Air Switches, Power Fuses, Fuse Disconnecting Switches, and Accessories.

หลังจากที่ได้ ค่าอิมพิแดนซ์สมมูลย์ของระบบที่จุดลัดวงจร(Z) สำหรับคำนวณกระแสลัดวงจร ค่ารีแอคแตนซ์สมมูลย์ของระบบที่จุดลัดวงจร(X)และค่ารีซีสแตนซ์ของ

ระบบที่จุดลัดวงจร(R) สำหรับคำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์แล้ว สามารถคำนวณการลัดวงจรได้ดังนี้

คำนวณอัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ของระบบที่จุดลัดวงจรได้จาก

$$X/R \text{ ratio} = \frac{X}{R} \tag{2.30}$$

กระแสลัดวงจรสมดุลย์ คำนวณได้จาก

$$Isc\ (Sym) = (E/Z) \times Ibase \tag{2.31}$$

กระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์ คำนวณได้จาก

$$Isc\ (Asym) = (E/Z) \times Ibase \times Asymmetrical\ factor \tag{2.32}$$

ฟอลท์เลเวล คำนวณได้จาก

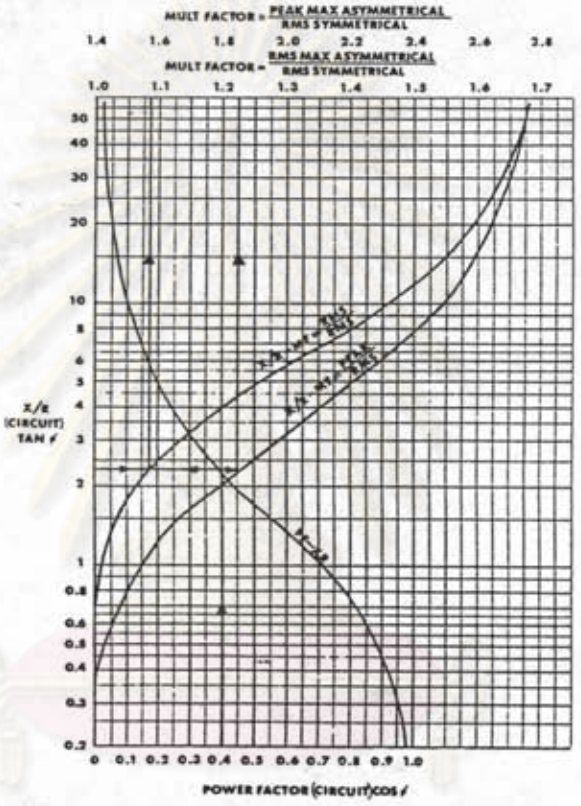
$$fault\ level = (E/Z) \times base\ MVA \tag{2.33}$$

โดยที่ E = แรงดันก่อนลัดวงจรที่จุดลัดวงจร มีค่าเป็นต่อหน่วยเทียบกับแรงดันฐาน

Ibase = กระแสไฟฟ้าฐาน คำนวณจาก $\frac{\text{base MVA}}{\sqrt{3}\ (\text{base voltage})}$

Asymmetrical factor คือ อะซิมเมตริกซ์คอลแฟคเตอร์คิดที่ครึ่งไซเกิลแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.12

การเทียบขนาดพิกัดของฟิวส์ ใช้ค่ากระแสลัดวงจรสมดุลย์และกระแสลัดวงจรไม่สมดุลย์ เทียบกับค่าอินเตอร์รับติงคาปาบิลิตี หรืออินเตอร์รับติงเคอร์เรนท์ (Interrupting current) ของฟิวส์ ซึ่งแสดงด้วยค่ากระแสสมดุลย์อาร์เอ็มเอส (Symmetrical rms current) และค่ากระแสไม่สมดุลย์อาร์เอ็มเอส (Asymmetrical




รูปที่ 2.12 อะซิมเมตริกซ์คอลแฟคเตอร์ที่ครึ่งไซเกิลแรก ณ ที่อัตราส่วนเอ็กซ์ต่ออาร์ต่าง ๆ

rms current) โดยที่ขนาดพิกัดของฟิวส์ จะต้องมีค่าสูงกว่ากระแสลัดวงจรสมดุลย์ และไม่สมดุลย์ที่คำนวณได้

4.5 <u>การคำนวณกระแสลัดวงจรสำหรับรีเลย์ถ่วงเวลา (Short circuit current for time-delayed relaying devices)</u> (1)

กระแสลัดวงจรสำหรับรีเลย์ที่ทำงานทันที (Instantaneous relays) สามารถพิจารณาได้จากกระแสลัดวงจรในช่วงไซเกิลแรก จากหัวข้อ 4.1, 4.3 หรือ 4.4 แต่กระแสลัดวงจรสำหรับรีเลย์ถ่วงเวลา จะคำนวณจากวงจรสมมูลย์ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบผลิตกำลังไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดกระแสลัดวงจรเท่านั้น มอเตอร์ทุกตัวจะไม่นำมาคำนวณ ส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสลัดวงจรจะลดลงเป็นศูนย์ หรือเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งไม่นำมาคิดในการคำนวณ ดังนั้น กระแสลัดวงจรจะเป็นกระแสลัดวงจรสมดุลย์ คำนวณได้จาก

$$Isc = ( E/Z ) \times Ibase \qquad (2.34)$$

โดยที่ E = แรงดันก่อนลัดวงจรที่จุดลัดวงจร มีค่าต่อหน่วยเทียบกับแรงดันฐาน

Z = อิมพีแดนซ์สมมูลย์ของระบบไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร

Ibase = กระแสไฟฟ้าฐานคำนวณจาก $\dfrac{\text{base MVA}}{\sqrt{3}\ (\text{base voltage})}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย