เอกสารวิชาการ

ช่างไฟฟ้ากำลัง

เล่ม ๓

(ระบบไฟฟ้ากำลังและอุปกรณ์ป้องกัน)

กรมอู่ทหารเรือ

(จัดพิมพ์เมื่อ กันยายน ๒๕๔๘)

บทที่ 1
พื้นฐานของระบบไฟฟ้า

ในการพัฒนาแหล่งของพลังงานเพื่อนำมาใช้งานนั้นจัดเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการพัฒนาความเจริญทางอุตสาหกรรม ซึ่งจะส่งผลต่อไปถึงการพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ ดังนั้นจึงต้องมีการค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อการจ่ายพลังงานให้กับเราในอนาคต แต่ก็ต้องอย่าลืมว่าในการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่งนั้นไม่ควรที่จะสร้างมลภาวะให้กับบรรยากาศที่มนุษย์อาศัยอยู่ ซึ่งมลภาวะต่าง ๆ ที่มนุษย์ได้พบเห็นอยู่ในปัจจุบัน จัดเป็นสิ่งที่ไม่สามารถยอมรับได้อีกต่อไป สำหรับพลังงานที่อยู่ในรูปแบบของไฟฟ้ากำลังนี้ ก็เป็นรูปแบบหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงพลังงานและการส่งพลังงานไปตามระบบสายส่ง ซึ่งรูปแบบไฟฟ้ากำลังนี้เป็นรูปแบบของพลังงานที่มีแต่ความสะอาดและปราศจากมลภาวะต่อมวลมนุษย์ ดังนั้นในประเทศที่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยีส่วนใหญ่แล้วจะมีการใช้ปริมาณไฟฟ้ามากตามไปด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องมีวิศวกรไฟฟ้าที่ได้รับการฝึกฝนอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ได้เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่ำที่สุดที่สามารถทำงานได้ทำงานได้นั้น ควรที่จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้:

ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 3 ส่วน ซึ่งก็คือ

1. สถานีหรือโรงจักรไฟฟ้า (Generating station)
2. สายส่ง (Transmission line)
3. ระบบกระจายไฟฟ้า (Distribution system)

สถานีหรือโรงจักรไฟฟ้าที่ทำการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะจ่ายไปให้กับลูกค้านั้น ก็เป็นหน้าที่หรือความรับผิดชอบของบริษัทผู้ผลิต สำหรับในประเทศไทยก็คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟน.) นั่นเอง ส่วนสายส่งจะเป็นตัวกลางที่เชื่อมระหว่างโรงจักรไฟฟ้าและระบบกระจายไฟฟ้า (Distribution system) และหน้าที่ของสายส่งอีกประการหนึ่ง ก็คือ เป็นตัวกลางที่เชื่อมกับระบบไฟฟ้าอื่น ๆ ที่มีอยู่ ส่วนระบบกระจายไฟฟ้า หรือ Distribution system นี้จะต่ออยู่กับโหลดผู้ใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ โดยผ่านสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ซึ่งต่อเข้ากันกับระบบสายส่งอีกทอดหนึ่ง

1.1 การเติบโตของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการที่มีการเริ่มต้นพัฒนาระบบไฟฟ้ากระแสสลับของประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี 1885 George Westinghouse ได้มีการซื้อลิขสิทธิ์ของระบบสายส่งกระแสสลับ ที่ได้พัฒนาขึ้นโดย L. Gaulard และ J.D. Gibbs of Paris สำหรับ William Stanley ซึ่งโดยการร่วมมือกับบริษัท

Westinghouse นี้ได้ทำการทดสอบตัวทรานฟอร์เมอร์ในห้องทดลองทางไฟฟ้าที่ Great Barrington มลรัฐ Massachusetts ในฤดูหนาวปี 1885 - 1886 Stanley ได้ทำการทดลองระบบการกระจายไฟฟ้ากระแสสลับหรือ AC distribution system ซึ่งจะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหลอดไฟฟ้า 150 หลอดที่ติดตั้งในเมือง ใน 1890 ได้มีการทดลองใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา จากแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าสกระแสสลับจากพลังน้ำในเมือง Willamette ไปยังเมือง Portland มลรัฐ Oregon โดยมีระยะห่างไกลถึง 13 ไมล์

ระบบสายส่งครั้งแรกนี้เป็นระบบไฟฟ้า 1 เฟส โดยที่กำลังไฟฟ้านี้ถูกนำไปใช้ในการผลิตแสงสว่าง (Lighting) แต่เพียงอย่างเดียว ส่วนมอเตอร์ที่มีอยู่ในขณะนั้นก็เป็นมอเตอร์ 1 เฟสด้วยเช่นเดียวกัน ต่อมาในวันที่ 16 เดือนพฤษภาคม ปี 1888 นั้น นาย Nikola Tesla ได้ทำการเปิดเผยสิ่งประดิษฐ์ที่เขาคิดค้นได้ ซึ่งก็คือ มอเตอร์แบบที่มี 2 เฟส (Two-phase induction motor) และตัวซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) ข้อดีของมอเตอร์หลายเฟสก็ได้ปรากฏขึ้นในทันทีทันใดเมื่อเราทำการเปรียบเทียบกับมอเตอร์ 1 เฟส สำหรับข้อดีของระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบ 2 เฟสนั้นได้ถูกแสดงต่อสาธารณชนที่เมืองชิคาโกในปี 1893 หลังจากนั้นเป็นต้นมา ระบบไฟฟ้าสายส่งกระแสสลับ 3 เฟสได้ทยอยเข้ามาทดแทนระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงตามลำดับ และในเดือนมกราคม ปี 1894 ได้มีโรงจักรไฟฟ้าที่มีเฟสอยู่ทั้งหมด 5 เฟสด้วยกัน โดยที่ระบบไฟฟ้าส่วนหนึ่งเป็นระบบไฟฟ้า 2 เฟส และระบบไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งก็จะเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งต่อมาในประเทศสหรัฐอเมริกาเองก็มีการใช้ระบบของสายส่งไฟฟ้าทั้งหมดเป็นระบบไฟฟ้าสลับ 3 เฟสเท่านั้น สำหรับค่าแรงเคลื่อนสูงสามารถทำได้โดยการใช้ทรานฟอร์เมอร์ ซึ่งหน้าที่ของทรานฟอร์เมอร์ก็คือการแปลงพลังงานที่มีระดับของแรงเคลื่อนต่ำที่ผลิตได้จากตัวเยนเนเรเตอร์ไปเป็นแรงเคลื่อนสูงที่เหมาะสมที่จะส่งเข้าไปกับระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูงเพื่อที่จะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่มากให้กับผู้ใช้โหลดต่อไป

สำหรับระบบสายส่งแบบไฟฟ้ากระแสตรง หรือ DC Transmission line นี้เกิดขึ้นได้จากการใช้วงจรเร็คติไฟย์ (Electronic rectifier) กรองกระแสไฟฟ้าสลับ 3 เฟส จากตัวเยนเนเรเตอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงสูงมาก ๆ เพื่อส่งเข้าไประบบสายส่งไฟฟ้าตรงอีกต่อหนึ่งจากที่ปลายของสายส่งไฟฟ้าตรงเราก็ใช้วงจร Inverter เพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าตรงเปลี่ยนไปเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับที่มีค่าแรงเคลื่อนสูง จากนั้นเมื่อผ่านตัวทรานฟอร์เมอร์ก็สามารถทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับสูงเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับต่ำ จากการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาทางด้านเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าระบบสายส่งเหนือหัวระบบไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ไม่สามารถใช้งานได้อย่างถูกต้องตามหลักเศรษฐศาสตร์ ถ้าหากว่าระยะทางของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงมีระยะทางที่น้อยว่า 350 ไมล์ ในรัฐแคลิฟอร์เนียร์ซึ่งมีการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังน้ำหรือเขื่อนเป็นจำนวนมากนั้นได้มีการส่งกำลังไฟฟ้านี่ จาก Pacific North-west ไปยังด้านใต้ของมลรัฐแคลิฟอร์เนียร์โดยการใช้สายส่ง

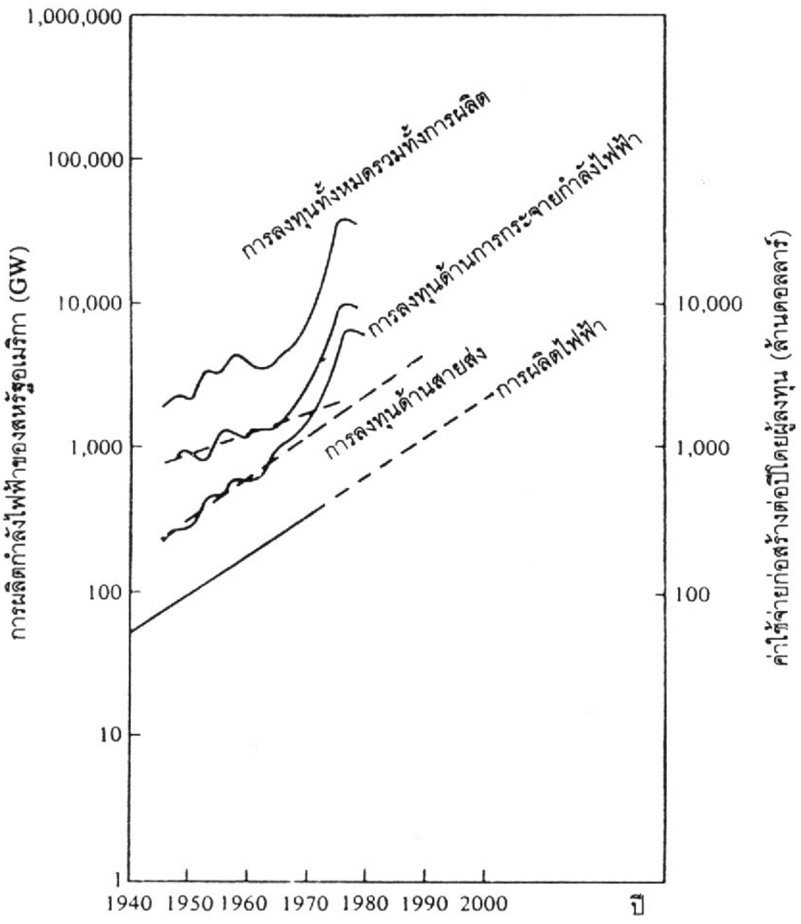
ไฟฟ้ากระแสสลับ 500 KV และก็มีการใช้สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาด 800 KV (Line to line) ด้วยเช่นกัน

ในปัจจุบันประเทศสหรัฐอเมริกามีการใช้ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่มีระดับของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ส่งเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เช่น ในปี 1890 ได้มีสายส่งไฟฟ้าระหว่าง Willamette-Portland นั้นมีระดับของค่าแรงเคลื่อนเป็น 3,300 โวลท์ ต่อมาในปี 1908 ระดับของสายส่งไฟฟ้ามีค่าแรงเคลื่อนที่ใช้เป็น 110 KV และระดับของแรงเคลื่อนของสายส่งได้เพิ่มขึ้นเป็น 150 KV, 220 KV, 244 KV ในปี 1913, 1923, 1926 ตามลำดับ ในปี 1936 ได้ใช้ระดับแรงเคลื่อนสายส่งเป็น 288 KV จากเขื่อนฮูเวอร์ยังลอสแองเจลิส (Los Angeles) ต่อมาในปี 1953 มีการใช้ระบบสายส่งที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาด 345 KV และใช้ระบบสายส่งที่มีระดับแรงเคลื่อน 500 KV เป็นครั้งแรกในปี 1965 สี่ปีต่อมาคือ ในปี 1969 ระบบสายส่งที่มีแรงเคลื่อน 865 KV ก็ถูกนำมาใช้งาน สาเหตุหนึ่งที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าของสายส่งมีค่าแรงเคลื่อนสูงเพิ่มขึ้นตามลำดับ เพราะเหตุผลที่ว่าสามารถส่งกำลังไฟฟ้า (MW) ได้สูงเพิ่มมากขึ้นจากจุด ๆ หนึ่งไปยังอีกจุด ๆ หนึ่ง

สำหรับลักษณะของการต่อโหลดผู้ใช้ไฟฟ้านั้น ตั้งแต่ปี 1918 ระบบไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่จะถูกนำไปใช้งานเฉพาะหน่วยผลิต เพราะว่าหน่วยผลิตกำลังไฟฟ้าเหล่านี้เป็นระบบที่ถูกจ่ายให้กับโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพียงกลุ่ม ๆ เดียว และต่อมากลุ่มของผู้ใช้ไฟฟ้านี้ได้ถูกขยายออกไปเรื่อย ๆ ครอบคลุมไปทั่วทั้งประเทศ จากความต้องการกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น รวมทั้งความต้องการเรื่องความเชื่อถือได้ (Reliability) เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีการต่อระบบไฟฟ้าเข้ากันกับระบบสายส่งของเพื่อนบ้านข้างเคียง (Interconnection) การต่อระบบไฟฟ้าเข้ากันกับระบบไฟฟ้าข้างเคียงหรือ Interconnection นี้มีข้อดีทางเศรษฐศาสตร์มากเพราะว่าจะมีเครื่องจักรหรือเยนเนเรเตอร์ 2 - 3 ตัว ถูกใช้เพื่อเป็นกำลังผลิตไฟฟ้าสำรองเพื่อใช้ในขณะที่มีโหลดสูงสุด (Peak load reserse capacity) และขณะเดียวกันก็ยังมีตัวเยนเนเรเตอร์อีก 2 - 3 ตัว ที่ทำงานหรือวิ่งโดยไม่มีโหลดต่ออยู่ เยนเนเรเตอร์นี้สามารถใช้งานได้เมื่อมีการต่อโหลดเกิดขึ้นในทันทีทันใดในการต่อระบบไฟฟ้าเข้าด้วยกันนี้ก็มีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ สามารถลดจำนวนตัวเยนเนเรเตอร์ที่จะต้องใช้งานลง เพราะถ้าหากว่าบริษัทผลิตไฟฟ้าบริษัทหนึ่งไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้พอเพียงก็ยังสามารถที่จะดึงกำลังไฟฟ้าเพิ่มเติมมาจากบริษัทเพื่อนบ้านได้ ข้อดีอีกประการหนึ่ง ก็คือ บริษัทผู้ผลิตไฟฟ้าสามารถซื้อกำลังไฟฟ้าจากบริษัทอื่นได้ ถ้าหากว่าราคาผลิตกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยของบริษัท เพื่อนบ้านมีราคาถูกกว่าราคาผลิตกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยที่ผลิตขึ้นจากตัวเยนเนเรเตอร์ของบริษัทผู้ผลิตเอง

แต่อย่างไรก็ตามการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าของสายส่ง หรือ Interconnection ของระบบไฟฟ้านั้นก็จะนำปัญหาใหม่ ๆ เพิ่มเข้ามาด้วย แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นสามารถที่จะแก้ไขได้อย่างน่าพอใจ

ปัญหาดังกล่าว เช่น เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบ ก็จะเกิดมีกระแสลัดวงจรเป็นจำนวนมากไหลมาจากแหล่งไฟฟ้าข้างเคียง และด้วยเหตุนี้ตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์จึงต้องมีขนาดใหญ่อย่างเพียงพอที่จะตัดกระแสลัดวงจรขนาดใหญ่นี่ได้ นอกจากนี้ขณะที่เกิดการลัดวงจรขึ้นก็จะส่งการ



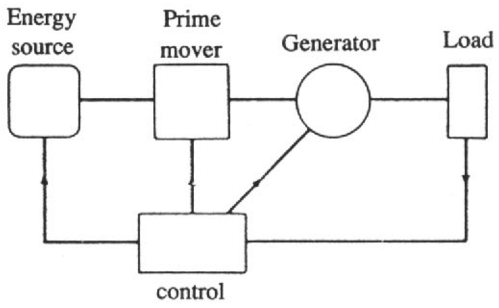
รูปที่ 1.1 แสดงค่ากราฟความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าที่มีอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา

ในการวางแผนการทำงานเกี่ยวกับระบบไฟฟ้า ตลอดจนการปรับปรุงและการขยายเครือข่ายของระบบไฟฟ้านั้น จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับสภาวะของโหลด การคำนวณการลัดวงจรชนิดต่าง ๆ การออกแบบติดตั้งระบบป้องกันอันตรายอันเนื่องมาจากฟ้าผ่า (Lighting) ค่าทรานเซียนในขณะที่มีการสับสวิตซ์ (Switching surges) และการต่อในขณะที่มีการลัดวงจรอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพ (Stability) ของระบบไฟฟ้าอีกด้วยและปัญหาที่สำคัญมากอีกประการหนึ่งก็คือ การทำให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งนั่นก็หมายความว่า

ทำอย่างไรจึงจะทำให้โรงจักรไฟฟ้าที่มีอยู่ทั้งหมดในระบบและหน่วยผลิตไฟฟ้า (Unit) หลาย ๆ หน่วยมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดนั่นเอง

1.2 พื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลัง

ก่อนอื่นเราต้องทำการศึกษาถึงระบบไฟฟ้าพื้นฐานทั่ว ๆ ไปเสียก่อนระบบไฟฟ้ากำลังใด ๆ นั้นอย่างน้อยที่สุดจะต้องประกอบขึ้นด้วยแหล่งพลังงาน (Energy source) แหล่งชุดขับกำลัง (Prime mover) ตัวเยนเนเรเตอร์ผลิตไฟฟ้า (Electrical generator) และโหลด (Load) ซึ่งแต่ละระบบของชุดต่าง ๆ นั้น จะถูกต่อเข้ากันกับชุดควบคุม (Control system) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับแหล่งพลังงานปกตินั้นจะเป็นถ่านหิน แก๊ส น้ำมัน หรือเชื้อเพลิงที่ใช้กับโรงไฟฟ้าปรมาณู หรืออาจจะเป็นแหล่งน้ำที่มีพลังงานศักย์อยู่สูงกว่าสถานีผลิตไฟฟ้า เช่น เขื่อนพลังน้ำ สำหรับแหล่งชุดขับกำลัง (Prime mover) นั้น บางครั้งก็เป็นเทอร์ไบน์ชนิดหนึ่งหรือเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้ภายในตัวเยนเนเรเตอร์โดยปกติจะเป็นตัวเยนเนเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งภายในของตัวเยนเนเรเตอร์จะประกอบด้วยตัวนำซึ่งจะวางทำมุมกันอยู่ 120° และตัวนำนี้จะถูกเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรโรเตอร์ให้มีขนาดของแรงเคลื่อนเท่า ๆ กันทุก ๆ เฟส สำหรับระบบควบคุม (Control system) นั้นอย่างน้อยต้องประกอบขึ้นด้วยชุดควบคุมความเร็ว (Speed governor) สำหรับควบคุมชุดขับกำลัง (Prime mover) เพื่อที่จะให้มีความเร็วคงที่ซึ่งจะส่งผลทำให้ความถี่ที่ผลิตออกมาจากตัวเยนเนเรเตอร์นั้นคงที่ไปด้วย ส่วนในวงจรควบคุมสยามแม่เหล็กของโรเตอร์ (Magnetic field current regulator) นั้นจะทำให้ค่าแรงเคลื่อนที่ผลิตออกมาจากตัวเยนเนเรเตอร์คงที่อยู่ตลอดเวลา และส่วนของตัวควบคุมการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel flow regulator) นั้นจะเป็นตัวปรับอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไหลเข้าเตาเผาให้มีค่าของกำลังไฟฟ้าขาเข้าสมดุลหรือเหมาะสมกันกับการเปลี่ยนแปลงสภาวะโหลดอยู่ตลอดเวลาซึ่งตัวโหลดนี้ก็คือ ผู้ใช้ต่าง ๆ ที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบด้วยโหลดแสงสว่าง (Light) มอเตอร์ (Moter) ฮีทเตอร์

(Heater) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic equipment) ซึ่งโดยปกติโหลดทั่ว ๆ ไปนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

จากรูปที่ 1.3 (ก) แสดงถึงระบบไฟฟ้าอย่างง่าย ๆ ที่ประกอบขึ้นด้วยตัวเยนเนเรเตอร์ ตัวสวิตซ์ตัดต่อ (Disconnection switch) ซึ่งใช้ในการซ่อมบำรุงและในการป้องกัน และชุดโหลด สำหรับรูปวงจรที่เขียนนี้จะถูกเขียน 1 เส้น แทนที่จะต้องเขียนเป็น 3 เส้นตามที่เป็นจริงในระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส สำหรับระบบไฟฟ้าที่ถูกเขียนโดย 1 เส้นนี้ เราเรียกกันว่า “One line diagram” หรือ ไดอะแกรมเส้นเดียว

จากรูปที่ 1.3 (ข) แสดงถึงระบบไฟฟ้าที่ขยายโหลดที่ต่ออยู่ออกไปเรื่อย ๆ โดยมีโหลดที่ต่ออยู่ในระยะทางต่าง ๆ กัน การสูญเสียเนื่องจากค่า R ที่มีอยู่ในสายส่งนี้ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสที่ไหลในสายส่งยกกำลังสอง ลักษณะของการต่อโหลดเพิ่มขึ้นในทิศทางต่าง ๆ กันโดยการเพิ่มสายส่งต่อไปอีกนั้น จะทำให้ได้ระบบกระจายไฟฟ้าที่เรียกว่า “Radial distribution system” ซึ่งลักษณะของการต่อแบบ Radial นี้ก็เหมือนกันกับกิ่งของต้นไม้ ซึ่งกระจายออกไปจากตัวเยนเนเรเตอร์นั่นเอง

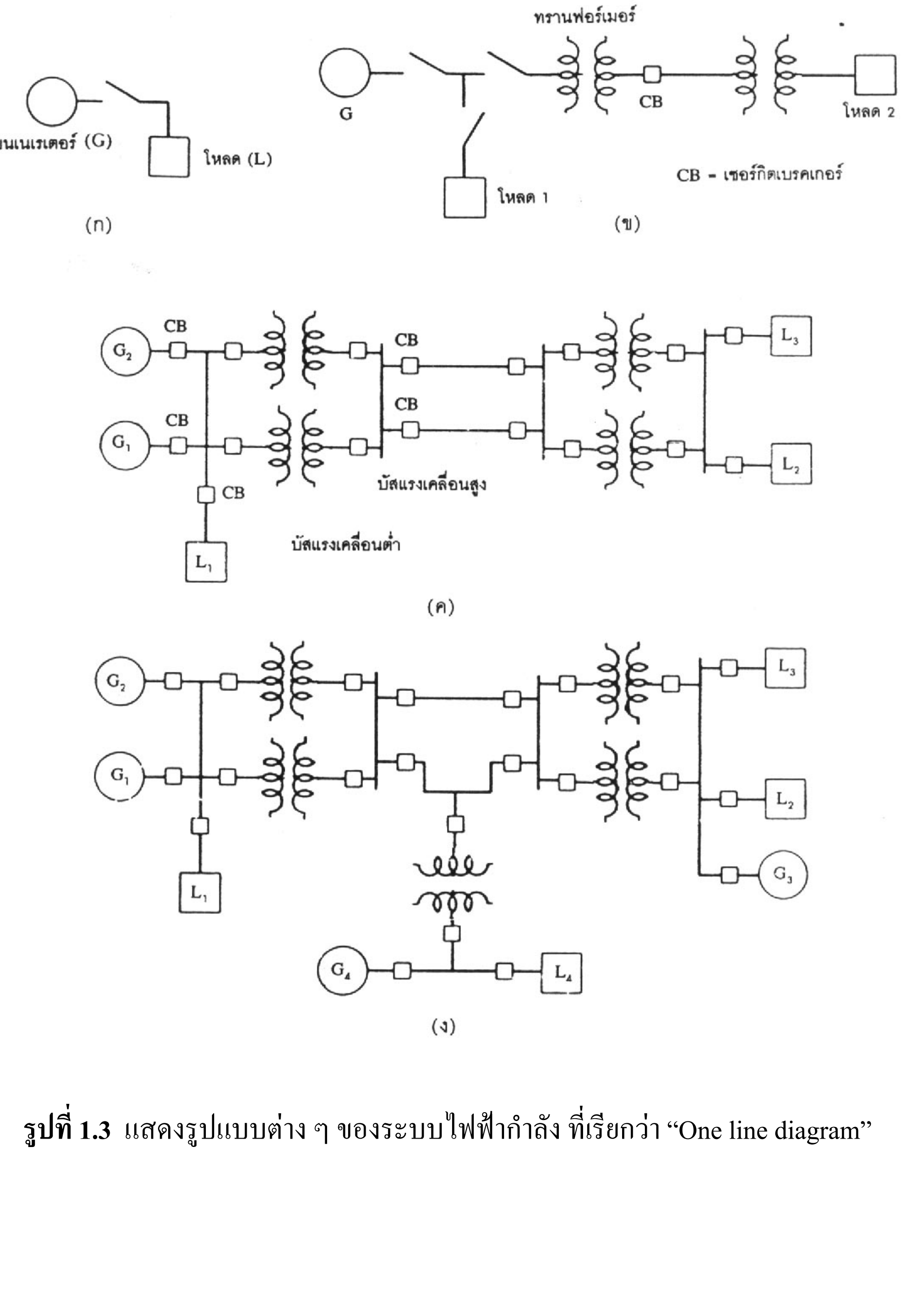
จากรูป 1.3 (ค) การต่อตัวเยนเนเรเตอร์และตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์ให้มีลักษณะเป็นวงจรที่เรียกกันว่า “Loop system” นั้น จะทำให้มีความเชื่อถือไว้ใจต่อการทำงานของระบบไฟฟ้า (Reliability) ได้สูง และมีความยืดหยุ่น (Flexibility) ในการซ่อมบำรุงได้ดีมากวงจรหนึ่ง

จากรูป 1.3 (ง) ต่อมาจากการเพิ่มโหลดในวงจรเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้จำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มตัวเยนเนเรเตอร์เพื่อผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามจุดต่าง ๆ ของวงจร จากการเพิ่มวงจรมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้วงจรนี้มีชื่อเรียกอีกแบบหนึ่งว่า “Network system” ซึ่งก็หมายความว่า โหลดแต่ละตัวนั้นจะมีวงจรที่ป้อนกำลังไฟฟ้าให้มากกว่า 2 วงจร ซึ่งจากการที่โหลดและตัวเยนเนเรเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากนั้น ก็จะส่งผลทำให้วงจรควบคุมมีความยากลำบากขึ้น ซึ่งก็หมายความว่า รายละเอียดทางเทคนิคต่าง ๆ ณ จุดนั้น ๆ จะต้องถูกถ่ายทอดไปยังจุดหรือสถานที่อื่น ๆ เพื่อให้ทราบสถานการณ์ทางเทคนิคซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการใช้ระบบการสื่อสารที่ทำงานควบคู่กันไปกับระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ตัวเยนเนเรเตอร์แต่ละตัวทำงานซิงโครนัสซึ่งกันและกันในระบบไฟฟ้านั้น ๆ

1.3 การส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายส่งและการกระจายไปยังโหลด (Delivery of the product-transmission and distribution systems)

การที่หน่วยผลิตผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นนั้น ระบบของการส่งกำลังไฟฟ้าก็จำเป็นที่จะต้องเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งถ้าพูดกันในภาษาของวิศวกรไฟฟ้ากำลังแล้ว จะกล่าวได้อีกแบบหนึ่งว่า ในการส่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้น จะต้องประกอบด้วยระบบไฟฟ้า 2 ชนิด ทำงานร่วมกันซึ่งก็คือระบบสายส่ง (Transmission system) และระบบกระจายกำลังไฟฟ้า (Distribution system) ซึ่งการ

แบ่งขอบเขตที่แน่นอนระหว่างระบบทั้ง 2 ระบบนี้ จะไม่มีการแบ่งเส้นขอบเขตกันอย่างแน่นอนและชัดเจนแต่ความหมายของคำว่าระบบสายส่งหรือ Transmission system นั้น จะหมายความถึงสายส่งไฟฟ้าที่มีความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าได้เป็นจำนวนมาก โดยที่สายส่งไฟฟ้าที่มีความยาวค่อนข้างมากนี้ ที่ปลายสายข้างหนึ่งจะถูกต่อเข้ากันกับตัวเยนเนเรอเตอร์โดยผ่านตัวกลาง คือ ทรานฟอร์เมอร์แรงเคลื่อนสูงและปลายสายอีกด้านหนึ่งของสายส่งจะถูกต่อเข้ากันกับศูนย์กลางของโหลดหรือ Load center ส่วนความหมายของระบบกระจายไฟฟ้า (Distribution system) นั้นก็คือ ระบบไฟฟ้าที่แยกตัวหรือแยกสาขาออกไปจากตัวระบบสายส่งและโดยปกติทั่วไปแล้วนั้น ระบบกระจายไฟฟ้าจะมีระดับของกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าและมีระยะความยาวของสายสั้นกว่าสายส่งแรงเคลื่อนสูงมาก



รูปที่ 1.3 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่เรียกว่า “One line diagram”

ในการส่งค่ากำลังไฟฟ้านั้น จะมีผลเกี่ยวข้องกันกับราคา (Cost) และความเชื่อถือไว้วางใจได้ (System reliability) ของระบบไฟฟ้า มีเหตุผลจำนวนมากที่เราต้องการจะทำให้ตัวเยนเนเรเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ เช่น โรงจักรไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิต 1,500 MW เป็นต้น เหตุที่ต้องทำให้โรงจักรไฟฟ้ามีขนาด MW ใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ นั้น ก็เพราะว่า เมื่อโรงจักรไฟฟ้ามี MW สูงขึ้น ก็จะทำให้ราคาค่าไฟฟ้าต่อกิโลวัตต์ที่ผลิตออกมานั้นมีราคาต่ำลงนั่นเอง เมื่อโรงจักรไฟฟ้ามีการผลิตกำลังไฟฟ้าที่มี MW สูงมาก ๆ ก็จำเป็นที่จะต้องมีการสร้างระบบสายส่งที่มีความสามารถในการที่จะถ่ายทอดกำลังไฟฟ้าที่มีราคาต่อกิโลวัตต์สูง ๆ นี้ไปยังผู้ใช้ (Load) ให้ได้ ระบบของสายส่ง (Line interconnection) ที่ต่อถึงกันนี้จะต้องทำให้ตัวเยนเนเรเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ๆ เหล่านี้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปให้กับโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Economic dispatch) สำหรับในกรณีที่มีอุบัติเหตุทางไฟฟ้าเกิดขึ้นกับโรงจักรไฟฟ้าโรงใดโรงหนึ่ง อันเป็นเหตุทำให้โรงจักรไฟฟ้าต้องปิดตัวเองลง ระบบสายส่งนี้จำเป็นจะต้องมีความสามารถที่จะจัดหา หรือส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าอื่น ๆ ได้เช่นเดียวกัน

สำหรับค่าแรงเคลื่อนที่ผลิตออกมาจากตัวเยนเนเรเตอร์ส่วนใหญ่แล้ว จะมีช่วงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตั้งแต่ 13.8 kV จนถึง 24 kV ส่วนถ้าเป็นตัวเยนเนเรเตอร์ที่ทันสมัย ค่าแรงเคลื่อนจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 18 kV จนถึง 24 kV เกี่ยวกับค่าขนาดของแรงเคลื่อนที่ขั้วของตัวเยนเ นเรเตอร์นี้ยังไม่มีมาตรฐานที่กำหนดไว้อย่างแน่นอน

ตารางที่ 1.1 แสดงระดับขนาดของแรงเคลื่อนที่ถูกนำมาใช้ในระบบสายส่ง ตามช่วงปีต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา

YEAR	VOLTAGE (KILOVOLTS)
1890	3.3
1900	40
1910	120
1920	150
1930	244
1940	288
1950	288
1960	345
1980	865

แรงเคลื่อนที่ตัวเยนเนอเรเตอร์ผลิตขึ้นมานั้น จะถูกยกระดับค่าแรงเคลื่อนขึ้น เพื่อใช้ต่อไปในการส่งเข้าไปในระบบสายส่งซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 115 - 865 kV ตามมาตรฐานแล้วค่าแรงเคลื่อน (High Voltage หรือ HV) นั้นจะมีค่าเป็น 115, 138 และ 230 kV ส่วนค่าแรงเคลื่อนสูงพิเศษนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 345, 380, 500 และ 865 kV และในการวิจัยค้นคว้าต่อไปก็จะมีการนำเอาระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงพิเศษ (Ultra High Voltage หรือ UHV) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 1,000 จนถึง 1,500 kV มาใช้งานในระบบสายส่ง ดังตารางที่ 1.1 และ 1.2

ตารางที่ 1.2 U.S. standard power operating voltages

VOLTAGE CLASS	NOMINAL LINE VOLTAGE
Low (LV)	120/240 V (Single Phase)
	208 V
	240 V
	480 V
	600 V
Medium (MV)	2.40 kV
	4.16 kV
	4.80 kV
	6.90 kV
	12.48 kV
	12.48 kV
	13.20 kV
	13.80 kV
	23.00 kV
	24.94 kV
	34.50 kV
	46.00 kV
	69.00 kV

VOLTAGE CLASS	NOMINAL LINE VOLTAGE
High (HV)	115 kV
	138 kV
	161 kV
	230 kV
Extra high (EHV)	345 kV
	500 kV
	865 kV
Ultra high (UHV)	1,000 kV
	1,500 kV

LV = Low Voltage

MV = Medium Voltage

HV = High Voltage

EHV = Extra High Voltage

UHV = Ultra High Voltage

ข้อดีของการส่งพลังงานไฟฟ้าโดยการใช้แรงเคลื่อนสูงนี้ก็คือ สามารถที่จะส่งกำลังไฟฟ้า MVA ไปได้เป็นจำนวนมากจากจุด ๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั่นเอง ถ้าคิดคำนวณแบบหยาบ ๆ แล้วจะพบว่าความสามารถ (Capability) ของสายส่งที่จะส่งกำลังไฟฟ้าไปได้มากหรือน้อยนั้นจะแปรผันโดยตรงกับค่าขนาดของแรงเคลื่อนที่ใช้อยู่ในสายส่งยกกำลังสองนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการส่งต่อกำลังไฟฟ้าไปได้มากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับค่าจำกัดทางอุณหภูมิของสายส่ง (Thermal limits of conductor) ค่าแรงเคลื่อนที่ตกอยู่ในสายส่งที่ยินยอมให้ส่งผ่านได้ และค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า (Reliability) ตลอดจนความมีเสถียรภาพของเครื่องจักรต่าง ๆ ที่ต่อรวมกันอยู่ในระบบนั้น ๆ ที่เราเรียกกันว่า Stability ค่าแฟคเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับระยะทางความยาวของสายส่งนั่นเอง

1.4 การส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างสายส่ง

ในการส่งกำลังไฟฟ้าจากจุด ๆ หนึ่งไปยังอีกจุด ๆ หนึ่งให้ได้มากหรือน้อย ค่าทางเทคนิคของสายส่ง (Transmission line parameter) นั้น ๆ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถของการส่งค่ากำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งนั้น ๆ เป็นสำคัญและค่าอีกค่าหนึ่งก็คือ ค่าขนาดของแรงเคลื่อนที่ผลิตขึ้นจากตัวเยนเนเรเตอร์ ณ จุดผลิตไฟฟ้านั้น ๆ ตัวเยนเนเรเตอร์เหล่านี้เราเรียกกันว่า "Synchronous machine" ซึ่งความสามารถของเครื่องจักรชนิดนี้ จะมีความสามารถในการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าออกจากตัวมันเองและสามารถจะรับค่ากำลังไฟฟ้าเข้าตัวมันเองได้เช่นเดียวกัน การรับหรือจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเคลื่อน (Magnitude) และค่ามุม (Phase angle) ของสายส่งหรือค่าแรงเคลื่อนที่ขั้ว (Terminal voltage) ของตัวเยนเนเรเตอร์ โดยที่ตัวเยนเนเรเตอร์ทั้ง 2 ตัวที่อยู่กับระบบสายส่งนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการซิงโครนัส (Synchronous) ซึ่งกันและกัน และค่ามุม (Phase angle) ระหว่างค่าแรงเคลื่อนทั้งสองนั้นจำเป็นที่จะต้องมีค่ามุมไม่ใหญ่มากจนเกินไป

จากรูปที่ 1.4 จะแสดงคุณสมบัติอย่างง่าย ๆ ซึ่งจะประกอบด้วยตัวเยนเนเรเตอร์ที่มีค่าแรงเคลื่อนอุดมคติ (Ideal voltage generator) ต่ออยู่ที่ปลายข้างหนึ่งของสายส่ง 1 เฟส ส่วนค่าพารามิเตอร์ของสายส่งให้แทนด้วยค่ารีแอกแตนซ์ (X_1) แต่เพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 1.4 นี้จะแสดงให้เห็นถึงการส่งค่ากำลังไฟฟ้า (P) จากขั้วที่ 1 ไปยังขั้วที่ 2 อย่างง่าย ๆ ค่ากำลังไฟฟ้าที่จะส่งผ่านสายส่งไปได้นี้ สามารถคำนวณได้จากสูตรที่ว่า :

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin \phi}{X_L} \qquad \text{......(1.1)}$$

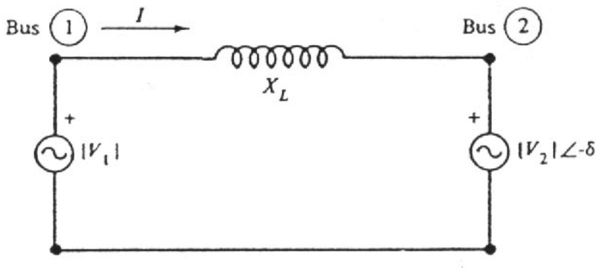
ในที่นี้ ค่า $\varnothing$ ก็คือ ค่ามุมความต่างเฟสระหว่างค่าแรงเคลื่อนทั้ง 2 ขั้ว (ขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2) [องศา]

X_L ก็คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง (Line reactance) [Ω]

P ก็คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายส่งได้ [MW]

V_1 ก็คือ ค่าแรงเคลื่อนทางต้นสายส่ง [V]

V_2 ก็คือ ค่าแรงเคลื่อนทางปลายสายส่ง [V]



รูปที่ 1.4 แสดงวงจรอย่างง่าย ๆ ของเครื่องจักร 2 ตัว ที่ต่อถึงกันโดยผ่านสายส่งที่มีค่ารีแอกแตนซ์ (X_l) ค่ากำลังไฟฟ้าที่จะส่งจากขั้วที่ 1 ไปยังขั้วที่ 2 ได้ก็คือ $P = \frac{V_1 V_2 \sin \varnothing}{X_L}$

จากสูตรข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่า ค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งหรือ X_L นี้ จะเป็นตัวการสำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการส่งค่ากำลังไฟฟ้าไปตามสายส่งจากจุด ๆ หนึ่งไปยังอีกจุด ๆ หนึ่งได้ ดังนั้นค่ารีแอกแตนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่นี้ควรที่จะทำให้มีค่าต่ำหรือมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ส่วนค่ามุมความต่างเฟส ($\varnothing$) นี้ควรที่จะมีค่าน้อยกว่ามุม 90 องศา เนื่องจากเหตุผลของความเสถียรภาพ (Stability) ของระบบไฟฟ้านั้น ๆ เป็นสำคัญ

1.5 การคำนวณการลัดวงจร

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อใด ค่ากระแสลัดวงจรนี้จะมีผลเข้าไปรบกวนต่อการไหลของกระแสปกติ การเกิดความผิดพร่อง (Fault) ของสายส่งขนาด 115 kV หรือระดับของแรงเคลื่อนที่สูงกว่านี้ ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นจากฟ้าผ่า ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิด Flashover บนลูกถ้วยฉนวน (Insulator) ขึ้น ค่าแรงเคลื่อนสูงที่เกิดจากฟ้าผ่าที่เกิดระหว่างสายตัวนำและโครงสร้างเสาสายส่งที่ต่อกับดินนั้นจะก่อให้เกิดการแตกตัวของประจุไฟฟ้าในอากาศ (Ionization) ทำให้เกิดเส้นทางเดินลัดวงจรต่อไปยังดิน สำหรับการเกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าโดยลำของฟ้าผ่า (Lightning stroke) ที่เกิดบริเวณข้าง ๆ สายตัวนำจะทำให้เกิดเส้นทางเดินไอออนระหว่างตัวนำและ

พื้นดินอีกครั้งหนึ่ง ผลลัพธ์ก็คือ เกิดมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำระหว่างสายตัวนำกับดินขึ้น ซึ่งก็จะเป็นเหตุที่จะทำให้เกิดการไหลของกระแสจำนวนมากจากสายตัวนำไปยังพื้นดิน และผ่านจากดินเข้าไปยังจุดนิวทรัล (Neutral) ที่ต่อลงดินของทรานฟอร์เมอร์ หรือเยนเนเรเตอร์ ซึ่งการไหลของกระแสทั้งหมดก็จะไหลได้ครบวงจร สำหรับการเกิดความผิดพลาดแบบ Line to Line ที่ไม่เกิดการลัดวงจรลงดินนั้นจะเกิดขึ้นได้ค่อนข้างน้อย ในการที่ตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์ทำการเปิดวงจรเพื่อทำการกันหรือตัดส่วนของสายส่งออกจากระบบไฟฟ้าที่ดีอยู่ ก็จะส่งผลถึงการตัดการไาหลของกระแสที่ก่อให้เกิดเส้นทางเดินไอออน (Ionized path) และเมื่อกระแสลัดวงจรถูกตัดออกไปก็จะเกิดการ Deionization ขึ้นแทนที่ ส่งผลทำให้ระหว่างสายส่งตัวนำและพื้นดินมีค่าอิมพีแดนซ์สูงขึ้นแทน ซึ่งกระแสลัดวงจรลงดินก็จะไม่สามารถไหลได้อีกต่อไป ระยะเวลาของการ Deionization นี้จะใช้ระยะเวลานาน 20 ไซเคิล หรือ 20 ms. X 20 = 400 ms. ซึ่งหลังจากระยะเวลานี้ไปตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์ก็สามารถต่อวงจร (Reclosed) หรือปิดลงอีกครั้งหนึ่ง โดยไม่เกิดมีการอาร์คกลับคืนเกิดขึ้นมาได้ จากประสบการณ์ของการทำงานกับสายส่งพบว่า ในการใช้ Ultra-high speed reclosing breakers สามารถที่จะทำงานได้ทันทีหลังจากการเกิดความผิดพร่องขึ้น แต่ถ้าหากว่าเทื่อใดเกิดมีความผิดพร่องถาวร (Permanent fault) ขึ้น เช่น การที่สายส่งเกิดขาดและพลาดลงดิน หรือโครงสร้างของเสาสายส่งเกิดเสียหายถาวรขึ้น หรือ Lighting arrester เกิดการเสียหายขึ้น ความผิดพร่องถาวรนี้เราไม่สามารถขจัดมันออกไปได้โดยการเปิด (Opening) หรือ ปิด (Reclosing) ตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์ได้อีกต่อไป จากประสบการณ์การทำงานกับระบบสายส่งไฟฟ้าปรากฏว่า การเกิดจุดผิดพร่อง (Fault) สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ 2 กลุ่มคือ

Single line to ground fault จะเกิดมีขึ้นประมาณ 80 - 80 % ของ Fault ทั้งหมด

Three phase fault จะเกิดมีขึ้นประมาณ 5 % ของ Fault ทั้งหมด

ลักษณะของการลัดวงจรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดินนั้นจะเป็นการลัดวงจรแบบ Unsymmetrical fault ซึ่งก็จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่ไม่เท่ากัน หรือไม่มีการสมดุลของกระแสในแต่ละเฟส การคำนวณหาจุดผิดพร่องนั้น กระแสลัดวงจรเหล่านี้ตะมีค่าขนาดต่าง ๆ กันตามลักษณะของการเกิดความผิดพร่องชนิดต่าง ๆ และยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า รายละเอียดที่ได้จากการคำนวณหาความผิดพร่องนั้นจะถูกนำมาใช้ในการตั้งค่าที่รีเลย์ซึ่งจะนำไปควบคุมตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์ต่อไปอีกทอดหนึ่ง

เมื่อเกิดความผิดพร่องแบบไม่สมดุล หรือ Unsymmetrical fault เกิดขึ้น วิธีการคำนวณหากระแสลัดวงจรนั้นสามารถคำนวณได้โดยการใช้วิธีการที่เรียกกันว่า “Symmetrical components” ซึ่งวิธีการคำนวณนี้ก็ง่ายเหมือนกันกับการคำนวณการลัดวงจรแบบสามเฟสนั่นเอง

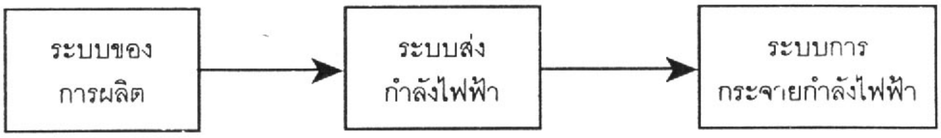
1.6 การป้องกันระบบไฟฟ้า

การเกิดความผิดพร่อง หรือ Fault ในวงจรสายส่งไฟฟ้านั้นอาจจะนำอันตรายอย่างใหญ่หลวงมาให้กับระบบไฟฟ้าได้ การเรียนรู้เกี่ยวกับระบบการป้องกันไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นจะเป็นการพัฒนาอุปกรณ์การป้องกันชนิดต่าง ๆ และวิธีการออกแบบระบบป้องกันซึ่งจะส่งผลถึงการปรับปรุงและป้องกันอันตรายต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นกับระบบสายส่ง และอุปกรณ์ไฟฟ้าตลอดจนการตัดแหล่งผลิตไฟฟ้าเมื่อเกิดมีการลัดวงจรขึ้น

ตัวอย่างเช่น ปัญหาของการเกิดทรานเซียนขึ้นในสายส่ง ตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นวิธีการใช้ Surge arrester มาเป็นอุปกรณ์ป้องกันให้กับตัวทรานฟอร์เมอร์ที่บัสของโรงจักรไฟฟ้า หรือสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเพื่อป้องกันค่าแรงเคลื่อนสูง (High voltage surge) อันเนื่องมาจากฟ้าผ่า (Lightning) หรืออันเกิดขึ้นมาจากการตัดต่อวงจร (Switching) โดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากว่าความผิดพร่องนั้นเกิดขึ้นจากการ Surge โดยปกติจะมีระยะเวลาที่เกิดสั้นมากเพียง 2-3 ไซเคิล แต่ถ้าหากว่าในสายส่งเกิดความผิดพลาดถาวรเกิดขึ้น ก็จำเป็นที่ตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์จะต้องตัดสายส่งที่เสียนั้นออกไปจากระบบไฟฟ้าที่ยังคงดีอยู่ การทำงานของตัวเซอร์กิตเบรคเกอร์นั้นจะถูกควบคุมโดยรีเลย์ที่วัดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นอีกทอดหนึ่ง ดังที่จะอธิบายในบทต่อไป

1.7 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง ไม่ว่าจะมีระบบใหญ่หรือระบบเล็กเพียงใด จะถูกแบ่งย่อยออกเป็น 3 ระบบย่อยที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แสดงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

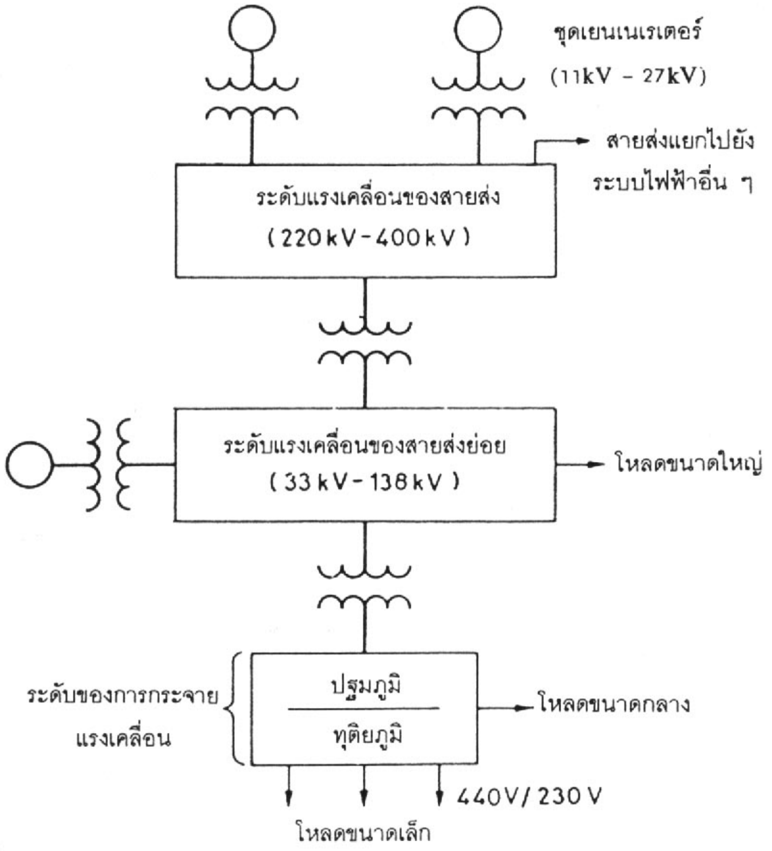
(ก) ระบบของการผลิตกำลังไฟฟ้าหรือ Generating station หมายถึง โรงจักรไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่อย่างมากมายหลายรูปแบบและมีอยู่หลายลักษณะในปัจจุบัน เช่น โรงจักรพลังน้ำ (Hydro power

plant) โรงจักรไอน้ำ (Steam power plant) โรงจักรแบบกังหันแก๊ส (Gas turbine power plant) ตลอดจนโรงจักรไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear power plant) โรงจักรแบบใช้ถ่านหิน (Coal power plant) การเลือกว่าจะใช้โรงจักรไฟฟ้าประเภทใดนั้น ก็จะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่าง ๆ หลาย ๆ ชนิด เช่น มีเขื่อนที่สามารถเก็บน้ำได้ปริมาณมากพอเพียงหรือไม่ สถานที่ใกล้กับถ่านหินหรือไม่ หรือในประเทศนั้น ๆ มีแหล่งเชื้อเพลิงชนิดใดมากที่สุด ราคาต้นทุนเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ และก็จำเป็นที่ต้องเปรียบเทียบกับโรงจักรไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ รวมทั้งสภาวะแวดล้อม (Environment) ในรูปแบบต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

(ข) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าหรือ Transmission line โดยทั่วไปแล้ว ตัวเยนเนเรเตอร์ในโรงจักรไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะทำการผลิตแรงเคลื่อนขนาด 11 ถึง 28 kV และค่าแรงเคลื่อนนี้จะทำการยกระดับแรงเคลื่อนในช่วงระหว่างตั้งแต่ 66 จนถึง 400 kV (หรือมากกว่า) ซึ่งความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission capability) ของสายส่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของแรงเคลื่อนยกกำลังสอง ซึ่งในการวิจัยก็จะพยายามยกระดับของแรงเคลื่อนขึ้นเรื่อย ๆ เช่น 865 kV และจะยกระดับของแรงเคลื่อนขึ้นไปจนถึง 1,200 kV ในอนาคต เพื่อใช้เมื่อระยะทางระหว่างหน่วยผลิต (Generating station) และโหลดผู้ใช้ไฟฟ้า (Load) ที่มีระยะทางไกลมากกว่า 600 กม. เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในการลงทุนเพื่อสร้างระบบสายส่งแล้ว มักจะนำเอาระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง (DC transmission) หรือที่เรียกกันว่า HVDC มาใช้งานโดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงจะมีระดับจนถึง 400 kV หรือมีค่าสูงมากกว่านี้ ระบบสายส่งนี้ถ้าส่งไประหว่างเมืองต่อเมืองจะเป็นระบบสายส่งที่เหนือพื้นดิน หรือ Overhead transmission line ส่วนสายส่งที่ส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างโหลดผู้ใช้ขนาดใหญ่ในเมืองจะใช้สายส่งที่ฝังอยู่ใต้พื้นดิน หรือ Underground cables

(ค) ระบบการกระจายกำลังไฟฟ้า หรือ ระบบจำหน่าย (Distribution system) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าที่ส่งมาจากหน่วยผลิต (Generating station) ผ่านระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission line) เพื่อจะทำการกระจายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดผู้ใช้กำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ และขนาดเล็กต่อไป ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบนี้ก็คือ สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย หรือ Substation ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ที่บริเวณรอบนอกของเมืองนั้น ๆ

ลักษณะทั่วไปของโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงได้ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 แสดงโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง

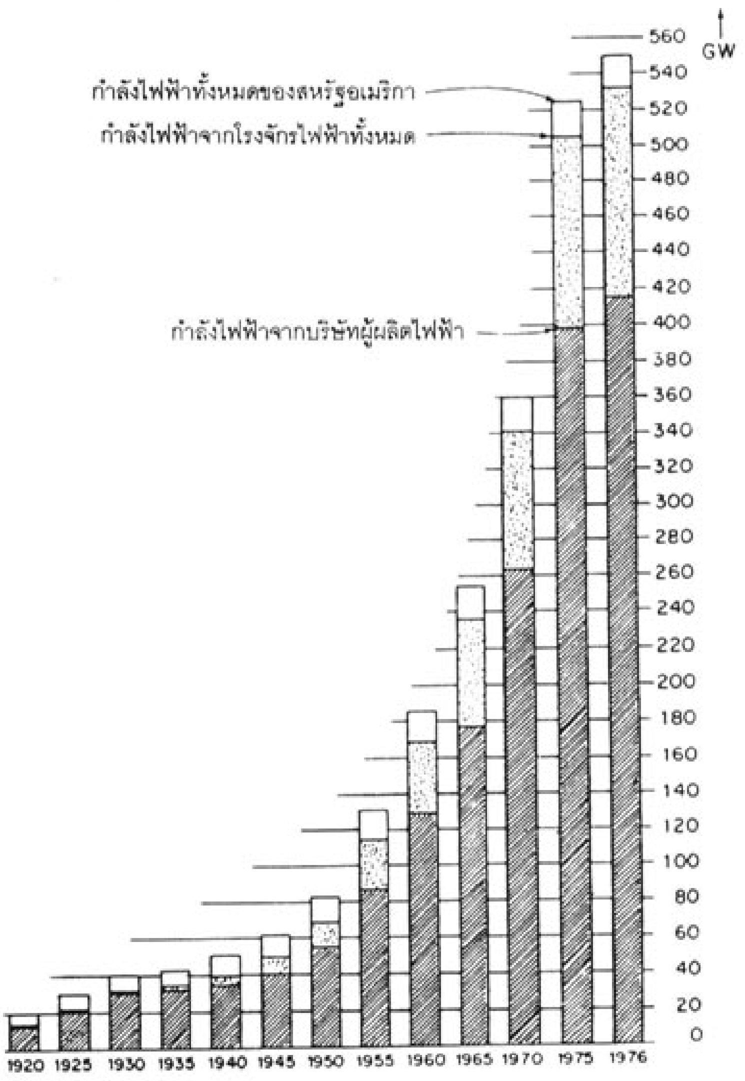
บทที่ 2

การผลิตไฟฟ้าและระบบไฟฟ้ากำลัง

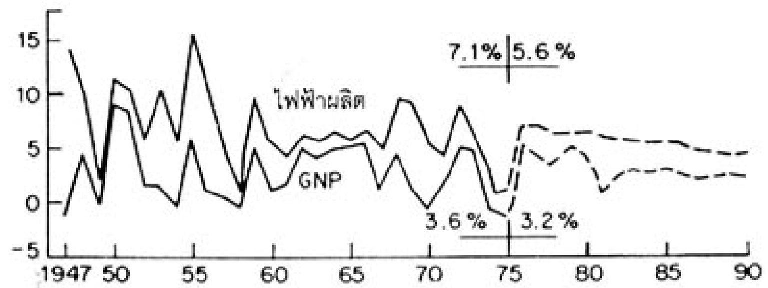
2.1 บทนำ

ในประเทศใหญ่ที่มีการใช้กำลังไฟฟ้ากันมาก ก็จะเป็นการแสดงถึงความเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจได้อีกวิธีหนึ่งด้วย ตัวอย่างเช่น การผลิตกำลังไฟฟ้าของสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงถึงการผลิตกำลังไฟฟ้าในแต่ละปี และจากรูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ GNP (Gross Notional Product) กับค่าขนาดของกำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศ

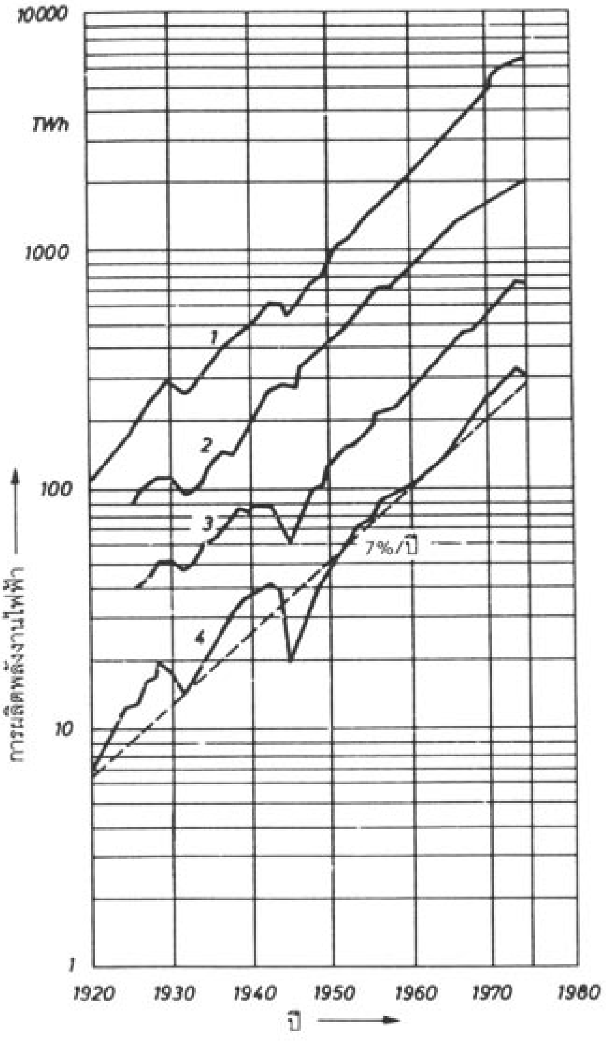
สำหรับอัตราการเติบโตของความต้องการใช้ฟ้าในโลกและใน U.S.A นั้น จะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 2.3 ในระหว่างปี 1980 ได้มีเหตุการณ์ที่สำคัญเกี่ยวกับน้ำมันเกิดขึ้น นั่นคือ การเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันในตลาดโลก ซึ่งส่งผลทำให้ความต้องการไฟฟ้าลดน้อยลงและเศรษฐกิจเกิดการถดถอยขึ้น ซึ่งสาเหตุของราคาน้ำมันแพงก็ส่งผลทำให้มนุษย์ได้มีการค้นคว้าและหาชนิดของเชื้อเพลิงอื่น ๆ มาทดแทนน้ำมัน ตัวอย่างเช่น การนำเอาถ่านหินมาใช้และพลังงานนิวเคลียร์มาใช้งาน นอกจากนี้แล้วก็ยังมีการหาพลังงานจากแหล่งอื่น ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell), พลังงานจากมหาสมุทร พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geo-thermal) และก็จะมีการพยายามหาแหล่งพลังงานชนิดอื่น เช่น พลังงานจากการ Fusion และ MHD (Magneto-Hydrodynamic Generation) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงกำลังการผลิตไฟฟ้าแต่ละปี ตั้งแต่ปี 1920 จนถึงปี 1986



รูปที่ 2.2 แสดงการเพิ่มขึ้นของการผลิตไฟฟ้าและ GNP (Gross National Product) ของสหรัฐอเมริกา

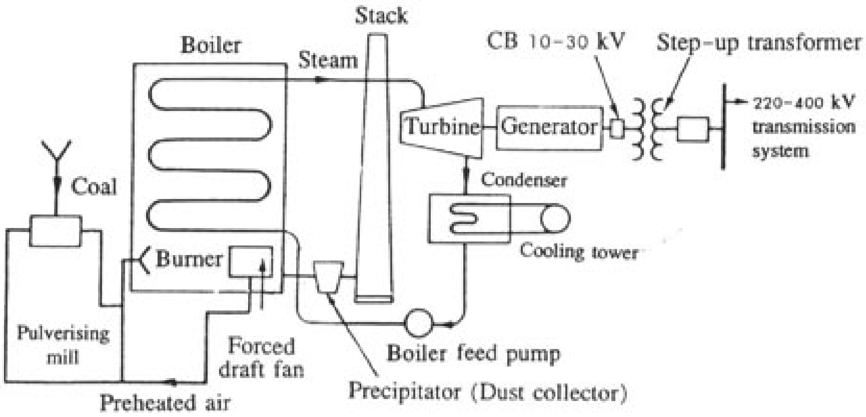


รูปที่ 2.3 แสดงการเติบโตของการผลิตไฟฟ้าของโลก

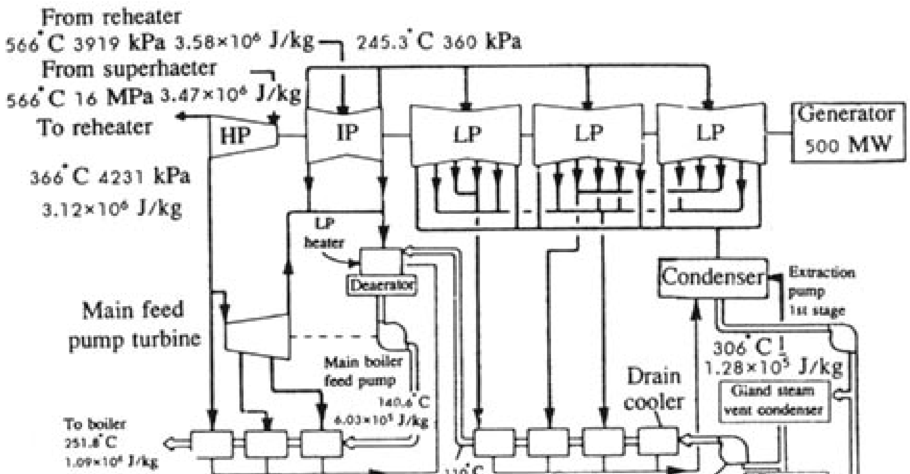
2.2 การเปลี่ยนพลังงานจากไอน้ำ

จากการเผาถ่านหินหรือเผาน้ำมันในหม้อต้มไอน้ำ จะส่งผลทำให้เกิดไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงและมีความดันที่สูงมาก ซึ่งไอน้ำนี้ก็จะไหลผ่านชุดเทอร์ไบน์ (Steam turbine) แต่ทว่าน้ำมันจะมีข้อดีทางด้านเศรษฐศาสตร์มากกว่าถ่านหิน เพราะเหตุที่ว่าน้ำมันเป็นของเหลว สามารถดูดหรือปั๊มผ่านท่อน้ำมันไปยังหม้อต้มไอน้ำ (Boilet) ได้โดยตรง เพื่อนำไอน้ำนี้ไปทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ต่อไป แต่ทว่าในปัจจุบันแหล่งเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันมากอีกชนิดหนึ่งแทนน้ำมันและถ่านหิน ก็คือ การใช้พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear fission) ซึ่งก็จะเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญมากในอนาคตอีกแหล่งหนึ่ง ดังนั้นโดยทั่วไปในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันจะมีหลักกากรโดยการใช้ไอน้ำไหลผ่านชุดกังหันเทอร์ไบน์ให้มากที่สุด

สำหรับสถานีกำเนิดไอน้ำซึ่งนำไปใช้งานนี้ เป็นลักษณะการทำงานแบบที่เรียกว่า Rankine cycle ซึ่งหลักการทำงานนี้จะประกอบขึ้นด้วย Superheating, Feed – water heating และ Steam reheating เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านขบวนการความร้อนให้สูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำได้โดยให้ไอน้ำทำงานด้วยความ



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของโรงจักรไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเผา



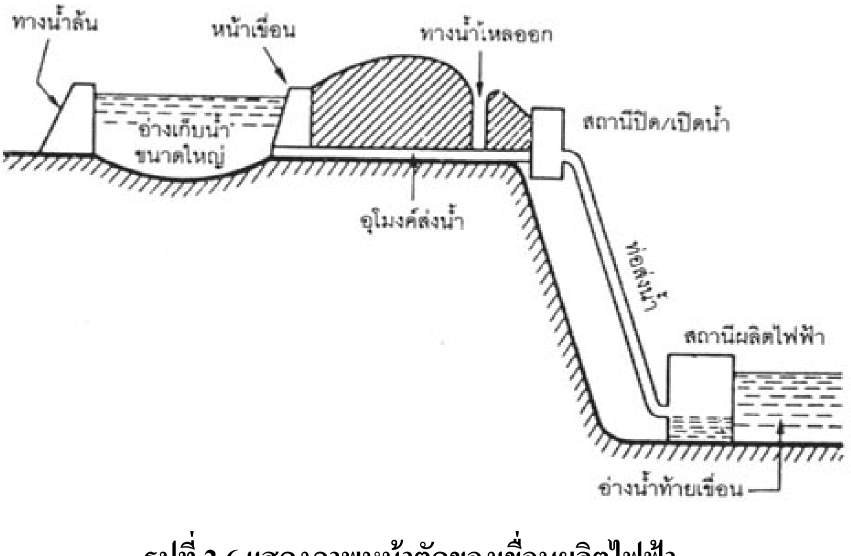
รูปที่ 2.5 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโรงจักรไอน้ำ สำหรับ Turbo-generator ขนาด 500 MW

ดันและอุณหภูมิที่สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ และอีกประการหนึ่งคือโรงจักรไฟฟ้าตลอดจนชุดทำงานต่าง ๆ เช่น ชุดกังหันไอน้ำ (เทอร์ไบน์) และตัวเยนเนเรเตอร์โดยมีแนวโน้มให้มีขนาดใหญ่ เพื่อลดต้นทุน (Capital cost) ในการผลิตกำลังไฟฟ้าลง

สำหรับเทอร์โบน์ไอน้ำขนาดตั้งแต่ 100 MW และสูงกว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้นได้อีกซึ่งก็มีวิธีการทำงานโดยการทำให้ไอน้ำร้อนขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (Reheating the steam) โดยใช้ตัวทำความร้อนจากภายนอก (External heater) ไอน้ำที่ถูกทำให้ร้อนขึ้นนี้ก็จะไหลผ่านชุดเทอร์ไบน์อีกครึ้งหนึ่งทางด้านชุดเทอร์ไบน์ชุดสุดท้าย ดังในรูป 2.4 และ 2.5 แสดงถึงไดอะแกรมการไหลของพลังงานสำหรับประสิทธิภาพทางอุณหภูมินั้นในช่วงเวลา 2 – 3 ปี ที่ผ่านมามีประสิทธิภาพของการทำงานได้สูงเพิ่มขึ้นประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

2.3 การผลิตกำลังไฟฟ้าโดยการใช้น้ำ

สำหรับการผลิตกำลังไฟฟ้าโดยการใช้น้ำนี้ก็เป็นวิธีการที่เก่าที่สุด โดยการใช้พลังงานน้ำมาเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในสถานีผลิตกำลังไฟฟ้าโดยการใช้น้ำ ซึงการใช้น้ำนี้จะไม่มีค่าต้นทุน (Cost) ใด ๆ แต่ทว่าการสร้างเขื่อนจะมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้นทุนทางด้านงานวิศวกรรมโยธา แต่ในปัจจุบันราคาต้นทุนต่อกิโลวัตต์ของโรงจักรพลังน้ำ (Hydroelectric station) ก็จะมีราคาที่สามารถเปรียบเทียบได้กับโรงจักรพลังไอน้ำ (Steam station) นอกจากนี้แล้วสภาวะทางด้านภูมิศาสตร์ที่จะทำเขื่อนก็หาได้ยาก สำหรับการทำเขื่อนในประเทศที่พัฒนาแล้วค่อนข้างหาทำเลสร้างเขื่อนทำได้ยาก โดยส่วนใหญ่แล้วนั้นทำเลที่ตั้งที่จะสร้างเขื่อนนั้นมักอยู่ในประเทศ ที่ด้อยพัฒนา



รูปที่ 2.6 แสดงภาพหน้าตัดของเขื่อนผลิตไฟฟ้า

สิ่งที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของขนาดของการผลิตกำลังไฟฟ้า ก็จะขึ้นอยู่กับระดับค่าความสูงระหว่างหัวเขื่อน (ระดับน้ำ) และท้ายเขื่อน (ตำแหน่งที่ตั้งชุดผลิตกำลังไฟฟ้า) เป็นสำคัญ สำหรับน้ำที่ไหลผ่านนี้จะมีพลังงานจลน์อยู่ ซึ่งจะตกกระแทกใบพัดของเทอร์ไบน์ให้หมุนไป โดยทั่วไปแล้วเทอร์ไบน์จะมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

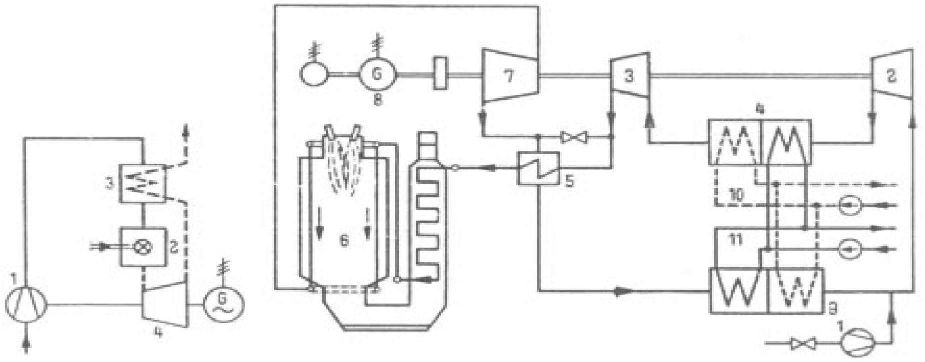
(ก) แบบ Pelton ซึ่งจะใช้กับระดับความสูงระดับ 184 – 1,840 เมตร

(ข) แบบ Francis จะใช้กับระดับความสูงของระดับน้ำตั้งแต่ 38 – 490 เมตร

(ค) แบบ Kaplan จะใช้กับระดับความสูงของระดับน้ำ จนถึง 61 เมตร ซึ่งเหมาะกับการใช้ตามแม่น้ำหรือสถานีเก็บกักน้ำ

2.4 แก๊สเทอร์ไบน์ (Gas turbines)

จากการใช้แก๊สเทอร์ไบน์ให้เป็นตัวต้นกำลังขับ (Prime mover) นี้จะมีข้อดีที่เหนือกว่าโรงจักรไฟฟ้าแบบไอน้ำ (Steam plant) ถึงแม้ว่าในการทำงานปกตินั้น จะมีการทำงานที่มีค่าเศรษฐศาสตร์ที่ต่ำ ข้อดีของโรงจักรชนิดนี้จะอยู่ตรงที่สามารถที่จะสตาร์ทได้รวดเร็วและจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบไฟฟ้าใหญ่ได้รวดเร็ว เพราะฉะนั้นแก๊สเทอร์ไบน์จะถูกนำมาใช้เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak load) แต่เพียงอย่างเดียว โดยในปัจจุบันโรงจักรไฟฟ้าแบบแก๊สเทอร์ไบน์จะมีขนาดสูงสุดประมาณ 100 MW สำหรับหน้าที่ของเครื่องจักรก็จะทำหน้าที่เป็น Synchronous compensator ที่จะรักษาระดับของแรงเคลื่อนในระบบไฟฟ้าใหญ่ให้มีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลา แต่เนื่องจากเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ก็จะทำการเดินเครื่องหรือสตาร์ทแก๊สเทอร์ไบน์จากสภาพไม่เดินเครื่อง (Cold) ไปยังสภาพทำงานปกติก็จะกินเวลาเพียง 2 นาที ซึ่งเร็วมากกว่าโรงจักรไฟฟ้าแบบไอน้ำ



รูปที่ 2.8

(ก) แสดงหลักการทำงานของแก๊สเทอร์ไบน์แบบเพลาเดียวระบบเปิด (Open System) ที่มีการถ่ายเทความร้อนภายใน

1 = เครื่องอัดอากาศ

2 = ห้องเผาไหม้

3 = ตัวถ่ายเทความร้อน

4 = เทอร์ไบน์

รูปที่ 2.8 (ข) แสดงหลักการทำงานของแก๊สเทอร์ไบน์ระบบปิด (Closed System)

1 = เครื่องอัดอากาศแบบสกรู

2 = เครื่องอัดอากาศแรงดันต่ำ

3 = เครื่ององอัดอากาศแรงดันสูง

4 = ชุดระบายความร้อนกลาง

5 = ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

6 = ชุดทำความร้อน

8 = เทอร์ไบน์

8 = เยนเนเรเตอร์

9 = ชุดทำความเย็น

10 = น้ำเย็น

11 = น้ำร้อน

ชนิดของแก๊สเทอร์ไบน์

จากรูป 2.8 (ก) แก๊สเทอร์ไบน์ที่ทำงานด้วยระบบเปิดหรือ Open gas turbine นี้ ลมหรืออากาศจะถูกดูดเข้ามาโดยเครื่องอัดอากาศที่ต่ออยู่บนแกนเพลาเดียวกันกับเทอร์ไบน์ อากาศนี้จะถูกอัดเข้าไปยังห้องเผาไหม้เพื่อทำการผสมกับเชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน แก๊ส เพื่อทำการสันดาปเผาไหม้ต่อไป ซึ่งทำให้เกิดแก๊สเผาไหม้ ซึ่งจากการผสมอากาศเข้าไปในขั้วตอนทำงานที่ 2 (2) นี้ อุณหภูมิของแก๊สที่ร้อนมากนี้จะถูกทำให้เย็นลงจนมีค่าอุณหภูมิสูงพอเหมาะ และไหลเข้าไปในเทอร์ไบน์ (4) แก๊สร้อนที่ไหลออกจากเทอร์ไบน์นี้จะมีอุณหภูมิราว 400 $^{\circ}$C และจะไหลผ่านปล่อยแก๊สเสียไปอีกทอดหนึ่ง ซึ่งอากาศร้อนก่อนที่จะถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศนี้ ก็สามารถนำไปใช้งานอีกครั้งหนึ่งโดยผ่านเข้าชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (3) เพื่อทำให้อากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (2) นี้ มีอุณหภูมิสูงอย่างเหมาะสม ก่อนที่อากาศนี้จะถูกนำไปสันดาปเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ (2) อีกครั้งหนึ่ง สำหรับประสิทธิภาพของแก๊สเทอร์ไบน์ชนิดนี้จะมีประมาณ 22% ถึง 30% และในปัจจุบันเราก็ทำแก๊สเทอร์ไบน์ ให้มีลักษณะเหมือนกับตัวเทอร์ไบน์ขับเครื่องบินไอพ่น กล่าวคือแทนที่จะแยกชุดอัดกาศ (1) และห้องเผาไหม้ (2) ออกจากกัน กับนำชุดอัดอากาศ (1) และห้องเผาไหม้ (2) มารวมไว้ด้วยกันเหมือนเทอร์ไบน์ขับเครื่องบินไอพ่นนั่นเอง ซึ่งก็จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้น

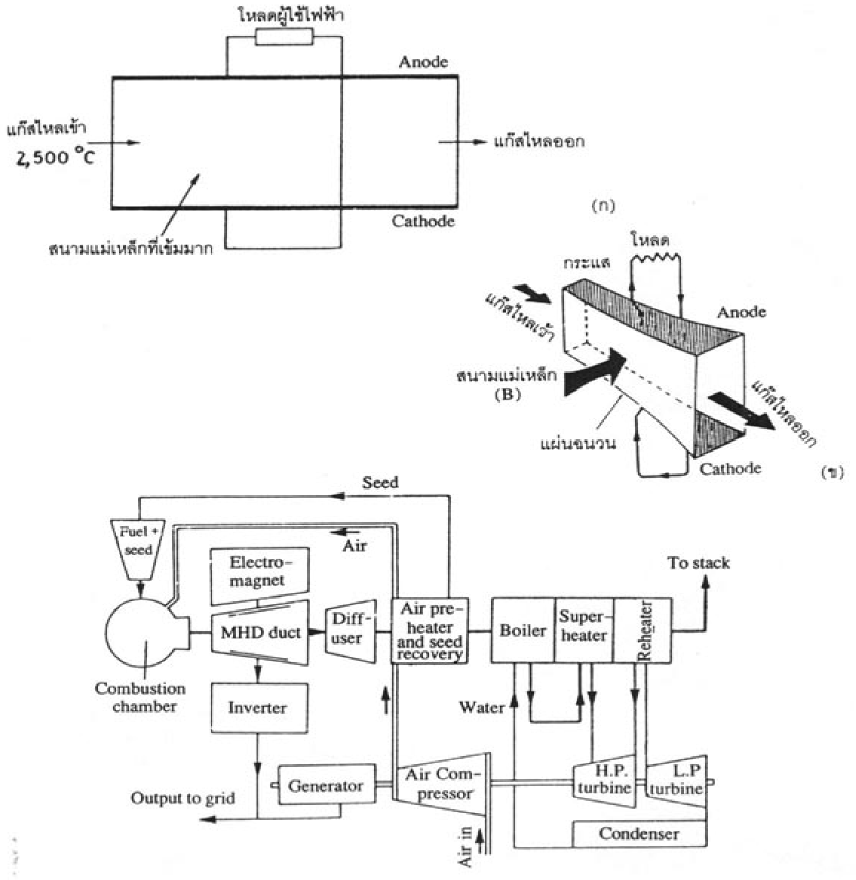
จากรูปที่ 2.8 (ข) แสดงภาพวงจรการทำงานของแก๊สเทอร์ไบน์แบบวงจรปิด (Closed Process) หรือ Closed gas turbine ลักษณะการทำงานกล่าวคืออากาศจะถูกวิ่งอยู่ภายในระบบตลอดเวลาและก่อนที่จะเข้าไปยังเทอร์ไบน์ (8) จะถูกเผาไหม้ในห้องเผาไหม้อากาศ (6) ก่อน

โรงจักรไฟฟ้าแบบแก๊สเทอร์ไบน์ในปัจจุบันจะมีการสร้างจนมีค่ากำลังไฟฟ้าสูง จนถึง 100 MW ระบบแก๊สเทอร์ไบน์แบบเปิดนี้จะมีความเหมาะสมมากเพราะว่ามีราคาต้นทุนจำเพาะในการผลิตไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เมื่อดูในตารางที่ 2.1 (ข) พบว่าจะมีระยะเวลานานในการเดินเครื่องประมาณ 10 นาที และเนื่องจากโรงจักรผลิตไฟฟ้าแบบแก๊สเทอร์ไบน์มีประสิทธิภาพที่ต่ำจึงเหมาะจะทำเป็นโรงจักรผลิตไฟฟ้าเมื่อตอนโหลดสูงสุด หรือช่วง Peak load หรือเป็นโรงจักรไฟฟ้าสำรองไว้เท่านั้น เนื่องจากระบบการทำงานของโรงจักรชนิดนี้ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้น้ำระบายความร้อน แก๊สเทอร์ไบน์จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในสถานที่ ๆ ไม่มีน้ำอยู่และจากการที่ได้นำเอาแก๊สมาเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ ซึ่งจัดได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ที่ดีที่สุดสำหรับโรงจักรไฟฟ้าแบบแก๊สเทอร์ไบน์ระบบเปิด เพราะเนื่องจากว่าจะไม่มีเขม่าควันออกมาทางปล่องควันหรือมีแต่น้อยมาก

สำหรับโรงจักรไฟฟ้าแบบแก๊สเทอร์ไบน์ระบบปิดนี้จะมีความเหมาะสมกับทางด้านเศรษฐศาสตร์มาก เพราะนอกจากจะให้ทำหน้าที่ผลิตกระแสได้แล้วก็ยังสามารถให้เป็นแหล่งผลิตน้ำร้อนสำหรับที่อยู่อาศัยในฤดูหนาวได้อีกด้วย ซึ่งเมื่อคิดคำนวณถึงประสิทธิภาพรวมก็จะสูงขึ้นมาก

2.5 Magneto - Hydrodynamic (MHD) Generation

ไม่ว่าการใช้เชื้อเพลิงจะเป็นการใช้ถ่านหิน น้ำมัน หรือพลังงานนิวเคลียร์ หลักการก็คือ การนำเอาไอน้ำไปหมุนที่เทอร์ไบน์อีกทอดหนึ่งและวิธีการของ MHD นี้ จะเป็นวิธีการของการผลิตไฟฟ้าโดยปราศจากตัวขับ (Prime mover) หรือตัวเยนเนเรเตอร์ วิธีการของ Magneto - Hydrodynamic ทำได้โดยการใช้แก๊สที่ 2,500 °C ซึ่งก็จะผ่านห้องเผา (Chamber) ที่ซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มมาก ซึ่งจะถูกสร้างโดยการใช้รูปที่ 2.19 (ก) และ (ข) ถ้าหากว่าแก๊สนี้มีความร้อนเพียงพอ แก๊สนี้ก็จะมีการนำไฟฟ้า (อาจมีการใส่โปตัสเซียม (Potassium) เข้าไป เพื่อเพิ่มความนำของแก๊ส ซึ่งก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ดีมากขึ้น) สำหรับค่าแรงเคลื่อนหนี่ยวนำ (e.m.f) นี้จะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้น ซึ่งกระแสนี้สามารถที่จะรับมาใช้งาน โดยการใช้อิเล็กโทรด (Electrode) ในปัจจุบันจะมีการพัฒนาการสร้าง MHD Generator ในหลาย ๆ ประเทศ เช่น U.S.A. เยอรมัน และสหภาพโซเวียต แต่ทว่าในทางปฏิบัติจะมีการใช้ MHD Generator ร่วมทำงานกับโรงจักรพลังไอน้ำปกติได้ โดยให้ดูรูปที่ 2.8 (ค) ประกอบ



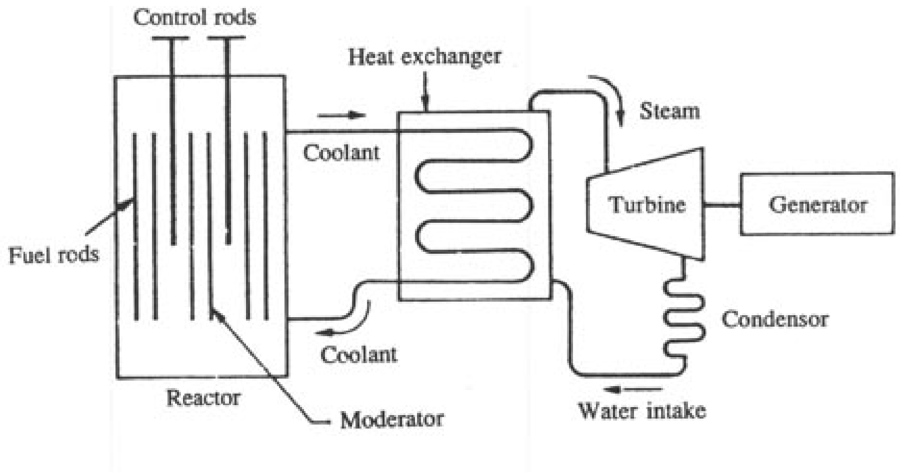
รูปที่ 2.8 (ก) และ (ข) แสดงหลักการของการผลิตกำลังไฟฟ้าแบบ MHD

(ค) แสดงบล็อกไดอะแกรมของโรงจักรไฟฟ้าแบบ MHD ทำงานร่วมกับระบบไฟฟ้าแบบธรรมดา

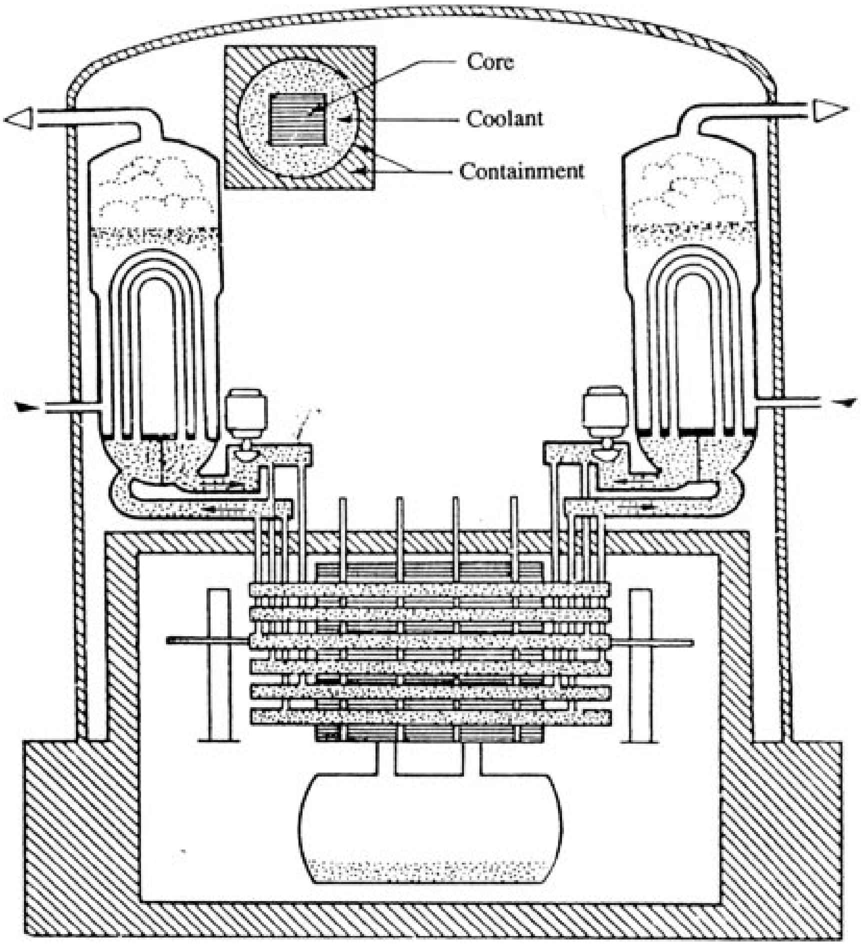
2.6 พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear power)

พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear power) แบบ Fission

ในปัจจุบันในการผลิตพลังงานไฟฟ้ายังสามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งโดยวิธีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ที่ได้มาจาก Fission reaction ซึ่งก็จะเป็นการแตกตัวของนิวเคลียสจากการเปรียบเทียบค่าปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว พลังงานนิวเคลียร์จะมีการปลดปล่อยออกมา ซึ่งมีทั้งปฏิกิริยาแบบ Fusion และ Fission ซึ่งก็จะอยู่ในช่วงของ 10 - 200 Mev (15 - 300 x 10^{-13} J) โลหะที่แยกออกมาจากสินแร่ดั้งเดิมจะประกอบด้วยไอโซโทป 2 ชนิด (Isotopes) ซึ่งก็คือ ยูเรเนียม - 238 (99.3% ต่อน้ำหนัก) และ U - 235 (0.8%) และมีแต่ยูเรเนียม - 235 เท่านั้นที่แตกตัวได้นั่นคือ โครงร่างจะถูกนิวตรอนที่วิ่งอย่างช้า ๆ ชน และนิวเคลียส (Nucleus) จะถูกทำให้แยกออกมาเป็น 2 ชิ้นส่วนที่มีความคงทน 2 ตัว บวกนิวตรอนหลาย ๆ ตัวและมีพลังงานจลน์ถึง 3 x 10^{-11} Joule ชิ้นส่วนที่วิ่งได้เร็วนี้จะชนกับอะตอมที่อยู่รอบ ๆ ทำให้เกิดความร้อนก่อนที่มันจะหยุดลง ส่วนนิวตรอนก็จะเดินทางได้ต่อไปและชนกับอะตอมอื่น ๆ ซึ่งก็จะทำเกิดการแตกแยก (Fission) ต่อไป นั่นคือจำนวนของนิวตรอนจะเพิ่มมากขึ้น ภายใต้เงื่อนไขการทำงานอย่างถูกต้องจะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่อย่างต่อเนื่อง สำหรับรีแอกเตอร์โดยปกติแล้ว (Conventional reactors) แกน หรือ Moderator จะทำให้ตัวนิวตรอนเคลื่อนที่ค่อนข้างช้าลง



รูปที่ 2.9 (ก) แสดงการทำงานของโรงจักรนิวเคลียร์



รูปที่ 2.9 (ข) แสดงโครงสร้างภายในของโรงจักรปรมาณูแบบ Reactor - pressurized heavy water Moderated

เชื้อเพลิงที่ใช้ในรีแอกเตอร์ (Reactor) มีการใช้ส่วนประกอบของ U - 238 ยูเรเนียมธรรมชาติจะถูกนำมาใช้ในบางครั้งและถึงแม้ว่าความหนาแน่นของพลังงานมีค่อนข้างน้อยกว่าพวก Pure isotopes แต่ก็จะดีกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง (Fossil fuels) ยูเรเนียมที่ใช้กันในปัจจุบันจะมาจากแหล่งแร่ที่มีโลหะมาก แต่แหล่งแร่ยูเรเนียมนี้ก็มีอยู่ในโลกอย่างจำกัดคือ ประมาณ 2×10^6 ตันเท่านั้น

2.7 การผลิตไฟฟ้าและเชื้อเพลิง

โดยทั่วไปแล้วในระบบไฟฟ้าทางผู้ใช้โหลดจะประกอบขึ้นด้วยโหลดพื้นฐานปกติ (Base load) บวกกับโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Variable load) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของแต่ละวัน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยแฟคเตอร์โหลดอื่น ๆ อีก โดยทั่วไปแล้วโหลดพื้นฐาน (Base load) นี้ผลิตขึ้นจากโรงจักรไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ตลอด 24 ชั่วโมงต่อวัน

ในขณะโหลดที่เหลืออยู่จากโหลดพื้นฐาน (Base load) จะถูกผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงจักรไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า โดยนำมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าที่เหลืออยู่ แต่ในการผลิตกำลังไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป จะมีการสำรองการผลิตกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่ง เพื่อว่าเมื่อมีเหตุฉุกเฉินเกิดขึ้นจะได้เอาโรงจักรไฟฟ้าสำรองมาใช้งาน โดยโรงจักรผลิตไฟฟ้านี้มักจะเป็นแบบกังหันแก๊ส หรือใช้โรงจักรไฟฟ้าแบบใช้น้ำ (เขื่อน) ซึ่งโรงจักรประเภทนี้สามารถเดินเครื่องได้ภายในระยะเวลา 5 นาที

กำลังผลิตไฟฟ้าสำรองของโรงจักรไฟฟ้าทั้งหมดนี้โดยทางปฏิบัติ จะต้องสำรองไปประมาณ 20% ของความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Annual peak demand) แต่โดยทั่ว ๆ ไปในประเทศหนึ่ง ๆ จะมีโรงจักรไฟฟ้าแบบผสมผสานกัน เช่น โรงจักรไฟฟ้าพลังน้ำ, โรงจักรไฟฟ้าแบบใช้ถ่านหิน, น้ำมันและพลังงานนิวเคลียร์และโรงจักรไฟฟ้าแบบแก๊สเทอร์ไบน์ ดังนั้นเพื่อให้ต้นทุนของการผลิตไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุดจึงต้องมีการวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตที่ต่ำสุด (Economic operation of power system) ก่อน แต่โดยทั่ว ๆ ไปแล้วต้นทุนของการผลิตกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับราคาน้ำมันเตา (Fuel price) เป็นสำคัญ ซึ่งราคาน้ำมันนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และยังขึ้นอยู่กับท้องถิ่นแต่ละท้องถิ่น สำหรับราคาค่าโรงจักรไฟฟ้าและราคาค่าเชื้อเพลิงของโรงจักรไฟฟ้าแบบชนิดต่าง ๆ นี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโรงจักรไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 (ก) แสดงราคาของโรงจักรไฟฟ้าและราคาค่าเชื้อเพลิง

	Nuclear	**Coal**	**Gas turbine**
Plant cost ($/kW) in 1984	2450	1240	300
Plant cost ($/kWh) in 1985	0.15	0.12-0.4	0.8-0.8

ตารางที่ 2.1 (ข) แสดงราคาต้นทุนจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า (บาท/kW) และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละหน่วยผลิต

ชนิดของโรงจักรไฟฟ้า	ราคาต้นทุนจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า (บาท/kW)	กำลังไฟฟ้าผลิตในแต่ละหน่วย (MW)
โรงจักรไฟฟ้าแบบถ่านหินลิกไนต์ (Lignite coal)	13500 - 15000	600
โรงจักรไฟฟ้าแบบ Bituminous coal		
โดยไม่มีเครื่องกรองอากาศเสีย (แก๊สซัลเฟอร์และแก๊สอื่น ๆ)	16500 - 19500	800
มีเครื่องกรองอากาศเสีย (แก๊สซัลเฟอร์และแก๊สอื่น ๆ)	18850 - 22500	800
โรงจักรไฟฟ้าใช้น้ำมัน		
โดยไม่มีเครื่องกรองอากาศเสีย (แก๊สซัลเฟอร์และอื่น ๆ)	12850 - 15000	800
มีเครื่องกรองอากาศเสีย (แก๊สซัลเฟอร์และแก๊สอื่น ๆ)	15000 - 18000	600
โรงจักรไฟฟ้าใช้แก๊ส	12850 - 15000	800
โรงจักรไฟฟ้าแบบใช้แก๊สเทอร์ไบน์	8500 - 9000	60 - 100
โรงจักรไฟฟ้าแบบพลังงานปรมาณู	18880 - 22500	1300
โรงจักรไฟฟ้าแบบพลังงานน้ำ		
แบบแรงดันต่ำ (Kaplan -Turbine)	42850 - 60000	-
แบบแรงดันสูง (Francis หรือ Pelton - Turbine)	22500 - 34500	-
โรงจักรไฟฟ้าแบบพลังน้ำที่กักเก็บน้ำกลับคืน (Pumped - Storage hydroelectric station)	10500 - 15000	-

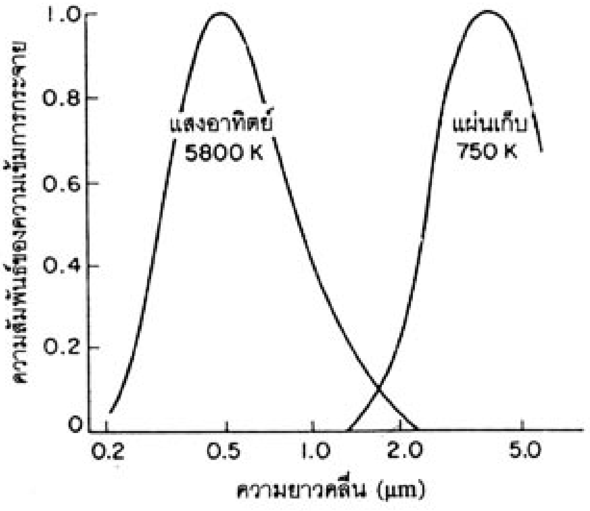
2.8 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy - thermal conversion)

พลังงานแสงอาทิตย์จะมีลักษณะของการใช้งาน 2 ชนิด คือ

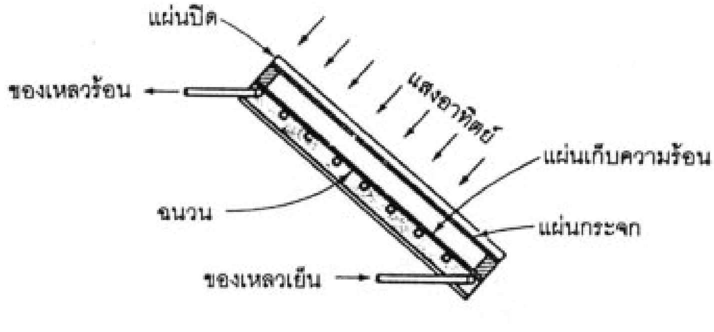
(ก) น้ำร้อนสำหรับบ้านเรือน

(ข) สถานีใหญ่ที่ใช้ตัวเก็บความร้อนขนาดใหญ่ ที่ใช้สำหรับผลิตไอน้ำสำหรับตัวเยนเนเรเตอร์

อุณหภูมิที่ผิวของแผงเก็บพลังงานจะเพิ่มการระบายความร้อน การกระจายพลังงานที่มีความยาวคลื่นของพลังงานแสงอาทิตย์ การกระจายรังสีอินฟาเรด แสดงดังรูปที่ 2.11 มันเป็นไปได้ในการออกแบบที่จะเลือกแผ่นปิดเหนือแผ่นเก็บแสงอาทิตย์ให้ผ่านเฉพาะแสงอาทิตย์ (Solar radiation) ส่วนแสงอินฟาเรดจะสะท้อนหมด แผ่นเก็บ (Absorbers) จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กเรียบ ซึ่งจะประกอบด้วยผิวของตัวนำเซมิคอนดักเตอร์บาง ๆ



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มของการกระจาย (Black – body intensity of Radiation) กับความยาวคลื่น (Wave length)



รูปที่ 2.11 แสดงแผงพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการทำน้ำร้อน

พลังงานที่รับโดยแผ่นคอลเล็กเตอร์ (Collector) ต่อตารางเมตรก็คือ

$$Q = I \cdot \alpha \cdot \tau \cdot -(\varepsilon_F + \varepsilon_B) \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_o^4)$$

ในที่นี้

ε_F และ ε_B = Front and back emissivities of absorber

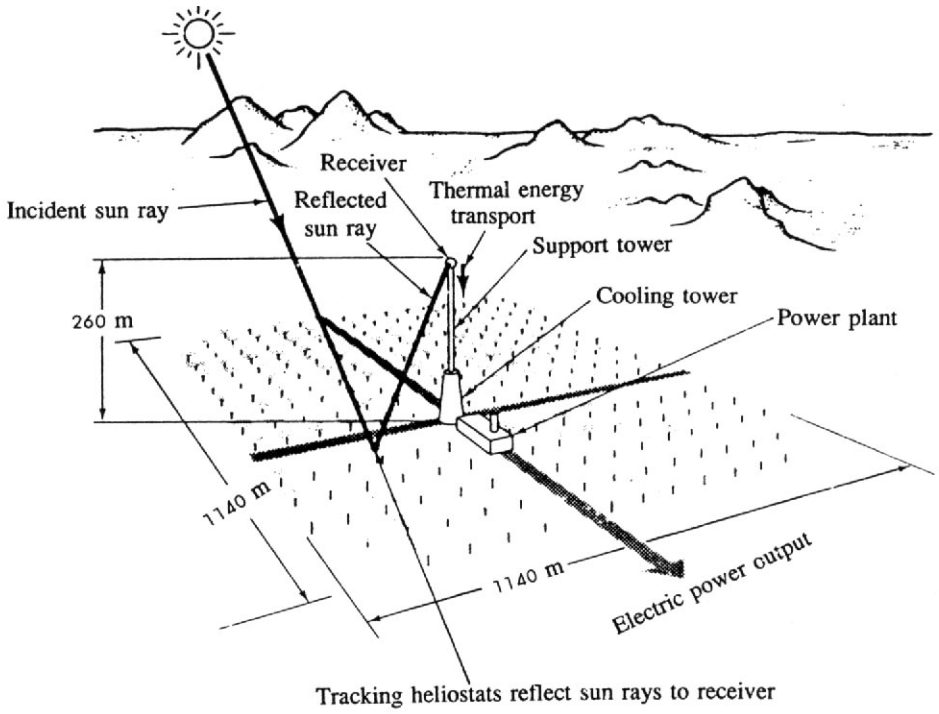
σ = Stefan – Boltzmann constant = 5.67 x 10^{-8}/K^4 – m^2

τ = Transmittance of cover plate (ตัวอย่างเช่น 0.93)

T_o = อุณหภูมิของแผ่นปิด (Kelvin)

I = Incident radiation normal to surface

T(K) และ α = อุณหภูมิและการดึงความร้อนของแผ่นดึงความร้อน (Absorbing panel)



รูปที่ 2.12 แสดงวิธีการผลิตกำลังไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

ในการติดตั้งสถานีขนาดใหญ่ ๆ ลำแสงอาทิตย์จะถูกทำให้รวมลำแสงเข้าด้วยกัน ในการใช้เลนส์หรือกระจก ซึ่งไม่ว่าจะใช้กระจกหรือเลนส์รวมแสงก็จำเป็นที่ต้องมีพื้นผิวโค้งมัน และต้องมีระบบหมุนตามเส้นทางโคจรของดวงอาทิตย์ ในการรวมลำแสงเข้าไว้ด้วยกัน (Concentrators) จะถูกออกแบบให้มีการเคลื่อนที่ตามเส้นทางโคจรของดวงอาทิตย์ไปตามฤดูกาล หรือการหันเหตามดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน ในสมัยก่อนยังมีความชำนาญไม่มากนัก ก็จะใช้ค่าแฟคเตอร์การรวมแสง (Concentration factors) ที่มีค่าประมาณ 30 เท่า หรือใช้ตัวอย่างของเตาถลุงแบบแสงอาทิตย์ของฝรั่งเศส (French solar furnace) ที่อยู่บนเทือกเขาปีรานีส (Pyrenees) ที่มีกระจก 2 แกน (Two-axis mirrors) และมีแฟคเตอร์การรวมแสง (Concentration factors) ถึง 16,000 เท่า โดยจากรูปไดอะแกรมของจุดรวมศูนย์กลาง (Central receiver system) จะถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า ดังในรูปที่ 2.12 ตัวสะท้อนแสงจะสะท้อนแสงอาทิตย์ไปรวมกันที่ตัวรับแสงอาทิตย์กลาง (Boiler) ก็จะทำให้เกิดไอน้ำขึ้น พื้นที่ของตัวเก็บแสง (Collector area) ประมาณ 1 กม^2 จะผลิตไฟฟ้าได้ 100 MW (e) และราคาต้นทุนทำงานจะมีราคาตกอยู่ประมาณ 0.81 บาท/kWh (ราคาที 1984) โดยมีราคาต้นทุน (Capital costs) ประมาณ 850 บาท/m^2 (แบบกระจก หรือ อื่น ๆ)

การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

การเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นก็ทำได้โดยการใช้วัตถุที่เหมาะสม เช่น แผ่นซิลิคอน ซึ่งลักษณะการทำงานก็คือ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำนี้ก็จะทำให้คู่ของโฮล (Hole) และอิเล็กตรอน (Electron) ที่ถูกกระตุ้นแยกออกจากกัน โดยโปรตอน (Photon) จากแสงอาทิตย์ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น สำหรับค่าทางทฤษฎีของ Photovoltaic (Solar cell) จะมีค่าประมาณ 25% และค่าทางปฏิบัติจะต่ำกว่าค่านี้ พวกสารกึ่งตัวนำ เช่น พวก Single crystal crystal silicon และ Gallium – arsenide cell ก็จะมีประสิทธิภาพประมาณ 10 และ 16% ตามลำดับ เนื่องจากราคาในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้เป็นแผงโซล่าเซลในยานอวกาศเป็นสำคัญ

สำหรับแผงโซล่าเซลที่ผลิตกันเป็นจำนวนมากคือ พวก Polycrystalline silicon film ซึ่งจะมีประสิทธิภาพประมาณ 10% มีการประมาณกันว่า ถ้ามีการผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ขนาดใหญ่มาก ๆ ก็จะได้กำลังไฟฟ้าถึง 10^{12} kWh ต่อปี สำหรับค่าราคาผลิตเซลแสงอาทิตย์จะสามารถลดราคาผลิตได้ประมาณ 12,500 บาท ต่อ kW

2.9 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่แล้ว จะอยู่มีเพียงชนิดเดียวคือ ระบบไฟฟ้า 3 เฟส การออกแบบระบบวงจรการจ่ายไฟฟ้า (Distribution network) ในสภาวะการทำงานปกติจะพยายามให้การทำงานหรือโหลดมีความที่สมดุลกันทั้ง 3 เฟส แต่ทว่าในการคำนวณ หรือการเรียนรู้เกี่ยวกับสภาวะของการ

ทำงานต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า มักนิยมใช้การวิเคราะห์เพียง 1 เฟส ก็เป็นการเพียงพอและจากการที่ให้โหลดเท่ากันในทุก ๆ เฟส ของระบบไฟฟ้าสามเฟส จะส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำที่ป้อนเข้าไปในระบบไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ (Low voltage distribution feeders) ก็จะมีค่าเท่ากันทุกเฟส ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในการเขียนระบบไฟฟ้า (Network)ให้ง่ายและมีประโยชน์ในการอ่านวงจรที่ดีที่สุด ก็คือ การเขียนไดอะแกรม (Line diagram) ในวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ก็จะถูกแทนโดยวงจรไฟฟ้า 1 เฟส (Single line) สำหรับสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.13 จะแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส

สำหรับรูปไดอะแกรมแสดงแบบการทำงาน (Schematic diagram) ซึ่งแสดงส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ในรูป ตัวเยนเนเรเตอร์จะต่อแบบสตาร์ (Y) และโดยที่จุดสตาร์ หรือ จุดนิวทรัล จะถูกต่อลงดินโดยผ่านตัวความต้านทานธรรมชาติของการต่อจุดสตาร์ของตัวเครื่องจักรกลที่หมุน (เช่น มอเตอร์, เยนเนเรเตอร์) และทรานฟอร์เมอต์กับดิน (Earth หรือ Ground) นั้น จะส่งผลสำคัญยิ่งยวดต่อเมื่อมีการเกิดจุดผิดพลาด (Fault) ขึ้นในระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยทำให้เกิดสภาวะที่ไม่สมดุล (Unbalance three phase) ขึ้น และในรูปตัวเยนเนเรเตอร์จะป้อนระบบสายส่ง 3 เฟส 2 ระบบ ที่ต่อ

ขนานกัน (สายส่งเหนือหัว หรือสายส่งใต้ดิน) ค่าแรงเคลื่อนที่ผลิตจากตัวเยนเนเรเตอร์ปกติ จะไม่เกินไปกว่า 30 kV ดังนั้น จึงต้องมีการทำให้ค่าแรงเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น โดยการใช้ตัวทรานฟอร์เมอร์เพื่อป้อนแรงเคลื่อนสูงเข้าทางต้นทางของระบบสายส่งและที่ปลายทางของสายส่งค่าแรงเคลื่อนจะถูกทำให้มีระดับที่ต่ำลง การใช้ทรานฟอร์เมอร์ป้อนแรงเคลื่อนให้กับโหลด ที่ต่อสำหรับการใช้ระบบสายส่งที่ขนานกันอยู่ 2 ระบบ ก็เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน (Security) ให้กับระบบจ่ายไฟฟ้าให้มากขึ้น นั่นคือถ้าสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งเกิดขาดลงหรือมีจุดผิดพร่อง (Fault) เกิดขึ้น ก็จะทำการตัดสายส่งเส้นนั้น ๆ ออกไปจากระบบ ส่วนสายส่งที่ดีอยู่ก็ยังคงที่จะจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าได้ตามปกติดังเดิม สำหรับการคำนวณเพื่อหาค่าของกระแสและแรงเคลื่อนโดยทั่ว ๆ ไป จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเขียนสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้า เช่น เซอร์กิตเบรคเกอร์ (C.B) หรือ ฟิวส์ หรืออุปกรณ์ป้องกันชนิดอื่น ๆ ลงไว้ในไดอะแกรมแต่อย่างใด แต่ในบางกรณี เช่น เกี่ยวกับการคำนวณหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (Stability of system) ก็จำเป็นที่จะต้องเขียนตำแหน่งของสวิตซ์ เช่น C.B, C.T (Current transformer) และอุปกรณ์ป้องกันอื่น ๆ เข้าไว้ในไดอะแกรม ซึ่งการเขียนก็จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการคำนวณ

รูปที่ 2.13 แสดงสัญลักษณ์แทนระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

เพื่อให้วิศวกรมีความเข้าใจในความหมายต่าง ๆ ที่จะใช้ในการพูดและเขียนให้เข้าใจได้เหมือนกัน ซึ่งก็จำเป็นที่ต้องนิยามความหมายต่าง ๆ ไว้ดังดังต่อไปนี้ :

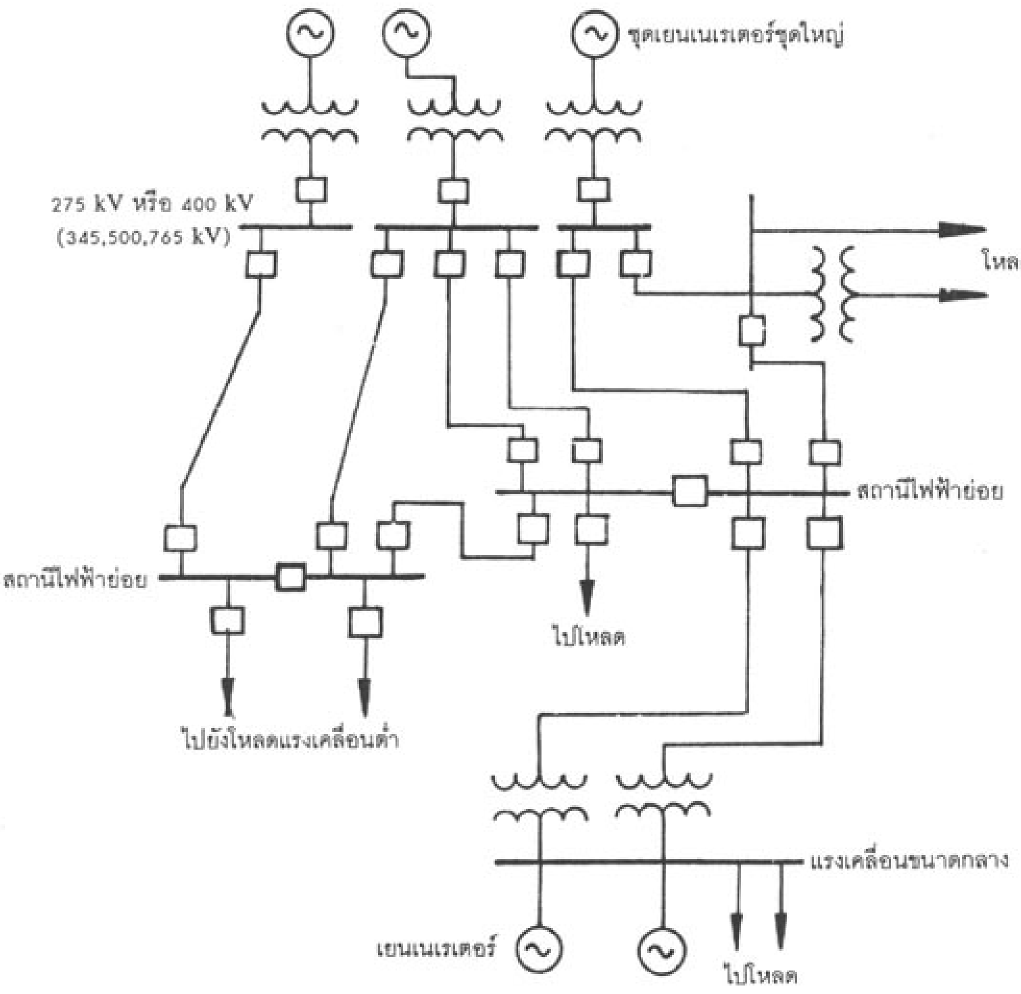
ระบบไฟฟ้า (System) : ให้หมายถึง การพรรณาวงจรไฟฟ้าที่สมบูรณ์, อันประกอบขึ้นด้วยเยนเนเรเตอร์, โหลดและตัวต้นกำลัง (Prime mover)

โหลด (Load) : การต่อโหลดนี้ก็มีความหมายได้หลายรูปแบบ เช่น หมายถึง กลุ่มของอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า หรือ หมายถึง ค่ากระแสหรือแรงเคลื่อนที่ไหลผ่านสายส่งหรือเครื่องจักร (Machine), หรือเป็นการแสดงถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้จากระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่

บัสบาร์ (Busbar) : ให้หมายถึง การต่อทางไฟฟ้าที่มีการต่อถึงกันโดยมีค่าอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์ที่มีการเชื่อมต่อถึงกันหลาย ๆ ครั้ง เช่น ต่อกับสายส่ง (Line), โหลด (Load) และอื่น ๆ และการใช้บัสบาร์ที่แท้จริงทำมาจากทองแดง หรือ อะลูมิเนียม

การต่อลงดิน : ให้หมายถึง การต่อของตัวนำ หรือโครงของอุปกรณ์ เครื่องใช้

(Earthing หรือ Grounding)	ทางไฟฟ้าเข้ากับดิน ในการต่อสายดินหรือต่อลงดินนี้จำเป็นที่จะต้องทำให้มีค่าความต้านทานของดินต่ำกว่าค่าที่กำหนดให้ไว้ตามมาตรฐาน โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะมีการนำตัวนำ (Conducting rod) ขนาดใหญ่ต่อลงไปในพื้นดินและใช้ตัวต่อ (Connector) ที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ต่อร่วมกัน
จุดผิดพร่อง (Fault)	: ให้หมายถึง สิ่งใดสิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าปกติและโดยทั่ว ๆ ไปอาจจะเกิดการลัดวงจรของตัวนำ หรือจากตัวนำให้ต่อกับพื้นดินทำให้การส่งกำลังไฟฟ้าไม่เป็นไปตามความต้องการ
ความปลอดภัยของแหล่งจ่ายไฟฟ้า	: ให้หมายถึง ข้อกำหนดในการให้ความปลอดภัยต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้เมื่อมีโรงจักรไฟฟ้าแห่งใดแห่งหนึ่งเกิดไม่ทำงาน วิธีสร้างความปลอดภัยโดยทั่ว ๆ ไปก็คือจะให้มีวงจรขนานกันอยู่ 2 ระบบ เพื่อให้มีความเสถียรต่อระบบไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้ต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงระดับค่าแรงเคลื่อนต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับตัวเยนเนเรเตอร์ที่ใช้ในกากรผลิตกำลังไฟฟ้า ก็มักจะมีค่าแรงเคลื่อนที่ขั้วอยู่ในช่วงประมาณ 12 – 30 kV จากนั้นค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากตัวเยนเนเรเตอร์นี้ก็ถูกเพิ่มค่าให้สูงขึ้นโดยใช้ทรานฟอร์เมอร์กำลังอีกตัวหนึ่งสถานีจ่ายไฟฟ้า (Substation) ก็จะเป็นการต่อกันระหว่างส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า เช่น มีการต่อสายส่ง และทรานฟอร์เมอร์ตลอดจนถึงอุปกรณ์ตัดต่อวงจรไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่จะมีการต่อรวมอยู่ด้วยกับระบบสายส่งที่ใช้ในการส่งกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ในบางประเทศ เช่น อังกฤษ ได้ใช้ระบบสายส่ง 400 kV และ 285 kV ส่วนในสหรัฐอเมริกาก็ได้ใช้ค่าของแรงเคลื่อน 345 kV, 865 kV สำหรับแรงเคลื่อนย่อยในอังกฤษก็มี เช่น 33 kV ; 11 kV หรือ 6.6 kV ส่วนรูปที่ 2.14 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังที่มีระดับค่าแรงเคลื่อนต่าง ๆ สาเหตุที่ระดับแรงเคลื่อนแตกต่างกันเป็นเพราะแนวคิดทางเทคนิคประกอบกับเทคโนโลยีแต่ละประเทศมีความแตกต่างกัน

2.10 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส (Three phase systems)

ในการผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไป ในระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกผลิตขึ้น โดยตัวเยนเนเรเตอร์ 3 เฟส ซึ่งลักษณะการวางขดลวดที่สเตเตอร์จะเป็นไป ดังรูปที่ 2.15 (ก) ซึ่งลักษณะการวางขดลวดทั้ง 3 เฟส ถูกวางห่างกันอยู่ 120° ทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นเหตุทำให้แรงเคลื่อนที่ผลิตออกมามีมุมเฟสต่างกันอยู่ 120° ตามไปด้วย ดังรูปที่ 2.15 (ข) เฟส (a) จะมีค่าสูงสุดที่มุม 120° ก่อนถึงเฟส (b) และ 240° ก่อนถึงเฟส (C) การไล่ตามเฟส จะไล่ตามลำดับของการที่แรงเคลื่อนถึงค่าสูงสุดของมัน หรือที่เรียกกันว่า Phase sequence หรือ a-b-c ซึ่งหลาย ๆ ประเทศได้มีการใช้อักษร a, b และ c เทนเฟส สำหรับในบางประเทศ เช่น เยอรมัน จะใช้ L_1, L_2, L_3, แทน R, S, T เป็นต้น จากรูปกราฟแรงเคลื่อนทั้ง 3 เฟสเห็นได้ว่า ผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนเฟส (Phase voltage) และกระแสในแต่ละเฟส (ถ้าในกรณีของโหลดสมดุล) ก็จะมีค่าของขนาด (Magnitude) เท่ากันแต่ค่ามุมเฟสต่างกัน ในทุกชั่วขณะเวลาจะมีค่าเป็นศูนย์ (Zero) จากระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย จะถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.16 (ก) ถ้ากระแสที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน หรือเกิดการไม่สมดุลขึ้นเมื่อใดแล้ว ก็จะมีกระแสไหลในสายที่สี่ ซึ่งเป็นสายนิวทรัล (Neutral line) ซึ่งสายนี้ ก็จะต่อกับจุดร่วมหรือ Neutral point ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.16 (ข)

จากการต่อวงจรไฟฟ้าแบบ "WYE" หรือ "Star" นี้จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังนี้:

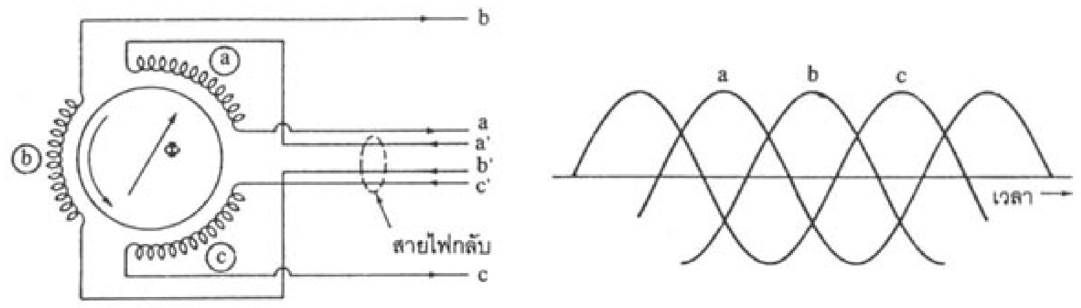
(ก) ค่าแรงเคลื่อนเฟส หรือค่าแรงเคลื่อนระหว่างสายกับนิวทรัล (Line to neutral voltage) ก็คือ V_{an}, V_{bn}, V_{cn},

(ข) ค่าแรงเคลื่อนระหว่างสายกับสาย (Line to line voltage) ก็คือ V_{an}, V_{bn}, V_{cn}, สำหรับอักษรต่อท้าย V นี้มีความหมายที่สำคัญ ก็คือ V_{ab} ให้หมายความว่า ให้ค่าแรงเคลื่อนของสาย หรือแรงเคลื่อนที่ขั้ว (a) เปรียบเทียบกับแรงเคลื่อนของสาย หรือแรงเคลื่อนที่ขั้ว (b) (V_{ba} = V_{ab}) ส่วนจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.18

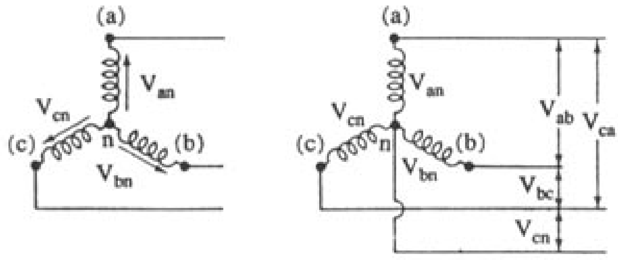
(ก) และจะแสดงให้เห็นได้ว่า $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = \sqrt{3}\cdot$(Phase voltage)

(ก) แสดงให้เห็นตัวซิงโครนัสเยนเนเรเตอร์ ที่มีขดลวดแยกออกจากกัน คือ a, b, และ c โดยมีมุมวางห่างออกจากกันเป็นมุม 120°

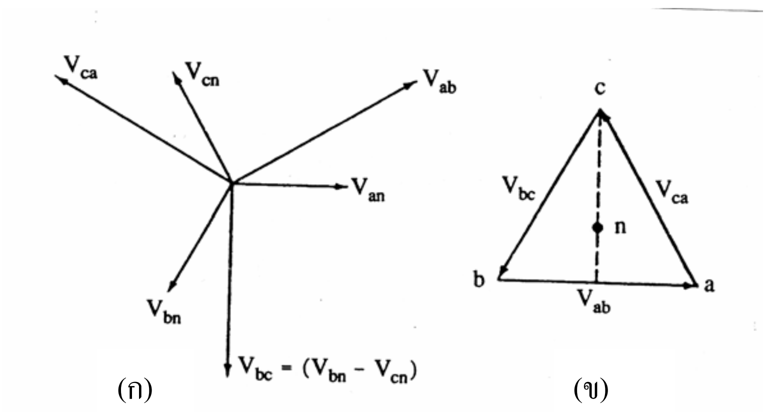
(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงไปของค่าแรงเคลื่อนที่ขั้วไปตามเวลา



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรไฟฟ้าภายในตัวเยนเนเรเตอร์

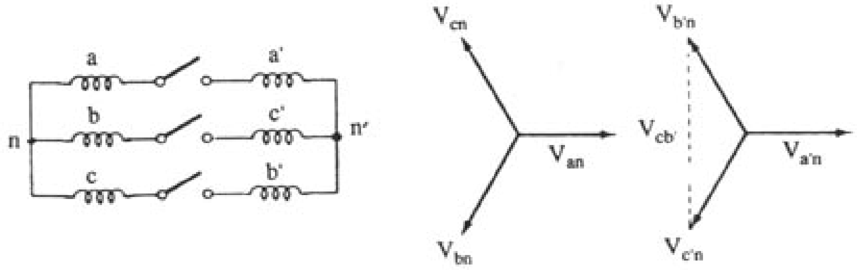


รูปที่ 2.16 (ก) แสดงการต่อวงจรแบบ “WYE” หรือ “Star” ที่ไม่มีสายนิวทรัลต่อ
(ข) แสดงการต่อวงจรแบบ “WYE” หรือ “Star” ที่มีสายนิวทรัลต่อ



รูปที่ 2.17 (ก) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมที่ต่อกันแบบ “WYE” หรือ “Star”
(ข) แสดงลักษณะของการจัดวางค่าแรงเคลื่อน สาย-กับ-สาย ในอีกรูปแบบ จุด n คือจุดที่อยู่ตรงกึ่งกลางของสามเหลี่ยมด้านเท่า และจุด n เป็นจุดอ้างอิงในการหาค่าแรงเคลื่อนนิวทรัล (Neutral voltage)

การหมุนหรือการเรียงลำดับของเฟส (Phase rotation) นี้มีความสำคัญมากประการหนึ่งทางไฟฟ้า ให้พิจารณาการต่อตัวเยนเนเรเตอร์ 2 ต่อ ที่มีการต่อเชื่อมถึงกันโดยใช้สวิตซ์โดยแหล่งแรงเคลื่อนทั้งสองมีค่าแรงเคลื่อนที่เท่ากัน (Equal magnitude) และมีการเรียงลำดับเฟสคือ a-b-c เมื่อสวิตซ์ถูกปิดหรือต่อถึงกันก็จะไม่มีกระแสไหล แต่อย่างไรก็ดีถ้าหากว่ากลับทางการหมุนของเฟสของเยนเนเรเตอร์ (ทำได้โดยการสลับสายไฟฟ้า 2 เส้น) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.18 นั่นคือ จะมีการเรียงลำดับเฟสเป็น a-b-c ตามลำดับ ซึ่งก็จะส่งผลตามมา ทำให้เกิดค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมขนาดใหญ่ $\sqrt{3}\cdot$(Phase voltage) ตกคร่อมที่สวิตซ์หน้าคอนแทค cb และ bc ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดกระแสขนาดใหญ่ไหลถึงกันและกันเกิดขึ้น ถ้าหากว่าสวิตซ์ถูกปิดลง (Closed) จากการสลับการเรียกลำดับเฟส (Reversed phase rotation) นี้ก็จะส่งผลทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าหมุน (Rotating magnetic field) ของขดลวดทั้ง 3 ขดลวด เกิดการกลับทิศทางหมุนเกิดขึ้นซึ่งก็จะส่งผลทำให้ตัวมอเตอร์ (Induction motor) เกิดการหมุนในทิศทางตรงกันข้ามเกิดขึ้น ซึ่งถ้ามีโหลดทางกลต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์แล้วก็อาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นได้

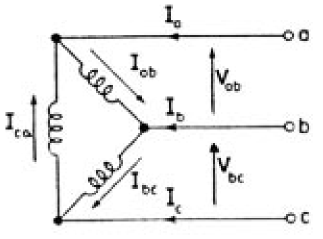


รูปที่ 2.18 (ก) แสดงตัวเยนเนเรเตอร์ 2 ต่อ ที่มีค่าแรงเคลื่อนเฟสเท่ากันถูกต่อโดยสวิตซ์

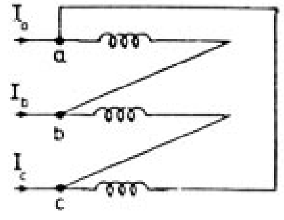
(ข) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรม

V_{cb} = ค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมสวิตซ์

V_{aa} = O



(ก) แสดงการต่อวงจรแบบเดลต้า (Delta) หรือ Δ



(ข) แสดงการต่อวงจรเดลต้าทางปฏิบัติ

สำหรับวงจรตามรูปที่ 2.19 นี้ จะเป็นวงจรไฟฟ้าที่เรียกกันว่า “Delta” หรือ □ สำหรับค่าแรงเคลื่อนเฟส (Phase voltage) จะมีค่าเท่ากันกับค่าแรงเคลื่อนระหว่างสายกับสาย (Line to line voltage) นั่นคือ $V_{Line} = V_{phase}$ ส่วนค่ากระแสสาย (Line current) ก็จะมีค่าดังนี้คือ :

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

ในที่นี้ I_a , I_b , I_c = กระแสสาย (Line Current)

I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} = กระแสสาย (Line Current)

ถ้าหากว่ากระแสมีความสมดุลในแต่ละเฟสดังรูป เฟสเซอร์ไดอะแกรม ก็คือ I_{Line} $\sqrt{3}\cdot I_{phase}$

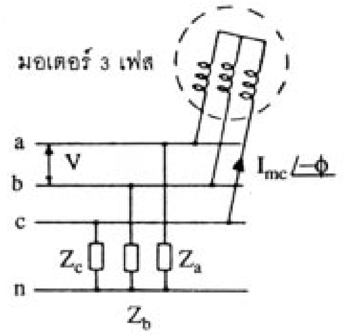
(ก) แสดงการต่อวงจรแบบเดลต้า (Delta) หรือ □ (ข) แสดงการต่อวงจรเดลต้าทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบของการต่อวงจรไฟฟ้า

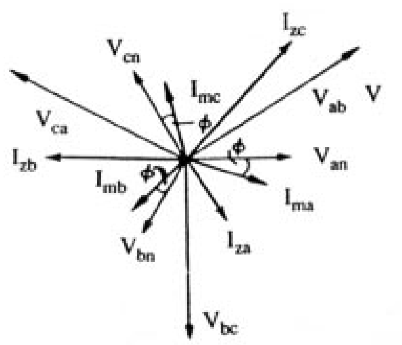
2.11 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 3 เฟส

2.11.1 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย (Three phase four wire)

ถ้าแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่งอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ไม่ถูกนำมาคิด ดังนั้น ค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมโหลดแต่ละค่าก็คือ ค่าแรงเคลื่อนสายกับสาย (Line to line voltage) หรือไม่ก็เป็นค่าแรงเคลื่อนเฟส (Phase voltage) ให้พิจารณา รูปที่ 2.19 จะประกอบขึ้นด้วยโหลดแบบเฟสเดียว (Single phase load) และโหลดสมดุลกันทั้ง 3 เฟส เช่น มอเตอร์ เป็นต้น



(ก) แสดงระบบไฟฟ้า 4 สาย ที่มีโหลดแบบเฟสเดียวต่ออยู่ และโหลดแบบ 3 เฟสต่ออยู่และ Line voltage = V



(ข) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรม (Phasor diagram)

รูปที่ 2.19 แสดงวงจรไฟฟ้าและเฟสเซอร์ไดอะแกรม

ให้สังเกตว่าค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลดแบบ 3 เฟสจะถูกเขียนเปรียบเทียบกับค่ากระแสเฟส (Phase current) และแรงเคลื่อนเฟส (Phase voltage) ค่ากระแสสาย (Line current) จะมีค่าดังต่อไปนี้:

$$I_a \quad = \quad \frac{V}{\sqrt{3}}\, x\, \frac{1}{Z_a} + \text{Im}(\cos\phi - j\sin\phi)$$

$$I_b \quad = \quad \frac{V}{\sqrt{3}}\, x\, (-0.5 - j\ 0.866)\, x\, \frac{1}{Z_b} + \text{Im}\left[-\cos(60^o - \phi) - j\sin(60^o - \phi)\right]$$

$$I_c \quad = \quad \frac{V}{\sqrt{3}}\, x\, (-0.5 - j\ 0.866)\, x\, \frac{1}{Z_c} + \text{Im}\left[-\cos(60^o - \phi) - j\sin(60^o - \phi)\right]$$

ค่ากระแสที่ไหลในสายนิวทรัล (Neutral current) หรือ $I_n = I_a + I_b + I_c$

2.11.2 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่สมดุล (Three phases balanced)

ระบบไฟฟ้าชนิดนี้ก็ให้ทำเหมือนกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส ที่มีค่าแรงเคลื่อนเฟส (Phase voltage) ได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ทั้งหมดทั้ง 3 เฟส จะมีค่าเท่ากันกับ 3 เท่าของกำลังไฟฟ้าในแต่ละเฟส

ค่ากำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่เกือบทั่วโลก จะถูกส่งผ่านระบบไฟฟ้าโดยใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส เพราะระบบไฟฟ้า 3 เฟสนี้จะใช้จำนวนเฟสที่น้อยที่สุดและให้ข้อดีของระบบสายส่ง 3 เฟสได้ดีที่สุด จากรูปที่ 2.20 สำหรับค่า N = 3 จะมีตัวนำ 4 ตัว ที่ประกอบขึ้นด้วย a,b,c และสายนิวทรัล (Neutral) n ค่าแรงเคลื่อนเฟส (Phase voltage) สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีลำดับการเรียงเฟส (Phase sequence) คือ a-b-c ซึ่งก็คือ :

$$V_{an} \quad = \quad V_a \quad = \quad V_p\angle 0^0$$

$$V_{bn} \quad = \quad V_b \quad = \quad V_p\angle -120^0$$

$$V_{cn} \quad = \quad V_c \quad = \quad V_p\angle +120^0$$

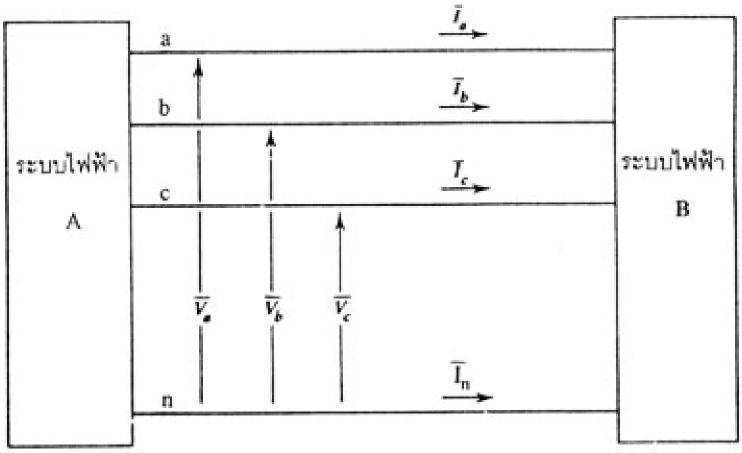
ค่าแรงเคลื่อนเฟสกับเฟส (Phase to phase voltage) หรือก็คือ Line voltage (V_L) ดังนั้น

$$V_L = \sqrt{3}\,V_p$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = V_p\sqrt{3}\angle 30^0 = V_L\angle 30^0$$

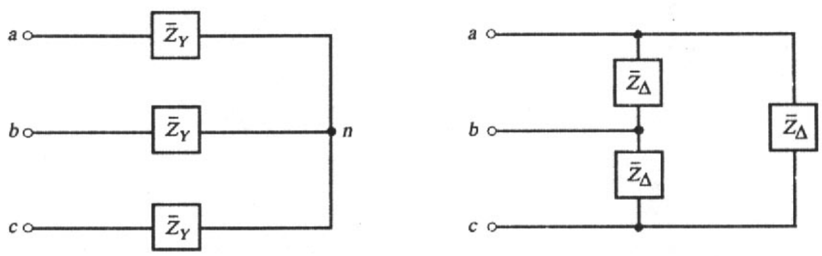
$$V_{bc} = V_b - V_c = V_p\sqrt{3}\angle -90^0 = V_L\angle -90^0$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = V_p\sqrt{3}\angle 150^0 = V_L\angle 150^0$$



รูปที่ 2.20 แสดงระบบไฟฟ้า 3 เฟสโดยทั่ว ๆ ไป

ให้พิจารณาระบบไฟฟ้า A ซึ่งเป็นตัวกำลังไฟฟ้า (Active) ส่วนระบบไฟฟ้า B เป็นตัวรับกำลังไฟฟ้า (Passive) ถ้าทางด้านระบบไฟฟ้า B มีการต่อโหลดสมดุลที่ต่อเป็นแบบ WYE หรือ STAR (Y) หรือ DELTA (Δ) ดังในรูปที่ 2.21 ทำให้ค่ากระแส $I_a = I_b = I_c$



(ก) โหลดที่ต่อกันแบบ WYE หรือ STAR (Y) (ข) โหลดที่ต่อกันแบบ DELTA (Δ)

รูปที่ 2.21 แสดงโหลดที่สมดุลกันทั้ง 3 เฟส

(ก) ในกรณีของการต่อวงจรไฟฟ้าแบบ WYE (Y)

$$I_a = \frac{V_a}{Z_y} = \frac{V_p}{Z_y}\angle 0^0 - \varphi = I_p \angle 0^0 - \varphi \left(-90^0 < \varphi < +90^0\right)$$

$*-90^0 < \varphi < 0^0$: Zy เป็นค่าคาปาซิทีฟ(C) ทำให้เกิด I_a lead V_a

$*\ \ 0^0 < \varphi < 90^0$: Zy เป็นค่าอินดักทีฟ(C) ทำให้เกิด I_a lag V_a

ค่ากระแสสาย (บางทีเรียกว่า Line current หรือ I_L ดังนั้น $I_L = I_p$) ที่สมดุลในกรณี 3 เฟส ก็คือ

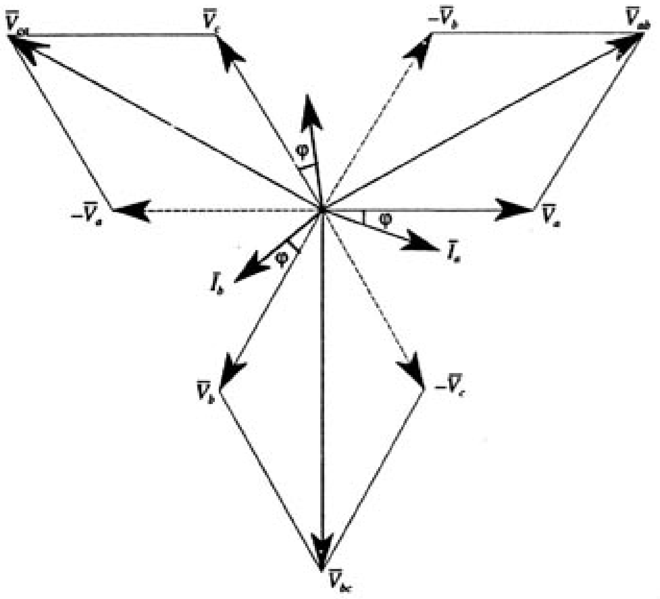
$$I_a = I_p \angle 0^\circ - \varphi = I_L \angle 0^\circ - \varphi$$

$$I_b = I_p \angle -120^\circ - \varphi = I_L \angle -120^\circ - \varphi$$

$$I_c = I_p \angle +120^\circ + \varphi = I_L \angle +120^\circ + \varphi$$

$$I_n = 0$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเคลื่อนและกระแสต่าง ๆ จะถูกแสดงได้โดยการใช้เฟสเซอร์ไดอะแกรม ดังในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับโหลดแบบสมดุล : โดยมีการเรียงลำดับเฟส (Phase sequence) คือ abc

(ข) ในกรณีของการต่อวงจรไฟฟ้าแบบ Delta (Δ)

$$Z_\Delta = 2\,[1 - \cos(120°)]\; Z_Y$$

ค่าของ Z_Δ ก็คือ $$Z_\Delta = 3\,Z_Y$$

ถ้าต้องการคำนวณหาค่าของกระแสไหลในแต่ละสาขาของ ก็สามารถคำนวณได้ตามวิธีการดังนี้

$$I_{ab} = V_{ab} / Z_\Delta$$

$$I_{bc} = V_{bc} / Z_\Delta$$

$$I_{ca} = V_{ca} / Z_\Delta$$

ค่ากระแสเหล่านี้บางครั้งเรียกว่า "กระแสเฟส หรือ Phase current" เพราะว่ากระแสเหล่านี้เป็นกระแสที่ไหลในแต่ละ "เฟส" ของวงจรเดลต้า (Delta) อย่างไรก็ตาม เราสามารถที่จะหลีกเลี่ยงชื่อเรียก (Terminology) เพราะว่ามันอาจที่จะเข้ามาสับสนกับกระแส $I_a = I_b$ และ I_c โดยกฎกระแสของเคอร์ชอฟ (KCL) จะได้ว่า

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

เช่นเดียวกับปัญหาของการเรียกชื่อค่าแรงเคลื่อน (Voltage terminology) ในวงจรเดลต้า ค่าของแรงเคลื่อน ซึ่งในบางครั้งจะถูกเรียกว่า ค่าแรงเคลื่อนเฟส หรือ "Phase voltage" ซึ่งค่าแรงเคลื่อนนี้จะตกคร่อม "เฟส" ของวงจรเดลต้า แต่อย่างไรก็ตามชื่อเหล่านี้อาจจะมีความยุ่งยากกับค่าจำกัดความก่อน ๆ เช่นที่ เรียกชื่อว่า "แรงเคลื่อนเฟส หรือ Phase voltage" เช่นเดียวกัน

เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่าการต่อแบบ WYE จะมีข้อดีบางประการที่เหนือกว่าการต่อวงจรโหลด ที่มีการต่อกันเป็นแบบเดลต้า (Δ)

สมการของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบไฟฟ้าสมดุลที่มีเฟสทั้งหมด 3 เฟส ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลจากระบบวงจรไฟฟ้า A ไปยังระบบวงจรไฟฟ้า B ก็คือ

$$S_{3\text{-}\varnothing} = 3\ V_p\ I_p$$

$$P_{3\text{-}\varnothing} = 3\ V_p\ I_p \cos\varphi$$

$$Q_{3\text{-}\varnothing} = 3\ V_p\ I_p \sin\varphi$$

ค่ากระแสของสาย (Line current)

$$I_L = I_P$$

$$V_L = \sqrt{3}\ V_p$$

ค่ากำลังของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ก็คือ :

$$S_{3\text{-}\varnothing} = 3\,(V_L/\sqrt{3})\,I_L = \sqrt{3}\ V_L I_L$$

$$P_{3\text{-}\varnothing} = \sqrt{3}\ V_L\ I_L \cos\varphi$$

$$Q_{3\text{-}\varnothing} = \sqrt{3}\ V_L\ I_L \sin\varphi$$

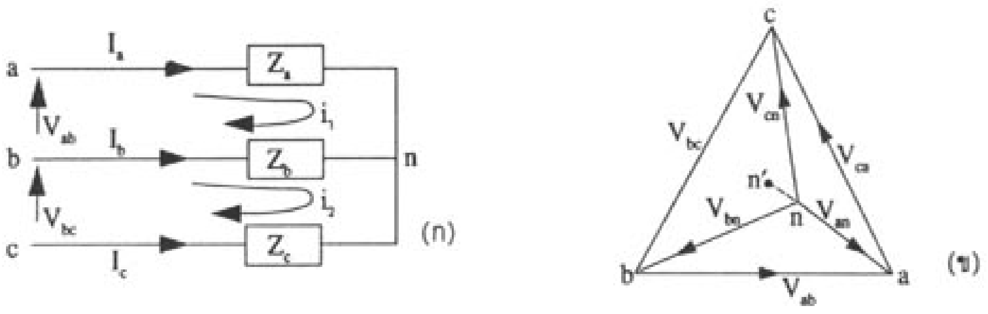
ค่า Complex power ก็คือ :

$$S_{3\text{-}\varnothing} = P_{3\text{-}\varnothing} + j\,Q_{3\text{-}\varnothing}$$

2.11.3 ระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่ไม่สมดุล (Three phase unbalanced)

ในระบบไฟฟ้าที่มีความยุ่งยากวิธีการที่ใช้คำนวณกันมากก็คือ การคำนวณแบบ Symmetrical component ให้พิจารณารูปวงจรดังในรูปที่ 2.20 ในที่นี้ $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ ซึ่งจากการใช้การวิเคราะห์แบบ Mesh ก็จะทำให้ได้สมการดังต่อไปนี้ :

$$\begin{bmatrix} V \\ V(-0.5-j0.866) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_a+Z_b) & -(Z_b) \\ (-Z_b) & (Z_b+Z_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 2.23 (ก) แสดงระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ไม่สมดุล i_1 และ i_2 ก็คือ Loop current

(ข) แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรม จุด n ก็คือ จุดแรงเคลื่อนนิวทรัลที่สมดุล ; ส่วน n' – n = ค่าความแตกต่างของแรงเคลื่อนระหว่างจุด n และจุดนิวทรัล (n')

ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีพ (Q) ที่ใช้ไปจากค่าโหลด 3 เฟส ที่มีความสมดุล (Balance three phase load) ทั้งแบบ Y และ Δ ก็สามารถเขียนเป็นสูตรได้คือ

$$P = \sqrt{3}\, VI \cos\phi \text{ และ } Q = \sqrt{3}\, VI \sin\phi$$

ในที่นี้ V = ค่าแรงเคลื่อนสายกับสาย (Line to line voltage)

V_{ph} = ค่าแรงเคลื่อนเฟส (Phase voltage)

I = ค่ากระแสสาย (Line current)

ϕ = มุมระหว่างกระแสเฟส และเรงเคลื่อนเฟสของโหลด

I_{ph} = ค่ากระแสเฟส (Phase current)

ในวิธีการอื่น ๆ

$$P = \sqrt{3}\, V_{ph} I_{ph} \cos\phi \text{ และ } Q = \sqrt{3}\, V_{ph} I_{ph} \sin\phi$$

ถ้าหากว่าโหลดผู้ใช้ไฟฟ้านั้นเท่ากันทุกเฟส ดังนั้น วัตต์มิเตอร์ที่ต้องใช้ในการวัดหาค่ากำลังไฟฟ้า (Balanced load) ก็ใช้เพียง 1 ตัว ก็เป็นการเพียงพอสำหรับโหลดที่ไม่สมดุล (Unbalance load) ก็ใช้วัตต์มิเตอร์ 2 ตัว ก็เป็นการเพียงพอ

บทที่ 3
ระบบสายส่งไฟฟ้า

3.1 คำนำ

ระบบสายส่งนั้นเป็นอุปกรณ์หรือตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายทอดกำลังไฟฟ้า ในการส่งพลังงานไฟฟ้า(Electric energy) ไปในระยะทางไกล ๆ ระบบไฟฟ้าที่ใช้อาจจะสามารถใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือระบบไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับระบบสายส่งนี้ยังสามารถแบ่งแยกออกเป็นคราว ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1. สายส่งเหนือหัว (Aerial Line)
2. สายเคเบิลใต้ดิน (Underground cables)
3. สายที่มีฉนวนอัดแก๊ส (Compressed gas insulated lines)

ระบบสายส่งในระบบ 3 เฟส ส่วนใหญ่จะใช้เป็นแบบสายส่งเหนือหัว (Aerial Line) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้สายตัวนำเปลือย (Bare conductor) ที่ล้อมรอบด้วยฉนวนที่เป็นอากาศ (Air insulating medium)

หน้าที่ของระบบสายส่งไฟฟ้าเหนือหัว ก็คือ การส่งกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ๆ จากแหล่งผลิตไปยังศูนย์กลางของโหลด(Load centers) และผู้ใช้กำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งได้แก่โรงงานอุตสาหกรรม ในการตัดสินใจที่จะสร้างระบบสายส่งใดๆ นั้น จำเป็นที่วิศวกรวางแผนระบบสายส่งไฟฟ้าจะต้องนำเอาแฟคเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ มาประกอบการพิจารณา

1. ระดับของแรงเคลื่อน (Voltage level)
2. ขนาดและชนิดของสายตัวนำ (Conductor type and size)
3. การควบคุมแรงเคลื่อนและการปรับระดับของแรงเคลื่อน (Line regulation and voltagecontrol)
4. การเกิดโคดรนาและการสูญเสีย (corona and loss)
5. การไหลของกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (Proper load flow and system stabiltity)
6. ระบบการป้องกัน (System protection)
7. ระบบการต่อลงดินของระบบ (Grounding)
8. ระบบของฉนวน (Insulation coordination)
9. การออกแบบทางกล (Mechanical design)
   9.1 การคำนวณการห้อยของสายและความเค้นทางกล (Sag and stress calculation)

9.2 ส่วนประกอบของสายตัวนำ (Conductor composition)

9.3 ระยะห่างของสายตัวนำ (Conductor spacing)

9.4 การเลือกฉนวนและสายตัวนำ (Insulator and conductor hardware selection)

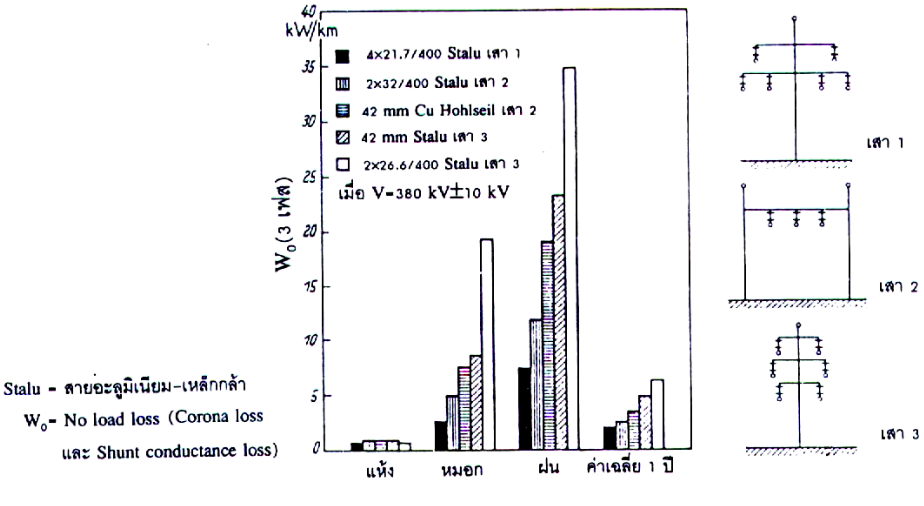
10. การออกแบบโครงสร้างเสา (Structural design)

10.1 ชนิดของโครงสร้าง (Structure type)

10.2 การคำนวณความเค้นทางกลของโครงสร้าง (Stress calculation)

3.2 ชนิดของตัวนำ

ในสมัยแรก ๆ ตัวนำของสายส่งไฟฟ้าปกติ จะใช้ทองแดงเป็นส่วนใหญ่ แต่ตัวนำของสายส่งในปัจจุบัน นิยมใช้อะลูมิเนียมแทนทองแดงเป็นส่วนใหญ่ สาเหตุที่ใช้อะลูมิเนียม ก็เพราะว่าราคาของสายส่งอะลูมิเนียมนั้นมีราคาถูก และน้ำหนักของสายส่งอะลูมิเนียม ก็เบากว่าทองแดง (เมื่อค่าความต้านทางของอะลูมิเนียมและทองแดงมีค่าเท่ากัน) โดยความเป็นจริงแล้ว สายส่งตัวนำที่เป็นอะลูมิเนียมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าตำนำที่ทำมาจากทองแดง เมื่อมีค่าความต้านทานเท่ากัน ซึ่งสิ่งนี้ก็เป็นข้อดีข้อหนึ่งของระบบไฟฟ้า เพราะในการที่ตัวนำสายส่งไฟฟ้าใดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ ก็จะทำให้ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity หรือ E) ที่บริเวณพื้นผิวของตัวนำลดน้อยลงตามไปด้วยนั่นก็หมายความว่า จะมีแนวโน้มที่อากาศรอบ ๆ ตัวนำสายส่ง จะเกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอน หรือ Ionization เกิดขึ้นลดลงตาม แต่ถึงกระนั้นก็ตามสิ่งนี้เป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์ ปรากฏการณ์อันนี้เราเรียกว่า Corona ซึ่งค่านี้ก็เป็นการสูญเสียทางไฟฟ้า (Watt loss) ชนิดหนึ่งนั่นเอง กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียอันเนื่องมาจากโคโรนานี้ จะมีหน่วยการสูญเสียเป็นกิโลวัตต์ต่อกิโลเมตร การสูญเสียนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะของอากาศ หรือ ฤดูกาล ในเวลานั้น ๆ เป็นสำคัญ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการสูญเสียของตัวนำของสายส่งไฟฟ้าอันเนื่องมาจากโคโรนา ซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล

สายส่งตัวนำนั้นจะมีความแตกต่างกันอยู่หลายชนิดหลายแบบด้วยกัน แต่จำแนกออเป็น 4 กลุ่ม ใหญ่ ๆ ได้ดังต่อไปนี้คือ

(ก) AAC หรือ All-Aluminum Conductors

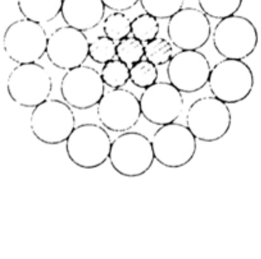
(ข) AAAC หรือ All- Aluminum-Alloy conductors

(ค) ACSR หรือ Aluminum Conductors Steel Reinforced

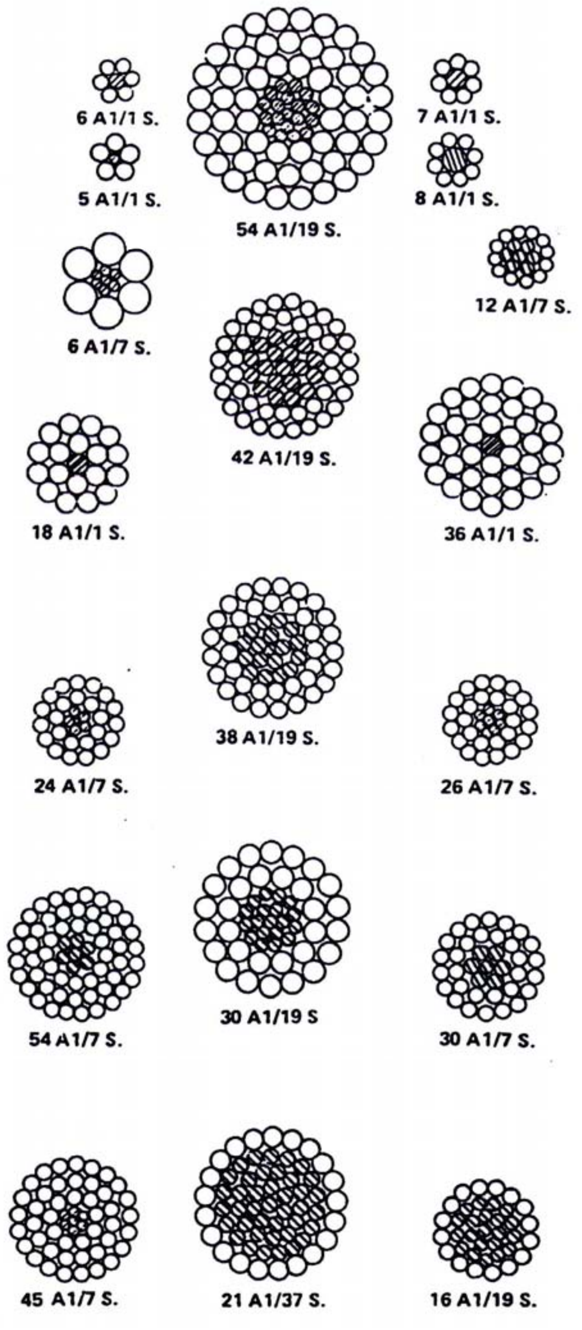
(ง) ACAR หรือ Aluminum conductors Alloy Reinforced

โดยปกติสายส่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นแบบ Aluminum Alloy Conductor หรือ AAC จะมีความเค้นทางกลสูงมากกว่าสายอะลูมิเนียมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ส่วนสายส่งตัวนำแบบ ACSR นี้จะประกอบขึ้นด้วยแกนกลางที่เป็นเส้นเหล็กกล้า (Steel) ล้อมรอบด้วยเส้นอะลูมิเนียมพันรอบเส้นเหล็กกล้าเป็นชั้น ๆ ส่วนสายส่งตัวนำแบบ ACAR นี้จะประกอบขึ้นด้วยแกนกลางที่ทำด้วยเส้นทองแดงที่มีความเค้นทางกลสูง (High-Strength aluminum) ล้อมรอบด้วยเส้นอะลูมิเนียมที่พันรอบเป็นชั้น ๆ สำหรับจำนวนของเส้นของตัวนำสายส่งขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นที่จะต้องพัน นอกจากนี้แล้วก็ยังขึ้นอยู่กับว่าสายส่งตัวนำนี้มีขนาดเท่ากันนั้นก็มีแตกต่างกันไป เช่น 7 , 19, 37, 61, 91 เส้น หรือมากกว่านี้ก็ได้

จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดของตัวนำสายส่งแบบ ACSR ตัวนำในรูปจะแสดงให้เห็นเส้นเหล็กกล้า (Steel) อยู่ตรงกลางภายในทั้งหมด 7 เส้น รอบ ๆ เส้นเหล็กกล้าและมีเส้นอะลูมิเนียมพันซ้อนกันอยู่ 2 ชั้น มีทั้งหมด 24 เส้น (Al) ซึ่งจะเขียนอยู่ในลักษณะที่ว่า 24 Al/7 St. หรือเขียนสั้น ๆ ว่า 24/7 ค่าขนาดจองความเค้นทางกล ขนาดของกระแส และขนาดของสายตัวนำ จะมีความแตกต่างกัน ถ้าหากว่ามีการใช้จำนวนเส้นของอะลูมิเนียม และเส้นของเหล็กกล้าในสายส่งตัวนำที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 3.2 แสดงหน้าตัดของสายตัวนำแบบ ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) โดยมีเส้นเหล็กกล้า 7 เส้น และเส้นอะลูมิเนียม 24 เส้น



รูปที่ 3.3 แสดงการจัดของสายตัวนำแบบ ACSR โดยที่ขนาดของตัวนำ (Conductor size) และขนาดของกระแสที่ไหลได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของสายแต่ละเส้น

3.3 ขนาดของสายตัวนำ (Conductor size)

ขนาดของตัวนำนี้จะใช้หน่วยที่เรียกว่า Circular mil คำนิยามของคำว่า 1 Circular mil ก็คือ พื้นที่ของวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิล (mil) โดย 1 mil มีค่าเท่ากับ 1 x 10^{-3} นิ้ว พื้นที่หน้าตัดของสายที่มีหน่วยเป็นตารางนิ้ว (Square inch) คูณด้วย 0.7854 x 10^{-6} จะเท่ากับพื้นที่ของ 1 Circular mil

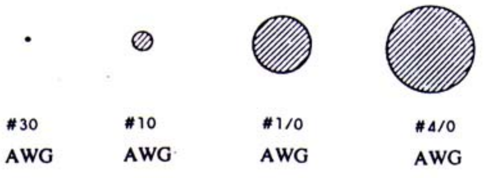
สำหรับตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กจนถึงพื้นที่หน้าตัดขนาด 211,600 circular mils ขนาดของมันจะถูกเรียกโดยใช้หมายเลขเกจ (Gage number) ตามมาตรฐานอเมริกัน (American Wire Gauge หรือ AWG Standard) ซึ่งมีชื่อเรียกในสมัยก่อนว่า Brown and Sharpe wire Gauge (B&S) ซึ่ง J.Rbrown ได้นำมาใช้ในปี 1857 หมายเลขเกจ (Gage number) จะมีหมายเลขลดลงเมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของสายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ถ้าหากว่าหมายเลขเกจเพิ่มค่ามากขึ้นก็หมายความว่าสายไฟฟ้าจะมีขนาดเล็กลง หมายเลขเกจจะเริ่มต้นที่หมายเลข 40 ซึ่งเป็นหมายเลขที่มีพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดมีเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ คือ 3.145 mils ขนาดตัวนำที่ใหญ่ที่สุดมีหมายเลขเกจ คือ 0000 ซึ่งเขียนได้เป็น 4/10 โดยสรุปแล้ว :

1 linear mil = 0.001 inch = 0.0254 millimeter

1 circular mil = Area of circle 1 linear mil in diameter

= $(\pi/4)$ x square mils = $(\pi/4)$ x 10^{-6} square inch

= 0.7854 x 10^{-6} square inch



รูปที่ 3.4 แสดงพื้นหน้าตัดของสายตัวนำที่มี AWG-Size ขนาดต่าง ๆกัน

สำหรับการนำไปใช้นั้น เรามักใช้พื้นที่หน้าตัดให้อยู่ในหน่วยเลขหลัก 1000 ตัวอย่างเช่น 250 kcmil. หรือ MCM เมื่อเทียบค่ากับ 250,000 circular mils หรือ 250,000 cmil.

ตัวนำที่ใช้ในงานปกตินั้น จะประกอบด้วยสายเส้นเดียว (Single strand) หรือสายหลายเส้น (Se – veral strands) ก็ได้ ถ้าเป็นสายเส้นเดียวเรียกว่า Solid ถ้ามีสายหลาย ๆ เส้นรวมกันที่มีจำนวนเส้นมากกว่า1 เส้น เราเรียกว่า Stranded สำหรับสายตัวนำแข็ง (Solid conductor) มักจะเรียกว่า สายไฟ (Wire) ในขณะที่สายตัวนำหลาย ๆ เส้น (Stranded conductor) มักเรียกว่าสายเคเบิล (Cable) สูตรที่ใช้โดยทั่ว ๆ ไปสำหรับจำนวนเส้นทั้งหมด (Total number of strand) ของสายเคเบิลแบบ Concentric stranded cable ก็คือ

จำนวนเส้น (Number of strands) = $3n^2 - 3n + 1$

ในที่นี้ n = จำนวนของชั้น (Number of layer)

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของตัวนำมาตรฐาน (Standard conductor size)

Size (AWG or kcmil)	(Circular mils)	Number of wires	Solid or Stranded
18	1,620	1	Solid
16	2,580	1	Solid
14	4,110	1	Solid
12	6,530	1	Solid
10	10,380	1	Solid
8	16,510	1	Solid
7	20,820	1	Solid
6	26,250	1	Solid
6	26,250	3	Stranded
5	33,100	3	Stranded
5	33,100	1	Solid
4	41,740	1	Solid
4	41,740	3	Stranded
3	52,630	3	Stranded
3	52,630	7	Stranded
3	52,630	1	Solid
2	66,370	1	Solid
2	66,370	3	Stranded
2	66,370	7	Stranded
1	83,690	3	Stranded
1	83,690	7	Stranded
0 (or 1/0)	105,500	7	Stranded
00 (or 2/0)	133,100	7	Stranded
000 (or 3/0)	167,800	7	Stranded
000 (or 3/0)	167,800	12	Stranded
0000 (or 4/0)	211,600	17	Stranded
0000 (or 4/0)	211,600	12	Stranded
0000 (or 4/0)	211,600	19	Stranded
250	250,000	12	Stranded
250	250,000	19	Stranded
300	300,000	12	Stranded
300	300,000	19	Stranded
350	350,000	12	Stranded
350	350,000	19	Stranded
400	400,000	19	Stranded
450	450,000	19	Stranded
500	500,000	19	Stranded
500	500,000	37	Stranded
600	600,000	37	Stranded
700	700,000	37	Stranded
750	750,000	37	Stranded
800	800,000	37	Stranded
900	900,000	37	Stranded
1,000	1,000,000	37	Stranded

โดยปกติแล้วตัวนำที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 AWG จะเป็นสายแบบสายตีเกลียว (Stranded) ตัวนำอาจเป็นแบบสายส่งใต้ดิน (Underground distribution) หรือ สายเคเบิลเหนือหัว (Aerial cable line) ก็ได้ ในตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของตัวนำมาตรฐาน (Standard conductor size) ที่ใช้กัน

สำหรับระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า วิศวกรไฟฟ้าจะให้ความสนใจเฉพาะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบสายส่งเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไประบบสายส่งจะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ๆ อยู่เพียง 4 ค่า เท่านั้น คือ

1. Line inductance (L)
2. Line shunt capacitance (C)
3. Line resistance (R)
4. Line shunt conductance (G)

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) เหล่านี้จะมีชื่ออักษรย่ออยู่ด้วยเสมอคือ ค่า L, C, R, และ G ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้จะมีค่าตามหน่วยหรือต่อหน่วยความยาว และต่อเฟสของระบบสายส่ง เช่น 1 เฮนรี ต่อเมตรต่อเฟส ในทางทฤษฎี ถ้าหากสายส่งนี้ไม่สามารถ (Unsymmetrical) กันแล้ว ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ก็จะไม่สามารถที่จะกำหนดค่าออกมาได้เป็นแบบต่อ 1 เฟส (Per phase base) ได้เลย แต่ในทางปฏิบัติแล้ว เราสามารถคิดให้มันมีค่าสมมาตร (Symmetrical) กันในทุก ๆ เฟสได้ ทั้งนี้ก็เพื่อความสะดวกในการคำนวณนั่นเอง

3.4 ค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของสายส่ง

ในการแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายส่งหรือสายเคเบิล นั้น ขึ้นอยู่กับระยะทางความยาวของสายส่ง และความแม่นยำ (Accuracy) ของการคำนวณตามที่ต้องการ เราสามารถแบ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้ตามความยาวของสายส่งออกเป็น 3 ชนิด ใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ

1. สายส่งแบบสั้น (The short transmission line) มีความยาวสายจนถึง 80 กิโลเมตร
2. สายส่งแบบกลาง (The medium-length line) มีความยาวสายตั้งแต่ 80 จนถึง 240 กิโลเมตร
3. สายส่งแบบยาว (The long transmission line) มีความยาวสายมากกว่า 240 กิโลเมตรขึ้นไป

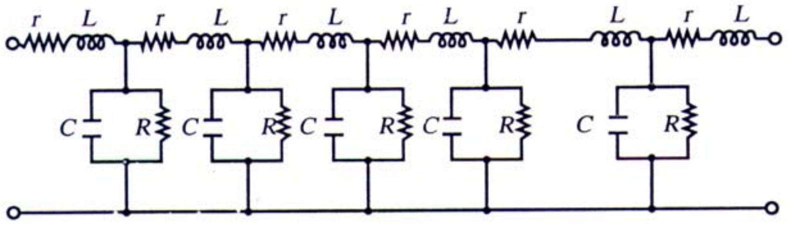
โดยความเป็นจริงแล้ว สายส่งหรือสายเคเบิลนั้นจะมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ ค่าความต้านทาน(R), ค่าอินดักแตนซ์ (L), ค่าคาปาซิแตนซ์ (C) และค่า Shunt conductance (G) หรือ Leakage resistance ที่มีอยู่ในทุก ๆ หน่วยความยาวของสาย ดังรูปที่ 3.5

L = Line inductance to neutral per unit length

R = Line A.C. resistance per unit length

C = Line capacitance to neutral per unit length

G =   Line shunt conductance (Leakage resistance) per unit length

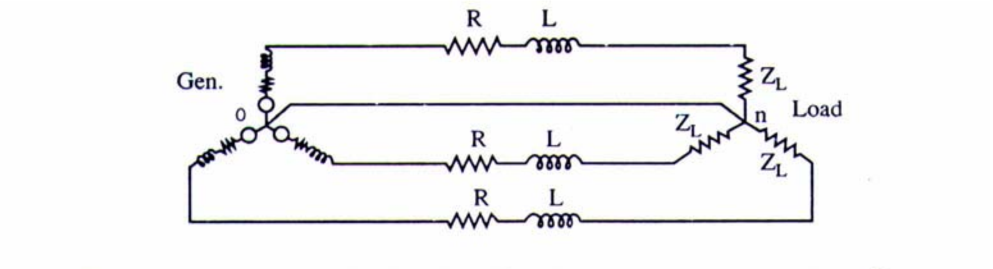


รูปที่ 3.5 แสดงค่าพารามิเตอร์คงที่ต่อทุก ๆ 1 หน่วยความยาว

การแทนค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคต่าง ๆ ของสายส่งลงในวงจรไฟฟ้า

โดยทั่ว ๆ ไป แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อน และกระแสบนสายส่งสามารถที่จะนำมาเขียนให้อยู่ให้อยู่ในรูปแบบของสมการที่มีความสัมพันธ์กันระหว่าง V และ I ได้ ถ้าหากว่าเราทราบค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชนิดของสายส่งนั้นมาก่อน ซึ่งจากการแบ่งความยาวของสายส่งออกเป็น 3 ชนิด จะพบว่าสายส่ง 2 ชนิดแรก คือ สายส่งแบบสั้น และสายส่งแบบกลาง สามารถนำพารามิเตอร์ที่เรียกกันว่า Lumped parameter มาใช้เขียนในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ ตามที่ทราบมาก่อนว่า ค่า R, L, C, G นี้ เป็นค่าต่อ 1 หน่วยความยาว เช่น ค่า L= 13.00 x 10^{-6} H/km ถ้าสมมติว่า สายส่งอันหนึ่งยาว 120 กิโลเมตร จะได้ค่า L ตลอดความยาวของสายส่งคือ 13 x 10^{-6} H/km x 120 km = 1.56 mH ซึ่งค่าที่ได้นี้คือ ค่าที่มารวมเป็นกลุ่มเดียวเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า Lumped parameter นั่นเอง ส่วนค่า R, L และ G ก็เป็นเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 3.6 แสดงถึงตัวเยนเนเรเตอร์ที่ต่อแบบ Star และจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลด 3 เฟสที่ต่อแบบ Star โดยผ่านสายส่งแบบสั้น จากรูปจะเห็นได้ว่าค่า R และ L ถูกแสดงค่าเป็นแบบกลุ่ม (Concentrate) หรือที่เรียกว่า Lumped parameter สำหรับการวัดค่าทางพิสิกส์ใด ๆ เช่น ค่ากระแส หรือ แรงเคลื่อนที่ปลายสายส่ง ค่าหรือผลลัพธ์ที่ได้จะไม่แสดงความแตกต่างใด ๆ ออกมาไม่ว่าสายส่งจะมีพารามิเตอร์แบบที่เรียกว่า Lumped Parameter ดังรูปที่ 3.6 หรือแบบที่มีการกระจายค่าของพารามิเตอร์อย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 6.1 และตราบเท่าที่ยังไม่มีการนำเอาค่าของ Shunt admittance หรือ G มาคิดคำนวณ ดังนั้น กระแสที่ไหลในสายส่งจะมีค่าขนาดเท่ากันโดยตลอดสายส่ง สำหรับตัวเยนเนเรเตอร์เองจะถูกแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งต่ออนุกรมกับแหล่งกำเนิด (Generated emf.) ในแต่ละเฟส



รูปที่ 3.6 แสดงตัวเยนเนเรเตอร์จ่ายไฟฟ้าให้กับโหลด โดยผ่านสายส่ง R และ L เป็นค่าทั้งหมด ตลอดความยาวของ สายส่ง (ส่วนค่า C หรือ Line capacitance ไม่ถูกนำมาคิด)

โดยปกติแล้ว สายส่งจะถูกกำหนดให้ทำงานโดยมีโหลดต่ออยู่ในลักษณะสมดุลทั้ง 3 เฟส ถึงแม้ว่าในบางครั้ง สายส่งมีระยะห่างของแต่ละเฟสของสายส่งไม่เท่ากันหรือสายส่งไม่มีการสลับสายไขว้กันผลลัพธ์ก็คือ ความไม่สมมาตร (Aaymmetry) จะมีค่าข้างน้อยซึ่งจะไม่นำมาคิด และให้คิดเสมอว่าเฟสทั้งสามของสายส่งมีคุณสมบัติเท่ากันทุกประการ ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมกันทั้งหมดของสายส่งและค่าอิมพีแดนซ์ ที่ต่ออนุกรมต่อหน่วยความยาวนั้น สมมัติให้มีค่าดังต่อไปนี้

z = ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาวต่อเฟส (Series inpedance per unit length Per phase)

y = ค่าแอตมิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวต่อเฟสกับนิวทรัล (Shunt admittance per unit Length per phase to neutral)

I = ระยะทางความยาวของสายส่ง (Length of line)

Z = z-1 = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมทั้งหมดต่อเฟส (Total series impedance per phase)

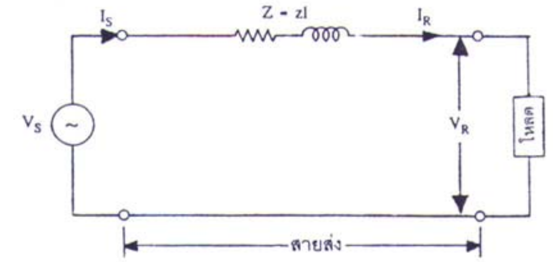
Y = y-1 = ค่าแอตมิแตนซ์ทั้งหมดที่ขนานระหว่างเฟสกับนิวทรัล (Total shunt admittance Per phase to neutral)

จากรูปที่ 3.7 แสดงถึงวงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรูปที่ 3.6 โดยการต่อเพิ่มตัวคาปาซแตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสใดเฟสหนึ่งของสายส่งกับนิวทรัล (Neutral) ที่มีอยู่ตลอดความยาวของสายส่ง โดยการแปรค่า C (1ตัว) ออกเป็น C/2 (2 ตัว) ให้ไปต่ออยู่ที่ต้นปลายและปลายของสายส่งด้านละเท่า ๆ กัน

รูปที่ 3.7 แสดงวงจรสมมูล 1 เฟส ที่มี C/2 ต่ออยู่แต่ละด้านของสายส่ง

3.4.1 สายส่งแบบสั้น (Short transmission line)

สายส่งใดที่มีระยะทางความยาวน้อยกว่า 80 กิโลเมตร หรือ 50 ไมล์ ถูกจัดว่าเป็นสายส่งแบบสั้น คุณสมบัติของสายส่งแบบสั้นคือ ไม่มีการนำเอาค่า Cที่มีอยู่ในสายส่งมาคิด หรือเขียนลงไปในวงจรสมมูลของสายส่ง มีแต่การนำเอาค่าอิมพีแดนซ์ ($Z = R + j\omega L$) มาคิดเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสมมูลของสายส่ง 1 เฟส โดยที่มีค่า R และ L ของระยะทางความยาวของสายส่งทั้งหมด

จากรูปแสดงถึงค่า I_s เป็นค่ากระแสที่ไหลเข้าที่ต้นทางของสายส่ง (I_S = Sending – end current) ส่วน I_r เป็นค่ากระแสที่ไหลทางปลายทางของสายส่ง (I_R = Receiving – end current) , V_S = ค่าแรงเคลื่อนทางต้นทางขอสายส่ง (V_S = Sending – end voltage) V_R = ค่าแรงเคลื่อนทางปลายทางของสายส่ง (V_R = Receiving – end voltge)

อย่าลืมว่า ทั้ง V_S และ V_R นี้เป็นค่าแรงเคลื่อนเฟสกับนิวทรัล (Line to neuteal voltage) มิใช่ค่าแรงเคลื่อนเฟสกับเฟส (Line to Line voltage)

จากรูปวงจรจะเห็นได้ว่าเป็นรูปวงจรแบบอนุกรมธรรมดา ดังนั้นค่ากระแสไหลเข้าที่ต้นสายส่ง และปลายทางของทางสายส่งจึงมีค่าเท่ากันหรือ

$$I_S = I_R \qquad .....(3.1\ ก)$$

และค่าแรงเคลื่อนที่ปลายสายส่งก็คือ

$$V_S = V_R + I_R . Z \qquad .....(3.1\ ข)$$

ในที่นี้ Z = z.1 = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมทั้งหมดในสายส่ง

ในระบบสายส่ง ถ้าหากว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าเพาเวอร์แฟตเตอร์ของโหลดแล้ว ก็จะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงเคลื่อนที่ปลายสายส่ง ที่โหลดตามไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงเคลื่อนที่ปลายสายส่งนี้เรียกว่า Voltage regulation ถ้าหากว่าค่าแรงเคลื่อนต้นสายส่ง หรือ Sending-end voltage ถูกจับให้มีค่าคงที่หนึ่ง ค่าแรงเคลื่อนทางปลายสายส่งขณะที่ไม่มีโหลดต่อ (No load receiving-end voltage) หรือ V_{R-NL} จะมีค่าสูงมากกว่าค่าแรงเคลื่อนเมื่อตอนมีโหลดเต็มที่ (Full-load receiving-end voltage หรือ V_{R-FL}) ดังนั้น จึงสามารถคำนวณหาอัตราการแปรเปลี่ยนไปของาแรงเคลื่อนได้ ดังสูตรที่ว่า

$$\text{Percent regulation} = \frac{|V_{R-NL}| - |V_{R-FL}|}{|V_{R-FL}|} x\, 100$$

ในที่นี้ $|V_{R\text{-}NL}|$ = แรงเคลื่อนที่จุดปลายสายส่ง ขณะที่ไม่มีโหลด (No load)

$|V_{R\text{-}FL}|$ = แรงเคลื่อนที่จุดปลายสายส่ง ขณะที่มีโหลดเต็มที่ (Full load) ในเมื่อ $|V_S|$ มีค่าคงที่

จากรูปที่ 3.8 จะพบว่า ถ้าหากมีการตัดโหลดออก ก็หมายความว่า $V_S = V_R$ หรือแรงเคลื่อนที่จุดต้นสายส่งเท่ากันกับแรงเคลื่อนที่จุดปลายสายส่ง (เพราะเหตุที่ว่า ไม่มีกระแสไหลในสายส่ง) และจากรูปที่ 3.8 ถ้าหากว่าโหลดถูกต่อเข้าไปในวงจรค่าแรงเคลื่อนที่ปลายสายส่ง (V_R) และค่า

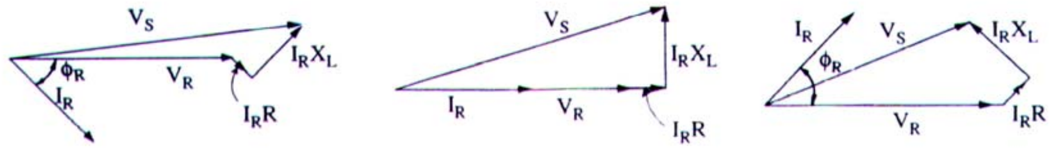
$|V_R| = |V_{R\text{-}FL}|$ ส่วนค่าแรงเคลื่อนที่ต้นสายส่ง (V_S) และค่า $|V_S| = |V_{R\text{-}NL}|$

จากการเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม ในรูปที่ 3.9

กรณี (ก) เมื่อมีโหลดประเภทอินดักทีฟหรือ L ต่ออยู่ทำให้กระแสโหลดทางปลายสายส่งคือ I_R ล้าหลัง (Lagging) แรงเคลื่อน V_R มาก (ให้ทำการวัดเทียบค่าขนาดของ V_R และ V_S ในรูปที่ 3.9 ก , ข และ ค)

กรณี (ข) เมื่อมีโหลดประเภท R หรือ Pure resistive ต่ออยู่นั้นคือ โหลดมีค่า p.f = 100% หรือ I_R มีค่าขนาดมุมเท่ากับ V_R นั่นเอง จะเห็นว่า V_S ในรูป (ข) นี้ยังมีขนาดมากกว่า V_S ในรูป (ค)

กรณี (ค) เมื่อมีโหลดประเภทคาปาซิทีฟ หรือ C ต่ออยู่ทำให้กระแสโหลดทางปลายสายส่ง คือ I_R นำหน้า(Ieading) แรงเคลื่อน V_R เป็นค่ามุมค่าหนึ่ง เช่น โหลดที่มีค่า p.f = 70% (Iead) จากรูป จะเห็นว่า V_S นั้น มีค่าขนาดที่น้อยกว่า V_R หรือน้อยที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบ V_S ในรูปที่ ก, ข และ ค



(ก) โหลดที่มีค่า p.f = 70% (Lag) (ข) โหลดที่มีค่า p.f = 100% (ค) โหลดที่มีค่า p.f = 70% (Iead)

รูปที่ 3.9 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของสายส่งแบบสั้น ที่มีค่าของ p.f แตกต่างกัน 3 ชนิด

กรณี (ข) เมื่อมีโหลดประเภท R หรือ Pure resistive ต่ออยู่นั้นคือ โหลดมีค่า p.f. = 100% หรือ I_R มีค่าขนาดมุมเท่ากับ V_R นั่นเอง จะเห็นว่า V_S ในรูป (ข) นี้ยังมีขนาดมากกว่า V_S ในรูป (ค)

กรณี (ค) เมื่อมีโหลดประเภทคาปาซิทีฟ หรือ C ต่ออยู่ ทำให้กระแสโหลดทางปลายสายส่ง คือ I_R นำหน้า (Ieading) แรงเคลื่อน V_R เป็นค่ามุมค่าหนึ่ง เช่น โหลดที่มีค่า p.f. = 70% (Iead) จากรูปจะเห็นว่า V_S นั้น มีค่าขนาดที่น้อยกว่า V_R หรือน้อยที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบ V_S ในรูปที่ 3.9 ก, ข และ ค

จากทั้งสามกรณีดังกล่าวจะเห็นได้ว่า Voltage regulation จะมีค่ามากสุด ในกรณีที่มี lagging p.f มากที่สุดคือ กรณี (ก) และรองลงมาคือ กรณี (ข) และ Voltage regulation มีค่าเป็นลบ (Negative) ในกรณี (ค) ค่าแรงเคลื่อนปลายสายส่ง (V_R) มีมากกว่าแรงเคลื่อนต้นสายส่ง (V_S) หรือพูดอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าแรงเคลื่อนตอนมีโหลดต่อ (V_{R-FL}) มีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนขณะไม่มีโหลดต่อ (V_{R-NL})

3.4.2 สายส่งความยาวแบบกลาง (Medium transmission line)

สำหรับสายส่งที่มีความยาวตั้งแต่ 80 กิโลเมตรขึ้นไป นั้น จะเกิดมีกระแสประจุ (Charging current) ไหลผ่าน Shunt admittance (Y) เกิดขึ้นมากจนไม่สามารถที่จะทำการละเลยหรือตัดค่าของ Shunt admittance (Y) ออกไปได้ สำหรับสายส่งที่มีช่วงความยาวระหว่าง 80 – 240 กิโลเมตร สามารถที่จะนำหรือรวมเอาค่า C ที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดความยาวของสายส่งไว้เป็นค่า ๆ เดียว (ค่า C ค่าเดียว) โดยการนำ C ที่จับให้เป็นค่าเดียวนี้ ต่อเข้าทางจุดปลายของสายส่งลักษณะของการต่อค่า C นี้ ดังรูปที่ 3.10 มีหลายรูปแบบของวงจรสมมูล ซึ่งโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบด้วยกัน คือ

(ก) ทำการต่อตัว C ที่ปลายสายส่งหรือเรียกกันว่า Localized load – end capacitance

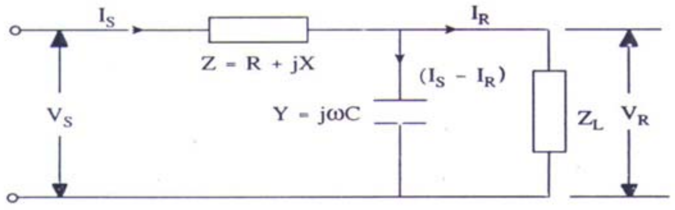
(ข) ทำการต่อตัว C ที่กลางสายส่ง หรือเรียกกันว่าต่อแบบ T (T circuit)

(ค) ทำการต่อตัว C โดยแบ่งออกเป็นค่าเท่า ๆ กัน 2 ค่า และทำการต่อทางต้นสายส่งและทางปลายสายส่งหรือเรียกกันว่า ต่อแบบ π(Pi circuit) ซึ่งแบบ (ค) นี้เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการคำนวณ

(ก) วงจรสมมูลแบบ Localized load-end capacitance

วงจรแบบนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ ABCD ได้ ดังรูปแบบล่าง

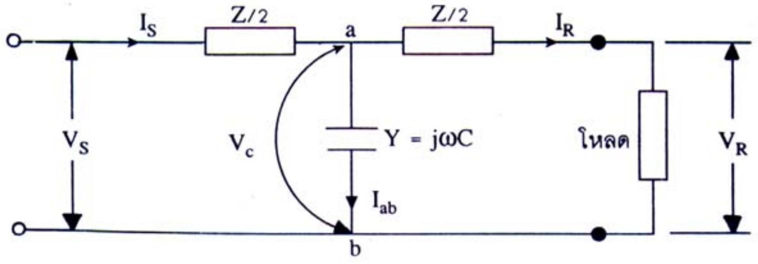
$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+YZ & Z \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$



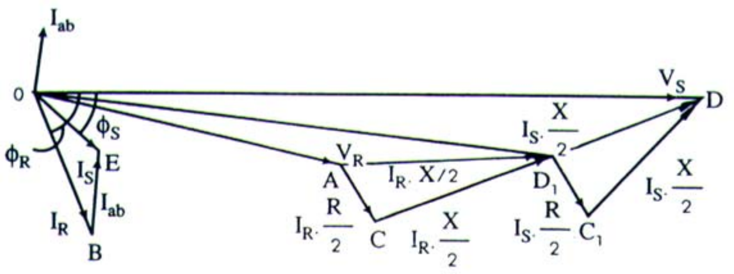
รูปที่ 3.10 แสดงสายส่งความยาวแบบกลาง ที่มี C ต่อที่ปลายสายส่ง (แบบ Localized load-end capacitance)

(ข) วงจรสมมูลแบบ Nomimal-T หรือต่อแบบ T

ถ้าหากว่ามีการต่อค่า Shunt capacitance (C) ที่เป็นค่า ๆ เดียวนี้เข้าที่กึ่งกลางของสายส่ง ก็จะได้รูปวงจรตัว T ดังรูปที่ 3.11 (ก)



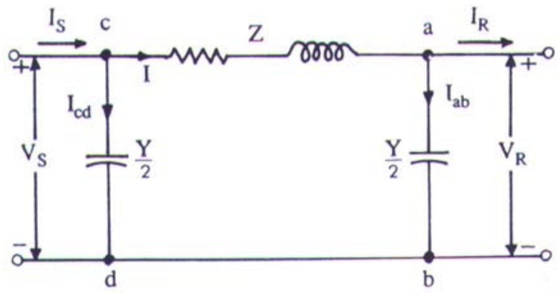
รูปที่ 3.11 (ก) แสดงสายส่งความยาวแบบกลางที่มี C ต่อที่ส่วนกลางสายส่งแบบ T



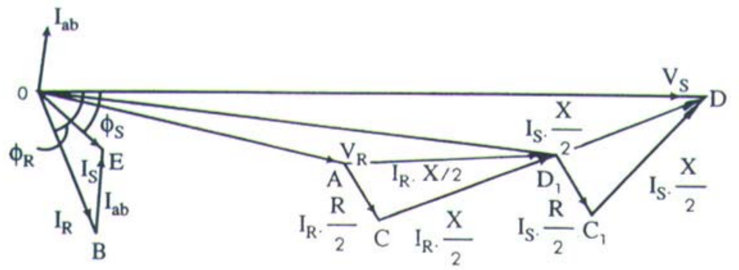
รูปที่ 3.11 (ข) แสดงไดอะแกรมของวงจรแบบ Nominal- T

(ค) วงจรสมมูลแบบ π

ในการคำนวณระบบสายส่งที่มีความยาวปานกลางระหว่าง 80km – 240 km ส่วนสายส่งที่มีความยาวที่น้อยกว่า 80 km นั้น เป็นสายส่งแบบสั้น (Short line) สายส่งที่มีความยาวมากกว่า 240 km จะต้องมีการนำเอาค่า Parameter ต่าง ๆ เข้ามาร่วมในการคำนวณด้วย ในสายส่งที่มีความยาวปานกลางนั้น ค่า Shunt admittance ตามความยาวทั้งหมดคือ Y นั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน คือ Y/2 + Y/2 โดยจะแบ่งให้ไปวางไว้ตรงจุดเข้า (Input) หรือต้นสายส่งและจุดออก (Output) หรือปลายสายส่งลักษณะวงจรแบบนี้เราเรียกว่า แบบ π หรือ Nominal π



รูปที่ 3.12 แสดงวงจรสมมูลแบบ π ของสายส่งความยาวแบบกลาง



รูปที่ 3.13 แสดงไดอะแกรมของวงจรแบบ Nominal π

ดังนั้น จะได้สมการดังต่อไปนี้คือ

$$V_S = V_R + (V_R \cdot \frac{Y}{2} + I_R) Z \tag{3.4}$$

$$= V_R + V_R \cdot \frac{Y}{2} Z + I_R \cdot Z$$

$$V_S = (Z \cdot \frac{Y}{2} + 1) V_R + Z \cdot I_R \tag{3.5}$$

ค่ากระแส I_S นี้ จะถูกแบ่งโดยค่า C/2 ที่อยู่ทางต้นสายและปลายส่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $V_S \cdot \frac{Y}{2}$ และ $V_R \cdot \frac{Y}{2}$ นั่น คือ

$$I_S = V_S \cdot \frac{Y}{2} + V_R \frac{V}{2} + I_R \tag{3.6}$$

แทนค่า V_S ลงในสมการที่ (3.6) จะได้

$$I_S = V_S \cdot \frac{Y}{2} + V_R \cdot \frac{Y}{2} + I_R$$

$$= [(Z \cdot \frac{Y}{2} + 1) V_R + Z I_R] \frac{Y}{2} + V_R \cdot \frac{Y}{2} + I_R$$

$$= [V_R \cdot Z \cdot \frac{Y}{2} + V_R + Z \cdot I_R] \frac{Y}{2} + V_R \cdot \frac{Y}{2} + I_R$$

$$= V_R \cdot Z \frac{Y}{2} \cdot \frac{Y}{2} + V_R \cdot \frac{Y}{2} + Z \cdot I_R \cdot \frac{Y}{2} + V_R \cdot \frac{V}{2} + I_R$$

$$= V_R \cdot Z \frac{Y^2}{4} + V_R \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + (Z \frac{Y}{2} + 1) I_R$$

$$= V_R \cdot Z \cdot \frac{Y^2}{4} + 2 V_R \frac{Y}{2} + (Z \cdot \frac{Y}{2} + 1) I_R$$

$$I_S = V_R \cdot Y\,[Z \cdot \frac{Y}{4} + 1] + [Z \cdot \frac{Y}{2} + 1]\,I_R \qquad (3.7)$$

ในที่สุด จากค่า V_S และ I_S สามารถนำมาเขียนได้ใหม่ คือ

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1+\frac{1}{2}YZ) & Z \\ Y(1+\frac{1}{4}YZ) & (1+\frac{1}{2}YZ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.5) และ (3.7) สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ว่า

$$V_S = A\,V_R + B\,I_R \qquad (3.9)$$

$$I_S = C\,V_R + D\,I_R \qquad (3.10)$$

$$A = Z \cdot \frac{Y}{2} + 1$$

$$B = Z$$

$$C = Y \cdot (Z \cdot \frac{Y}{4} + 1)$$

$$D = Z \cdot \frac{Y}{2} + 1$$

ดังนั้น $A = D$

ค่า A, B, C, D นี้เรียกว่า ค่าคงที่ของวงจรของระบบสายส่ง หรือ Circuit constants of the transmission line

A, D เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย และมีค่าเท่ากัน ถ้าสายมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันโดยตลอด

B และ C มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) และ Mhos (หรือ Siemens) ตามลำดับ

สำหรับค่าคงที่ A, B, C และ D นั้น ก็มีความหมายทางด้านฟิสิกส์ ดังต่อไปนี้ คือ

ก. จากสมการที่ (3.9) ถ้าหากว่าทางด้านขาออก (Output) ไม่มีโหลดใด ๆ ต่ออยู่ นั้นคือ ไม่มีค่ากระแส I_R ไหล หรือ $I_R = 0$

$$V_S = A\,V_R + B\,I_R$$

$$A = \frac{V_S}{V_R}$$

ข. จากสมการที่ (3.9) ถ้าหากว่าทางด้านขาออก (Output) ถูกลัดวงจร ดังนั้น $V_R = O$ นั่นคือ

$$V_S = A V_R + B I_R$$

$$V_S = B I_R$$

$$B = \frac{V_S}{I_R}$$

ในการคำนวณหาค่า Voltage regulation นั้น มีสูตรทั่วไปว่า

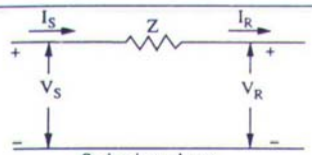
$$\text{Percent regulation} = \frac{\text{V output no load - V output on load}}{\text{V output on load}}$$

$$= \frac{V_R - V_{R\ full\ load}}{V_{R\ full\ load}}$$

$$= \frac{\left|V_S\right| / \left|A\right| - \left|V_{R-FL}\right|}{\left|V_{R-FL}\right|} \qquad (3.11)$$

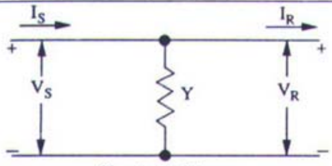
โดยปกติแล้ว ค่า A, B, C, D ไม่ได้ใช้มากนักในการคำนวณ ค่า A, B, C, D คงที่เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของวงจรไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ A, B, C, D ที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามวงจรทางไฟฟ้า



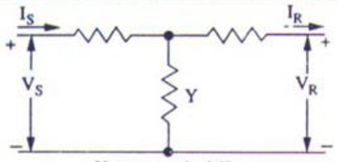
Series impedance

$A = 1$
$B = Z$
$C = 0$
$D = 1$



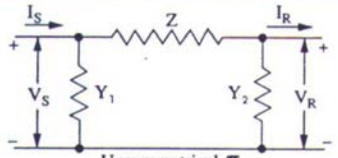
Shunt admittance

$A = 1$
$B = 0$
$C = Y$
$D = 1$



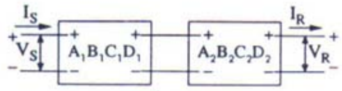
Unsymmetrical T

$A = 1 + YZ_1$
$B = Z_1 + Z_2 + YZ_1Z_2$
$C = Y$
$D = 1 + YZ_2$



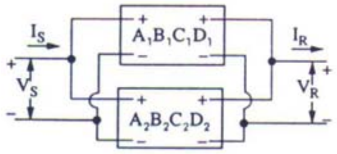
Unsymmetrical π

$A = 1 + Y_2Z$
$B = Z$
$C = Y_1 + Y_2 + ZY_1Y_2$
$D = 1 + Y_1Z$



วงจรต่ออนุกรม

$A = A_1A_2 + B_1C_2$
$B = A_1B_2 + B_1D_2$
$C = A_2C_1 + C_2D_1$
$D = B_2C_1 + D_1D_2$

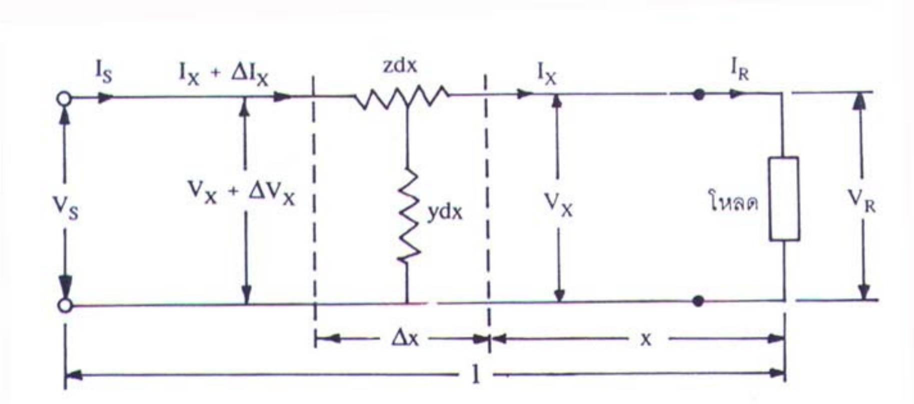


วงจรต่อขนาน

$A = (A_1B_2 + A_2B_1)/(B_1 + B_2)$
$B = B_1B_2/(B_1 + B_2)$
$C = C_1 + C_2 + (A_1 - A_2)(D_2 - D_1)/(B_1 + B_2)$
$D = (B_2D_1 + B_1D_2)/(B_1 + B_2)$

3.4.3 ระบบสายส่งที่มีความยาวมาก หรือสายส่งที่มีความยาวแบบยาว

ในการคำนวณสายส่งใด ๆ ที่มีความยาวเกินกว่า 240 Km ต้องมีความละเอียดในการคำนวณมากกว่าในระบบสายส่งที่มีความยาวระดับปานกลางกล่าวคือ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่า Admittance (Y) นั้น จะถูกจับให้รวมเป็นกลุ่มเป็นก้อนเหมือนแบบก่อนไม่ได้ แต่ค่าพารามิเตอร์ ต่าง ๆ เหล่านี้ จะถูกทำให้กระจายไปอย่างสม่ำเสมอ ตามความยาวของสายส่ง



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสายส่งแบบยาว

ในที่นี้ z = ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมต่อหน่วยความยาวต่อเฟส

y = ค่าแอตมิแตนซ์ขนาดต่อหน่วยความยาวต่อเฟสกับกราวด์ (Shunt admittance per unit Length per phase to neutral)

I = ความยาวของสายส่ง

Z = z.1 = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมทั้งหมดต่อเฟส

Y = y-1 = ค่าแอตมิแตนซ์ขนาดทั้งหมดต่อเฟสกับนิวทรัล

ให้เราพิจารณาชิ้นส่วนเล็ก ๆ (ΔX) ของสายส่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันของแรงเคลื่อนและความแตกต่างกันของกระแส จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่า x เป็นระยะทางจากปลายสุดของสายส่งมายังส่วนของสายส่งสั้น ๆ (ΔX) สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสั้น ๆ นี้ก็คือ z-ΔX และค่า Shunt admittance ก็คือ y-ΔX ส่วนค่าแรงเคลื่อนตรงจุด ΔX ที่มีทิศทางไปทางโหลดนี้มีค่าคือ V ค่า V นี้เป็นค่าคณิตศาสตร์เชิงซ้อน (Complex) ของค่าแรงเคลื่อน (RMS. Voltage) ซึ่งทั้งค่าขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase) จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะความยาวของสายส่ง ดังนั้น ค่าแรงเลื่อนที่มีทิศทางไปยังตัวเยนเนเรเตอร์ตรงจุด ΔX นี้ จะมีค่าเป็น V + ΔV ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของแรงเคลื่อนไปตามทิศทาง x (จากตัวโหลดผู้ใช้ไฟ้าไปยังตัวเยนเนเรเตอร์) นั่นก็คือ

$$\Delta V = I \cdot z \cdot \Delta X \tag{3.12}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta X} = I \cdot z \tag{3.13}$$

ถ้า $\Delta X \longrightarrow 0$ แล้ว ค่าลิมิตของอัตราส่วนของ $\dfrac{\Delta V}{\Delta X}$ ก็จะกลายเป็น

$$dV / dX = I \cdot z \tag{3.14}$$

เช่นเดียวกับค่าของกระแส I ที่ไหลออกมาจากส่วนของ ΔX ที่จะไปยังโหลดค่ากระแส I จะเปลี่ยนแปลงทั้งค่าขนาด (Magnitude) และมุมเฟส (Phase angle) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของสายส่งเสมอ เพราะเหตุที่ว่า ค่า Y หรือ Shunt admittance นี้กระจายอยู่สม่ำเสมอไปตามความยาวของสายส่ง ดังนั้น ค่ากระแสที่จะไหลเข้าส่วนย่อย หรือ Element ของ ΔX ที่ไหลมาจากตัวเยนเนเรเตอร์นี้ ก็คือ $I + \Delta I$ นั้นคือ กระแสที่ไหลเข้าส่วนย่อย หรือ Element ΔX จากเยนเนเรเตอร์ $(I + \Delta I)$ จะมีค่าสูงมากกว่ากระแสที่ออกมาจากส่วนย่อย (Element) ΔX ที่ไหลไปยังโหลดอยู่เป็นจำนวน ΔI

$$\Delta I = V \cdot \Delta y = V \cdot y \cdot \Delta X$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta X} = V \cdot y$$

ซึ่งก็เช่นเดียวกันกับสมการที่ (3.12) และ (3.13) ในเมื่อ $\Delta X \rightarrow 0$

$$\frac{dI}{dX} = V \cdot y \tag{3.15}$$

จากสมการที่ (3.14) ที่ว่า $\dfrac{d^2V}{dX} = I \cdot z$ สามารถสร้างสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) ของสมการที่ (3.14) และ (3.15) เมื่อไปตามแกน x ได้

$$\frac{d^2V}{dX^2} = z \frac{dI}{dX} \tag{3.16}$$

และ

$$\frac{d^2I}{dX^2} = y \frac{dv}{dX} \tag{3.17}$$

ถ้าทำการแทนค่า dI/dx = V-y และ dV/dx = I-z จากสมการที่ (3.15) และ (3.14) ลงใน

$$\frac{d^2V}{dX} = z \cdot y \cdot V \qquad (3.18)$$

และ

$$\frac{d^2I}{dX^2} = z \cdot y \cdot I \qquad (3.19)$$

เมื่อดูในสมการที่ (3.18) จะพบว่าในสมการมีตัวแปรคือ V และ x และในสมการที่ (3.19) จะพบว่ามีตัวแปรคือ I และ x

สำหรับการแก้สมการที่ (3.18) เพื่อหาค่า V และ I ตามลำดับ จะต้องมีการ Differentiate 2 ครั้ง ไปตามระยะทาง x จากจุดกำเนิด โดยมีค่าคงที่ คือ y • z ดังนั้นในการหาวิธีการแก้สมการสำหรับ V เมื่อมีการ Differentiate 2 ครั้ง ไปตามระยะทาง x จะต้องอยู่ในรูปของ y • z •V

สมมติว่า การแก้สมการของสมการที่ (3.18) อยู่ในรูปของ Exponential จะได้ว่า

$$V = A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) + A_2 \cdot \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x) \qquad (3.20)$$

เมื่อมีการ Derivative ค่า V เป็นครั้งที่ 2 เมื่อเทียบกับ x ของสมการที่ (3.20) จะได้

$$\frac{d^2V}{dX^2} = y \cdot z \cdot \underbrace{[A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) + A_2 \cdot \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x)]}_{V} \qquad (3.21)$$

ซึ่งจากสมการที่ (3.21) จะเห็นว่าการ Derivative ครั้งที่ 2 นี้ จะมีค่าเป็น yz เท่าของ V นั่นเอง นั่นคือสมการที่ (3.20) นี้ จะเป็นคำตอบของการแก้สมการที่ (3.18) จากสมการที่ (3.14) คือ

$$\frac{dV}{dx} = I \cdot z \qquad (3.14)$$

โดยการแทนค่า V จากสมการที่ (3.20) ลงไปในสมการที่ (3.14) จะได้

$$\frac{d}{dx}(A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) + A_2 \cdot \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x) = I \cdot z$$

$$I = \frac{1}{z} \cdot \frac{d}{dx}(A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) + A_2.\exp(-\sqrt{y.z} \cdot x)$$

$$= \frac{\sqrt{y.z}}{\sqrt{z^2}} \cdot A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) + (\frac{-\sqrt{y.z}}{\sqrt{z^2}}) A_2 \cdot \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} \cdot A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) - \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} A_2 \cdot \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x)$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} \cdot A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) - \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} A_2 \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x) \quad (3.22\text{ ก})$$

สำหรับการคำนวณหาค่า A_1 และ A_2 นี้ สามารถหาได้โดยการสมมติเงื่อนไขบางประการ เช่น ที่จุดปลายของสายส่ง (Receiving –end) ค่าของ x=o, $V = V_R$ และ $I = I_R$ แทนค่าเหล่านี้ลงไปในสมการที่ (3.20) และ (3.22) จะได้จากสมการที่ (3.20) ที่ว่า

$$V = A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) + A_2 \cdot \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x)$$

เมื่อแทนเงื่อนไข $x = 0$, $V = V_R$, $I = I_R$ ลงไป จะได้ว่า

$$V_R = A_1 \cdot e^{(0)} + A_2 \cdot e^{(0)}$$

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (3.20\text{ ก})$$

และจากสมการที่ (3.22) ที่ว่า

$$I = \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} \cdot A_1 \cdot \exp(\sqrt{y.z} \cdot x) - \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} \cdot A_2 \cdot \exp(-\sqrt{y.z} \cdot x)$$

เมื่อแทนเงื่อนไข $x = 0$, $I = I_R$ ลงไป จะได้

$$I_R = \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} \cdot A_1 \cdot e^{(0)} - \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} \cdot A_2 \cdot e^{(0)}$$

$$I_R = \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} (A_1 - A_2) \quad (3.20\text{ ข})$$

สมมติให้ $Z_C = \sqrt{.z/y}$ และแทนค่าลงในสมการที่ (3.20 ก) และ (3.20 ข) จะได้

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (3.20\text{ ก})$$

$$I_R = \frac{1}{Zc} \cdot (A_1 - A_2)$$

$$Z_C \cdot I_R = A_1 - A_2 \qquad (3.20 ข)$$

จากทั้งสองสมการ เมื่อนำมาบวกและลบกัน จะได้

$$2A_1 = V_R + Z_C \cdot I_R \quad ; \quad V_R - Z_C \cdot I_R = 2A_2$$

$$A_1 = \frac{V_R + I_R.Z_C}{2} \quad : \quad A_2 = \frac{V_R - I_R.Z_C}{2}$$

และให้แทนค่า A_1 และ A_2 ลงในสมการที่ (3.20) และ (3.22 ก) และให้ $\gamma = \sqrt{y.z}$ จะได้

$$V = A_1 e^{\sqrt{Y.Z}X} + A_2 e^{-\sqrt{Y.Z}X}$$

$$V = \frac{(V_R + I_R.Z_C).\,e^{YX}}{2} + \frac{(V_R - I_R.Z_C).\,e^{-YX}}{2} \qquad (3.23)$$

$$I = \frac{[(V_R/Z_C) + I_R].\,e^{YX}}{2} - \frac{[V_R/Z_C - I_R].\,e^{-YX}}{2} \qquad (3.24)$$

ในที่นี้ $Z_C = \sqrt{Z/Y}$ เราเรียกค่า Z_C นี้ว่า Characteristic impedance ของสายส่ง

และ $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$ เราเรียกค่า γ นี้ว่า Propagation constant

จากสมการที่ (3.23) และ (3.24) นี้แสดงให้เห็นว่าถ้าหากว่าทราบทราบค่า V_R, I_R และค่าพารามิเตอร์ (z,y) ของสายส่งแล้ว ก็สามารถที่จะคำนวณหาค่า V, I ที่จุดใด ๆ ของสายส่งที่มีระยะ x ห่างจากปลายสายส่งได้

3.5 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบสายส่ง

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านจุดใดจุดหนึ่งในระบบสายส่งนั้น สามารถคำนวณหาได้ตลอดเวลา ถ้าหากทราบค่าแรงเคลื่อน, กระแส และค่าเพาเวอร์แฟตเตอร์ (cos Θ) ณ จุดนั้น ๆ แต่ว่ารูปแบบของสมการ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งที่สามารถนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางนั้นจะอยู่ในเทอมของค่าคงที่เหล่านี้คือ ค่าคงที่ A, B, C, D เหตุที่นำรูปแบบของสมการนี้มาใช้กันมากก็เพราะว่า รูปแบบของสมการดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้กับวงจรใด ๆ ก็ได้ ที่มีลักษณะเป็นแบบ 2 ขาเข้า และ 2 ขาออก (Two-terminal pair network) จากการทบทวนสมการที่ (3.8) และในการคำนวณหาค่าผลลัพธ์ทางด้านปลายของสายส่งของกระแสด้านปลายสายส่ง (Receiving-end current) หรือ I_R นี้จะหาได้จาก

$$V_S = A \cdot V_R + B \cdot I_R \qquad (3.25)$$

$$I_R = \frac{V_S - A.V_R}{B} \qquad (3.26)$$

ถ้าให้ค่า $A = |A| \angle \alpha \quad : \quad B = |B| \angle \beta$

$V_R = |V_R| \angle 0^\circ \quad : \quad V_S = |V_S| \angle \delta$

จะได้รับ

$$I_R = \frac{|V_S|}{|B|} \angle \delta - \beta \; - \; \frac{|A|.|V_R|}{|B|} \angle \alpha - \beta \qquad (3.27)$$

สำหรับค่า Complex power ตรงที่ปลายสายส่ง (Receiving-end) สามารถหาได้จากสูตร

$$S_R = V_R \cdot I_R^*$$

$$P_R + jQ_R = \frac{|V_S|.|V_R|}{|B|} \angle \beta - \delta \; - \; \frac{|A|.|V_R|^2}{|B|} \angle \beta - \alpha \qquad (3.28\text{ ก})$$

ถ้าแยกสมการที่ (3.28 ก) จะแบ่งออกเป็น Real และ Reactive power ที่ปลายของสายส่ง

$$P_R + jQ_R = \frac{|V_S|.|V_R|}{|B|} \cos(\beta - \delta) + \frac{|V_S|.|V_R|}{|B|} \sin(\beta - \delta)$$

$$- \frac{\{|A|.|V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) - \frac{|A|.|V_R|^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha) \qquad (3.28\text{ ข})$$

ซึ่งจากสมการ (3.28 ข) นี้ ถูกนำไสร้างเป็นรูปที่ 3.14 หรือถ้าต้องการดูรูปแบบให้ง่ายขึ้น ก็ดูที่สมการที่ (3.29) และ (3.30) จากการที่เรารวบรวมเทอมของ cos $(\beta - \alpha)$ ให้อยู่ร่วมกันเพราะว่าอะไรก็ตามที่คูณกับเทอมของ cos จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) ส่วนเทอมที่คูณด้วย sin จะได้เป็นค่า Reactive power ดังต่อไปนี้ คือ

$$\text{Real power } (P_R) = \frac{|V_S|.|V_R|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|.|V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \qquad (3.29)$$

$$\text{Reactive power } (Q_R) = \frac{|V_S|.|V_R|}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A|.|V_R|^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha) \qquad (3.30)$$

ให้สังเกตว่า ค่าของ $P_R + jQ_R$ (Complex power) จากสมการที่ (3.28 ก) นี้ อยู่ในรูปของ Polar และจากการแยกสมการที่ (3.28 ก) ออกไปเป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real power) และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power) ก็สามารถที่จะเขียนค่าเฟสเซอร์ (Phasor) เหล่านี้ ให้อยู่ในระนายเชิงซ้อน (Complex plan) ได้โดยการแบ่งออกเป็นแกนในแนวตั้งและแกนในแนวนอน ซึ่งจะมีค่าวัตต์และวาร์ตามลำดับ จากรูปที่ 3.15 แสดงค่าที่อยู่ในรูปเลขเชิงซ้อน 2 ค่า ที่มาจากสมการที่ (3.28 ก) จากรูปที่ 3.16 แสดงรูปของค่าเฟสเซอร์ (Phasor) ที่เหมือนกันกับในรูปที่ 3.15 แต่จะมีการเลื่อนทั้งแกน x และ

แกน y ออกไป ดังแสดงในรูป ซึ่งรูปนี้จะแสดงค่ากราฟกำลังไฟฟ้า และผลลัพธ์ของค่าขนาดเหล่านี้ก็คือ

$|P_R + jQR|$ ซึ่งทำมุม θ_R กับแนวนอน (Horizontal axis) ซึ่งค่า $|P_R + jQ_R|$ นี้จะเท่ากันกับค่าของ $|I_R|$ ในสมการที่ (3.27) คูณเข้ากับ $|V_R|$ ดังในสมการที่ (3.28 ก)

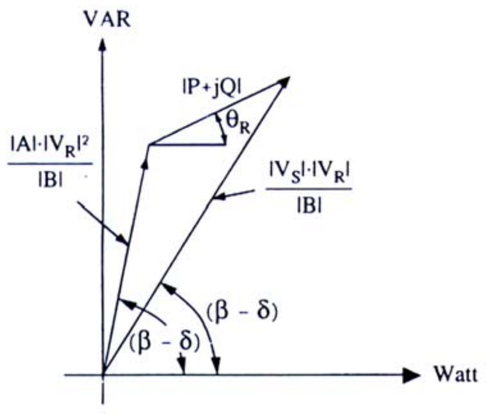
$$|P_R + jQ_R| = |I_R| \cdot |V_R|$$

ถ้าหากว่าแยกค่าของ $|P_R + jQ_R|$ ออกไปเป็นค่าจริง (Real) และค่าจินตนาการ (Imaginary) จะได้ว่า

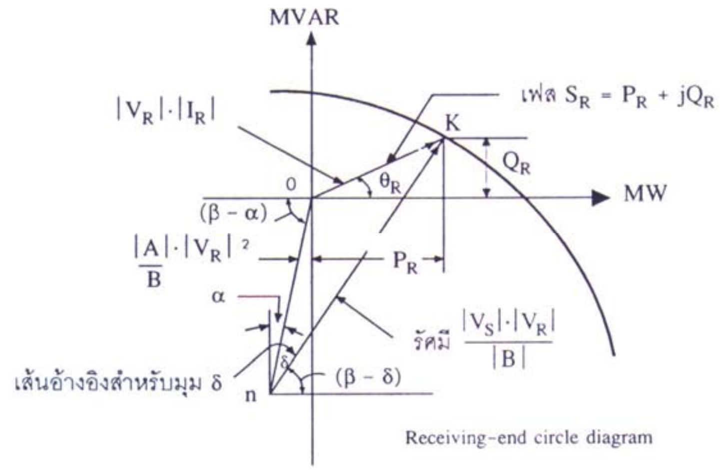
$$P_R = |V_R| \cdot |I_R| \cos\theta_R \quad \text{.....(3.31)}$$

$$Q_R = |V_R| \cdot |I_R| \sin\theta_R \quad \text{.....(3.21)}$$

ในที่นี้ θ_R = ค่ามุม เมื่อ V_R นำหน้า (lead) ค่ากระแส I_R



รูปที่ 3.15 แสดงเฟสเซอร์ (Phassor) ของสมการที่ (3.28 ก) ที่เขียนอยู่ในระนาบของเลขเชิงซ้อนที่มีขนาดและมุม



รูปที่ 3.16 แสดงค่ากราฟของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการที่เลื่อนแกนวัดวัตต์และแกนวาร์ของรูปที่ 3.15

3.6 การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบสายส่ง

สำหรับรูปแบบของระบบสายสส่งไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสายส่งแบบกลาง(Medium length) และระบบสายส่งแบบยาว (Long length) สามารถที่จะทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้านั้น ๆ ได้ โดยวิธีการที่เรียกว่า การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive compensation) การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้ สามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุกรมและในรูปแบบขนาด การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม หรือ Series compensation นี้จะทำได้โดยการนำเอาชุดของคาปิซิเตอร์เข้าไปต่ออนุกรมอยู่ในสายส่งตัวนำในแต่ละเฟสของระบบสายส่ง ส่วนการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนาด หรือ Shunt compensation นี้จะทำได้โดยการนำค่าอินดักทีฟไปต่ออยู่ระหว่างสายส่ง (Line) กับนิวทรัล (Neutral) เพื่อที่จะใช้ลดค่า Shunt susceptance (B_c) บางส่วนหรือลดค่า B_c ของสายส่งไฟฟ้าให้หมดไป ซึ่งค่า Shunt susceptance นี้ จะเกิดขึ้นมากในระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูง ซึ่งการทำเช่นนี้เป็นสิ่งที่จำเป็นมากในระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูง และในขณะที่ปลายสายส่ง (Receiving-end) นั้น ๆ มีโหลดต่ออยู่น้อย (Light load) เพราะว่าเมื่อที่ปลายสายส่ง(Receiving-end) มีโหลดต่ออยู่น้อยก็จะเป็นเหตุที่ทำให้ค่าแรงเคลื่อนมีค่าสูงเพิ่มมากขึ้นกว่าค่าแรงเคลื่อนทำงานปกติ (V_N) ได้

การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสายส่งแบบกลาง (Medium length) และระบบสายส่งแบบยาว (Long length) สามารถที่จะทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า นั้น ๆ ได้ โดยวิธีการที่เรียกว่า การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive compensation) การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้ สามารถทำได้ทั้งในรูปแบบอนุกรมและในรูปแบบขนาน การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม หรือ Series compensation นี้จะทำได้โดยการนำเอาชุดของคาปาซิเตอร์เข้าไปต่ออนุกรมอยู่ในสายส่งตัวนำในแต่ละเฟสของระบบสายส่งส่วนการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบขนาน หรือ Shunt compensation นี้ จะทำได้โดยการนำค่าอินดักทีฟไปต่ออยู่ระหว่างสายส่ง (Line) กับนิวทรัล (Neutral) เพื่อที่จะใช้ลดค่า Shunt susceptance (B_C) บางส่วนหรือลดค่า (B_C) ของสายส่งไฟฟ้าให้หมดไป ซึ่งค่า Shunt susceptance นี้ จะเกิดขึ้นมากในระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูง ซึ่งการทำเช่นนี้เป็นสิ่งที่จำเป็นมากในระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูง และในขณะที่ปลายสายส่ง (Receiving-end) นั้น ๆ มีโหลดต่ออยู่น้อย (Ling load) เพราะว่าเมื่อที่ปลายสายส่ง (Receiving-end) มีโหลดต่ออยู่น้อยก็จะเป็นเหตุที่ทำให้ค่าแรงเคลื่อนมีค่าสุงเพิ่มมากขึ้นกว่าค่าแรงเคลื่อนทำงานปกติ (V_N) ได้

การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม (Series compensation) จะเป็นตัวที่ช่วยลดค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่ในสายส่ง (Line) ลง เพราะค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมอยู่ในสายส่ง (Line) เหล่านี้ จะเป็นต้นเหตุของการเกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่ง (Voltage drop) และค่านี้จะเป็นค่าแฟตเตอร์ที่สำคัญมากที่สุดที่จะยินยอมให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุด (Maximum power) ไหลผ่านระบบสายส่งนั้น ๆ ไปได้ เพื่อที่จะทำให้เราเข้าใจผลของค่าอิมพีแดนซ์ (Series impedance) ต่อ

การส่งผ่านค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากต้นสายส่ง (Sending-end) ไปยังปลายสายส่ง (Receiving-end) ได้เป็นอย่างดีนั้นให้ดูในสมการที่ (3.33) ที่ว่า

$$P_{R.max} = \frac{|V_S|.|V_R|}{|B|} - \frac{|A|.|V_R|^2}{|B|}\cos(\beta-\alpha) \qquad (3.33)$$

จากสมการที่ (3.33) จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะสามารถส่งผ่านระบบสายส่งไฟฟ้านั้น ๆ ไปได้จะขึ้นอยู่กับส่วนกลับของค่าคงที่ของวงจร (B) ซึ่งค่า B นี้ จะเท่ากับค่า Z ถ้าหากว่าวงจรสมมูลของสายส่งไฟฟ้านั้น ๆ เป็นแบบ Nominal π และในวงจรสมมูลแบบ π จะมีค่าเท่ากับ Z (sinh γl) γl และเพราะสาเหตุที่ค่าคงที่ของวงจรตัวอื่น ๆ คือ A. C และ D เป็นค่าที่จะแปรผันไปตามค่า Z ถ้าหากว่าค่า Z เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ (A, C และ D) เหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกับค่าคงที่ B

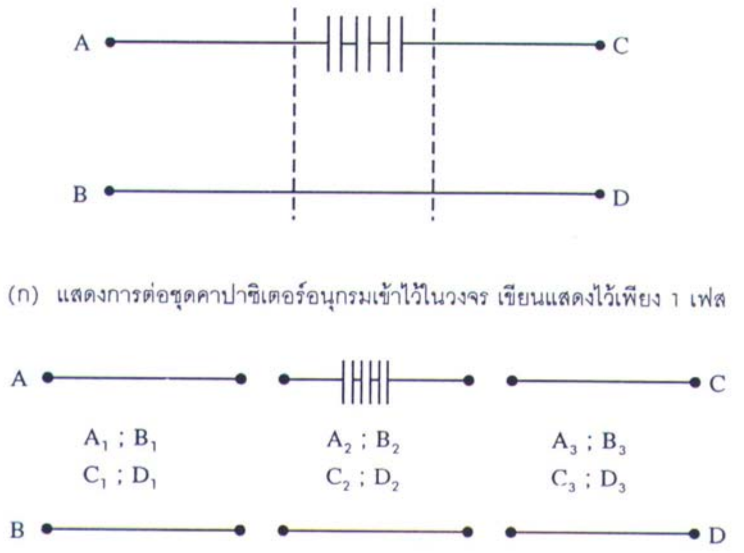
ในการคำนวณคิดค่าขนาดของรีแอกแตนซ์ของตัวชุดคาปาซิเตอร์ (X_C) ที่จะมาใช้ในการต่ออนุกรมอยู่ในวงจรนี้ จะขึ้นอยู่กับค่าของอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (X_L) ทั้งหมดที่มีอยู่ในสายส่งไฟฟ้า (Line) นั้น ๆ ซึ่งเราจะใช้คำว่า Compensation factor ซึ่งค่านี้จะถูกนิยาม ดังนี้

$$\text{Compensation factor} = \frac{X_C}{X_L}$$

ในเมื่อ X_C = ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ ของชุดคาปาซิเตอร์ ที่จะนำมาต่ออนุกรมต่อเฟส

X_L = ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ทั้งหมดของสายส่งไฟฟ้าต่อเฟส

ถ้าหากว่ามีการใช้วงจร Nominal เพื่อใช้ในการแทนสายส่งไฟฟ้า (Line) และตัวชุดคาปาซิเตอร์ (Capacitor bank) ลักษณะทางฟิสิกส์ของการวางชุดคาปาซิเตอร์ไปตามความยาวของสายส่งนี้จะไม่มีความสำคัญ ถ้าหากว่าเราสนใจแต่เพียงเงื่อนไขของการทำงานของต้นสายส่ง (Sending-end) และของปลายสายส่ง (Receiving-end) เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าหากว่าเราสนมจที่จะทราบลักษณะหรือเงื่อนไขของการทำงานของสายส่งในแต่ละจุดไปตามรายะทางความยาวของสายส่งก็จำเป็นต้องนำเอาลักษณะทางฟิสิกส์ของการวางชุดคาปาซิเตอร์มาคิดคำนวณด้วย ซึ่งในการคำนวณนี้ก็สามารถทำได้อย่างง่ายดาย โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของวงจรคือ ค่า A, B, C, D ในแต่ละส่วนของสายส่ง ในแต่ละด้านของชุดคาปาซิเตอร์ (Capacitor bank) ที่ต่ออยู่ และในทำนองเดียวกันก็ให้แทนชุดคาปาซิเตอร์ (Capactior bank) ที่ต่ออยู่โดยการใช้ค่าคงที่ A, B, C และ D เข้าไปใช้ในการคำนวณ ดังรูปในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.17 แสดงส่วนของวงจรเมื่อสายส่งถูกแยกออกมา

ค่าคงที่ของวงจร A, B, C, D ในแต่ละส่วนของสายส่ง – คาปาซิเตอร์ – สายส่ง นี้ สามารถคำนวณหาได้โดยการใช้สมการที่มีอยู่ในตารางที่ 3.2 ที่อยู่ในบทนี้

ยกตัวอย่างของการใช้ชุดคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาหรือรัสเซียที่มีอาณาเขตกว้างขวางนั้น ได้มีการใช้การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม (series compensation) โดยการใช้ Series capacitor เพราะว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วยใหญ่นั้นอยู่ห่างไกลจากผู้ใช้โหลด (Load center) เป็นระยะทางที่ไกลมาก ดังนั้น จึงสามารถยกระดับของค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมอยู่ในสายส่งให้มีค่าแรงเคลื่อนที่สูงขึ้นได้เป็นอย่างดี โดยการใช้วิธีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบอนุกรม (Series compensation) นอกจากนี้ Series capacitor ยังถูกใช้เป็นประโยชน์ในการทำให้ค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่งที่ขนานกันสองระบบ ให้มีความสมดุลหรือเท่ากันได้เป็นอย่างดี

3.7 การแก้ค่าเพาเวอร์แฟตเตอร์ของสายส่ง

การแก้ค่าเพาเวอร์แฟตเตอร์ ทำได้หลายวิธี เช่น

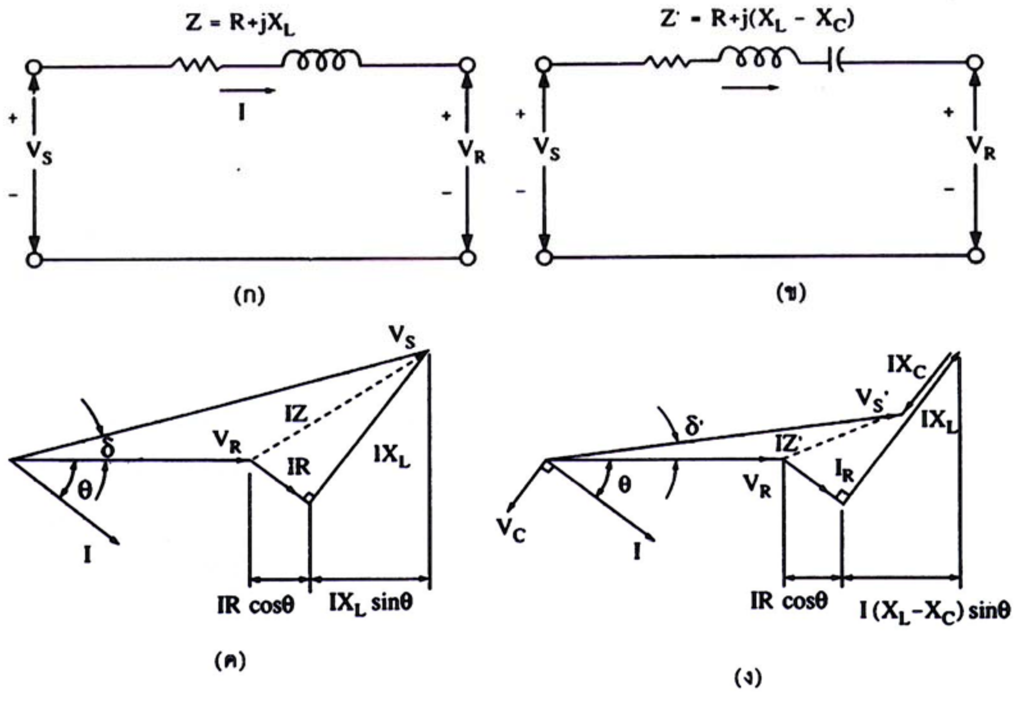
ก. การต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม (Series Capacitor)

Series Capacitor คือ คาปาซิเตอร์ที่ต่ออนุกรมกับสายส่งโดยมีจุดประสงค์เพื่อชดเชย (Compensate) ค่า X_L ที่มีอยู่ในสายส่งนั้น ๆ ซึ่งลักษณะการต่อและค่ามุมต่าง เฟส (Phase diagram) แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม จะให้ข้อดีดังต่อไปนี้

1. ในกรณีที่โหลดมีค่าเพาเวอร์แฟตเตอร์ต่ำ และวงจรสายส่งมีค่า X_L สูง จะทำให้ค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมในสายส่งมีมาก ดังนั้นการลดแรงเคลื่อนตกคร่อมที่มีอยู่ในสายส่ง

สามารถทำได้โดยการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม เพราะว่าค่าคาปาซิแตนซ์จะไปชดเชยกับ X_L ของสายส่งที่เป็น X_L ดังนั้นสภาวะดังกล่าวการต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม (Series capacitor) จะให้ผลดีกว่าการต่อแบบขนาน (Shunt) ที่มีค่า kVAR ของ C เดียวกัน

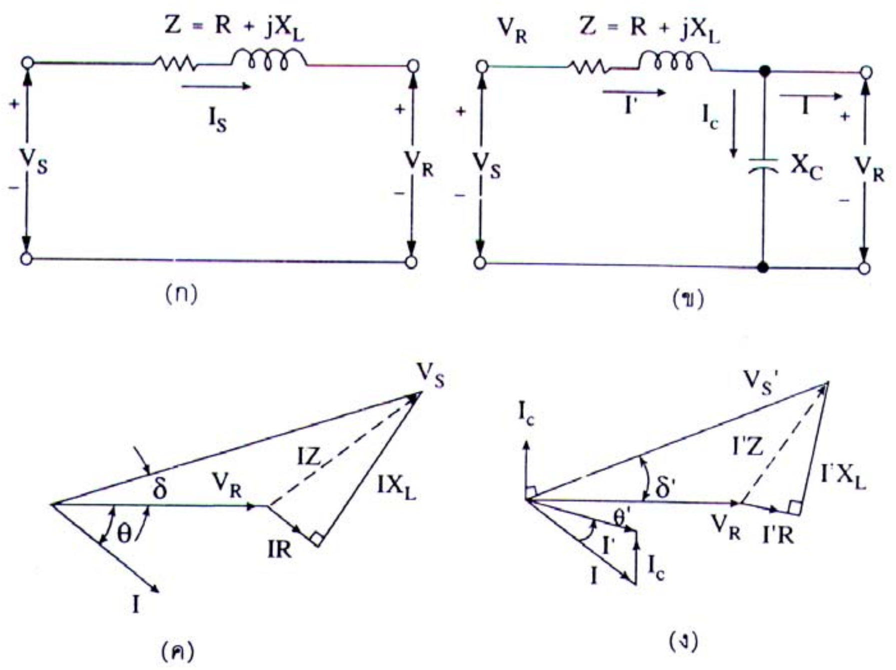
2. คาปาซิเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรม จะสามารถลดแรงเคลื่อนตกคร่อมภายในสายได้โดยไม่มีผลกระทบต่อค่าเพาเวอร์แฟตเตอร์ที่ปลายสายส่ง (Receiving-end power factor) และวงจรอื่น ๆ การต่อคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมนี้ จะไม่มีผลต่อ $I^2.R$ losses แต่จะลดผลของ $I^2.X_L$ losses ในสายส่งเท่านั้น
3. Compoment ของค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมจะถูกกำจัดโดยอัตโนมัติ เนื่องมาจากค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมในตัวคาปาซิเตอร์แบบอนุกรม



รูปที่ 3.18 แสดงการเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนของสายส่งที่มี Power factor เป็นแบบ Lagging (ก) และ (ค) ไม่ต่อ Series capacitor (ข) และ (ง) ต่อ Series capacitor

ข. การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน (Shunt capacitor)

การต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน (Shunt capacitor) คือ คาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานกับสาย ซึ่งใช้มากในระบบไฟฟ้าย่อย โดยการต่อ Shunt capacitor นี้จะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power) ให้แก้โหลดพวก L หรือ Inductive load ซึ่งการทำงานคล้ายกับการทำงานของ Synchronous Generator ที่ทำการต่อ Over-excited โดยลักษณะการต่อคาปาซิเตอร์แบบขนาน ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการเขียนเฟสเซอร์ของแรงเคลื่อนของสายส่งที่มี Power factor เป็นแบบ Lagging (ก) และ (ค) ไม่ต่อ Shunt capacitor ส่วน (ข) และ (ง) ต่อ Shunt capacitor

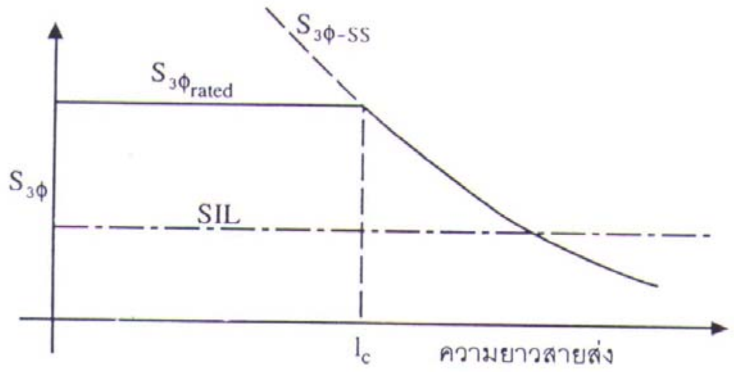
การต่อ Shunt capacitor ในระบบไฟฟ้าให้ผลดีดังนี้

1. สามารถมั่นใจได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าอินดักทีฟ (kVAR) ไปยังโหลด จะต้องมีค่าไม่เกินความสามารถของแหล่งกำเนิดที่จะจ่ายได้
2. สามารถลดขนานกำลังสำรอง (Spare MVA capacity) ของระบบไฟฟ้าที่ต้องมีตัวเยนเนเรเตอร์ อื่น ๆ ที่เผื่อสำรองไว้ให้มีขนาดลดลงได้
3. ลดขนานของกระแสที่จะจ่ายให้โหลดให้มีขนาดลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power losses) ที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งลดลง
4. ทำให้ Voltage regulation ดีขึ้น

3.8 การชดเชยกำลังไฟฟ้าในสายส่ง

ค่า S หรือ Steady-stare Stability limit ของสายส่ง 3 เฟส มีค่าลดลงไปตามขนาดความยาวของสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ถ้าหากว่าความยาวของสายส่งมากกว่าค่าความยาววิกฤต (Critical length) I_C บางค่าแล้ว ค่าของ Steady-stare Stability limit นี้จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการใช้สายส่งทำให้สายส่งไม่สามารถใช้ความสามารถในการถ่ายเทค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางด้านอุณหภูมิ (Full thermal capacity of the line) ได้ ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดจนเรื่องค่าขนาดของแรง

เคลื่อนที่ปลายสายส่งไม่เท่ากันกับค่าแรงเคลื่อนทางด้านต้นสายส่ง เป็นสาเหตุทำให้เราต้องนำเอาการชดเชยในระบบสายส่ง (Line compensation) ชนิดต่าง ๆมาใช้งาน



รูปที่ 3.20 แสดงค่าความสามารถของสายส่งในการถ่ายเทกำลังไฟฟ้า

3.8.1 Series-Capacitive Compensation

เพื่อให้การคำนวณหรือการหาสูตรงานขึ้น ให้ลืมค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทุกชนิด นอกจากค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่ง หรือ X ดังแสดงในรูปที่ 3.21 สำหรับในกรณีนี้

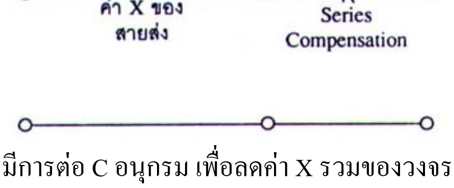
$$A = 1\angle 0^\circ$$

$$B = Z = jX = X\angle 90^\circ$$

$$P_{3\Phi\text{-}SS} = \frac{(V_{L\ rated})^2}{X}$$

ให้สังเกตว่า ค่า $P_{3\phi\text{-}SS}$ นี้ จะเป็นสัดส่วนกลับกันกับค่าความยาวของสายส่งนั่นเองหรือพูดอีกนั้นหนึ่งได้ว่า การที่จะเพิ่มค่าของกำลังไฟฟ้าของสายส่ง หรือ $P_{3\phi\text{-}SS}$ นี้ ทำได้โดยการลดค่า X ของสายส่ง ซึ่งวิธีการลดค่า X วิธีหนึ่งก็คือ การต่อตัวคาปาซิเตอร์ (C) อนุกรมเข้าไปในสายส่ง ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.21 ค่าเปอร์เซนต์ของการแก้หรือการชดเชย (Percent compensation) มีคำจำกัดความที่ว่า

$$\%\ \text{Compensation} = \frac{X_c}{X} \cdot 100\ \%$$



รูปที่ 3.21 แสดงวงจรสมมูลที่มีการต่อ C อนุกรม เพื่อลดค่า X รวมของวงจรสายส่งให้มีค่าน้อยลง

โดยปกติ ค่าเปอร์เซ็นต์ของการชดเชยนั้นจะมีการกำหนดขอบเขตให้อยู่ในช่วง 20% ถึง 80% ถ้าสายส่งไม่มีการชดเชยที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของการชดเชยไม่ถึง 20% แล้วก็ไม่ควรที่จะมีการชดเชยในวงจรเกิดขึ้นเพราะเหตุที่ว่า ค่าการลงทุนตลอดจนความยุ่งยากต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นไม่คุ้มกัน แต่ถ้ามีการชดเชยโดยให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ของการชดเชยที่มีค่าสูงกว่า 80 % ก็ไม่ควรทำเพราะจะทำให้ค่า X รวมในสายส่งมีค่าที่ต่ำมาก ๆ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าสูงมาก ๆ จนไม่สามารถยอมรับได้เมื่อเกิดสภาวะของการลัดวงจรขึ้นที่สายส่ง

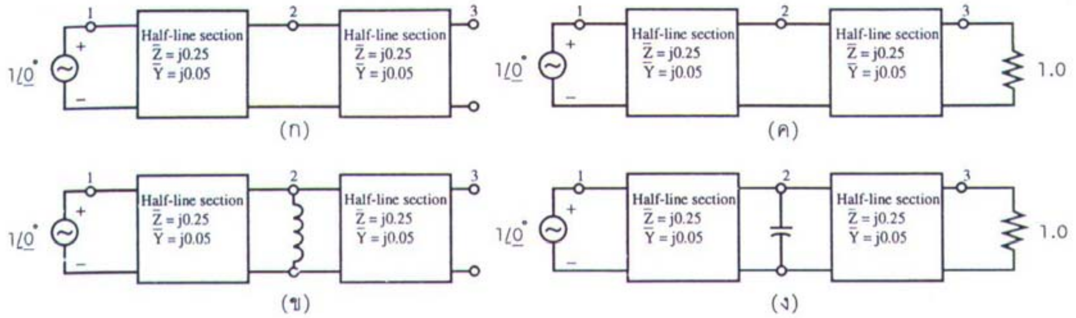
แต่ว่า ในการต่อค่า C อนุกรมเข้าไปในสายส่งก็จะก่อให้เกิดปัญหาบางประการเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่า Subsynchronous resonance เกิดขึ้น ดังที่เคยเรียนมาในวงจรไฟฟ้าทั่ว ๆ ไปแล้วว่า เมื่อใดที่มีการต่อค่า L และค่า C อนุกรมเข้าด้วยกันแล้วก็จะมีการเกิดรีโซแนนซ์ขึ้น ได้ซึ่งเราเรียกว่า Resonant frequency (f_r) ซึ่งค่าความถี่นี้มีค่าความถี่ที่ต่ำกว่า 50 H_Z (Subsynchronous) ด้วยเหตุนี้ ถ้าหากว่ามีค่าแรงเคลื่อนค่าน้อย ๆ อยู่ ณ จุดที่มีค่าความถี่รีโซแนนซ์นี้ก็จะเป็นเหตุที่ทำให้เกิดแรงบิดหมุน (Touque) ที่มีค่าขนาดใหญ่อย่างเพียงพอ โดยมีค่าความถี่ $2(50 - f_R)$ ถ้าหากว่าแรงบิด (Torque) นี้เกิดขึ้น สามารถทำให้เกิดการรีโซแนนซ์ทางกลตามธรรมชาติของตัวเยนเนเรเตอร์และเกิดขึ้นที่ตัวโรเตอร์ของเทอร์ไบน์ (Turbine rotor) เนื่องจากมีการหน่วงค่านี้น้อย ซึ่งทำให้เกิดการสั่นขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการสั่นนี้ก็จะส่งผลต่อความเร็วของโรเตอร์ การสั่นที่ตัวโรเตอร์นี้จะเกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำทำให้ค่าแรงเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นที่ค่าความถี่ (f_r) ส่งผลย้อนกลับทางด้านบวก การสั่นของโรเตอร์จะเป็นเหตุทำให้ค่าขนาดลดน้อยลงรวมทั้งทำให้แกนของเทอร์ไบน์และแกนของตัวเยนเนเรเตอร์เสียหายได้ ตลอดจนทำให้ทั้งหน่วยของตัวเยนเนเรเตอร์เกิดความเสียหายขึ้นได้ การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการติดตั้ง Subsynchronous resonanceในแต่ละเฟสของทรานฟอร์เมอร์ของตัวเยนเนเรเตอร์เพื่อการปิดกั้นการไหลของ Subsynchronous current ที่เกิดขึ้น

3.8.2 วงจรชดเชยแบบต่ออินดักทีฟแบบอนุกรม (Series Inductive Compensation)

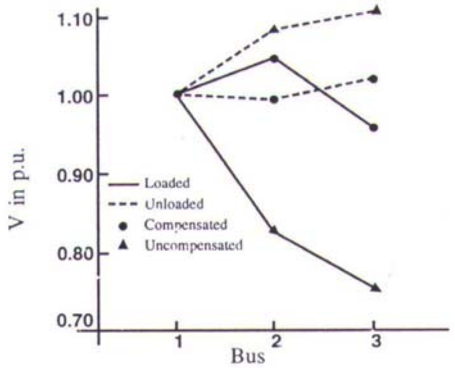
ในบางกรณีสายส่งที่ใช้งานมีระยะทางสั้นมาก ก็เป็นเหตุทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่าต่ำตามไปด้วย ซึ่งก็หมายความว่า ถ้าหากเกิดการลัดวงจร (Fault) ขึ้น กระแสลัดวงจรก็จะมีขนาดที่ใหญ่มาก (I = V/X) จนกระทั่งค่าของ Short circuit capacity นั้น มีค่าสูงเกินกว่าค่า Interrupting capacity ของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งก็หมายความว่า ตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้นั่นเอง วิธีแก้ไขคือ การต่อค่าอินดักทีฟ (X) ต่ออนุกรมเข้าไปในวงจรนั้น ๆ เพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ให้กับวงจร และลดกระแสลัดวงจรให้มีขนาดต่ำลงนั่นเอง

3.8.3 การชดเชยแบบอนุกรม (Shunt compensation)

ในระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้น ถ้าสายส่งใดมีโหลดต่ออยู่น้อย (Light load) ค่าแรงเคลื่อนของสายส่งมีแนวโน้มที่มีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าสายส่งใดมีโหลดต่ออยู่มาก (Heavy load) ค่าแรงเคลื่อนของสายส่งมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลง ลักษณะของผลลัพธ์เหล่านี้สามารถที่หักล้างกันและกันได้ โดยวิธีการเพิ่ม Shunt reactance เพื่อทำการลด (Drop) ค่าแรงเคลื่อนในสายส่งให้ต่ำลงและจากการต่อหรือเพิ่ม Shunt capacitance เพื่อทำการเพิ่ม (Raise) ค่าแรงเคลื่อนในสายส่งให้สูงขึ้นได้ ดังหลักการที่แสดงในรูปที่ 3.22 ค่าขนาดของแรงเคลื่อนของจุด 3 จุดบนสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ในการชดเชยนั้นใช้ค่า B = + 0.560 (Capacitance) และ B = - 0.160 (Inductance)



รูปที่ 3.22 แสดงตัวอย่างการต่อวงจรชดเชยแบบ Shunt-reactive สำหรับสายส่ง



รูปที่ 3.23 แสดงระดับของแรงเคลื่อน (Voltage profile) ของสายส่งที่มีการชดเชย ชนิดต่าง ๆ ตามรูปที่ 3.22

3.9 การเกิดแรงเคลื่อนเกินชั่วขณะในสายส่ง

ค่าแรงเคลื่อนเกินชั่วขณะหรือ Transient overvoltage ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ก็คือ

(ก) การเกิดแรงเคลื่อนเกินชั่วขณะ **อันเนื่องจากสาเหตุภายนอกของสายส่ง** (External transient over voltage) เช่น ฟ้าผ่า หรือ Lightning discharge

(ข) การเกิดแรงเคลื่อนเกิดชั่วขณะ อันเนื่องจากสาเหตุภายในของสายส่ง (Internal transient overvoltage) ก็เช่น การสับสวิตซ์ (On หรือ Off) ของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ การตัดโหลดขนาดใหญ่และการลัดวงจร เป็นต้น

แต่ว่าการเกิดค่าแรงเคลื่อนเกินชั่วขณะภายนอก เช่น ฟ้าผ่า นั้น จะก่อให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังมากที่สุด รองลงมาได้แก่ การสับสวิตซ์ตัดต่อกับวงจรไฟฟ้าของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งก็จะทำให้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าเกิดความเสียหายขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น ในระบบสายส่งที่ใช้ค่าแรงเคลื่อนขนาด 230 kV อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่นำมาใช้ต้องผ่านการทดสอบความสามารถของฉนวน (Insulation level) ให้ได้ตามมาตรฐานเสียก่อน คือ ไม่ต่ำกว่า 3 เท่า หรือมากกว่าค่าของ V_N แล้วแต่กรณี ถ้าในระบบไฟฟ้ากำลังฟ้าผ่าที่มีค่าแรงเคลื่อนสูงเกินเกิดขึ้นแล้ว ก็อาจจะเกิดความเสียหายต่อฉนวนไฟฟ้าขึ้นได้ ซึ่งก็จำเป็นที่จะต้องหามาตรการต่าง ๆ เข้ามาป้องกันมิให้ฟ้าผ่าที่มีค่าแรงเคลื่อนชั่วขณะที่สูงมากกว่า 700 kV นี้ผ่าเข้ากับสายส่งโดยตรง สำหรับวิธีการป้องกันก็เช่น การใช้สาย Ground wire ขึงเหนือสายส่งใช้งานและติดตั้ง Surge arrester เข้าที่สายส่งที่ใช้งานอยู่

ส่วนสายเคเบิลใต้ดินนี้ส่วยใหญ่แล้วจะไม่มีปัญหาใด ๆ กับตัวกับดักฟ้าผ่า (Lightning arrester) เลย แต่อย่างไรก็ตามด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ และทางเทคนิคนี้ สายเคเบิลจึงถูกนำมาใช้แทนระบบสายส่งเหนือหัวในสภาพแวดล้อมบางประการ เช่น วางสายเคเบิลลอดใต้แม่น้ำหรือใช้สายเคเบิลเชื่อมระหว่างเกาะกับแผ่นดินใหญ่แทนที่จะสร้างเสาสายส่งเหนือหัวที่มีความสูงของเสาโครงสร้างให้สูงมากกว่าปกติ

สายส่งไฟฟ้าเหนือหัวสามารถที่จะป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าได้ โดยการใช้สายที่มีศักย์ดิน (Ground potential) 1 เส้น หรือมากกว่า 1 เส้น ต่อวางอยู่เหนือและขนานไปกับสายส่งที่ทำงานจริง สายดินนี้จะทำให้เกิดโซนของการป้องกันขึ้นประมาณ 30° ในแต่ละด้านของแนวตั้ง (Vertical) ของเส้นดิน ซึ่งก็หมายความว่าตัวนำของสายส่งจะอยู่ภายในมุม 60° ของการป้องกัน ดังนั้นเส้นสายดิน (Ground wire) นี้จะถูกฟ้าผ่ามากกว่าสายตัวนำของสายส่งไฟฟ้าเหนือหัว

ฟ้าผ่าที่ผ่าลงไปในสายดิน (Ground wire) หรือสายตัวนำของสายส่งจะแบ่งกระแสฟ้าผ่าออกไปทั้ง 2 ด้าน คือด้านซ้ายมือกับด้านขวามือขนาดของกระแสฟ้าผ่าสูงสุดนี้จะมีขนาดที่สูงต่ำแตกต่างกันออกไป โดยปกติแล้วจะมีค่าของกระแสอยู่ในช่วงของ 10,000 A หรือค่ามากกว่านี้ ในกรณีที่สายตัวนำของสายส่งได้รับฟ้าผ่าโดยตรงก็อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่ออยู่นั้นเกิดความเสียหายขึ้นได้ เนื่องมาจากค่าแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำกับดินซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากประจุไฟฟ้า (Injected charged) ซึ่งเดินทางไปตามสายส่งเหมือนกับกระแส ซึ่งค่าแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าเป็นล้านโวลต์ สำหรับฟ้าผ่าที่ลงที่สายดินก็สามารถทำให้เกิดค่าแรงเคลื่อนสูง (High voltage surge) เกิดขึ้นบนสายตัวนำของสายส่งโดยหลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction) ได้เช่นกัน

การป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากค่าแรงเคลื่อนชั่วขณะนี้ทำได้โดยใช้อุปกรณ์ติดที่ปลายของสายส่งซึ่งก็คือ Lightning arresters อุปกรณ์ป้องกันในอุดมคติ (Ideal arrester) นี้ จะต่อเข้ากับตัวของสายส่งที่เฟสใดเฟสหนึ่งและต่อลงดิน ซึ่งลักษณะของการทำงานมีดังต่อไปนี้คือ

(ก) ตัว Lightning arresters จะเปลี่ยนจากฉนวนทางไฟฟ้ากลายเป็นตัวนำทันที ถ้าค่าแรงเคลื่อนบนสายส่งนั้นมีค่าที่สูงเกินกว่าค่าแรงเคลื่อนที่ออกแบบไว้บนตัวมัน

(ข) ตัว Lightning arresters จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมที่ขั้วของสายส่งให้มีค่าแรงเคลื่อนอยู่ในค่าขนาดที่ออกแบบไว้

(ค) ตัว Lightning arresters จะเป็นตัวเปลี่ยนสภาพของตัวมันเองให้กลายเป็นฉนวนทางไฟฟ้า (Nonconducting) อีกครั้งหนึ่ง ถ้าหากว่าค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมระหว่างสายเฟสกับนิวทรัลที่ตกคร่อมที่ตัวมัน มีค่าของแรงเคลื่อนต่ำกว่าที่ได้ออกแบบไว้ให้กับตัว Lighthing arresters

หลักการทำงานของกับดักฟ้าผ่า (Arrester) นี้มีวิธีการทำงานโดยอาศัยช่องว่างของตัวนำที่อยู่ในอุปกรณ์ทั้ง 2 ข้าง เมื่อค่าแรงเคลื่อนสูงเกินชั่วขณะ (Surge voltage) มีค่าสูงจนถึงค่า ๆ หนึ่งระยะห่างของช่องว่างของอากาศ (Gap) ซึ่งได้ถูกออกแบบไว้ทำให้เกิดการอาร์ค (Are) ขึ้นตามเส้นทางการเกิด (Ionized) และกระแสนี้ก็จะไหลลงดิน ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ เพราะเมื่อการเกิด Surge นั้นหายไป เส้นทางของการเกิด (Ionized) ลงดินนี้ ก็จะเป็นทางเดินให้กับกระแสที่ส่งมาจากตัวเยนเนเรเตอร์ไหลผ่านๆ ไฟอาร์ค (Arc flame) ลงดินได้ต่อไป การอาร์คลงดินของสายส่งนี้จะสามารถทำการดับได้โดยการเปิดวงจร (เปิดหน้าคอนแทค) ของตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์นั่นเอง

ตัวกับดักฟ้าผ่า (Arrester) ที่มีความสามารถในการดับการอารค์ อันเนื่องจากการไหลของกระแส 50 Hz ลงดินได้ถูกพัฒนาต่อมา ตัวกับดักฟ้าผ่าถูกทำขึ้นจากตัวต้านทานที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear resister) ต่ออนุกรมเข้ากับช่องว่างอากาศ (Air gap) ตัวต้านทานของ R ชนิดไม่เป็นเส้นตรงจะลดค่าขนาดของตัวมันเองอย่างรวดเร็ว ตามค่าขนาดของแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมตัว R ชนิดนี้ และเมื่อเกิดการอาร์คขึ้นเนื่องจากค่าแรงเคลื่อนเกินชั่วขณะ (Voltage surge) นี้เกิดขึ้น กระแสไฟฟ้าก็จะโหลดลงดิน โดยผ่านค่าความต้านทานต่ำของ R ชนิดนี้ หลังจากค่าแรงเคลื่อนชั่วขณะนี้หมดลงค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมตัวกับดักฟ้าผ่า ก็จะกลับมาเป็นค่าแรงเคลื่อนปกติอีกครั้งหนึ่ง ตัวความต้านทานนี้ก็จะเพิ่มตัวมันเองขึ้นไป ส่งผลทำให้ไปจำกัดค่าขนาดของการไหลของกระแสอาร์ค (Arc current) ให้มีค่าลดน้อย ลงจนกระทั่งช่องว่างอากาศ (Air gap) นี้ตัดค่ากระแสน้อย ๆ นี้ออกไป การดับอาร์ค (Quenching) นี้สามารถทำได้ โดยการทำ Deionizing การอาร์คโดยทำให้ลำของการอาร์คยาวขึ้นและทำให้การอาร์คเย็นตัวลง (Cooling) โดยใช้หลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างแผ่นฉนวนที่มีอยู่

ตัวกับดักฟ้าผ่าในปัจจุบันได้ทำขึ้นจากสารพวก Zinc oxide แทนสารพวก Silicon carbide ค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อม R แบบ Zinc oxide นี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าจะมีกระแสขนาดใหญ่ ๆ

ไหลตามก็หมายความว่าค่าความต้านทานในขณะที่มีค่าของแรงเคลื่อนทำงานปกติ มีค่าสูงจนไม่จำเป็นที่ต้องมีการทำช่องอากาศ (Air gap) อยู่ด้วย เพื่อที่จะจำกัดค่าขนาดของกระแสที่มีความถี่ 50 Hz ที่ค่าแรงเคลื่อนปกติรวมอยู่ด้วย

บทที่ 4
ค่าระบบเปอร์เซ็นต์ และค่าระบบเปอร์ยูนิต

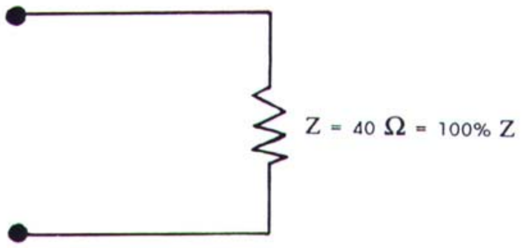
4.1 คำนำ

โดยปกติแล้วในการคำนวณทางไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าทั่ว ๆ หน่วยที่ใช้คำนวณมักจะอยู่ในเทอมของโวลต์ แอมแปร์ และโอห์ม ซึ่งปัญหาต่าง ๆ ที่คำนวณในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่ก็อยู่ในเทอมเหล่านี้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ดี ถ้าต้องการให้การคำนวณง่ายขึ้นและสะดวกขึ้น เราจะคำนวณปริมาณทางไฟฟ้า (Electrical Quantities) เหล่านี้ให้อยู่ในเทอมของเปอร์เซ็นต์ (Percent) หรือต่อหน่วย (Per-unit) โดยมีการเลือกใช้ฐานของการคำนวณ (Base) เป็นค่าใด ๆ ก็ได้และโดยเฉพาะอย่างยิ่งรายละเอียดทางเทคนิคและคุณสมบัติของเครื่องจักรกลทางไฟฟ้านั้น ผู้ออกแบบและบริษัทผู้ผลิตมักจะกำหนดค่าให้อยู่ในเทอมของเปอร์เซ็นต์ (Percent) หรือ Per-unit เสมอ

4.2 ระบบเปอร์เซ็นต์ (The Percentage System)

ให้เราพิจารณาดูค่า Z ในรูปที่ 4.1 โดยสมมติให้ค่านี้คงที่เท่ากับ 50 โอห์ม และสมมติให้ใช้ค่า 40 โอห์มนี้เป็นค่าอ้างอิง (Reference) นั่นคือ Z เท่ากับ 40 โอห์ม ซึ่งก็เท่ากับ 100% ของค่าแรงเคลื่อนถูกจ่ายให้กับค่าอิมพีแดนซ์ 40 โอห์ม (100 % ค่าอิมพีแดนซ์) ก็จะให้ค่ากระแสเท่ากับ 5 แอมแปร์ ซึ่งค่า 5 A นี้ก็คือ ค่า 100 % ของค่ากระแสนั่นเอง ถ้าคิดต่อไปค่ากำลังไฟฟ้าจะได้จาก 5 A คูณกับ 200 V นั่นคือ 1000 VA ซึ่งค่านี้ก็คือ 100 % ของค่า VA นั่นเอง
ค่าเหล่านี้จะมีค่าเป็น 100 % ของค่าอ้างอิง (Base value) ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Base impedance	40	Ohms	100 % Z
Base voltage	200	Volts	100 % V
Base current	200	Amperes	100 %
Base volt-amperes	1000	Volt-Amperes	100 % VA



รูปที่ 4.1 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ง่าย ๆ

ถ้าหากค่า Z = 50 Ohms เมื่อเปรียบเทียบกับค่า Base impedance ก็คือ

$$Z = \frac{50 \text{ Ohms}}{40 \text{ Ohms}} = 125\ \%$$

ถ้าหากค่า I = 4 A เมื่อเปรียบเทียบกับค่า Base current ก็คือ

$$I = \frac{4 \text{ A}}{5 \text{ A}} = 80\ \%$$

ถ้าหากว่าค่า V = 150 V เมื่อเปรียบเทียบกับค่า Base voltage

$$V = \frac{150 \text{ V}}{200 \text{ V}} = 75\ \%$$

รูปแบบของ Percent system นี้ จะไม่สะดวกในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพราะว่าต้องเขียนเปอร์เซ็นต์ลงไปในสูตรต่าง ๆ ด้วยเสมอ มิฉะนั้นแล้วก็อาจจะเกิดความเข้าใจผิดได้ และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือ โดยปกติเรามักจะไม่นิยมการเขียน % ลงในสูตรต่าง ๆ เช่น

$$V = I \times Z \quad \text{หรือ} \quad V\% = I\% \times Z$$

ตัวอย่างที่ 4.1 ถ้า I = 80%(4 A) ในขณะที่ค่า Z = 150%(6 Ohms)ถามว่าค่าของแรงเคลื่อนจะมีค่าเท่าใด?

วิธีทำ

$$V = I \times Z = 80 \times 150 = 12000\%$$

ตอบ

ลักษณะของผลลัพธ์นี้เมื่อคิดเป็นค่าแรงเคลื่อน (Base voltage) = 200 V ก็คือ 24,000 V นั่นเอง (ค่าที่คำนวณได้จาก 12,000 %) ซึ่งแท้ที่จริงแล้ว ค่าคำตอบของ V นี้คือ V = 4 A X 6 Ohms = 240 Volt นั่นเอง และจากตัวอย่างของการคำนวณแสดงให้เห็นความผิดพลาดอันที่จะเกิดขึ้นได้จากการนำค่าของเปอร์เซ็นต์ (Percent system) มาใช้ในการคำนวณ ด้วยเหตุนี้เพื่อการหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดอันจะเกิดขึ้นได้เสมอ เราจึงนิยมใช้ค่า Per-unit system กันมากกว่าแทนที่จะใช้ Percent system มาทำการคำนวณ

4.3 ระบบ Per-unit (The Per-unit system)

Per-unit system นี้ก็เหมือนกันกับระบบเปอร์เซ็นต์ (Percent system) ยกเว้นแต่ว่าค่าเหล่านี้จะอยู่ในรูปของทศนิยม (Decimal fraction) แทนที่จะเป็นค่าของ Percentage ดังนั้น ค่า Base quantities ทั้งหมด จึงจะมีค่าเป็น 1 (Unity) แทนที่จะเป็นค่า 100%

ดังตัวอย่างวิธีการเขียนค่า Per-unit

Base impedance	40	Ohms	คือ	1.0 p.u.
Base votage	200	Volts	คือ	1.0 p.u.
Base current	5	Amperes	คือ	1.0 p.u.
Base volt-amperes	1000	Volt-Amperes	คือ	1.0 p.u.

และนั่นก็คือ

50 Ohms	ก็คือ	1.25	p.u.
4 Amperes	ก็คือ	0.8	p.u.
150 Volts	ก็คือ	0.75	p.u.

ค่า Per-unit system นี้ มีข้อดีมากมาย ถ้าหากว่าจะนำค่า Base quantities เหล่านี้ไปทำการคำนวณต่อไป ตัวอย่างเช่น

ถ้า I = 0.8 p.u.(4 Amperes) และ Z = 1.5 p.u. (60 Ohms)

V = I X Z = 0.8 x 1.5 = 1.2 p.u. Voltage **ตอบ**

ซึ่งจะเห็นได้ว่า 1.2 p.u. = 240 Volts ซึ่งเป็นคำตอบที่ถูกต้อง มิใช่ค่า 12,000 Volt ดังในตัวอย่างของ Percent system ถ้าหากว่าค่า Base quantities เหล่านี้ถูกเขียนเป็นสูตร จะได้สูตรทั่ว ๆ ไปว่า

$$V_{base} = I_{base} \times Z_{base} \quad ....4.1$$

$$VA_{base} = V_{base} \times I_{base} \quad ....4.2$$

จากสูตรจะเห็นว่า ถ้าหากทราบค่าใด ๆก็ตามเพียง 2 ค่าจากทั้งหมด 4 ค่า ค่าอื่น ๆ อีก 2 ค่าก็สามารถคำนวณหาได้อย่างง่ายดาย ในการคำนวณโดยทั่วไปแล้ว มักจะกำหนดค่า Base voltage และค่า Base volt-amperes มาให้ ดังนั้น ค่า Base current และ Base impedance ก็สามารถที่จะคำนวณได้

จากค่า Base voltage และ Base volt-amperes

ค่าที่แท้จริงสามารถคำนวณหาได้จากค่า Per-unit ต่างๆ ดังสูตรต่อไปนี้

$$Z \text{ (Ohms)} = Z_{p.u.} \times Z_{base} \quad .....(4.3)$$

$$I \text{ (Amps)} = I_{p.u.} \times I_{base} \quad .....(4.4)$$

$$V \text{ (Volts)} = V_{p.u.} \times V_{base} \quad .....(4.5)$$

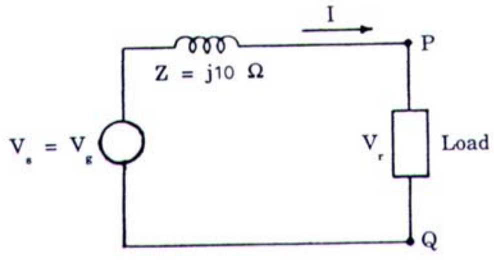
$$VA \text{ (Volt - Ampere)} = VA_{p.u.} \times VA_{base} \quad .....(4.6)$$

จากตัวอย่างที่ยกมาเปรียบเทียบทั้งระบบเปอร์เซ็นต์ (Percent system) และระบบหน่วย (Per-unit system) จะเห็นว่าการใช้ Per-unit system นั้น จะช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ในวงจรไฟฟ้าให้ง่ายขึ้น ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ถ้าหากว่าเราจะใช้การคำนวณตามวิธีปกติทั่ว ๆ ไป กล่าวคือ ใช้การคำนวณที่อยู่ในรูปของโวลต์และแอมแปร์ เราจะต้องคำนวณค่าแรงเคลื่อนหลาย ๆ ระดับที่อยู่ในระบบไฟฟ้านั้น ๆ เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ รวมทั้งจะต้องโอนย้ายค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าระดับแรงเคลื่อนที่แตกต่างกันอยู่นี้ให้ไปอยู่ในระดับแรงเคลื่อนเดียวกัน ซึ่งจะต่างกับการคำนวณตามวิธีการแบบ Per-unit system

ในระบบหน่วย (Per-unit system) ของระบบไฟฟ้านั้น ระดับค่าแรงเคลื่อนต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างกันอยู่จะไม่เข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณ เพราะในระบบนี้จะมีค่าของแรงเคลื่อนเพียงระบบเดียว ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเยนเนเรเตอร์ทรานฟอร์เมอร์และสายส่ง (Line) ที่มีระดับแรงเคลื่อนที่แตกต่างกันอยู่ จะถูกลดค่าลงเป็นค่าอิมพีแดนซ์อย่างง่าย ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ต่อไป ข้อดีของระบบหน่วย (Per-unit system) ประการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลทางไฟฟ้า เช่น เยนเนเรเตอร์และทรานฟอร์เมอร์ ก็คือ เมื่อค่ารีแอกแตนซ์ต่าง ๆ ถูกเขียนโดยใช้ระบบหน่วยนี้แล้ว ส่วนใหญ่จะมีค่าที่ค่อนข้างเท่ากัน เพราะค่า Per-unit system นี้จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าขนาด (kW) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้านั่น ๆ ตัวอย่างเช่น ทรานฟอร์เมอร์ตัวหนึ่งขนาด 20 kVA มีค่ารีแอกแตนซ์ 6% หรือ 0.06 p.u. และทรานฟอร์เมอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าคือ 200,000 kVA ซึ่งอาจจะมีค่ารีแอกแตนซ์ 6% หรือ 0.06 p.u. ได้เช่นเดียวกัน

4.4 การคำนวณหา Per-unit ของเยนเนเรเตอร์

ให้ทำการพิจารณาวงจรของเยนเนเรเตอร์ ตามรูปที่ 4.2 โดยสมมติให้ตัวเยนเนเรเตอร์มีค่าดังต่อไปนี้ คือ 1,000 VA ; 200 V ให้คำนวณหาค่า I_n



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรสมมูลของเยนเนเรเตอร์

ถ้าจะเขียนค่า Base ของตัวเยนเนเรเตอร์ ก็จะได้ค่าดังต่อไปนี้

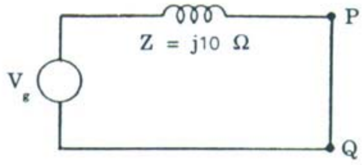
Base volt-amperes		1,000	VA
Base volts	(V_{base} หรือ V_b)	200	V

Base current 5 V

Base impedance (Z_{base} หรือ Z_b) 40 Ohms

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า ค่าอิมพีแดนซ์ภายในของตัวเยนเนเรเตอร์เท่ากับ 10 Ohms (Z=j10 Ohms) ซึ่งค่านี้ (10 Ohms/40 Ohms) จะเท่ากับ 0.25 ของ Z_{base} หรือ 25 % หรือ 0.25 Per-unit ของ Base impedance นั่นเอง

ถ้าสมมติว่าทางด้านโหลดหรือทางขั้นต่อโหลดคือ PQ ถูกลัดวงจรเข้าด้วยกันดังรูปที่ 4.3 ถามว่าตัวเยนเนเรเตอร์ต้องมีค่า V_g เท่าใด? จึงจะทำให้มี I_n ที่มีค่าเท่ากับ 5A ไหลได้เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น



รูปที่ 4.3 แสดงการลัดวงจรที่ขั้วของเยนเนเรเตอร์

และ $V_g = I_n \times Z = 5 \times 10$ Ohms $= 50$ V

นั่นคือ ต้องการค่าแรงเคลื่อน (V_g) เพียง 50 V หรือ 50 V/200V = 0.25% ของ V_{base} หรือ 0.25 Per-unit นั่นเอง

จากการคำนวณที่ผ่านมาจะพบข้อสังเกตบางประการที่ว่า ค่าของแรงเคลื่อนที่ใช้ในการทำให้เกิดการไหลของกระแสลัดวงจรขนาด 5 A เมื่อตัวเยนเนเรเตอร์ลัดวงจรอยู่จะมีค่า Per-unit voltage เท่ากันกับค่า Per-unit impedance ของเยนเนเรเตอร์

4.5 การคำนวณหาค่า Per-unit ของทรานฟอร์เมอร์

ให้ทำการพิจารณาค่าเทคนิคของทรานฟอร์เมอร์ตัวหนึ่ง คือ

2,000 VA 200 V/400 V

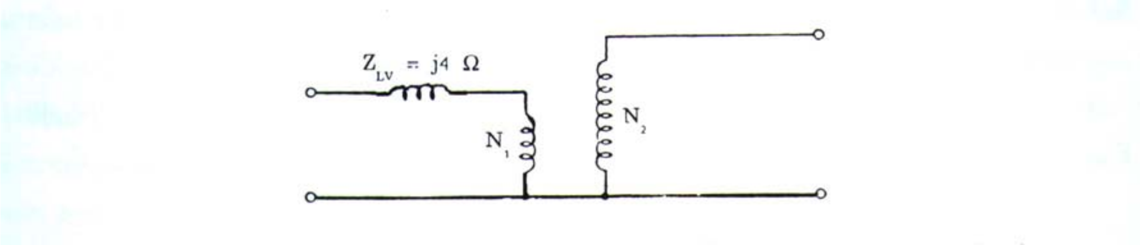
จากรูปจะเห็นว่า ค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดได้ถูกย้ายไปไว้ทางด้านแรงเคลื่อนต่ำ (Low voltage side) ดังรูปที่ 4.4 ให้ทำการคำนวณหาค่า Per-unit impedance ของทรานฟอร์เมอร์ตัวนี้ โดยมี Base quantities เป็นค่าขนาดของการทำงานปกติ หรือ Rated value ของทรานฟอร์เมอร์ดังต่อไปนี้

** **ทางด้านแรงเคลื่อนที่ต่ำใช้ค่า Base ดังต่อไปนี้**

Base volt-amperes 2000 VA

Base voltage 200 V

Base current	10	A
Base impedance	20	Ohms



รูปที่ 4.4 แสดงวงจรสมมูลของทรานฟอร์เมอร์ที่มีการย้ายค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมด มาอยู่ทางด้านแรงเคลื่อนต่ำ (LV)

ค่าอิมพีแดนซ์ของทรานฟอร์เมอร์ (p.u.) ก็คือ

$$Zp.u. = \frac{Z_{Ohms}}{Z_{base}} = \frac{4}{20} = 0.20 \text{ p.u.}$$ **ตอบ**

** **ทางด้านแรงเคลื่อนสูง**

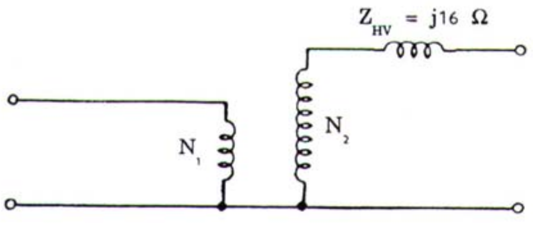
ก่อนอื่นต้องทำการโอนค่าอิมพีแดนซ์ที่อยู่ทางด้านแรงเคลื่อนต่ำ คือ j4 Ohms ให้ไปอยู่ทางด้านแรงเคลื่อนสูงเสียก่อน นั่นคือ

$$Z_{HV} = Z_{HV} \text{ x} \frac{(N_2)^2}{(N_1)^2} = 4 \text{ x} \frac{(400 \text{ V})^2}{(200 \text{ V})^2} = 16 \text{ Ohms}$$

รูปวงจรสมมูลของทรานฟอร์เมอร์ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 สำหรับค่า Base quantities ที่อยู่ทางด้านแรงเคลื่อนสูง (High Voltage side) เราสมมติให้มีค่าดังนี้

Base volt-amperes	2000	VA
Base voltage	400	V
Base current	5	A
Base impedance	80	Ohms $\left(= \frac{400^2}{2000} \right)$

ค่าอิมพีแดนซ์ของทรานฟอร์เมอร์ (p.u.) ทางด้านแรงเคลื่อนสูงคือ



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรสมมูลของทรานฟอร์เมอร์ที่มีการย้ายค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมด
มาอยู่ทางด้านแรงเคลื่อนสูง (High Voltage side หรือ HV)

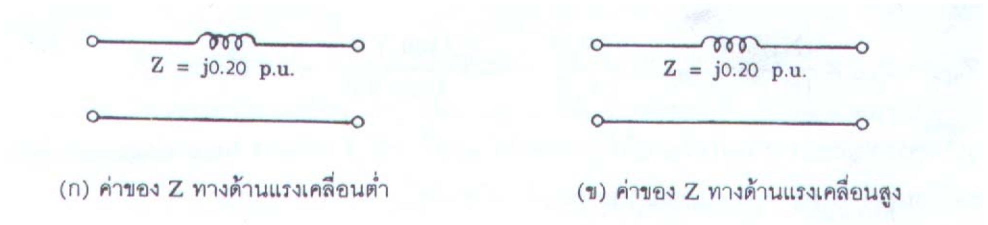
$$Z = \frac{16\,Ohms}{80\,Ohms} = 0.20 \quad p.u.$$

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าในการคำนวณหาค่า Per-unit impedance นี้

1) สามารถหาได้ทั้งทางด้านแรงเคลื่อนต่ำและทางด้านแรงเคลื่อนสูง
2) การใช้ค่า Base ก็สามารถสมมติ หรือให้ค่าใด ๆ ก็ได้ทั้งทางด้านแรงเคลื่อนต่ำและแรงเคลื่อนสูง

จากรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) แสดงถึง วงจรสมมูลของทรานฟอร์เมอร์ทั้งทางด้านแรงเคลื่อนต่ำและ ทางด้านแรงเคลื่อนสูง

จากตัวอย่างการคำนวณหาค่า Per-unit impedance ของทรานฟอร์เมอร์ทั้งที่อยู่ทางด้านแรงเคลื่อนต่ำและที่อยู่ทางด้านแรงเคลื่อนสูง แสดงให้เห็นว่าค่า Per-unit impedance นี้นั้น จะมีค่าที่เท่ากันเสมอไม่ว่าจะมีค่าแรงเคลื่อนอยู่ในระดับใดก็ตาม



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรสมมูลของทรานฟอร์เมอร์ที่มีหน่วยเป็น Per – Unit ที่เท่ากัน

4.6 การคำนวณหาค่า Per-unit ของสายไฟและสายเคเบิล

โดยปกติแล้วในการวางสายส่งเหนือหัว (Overhead line) หรือสายเคเบิลที่ฝังอยู่ใต้ดินนั้น ส่วนใหญ่แล้ว เราจะรู้ขนาดของสายไฟฟ้า (Wire size) และระยะห่างของสายไฟ (Spacing) แต่ละเส้นของสายส่งเหนือหัวเสมอ ด้วยเหตุนี้ ทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่อยู่ในวงจรได้เสมอ ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเพื่อให้เป็นค่า Per-unit impedance นั้น ก็จำเป็นต้องรู้หรือทราบค่า Base impedance ของวงจรเสียก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ค่า Base VA ใด ๆ และค่า Base V ใด ๆ ก็ได้ แต่โดยทั่วไปเรามักใช้ค่าปกติ (Rated) ของมันเอง เช่น ค่าแรงเคลื่อนที่อาจใช้ค่าแรงเคลื่อนของสายส่งก็ได้ ส่วนค่า Volt-Ampere นั้น ก็ใช้ค่าของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งที่อยู่ในระบบก็ได้ สำหรับการคำนวณหาค่า Per-unit impedance นั้น สามารถคำนวณได้โดยการใช้สูตรดังต่อไปนี้ คือ

$$Z = \frac{Z_{Ohms}}{Z_{Ohms}} = \frac{Z_{Ohms} \;\; x \;\; VA_{base}}{V_{base}^{\;2}}$$

หรือ

$$Zp.u.(new) = \frac{Z_{given} \times VA_{base(new)}}{[V_{base(new)}]^2}$$

** ต้องระมัดระวังในการคำนวณว่าอะไรคือ Base line voltage และสูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงเคลื่อนที่จะต้องแทนลงในสูตรนี้ จะเป็นค่า Line to line voltage หรือ Phase voltage (Line to ground voltage)

4.7 การนำเอาระบบ Per-unit ไปใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในระบบสายส่งไฟฟ้ากำลัง จะมีระดับของแรงเคลื่อนที่จะใช้ในการทำงานค่าหนึ่งเสมอ สำหรับหน่วยที่ใช้กันมากในระบบสายส่งแรงเคลื่อนสูง ก็คือหน่วยกิโลโวลต์ (Kilovolt) สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าจำนวนมากที่ต้องการส่งจากจุดหนึ่ง (จุดผลิต) ไปยังอีกจุดหนึ่ง (จุดผู้ใช้ไฟฟ้า) นี้ จะมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์(Kilowatts) หรือ เมกกะวัตต์ (Megawatt) สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) หรือค่า Apparent Power นี้จะมีหน่วยเป็นกิโลโวลต์แอมแปร์ (Kilovolt-amperes) หรือค่าเมกกะโวลต์แอมแปร์ (Megavolt-amperes) อย่างไรก็ตาม ค่าต่อไปนี้ เช่น Ampere หรือ Ohms นี้ จะถูกแสดงหรือเขียนออกมาให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์หรือ Per-unit ของค่าที่ใช้ Base Voltage นี้ มีค่าเป็น 120 k V และจะเลือกให้เป็นค่าเปรียบเทียบ ถ้าหากว่าค่าแรงเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ 108 , 120 และ 126 kV แต่ถ้าหากคำนวณค่าแรงเคลื่อนเหล่านี้ให้เป็นค่า Per-unit ก็จะได้ (108 kV/120 kV) = 0.9 , (102 kV/120 kV) = 1.0 หรือ (126 kV /120 kV) = 1.05 p.u.(Per-unit) ตามลำดับ หรือถ้าหากว่าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะมีค่าดังนี้ คือ 90 % 100 % และ 105 % ตามลำดับ ดังนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์นี้จะมีค่า 100 เท่าของค่าของ Per-unit เสมอ สำหรับค่าที่ใช้ในการคำนวณโดยวิธีการคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ หรือ Per-unit method นี้ นิยมใช้กันมากในการคำนวณเกี่ยวกับไฟฟ้ากำลัง แทนที่จะคำนวณออกมาเป็นค่า Ampere, Ohms และ Volts โดยตรงสำหรับการคำนวณโดยการใช้วิธีการคำนวณเป็นหน่วย Per-unit นี้ จะมีข้อดีมากกว่า วิธีการคำนวณเป็น Percent method หลายเท่า เพราะว่า ผลคูณของค่าปริมาณ 2 ค่าเมื่อคูณเข้าด้วยกัน ค่าที่คูณได้ออกมาก็จะเป็นค่า Per-unit อีก แต่ถ้าหากว่า มีการคูณปริมาณ 2 ค่าที่เป็นเปอร์เซ็นต์นี้เข้าด้วยกัน ก็จำเป็นที่จะต้องนำค่าที่ได้นี้มาหารด้วย 100 อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ค่าที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์นั่นเอง

ค่าแรงเคลื่อน กระแส กิโลโวลต์แอมแปร์ และอิมพีแดนซ์ นี้ จะมีส่วนสัมพันธ์กับค่าอ้างอิง (Base value) ค่าอ้างอิงนี้สามารถที่จะใช้ค่า Base impedance นี้ จะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งจะมีค่าแรงเคลื่อนตกคร่อมที่ค่า Base impedance นี้เท่ากับค่าของ Base vlotage โดยมีกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ตัวนี้ เท่ากับค่า Base current นั่นเอง สำหรับค่า Base kilovolt-amperes ของระบบไฟฟ้า 1 เฟส จะเป็นผลคูณของ Base vlotage ที่มีหน่วยเป็น Kilovlots และค่า Base current ที่มีหน่วยเป็น

Amperes แต่ในการใช้ปริมาณที่จะใช้เป็นค่าอ้างอิงนั้น ปกติค่าที่จะใช้ในการคำนวณกันมากคือ ค่า Base megavolt - amperes และค่าของ Base voltage ที่มีหน่วยเป็น Kilovolt

สำหรับในระบบไฟฟ้า 1 เฟสหรือระบบไฟฟ้า 3 เฟส นั้นค่ากระแสที่ต้องนำมาใช้ในการคำนวณนี้คือ ค่า Line current (I_L) และในเทอมของแรงเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับค่าแรงเคลื่อนกับนิวทรัล (Voltage to neutral) และในเทอมของ Kilovolt-ampere ที่เปรียบเทียบกับค่า Kilovolt-ampere ต่อเฟส ดังสูตรที่มีความสัมพันธ์ต่อปริมาณต่าง ๆ ได้ ดังต่อไปนี้

$$\text{Base current} = \frac{\text{Base kVA}_{1-\phi}\ ,[\text{kVA}]}{\text{Base voltage , }[\text{kV}_{LN}]} \quad \text{...........4.7}$$

$$\text{Base impedance} = \frac{\text{Base voltage , }[\text{V}_{LN}]}{\text{Base current , [A]}} \quad \text{...........4.8}$$

$$\text{Base impedance} = \frac{(\text{Base voltage , }[\text{kV}_{LN}])^2 \text{ x } 1000}{\text{Base kVA}_{1-\phi}} \quad \text{............4.9}$$

$$Base\,power, kW_{1-\varphi} = Base\,kVA_{1-\varphi} \quad \text{................4.10}$$

$$Base\ impedance = \frac{(Base\,voltage\ V_{LN})^2}{Base\ MVA_{1-\phi}} \quad \text{................4.11}$$

$$Base\ Power, MW_{1-\varphi} = Base\ MVA_{1-\varphi} \quad \text{................4.12}$$

Per-unit impedance ของวงจรไฟฟ้าใด ๆ ก็คือ

$$= \frac{Actual \quad impredance\ [Ohms\ ]}{Base \quad impredance\ [Ohms\ ]}$$

ในสมการเหล่านี้จะมีตัวห้อยคือ 1 – เฟส และอักษร LN ซึ่งจะมีความหมายก็คือ “Per phase” และ “Line to neutral” ตามลำดับ สำหรับสมการตั้งแต่สมการที่ 4.7 จนถึงสมการที่ 4.13 นี้จะถูกนำไปใช้กับวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ถ้าหากว่านำสมการตั้งแต่สมการที่ 4.7 ถึงสมการที่ 4.13 ไปใช้กับวงจรเฟสเดียวแล้ว คำว่า kV_{LN} จะหมายถึงค่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมกับสายเฟสเดียว (Single phase line) หรือLine to ground voltage ถ้าหากว่าสายไฟสายหนึ่งเป็นสายดิน หรือมีศักย์ทางไฟฟ้าเกือบเท่ากับดิน

แต่ว่าในการคำนวณวงจรไฟฟ้าเส้นใด (R หรือ S หรือ T) เส้นหนึ่งกับสาย Neutral โดยมีหน่วยที่ใช้ใน Impedance diagram ก็คือ Kilovolt-amperes per phase และ Kilovoltas จาก Line to

neutral เป็นต้น และรายละเอียดทางเทคนิคอื่น ๆ ก็เช่น Kilovolt-amperes หรือ Megavolt-amperes และค่าแรงเคลื่อนระหว่างสายกับสาย (Line to line voltage) ก็คือค่า Kilovolts เป็นต้น ซึ่งค่าเหล่านี้จะเป็นค่าทางไฟฟ้าที่ใช้กันมากในระบบไฟฟ้า 3 เฟส แต่ทว่าค่าเหล่านี้จะทำให้เกิดความยุ่งยากและสับสนในการคำนวณ เพราะเหตุที่ว่า ค่าที่ใช้ในการคำนวณที่เป็นค่า Per-unit ของ Line voltage กับค่า Per-unit ของ Phase voltage นั้น จะมีค่าที่ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าเราอาจจะนำค่า Line voltage มาใช้เป็น Base ในการคำนวณได้เช่นเดียวกัน แต่ทว่าในการคำนวณในวงจรไฟฟ้า 1 เฟสนั้น จะใช้ค่าแรงเคลื่อนระหว่างสายกับดิน (Line to neutral) เสมอ ดังนั้น

$$\text{Base voltage to neutral} = \frac{\text{Base voltage from line to line}}{\sqrt{3}}$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีลักษณะที่สมมาตรกันนั้น จะสามารถนำสูตรด้านบนไปใช้ในการคำนวณได้เสมอ และด้วยเหตุนี้

$$* \quad \text{Per - unit} = \frac{\text{Line to neutral voltage}}{\text{Line to neutral voltage base}}$$

หรือ

$$= \frac{\text{Line to Line voltage}}{\text{Line to Line voltage base}}$$

(เมื่อระบบไฟฟ้า 3 เฟส อยู่ในลักษณะสมดุล หรือ Balance Phase) และ

$$3 - \phi \text{ Kilovolt-amperes} = 3 \text{ x Kilovolt-amperes ต่อ } 1 - \phi$$

นั่นคือ

$$3 - \phi \text{ Kilovolt-amperes base} = 3 \text{ เท่าของ Base Kilovolt-ampere-phase}$$

และ

$$** \quad \text{Per-unit in } 3-\phi = \frac{3-\Phi\text{Kilovolt}-\text{amperes}}{3-\Phi\text{Kilovolt}-\text{ampere base}}$$

หรือ

$$** \quad \text{Per-unit in } 3-\phi = \frac{\textit{Kilovolt-amperes per phase}}{\textit{Kilovolt-ampere per phase base}}$$

ตัวอย่างที่ 4.2 ค่าของ kVA = 30,000 kVA และ Base kV_{LL} = 120 kV

สำหรับอักษรตัวห้อยที่ว่า 3 – ϕ และ LL นั้นหมายถึง 3 – เฟส และ Line to line ตามลำดับ ถ้าต้องการหาค่า Base ดังกล่าวนี้ในรูปของ 1 – ϕ ก็ให้นำเอา 3 ไปหาร ดังนี้คือ

$$\text{Base kVA}_{1-\phi} = \frac{30,000}{3} = 10,000 \text{ kVA}$$

และ

$$\text{Base kV}_{LN} = \frac{120}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 69.2 \text{ kV}$$

สำหรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้งานจริง (Line to line voltage) ก็คือค่า 108 kV ค่าของ line to neutral voltage ก็คือ 108 kV/√ 3 = 62.3 kV และ * Per-unit voltage = 108 kV/120 kV = 62.3kV/69.2 kV = 0.90

* Per-unit voltage = 108 kV / 120 kV = 62.3 kV / 69.2 kV = 0.90

ถ้าหากว่าระบบไฟฟ้านี้มีค่ากำลังไฟฟ้า (P) ทั้งหมด = 18,000 kW ค่ากำลังไฟฟ้า (P) ต่อ 1 เฟส = (18,000 kW / 3) = 6000 kW

และนั่นก็คือ = 18,000 / 30,000 kW = 60,000 / 10,000 = 0.60 p.u. **ตอบ**

……………………..

จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่า Per-unit voltage และ Per-unit power นั้น ไม่ว่าจะคำนวณจากค่า Line to line voltage หรือค่า Line to neutral ก็จะได้ค่า Per-unit ที่เท่ากัน เช่นเดียวกันกับการคำนวณเรื่อง Per-unit power นั่นเอง

ดังนั้น ให้กำหนดว่า Base voltage ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส นั้น หมายถึง Line to line voltage และ Base kVA หรือ Base MVA ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส นั้นก็ให้หมายถึง ค่ากำลังไฟฟ้าพื้นฐานทั้งหมดในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ดังนั้น จะเห็นว่าค่า Base impedance และ Base current นี้ยังสามารถคำนวณได้จากค่า Base kV และคำนวณ Base kVA จากค่าต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้โดยตรงอีกด้วย

นั่นคือ ถ้าเราพูดว่า Base kVA และ Base kV ก็ให้หมายความว่าเป็นค่าของ Base kVA สำหรับค่า3 – ϕ ทั้งหมด และ Base kV ก็คือ ค่า Base voltage จากค่า Line to line นั่นเอง ซึ่งเขียนเป็นสูตรได้คือ

$$\text{Base current, [A]} = \frac{Base\ kVA_{3-\Phi}}{\sqrt{3}\ x\ Base\ voltage\ kV_{LL}} \tag{4.14}$$

และจากสมการที่ (4.9)

$$\text{Base impedance} = \frac{(\text{Base voltage kV}_{LL}/\sqrt{3})^2 \times 1{,}000}{(\text{Base kVA}_{3-\Phi}/3)} \tag{4.15}$$

$$\text{Base impedance} = \frac{(\text{Base voltage kV}_{LL})^2 \times 1{,}000}{\text{Base kVA}_{3-\Phi}} \tag{4.16}$$

$$\text{Base impedance} = \frac{(\text{Base voltage kV}_{LL})^2}{\text{Base MVA}_{3-\Phi}} \tag{4.17}$$

ดังนั้น ในการคำนวณจะมีหลักง่าย ๆ ที่จะต้องเลือกใช้ข้อใดข้อหนึ่งดังนี้ คือ

1. ถ้าหากว่าใช้ค่าแรงเคลื่อนเป็นแบบ Line – to - Line (kV_{LL}) แล้ว ค่า kVA 3 – ϕ และ MVA ต้องเป็นของระบบไฟฟ้า 3 – ϕ

2. ถ้าหากว่าใช้ค่าแรงเคลื่อนเป็นแบบ Line – to – Line (kV) แล้วค่า kVA หรือ MVA ที่ต้องใช้ต้องเป็นค่าต่อ 1 เฟส

** สมการที่ 4.7 จะใช้คำนวณหาค่า Base current โดยใช้สำหรับระบบไฟฟ้า 1- ϕ หรือใช้กับระบบไฟฟ้า 3 – ϕ ค่า Base ที่ถูกใช้ในการคำนวณนั้น จะเป็นค่าของ Kilovolt ampere ต่อ 1 เฟส และ Kilovolts to neutral

** แต่สมการที่ 4.14 จะใช้คำนวณหาค่า Base current สำหรับระบบไฟฟ้า 3 – ϕ โดยที่ค่า Base ที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะเป็นค่าของ Kilovolts-ampere ของ 3 – ϕ ทั้งหมด และ Kilovolts จาก Line to Line voltage

ตัวอย่างที่ 4.3 ให้คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ให้อยู่ในรูป Per-unit impedance โดยคำนวณห้อยู่ในรูปของค่า Per-unit บน Base 4.4 kV, 127 A โดยที่ค่าขนาดของแรงเคลื่อนและกระแสจะมีค่าเป็น 1.0 Per-unit (p.u.)

$$\text{Base impedance} = \frac{4{,}400}{\sqrt{3} \times 127\text{A}}$$

$$= 20.0 \quad \text{Ohms}$$

ดังนั้น เมื่อทั้งค่า V และ I ที่ให้มาจากตัวอย่างที่ 7.3 นี้ มีค่าเท่ากับ 1.0 p.u. ดังนั้นค่า Base impedance = 20.0 Ohms ก็เท่ากับ 1.0 p.u. ด้วย

$$\text{ค่าของ Load impedance} = \frac{2.8\angle 75^\circ}{20} = 0.14\angle 75^\circ \quad \text{p.u.} \quad [\Omega]$$ **ตอบ**

4.8 การหาค่า Per-unit ให้อยู่ใน Base อื่น ๆ

ในบางครั้งจะต้องเปลี่ยนค่า Per-unit impedance ค่าใดค่าหนึ่งที่อยู่ในระบบนี้ให้ไปอยู่กับ Base ของระบบอีกระบบหนึ่ง เหตุที่ต้องคำนวณย้าย Base ก็เพราะว่า ถ้าค่า Per-unit impedance ไม่ได้อยู่ใน Base เดียวกัน ก็จะทำให้เราไม่สามารถคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรหรือค่าอื่น ๆ ในวงจรนั้น ๆ ได้เลย เพราะว่าค่าต่าง ๆ เหล่านี้อยู่คนละ Base กัน ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณค่าต่าง ๆ จาก Base หนึ่ง ๆ ไปสู่ Base ที่ต้องการ จากการแทนค่า Base impedance ในสมการที่ 4.18 จะได้ว่า

$$\text{Per-unit impedance} = \frac{(\text{Actual impedance, Ohms})}{(\text{Base impedance, ohms})} \qquad (4.18)$$

$$\text{Base impedance} = \frac{(\text{Base voltage, kV}_{LN})^2 \times 1{,}000}{\text{Base kVA}_{1-\Phi}} \qquad (4.19)$$

$$\text{Per-unit impedance} = \frac{(\text{Actual impedance Ohms}) \times \text{kVA}_{1-\Phi}}{(\text{Base voltage, kV}_{LN})^2 \times 1{,}000} \qquad (4.20)$$

จากสูตร จะเห็นได้ว่าค่า Per-unit impedance นั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Base kVA และเป็นส่วนกลับกับค่า Base voltage ยกกำลังสอง เพราะฉะนั้นในการเปลี่ยนค่า Per-unit impedance ไปยัง Base ที่ต้องการใหม่ ก็สามารถทำได้โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{Per-unit } Z_{new} = \text{Per-unit } Z_{given} \times \frac{(\text{Base kV}_{given})^2 \times (\text{Base kVA}_{new})}{(\text{Base kV}_{new})^2 \times (\text{Base kVA}_{given})} \qquad (4.21)$$

ตัวอย่างที่ 4.4 ค่า Reactance ของเยนเนเรเตอร์ (X) มีค่าเท่ากับ 0.28 p.u. ซึ่งได้จากกาคำนวณโดยใช้ Base จากเยนเนเรเตอร์ Name Plate ก็คือ 18 kV, 600 MVA ถ้าหากว่าต้องการใช้ Base ในการคำนวณใหม่คือ 20 kVA , 150 MVA ให้ทำการคำนวณหา (X) ของ New Base ว่ามีค่าเท่าใด ?

วิธีทำ โดยการใช้สมการที่ 4.21

$$\text{Per-unit } Z_{new} = \text{Per-unit } Z_{given} \times \frac{(\text{Base kV}_{given})^2 \times (\text{Base kVA}_{new})}{(\text{Base kV}_{new})^2 \times (\text{Base kVA}_{given})}$$

วิธี 1 : โดยการใช้สูตรโดยตรง

$$X'' = 0.28 \times \frac{(18\,\text{kV})^2 \times 150\ \text{MVA}}{(20\,\text{kV})^2 \times 600\,\text{MVA}}$$

$$= 0.0567\ \text{p.u.}$$

ตอบ

วิธีที่ 2 : หรือโดยการเปลี่ยนค่าที่ให้เป็น Ohms ก่อนและหารโดยการใช้ค่า New base impedance อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งโดยแท้จริงแล้ว สูตรคำนวณนี้ได้มาจากสมการที่ (4.21) นั่นเอง

$$X'' = 0.28 \times \frac{(18^2/600)}{(20^2/150)} = 0.0567 \quad \text{p.u.}$$ **ตอบ**

หรือ

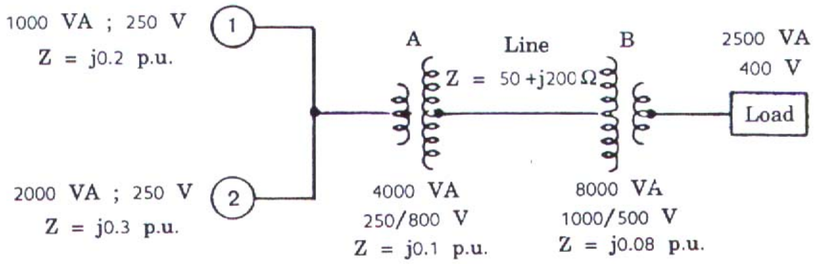
$$\text{Per-unit } Z_{new} = \text{Per-unit } Z_{given} \times \frac{(base \;\; kW_{given})^2}{\text{base} \;\; \text{kWA}_{given}} \times \frac{1}{\frac{(\text{base} \;\; \text{kV}_{new})^2}{base \;\; kVA_{new}}}$$

$$**** \quad \text{Per-unit } Z_{new} = \text{Per-unit } Z_{given} \times \frac{Z_{given}}{Z_{new}} \quad ****$$

ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น เยนเนเรเตอร์ ทรานฟอร์เมอร์ ฯลฯ นั้น ส่วนใหญ่แล้วค่าของ Per-unit ของอุปกรณ์นั้น ๆ ผู้ผลิตจะหาค่าไว้ให้แล้วโดยมี Base ที่ใช้ในการคำนวณ ก็คือ Rated kVA และ kV ของอุปกรณ์นั้น ๆ เช่น ค่ารีแอกแตนซ์ ตามตารางที่ A.4 และ A.5 ซึ่งเป็นตารางค่าของรีแอกแตนซ์ (Reactance) สำหรับเยนเนเรเตอร์และทรานฟอร์เมอร์

ตัวอย่างที่ 4.5 ให้คำนวณหาค่า Per-unit impedance โดยการใช้ Base VA คือ 5000 VA และใช้ค่า Base voltage (Base V) เป็น 250 V

วิธีทำ



รูปที่ 4.7 แสดงไดอะแกรมเส้นเดียว (One line diagram)

Base VA = 5000 VA

Base V = 250 V

$$\text{Base Z} = \frac{(\text{Base V})^2}{\text{Base VA}} = \frac{(250\ \text{V})^2}{5{,}000\ \text{VA}} = 12.5\ \text{Ohms}$$

$$\text{Base I} = \frac{5{,}000\ \text{VA}}{250\ \text{V}} = 20\ \text{A}$$

ที่ Machine ตัวที่ 1 มี Z = j 0.2 p.u. (จาก Base VA = 1000 VA และ Base V = 250 V)

ที่ Machine ตัวที่ 2 มี Z = j 0.3 p.u. (จาก Base VA = 2000 VA และ Base V = 250 V)

Machine 1

$$Z\ \text{p.u.}\ (5000) = \text{Per-unit}\ Z_{\text{given}} \times \frac{Z_{\text{given}}}{Z_{\text{new}}}$$

$$= j0.2 \times \frac{(62.5\ \text{Ohms})}{(12.5\ \text{Ohms})} = j1.0\ \text{p.u}$$

Machine 2

$$Z\ \text{p.u.}\ (5000) = \text{Per-unit}\ Z_{\text{given}} \times \frac{(\text{base kV}_{\text{given}})^2\ x\ (\text{base kVA}_{\text{new}})}{(\text{base kV}_{\text{new}})^2\ x\ (\text{base kVA}_{\text{given}})}$$

$$= j0.3 \times \frac{250^2\ x\ 5{,}000}{250^2\ x\ 2{,}000} = j\ 0.75\ \text{p.u}$$ (เปรียบเทียบกับวิธีของ Machine 1)

Transformer A

$$Z\ \text{p.u.}\ (5000) = \frac{j\,0.1\ x\ 250^2\ x\ 5{,}000}{250^2\ x\ 4{,}000} = j\ 0.125\ \text{p.u}$$

Line

$$Z\ \text{p.u.}\ (5000) = \frac{(50 + j200)\ x\ 5{,}000}{800^2} = (0.39 + j\ 1.56)\ \text{p.u}$$

(Base V ของสายส่ง = 800 V ไม่ใช่ 250 V เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า ตัวทรานฟอร์เมอร์เป็นตัวเปลี่ยนแรงเคลื่อนจาก 250 V ไปเป็น 800V)

Transformer B

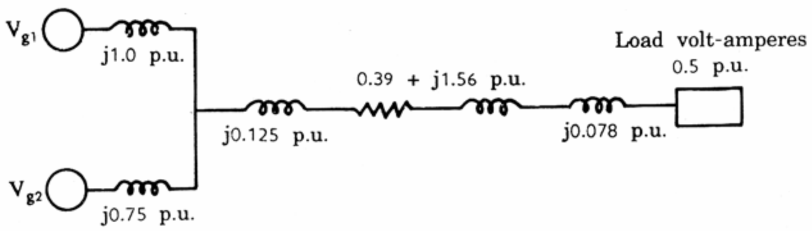
$$Z\ \text{p.u.}\ (5000) = \frac{j\,0.08\ x\ 1{,}000^2\ x\ 5{,}000}{800^2\ x\ 8{,}000} = j\ 0.078\ \text{p.u}$$

Load

$$\text{VA p.u}\ (5{,}000) = \frac{2{,}500}{5{,}000} = 0.5\ \text{p.u}$$ **ตอบ**

จากการคำนวณระบบทั้งหมด อุปกรณ์ทางไฟฟ้าทุกชนิดจะมีค่าร่วมกันคือ 5000 VA ซึ่งเป็นค่า Base VA ซึ่งจากวงจรในรูป สามารถที่จะยุบรูปแบบของวงจรได้ เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการคำนวณต่อไป

ข้อสังเกตุ จะเห็นว่า Machine 1 และ Machine 2 มีค่าแรงเคลื่อนทำงานปกติคือ 250 V ซึ่งก็จะเท่ากันกับทางด้านขดปฐมภูมิของทรานฟอร์เมอร์ A (250 V) เช่นเดียวกัน ซึ่งถ้าเราเลือกค่า 250 V นี้ ให้เป็น Base Voltage ของระบบไฟฟ้าในวงจรทั้งหมดแล้ว สายส่งก็จะมีค่า Base Voltage = 800 V เท่ากันกับค่า Turn ratio ตัวทรานฟอร์เมอร์ B นั้น มิได้ออกแบบให้ใช้กับการติดตั้งในระบบนี้ ดังนั้น มันจึงมีค่าแรงเคลื่อนสูงเกินความจำเป็น (1000/500V) แต่อย่างไรก็ดี ค่าของ Turn ratio ของตัวทรานฟอร์เมอร์ B ก็มีความเหมาะสมต่อการป้อนแรงเคลื่อนให้กับโหลด ซึ่งต้องการค่าแรงเคลื่อนทำงานปกติ (Rated voltage) คือ 400 V



รูปที่ 7.8 แสดงวงจรของค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดจากเยนเนเรเตอร์ตัวที่ 1 , 2 ทรานฟอร์เมอร์ A,B และสายส่งตลอดจนค่าโหลด โดยมีค่า Base VA=5000 VA

4.9 การใช้ per – unit ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ค่า Per–unit quantities ได้ถูกกำหนดให้ใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 เฟส และระบบสายส่ง 1 เฟส แต่ว่าการหาค่า Per–unit นี้ สามารถที่จะนำไปใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส ได้ด้วย เพราะเหตุที่ว่าวงจรไฟฟ้าระบบ 3 เฟส โดยพื้นฐานแล้วก็คือ วงจรไฟฟ้า 1 เฟส นั่นเอง ซึ่งในบทก่อน ๆก็ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสแบบสมดุล ก็คือ วงจรไฟฟ้าที่มีพื้นฐานของการทำงานเป็นแบบ 1 เฟส นั่นเอง ค่าต่าง ๆ เช่น Per-unit volts, Per-unit amperes, Per-unit volt-amperes และค่า Per-unit ohms ที่อยู่ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสนั้น สามารถนำมาใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟสได้ ยกเว้นเพียงค่าเดียว คือ ค่ากระแสเท่านั้น เพราะค่าของกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟสจะมีค่าเท่ากับค่ากระแสในระบบ 1 เฟสหารด้วยค่า $\sqrt{3}$

ตัวอย่างที่ 4.6 ถ้าในระบบไฟฟ้าหนึ่ง ๆ มีค่า 1,000 VA, 200 Volts และกระแส คือ 2.4 p.u ถ้าค่าเหล่านี้เป็นค่าในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ให้ทำการคำนวณเปรียบเทียบกับการใช้ค่าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

วิธีทำ ค่า Base current ก็คือ

$$I_{base} = \frac{VA_{base}}{V_{base}} = \frac{1{,}000\ VA}{200\ V} = 5\ A$$

ค่ากระแสที่แท้จริงก็คำนวณได้คือ ค่ากระแสแท้จริงในระบบไฟฟ้า 1 เฟส

$$I_{1\text{-}\phi} = I_{p.u.} \times I_{base} = 2.4 \times 5 = 12\ A$$ **ตอบ**

** แต่ถ้าหากว่า ค่าเหล่านี้เป็นค่าในระบบ 3 เฟส ค่า Base current คือ

$$I_{3\text{-}\phi} = 12\ A / \sqrt{3} = 6.95\ A$$ **ตอบ**

ค่าเหล่านี้สามารถคำนวณพิสูจน์ได้อีกครั้งหนึ่งโดยการใช้ค่าสูตรคำนวณต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังสูตรที่ว่า

$$VA = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_L$$

** หากกระแส (I_{base} 3 เฟส)

$$I_{base}\ 3\ \text{เฟส} = \frac{VA}{\sqrt{3}.V} = \frac{1{,}000}{\sqrt{3}.x\ 200} = 2.88\ A$$

แต่จากเงื่อนไขที่ให้มาก่อนที่ว่า I = 2.4 p.u. ดังนั้นค่ากระแสที่แท้จริงก็คือ

$$I_{3\text{-}\phi} = 2.4 \times 2.88\ A = 6.95\ A$$ **ตอบ**

4.10 การเลือก Base สำหรับการคำนวณที่เป็น Per-unit

การเลือก Base ว่ามีค่าเท่าไรนั้น มีหลักอยู่ว่า จะต้องให้ค่าที่เลือกมาใช้นั้นเกิดประโยชน์โดยสามารถลดงานในการคำนวณต่าง ๆ ให้น้อยลงและค่า Base ที่เลือกควรเป็นค่าที่จะทำให้จำนวนที่เป็น Per-unit มีค่าเข้าใกล้กับ 1 มากที่สุด

การเลือก Base ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า นิยมเลือกใช้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เขียน (Nominal system voltage) เป็น Base เช่น ใช้ค่า 69 หรือ 115 หรือ 230 kVA เป็นต้น

การเลือก Base ของกำลังไฟฟ้า (Base MVA) ในการวิเคราะห์ระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยทั่ว ๆ ไปนิยมใช้ Base ของกำลังไฟฟ้า = 100 MVA

ค่า Per-unit ที่เกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าความต้านทานและ Leakage reactance ของหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าบอกมาเป็น Per-unit ก็ให้หมายความว่า ได้ถูกคิดคำนวณมาโดยเปรียบเทียบกับ Base ดังนี้

Base กำลังไฟฟ้า = kVA rating ของหม้อแปลง

Base แรงเคลื่อนไฟฟ้า = Base แรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านแรงเคลื่อนต่ำหรือแรงเคลื่อนสูง แล้วแต่ว่าค่าความต้านทานหรือ Leakage reactance ที่กำหนดมานั้นได้อ้างอิงไปถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้านไหน

ตัวอย่างที่ 4.7 ระบบไฟฟ้าแห่งหนึ่งได้มีการจ่ายไฟฟ้าให้โหลดแบบ ต่อเป็นแบบ Y มีโหลดทั้งสิ้น 40 MW และมี p.f. = 0.85 lagging ถ้าหากว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่โหลด = 120 kV จงหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายไฟฟ้าแต่ละสาย และ MVA ของโหลดเป็น p.u.

วิธีทำ สมมติ Base แรงเคลื่อนไฟฟ้า = 120 kV

และสมมติให้ Base กำลังไฟฟ้า = 100 MVA

Base กระแสไฟฟ้า $= \dfrac{\text{Base kVA}}{\sqrt{3} \times \text{Base kV}}$

$= \dfrac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \times 120} = 481.14 \text{ A}$

กระแสไฟฟ้าแต่ละสาย $= \dfrac{40 \times 1000}{\sqrt{3} \times 120 \times 0.85}$

= 226.42 แอมแปร์

Per-unit กระแสไฟฟ้า = 226.42 / 481.14 = 0.47 p.u.

โหลด 40 MW และ p.f. คือ 0.85 = 40 MW + j 24.78 MVAR

= 40 / 100 + j24.79/100 p.u.

= 0.400 + j0.2479 p.u.

โหลดคิดเป็น MVA และเป็น p.u. $= \sqrt{(0.400^2 + 0.248^2}$

= 0.47 pu **ตอบ**

บทที่ 5
การป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง

5.1 บทนำ

พลังงานไฟฟ้ากลายเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง ของการดำเนินชีวิตและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม เมื่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าขยายตัวมากยิ่งขึ้น ในขณะที่เกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า ย่อมเกิดผลเสียหายต่อระบบการผลิตอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบไฟฟ้าใหญ่ขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลขณะลัดวงจรจะสูงมาก เพื่อที่จะป้องกันระบบไฟฟ้าให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นแก่ระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้ากรณีระบบผิดปกติ นอกจากนี้ระบบการป้องกันยังต้องมีความเชื่อถือได้ดี สำหรับความผิดปกติของระบบไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นได้ในลักษณะต่าง ๆ ต่อไปนี้

(ก) การลัดวงจรระหว่างเฟสต่อเฟส หรือเฟสกับดิน มีสาเหตุเนื่องมาจากการเสื่อมของฉนวนไฟฟ้า

(ข) การเกิดภาวะแรงดันสูง (over voltage) มีสาเหตุเนื่องมาจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าไม่ปกติ ฟ้าผ่าหรือสวิตซิงเสิร์จ (switch surge) มีสาเหตุเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอกับโหลด

(ค) การเกิดความถี่ต่ำ (under frequency) มีสาเหตุเนื่องมาจากการผลิตกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอกับโหลด

(ง) การเกิดโหลดเกิน (over load) มีสาเหตุมาจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าเกินกำลัง

ระบบการป้องกันไฟฟ้าที่ดี ย่อมไม่เป็นผลกระทบกระเทือนต่อระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้า ดังนั้น หน้าที่ของระบบการป้องกันไฟฟ้าที่ดี คือต้องสามารถตัดระบบไฟฟ้าออกจากวงจรให้รวดเร็วที่สุดกรณี เกิดภาวะผิดปกติในระบบไฟฟ้า นอกจากนี้คุณสมบัติที่ดีของระบบการป้องกันคือ

(ก) มีความเชื่อถือได้ดี (reliability)

(ข) ทำงานโดยถูกต้อง (dependability)

(ค) ทำงานโดยรวดเร็ว (high speed)

(ง) ค่าบำรุงรักษาต่ำ

(จ) อายุการใช้งานของระบบป้องกันทนทาน

(ฉ) มีราคาพอสมควร

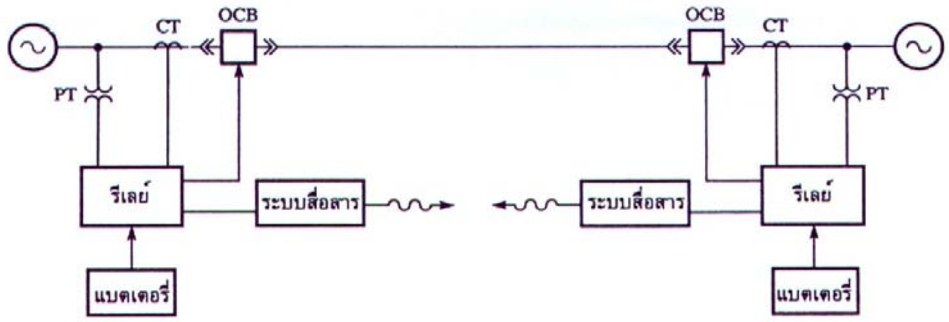
5.2 อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินได้แก่ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และรีเลย์ป้องกัน

5.2.1 ฟิวส์ เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและป้องกันการลัดวงจร ฟิวส์นี้จะต่ออันดับอยู่กับวงจรไฟฟ้า และจะหลอมละลายเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกินพิกัดหรือลัดวงจร ฟิวส์นี้จะมีคุณสมบัติที่ตัดกระแสลัดวงจรได้ถึงพิกัดสูงสุด อีกทั้งมีคุณสมบัติสามารถจำกัดค่ากระแสลัดวงจร โดยให้กระแสไหลผ่านฟิวส์ต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่จะขึ้นถึงสูงสุด นั่นก็คือฟิวส์จำกัดกระแส

5.2.2 เซอร์กิตเบรกเกอร์ เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและป้องกันการลัดวงจรเช่นเดียวกับฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์นี้จะทำงานด้วยกลไกการตัดวงจรโดยอัตโนมัติ เมื่อกระแสไฟฟ้าไกลเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ กลไกการตัดวงจรก็จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรออกจากระบบโดยอัตโนมัติ ส่วนการสับซ้ำอาจบบังคับด้วยมือ (Manual operated) หรือสั่งสับซ้ำโดยอัตโนมัติด้วยรีเลย์ชนิดสับซ้ำ (re-closing relay)

5.2.3 รีเลย์ป้องกัน ในขณะที่ระบบไฟฟ้าเกิดฟอลต์ขึ้น จำเป็นต้องตัดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบด้วยความเร็วสูง ทั้งนี้เพื่อลดอันตรายและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ป้องกัน พร้อมทั้งค้นหาสภาพผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อสั่งการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรด้วยความเร็วสูงโดยอัตโนมัติ เราเรียกอุปกรณ์ควบคุมการป้องกันนี้ว่า “รีเลย์ป้องกัน” ดังรูปที่ 1.1 ออย์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (OCB) จะตัดวงจรไฟฟ้าโดยอัตโนมัติตามคำสั่งของรีเลย์ สำหรับหม้อแปลงกระแส (CT) และหม้อแปลงแรงดัน (PT) จะทำการถ่ายทอดกระแสและแรงดันส่งไปสู่ยังรีเลย์ ส่วนรีเลย์ทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติของกระแสและแรงดันอันเนื่องมาจากความผิดปกติของระบบไฟฟ้า แบตเตอรรี่เป็นตัวป้อนกำลังงานไฟฟ้าไปยังระบบรีเลย์ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยระบบสื่อสารในการป้องกัน



OCB = ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Oil circuit breaker)

CT = หม้อแปลงกระแส (current transformer)

PT = หม้อแปลงแรงดัน (voltage transformer)

รูปที่ 5.1 ระบบการป้องกันไฟฟ้าใช้รีเลย์ควบคุมการทริปออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์

5.3 องค์ประกอบในการเลือกอุปกรณ์การป้องกัน

ข้อมูลควรทราบเกี่ยวกับขีดความสามารถของอุปกรณ์การป้องกันที่จะเลือกใช้นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้อุปกรณ์การป้องกันได้ถูกต้องตามคุณลักษณะที่ออกแบบไว้โดยไม่เกิดความเสียหายขณะใช้งาน สิ่งสำคัญที่ควรทราบมีดังนี้

5.3.1 แรงดันไฟฟ้า

1) แรงดันที่กำหนด (rated voltage) เป็นแรงดันที่กำหนดของอุปกรณ์การป้องกันนั้นอย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันระหว่างเฟสต่อเฟส เช่น 115kV , 63 kV , 24 kV , 12kV, 600Vหรือ 240 V ทั้งนี้เพื่อป้องกันฉนวนของอุปกรณ์การป้องกันให้มีความแข็งแรงต่อแรงดันไฟฟ้านั้น ๆ

2) แรงดันที่ระบุ (nominal voltage) หมายถึงแรงดันระบบ (system voltage) ขึ้นอยู่กับมาตรฐานของการไฟฟ้า เช่น การไฟฟ้านครหลวง 12 kV, 24 kV และ 69 kV หรือการไฟฟ้าภูมิภาค 11 kV, 22 kV และ 33 kV

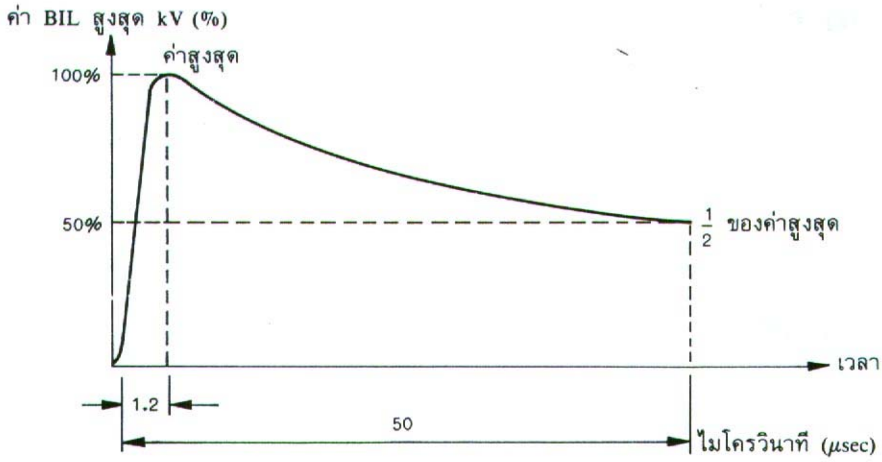
3) แรงดันใช้งานสูงสุด (maximum operating voltage) หมายถึงแรงดันสูงสุดตามที่เป็นจริงของระบบซึ่งจะนำอุปกรณ์การป้องกันไปใช้

4) แรงดันออกแบบสูงสุด (maximum design voltage) หมายถึงค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้เป็นมูลฐานในการออกแบบอุปกรณ์การป้องกัน สำหรับอุปกรณ์การป้องกันแรงดันต่ำนั้น มักจะบอกแต่เพียงแรงดันที่กำหนดเท่านั้น เพราะถือว่ามีค่าใกล้เคียงกับแรงดันออกแบบสูงสุด

5) แรงดันใช้งานต่ำสุด (minimum operating voltage) หมายถึงค่าแรงดันต่ำสุดของอุปกรณ์การป้องกันที่ยังมีความสามารถที่จะตัดกระแสตามพิกัด MVA นั้นได้ เพราะว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องสามารถตัดกระแสที่ค่าแรงดันต่ำกว่าแรงดันระบุได้ แต่ถ้าแรงดันยิ่งต่ำ ค่าความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์(interrupting capacity) ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะยิ่งต่ำลงไปด้วย จึงต้องกำหนดค่าแรงดันใช้งานต่ำสุดกำหนดไว้ว่าเป็นค่าแรงดันต่ำสุดที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ยังคงทำงานได้ปกติตามพิกัด

5.3.2 ระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน (basic impulse insulation level) หรือค่า BIL

เป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ฉนวนของอุปกรณ์การป้องกันทนคลื่นฟ้าผ่าได้โดยปลอดภัย การทดสอบหาค่า BIL สูงสุดที่ 1.2/50 usec ดังรูปที่ 1.2 สำหรับมาตรฐาน IEC ได้กำหนดค่า BIL สูงสุดในตารางที่ 1.1 ฉะนั้นอุปกรณ์การป้องกันที่จะเลือกนำมาใช้งาน ต้องผ่านการทดสอบที่เรียกว่าการทดสอบอิมพัลส์(impulse test) หาค่าฉนวนของอุปกรณ์การป้องกันสามารถผ่านการทดสอบไปได้โดยปลอดภัย ก็ถือว่าค่า BIL เป็นไปตามมาตรฐาน IEC อย่างไรก็ตามสำหรับอุปกรณ์การป้องกันแรงดันต่ำ และอุปกรณ์การป้องกันที่ติดตั้งอยู่ภายในอาคารมักจะไม่ได้กำหนดค่า BIL ไว้



รูปที่ 5.2 การทดสอบค่า BIL สูงสุดที่ 1.2/50 usec ตามมาตรฐาน IEC

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า BIL สูงสุด ตามมาตรฐาน IEC

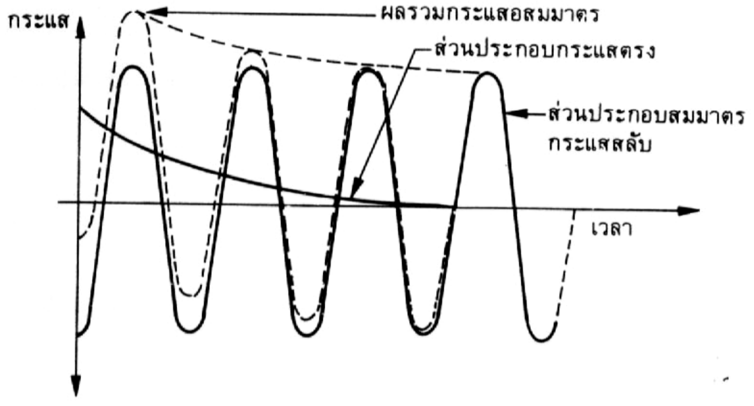
แรงดันระบุ (kV)	แรงดันอิมพัลส์ เป็น kV (ยอดคลื่น)	
	ฉนวนเต็ม	ฉนวนลดขนาด *
12	75	–
24	125	–
36	170	–
72.5	235	–
123	550	450
245	1,050	900
525	–	1,800

* ฉนวนลดขนาด (reduce insulation) สายศูนย์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าต้องต่อลงดินโดยตรง หรือผ่านความต้านทานต่ำ ๆ

5.3.3 ความถี่ที่กำหนด (rated frequency) การเลือกขนาดความพี่ที่กำหนดของอุปกรณ์การป้องกันนั้นจะต้องให้เท่ากับความถี่ของระบบ เช่น ความถี่ 50 Hz , 60 Hz , 400 Hz หรือใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง

5.3.4 พิกัดกระแสต่อเนื่อง (continuous current rating) หรือกระแสที่กำหนด (rated current) เป็นปริมาณสูงสุดของกระแสที่อุปกรณ์การป้องกันจะรับได้สม่ำเสมอตลอดเวลา โดยที่อุณหภูมิจะไม่สูงเกินกว่าปกติ

5.3.5 พิกัดกระแสโมเมนเทรี (momentary current rating) ในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจร กระแสไฟฟ้าจะพุ่งพรวดขึ้นถึงจุดสูงสุดในครึ่งไซเกิลแรก คือ เวลา 1/100 วินาที ดังรูปที่ 1.3 กระแสนี้เรียกว่า *ผลรวมกระแสอสมมาตร (total asymmetrical current)* ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสส่วนประกอบกระแสตรง (DC component) กับกระแสส่วนประกอบสมมาตรกระแสสลับ (AC symmetrical component) ดังนั้นพิกัดกระแสโมเมนทรี่จึงเป็นค่า RMS ของผลรวมกระแสอสมมาตรในไซเกิลแรก โดยที่อุปกรณ์การป้องกันจะต้องสามารถทนต่อกระแสได้ในช่วงเวลา ½ ไซเกิลถึง 1 ไซเกิล หรือในเวลา 1/100 วินาท ถึง 1/50 วินาทีได้โดยปลอดภัย หลังจากการเกิดฟอลต์ในไซเกิลแรก ๆ ผ่านพ้นไปแล้ว กระแสลัดวงจรจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนประกอบกระแสตรงจะสูงสุดในตอนแรกที่เกิดฟอลต์และจะลดลงเป็นศูนย์ในไซเกิลต่อ ๆ มา



รูปที่ 5.3 ลักษณะกระแสขณะลัดวงจรในระบบไฟฟ้า

5.3.6 พิกัดกระแสช่วงเวลาสั้น (short time current rating) เป็นค่า RMS ของกระแสลัดวงจรที่อุปกรณ์การป้องกันจะทนได้ในระยะเวลาสั้น ๆ ที่กำหนด เช่น 4 วินาทีเป็นต้น

5.3.7 พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (interrupting current rating) หรือพิกัดกระแสขณะตัดวงจร เป็นค่ากระแสลัดวงจร RMS สมมาตร โดยที่อุปกรณ์การป้องกันต้องสามารถตัดกระแสได้ในเวลาไม่เกิน 8 ไซเกิลภายใต้แรงดันที่กำหนด ในบางครั้งอาจกำหนดเป็นพิกัดกำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ หรือ interrupting MVA rating ดังนี้คือ

กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ (MVA) = √ 3X แรงดันออกแบบสูงสุด (kV) x กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (kV)

5.3.8 พิกัดเวลา (time rating)

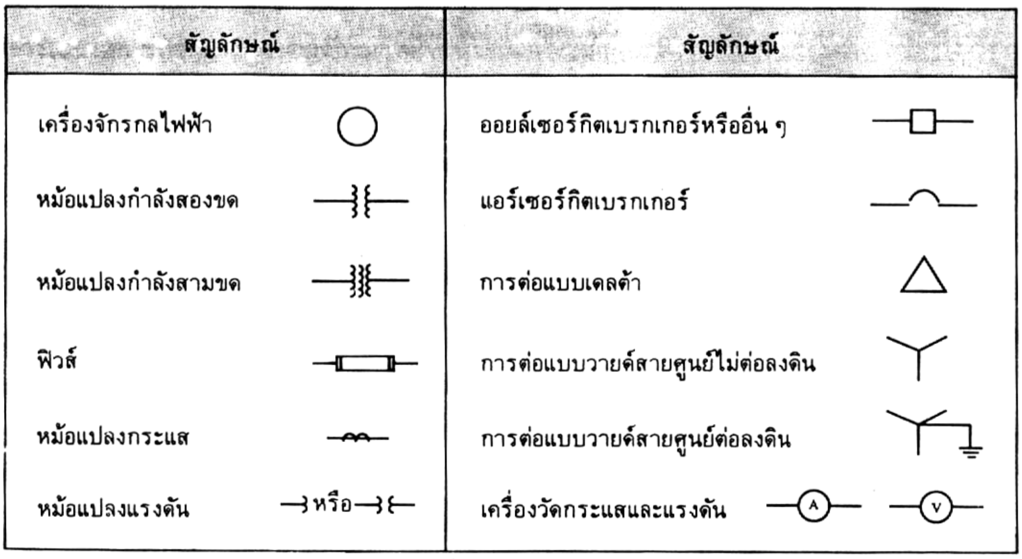
1. **เวลาขณะอินเตอร์รัพต์ (interrupting time)** คือช่วงเวลาที่อุปกรณ์การป้องกันตัดกระแสลัดวงจรและเปลวอาร์คได้ดับสนิทแล้ว ซึ่งใช้เวลาตัดกระแสอย่างช้าไม่เกิน 8 ไซเกิล หรือ 8/50 วินาที

2. **เวลาสับซ้ำ (re-closing time)** คือช่วงเวลาที่อุปกรณ์การป้องกันสับซ้ำต่อเข้าสู่วงจรอีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้จะใช้เวลา 20 ถึง 30 ไซเกิล หรือประมาณ ½ วินาที

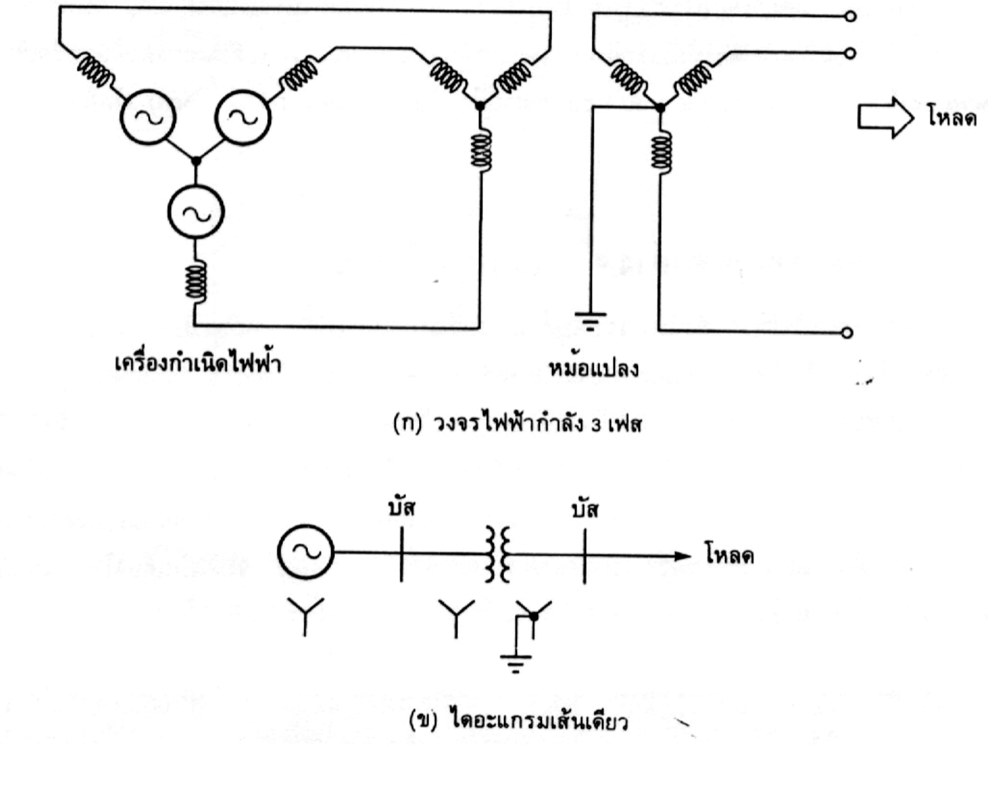
5.3.9 รอบทำงาน (duty cycle) เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น และเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้ทริปแล้ว รีเลย์สับซ้ำอัตโนมัติ (auto recloser relay) จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สับต่อวงจรอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 20 ถึง 30 ไซเกิลหรือประมาณ ½ วินาที แต่ถ้าหากในระบบไฟฟ้าฟอลต์ยังคงมีอยู่ เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะทริปอีก และรีเลย์ก็จะสั่งสับซ้ำใหม่ไปเรื่อย ๆ ถ้าฟอลต์ในระบบยังคงมีอยู่ จนกระทั่งถึงจำนวนครั้งที่ตั้งไว้รีเลย์ก็จะไม่สั่งให้สับซ้ำอีก โดยปกติการตั้งความเร็วการสับและตัดให้ช้าหรือเร็วจะกำหนดเวลาคั่นไว้ เช่น co + 15 sec +co co หมายถึง โคลส – โอเพน (close-open) คั่นด้วยเวลา 15 วินาที

5.4 การแสดงและคำนวณค่าต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังนั้นประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง สายส่งและสายจำหน่ายไฟฟ้า โดยทั่วไปก็จะเป็นชนิดสามเฟส สำหรับการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าค่อนข้างจะซับซ้อนและยุ่งยาก เพื่อให้การศึกษาวงจรไฟฟ้าด้วย ไดอะแกรมเส้นเดียว ส่วนการคำนวณค่าต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าเช่น แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก็ยุ่งยากเนื่องจากหน่วยต่าง ๆ ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องใช้ระบบเปอร์ยูนิต เพื่อช่วยในการคำนวณ



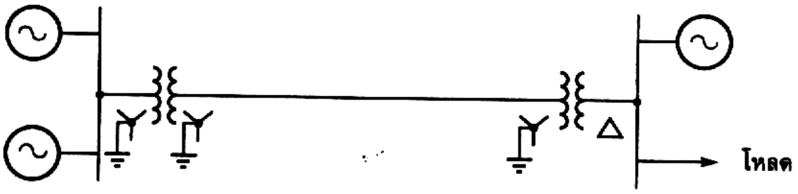
รูปที่ 5.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในไดอะแกรมเส้นเดียว



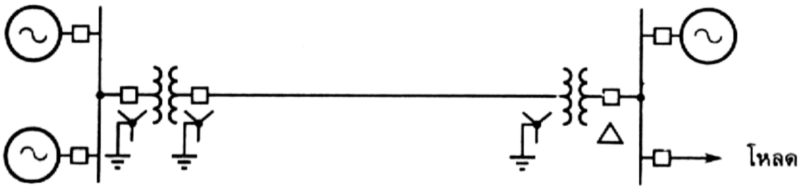
รูปที่ 5.5 ความแตกต่างวงจรไฟฟ้า 3 เฟส และไดอะแกรมเส้นเดียว

5.4.1 ไดอะแกรมเส้นเดียว ในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสามารถใช้สัญลักษณ์เขียนแทนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวดังรูปที่ 1.4 ความแตกต่างของวงจรไฟฟ้า 3 เฟส และไดอะแกรมเส้นเดียวดังรูปที่ 1.5 จุดประสงค์ของการเขียนไดอะแกรมเส้นเดียวก็เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังใน

รูปแบบที่กะทัดรัด และเข้าใจง่าย รายละเอียดของไดอะแกรมเส้นเดียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัญหาที่กำลังพิจารณาอยู่ เช่น ถ้ากำลังศึกษาเกี่ยวกับแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ก็ไม่จำเป็นต้องใส่สัญลักษณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ดังรูปที่ 1.6 (ก) แต่จะใส่สัญลักษณ์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ก็ต่อเมื่อต้องการศึกษากระแสลัดวงจร ทั้งนี้เพื่อหาขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์ดังรูปที่ 1.6 (ข)



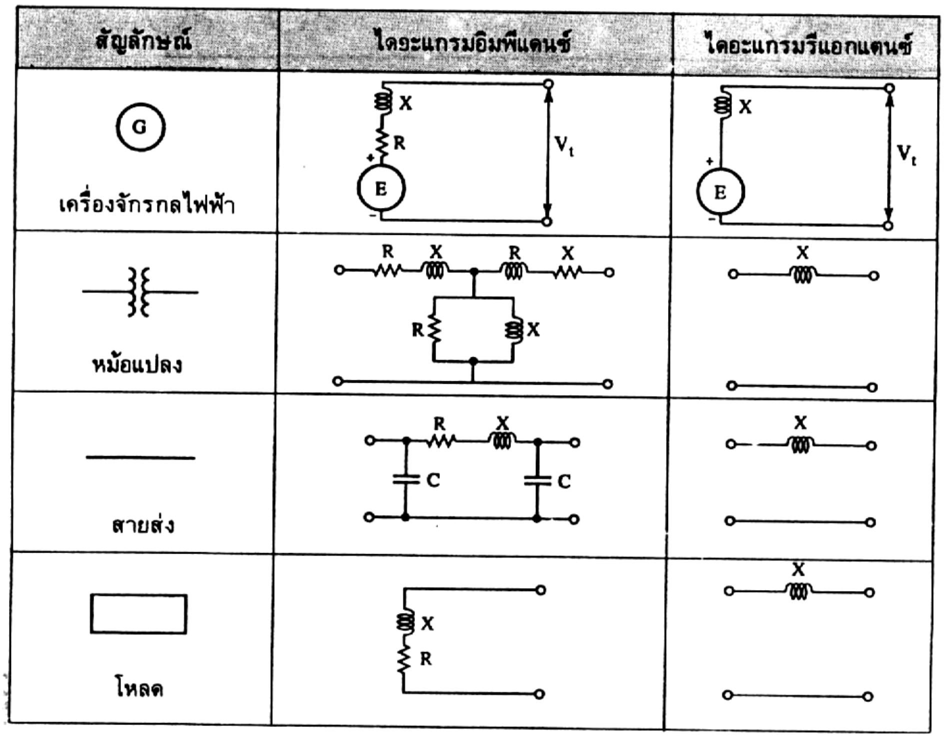
(ก) ศึกษาขนาดการไหลของกระแส



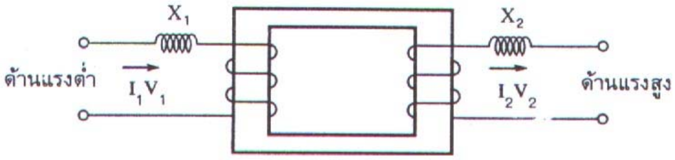
(ข) ศึกษากระแสลัดวงจรเพื่อหาขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์

รูปที่ 5.6 การแสดงรายละเอียดลงในไดอะแกรมเส้นเดียว

5.4.2 ไดอะแกรมอิมพีแดนซ์และรีแอกแตนซ์ ในการคำนวณกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าจากไดอะแกรมเส้นเดียวนั้น จะต้องแปลงให้เป็นไดอะแกรมอิมพีแดนซ์เสียก่อนจึงจะคำนวณได้ สำหรับไดอะแกรมอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ในรูปที่ 5.7 แต่เนื่องจากค่าความร้อนต้านทานในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นต่ำมากเมื่อเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ ฉะนั้นเพื่อให้การคำนวณกระแสลัดวงจรนั้นง่ายขึ้น ค่าความต้านทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าความต้านทานกระแสสร้างแม่เหล็กของหม้อแปลงค่าความต้านทานและค่าคาพาซิแตนซ์อาจไม่นำมาคิด ซึ่งสามารถยุบลงมาเขียนเป็นไดอะแกรมรีแอกแตนซ์ได้ สำหรับค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงนั้นการย้ายค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านแรงต่ำไปสู่ด้านแรงสูง หรือย้ายค่ารีแอกแตนซ์ด้านแรงสูงไปสู่ด้านแรงต่ำนั้นจะมีค่าไม่เท่ากันดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 ไดอะแกรมอิมพีแดนซ์และไดอะแกรมรีแอกแตนซ์



รูปที่ 5.8

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$ (ถ้าไม่คิดการสูญเสียของหม้อแปลง)

$$\therefore \frac{I_1}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = K \qquad (5.1)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{K} \qquad (5.2)$$

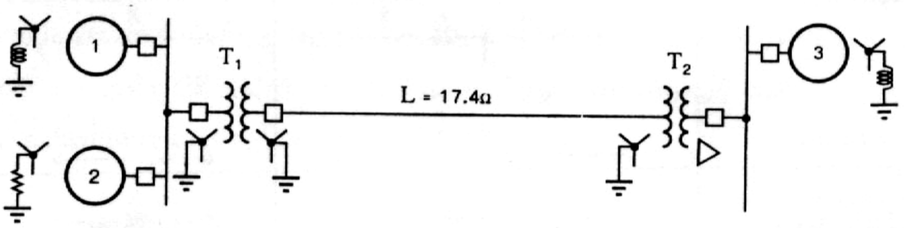
$$I_1^2 X_2^* = I_2^2 X_2$$ (ถ้าย้ายรีแอกแตนซ์ด้านแรงสูงสู่ด้านแรงต่ำ)

$$\therefore X_2^* = \frac{I_2^2}{I_1^2} X_2 = \frac{X_2}{K^2} \qquad (5.3)$$

$$I_1^2 X_1 = I_2^2 X_1^* \qquad \text{(ถ้าย้ายรีแอกแตนซ์ด้านแรงต่ำสู่ด้านแรงสูง)}$$

$$X_1^* = \frac{I_1^2}{I_2^2} X_1 = K^2 X_1 \qquad (5.4)$$

ตัวอย่างที่ 5.1 จงเขียนไดอะแกรมรีแอกแตนซ์โดยการย้ายไปอยู่ด้านแรงสูง รายละเอียดไดอะแกรมเส้นเดียวดังรูปที่ 5.9



เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1–20,000 kVA, 6.6 kV, X″ = 0.655 Ω

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2–10,000 kVA, 6.6 kV, X″ = 1.31 Ω

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3–30,000 kVA, 3.81 kV, X″ = 0.1452 Ω

T_1 และ T_2 แต่ละตัวเป็นหม้อแปลงเฟสเดียว ขนาด 10,000 kVA 3.81/38.1 kV X″ = 14.52 Ω นำมาต่อแบงค์เป็นสามเฟส

รูปที่ 5.9 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบไฟฟ้า

วิธีทำ ในสมการ 1.4 ย้ายรีแอกแตนซ์ด้านแรงต่ำไปอยู่ด้านแรงสูง

$$X_1^* = K^2 X_1$$

T_1 $\qquad K = \dfrac{V_2}{V_1} = 38.1 \div 3.81 = 10$

G_1 $\qquad X_1'' = (10)^2 \times 0.655 = 65.5\ \Omega$

G_2 $\qquad X_2'' = (10)^2 \times 1.31 = 131\ \Omega$

T_2 $\qquad$ ทางด้านแรงสูงแรงดันไลน์ $= 38.1 \times \sqrt{3}\ \text{kV}$

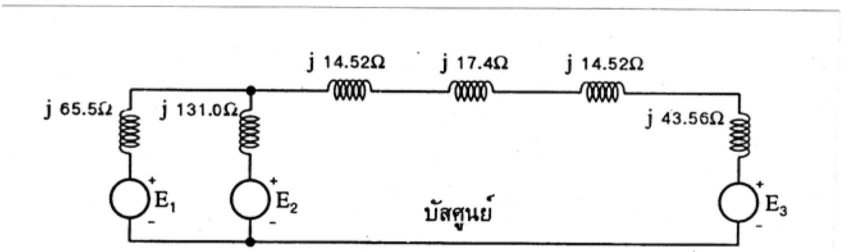
ทางด้านแรงต่ำแรงดันไลน์ $= 3.18\ \text{kV}$

$$K = \frac{38.1\sqrt{3}}{3.81} = 10\sqrt{3}$$

G_3 $\qquad X_3'' = (10\sqrt{3})^2 \times 0.1452 = 43.56\ \Omega$

$$L = 17.4\ \Omega$$

สามารถเขียนไดอะแกรมรีแอกแตนซ์เมื่อย้ายค่ารีแอกแตนซ์ไปอยู่ด้านแรงสูงดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 5.10 จากรูปที่ 5.9 สามารถเขียนไดอะแกรมรีแอกแตนซ์เมื่อย้ายค่ารีแอกแตนซ์ไปอยู่ด้านแรงสูง

5.4.3 เปอร์ยูนิต (per-unit) ในการคำนวณและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จำเป็นต้องเขียนไดอะแกรมรีแอกแตนซ์ดังรูปที่ 1.10 ย่อมต้องใช้เวลาในการย้ายข้างของกระแส แรงดัน อิมพีแดนซ์ระหว่างขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ ยิ่งถ้าระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนก็ยิ่งต้องใช้เวลามากและอาจเกิดความผิดผลาดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงนำระบบเปอร์ยูนิตมาใช้ โดยการทำค่าต่าง ๆ เช่น กระแสแรงดัน อิมพีแดนซ์ ให้อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์หรือเปอร์ยูนิต หรือ pu เป็นเบส (base) หรือค่าอ้างอิง เช่นถ้าเลือกแรงดันเบสที่ 230 kV ฉะนั้นแรงดันระบบอื่น ๆ ต้องเทียบกับแรงดันเบส เช่น แรงดันที่ 115kV, 69kVและ 32kV

ที่ 115kV	=	$115 \div 230$	=	0.5 pu
69kV	=	$69 \div 230$	=	0.3 pu
33kV	=	$33 \div 230$	=	0.144 pu

แรงดัน กระแส อิมพีแดนซ์ และ กำลังไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กันอยู่ในตัวของมันเอง เราสามารถหาค่าแต่ละค่าได้ เช่น $I = E/Z$, $P = IE$, $I = P/E$, $Z = E/I$ หรือ $Z = E^2/P$ ดังรูปที่ 5.11 แสดงสูตรการหากระแสเบสและอิมพีแดนซ์เบสในระบบเฟสเดียว ส่วนรูปที่ 5.12 แสดงสูตรการหากระแสเบสและอิมพีแดนซ์เบสในระบบสามเฟส

$$\text{กระแสเบส } (I_B) = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าเบส (base kVA}_{1-\Phi}}{\text{แรงดันเบส (base kV}_{LN})} \quad A \tag{5.5}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์เบส } (Z_B) = \frac{\text{แรงดันเบส (base kV}_{LN}) \times 1000}{\text{กระแสเบส (base I)}} \quad \Omega \tag{5.6}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์ } (Z_B) = \frac{\text{แรงดันเบส (base kV}_{LN})^2 \times 1000}{\text{กำลังไฟฟ้าเบส (kVA}_{1-\Phi})} \quad \Omega \tag{5.7}$$

$$\text{เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์} = \frac{\text{อิพพีแดนซ์จริง } (\Omega)}{\text{อิมพีแดนซ์เบส } (\Omega)} \quad \text{pu.} \tag{5.8}$$

รูปที่ 5.11 สูตรการหากระแสเบส อิมพีแดนซ์เบส และเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ในระบบเฟสเดียว

$$\text{กระแสเบส } (I_B) = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าเบส (kVA}_{3\Phi})}{\sqrt{3} \times \text{แรงดันเบส (kV}_{LL})} \quad A \tag{5.9}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์เบส } (Z_B) = \frac{(\text{แรงดันเบส (kV}_{LL})/\sqrt{3})^2 \times 1000}{\text{กำลังไฟฟ้าเบส (kVA}_{3\Phi})} \quad \Omega \tag{5.10}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์เบส } (Z_B) = \frac{(\text{แรงดันเบส (base kV}_{LL}))^2 \times 1000}{\text{กำลังไฟฟ้าเบส (kVA}_{3\Phi})} \quad \Omega \tag{5.11}$$

$$\text{อิมพีแดนซ์เบส } (Z_B) = \frac{(\text{แรงดันเบส (kV}_{LL}))^2}{\text{กำลังไฟฟ้าเบส (MVA}_{3\Phi})} \quad \Omega \tag{5.12}$$

$$\text{เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์} = \frac{\text{อิพพีแดนซ์จริง } (\Omega)}{\text{อิมพีแดนซ์เบส } (\Omega)} \quad \text{pu.} \tag{5.13}$$

รูปที่ 5.12 สูตรการหากระแสเบส อิมพีแดนซ์เบส และเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ ในระบบสามเฟส

ตัวอย่างที่ 5.2 หม้อแปลง 3Φ ขนาด 500 kVA 24 / 0.4 kV ค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านแรงต่ำ 0.1 Ω จงแสดงค่ารีแอกแตนซ์เป็นโอห์ม และเปอร์ยูนิต

วิธีทำ

ทางด้านแรงต่ำ 400 V หรือ 0.4 kV

รีแอกแตนซ์ = 0.1 Ω

ในสมการที่ 5.12 อิมพีแดนซ์เบส $(Z_B) = \frac{(kV)^2}{MVA} = \frac{(0.4)^2}{0.5} = 0.32\ \Omega$

ในสมการที่ 5.13 เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ $= \frac{0.1}{0.32} = 0.3125$ pu

ทางด้านแรงสูง 24 kV

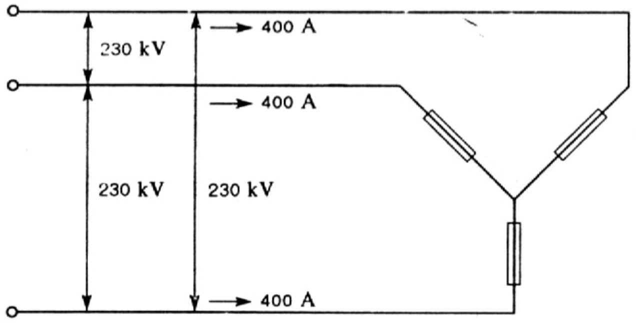
รีแอกแตนซ์ $= \frac{(24)^2}{0.4} \times 0.1 = 360\ \Omega$

อิมพีแดนซ์เบส $(Z_B) = \frac{(kV)^2}{MVA} = \frac{(24)^2}{0.5} = 1152\ \Omega$

เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ $= \frac{360}{1152} = 0.3125$ pu **ตอบ**

จากตัวอย่างที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านแรงต่ำ 0.1 Ω เมื่อย้ายไปอยู่ด้านแรงสูงจะมีค่า 360 Ω แต่ถ้ารีแอกแตนซ์ทำเป็นเปอร์ยูนิตแล้ว ค่ารีแอกแตนซ์ไม่ว่าจะย้ายไปอยู่ด้านแรงสูงหรือด้านแรงต่ำ จะมีค่า 0.3125 pu เท่า ๆ กัน ฉะนั้นการนำเอาระบบเปอร์ยูนิตมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ก็เพื่อตัดปัญหาการย้ายค่าต่าง ๆ ของแรงดัน กระแส อิมพีแดนซ์ ระหว่างขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำของหม้อแปลง

ตัวอย่างที่ 5.3 โหลดต่อแบบวายด์ 3$\varnothing$ 230 kV มีกระแสไหล 400 A ดังรูปที่ 5.11 ถ้ากำหนดให้เลือกแรงดันเบส 500 kV และกำลังไฟฟ้าเบส 600 MVA



รูปที่ 5.11 โหลดต่อแบบวายด์ แรงดันเบส 500 kV และกำลังไฟฟ้าเบส 600 MVA

วิธีทำ ในสมการที่ 5.9

$$I_B = \frac{kVA_{เบส}}{\sqrt{3}\,kV_{เบส}} = \frac{600 \times 1000}{\sqrt{3}\,kV \times 500}$$

$$= 692.84 \text{ A}$$

ในสมการที่ 5.12

$$Z_B = \frac{(kVA_{เบส})^2}{MVA_{เบส}} = \frac{(500)^2}{600}$$

$$= 416.67 \; \Omega$$

เปอร์ยูนิตแรงดัน $= \frac{230}{500} = 0.46$ p.u.

เปอร์ยูนิตกระแสโหลด $= \frac{400}{692.84} = 0.577$ p.u.

เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์โหลด $= \dfrac{\text{เปอร์ยูนิตแรงดัน}}{\text{เปอร์ยูนิตกระแสโหลด}} = \dfrac{0.46}{0.577}$

$= 0.797$ p.u.

เปอร์ยูนิตกำลังไฟฟ้า = เปอร์ยูนิตแรงดัน x เปอร์ยูนิตกระแสโหลด

$= 0.46 \times 0.577$ p.u.

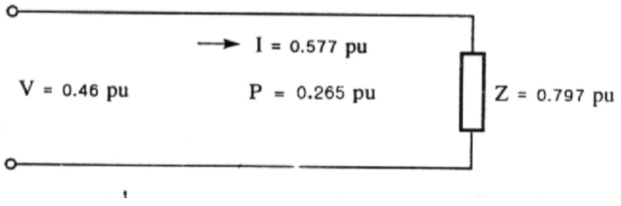
$= 0.265$ p.u.

หรือกำลังไฟฟ้าโหลด $= \dfrac{\sqrt{3} \times kV \times I}{1000} = \dfrac{\sqrt{3} \times 230 \times 400}{1000}$ MVA

$= 159.344$ MVA

เปอร์ยูนิตกำลังไฟฟ้า $= \dfrac{159.344}{600} = 0.265$ p.u. **ตอบ**

และสามารถเขียนวงจรสมมูลของโหลดได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 วงจรสมมูลของโหลดเป็นเปอร์ยูนิต

5.4.3 การเปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตตามเบส ในบางครั้ง ค่าเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์อาจขึ้นอยู่กับเบสหนึ่ง แต่แตกต่างไปจากเบสที่ถูกเลือกไว้สำหรับระบบ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมดในระบบต้องใช้เบสเดียวกัน เมื่อต้องการคำนวณหรือวิเคราะห์ระบบจึงต้องมีการเปลี่ยนค่าเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์จากเบสเดิมไปเป็นค่าเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์จากเบสใหม่หรือเบสของระบบที่เลือกไว้ สมมติว่ากำหนดให้ดังนี้

Z_g	=	เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสเดิม	Z_n	=	เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่
KV_g	=	แรงดนเบสเดิม	kV_n	=	แรงดันเบสใหม่
KVA_g	=	กำลังไฟฟ้าเบสเดิม	kVA_n	=	กำลังไฟฟ้าเบสใหม่

จากสมการที่ 5.11 อิมพีแดนซ์เบสเดิม $= \dfrac{(kV_g)^2 \times 1000}{kVA_g} \quad \Omega$

จากสมการที่ 5.13 อิมพีแดนซ์เดิม = เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสเดิม X อิมพีแดนซ์เบสเดิม

$$= Z_g \left(\frac{(kV_g)^2 \times 1000}{kVA_g}\right) \quad \Omega$$

อิมพีแดนซ์เบสใหม่ $= \left(\dfrac{(kV_n)^2 \times 1000}{kVA_n}\right) \quad \Omega$

เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่ = $\dfrac{\text{อิมพีแดนซ์เดิม}}{\text{อิมพีแดนซ์เบสใหม่}}$ p.u.

เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่ $= Z_g \left(\dfrac{kV_g}{kV_n}\right)^2 \left(\dfrac{kVA_n}{kVA_g}\right)$ p.u. (5.14)

ตัวอย่างที่ 5.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 30,000 kVA 13.2 kV รีแอกแตนซ์ 20% ถ้ากำหนดให้เบสใหม่ของระบบมีค่า 50,000 kVA , 13.8kV จงหาค่ารีแอกแตนซ์เบสใหม่

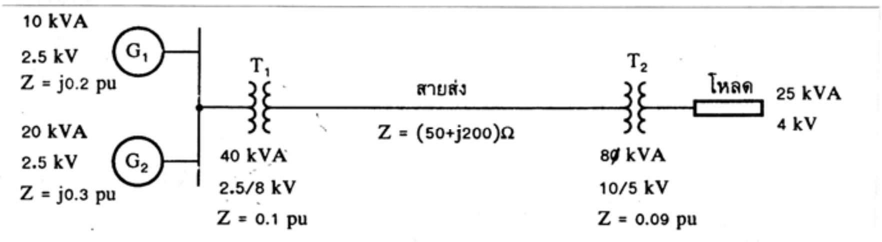
วิธีทำ รีแอกแตนซ์เบสเดิม = 20% = 0.2 p.u.

จากสมการที่ 1.14 เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่ $= Z_g \left(\dfrac{kV_g}{kV_n}\right)^2 \left(\dfrac{kVA_n}{kVA_g}\right)$ p.u.

$$= 0.2 \left(\frac{13.2}{13.8}\right)^2 \left(\frac{50000}{30000}\right)$$

$\therefore$ เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่ = 0.306 p.u. **ตอบ**

ตัวอย่าง 5.5 จากรูปที่ 5.15 จงเขียนเป็นไดอะแกรมอิมพีแดนซ์ โดยกำหนดให้เลือกใช้กับเบสใหม่ 50kVA 2.5 kV



รูปที่ 5.15

วิธีทำ หาค่าเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่ในสมการที่ 5.11 และจากรูปที่ 5.16 แสดงไดอะแกรมอิมพีแดนซ์

G_1 $$Z_{pu} = 0.2\left(\frac{2.5}{2.5}\right)^2\left(\frac{50}{10}\right) = j\,1.0 \text{ p.u.}$$

G_2 $$Z_{pu} = 0.3\left(\frac{2.5}{2.5}\right)^2\left(\frac{50}{20}\right) = j\,0.75 \text{ p.u.}$$

$$Z_{pu} = 0.1\left(\frac{2.5}{2.5}\right)^2\left(\frac{50}{40}\right) = j\,0.125 \text{ p.u.}$$

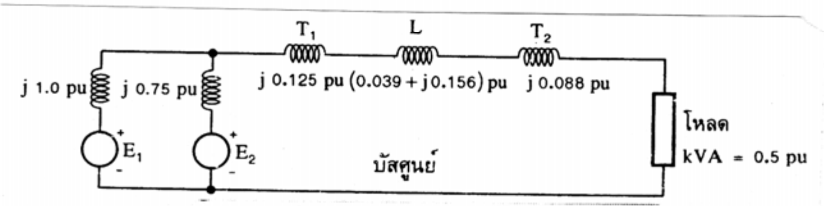
$$Z_{pu} = 0.09\left(\frac{10}{8}\right)^2\left(\frac{50}{80}\right) = j\,0.088 \text{ p.u.}$$

ในสมการที่ 5.11 $$Z_B = \frac{(kV)^2 x 1000}{kVA} = \frac{(8)^2 \text{ x } 1000}{50}$$

$$= 1280\ \Omega$$

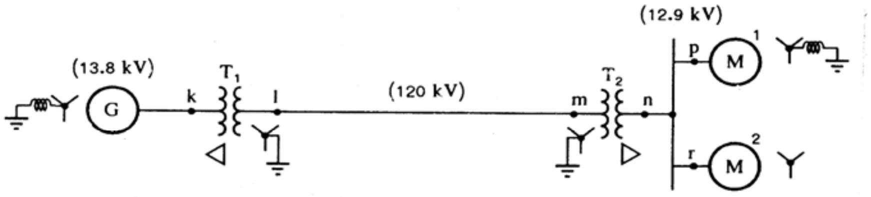
L $$Z_{pu} = \frac{50 + j200}{1280} = 0.039 + j\,0.156$$

โหลด $$kVA_{pu} = \left(\frac{25}{50}\right) = 0.5 \text{ p.u.}$$



รูปที่ 5.16 ไดอะแกรมอิมพีแดนซ์เป็นเปอร์ยูนิต

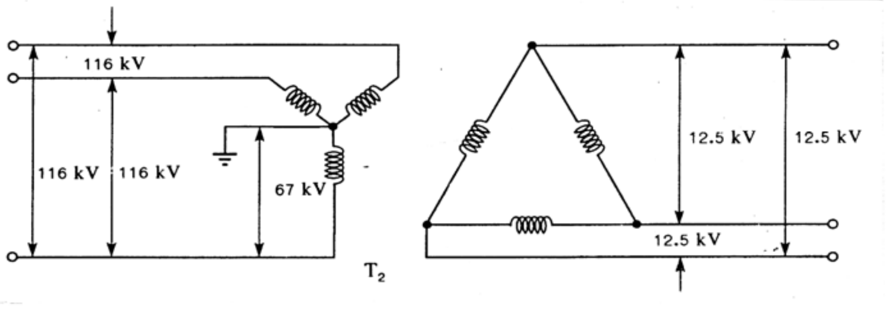
ตัวอย่างที่ 5.6 กำหนดให้เบสใหม่ 30,000 kVA 13.8 kV ตามรูปที่ 5.17 จงเขียนไดอะแกรมรีแอกแตนซ์



รูปที่ 5.17 ไดอะแกรมเส้นเดียว

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	G	:	30,000 kVA	13.8 kV	X'' 15 %	
มอเตอร์	M_1	:	20,000 kVA	12.5 kV	X'' 20 %	
มอเตอร์	M_2	:	10,000 kVA	12.5 kV	X'' 20 %	
หม้อแปลง	T_1	:	30,000 kVA	13.2 /115 kV	Δ/Y	X = 10 %
หม้อแปลง	T_2	:	10,000 kVA	12.5 /67 kV	1 Φ 3 ตัว แต่ต่อแบงค์เป็น 3 Φ	X = 10 %
สายส่ง	L	:	ค่ารีแอกแตนซ์ 80 Ω			

วิธีทำ หม้อแปลง T_2 10,000 kVA 1 $\varnothing$ 3 ตัว = 3 x 10,000 kVA



รูปที่ 5.18

แรงดันไลน์ต่อไลน์ $= 67\sqrt{3} = 116$ kV ดังรูปที่ 5.18

เนื่องจากกำหนดให้ 30,000 kVA 13.8 kV เป็นเบสใหม่ของระบบ

$\therefore$ แรงดันเบสใหม่ของสายส่ง $= \dfrac{115 \times 13.8}{13.2} = 120$ kV

$\therefore$ แรงดันเบสใหม่ของมอเตอร์ $= \frac{12.5 \times 120}{116} = 12.9 \text{ kV}$

หาค่าเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่ในสมการที่ 5.14

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า G : $X_{pu} = 15\ \% = 0.15 \text{ p.u.}$

หม้อแปลง T_1 : $X_{pu} = 0.1\left(\frac{13.2}{13.8}\right)^2 \left(\frac{30000}{30000}\right) = 0.0784 \text{ p.u.}$

หม้อแปลง T_2 : $X_{pu} = 0.1\left(\frac{12.5}{12.9}\right)^2 \left(\frac{30000}{30000}\right) = 0.0940 \text{ p.u.}$

มอเตอร์ M_1 : $X''_{pu} = 0.2\left(\frac{12.5}{12.9}\right)^2 \left(\frac{30000}{20000}\right) = 0.282 \text{ p.u.}$

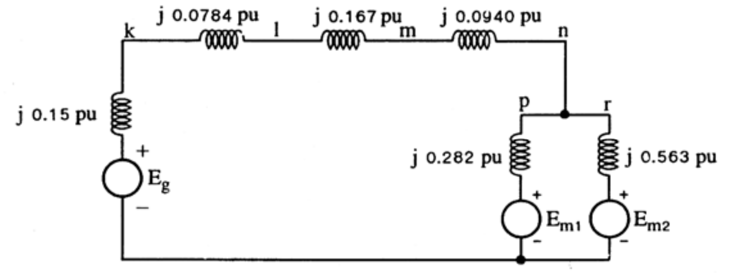
มอเตอร์ M_2 : $X''_{pu} = 0.2\left(\frac{12.5}{12.9}\right)^2 \left(\frac{30000}{10000}\right) = 0.563 \text{ p.u.}$

ในสมการที่ 5.11 อิมพีแดนซ์เบส $(Z_B) = \frac{(kV)^2 \times 1000}{kVA} = \frac{(120)^2 \times 1000}{30000}$

$= 480\ \Omega$

สายส่ง L : $X_{pu} = \frac{80}{480} = 0.167 \text{ p.u.}$

และสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมรีแอกแตนซ์ ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ไดอะแกรมรีแอกแตนซ์เป็นเปอร์ยูนิต

บทที่ 6

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจร

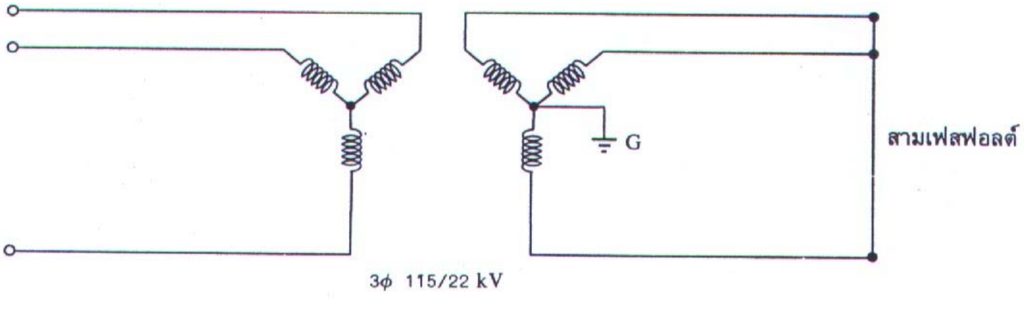
(Short Circuit Calculations)

การออกแบบระบบการป้องกันที่ดีที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับประสบการณ์ และการพิจารณาผลของค่ากระแสลัดวงจรในระบบที่ทำให้กระแสในวงจรเพิ่มขึ้น การตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ป้องกันได้แก่ฟิวส์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อทำการแยกตำแหน่งที่เกิดฟอลต์โดยปลอดภัย นอกจากนี้อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น เคเบิล สวิตช์เกียร์ บัสบาร์ สวิตช์ปลดวงจร จะต้องมีความสามารถคงทนต่อแรงกล และความร้อน ในขณะที่กระแสฟอลต์ไหลสูงสุด กระแสที่ไหลขณะฟอลต์ที่ตำแหน่งใด ๆ ในระบบไฟฟ้า จะถูกจำกัดด้วยอิมพีแดนซ์ของวงจรและอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยจะพิจารณาตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจนถึงตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ค่ากำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายจะเพิ่มขึ้นตามความต้องการโหลดย่อมทำให้กระแสฟอลต์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ฉะนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์การป้องกันจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาหาค่ากระแสลัดวงจรให้เหมาะสมและถูกต้อง เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ป้องกัน ต่อชีวิต และทรัพย์สิน อย่างไรก็ตามถ้าเลือกอุปกรณ์ป้องกันที่มีขนาดใหญ่เกินไป อุปกรณ์ต่าง ๆ ก็ย่อมแพงเกินความจำเป็น

ในการศึกษาค่ากระแสลัดวงจรในเรื่องฟอลต์นั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สามเฟสฟอลต์สมมาตร และฟอลต์ไม่สมมาตร

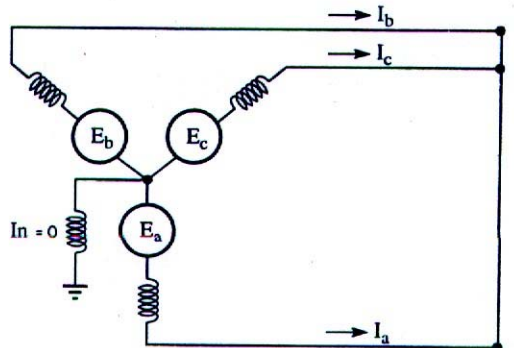
6.1 สามเฟสฟอลต์สมมาตร

ในกรณีสามเฟสสมดุลลัดวงจร เป็นการลัดวงจรพร้อมกันทั้งสามเฟส เรียกว่า สามเฟสฟอลต์สมมาตร (three phase symmetrical fault) ดังรูปที่ 6.1

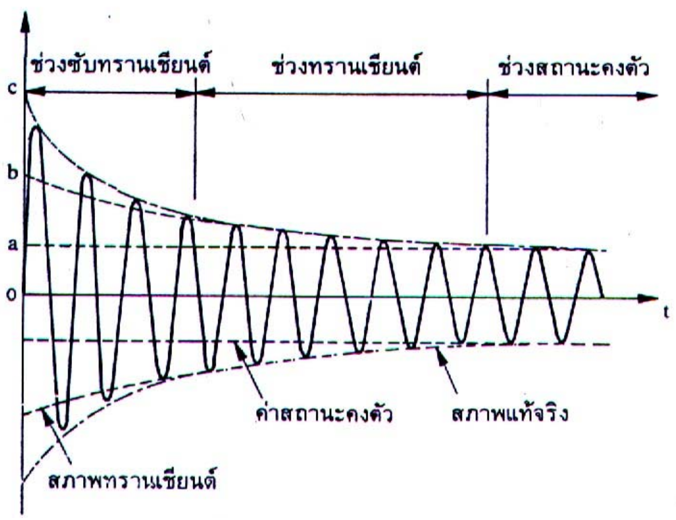


รูปที่ 6.1 สามเฟสฟอลต์สมมาตร

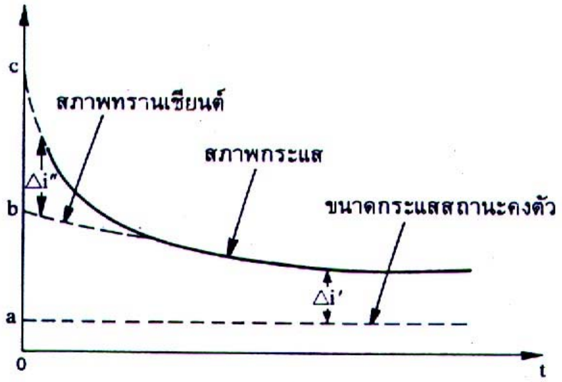
6.1.1 สามเฟสฟอลต์เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด (3 Ø fault on an unload generator) การเกิดสามเฟสฟอลต์สมมาตรเกิดจากการลัดวงจรที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังรูปที่ 6.2 ในขณะลัดวงจรจะเกิดรูปคลื่นกระแสสมมาตร ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งจะแบ่งกระแสลัดวงจรออกเป็น 3 ระยะได้แก่ช่วงซับทรานเชียนต์ (subtransient) เป็นช่วงเวลาที่เกิดฟอลต์ในครึ่งไซเคิลแรก หลังจากนั้นกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนช่วงต่อมาคือ ช่วงทรานเชียนต์ (transient) เป็นช่วงหลังจากเกิดฟอลต์ไปแล้ว 3 ไซเคิล ถึง 8 หรือ 9 ไซเคิล ซึ่งเป็นช่วงกลาง หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่ช่วงสถานะคงตัว (steady state) เป็นช่วงสุดท้าย ถ้าระบบไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz ช่วงทรานเชียนต์ที่ 8 ไซเคิล หลังจากเกิดฟอลต์จะใช้เวลา 8/50 วินาที เท่ากับ 0.16 วินาที ความแตกต่างระหว่างกระแส $\Delta i'$ ดังรูปที่ 6.4 จะอยู่ระหว่างช่วงทรานเชียนต์กับสถานะคงตัว ส่วนความแตกต่างระหว่างกระแส $\Delta i''$ จะอยู่ระหว่างช่วงซับทรานเชียนต์กับช่วงทรานเชียนต์ การพิจารณารูปคลื่นกระแสลัดวงจรสมมาตรในขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลดในรูปที่ 6.3 ระยะระหว่าง oa เป็นค่าสูงสุดของกระแสลัดวงจรในขณะเข้าสู่สถานะคงตัว ค่ากระแสจะเป็น 0.707 เท่ากับกระแส (I_{rms}) แรงดันไม่จ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า E_g หารด้วยกระแส สถานะคงตัว เรียกว่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเรียกว่าค่ารีแอกแตนซ์แบบซิงโครนัสตามแกนในแนวตรง (direct-axis synchroneous regetance – X_d) ซึ่งในขณะลัดวงจรเพาเวอร์แฟกเตอร์นั้นต่ำมาก ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์นั้นน้อยมาก ซึ่งไม่จำเป็นต้องนำมาคิดก็ได้ สามารถหากระแสฟอลต์ที่สถานะคงตัวได้ดังนี้



รูปที่ 6.2 3 Ø ฟอลต์เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด



รูปที่ 6.3 รูปคลื่นกระแสลัดวงจรสมมาตรในขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด



รูปที่ 6.4

$$I = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{Eg}{Xd} \quad \text{…………(6.1)}$$

ถ้าย้อนสภาพกระแสไปสู่ช่วงแรกของการลัดวงจรรูปที่ 6.3 ที่ระยะ ob กระแสจะมีค่า 0.707 เท่าของกระแสระยะ ob เราเรียกว่ากระแสทรานเชียนต์ I’ ส่วนค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เราเรียกว่า ค่าทรานเชียนต์รีแอกแตนซ์ตามแกนในแนวตรง (direct-axis transient reactance – X'_d) สามารถหาค่ากระแสทรานเชียนต์ได้ดังนี้

$$I' = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{Eg}{Xd'} \quad \text{…………(6.2)}$$

ค่ากระแสที่เริ่มจากเวลาที่ศูนย์เราเรียกว่า กระแสซับทรานเชียนต์ I” ซึ่งค่ากระแสซับทราน-เชียนต์นี้จะมีค่า 0.707 เท่าของระยะ oc ค่ากระแสซับทรานเชียนต์นี้จัดว่าเป็นกระแสลัดวงจรสมมาตรเริ่มต้น ทั้งนี้ยังไม่ได้รวมส่วนประกอบกระแสตรง (DC component) ค่ารีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่า ซับทรานเชียนต์รีแอกแตนซ์ตามแกนในแนวตรง (direct-axis subtransient reactance – X''_d) สามารถหาค่ากระแสซับทรานเชียนต์ดังนี้

$$I'' = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{Eg}{Xd''} \qquad \text{...........(6.3)}$$

เมื่อ I = กระแสสถานะคงตัวเป็น rms

I’ = กระแสทรานเชียนต์เป็น rms (ยังไม่รวมส่วนประกอบกระแสตรง)

I” = กระแสซับทรานเชียนต์เป็น rms (ยังไม่รวมส่วนประกอบกระแสตรง)

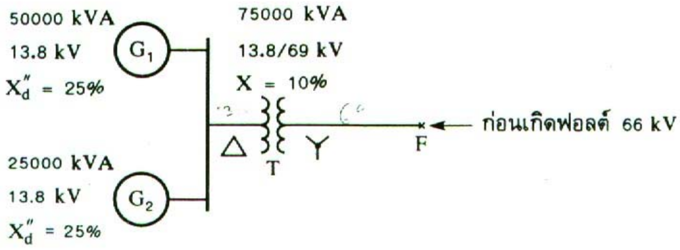
E_g = แรงดันที่ขั้วต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับสายศูนย์หรือสายดิน

ในสมการที่ 6.1 – 6.3 เป็นวิธีคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด แต่ถ้ามีอิมพีแดนซ์ต่ออยู่ภายนอกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อ และเกิดลัดวงจรที่ภายนอกก็จะเพิ่มอิมพีแดนซ์รวมเข้าไปในวงจรด้วย ถ้ากำหนดให้ $E_g = E_f$ สามารถคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรดังสมการ

$$I_f = \frac{E_f}{Z} \qquad \text{..............(6.4)}$$

E_f = แรงดันที่ขั้วต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับสายศูนย์หรือสายดินก่อนเกิดฟอลต์

ตัวอย่างที่ 6.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ตัว ขนานกันต่อกับหม้อแปลง Δ – Y 13.8/69 kV ดังรูปที่ 6.5 จงคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรสามเฟสฟอลต์สมมาตรที่จุด F ก่อนเกิดฟอลต์วัดแรงดันที่จุด F ได้ 66 kV กำหนดให้เบส 75000 kVA 69 kV



รูปที่ 6.5 ไดอะแกรมเส้นเดียวตัวอย่างที่ 6.1

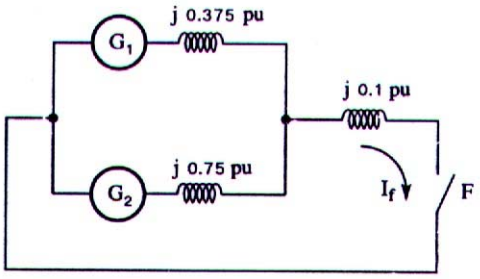
วิธีทำ หาค่าเปอร์ยูนิคอิมพีแดนซ์เบสใหม่

$$X''_{g1} = j\,0.25 \;\; x \;\; \frac{75000}{50000} \qquad = j\,0.375 \text{ pu}$$

$$X''_{g2} = j\,0.25 \;\; x \;\; \frac{75000}{25000} \qquad = j\,0.75 \text{ pu}$$

$$X_T = j\,0.1 \text{ pu}$$

เขียนเป็นไดอะแกรมรีแอกแตนซ์ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6

$$X = \frac{(j0.375\,x\;j0.75)}{(j0.375+j0.75)} + j\,0.1$$

$$= j\,0.25 + j\,0.1 = j\,035 \text{ p.u.}$$

อิมพีแดนซ์เบส $(Z_B) = \frac{(kV_{base})^2\;x\,1000}{kVA_{base}}$

$$Z_B = \frac{(69)^2\;x\,1000}{75000} \qquad = 63.48\;\Omega$$

อิมพีแดนซ์จริง = เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ x อิมพีแดนซ์เบส

= j 0.35 x 63.48

= j 22.218 Ω

ในสมการที่ 6.4 $I_f = \frac{Ef}{Z}$ (E_f = แรงดันตำแหน่งลัดวงจรเทียบกับสายศูนย์)

∴ กระแสลัดวงจรที่จุด F $= \frac{66000}{\sqrt{3}\;x\;j22.218} \qquad = -j\,1715.1$ A

หรืออาจคำนวณแรงดันและกระแสในรูปเปอร์ยูนิตดังนี้

$$E_f = 66/\sqrt{3} \div 69/\sqrt{3} \qquad = 0.9565 \text{ p.u.}$$

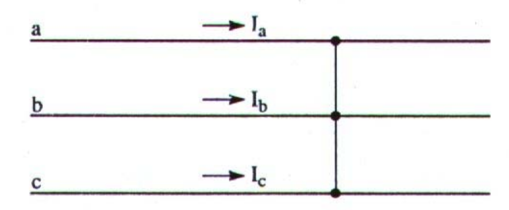
$$I_f = \frac{0.9565}{j0.35} = -j\,2.7329 \text{ p.u.}$$

กระแสเบส $$I_B = \frac{kVA_{base}}{\sqrt{3}\,kV_{base}} = \frac{75000}{\sqrt{3} \times 69} = 627.57 \text{ A}$$

$$I_f = -j\,2.7329 \times 627.57 = -j\,1715.1 \text{ A}$$

∴ กระแสลัดวงจรที่จุด F = 1715.1 A **ตอบ**

6.1.2 สามเฟสฟอลต์ในระบบไฟฟ้า (three phase fault on a power system) จากรูปที่ 6.7 เป็นการลัดวงจรทั้งสามเฟสของสายส่งหรือสายจำหน่ายไฟฟ้า



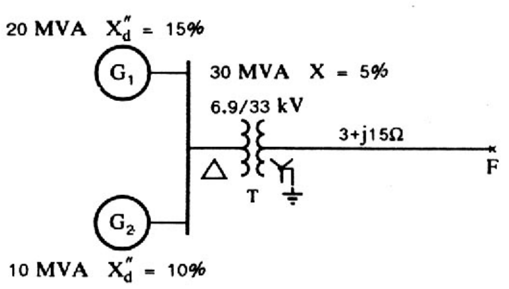
รูปที่ 6.7 ไดอะแกรมเมื่อเกิดสามเฟสฟอลต์ในระบบไฟฟ้า $I_a = I_b = I_c$

จากสมการที่ 6.4

$$I_f = \frac{V_f}{Z} \qquad \text{……….(6.5)}$$

V_f = แรงดันที่ตำแหน่งลัดวงจรเทียบกับสายศูนย์หรือสายดินก่อนลัดวงจร

ตัวอย่างที่ 6.2 จงคำนวณหาค่ากระแสลัดวงจรสามเฟสฟอลต์ที่จุด F ที่เบส 30 MVA 33 kV ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 ไดอะแกรมเส้นเดียวตัวอย่างที่ 6.2

วิธีทำ หาค่าเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์เบสใหม่

G1 $$X''_{g1} = j\,0.15 \times \frac{30000}{20000} = j\,0.225 \text{ p.u.}$$

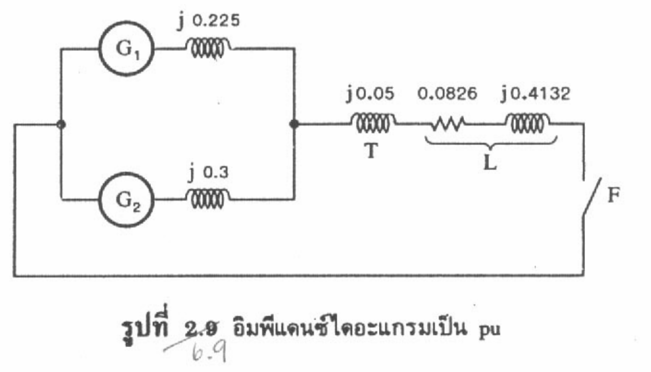
G2 $$X''_{g2} = j\,0.10 \times \frac{30000}{10000} = j\,0.3 \text{ p.u.}$$

$$X_T = j\,0.05 \text{ p.u.}$$

ในสมการที่ $$Z_B = \frac{(kV_{base})^2}{MVA_{base}} = \frac{(33)^2}{30} = 36.3 \ \Omega$$

$$Z_L = \frac{3 + j15}{36.3} = 0.0826 + j\,0.4132 \text{ p.u.}$$

สามารถเขียนเป็นอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 อิมพีแดนซ์ไดอะแกรมเป็น p.u.

$$Z_{pu} = \frac{(j0.225 \times j0.3)}{(j0.225 + j0.3)} + j0.05 + 0.0826 + j0.4132$$

$$= j0.1286 + j0.05 + 0.0826 + j0.4132$$

$$= 0.0826 + j0.5918 \quad \text{p.u.}$$

เมื่ออิมพีแดนซ์เบส (Z_B) = 36.3 Ω

อิมพีแดนซ์จริง = เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ x อิมพีแดนซ์เบส

$= (0.0826 + j\,0.5918) \times (36.3)$

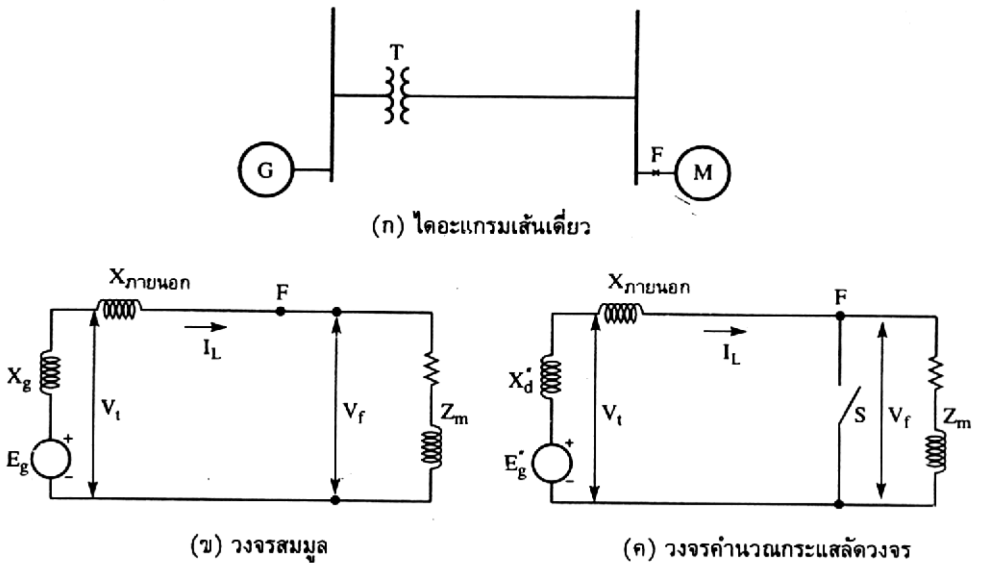
$= 3 + j21.48 = 21.628\angle 82° \ \Omega$

ในสมการที่ 6.5 $I_f = \dfrac{Vf}{Z} = \dfrac{33 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 21.628}$

∴ กระแสลัดวงจรที่จุด F = 878.5 A **ตอบ**

6.1.3 สามเฟสฟอลต์พร้อมด้วยโหลดมอเตอร์ (three phase fault with load motors) ในระบบไฟฟ้าที่มีโหลดมอเตอร์ต่ออยู่ดังรูปที่ 6.10 แสดงไดอะแกรมเส้นเดียวและวงจรงสมมูล โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดให้กับมอเตอร์สมดุลทั้งสามเฟส กำหนดให้เกิดฟอลต์ที่จุด F ตามรูปที่ 6.10 (ข) แสดงวงจรไฟฟ้าของสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่กับโหลดมอเตอร์ 3 เฟส กระแสก่อนฟอลต์เท่ากับ I_L และแรงดันที่จุดฟอลต์คือ V_f ส่วนแรงดันที่ขั้วต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ V_t ส่วนรูปที่ 6.10 (ค) กระแสลัดวงจรจะผ่าน X''_d และอิมพีแดนซ์ภายนอกในขณะที่สับสวิตช์ S กระแสที่ไหลผ่าน X''_d คือ I'' ส่วน X'_d สำหรับคำนวณกระแสทรานเชียนต์ I' แต่ถ้าสวิตช์ S เปิดวงจรแรงดันซับทรานเชียนต์รีแอกแตนซ์ E''_g จะมีค่าดังนี้

$$E''_g = V_t + j I_L X''_d \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(6.6)$$



รูปที่ 6.10 แสดงไดอะแกรมเส้นเดียวและวงจรสมมูล

เช่นเดียวกันเราสามารถหากระแสทรานเชียนต์ I' เมื่อกระแสไหลผ่านทรานเชียนต์รีแอก-แตนซ์ X'_d แรงดันทรานเชียนต์รีแอกแตนซ์ E'_g จะมีค่าดังนี้

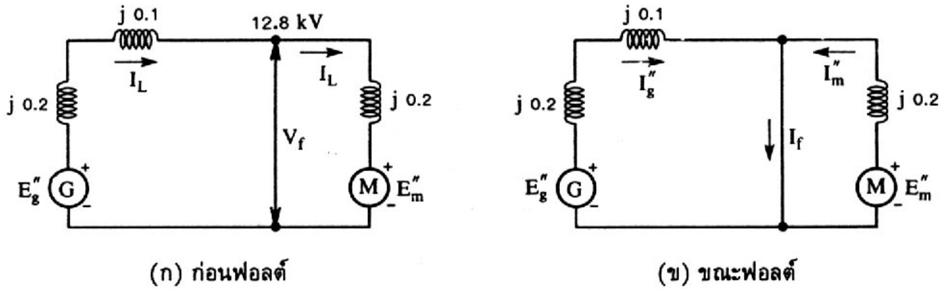
$$E'_g = V_t + j I_L X'_d \qquad \text{............(6.7)}$$

และในสถานะคงตัว ค่าแรงดันรีแอกแตนซ์ E_g จะต่ออันดับกับซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ X_g สำหรับค่ารีแอกแตนซ์ของซิงโครนัสมอเตอร์ก็จะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะลัดวงจรซิงโครนัสมอเตอร์ยังคงหมุนอยู่ด้วยแรงเฉื่อยและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงยังคงป้อนสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ เป็นเหตุให้เกิดแรงดันจากแรงเฉื่อยของมอเตอร์ ก็จะจ่ายกระแสไฟฟ้าเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกประการ ดังนั้นเราสามารถหาค่าแรงดันซับทรานเชียนต์ และค่าแรงดันทรานเชียนต์รีแอกแตนซ์ของซิงโครนัสมอเตอร์ดังนี้

$$E''_m = V_t - j I_L X''_d \qquad \text{............(6.8)}$$

$$E'_m = V_t - j I_L X'_d \qquad \text{............(6.9)}$$

ตัวอย่างที่ 6.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและซิงโครนัสมอเตอร์ขนาด 30000 kVA 13.2 kV ค่า X''_d 20% สายมีค่ารีแอกแตนซ์ 10% เทียบกับเบสของพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลดเป็นมอเตอร์ 20000 kW เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.8 นำหน้าแรงดันที่ขั้วต่อมอเตอร์ก่อนฟอลต์ 12.8 kV จงหาค่ากระแสซับทรานเชียนต์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์และกระแสฟอลต์ที่ขั้วต่อมอเตอร์กำหนดให้เบสมีค่า 30000 kVA 13.2 kV ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 รีแอกแตนซ์ไดอะแกรมเป็น pu

วิธีทำ กระแสโหลดมอเตอร์ $I_L = \dfrac{kW}{\sqrt{3}\, E \cos\theta} = \dfrac{20000}{\sqrt{3} \times 12.8 \times 0.8}$

$= 1127.67 \angle 36.87^\circ$ A

$= 902 + j\,676.6$ A

ในสมการที่ 6.6 $E''_g = V_t + j I_L X''_d$ เมื่อ $V_t = V_f = 12800/\sqrt{3} = 7390$ V

$X''_d = j\,0.3$ p.u.

อิมพีแดนซ์เบส (Z_B) $= \dfrac{(kV_{base})^2 \times 1000}{kVA_{base}}$

$= \dfrac{(13.2)^2 \times 1000}{30000} = 5.808\ \Omega$

แปลงเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ $X''_d = j\,0.2 + j\,0.1 = j\,0.3$ p.u. ให้เป็นโอห์มดังนี้

อิมพีแดนซ์จริง = เปอร์ยูนิตยูนิตอิมพีแดนซ์ x อิมพีแดนซ์เบส

$= j\,0.3 \times 5.808 = j\,1.7424\ \Omega$

$\therefore E''_g = 7390 + (902 + j\,676.6)(j\,1.7424)$

$= 7390 + j\,1572 - 1178.9$

$$= 6212 + j\,1572$$

$$I''_g = \frac{Eg''}{Xd''} = \frac{6211 + j1572}{j1.7424}$$

$$= 902 - j\,3565 \text{ A}$$

ในสมการที่ 6.8 $E''_m = V_t - I_L X''_d$

เมื่อ X''_d ของมอเตอร์ $= 0.2$ p.u.

อิมพีแดนซ์จริง $= j\,0.2 \times 5.808$

$= j\,1.1616\ \Omega$

$$E''_m = 7390 - (902 + j\,676.6)(j\,1.1616)$$

$$= 7390 - j\,1047.8 + 785.94$$

$$= 8175.94 - j\,1047.8$$

$$I''_m = \frac{Em''}{Xd''} = \frac{8175.94 - j1047.8}{j1.1616}$$

$$= -902 - j\,7039 \text{ A}$$

$$I_f = I''_g + I''_m$$

$$= (902 - j\,3565) + (-902 - j\,7039)$$

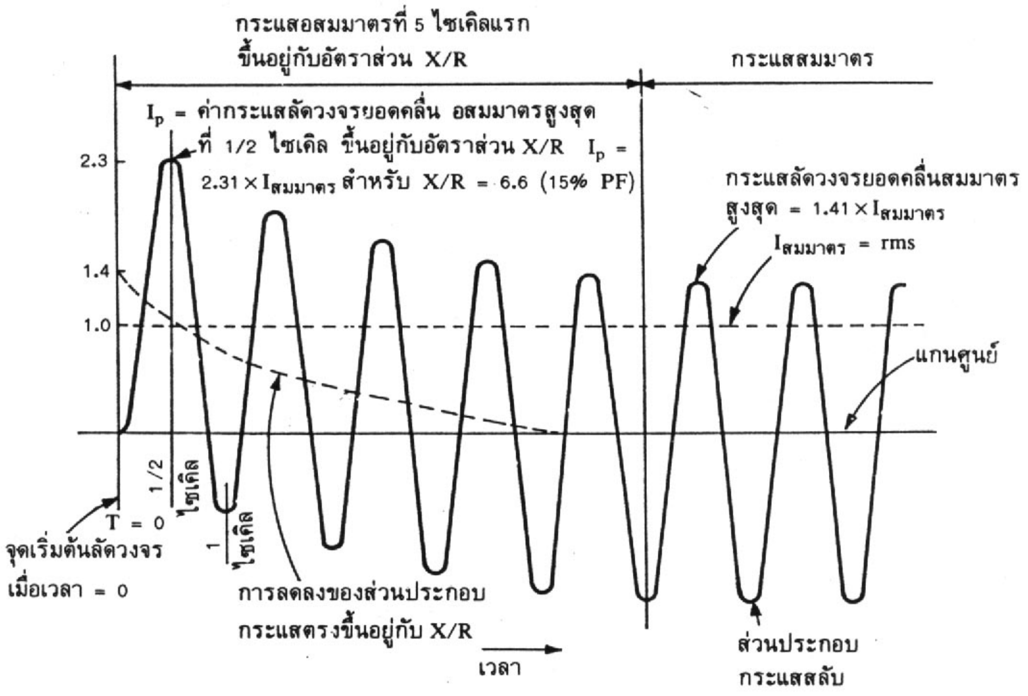
$$= -j\,10604 \text{ A}$$

ตอบ

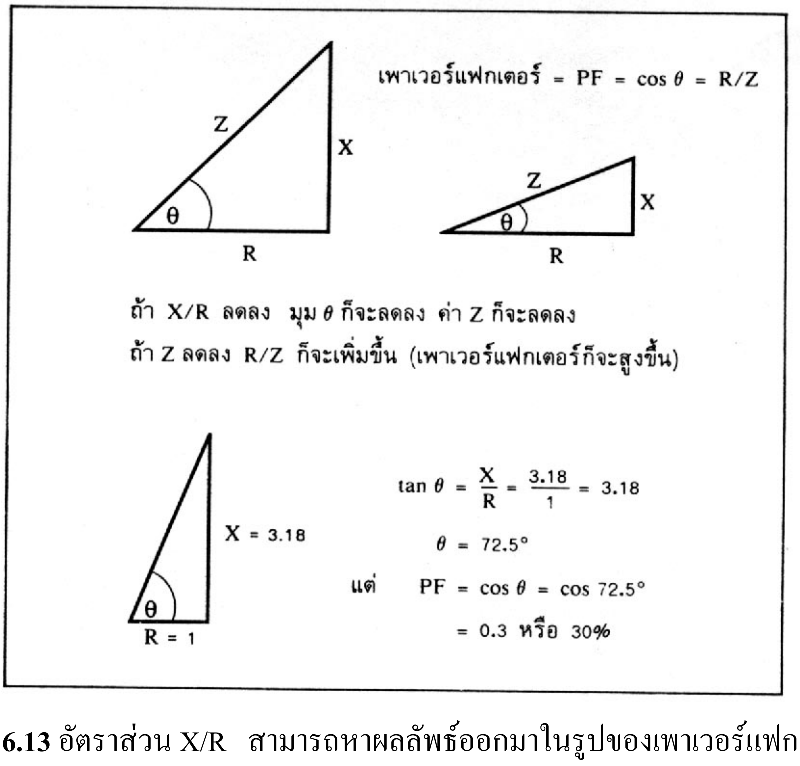
6.2 การเลือกขนาดเซอร์กิตเบรกเกอร์

ในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้านั้น ค่ากระแสลัดวงจรจะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้า 2 ส่วนคือ ส่วนประกอบกระแสสลับ (AC component) และส่วนประกอบกระแสตรง (DC component) การพิจารณาค่ากระแสลัดวงจรนั้นจะพิจารณาในช่วงซับทรานเชียนต์ ซึ่งเป็นค่ากระแสสูงสุด ค่ากระแสซับทรานเชียนต์สูงสุดนี้เป็นผลรวมของส่วนประกอบกระแสสลับและส่วนประกอบกระแสตรง ซึ่งเรียกผลรวมของค่ากระแสลัดวงจรนี้ว่า กระแสอสมมาตร (asymmetrical) ค่ากระแสอสมมาตรนี้จะเกิดในช่วงครึ่งไซเคิลถึง 5 ไซเคิลแรก (1/100 ถึง 1/10 วินาที) แต่หลังจาก 5 ไซเคิลไปแล้ว ค่ากระแสลัดวงจรจะไม่มีส่วนประกอบกระแสตรงอยู่ด้วยซึ่งเราเรียกค่ากระแสลัดวงจรนี้ว่า กระแสสมมาตร (symmetrical) ดังรูปที่ 6.12 ส่วนประกอบกระแสตรงนั้นเป็นผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า X/R อย่างมาก โดยปกติค่า X/R เป็นอัตราส่วนของค่ารีแอกเตนซ์และความต้านทานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่จุดลัดวงจร อัตราส่วน X/R สามารถหาผลลัพธ์ออกมาในรูปของ

เพาเวอร์แฟกเตอร์ได้ ดังรูปที่ 6.13 และในตารางที่ 6.1 การลัดวงจรของแหล่งกำเนิดนั้นจะประกอบด้วยอัตราส่วน X/R



รูปที่ 6.12 ค่ากระแสลัดวงจรอสมมาตรขึ้นอยู่กับความต้านทานและรีแอกเตนซ์



รูปที่ 6.13 อัตราส่วน X/R สามารถหาผลลัพธ์ออกมาในรูปของเพาเวอร์แฟกเตอร์

ตารางที่ 6.1 อัตราส่วน X/R มีผลลัพธ์กับเพาเวอร์แฟกเตอร์

เพาเวอร์แฟกเตอร์ ในขณะลัดวงจร (%)	อัตราส่วน X/R	ตัวคูณค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร (rms)	
		ค่ากระแสอสมมาตรสูงสุด A (ยอดคลื่น)	ค่ากระแสอสมมาตรสูงสุด A (rms)
0	α	2.83	1.732
10	9.95	2.45	1.436
12	8.27	2.39	1.391
15	6.59	2.31	1.330
30	3.18	1.98	1.130
45	1.98	1.75	1.041
60	1.33	1.59	1.009
75	0.88	1.49	1.0008
100	0.00	1.41	1.0000

เช่น ถ้าค่ากระแสลัดวงจร 10000 A สมมาตร ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 15 เปอร์เซ็นต์ (X/R = 6.59) ค่ากระแสลัดวงจรยอดคลื่นอสมมาตรสูงสุดที่ ½ ไซเคิล จะมีค่า 231000 A (2.31 x 10000) โดยปกติอัตราส่วน X/R จะมีค่าสูงสุดเมื่ออยู่ใกล้แหล่งจ่ายไฟฟ้าดังนี้คือ

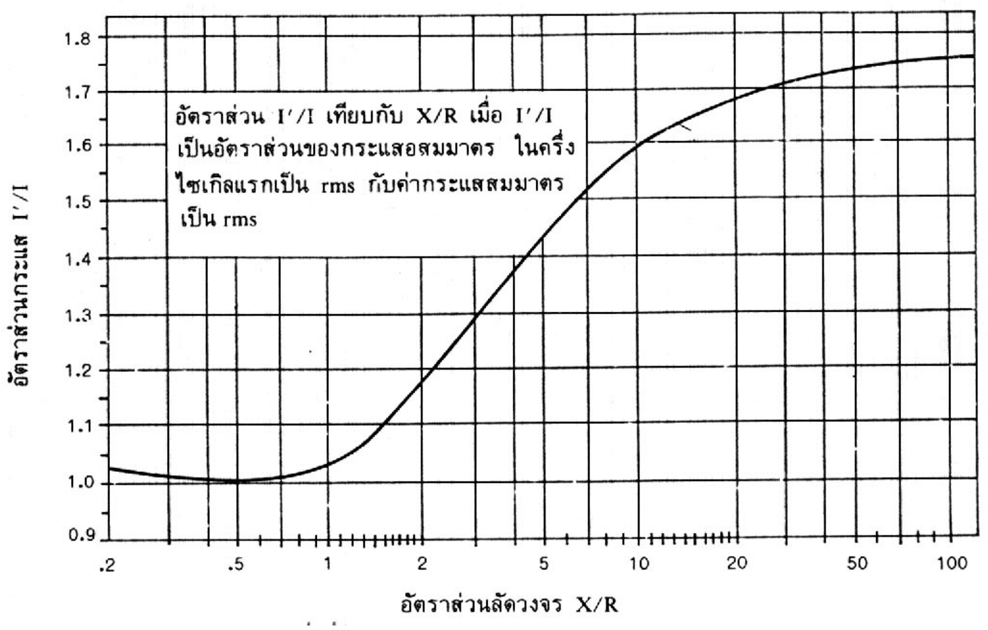
(ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า อัตราส่วน X/R จะอยู่ในย่าน 15 ถึง 25

(ข) หม้อแปลงแบบแห้งขนาดใหญ่ (750 kVA หรือใหญ่กว่า) อัตราส่วน X/R จะอยู่ระหว่าง 8 ถึง 15

(ค) หม้อแปลงแบบน้ำมัน อัตราส่วน X/R จะอยู่ในย่าน 8 ถึง 15

(ง) สวิตช์บอร์ด อัตราส่วน X/R ไม่เกิน 6.6

อย่างไรก็ตามผลของอัตราส่วนระหว่างกระแสอสมมาตรสูงสุด (I') ที่ rms กับกระแสสมมาตร (I) ที่ค่า rms และค่ารีแอกแตนซ์กับค่าความต้านทาน (X/R) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 ตัวคูณหาค่ากระแสอสมมาตรสูงสุด (rms)

6.2.1 กระแสโมเมนเทรี (momentary current) เป็นผลรวมของส่วนประกอบกระแสตรงกับส่วนประกอบสมมาตรสูงสุด (rms) ในช่วงครึ่งไซเคิลถึง 1 ไซเคิล หลังจากเกิดฟอลต์ ช่วงเวลาดังกล่าวเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องสามารถทนต่อค่ากระแสลัดวงจรนี้ได้ โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่เสียหาย ดังนั้นค่ากระแสนี้จึงเรียกว่า กระแสโมเมนเทรี่ โดยปกติค่ากระแสลัดวงจรที่คำนวณไว้จะเป็นกระแสสมมาตร (rms) ซึ่งไม่ได้รวมส่วนประกอบกระแสตรงเข้าไปด้วย ฉะนั้นการหาค่ากระแสโมเมนเทรี่สามารถหาได้ดังนี้

กระแสโมเมนเทรี่ = กระแสสมมาตร (rms) x ค่าตัวคูณ …………6.10

และค่าตัวคูณดังในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ตัวคูณที่ใช้หาค่ากระแสโมเมนเทรี่

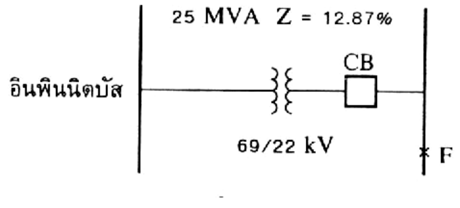
พิกัดแรงดันเบรกเกอร์	ตัวคูณ
มากกว่า 5 kV	1.6
น้อยกว่า 5 kV	1.6
ไม่เกิน 600 V	1.25

6.2.2 กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (interrupting current) หรือเรียกอักษรย่อ ค่า IC เป็นกระแสลัดวงจรสมมาตร(rms) โดยอุปกรณ์ป้องกันต้องสามารถขัดจังหวะการไหลของกระแสลัดวงจร หรือสามารถตัดกระแสได้ หลังจาก 3, 5 หรือ 8 ไซเคิลภายใต้แรงดันที่กำหนด ในขณะที่หลังจาก 8 ไซเคิลแล้วนั้นจะไม่มีส่วนประกอบกระแสตรงอยู่เลย ดังรูปที่ 2.15 ฉะนั้นการหาขนาด IC ของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นจึงขึ้นอยู่กับความเร็วของเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยทั่วไปมักใช้ตัวคูณ คูณกับค่ากระแสลัดวงจรสมมาตร ดังตารางที่ 2.3 อย่างไรก็ตามการเลือกขนาด IC ของเบรกเกอร์ต้องให้เท่ากับหรือมากกว่าค่ากระแสลัดวงจร แต่ถ้าเลือกขนาด IC ของเบรกเกอร์ต่ำค่ากระแสลัดวงจร โอกาสเบรกเกอร์จะระเบิดย่อมเกิดขึ้นได้เช่นกัน

ตารางที่ 6.3 ตัวคูณหาค่า IC ของเบรกเกอร์

เวลาการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์	ตัวคูณ
8 ไซเคิล หรือ CB ตัดช้า	1.0
5 ไซเคิล	1.1
3 ไซเคิล	1.2
2 ไซเคิล	1.4

ตัวอย่างที่ 6.4 หม้อแปลงกำลังขนาด 25 MVA 69/22 kV สมมติว่าหม้อแปลงต่ออยู่กับแหล่งจ่ายอินพินนิตบัส จงเลือกขนาดกระแสโมเมนเทรี่และค่า IC ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เวลาการตัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์ 8 ไซเคิล ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15

วิธีทำ $Z = 12.87\,\% = 0.1287$ p.u.

แปลง Z 0.1287 p.u. ให้เป็นโอห์ม

$$Z = 0.1287 \times \frac{(22)^2}{25}$$

$$= 2.491632\ \Omega$$

ในสมการที่ 6.5 $I_f = \frac{Vf}{Z} = \frac{22000}{\sqrt{3}\ x\ 2.491632}$

$$= 5098\ \text{A} = 5.098\ \text{kA}$$

หรือสามเฟสฟอลต์ MVA $= \sqrt{3}\ \text{x}\ 22\ \text{x}\ 5.098$

$$= 194.25\ \text{MVA}$$

ในตารางที่ 6.2 พิกัดแรงดันของ CB มากกว่า 5 kV (ใช้ 24 kV) ตัวคูณ 1.6

กระแสโมเมนเทรี่ของ CB $= 1.6\ \text{x}\ 5098$

$$= 8156.8\ \text{A} = 8.1568\ \text{kA}$$

หรือโมเมนเทรี่สามเฟสฟอลต์ MVA ของ CB $= \sqrt{3}\ \text{x}\ 22\ \text{x}\ 8.1568$

$$= 310.8\ \text{MVA}$$

ในตารางที่ 6.3 เวลาการตัดของ CB 8 ไซเคิล ตัวคูณเท่ากับ 1.0

$\therefore$ ค่า IC ของ CB $= 5.098\ \text{x}\ 1.0$

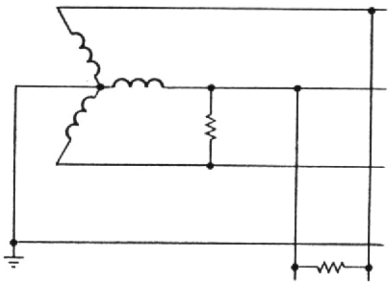
= 5.098 kA ที่แรงดัน 22 kA

หรือกำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ของ CB $= 194.25\ \text{x}\ 1.0$

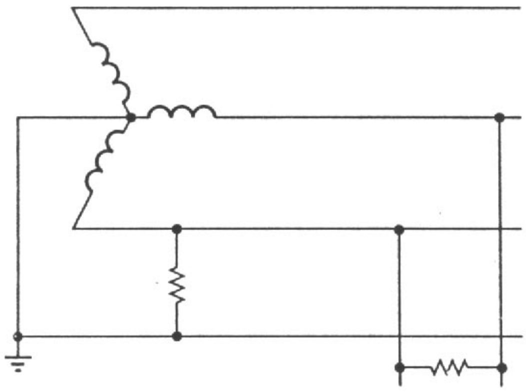
$= 194.25$ MVA **ตอบ**

6.3 ฟอลต์ไม่สมมาตร

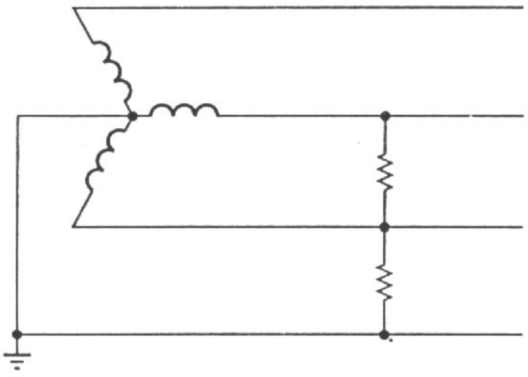
ฟอลต์ไม่สมมาตร (unsymmetrical fault) ในระบบไฟฟ้านั้นแบ่งออกเป็นฟอลต์ลงดินเส้นเดียว (single line-to-ground fault) เกิดขึ้นจากตัวนำตกลงสู่ดินหรือสัมผัสกับสายศูนย์ดังรูปที่ 6.16 ฟอลต์ระหว่างสาย (line-to-line fault) เกิดจากตัวนำ 2 ตัวนำในระบบไฟฟ้าลัดวงจรถึงกันดังรูปที่ 6.17 และฟอลต์สองสายลงดิน (double line-to-ground fault) เกิดจากตัวนำ 2 ตัวนำตกลงสู่ดินหรือตัวนำทั้ง 2 สัมผัสกับสายศูนย์ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.16 ฟอลต์ลงดินเส้นเดียว

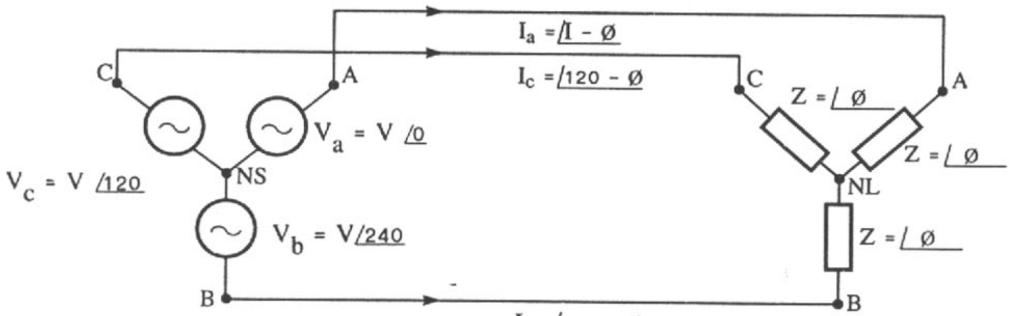


รูปที่ 6.17 ฟอลต์ระหว่างสาย



รูปที่ 6.18 ฟอลต์สองสายลงดิน

6.3.1 ส่งประกอบสมมาตร การศึกษาวิธีการของส่วนประกอบสมมาตร (symmetrical component) ทั้งนี้ก็เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาในกรณีที่เกิดฟอลต์ที่เป็นชนิดฟอลต์ไม่สมมาตร การเกิดฟอลต์ไม่สมมาตรของระบบการส่งจ่ายไฟฟ้า จะประกอบด้วยค่าการลัดวงจรของอิมพีแดนซ์ระหว่างสายอิมพีแดนซ์จากหนึ่งหรือสองสายลงสู่ดิน หรือสายส่งจ่ายขาด สิ่งเหล่านี้สามารถศึกษาด้วยวิธีของส่วนประกอบสมมาตร (symmetrical component) ในระบบ 3 เฟสสมดุล กระแสที่จุดใด ๆ ของตัวนำในระบบสามเฟสจะมีขนาดเท่ากัน และแต่ละเฟสจะแยกกัน 120^0 ดังรูปที่ 6.19



แรงดันเฟสต่อเฟส :

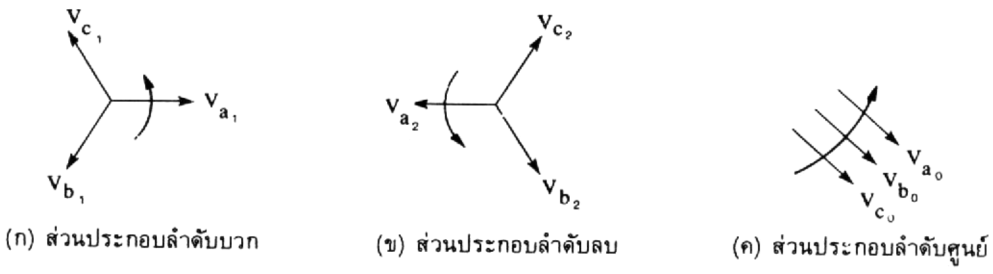
$$V_{ab} = V_b - V_a = \sqrt{3}\,V\angle 210$$

$$V_{bc} = V_c - V_b = \sqrt{3}\,V\angle 90$$

$$V_{ca} = V_a - V_c = \sqrt{3}\,V\angle 330$$

รูปที่ 6.19 กระแสและแรงดันในระบบสามเฟสสมดุล

6.3.2 การสร้างเฟสเซอร์ไม่สมมาตรจากส่วนประกอบสมมาตร เฟสเซอร์ไม่สมมาตรในระบบ 3 เฟส สามารถแยกเป็นระบบสมดุลทางเฟสเซอร์ออกเป็นส่วนประกอบลำดับบวก ส่วนประกอบลำดับลบ และส่วนประกอบลำดับศูนย์ดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 เฟสเซอร์ส่วนประกอบสมมาตรของสามเฟสเซอร์ไม่สมดุล

1. ส่วนประกอบลำดับบวก (positive-sequence component) ดังรูปที่ 6.20 (ก) เลขห้อยท้าย 1 ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน ระยะห่างแต่ละเฟส 120^0 เรียงลำดับเฟสเช่นเดียวกับเฟสเซอร์เดิม ส่วนประกอบลำดับบวกจะหมุนตามเข็มนาฬิกา หมุนตามลำดับเฟส abc

2. ส่วนประกอบลำดับลบ (negative-sequence component) ดังรูปที่ 6.20 (ข) เลขห้อยท้าย 2 ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน ระยะห่างแต่ละเฟส 120^0 เรียงลำดับตรงกันข้ามกับเฟสเซอร์เดิม ส่วนประกอบลำดับลบ จะหมุนกลับลำดับเฟสกับทิศทางเดิม acb

3. ส่วนประกอบลำดับศูนย์ (Zero-sequence component) ดังรูปที่ 6.20 (ค) เลขห้อยท้าย 0 ประกอบด้วย 3 เฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากัน มีทิศทางไปทางเดียวกัน

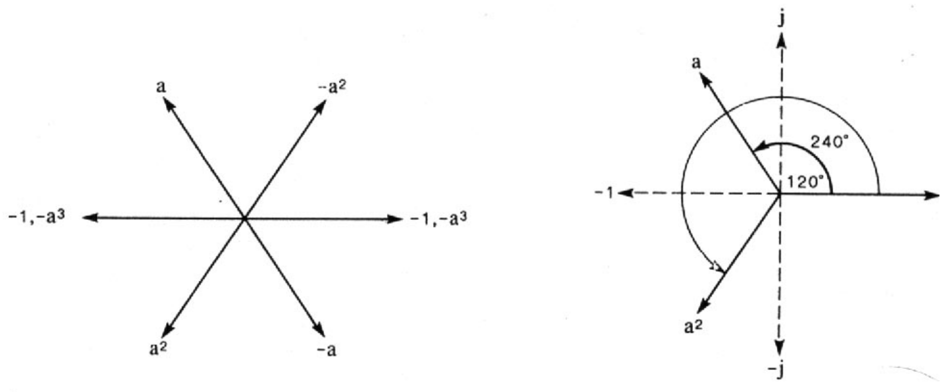
แต่ละเฟสเซอร์ไม่สมดุลเดิมเป็นผลรวมของส่วนประกอบเฟสเซอร์เดิมในสมการดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \qquad \text{…………………(6.11)}$$

6.3.3 โอเปอร์เรเตอร์ (operator) เนื่องจากระยะห่างแต่ละเฟสทั้งแรงดันและกระแสห่างกัน 120^0 ตัวคูณจำนวนค่าเชิงซ้อน (complex number) สองตัวสามารถหาขนาดและผลรวมของมุมได้ขนาดจำนวนค่าเชิงซ้อนและมุม θ เป็นค่าโอเปอร์เรเตอร์หมุนตามเฟสเซอร์ ดังรูปที่ 6.21



(ก) a โอเปอร์เรเตอร์ (ข) j โอเปอร์เรเตอร์

รูปที่ 6.21 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของโอเปอร์เรเตอร์ a และ j

จากรูปที่ 6.21 (ข)

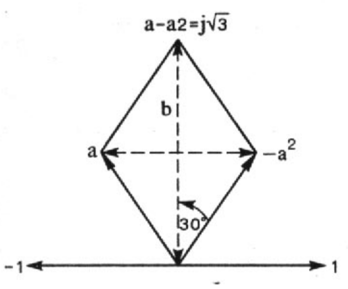
$$a = 1\angle 120^\circ = 1\ (\cos 120^\circ + j\sin 120^\circ) = -0.5 + j\,0.866$$

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = 1\ (\cos 240^\circ + j\sin 240^\circ) = -0.5 + j\,0.866$$

$$a^3 = 1\angle 360^\circ = 1\angle 0^\circ = 1$$

$$a^4 = 1\angle 120^\circ = a = -5 + j\,0.866$$

$$a^4 - a^2 = a - a^2 = j\sqrt{3}$$ ดังรูปที่ 6.22



$$b = 2\cos 30^\circ = 2\times\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$= j\sqrt{3}$$

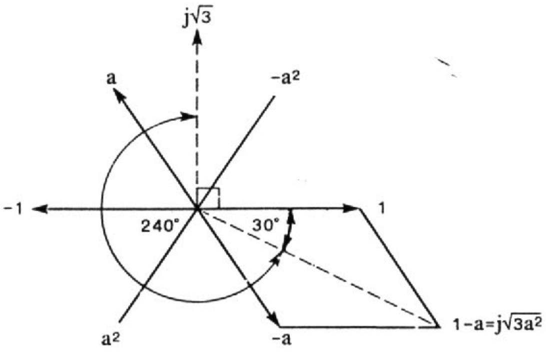
รูปที่ 6.22 $a - a^2$ เป็น j โอเปอร์เรเตอร์มีค่า j 3

$$a - a^2 = -j\sqrt{3}$$

$$1 + a = -a^2 = -(-0.5 - j\,0.866) = 0.5 + j\,0.866$$

$$1 - a = 1 - (-0.5 - j\,0.866) = 1.5 + j\,0.866 = 1.732 \angle 30^\circ = j\sqrt{3} \angle 240^\circ$$

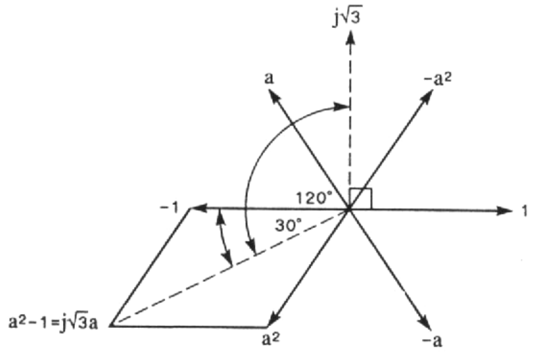
$$= j\sqrt{3}\ a^2$$ ดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 1 - a เป็น j โอเปอร์เรเตอร์มีค่า $j\sqrt{3}a^2$

$$a^2 - 1 = (-0.5 - j\,0.866) - 1 = -1.5 + j\,0.866 = 1.732 \angle 30^\circ = j\sqrt{3} \angle 120^\circ$$

$$= j\sqrt{3}\ a$$ ดังรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 a^2 - 1 เป็น j โอเปอร์เรเตอร์มีค่า $j\sqrt{3}\,a$

6.3.4 ส่วนประกอบสมมาตรของเฟสเซอร์ไม่สมสมาตร (symmetrical component of unsymmetrical phaser) เพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ 2.11 เมื่อเทียบกับรูปที่ 6.20 จะได้สมการดังนี้

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \qquad V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2} \qquad V_{c2} = a^2 V_{a2} \qquad (6.12)$$

$$V_{b0} = V_{a0} \qquad V_{c0} = V_{a0}$$

แทนค่าสมการที่ 6.12 ลงในสมการที่ 6.11 จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \qquad (6.13)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}$$

เขียนฟอร์มใหม่ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \qquad (6.14)$$

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \\ 1 & a \end{matrix}$$

เมื่อคูณทแยงลงเป็นบวก คูณทแยงขึ้นเป็นลบ

ดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) $|A| = a^4 + a + a - (a^2 + a^2 + a^2)$

$$= 3a - 3a^2$$

$$|A| = 3(a - a^2)$$

ในรูปที่ 6.22 $a - a^2 = j\sqrt{3}$

$$|A| = 3j\sqrt{3}$$

หาค่าโคแฟกเตอร์ (cofactor)

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{6.15}$$

ค่าโคแฟกเตอร์เลขคู่เป็นบวกและเลขคี่เป็นลบ

$$A_{11} = \begin{bmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} = a^4 - a^2 = a - a^2 = j\sqrt{3}$$

$$A_{12} = -\begin{bmatrix} 1 & a \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} = -(a^2 - a) = a - a^2 = j\sqrt{3}$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} 1 & a^2 \\ 1 & a \end{bmatrix} = a - a^2 = j\sqrt{3}$$

$$A_{21} = -\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a & a^2 \end{bmatrix} = -(a^2 - a) = a - a^2 = j\sqrt{3}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} = a^2 - 1 = j\sqrt{3}\ a$$

$$A_{23} = -\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{bmatrix} = 1 - a = j\sqrt{3}\ a^2$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \end{bmatrix} = a - a^2 = j\sqrt{3}$$

$$A_{32} = -\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{bmatrix} = 1 - a = j\sqrt{3}\ a^2$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} = a^2 - 1 = j\sqrt{3}\ a$$

แทนค่าโคแฟกเตอร์ A ลงในสมการที่ 6.15

$$\text{โคแฟกเตอร์ A} \quad \begin{bmatrix} j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3} \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3}\,a & j\sqrt{3}\,a^2 \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3}\,a^2 & j\sqrt{3}\,a \end{bmatrix}$$

โคแฟกเตอร์ A ทรานสโพส (cofactor A transpose) เปลี่ยนโรว์เป็นคอลัมน์และจากคอลัมน์เป็นโรว์

$$A^{T} \qquad \begin{bmatrix} j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3} \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3}\,a & j\sqrt{3}\,a^2 \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3}\,a^2 & j\sqrt{3}\,a \end{bmatrix}$$

อินเวิร์สเมตริกซ์ (inverse matrix)

$$A^{-1} = \frac{A^T}{|A|} = \frac{1}{3j\sqrt{3}} \begin{bmatrix} j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3} \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3}\,a & j\sqrt{3}\,a^2 \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3}\,a^2 & j\sqrt{3}\,a \end{bmatrix}$$

$$= \frac{j\sqrt{3}}{3j\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \qquad (6.16)$$

จากสมการที่ 6.14 เมื่ออินเวิร์สเมตริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \qquad (6.17)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \qquad (6.18)$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)$$

อย่างไรก็ตามสามารถหาในเทอมของกระแสได้เช่นกัน ในสมการที่ 6.14

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \qquad (6.19)$$

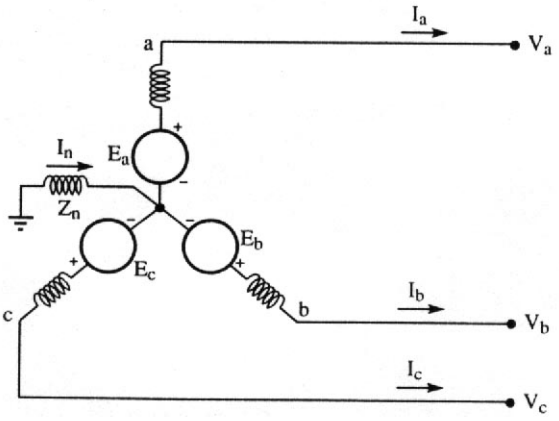
$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \tag{6.20}$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \tag{6.21}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

6.3.5 ลำดับวงจรข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด เครื่องกำเนิดไม่จ่ายโหลดและต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์ ดังรูปที่ 6.25 แรงดันที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเฟสคือ E_a, E_b และ E_c และจ่ายโหลดกระแส I_a, I_b และ I_c



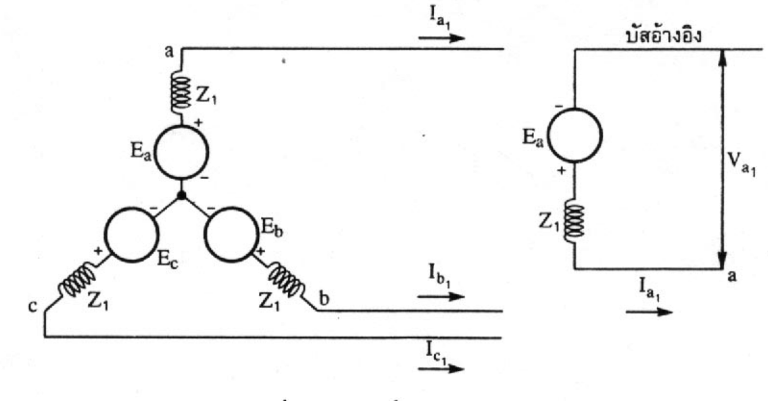
รูปที่ 6.25 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด ต่อลงดินโดยผ่านรีแอกเตอร์ Z_n

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1}Z_1$$

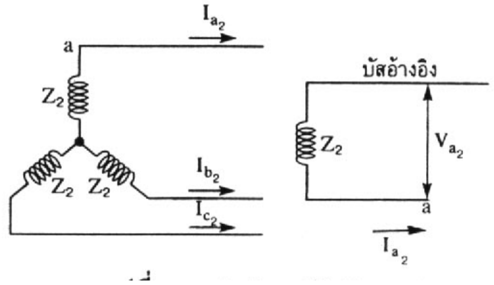
$$V_{a2} = E_{a2} - I_{a2}Z_2 \tag{6.22}$$

$$V_{a0} = E_{a0} - I_{a0}Z_0$$

ในกรณีที่แรงดันที่ผลิตสมดุล E_{a2} = E_{a0} – 0 และค่า E_{a1} เป็นแรงดันของแหล่งจ่าย E_a ส่วน Z_1 เป็นอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ดังรูปที่ 6.26 ค่า Z_1 เกิดขึ้นได้ทั้งสภาพซับทรานเชียนต์ ทรานเชียนต์และสถานะคงตัว ส่วนค่า Z_2 เป็นอิมพีแดนซ์ลำดับลบของเครื่องกำเนิด โดยทั่วไปเครื่องกำเนิด-ไฟฟ้าแบบกังหัน (turbine generator) ที่เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดขั้วยื่น (salient pole) Z_2 จะมีค่าซับทรานเชียนต์เท่ากับ Z_1 แต่ไม่มีแหล่งจ่ายดังรูปที่ 6.27 ส่วนค่า Z_0 เป็นอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผลของอิมพีแดนซ์ Z_n ตามกฎทางเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's law) กระแสสายศูนย์จะมีค่า



รูปที่ 6.26 อิมพีแดนซ์ลำดับบวก



รูปที่ 6.27 อิมพีแดนซ์ลำดับลบ

I_n = $I_a + I_b + I_c$

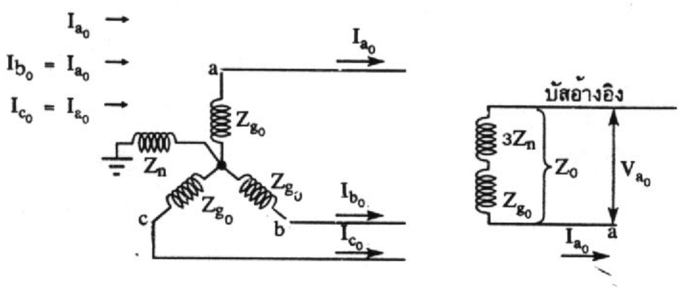
จากสมการที่ 6.21 I_{a0} = $(I_a + I_b + I_c)$

I_n = $3\, I_{a0}$ …………….6.23

V_n = $Z_n\, 3\, I_{a0}$

V_n = $3\, Z_n\, I_{a0}$ …………….6.24

ดังนั้นถ้าพิจารณาส่วนประกอบสมมาตรลำดับศูนย์อย่างเดียว ดังรูปที่ 6.28 แสดงค่า Z_{go} เป็นค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ Z_n เป็นอิมพีแดนซ์ระหว่างสายศูนย์หรือสายกราวด์



รูปที่ 6.28 อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์

แรงดันที่ขั้วต่อสายต่อกราวด์สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$V_{a0} = E_{a0} - 3 Z_n I_{a0} - Z_{g0} I_{a0} \qquad \text{...............6.25}$$

เปรียบกับสมการที่ 6.25 กับสมการ 6.22 จะได้สมการดังนี้

$$Z_0 = 3 Z_n + Z_{g0} \qquad \text{...............6.26}$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าสมดุล $E_{a2} = E_{a0} = 0$ และ $E_{a1} = E_a$ แทนค่าลงในสมการที่ 6.22 จะได้สมการใหม่ดังนี้

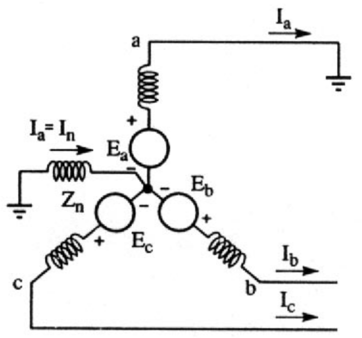
$$V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1$$

$$V_{a2} = - I_{a2} Z_2 \qquad \text{.....................6.27}$$

$$V_{a0} = - I_{a0} Z_0$$

6.4 ฟอลต์ลงดินเส้นเดียว

6.4.1 ฟอลต์ลงดินเส้นเดียวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด (single line-to-ground fault on an unload generator) เกิดจากเฟสหนึ่งเฟสใดลัดวงจรลงสู่ดินดังรูปที่ 6.29 แสดงไดอะแกรมฟอลต์ลงดินเส้นเดียวของเฟส a ที่ขั้วต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่จ่ายโหลด ที่จุดศูนย์ต่อผ่านรีแอกเตอร์ Z_n ลงสู่ดิน



รูปที่ 6.29 ไดอะแกรมฟอลต์ลงดินเส้นเดียวของเฟส a

$I_b = 0 \qquad I_c = 0 \qquad V_a = 0$

จากสมการที่ 6.20

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + \overset{0}{I_b} + \overset{0}{I_c}) = \frac{I_a}{3}$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + \overset{0}{aI_b} + \overset{0}{aI_c}) = \frac{I_a}{3}$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + \overset{0}{a^2I_b} + \overset{0}{aI_c}) = \frac{I_a}{3}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{I_a}{3}$$

$$\therefore I_a = 3 I_{a1} \text{ หรือ } 3 I_{a2} \text{ หรือ } 3 I_{a0} \tag{6.28}$$

ในสมการที่ 6.23 $I_n = 3 I_{a0}$

$$\therefore I_n = I_a$$

จากสมการที่ 2.27

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix}$$

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a2} = - Z_2 I_{a2}$$

$$V_{a0} = - Z_0 I_{a0}$$

เมื่อ $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$

ดังนั้น $V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = E_a - (Z_1 + Z_2 + Z_0)\ I_{a1}$

$$\therefore I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \tag{6.29}$$

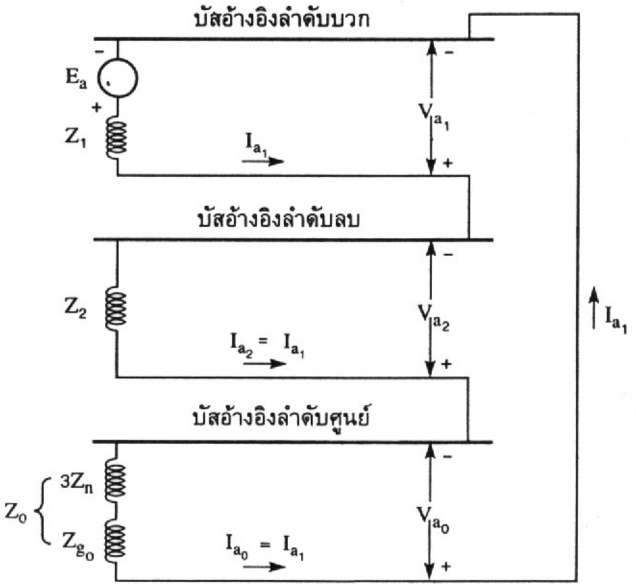
จากสมการที่ 2.28 เมื่อ $I_a = 3 I_{a1}$

$$I_a = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$\therefore I_f = \frac{3E_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \tag{6.30}$$

เมื่อ Ef = แรงดันที่ขั้วต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับสายศูนย์หรือสายดินก่อนเกิดฟอลต์

สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 6.30 แสดงการต่อลำดับวงจรข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด เมื่อเกิดฟอลต์ลงดินเส้นเดียวที่ขั้วต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เฟส a



รูปที่ 6.30 การต่อลำดับวงจรข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด เกิดฟอลต์ที่ขั้วต่อที่เฟส a

ตัวอย่างที่ 6.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 MVA 13.8 kV เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำหนดว่า ค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวก j 0.25 pu รีแอกแตนซ์ลำดับลบ j 0.35 pu และรีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ j 0.10 pu โดยที่สายศูนย์ต่อลงดินโดยตรง จงคำนวณหาค่ากระแสฟอลต์ลงดินเส้นเดียว เมื่อขั้วต่อสายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฟส a ลัดวงจรลงดิน

วิธีทำ จากสมการที่ 2.29

$$I_f = \frac{3E_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$Z_{\text{รวม}} = Z_1 + Z_2 + Z_0 = j\,0.25 + j\,0.35 + j\,0.10 = j\,0.7 \text{ pu}$$

ทำเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ให้เป็นอิมพีแดนซ์จริง (โอห์ม)

$$Z_{\text{จริง}} = Z\text{ pu } \frac{(kV)^2}{MVA} = j\,0.7 \frac{(13.8)^2}{20} = j\,6.6654\ \Omega$$

$$I_a = \frac{3\ x\ 13800}{\sqrt{3}\ x\ j6.6654} = -\,j\,3586 \text{ A}$$

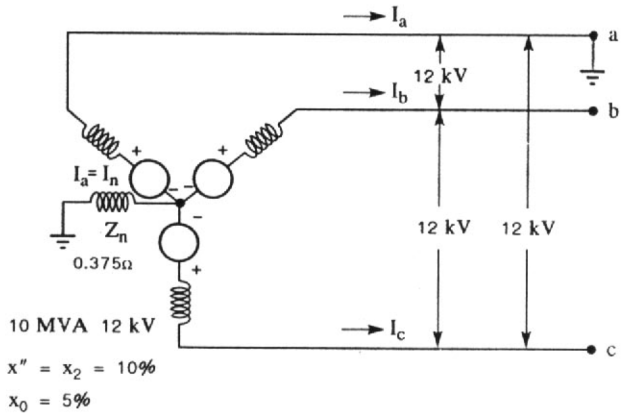
∴ กระแสลัดวงจรที่เฟส a ลงดิน = 3586 A **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 6.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 MVA 12 kV $X'' = X_2 = 10\ \%$ $X_0 = 5\ \%$ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่ได้จ่ายโหลด จงคำนวณค่ากระแสฟอลต์ลงดินเส้นเดียวดังรูปที่ 6.31

(ก) สายศูนย์ต่อลงดินผ่านรีแอกเตอร์ 0.375 Ω

(ข) สายศูนย์ต่อลงดินโดยตรง

(ค) ถ้าเกิดเฟสฟอลต์ค่ากระแสลัดวงจรนี้จะสูงกว่าฟอลต์ลงดินเส้นเดียวหรือไม่



รูปที่ 6.31

วิธีทำ (ก) $X'' = X_2 = Z_1 = Z_2 = j\,0.10$ pu

$X_0 = Z_0 = Z_{g0} + 3\,Z_n$ (สมการที่ 2.25)

จากสมการที่ 1.13 หาเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์

$$Z_n = \frac{0.375\ x\,10}{(12)^2} = j\,0.026 \text{ pu}$$

$$3\,Z_n = 3 \text{ x } j\,0.026 = j\,0.078 \text{ pu}$$

$$Z_0 = j\,0.05 + j\,0.078 = j\,0.128 \text{ pu}$$

$$Z_{\text{รวม}} = Z_1 + Z_2 + Z_0$$

$$= j\,0.1 + j\,0.1 + j\,0.128$$

$$= j\,0.328 \text{ p.u.}$$

ทำเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ให้เป็นอิมพีแดนซ์จริง (โอห์ม)

$$Z_{\text{จริง}} = Z_{\ p.u.}\frac{(kV)^2}{MVA}$$

$$= j\,0.328\ \frac{(12)^2}{10}$$

$$= j\,4.7232\ \Omega$$

จากสมการ $I_f = \dfrac{3 \, x \, 12000}{\sqrt{3} \; x \; j4.7232} = -\, j \, 4400 \text{ A}$

∴ กระแสลัดวงจรลงดินที่เฟส a เมื่อสายศูนย์ผ่านรีแอกเตอร์ลงดิน = 4400 A **ตอบ**

(ข) เมื่อสายศูนย์ต่อลงดินโดยตรง

$Z_1 = Z_2 = j\,0.1 \text{ pu} \qquad Z_0 = j\,0.5 \text{ pu}$

$Z_{รวม} = j\,0.1 + j\,0.1 + j\,0.05 = j\,0.25 \text{ pu}$

ทำเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ให้เป็นอิมพีแดนซ์จริง (โอห์ม)

$Z_{จริง} = Z \text{ pu } \dfrac{(kV)^2}{MVA} = j\,0.25 \; \dfrac{(12)^2}{10} = j\,3.6 \; \Omega$

จากสมการ $I_f = \dfrac{3 \, x \, 12000}{\sqrt{3} \; x \; j3.6} = -\, j \, 5773 \text{ A}$

∴ กระแสลัดวงจรลงดินที่เฟส a เมื่อสายศูนย์ต่อลงดินโดยตรง = 5773 A **ตอบ**

(ค) เมื่อเกิดสายเฟสฟอลต์

$Z_1 = j\,0.1 \text{ pu}$

ทำเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ให้เป็นอิมพีแดนซ์จริง (โอห์ม)

$Z_1 = j\,0.1 \; x \; \dfrac{(12)^2}{10} = j\,1.44 \; \Omega$

จากสมการ $I_f = \dfrac{E_f}{Z_1} = \dfrac{12000}{\sqrt{3} \; x \; j1.44} = -\,j\,4812 \text{ A}$

เมื่อเกิดสามเฟสฟอลต์ = 4812 A

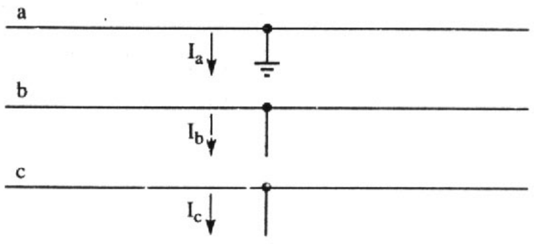
ถ้าพิจารณาสามเฟสฟอลต์และฟอลต์ลงดินเส้นเดียวเมื่อสายศูนย์ผ่านรีแอกเตนซ์ลงดิน

กระแสสามเฟสฟอลต์จะสูงกว่า 412 A (4812 – 4400 A)

ถ้าพิจารณาสามเฟสฟอลต์และฟอลต์ลงดินเส้นเดียวเมื่อสายศูนย์ต่อลงดินโดยตรง

กระแสฟอลต์ลงดินเส้นเดียวจะสูงกว่าสามเฟสฟอลต์ 961 A (5773 – 4812 A) **ตอบ**

6.4.2 ฟอลต์ลงดินเส้นเดียวในระบบไฟฟ้า (single line to ground fault on a power system) ดังรูปที่ 6.32 เป็นการลัดวงจรลงดินเฟสใดเฟสหนึ่งของสายส่งหรือสายจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 6.32 ไดอะแกรมเมื่อเกิดฟอลต์ลงดินเส้นเดียวในระบบไฟฟ้า

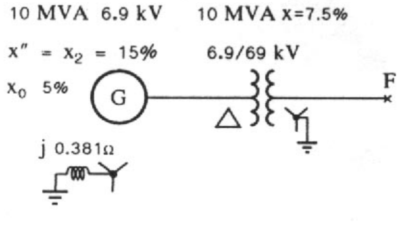
$I_b = 0 \qquad I_c = 0 \qquad V_a = 0$

จากสมการที่ 2.29

$$I_f = \frac{3V}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \tag{6.31}$$

V_f = แรงดันที่ตำแหน่งลัดวงจรเทียบกับสายศูนย์หรือสายดินก่อนลัดวงจร

ตัวอย่างที่ 6.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 10 MVA 6.9 kV ต่อแบบวาย X” = X_2 = 15 % และ X_0 = 5 % จุดศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อผ่านรีแอกเตอร์ 0.381 Ω ลงสู่ดิน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อกับหม้อแปลงขนาด 10 MVA 6.9/69 kV Δ – Y วายต่อลงดินโดยตรง ค่ารีแอกแตนซ์ 7.5 % จงคำนวณกระแสฟอลต์ลงดินเส้นเดียวถ้าเกิดฟอลต์ที่จุด F ดังรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33

วิธีทำ ที่เบส 6.9 kV 10 MVA

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า $X'' = X_2 = Z_1 = Z_2 = 15\ \% = j\,0.15$ pu

$X_0 = Z_{g0} = Z_0 = 5\ \% = j\,0.05$ pu

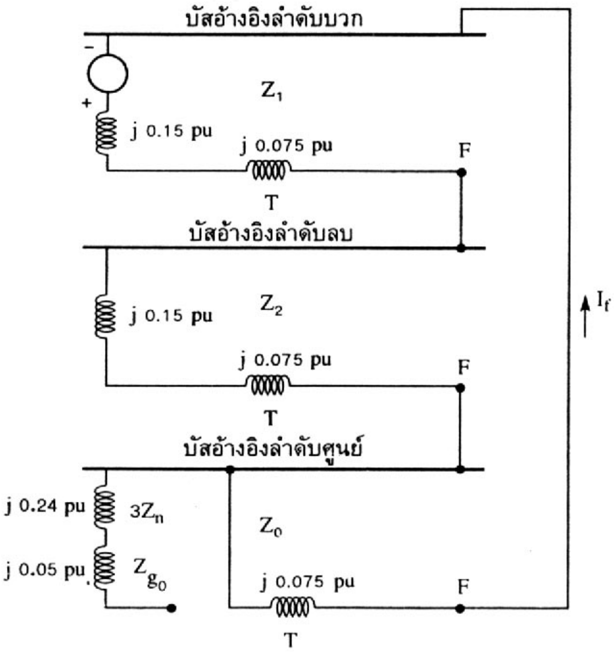
หม้อแปลง $X = Z_1 = Z_2 = Z_0 = 7.5\ \% = j\,0.075$ pu

อิมพีแดนซ์เบสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $= \dfrac{(6.9)^2}{10} = 4.761\ \Omega$

ตัวรีแอกเตอร์ จำกัดกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $Z_n = \dfrac{j\,0.381}{4.761} = j\,0.08$ pu

$3\,Z_n = 3 \times j\,0.08 = j\,0.24$ pu

การต่อรีแอกแตนซ์ลำดับบวก รีแอกแตนซ์ลำดับลบ และรีแอกแตนซ์ลำดับศูนย์ ดังรูปที่ 6.34



รูปที่ 6.34 การต่อรีแอกแตนซ์ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์

$Z_1 = Z_2 = j\,0.15 + j\,0.075 = j\,0.225$ pu

$Z_0 = j\,0.075$ pu

$Z_{รวม} = Z_1 + Z_2 + Z_0 = j\,0.225 + j\,0.225 + j\,0.075$ pu

$= j\,0.525$ pu

ทำเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ให้เป็นอิมพีแดนซ์จริง (โอห์ม)

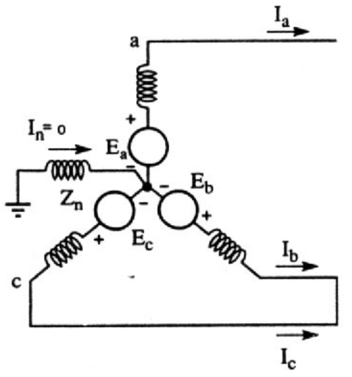
$Z_{รวม} = j\,0.525 \times \dfrac{(6.9)^2}{10} = j\,250\ \Omega$

$I_f = \dfrac{3 \times 69000}{\sqrt{3} \times j\,250} = -j\,478$ A

$\therefore$ กระแสฟอลต์ลงดินเส้นเดียวที่จุด F = 478 **A** **ตอบ**

6.5 ฟอลต์ระหว่างสาย

6.5.1 ฟอลต์ระหว่างสายเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด (line to line fault on an unload generator) เกิดจากการลัดวงจรระหว่างเฟสดังรูปที่ 6.35



รูปที่ 6.35 ไดอะแกรมฟอลต์ระหว่างสาย

เมื่อ $I_a = 0$ $I_b = -I_c$ และ $V_b = V_c$

จากสมการที่ 6.20 (เมื่อ $I_a = 0$ และ $I_b = -I_c$)

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix}$$

หรือในสมการที่ 6.21

$$I_{a0} = \frac{I_a - I_c + I_c}{3} = 0 \qquad (\text{เมื่อ } I_a = 0)$$

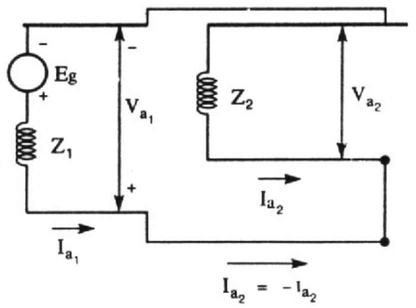
$$I_{a1} = \frac{I_a - aI_c + a^2 I_c}{3}$$

เมื่อ $I_a = 0$ และเอา (–) คูณตลอด จะได้

$$-I_{a1} = \frac{aI_c - a^2 I_c}{3}$$

$$I_{a2} = \frac{I_a - a^2 I_c + aI_c}{3}$$

เมื่อ $I_a = 0$ $\therefore$ $I_{a2} = -I_{a1}$



รูปที่ 6.36 ฟอลต์ระหว่างสายเฟส b และ c ที่ขั้วต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการที่ 6.18 และรูปที่ 6.36

$$V_{a1} = \frac{1}{3}\left(V_a + a\cancelto{V_c}{V_b} + a^2 V_c\right)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}\left(V_a + a^2\cancelto{V_c}{V_b} + a V_c\right)$$

$$\therefore \quad V_{a1} = V_{a2}$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3}\left(V_a + V_b + V_c\right)$$

เมื่อ $I_{a0} = 0$ และเมื่อกระแสลัดวงจรไม่ผ่านลงดิน Z_0 จึงแป็นอินพีนิต

$$\therefore \quad V_{a0} = 0$$

จากสมการที่ 6.27

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix}$$

เมื่อ $V_{a1} = V_{a2}$ และ $I_a = 0$, $I_{a2} = -I_{a1}$ จะได้

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1} \tag{6.32}$$

$$V_{a1} = Z_2 I_{a1} \tag{6.33}$$

จากสมการที่ 6.32 ลบสมการที่ 6.33 คือ $E_a - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a1}$ จะได้

$$(Z_1 + Z_2) I_{a1} = E_a$$

$$\therefore \quad I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \tag{6.34}$$

จากสมการที่ 6.19 เปลี่ยนเป็นเทอมของกระแส

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

เมื่อ $I_{a0} = 0$ และ $I_{a2} = -I_{a1}$ จะได้

$$I_a = 0 + I_{a1} - I_{a1} = 0$$

$$I_b = 0 + a^2 I_{a1} - aI_{a1}$$

เมื่อแทนค่า I_{a1} จากสมการที่ 6.34 จะได้

$$I_b = \frac{a^2 E_a}{Z_1 + Z_2} - \frac{aE_a}{Z_1 + Z_2}$$

$$= \frac{E_a(a^2 - a)}{Z_1 + Z_2}$$

เมื่อ $a^2 - a = j\sqrt{3}$ จะได้

$$I_b = -j\sqrt{3} \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$$

แต่ $I_b = -I_c$ ดังนั้นจะได้

$$I_c = j\sqrt{3} \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$$

$$\therefore \quad I_f = \pm j\sqrt{3} \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \tag{6.35}$$

ตัวอย่างที่ 6.8 จากตัวอย่างที่ 6.5 ถ้าเกิดฟอลต์ระหว่างสายเฟส b และ c จงคำนวณกระแสลัดวงจรที่เฟส b และเฟส c

วิธีทำ $Z_1 = j\,0.25$ pu $\qquad Z_2 = j\,0.35$ pu

$$Z_{รวม} = Z_1 + Z_2 = j\,0.25 + j\,0.35 = j\,0.6 \text{ pu}$$

ทำเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ให้เป็นอิมพีแดนซ์จริง (โอห์ม)

$$Z_{รวม} = j\,0.6 \times \frac{(13.8)^2 \times 1000}{20000} = j\,5.7132\,\Omega$$

เมื่อ $I_a = 0$

$$I_b = -j\sqrt{3}\,\frac{E_f}{Z_1 + Z_2} = \frac{-j\sqrt{3} \times 138000}{\sqrt{3} \times j5.7132} = -2415 \text{ A}$$

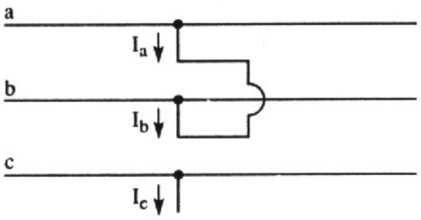
$$= 2415\,\angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_c = j\,\frac{\sqrt{3} \times 138000}{\sqrt{3} \times j5.7132} = 2415 \text{ A}$$

$$= 2415\,\angle 0^\circ \text{ A}$$

ตอบ

6.5.2 ฟอลต์ระหว่างสายในระบบไฟฟ้า (line to line fault on a power system) จากรูปที่ 2.69 เป็นการลัดวงจรระหว่างสายของสายส่งหรือสายจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 6.37 ไดอะแกรมเมื่อเกิดฟอลต์ระหว่างสายในระบบไฟฟ้า

$V_a = V_b \qquad I_c = 0 \qquad I_a = -I_b$

จากสมการที่ 6.35

$$I_f = \pm j\sqrt{3}\,\frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \tag{6.36}$$

ตัวอย่างที่ 6.9 จากตัวอย่างที่ 6.6 ถ้าเกิดฟอลต์ระหว่างสายเฟส a และ b จงคำนวณกระแสลัดวงจรที่เฟส a และเฟส b

วิธีทำ

$$Z_1 = Z_2 = j\,0.15 + j\,0.075 = j\,0.225 \text{ pu}$$

$$Z_{รวม} = Z_1 + Z_2 = j\,0.225 + j\,0.225 = j\,0.45 \text{ pu}$$

ทำเปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ให้เป็นอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

$$Z_{รวม} = j\,0.45 \times \frac{(69)^2}{10} = j\,214.25\ \Omega$$

จากสมการ

$$I_a = -j\sqrt{3}\,\frac{V_f}{Z_1 + Z_2} = \frac{-j\sqrt{3} \times 69000}{\sqrt{3} \times j214.25} = -322.05 \text{ A}$$

$$= 322.05\angle 180^\circ \text{ A}$$

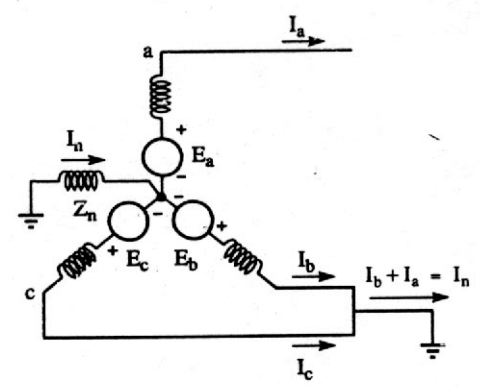
$$I_b = j\sqrt{3}\,\frac{V_f}{Z_1 + Z_2} = \frac{j\sqrt{3} \times 69000}{\sqrt{3} \times j214.25} = 322.05 \text{ A}$$

$$= 322.05\angle 0^\circ \text{ A}$$

ตอบ

6.6 ฟอลต์สองสายลงดิน

6.6.1 ฟอลต์สองสายลงดิน เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลด (double line to ground on an unload generator) เกิดจากการลัดวงจรระหว่างเฟสลงสู่ดิน ดังรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.38 ไดอะแกรมฟอลต์สองสายลงดิน

เมื่อ $V_b = 0$ $V_c = 0$ $I_a = 0$

จากสมการที่ 6.17

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

เมื่อ $V_b, V_c = 0$ $\therefore$ $V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3} V_a$ (6.37)

จากสมการ

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

จากสมการที่ 6.38 เมื่อ V_{a0} , $V_{a2} = V_{a1}$ จะได้

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1 = V_{a2} = V_{a0} \quad (6.39)$$

อินเวิร์สเมตริก Z^{-1}

$$Z^{-1} \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_0} \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

ดังนั้นสมการที่ 6.38 จะได้

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a - I_{a1} Z_1 \\ E_a - I_{a1} Z_1 \\ E_a - I_{a1} Z_1 \end{bmatrix} \quad (6.41)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_0} \end{bmatrix} \quad (6.42)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a - (E_a - I_{a1} Z_1)}{Z_1} \quad (6.43)$$

$$I_{a2} = -\frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_2} \quad (6.44)$$

$$I_{a0} = -E_a - \frac{I_{a1} Z_1}{Z_0} \quad 6.45)$$

จากสมการที่ 6.19 เมื่อ $I_a = 0$ จะได้

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$$

จากสมการที่ 6.43 + สมการที่ 6.44 และ + สมการที่ 6.45

$$\frac{E_a - (E_a - I_{a1} Z_1)}{Z_1} - \frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_2} - \frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_0} = 0$$

$$\frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_1} + \frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_2} + \frac{E_a - I_{a1} Z_1}{Z_0} = \frac{E_a}{Z_1}$$

$$\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}\right)(E_a - I_{a1} Z_1) = \frac{E_a}{Z_1}$$

$$I_{a1} Z_1 = E_a - \frac{E_a}{Z_1\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}\right)}$$

$$I_{a1} Z_1 = \frac{E_a Z_1 \left(\dfrac{1}{Z_1} + \dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right) - E_a}{Z_1 \left(\dfrac{1}{Z_1} + \dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right)}$$

$$I_{a1} Z_1 = \frac{\cancel{E_a} \dfrac{\cancel{Z_1}}{\cancel{Z_1}} + E_a \dfrac{Z_1}{Z_2} + E_a \dfrac{Z_1}{Z_0} - \cancel{E_a}}{Z_1 \left(\dfrac{1}{Z_1} + \dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right)}$$

$$I_{a1} Z_1 = \frac{E_a Z_1 \left(\dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right)}{Z_1 \left(\dfrac{1}{Z_1} + \dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right)}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a \cancel{Z_1} \left(\dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right)}{\cancel{Z_1} Z_1 \left(\dfrac{1}{Z_1} + \dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right)}$$

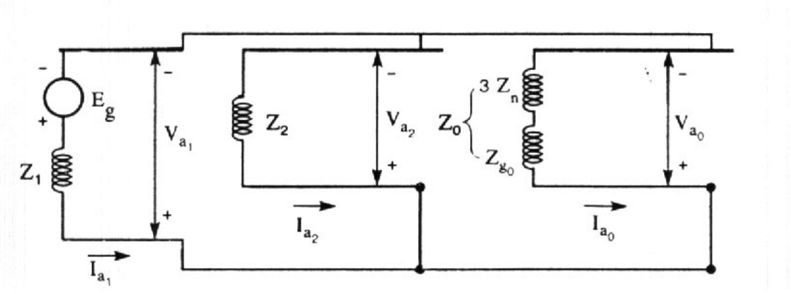
$$I_{a1} = \frac{E_a \left(\dfrac{Z_2 + Z_0}{Z_2 Z_0} \right)}{Z_1 \left(\dfrac{1}{Z_1} + \dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_0} \right)}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a \left(\dfrac{Z_2 + Z_0}{\cancel{Z_2 Z_0}} \right)}{\cancel{Z_1} \left(\dfrac{Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0 + Z_1 Z_2}{\cancel{Z_1} \cancel{Z_2} \cancel{Z_0}} \right)} = E_a \left(\frac{Z_2 + Z_0}{Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0 + Z_1 Z_2} \right)$$

$$I_{a1} = E_a \left(\frac{Z_2 + Z_0}{Z_2 Z_0 + Z_1 (Z_2 + Z_0)} \right)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \dfrac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \qquad \textbf{(6.46)}$$

ดังรูปที่ 6.39 แสดงการต่อลำดับวงจรข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่จ่ายโหลดเมื่อเกิดฟอลต์สองสายลงดิน



รูปที่ 6.39 การต่อลำดับวงจรข่ายเมื่อเกิดฟอลต์สองสายลงดินระหว่างเฟส b และ c

จากสมการที่ 6.39 และสมการที่ 6.44

$$I_{a2} = -\frac{V_{a2}}{Z_2} \tag{6.47}$$

จากสมการที่ 6.39 และสมการที่ 6.45

$$I_{a0} = -\frac{V_{a0}}{Z_0} \tag{6.48}$$

ในสมการที่ 6.19

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$$
$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}$$
$$I_c = I_{a0} + a\, I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

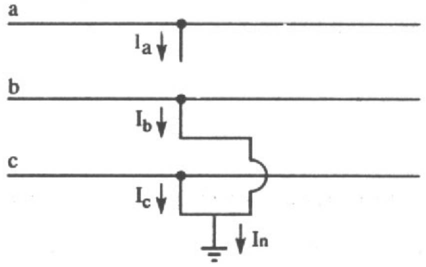
จากสมการที่ 6.19 สมการที่ 6.46 , สมการที่ 6.44 และสมการที่ 6.45 สามารถหาฟอลต์สองสายลงดินได้ในสมการที่ 6.49 และสมการที่ 6.50

$$\mathrm{I_f} = -j\sqrt{3}\, E_f \frac{Z_0 - aZ_2}{Z_1 Z_2 + Z_0(Z_1 + Z_2)} \tag{6.49}$$

และอีกเฟสหนึ่งจะมีค่า

$$\mathrm{I_f} = j\sqrt{3}\, E_f \frac{Z_0 - a^2 Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_0(Z_1 + Z_2)} \tag{6.50}$$

6.6.2 ฟอลต์สองสายลงดินในระบบไฟฟ้า (double line to ground fault on a power system) ดังรูปที่ 6.40 เป็นการลัดวงจรระหว่างสายต่อสายลงดินของสายส่งหรือสายจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 6.40 ไดอะแกรมเมื่อเกิดฟอลต์สองสายดินในระบบไฟฟ้า

$$V_b = V_c = 0 \qquad I_a = 0$$

จากสมการที่ 6.49 และสมการที่ 6.50

$$I_f = -j\sqrt{3}\, V_f \frac{Z_0 - aZ_2}{Z_1Z_2 + Z_0(Z_1 + Z_2)} \tag{6.51}$$

และอีกเฟสหนึ่งจะมีค่า

$$I_f = j\sqrt{3}\, V_f \frac{Z_0 - a^2Z_2}{Z_1Z_2 + Z_0(Z_1 + Z_2)} \tag{6.52}$$

…………………………………………..

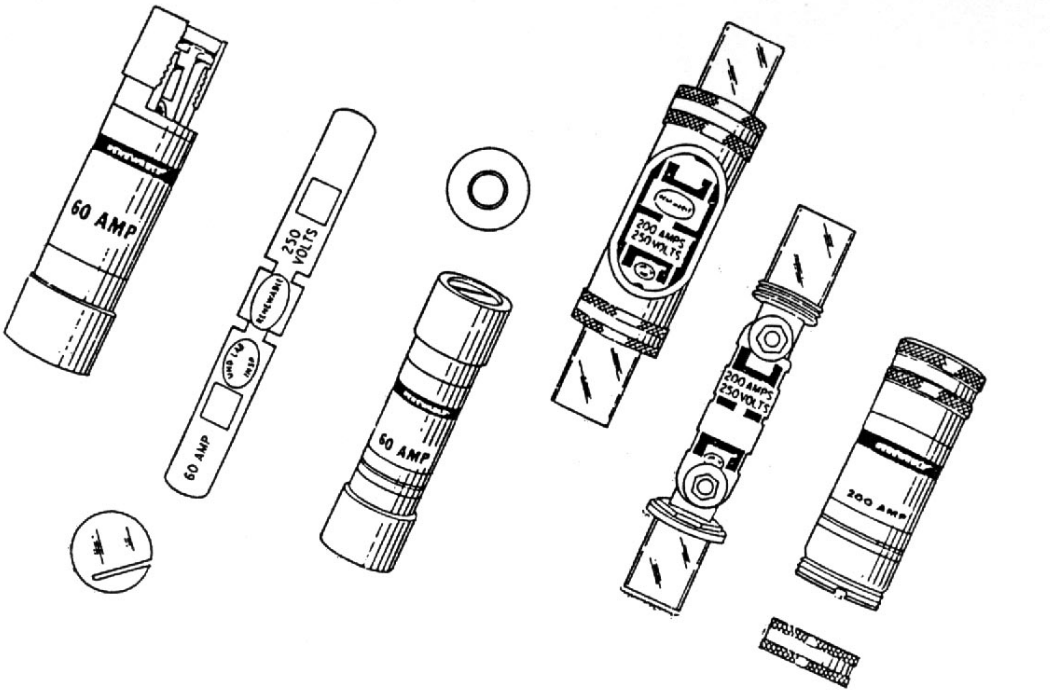
บทที่ 7
ฟิวส์แรงต่ำ
(Low Voltage Fuse)

ฟิวส์ หมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ต่ออนุกรมเข้ากับวงจรไฟฟ้า เพื่อป้องกันการเกิดกระแสไหลเกิน เช่นจากการลัดวงจรที่วงจรไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนที่อยู่หลังฟิวส์ โดยทั่วไปในตัวฟิวส์จะทำด้วยแถบหรือเส้นโลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำ หรือออกแบบให้เกิดการหลอมละลายได้โดยง่ายเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากเกินพิกัด ในช่วงเวลาที่ตัวฟิวส์หลอมละลายและเริ่มขาดออกจากกันก็จะเกิดการอาร์ค (arc) ฟิวส์นั้น (fuse holder) ก็จะต้องสามารถรับแรงดันตกคร่อมในขณะตัดวงจรได้ด้วย อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ฟิวส์ก็เป็นสิ่งสำคัญ ถ้าใช้ฟิวส์ที่ไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้า สายไฟฟ้า และอาจรวมถึงระบบไฟฟ้าบางส่วนหรือทั้งหมด

สำหรับฟิวส์แรงต่ำนี้เป็นฟิวส์ที่กำหนดแรงดันที่ระบุไม่เกิน 600 V

7.1 ชนิดของฟิวส์แรงต่ำ

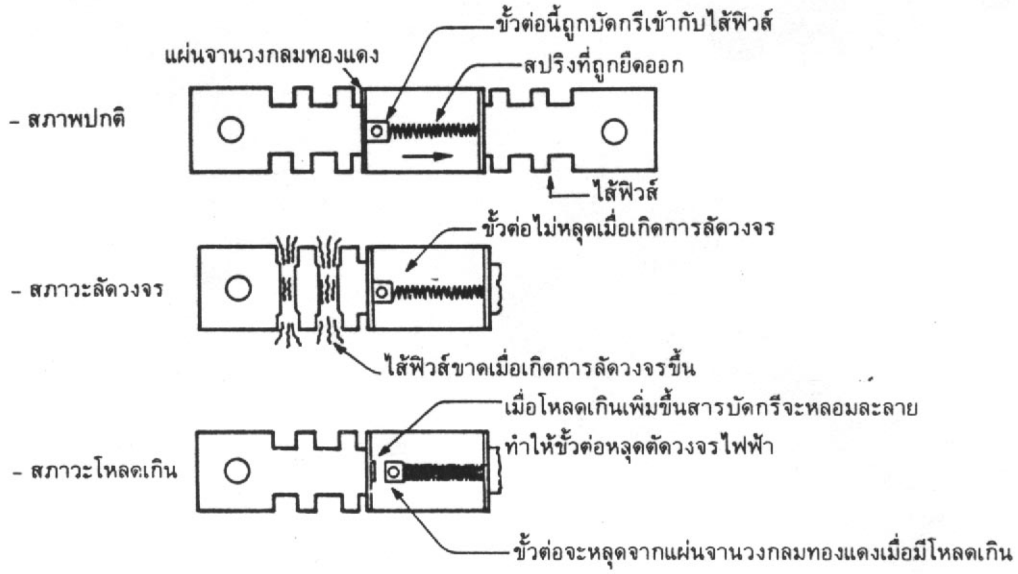
7.1.1 ฟิวส์เปลี่ยนไส้ได้ (renewable fuse) ภายหลังจากได้มีการค้นคว้าและทดลองเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวฟิวส์และกระบอกฟิวส์ พบว่าหากใช้กระบอกฟิวส์ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอาร์ค ก็ไม่จำเป็นต้องใส่สารผงที่เป็นฉนวนเพื่อใช้ดับอาร์ค ทั้งนี้จะสามารถเปลี่ยนเฉพาะตัวฟิวส์ใหม่ได้ ดังรูปที่ 7.1 แสดงรูปของฟิวส์เปลี่ยนไส้ได้ มีแบบต่าง ๆ เช่น ชนิดทรงกระบอก และชนิดที่ปลายทั้ง 2 ข้างเป็นแบบใบมีด ที่ปลายด้านหนึ่งของกระบอกฟิวส์จะมีเกลียว เพื่อใช้ในการเปิดออกเปลี่ยนตัวฟิวส์ใหม่ได้ การนำฟิวส์ชนิดนี้มาป้องกันเกี่ยวกับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ายังไม่ประสบผลเท่าที่ควร เพราะเป็นฟิวส์ทำงานไว ซึ่งจะขาดขณะมอเตอร์เริ่มหมุน จึงต้องเลือกใช้ฟิวส์ขนาดใหญ่สุดถึง 300 เปอร์เซ็นต์ของกระแสโหลดเต็มที่ของมอเตอร์ ย่อมเกิดปัญหาในเรื่องราคาฟิวส์ ฟิวส์ชนิดนี้โดยปกติทั่วไปจะเป็นประเภท H



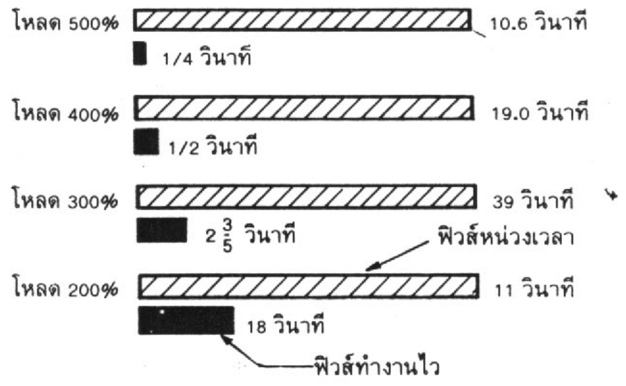
รูปที่ 7.1 ฟิวส์เปลี่ยนไส้ได้

7.1.2 ฟิวส์สองไส้หน่วงเวลา (dual element time delay fuse) ฟิวส์ชนิดนี้จะมีส่วนประกอบฟิวส์ 2 ส่วนต่ออันดับกัน สำหรับฟิวส์ส่วนป้องกันการลัดวงจร (short circuit section) ติดตั้งอยู่ที่ตัวฟิวส์ทั้ง 2 ข้าง ส่วนตรงกลางเป็นส่วนป้องกันโหลดเกิน (overload section) ฟิวส์ส่วนป้องกันการลัดวงจรจะขาดในขณะกระแส 500 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่าของอัตราพิกัดฟิวส์ และส่วนป้องกันโหลดเกินจะออกแบบให้ตัดวงจรขณะอุณหภูมิประมาณ 140 $^{\circ}$C ดังรูปที่ 7.2 ส่วนรูปที่ 7.3 แสดงการทำงานของฟิวส์สองไส้หน่วงเวลา และรูปที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบเวลาการตัดวงจรของฟิวส์ทำงานไว และฟิวส์สองไส้หน่วงเวลาในสภาพโหลดเกินต่าง ๆ

รูปที่ 7.2 ฟิวส์สองไส้หน่วงเวลา



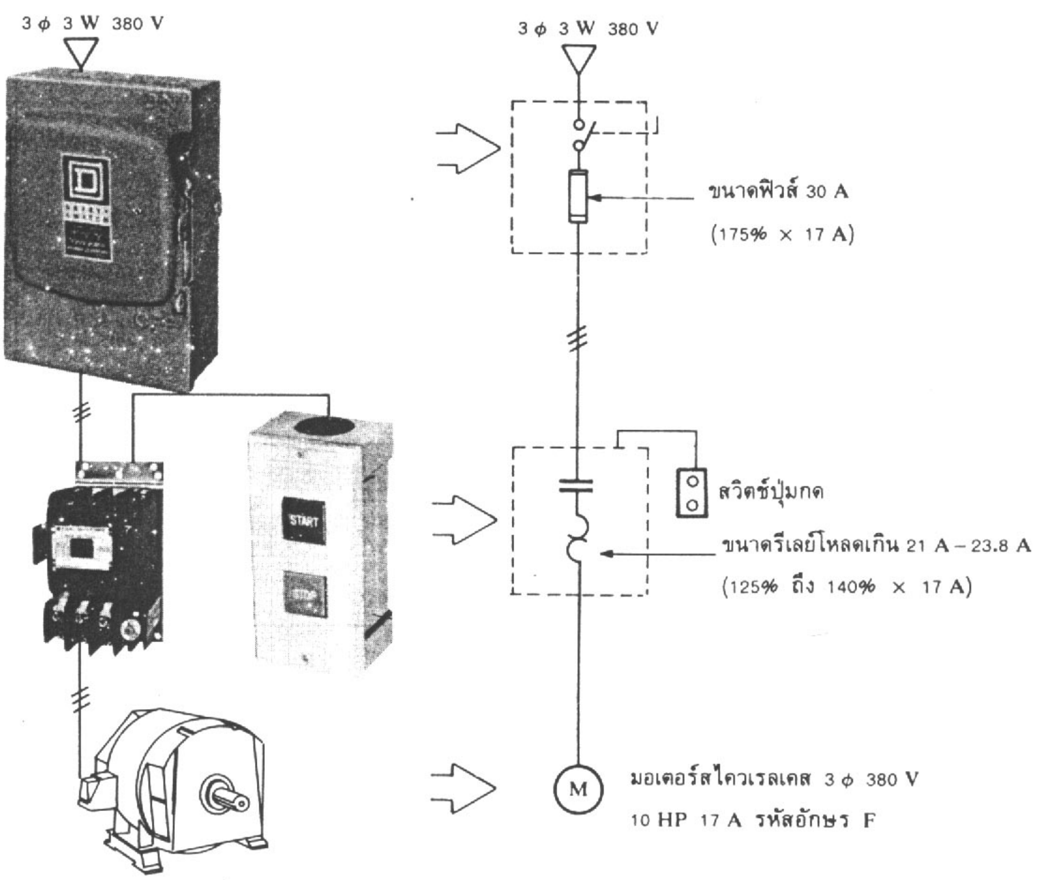
รูปที่ 7.3 การทำงานของฟิวส์สองไส้หน่วงเวลา



รูปที่ 7.4 **เปรียบเทียบเวลาการตัดของฟิวส์ทำงานไวและฟิวส์สองไส้หน่วงเวลา**

ฟิวส์ชนิดนี้จะใช้สำหรับป้องกัน มอเตอร์ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้า หรืออาจใช้กับสายประธานไฟฟ้า สายป้อน และวงจรย่อย ฟิวส์ชนิดนี้โดยปกติทั่วไปจะเป็นประเภท RK5 และ R การใช้ฟิวส์สองไส้หน่วงเวลา เซอร์กิตเบรกเกอร์มอเตอร์สตาร์ตเตอร์ หรือรีเลย์โหลดเกินร่วมกับแมกเนติกคอนแทกเตอร์ เป็นอุปกรณ์ป้องกันการใช้เกินกำลังของมอเตอร์ (overload protection) ขนาดอุปกรณ์ป้องกันการใช้เกินกำลังของมอเตอร์ไม่เกิน 125 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสเต็มที่บนแผ่นป้ายประจำเครื่อง แต่ถ้าขนาดอุปกรณ์ป้องกันการใช้งานเกินกำลังของมอเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถสตาร์ตมอเตอร์ได้ อนุญาตให้เลือกขนาดหรือปรับตั้งใหม่ได้ แต่ต้องไม่เกิน 140

เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสเต็มที่บนแผ่นป้ายประจำเครื่อง ส่วนขนาดเครื่องป้องกันการลัดวงจร (short circuit protection) ในตารางที่ 701 ถ้าใช้ฟิวส์หน่วงเวลาต้องมีขนาดไม่เกิน 175 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสเต็มที่บนแผ่นป้ายประจำเครื่อง (ถ้าไม่ตรงกับขนาดมาตรฐานฟิวส์อนุญาตให้เลือกขนาดสูงถัดไปได้) ดังรูปที่ 7.5

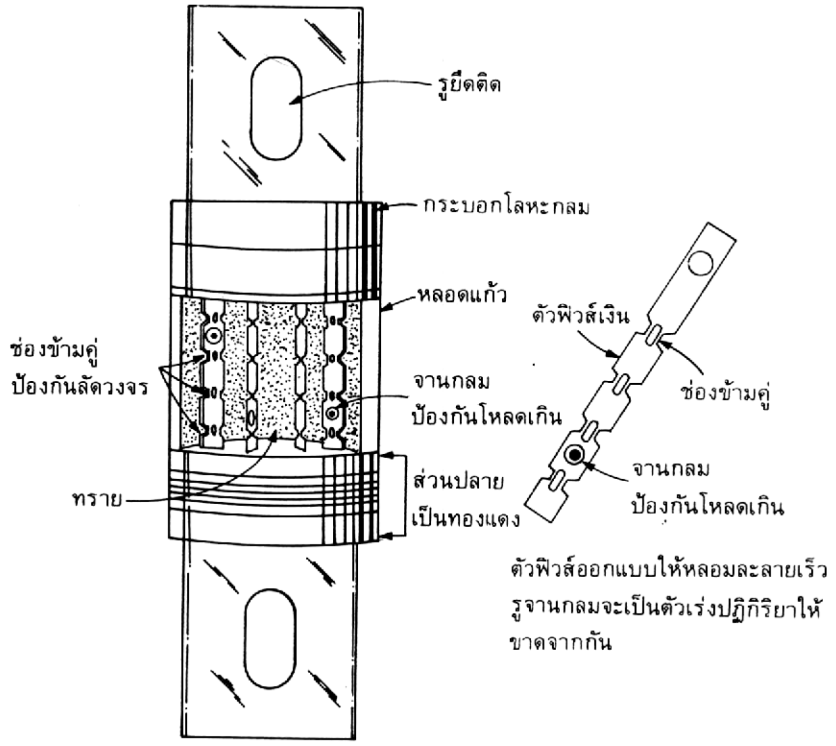


รูปที่ 7.5 การใช้ฟิวส์สองไส้หน่วงเวลาขนาด 30 A เป็นเครื่องป้องกันการลัดวงจรและเลือกใช้รีเลยโหลดเกินขนาดปรับตั้ง 21 A – 23 A เป็นเครื่องป้องกันการใช้เกินกำลังของมอเตอร์

ตารางที่ 7.1 พิกัดหรือขนาดปรับตั้งสูงสุดของเครื่องป้องกันการลัดวงจรและการลัดวงจรลงดินของวงจรย่อยมอเตอร์

ชนิดของมอเตอร์	ร้อยละของกระแสโหลดเต็มที่			
	ฟิวส์ทำงานไว	ฟิวส์หน่วงเวลา	เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปทันที	เซอร์กิตเบรกเกอร์เวลาผกผัน
มอเตอร์เฟสเดียวไม่มีรหัสอักษร......................	300	175	700	250
มอเตอร์กระแสสลับเฟสเดียวทั้งหมด และมอเตอร์ 3 เฟส แบบสไควเรลเคจและแบบซิงโครนัส ซึ่งเริ่มเดินโดยรับแรงดันไฟฟ้าเต็มที่ หรือเริ่มเดินผ่านตัวต้านทาน หรือรีแอกเตอร์				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	300	175	700	250
รหัสอักษร F ถึง V..........................	300	175	700	250
รหัสอักษร B ถึง E..........................	250	175	700	200
รหัสอักษร A..................................	150	150	700	150
มอเตอร์กระแสสลับทั้งหมดแบบสไควเรลเคจ และแบบซิงโครนัส ซึ่งเริ่มเดินโดยผ่านหม้อแปลงออโต้				
กระแสไม่เกิน 30 A				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	250	175	700	200
กระแสเกิน 30 A				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	200	175	700	200
รหัสอักษร F ถึง V..........................	250	175	700	200
รหัสอักษร B ถึง E..........................	200	175	700	200
รหัสอักษร A..................................	150	150	700	150
มอเตอร์แบบไฮ-รีแอกแตนซ์สไควเรจเคจ				
กระแสไม่เกิน 30 A				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	250	175	700	250
กระแสเกิน 30 A				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	200	175	700	200
มอเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	150	150	700	150
มอเตอร์กระแสตรง (แรงดันคงที่)				
ขนาดไม่เกิน 50 แรงม้า				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	150	150	250	150
ขนาดเกิน 50 แรงม้า				
ไม่มีรหัสอักษร..................................	150	150	175	150

7.1.3 ฟิวส์กำจัดกระแส (current limiting fuse) การพัฒนาระบบไฟฟ้าให้มีความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าสูงขึ้น ฟิวส์ธรรมดาจะสามารถป้องกันกระแสลัดวงจรได้สูงสุด 10 kA ซึ่งไม่อาจใช้ในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่นี้ได้ ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องกระบอกฟิวส์ระเบิกและอื่น ๆ ขึ้นบ่อยครั้ง จนกระทั่งในปลายปี 2470 ได้มีการออกแบบฟิวส์กำจัดกระแสออกมาใช้ โดยฟิวส์ชนิดนี้จะขาดอย่างรวดเร็ว เมื่อต้องรับกระแสลัดวงจรที่สูงมาก จากการค้นคว้าพบว่าหากเจาะตัวฟิวส์ให้เป็นร่องดังรูปที่ 7.6 และใช้ผงทราย (quartz sand) เป็นส่วนประกอบด้วย จะทำให้ความหนาแน่นของกระแสของส่วนตัวฟิวส์ในช่วงที่เรียกว่า ช่องข้ามคู่ (double bridge) มีค่าค่อนข้างสูง เมื่อมีกระแสลัดวงจรที่สูงมากไหลผ่าน ก็จะทำให้ส่วนช่องข้ามคู่หลอมละลาย ความร้อนที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้จะทำให้ทรายที่อยู่โดยรอบหลอมเหลวและหุ้มห่อส่วนที่ขาดของวงจรอย่างรวดเร็ว ทำให้ส่วนของตัวฟิวส์ที่ขาดออกจากกันถูกคั่นด้วยฉนวนและสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้ โดยหลักการแล้วฟิวส์ประเภทนี้ใช้ทรายดูดซึมพลังความร้อนที่เกิดขึ้นในฟิวส์ จะเป็นการลดความรุนแรงและความเสียหายในระบบไฟฟ้าได้อย่างมาก เมื่อฟิวส์ประเภทนี้มีความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์กระแสลัดวงจรได้สูง ๆ จึงเรียกว่า ฟิวส์ HRC (high rupturing capacity) ซึ่งฟิวส์ประเภทนี้ได้แก่ L, R, RK1, T, J และ gL/gI



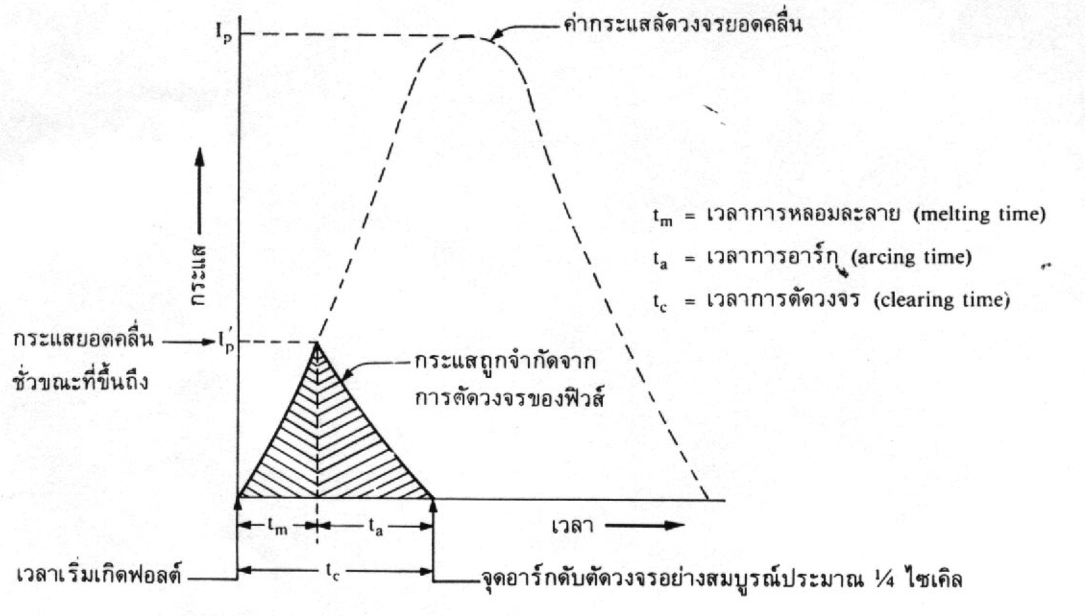
รูปที่ 7.6 ฟิวส์จำกัดกระแส

การจำกัดกระแส (current limitation) ฟิวส์จำกัดกระแสนี้จะจำกัดกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านฟิวส์ต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรที่ขึ้นถึงสูงสุด ทั้งนี้เพื่อลดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากพลังงานในรูปของความร้อน อันเกิดจากผลของกระแส (rms) ยกกำลังสองคูณกับเวลาเป็นวินาที ดังนี้

$$\text{พลังงานความร้อน} = I^2_{(rms)}\, t$$

ในขณะเดียวกันแรงทางแม่เหล็กที่กระทำกับอุปกรณ์ไฟฟ้า จะแปรผันตามกระแสยอดคลื่น (peak current) ยกกำลังสอง คือ I^2_p

การที่กระแสลัดวงจรจำนวนมาก ๆ และยอมให้กระแสไหลผ่านในเวลานาน ๆ ย่อมทำให้ฉนวนตัวนำไหม้ หลอมละลาย หรือเกิดการโก่งงอที่บัสบาร์ เป็นต้น ฉะนั้นการเลือกใช้ฟิวส์กำจัดกระแสเพื่อให้ปลอดภัยแก่อุปกรณ์ไฟฟ้านั้น จึงต้องมีความระมัดระวัง ฟิวส์จำกัดกระแสต้องมีค่าพิกัดความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์เพื่อตัดกระแสฟอลต์ได้อย่างปลอดภัย พร้อมทั้งมีความสามารถที่จะจำกัดกระแสยอดคลื่นชั่วขณะที่ขึ้นถึง (I'_p) ให้มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสลัดวงจรยอดคลื่น (I_p) ดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 ผลของฟิวส์จำกัดกระแส

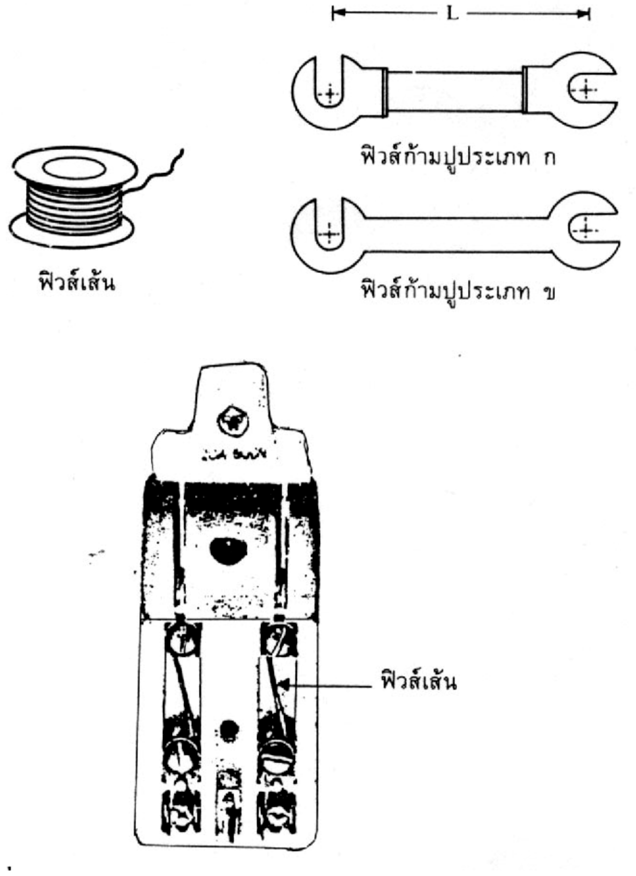
7.2 รูปแบบฟิวส์แรงต่ำ

7.2.1 ฟิวส์แบบเปลือย ฟิวส์ชนิดนี้มีรูปร่างเป็นเส้นลวดหรือแท่งแบน ๆ (ฟิวส์ก้ามปู) ซึ่งออกแบบมาไว้ใช้ร่วมกับคัดเอ้าต์ดังรูปที่ 7.8 โดยปกติทั่วไปตัวฟิวส์จะทำด้วยตะกั่วหรือส่วนผสมของตะกั่วกับดีบุก มีค่าพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 1 kA ถึง 3 kA เท่านั้น จึงเหมาะที่จะใช้กับระบบไฟฟ้าขนาดเล็ก สำหรับฟิวส์ก้ามปูที่ได้รับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) นั้นใช้กับแรงดันต่ำที่กำหนดไม่เกิน 250 V สำหรับกระแสตรง และกระแสสลับความถี่ 50 Hz แรงดันที่กำหนดไม่เกิน 500 V ส่วนกระแสที่กำหนดไม่เกิน 100 A ได้แก่ 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 75 และ 100 A

1. ประเภทของฟิวส์ก้ามปู แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภท ก และประเภท ข ดังตารางที่ 7.2

(ก) ประเภท ก คือ ฟิวส์ก้ามปูที่มีไส้ฟิวส์ต่อกับขั้วต่อฟิวส์ด้วยการบัดกรีหรือการเชื่อม

(ข) ประเภท ข คือ ฟิวส์ก้ามปูที่มีไส้ฟิวส์และขั้วต่อฟิวส์ทำจากโลหะท่อนเดียวกันตลอด



รูปที่ 7.8 ฟิวส์เส้นและฟิวส์ก้ามปู เป็นอุปกรณ์ป้องกันซึ่งใช้ร่วมกับคัตเอ้าต์

ตารางที่ 7.2 ประเภทของฟิวส์ก้ามปู

แรงดันที่กำหนด (V)	ประเภทของฟิวส์*	กระแสที่กำหนด (A)
250 V	ก 35	3, 5, 10, 15
	ข 35	3, 5, 10, 15
	ก 45	3, 5, 10, 15, 20, 30
	ข 45	3, 5, 10, 15
	ก 55	40, 50, 60, 75, 100

* ตัวเลข 35, 45 และ 55 หมายถึง ความยาวของฟิวส์ (L) ขนาด 35 mm, 45 mm และ 55 mm ตามลำดับ

2. ชนิดของฟิวส์ก้ามปู แบ่งตามลักษณะเวลาที่ฟิวส์หลอมละลายออกเป็น 2 ชนิด คือ ฟิวส์ก้ามปูชั้นหนึ่ง และฟิวส์ก้ามปูชั้นสอง

(ก) ฟิวส์ก้ามปูชั้นหนึ่ง (fast type fuse) หมายถึง ฟิวส์ก้ามปูที่ตัดวงจรได้เร็ว ใช้อักษรย่อ F

(ข) ฟิวส์ก้ามปูชั้นสอง (slow type fuse) หมายถึง ฟิวส์ก้ามปูชนิดที่ตัดวงจรได้ช้ากว่าฟิวส์ก้ามปูชั้นหนึ่ง ใช้อักษรย่อ S

ในภาวะที่เกิดกระแสเกินหรือลัดวงจร ฟิวส์ก้ามปูจะต้องหลอมละลายภายในเวลาที่กำหนดภายใต้การทดสอบดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 แสดงการหลอมละลายของฟิวส์ก้ามปูตามมาตรฐาน มอก. 10 - 2513

กระแสที่กำหนดของฟิวส์ก้ามปู (A)	เวลาที่ฟิวส์หลอมละลาย (นาที)		
	ฟิวส์ก้ามปูชั้นหนึ่ง (F) 135% × กระแสที่กำหนด	ฟิวส์ก้ามปูชั้นสอง (S) 160% × กระแสที่กำหนด	ฟิวส์ก้ามปูทั้ง 2 ชนิด 200% × กระแสที่กำหนด
3–15	60	60	2
20–30	60	60	2
40–60	60	60	4
75–100	120	120	6

การกำหนดเครื่องหมายที่ขั้วของฟิวส์ก้ามปู ต้องมีตัวเลขและอักษรแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนด รวมทั้งระบุชนิดของฟิวส์ก้ามปูไว้อย่างชัดเจน ส่วนที่กล่องบรรจุฟิวส์ก้ามปูทุกกล่องต้องมีตัวเลขอักษรหรือเครื่องหมายแสดงชัดเจนคือ ชื่อโรงงานผลิต กระแสที่กำหนด แรงดันที่กำหนด ประเภท จำนวนฟิวส์ในกล่อง หรืออื่น ๆ

7.2.2 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ (cartridge fuse) เป็นฟิวส์แบบสำเร็จรูปที่ผลิตมาตรฐานตาม NEC (National electrical Code) และ IEC (International Electrotechnical Commission) หรือ VDE (Verband Deutscher Electrotechniker e.V.) ตัวฟิวส์จะถูกบรรจุอยู่ในกระบอกใส่ฟิวส์ที่เป็นฉนวน นอกจากนี้ต้องระบุพิกัดกระแสพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ที่กระบอกฟิวส์

7.3 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ตามมาตรฐาน NEC

7.3.1 ประเภทคาร์ทริดจ์ฟิวส์ตามมาตรฐาน NEC ฟิวส์ประเภทนี้ได้รับการรับรองมาตรฐานจาก UL (Underwriter's Laboratory)

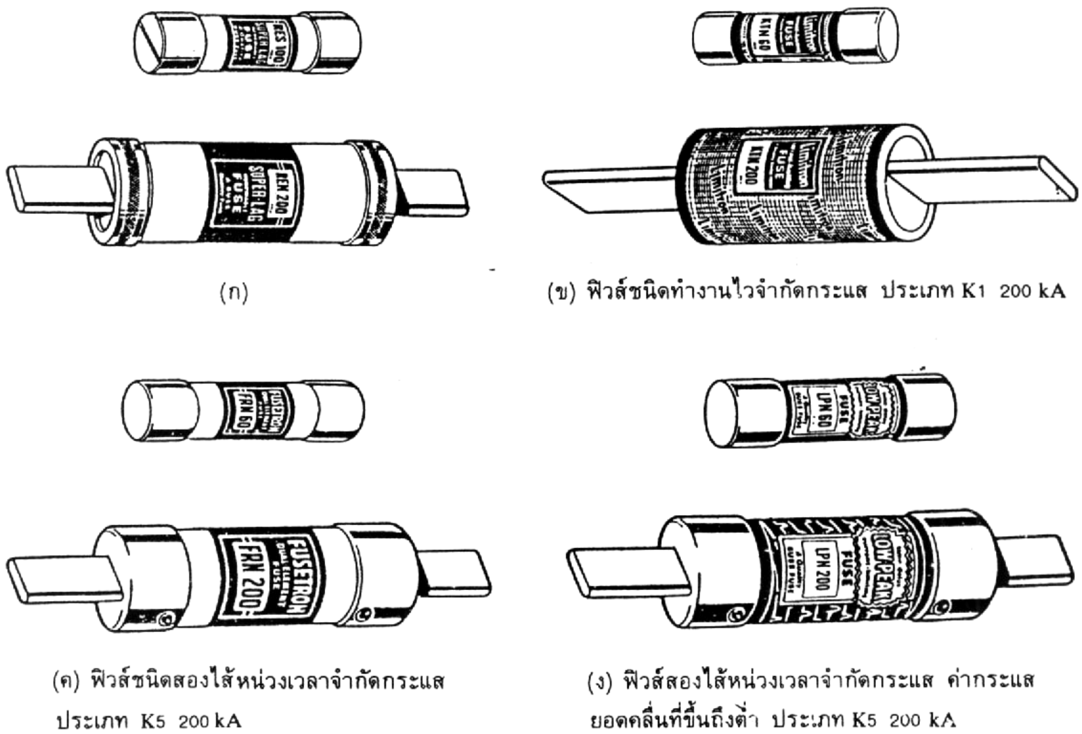
1. คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท H สำหรับฟิวส์ประเภท H เป็นฟิวส์ชนิดไม่จำกัดกระแสทำงานไว มีพิกัดแรงดัน 250 VAC และ 600 VAC มีพิกัดกระแส 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 400, 500 และ 600 A

มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 10 kA (10000 A) ดังรูปที่ 7.9 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท H นี้เท่านั้นที่ฟิวส์ขาดแล้วเปลี่ยนไส้ใหม่ได้ ส่วนประเภทอื่น ๆ เมื่อฟิวส์ขาดแล้วเปลี่ยนไส้ใหม่ไม่ได้

รูปที่ 7.9 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท H

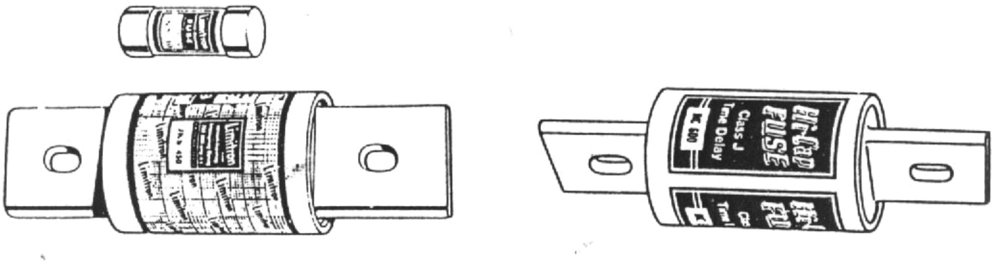
2. คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท K ดังรูปที่ 7.10 สำหรับฟิส์ประเภท K แบ่งออกเป็น K1, K5 และ K9 พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ของฟิวส์ประเภทนี้มีขนาด 50 kA, 100 kA และ 200 kA ฟิวส์ประเภท K แต่ละตัวตามการรับรองของ UL จะให้ค่ากระแสยอดคลื่นชั่วขณะที่ขึ้นถึง (instantaneous peak let through) แต่ละขนาด ฟิวส์ประเภทนี้สามารถเลือกคุณสมบัติการจำกัด

กระแส ตามรูปที่ 7.10 (ข) เป็นฟิวส์ชนิดทำงานหน่วงเวลา และจะหน่วงเวลาต่ำสุด 10 วินาที ที่ 500 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแส ดังรูปที่ 7.10 (ค) เป็นฟิวส์สองไส้หน่วงเวลาจำกัดกระแส ส่วนรูปที่ 7.10 (ง) เป็นฟิวส์สองไส้หน่วงเวลาจำกัดกระแสค่ากระแสยอดคลื่นที่ขึ้นถึงต่ำ (low-peak dual element current limiting fuse) ฟิวส์ประเภท K นี้มีพิกัดกระแส 0-600 A มีพิกัดแรงดัน 250 VAC หรือ 600 VAC



รูปที่ 7.10 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท H

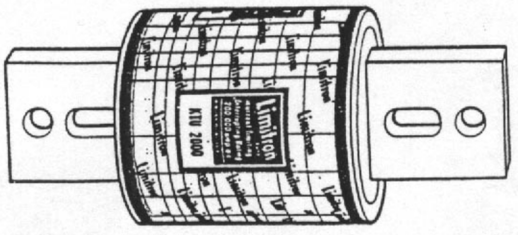
3. คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท J ดังรูปที่ 7.11 เป็นชนิดจำกัดกระแส สามารถเลือกใช้ได้ทั้งทำงานไว จำกัดกระแส (fast acting-current limiting) รูปที่ 7.11 (ก) และหน่วงเวลาจำกัดกระแส (time delaycurrent limiting) รูปที่ 7.11 (ข) มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 200 kA มีพิกัดกระแส 0-600 A ที่พิกัดแรงดัน 600 VAC อย่างไรก็ตามมาตรฐานของ UL ไม่ได้ระบุชนิดหน่วงเวลาจำกัดกระแสไว้ แต่มาตรฐานของแคนนาเดียน (Canadian Standad Association – CSA) มีการระบุฟิวส์ชนิดหน่วงเวลาอยู่ในประเภท J ด้วย



(ก) ฟิวส์ทำงานไว จำกัดกระแส 0-600 A 200 kA (ข) ฟิวส์หน่วงเวลาจำกัดกระแส 0-600 A 200 kA

รูปที่ 7.11 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท J

4. คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท L ฟิวส์ประเภทนี้เป็นฟิวส์ชนิดจำกัดกระแส ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งชนิดทำงานไว จำกัดกระแส รูปที่ 7.12 (ก) และชนิดหน่วงเวลาจำกัดกระแส รูปที่ 7.12 (ข) มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 200 kA ตามมาตรฐานของ UL มีพิกัดกระแส 630, 700, 800, 1000, 1200, 1250, 1600, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000 และ 6000 A มีพิกัดแรงดัน 600 VAC

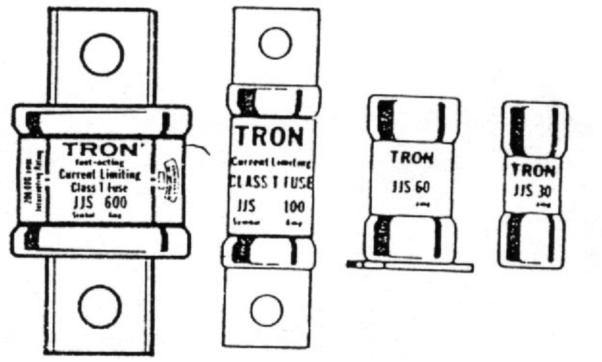


(ก) ฟิวส์ทำงานไว จำกัดกระแส 630-6000 A 200 kA

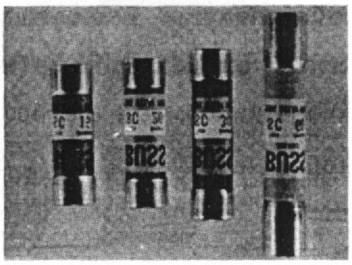
(ข) ฟิวส์หน่วงเวลาจำกัดกระแส 630-6000 A 200 kA

รูปที่ 7.12 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท L

5. คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท T ฟิวส์ชนิดนี้เป็นชนิดจำกัดกระแสทำงานไว มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 200 kA และมีพิกัดกระแสให้เลือกตั้งแต่ 0-600 A ที่พิกัดแรงดัน 250 VAC หรือ 600 VAC สำหรับฟิวส์ประเภทนี้เหมาะสำหรับป้องกันสายประธาน สายป้อน วงจรย่อย หรือใช้ร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังรูปที่ 7.13

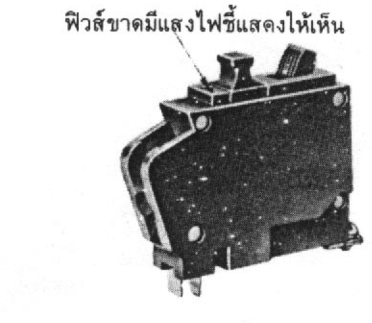


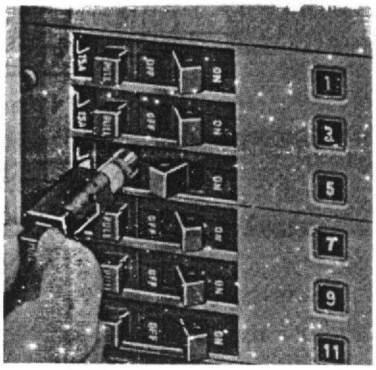
รูปที่ 7.13 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท T



พิกัดกระแส	ขนาดฟิวส์
0–15	13/32″ × 1 5/16″
16–20	13/32″ × 1 13/32″
21–30	13/32″ × 1 5/8″
31–60	13/32″ × 2 1/4″

(ก) พิกัดกระแสและขนาดฟิวส์

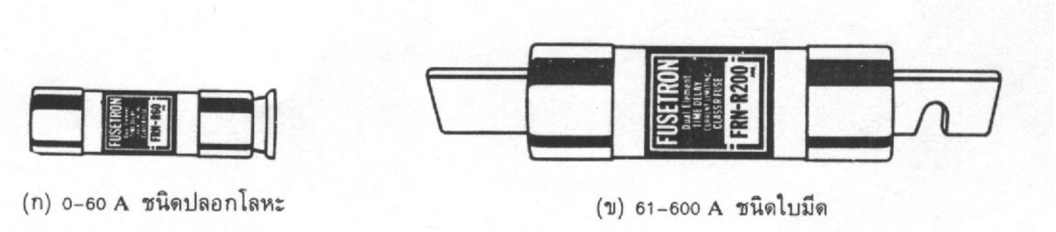




รูปที่ 7.14 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท G

6. คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท G คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภทนี้มีขนาดเล็ก ทำงานไว ใช้กับพิกัดแรงดันไม่เกิน 300 V และสามารถเลือกพิกัดกระแสตั้งแต่ 0-60 A มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 100 kA โดยปกติทั่วไปเรียกว่า*ฟิวส์แบบ SC* จะนำไปใช้กับวงจรย่อย หรือใช้ร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อให้สามารถเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ต่ำได้ ดังรูปที่ 7.14

7. คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท R ดังรูปที่ 7.15 เป็นชนิดคาร์ทริดจ์ฟิวส์หน่วงเวลา มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 200 kA สำหรับฟิวส์ประเภท R จะแบ่งออกเป็นประเภทรองอีกสองประเภท คือ ประเภท RK1 และประเภท RK5 ประเภท RK1 มีคุณลักษณะเหมือนฟิวส์ประเภท K1 และประเภท RK5 ก็มีคุณลักษณะเหมือนฟิวส์ K5 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท R ชนิดปลอกโลหะ มีพิกัดกระแส 0-60 A ดังรูปที่ 7.15 (ก) ส่วนชนิดใบมีด มีพิกัดกระแส 61-600 A ดังรูปที่ 7.15 (ข) ที่พิกัดแรงดัน 250 VAC หรือ 600 VAC



รูปที่ 7.15 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท R

7.3.2 การพิจารณาภาวะโหลดเกิน อุณหภูมิ และพิกัดลดลง

1. โหลดเกิน (overload) เมื่อโหลดเกินโดยปกติฟิวส์ประเภท H, G, K1, K5, K9, J, RK1, RK5 และ T จะขาดในเวลา 10 ถึง 400 วินาที ส่วนประเภท L จะขาดในเวลา 600 ถึง 1500 วินาที อย่างไรก็ตามมาตรฐานของ UL จะพิจารณาในเทอมช่วงเวลาตัดกระแส (clearing time) ของฟิวส์จะเกิดขึ้นในขณะที่โหลดเกิน 135 เปอร์เซ็นต์ ถึง 200 เปอร์เซ็นต์ คำว่าช่วงเวลาตัดกระแสนั้นหมายถึงช่วงเวลาที่ฟิวส์หลอมละลายจนขาด และอาร์คดับลงดังตารางที่ 7.4 เช่น ฟิวส์ประเภท R ขนาด 100 A ถ้ากระแสโหลดเกิน 135 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดฟิวส์ คือ 135 A (100 x 135 %) ฟิวส์จะขาดในเวลา 120 นาที แต่ถ้ากระแสเพิ่มขึ้นเป็น 500 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดฟิวส์ คือ 500 A (100 x 500 %) ฟิวส์จะขาดในเวลา 10 วินาที ส่วนตารางที่ 7.5 แสดงช่วงเวลาตัดกระแสของฟิวส์ประเภท G และตารางที่ 7.6 แสดงช่วงเวลาตัดกระแสของฟิวส์ประเภท J ส่วนรูปที่ 7.16 แสดงกราฟการพิจารณาเวลาตัดกระแสสูงสุดและต่ำสุดของฟิวส์ขนาด 30 A 600 V ถ้ากระแสเพิ่มขึ้นเป็น 200 เปอร์เซ็นต์ (30 x 2 = 60 A) เวลาที่ฟิวส์ขาดสูงสุด 104 วินาที และต่ำสุด 70 วินาที ถ้าพิจารณาตารางที่ 7.4 และ 7.6 ที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดฟิวส์ เวลาตัดกระแสสูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 2 นาที หรือ 120 วินาที

กระแสที่กำหนดของฟิวส์ก้ามปู (A)	เวลาที่ฟิวส์หลอมละลาย (นาที)		
	ฟิวส์ก้ามปูชั้นหนึ่ง (F) 135% x กระแสที่กำหนด	ฟิวส์ก้ามปูชั้นสอง (S) 160% x กระแสที่กำหนด	ฟิวส์ก้ามปูทั้ง 2 ชนิด 200% x กระแสที่กำหนด
3-15	60	60	2
20-30	60	60	2
40-60	60	60	4
75-100	120	120	6

* 600 V ฟิวส์ขนาด 100 A หรือต่ำกว่า ถ้ามีเครื่องหมาย “ใช้สำหรับวงจรมอเตอร์อย่างเดียว (for use only on motor circuits)” ฟิวส์จะขาดในเวลา 8 นาที

** สำหรับฟิวส์ที่มีเครื่อง “ D “ หรือ “หน่วงเวลา (time delay)”

พิกัดฟิวส์ (A)	ช่วงเวลาตัดกระแสสูงสุด (นาที)		ช่วงเวลาตัดกระแสต่ำสุด (วินาที) ฟิวส์หน่วงเวลา 500% ของพิกัดฟิวส์**
	135% ของพิกัดฟิวส์	200%* ของพิกัดฟิวส์	
101-200	120	8	10
201-400	120	10	10
401-600	120	12	10

* 600 V ฟิวส์ขนาด 100 A หรือต่ำกว่า ถ้ามีเครื่องหมาย “ใช้สำหรับวงจรมอเตอร์อย่างเดียว (for use only on motor circuits)” ฟิวส์จะขาดในเวลา 8 นาที

** สำหรับฟิวส์ที่มีเครื่อง “ D ” หรือ “หน่วงเวลา (time delay)”

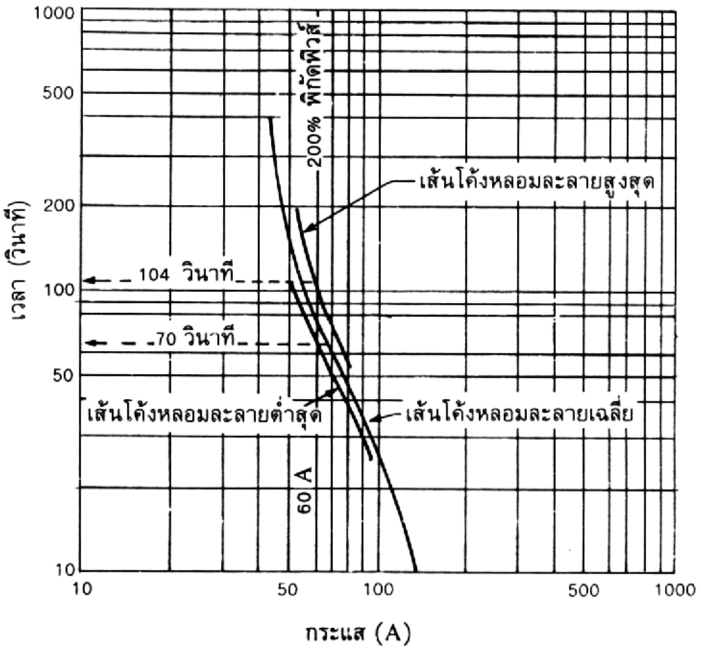
ตารางที่ 7.5 ช่วงเวลาตัดกระแสของฟิวส์ประเภท G 300 V

พิกัดฟิวส์ (A)	ช่วงเวลาตัดกระแสสูงสุด (นาที)		ช่วงเวลาตัดกระแสต่ำสุด (วินาที) ฟิวส์หน่วงเวลา 500% ของพิกัดฟิวส์*
	135% ของพิกัดฟิวส์	200% ของพิกัดฟิวส์	
0-30	60	2	12
31-60	60	4	12

* สำหรับฟิวส์ที่มีเครื่องหมาย “ D ” หรือ “time delay”

ตารางที่ 7.6 ช่วงเวลาตัดกระแสของฟิวส์ประเภท J 600 V

ชนิดฟิวส์ ระยะพิกัดกระแส	พิกัดแรงดัน V	สัญลักษณ์	มาตรฐาน U.L.	พิกัดกระแส ขณะอินเตอร์รัพต์ A	การนำไปใช้ป้องกัน
HI-CAP time-delay FUSE 601–6000 A	600 V	KRP-C	L	200,000 A	สายเมน สายป้อน วงจรย่อยและมอเตอร์ขนาดใหญ่ ที่กระแสลัดวงจรสูง ๆ
LIMITRON fast-acting FUSE 601–6000 A	600 V	KTU	L	200,000 A	สายเมน สายป้อน วงจรย่อยและใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์-กิตเบรกเกอร์
FUSETRON dual-element FUSE 0–600 A	250 V 600 V	FRN FRN-RK5 R FRS FRS-RK5	RK5 R RK5 R	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ที่แนะนำใช้ป้องกันมอเตอร์ เครื่องเชื่อมและหม้อแปลง
LOW-PEAK dual-element FUSE 0–600 A	250 V 600 V	LPN LPN-RK5 LPS LPS-RK5	RK5 R RK5 R	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ที่แนะนำใช้ป้องกันมอเตอร์ เครื่องเชื่อม และหม้อแปลง



รูปที่ 7.16 การพิจารณาเวลาตัดกระแสสูงสุดและต่ำสุดของฟิวส์ขนาด 30 A 600 V

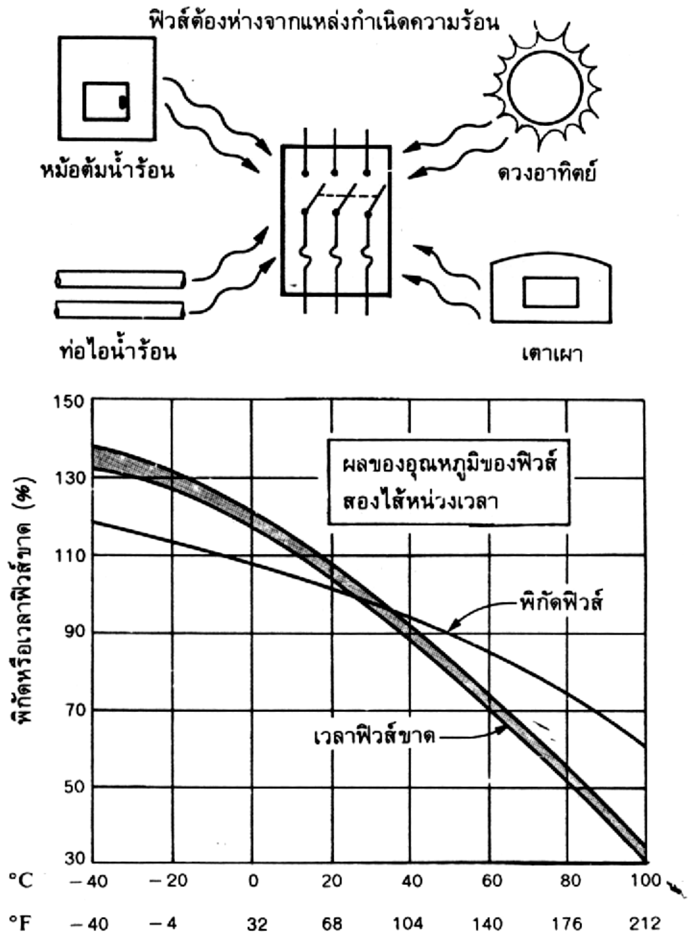
2. อุณหภูมิแวดล้อม ผลของอุณหภูมิแวดล้อมเกิดจากอุณหภูมิรอบ ๆ ตัวฟิวส์ ความร้อนที่เพิ่มขึ้นเกิดจากกระแสไหลผ่านตัวฟิวส์ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาขีดจำกัดอุณหภูมิของตัวฟิวส์ โดยการให้อากาศผ่านรอบ ๆ ตัวฟิวส์ โดยปกติเวลาฟิวส์ขาดจะทดสอบที่อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม 25°C (77°F) ดังรูปที่ 7.17 อุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อการใช้งานฟิวส์ ถ้าอุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่า 20oC ฟิวส์สามารถนำกระแสได้สูงกว่าพิกัด 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะเดียวกันเวลาที่ฟิวส์ขาดก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่า 20°C พิกัดของฟิวส์ก็จะลดลง และเวลาที่ฟิวส์ขาดก็จะสั้นลงเช่นเดียวกัน ผลของความร้อนอาจเกิดมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าติดตั้งอยู่ใกล้บริเวณที่ร้อนอันได้แก่ หม้อน้ำร้อน หรือรับแสงอาทิตย์โดยตรง โดยปกติทั่วไปฟิวส์จะติดตั้งในแนวตั้งในกล่องเครื่องห่อหุ้ม เช่น สวิตช์บอร์ดและแผงย่อย เป็นสาเหตุที่ทำให้ฟิวส์ได้รับอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมภายนอก ตามมาตรฐานของ UL เครื่องห่อหุ้มสำหรับสวิตช์บอร์ด แผงย่อย จะทดสอบที่พิกัดโหลดเต็มที่ อุณหภูมิแวดล้อม 25°C นอกจากนี้ยังมีสาเหตุอื่นที่ทำให้ภายในสวิตช์บอร์ด แผงย่อย เกิดความร้อนสูงได้แก่

(ก) หน้าสัมผัสฟิวส์ไม่ดีพอ ทำให้เกิดความร้อนสูงที่หน้าสัมผัสเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนกระทั่งฟิวส์ขาด

(ข) จำนวนสายไฟในเครื่องห่อหุ้มมากเกินไป

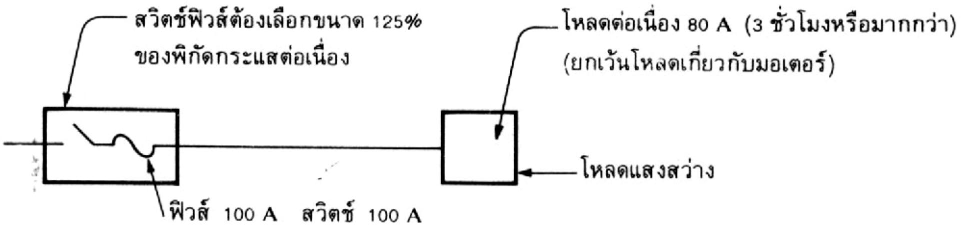
(ค) ข้อต่อสายไม่แน่น

(ง) ความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

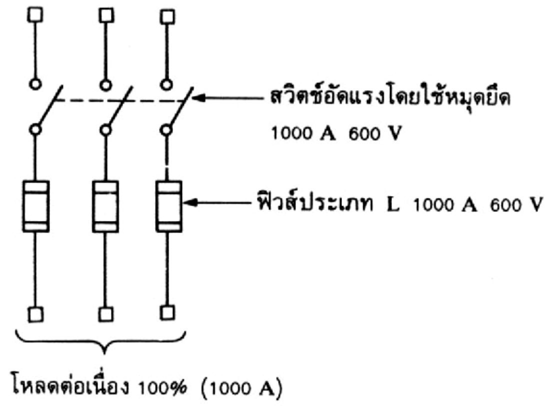


รูปที่ 7.17 อุณหภูมิแวดล้อมมีผลต่อการใช้งานฟิวส์

3. พิกัดลดลง ตามมาตรฐานของ UL ถือว่าโหลดต่อเนื่อง (continuous load) หมายถึง เวลาที่ฟิวส์ต้องรับกระแสต่อเนื่องตั้งแต่ 3 ชั่วโมงขึ้นไป ในกรณีนี้จะยอมให้ฟิวส์รับกระแสได้เพียง 80 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดฟิวส์เท่านั้น ดังรูปที่ 7.18 แต่มีข้อยกเว้นคือ ฟิวส์สามารถรับกระแสต่อเนื่องได้ 100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดฟิวส์เมื่อใช้ร่วมกับสวิตช์อัดแรงโดยใช้หมุดยึด (bolted pressure switch) พิกัดตั้งแต่ 600 A ขึ้นไป โดยใช้ร่วมกับฟิวส์ประเภท L ดังรูปที่ 7.19



รูปที่ 7.18 พิกัดของฟิวส์รับกระแสต่อเนื่องได้ 80 % ของพิกัดฟิวส์



รูปที่ 7.19 พิกัดฟิวส์รับกระแสได้ 100 % ของพิกัดฟิวส์

7.3.3 พิกัด ประเภท และการนำไปใช้งาน สำหรับฟิวส์แรงต่ำ 250 V – 600 V มีพิกัด ประเภท และการนำไปใช้งานดังตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 พิกัดและการนำไปใช้งาน ฟิวส์แรงต่ำ 250 – 600 V

ชนิดฟิวส์ ระยะพิกัดกระแส	พิกัด แรงดัน V	สัญลักษณ์	มาตรฐาน U.L	พิกัดกระแส ขณะอินเตอร์รัพต์ A	การนำไปใช้ป้องกัน
LIMITRON fast-acting FUSE 0–600 A	250 V 600 V	KTN KTN-RK1 KTS RTS-RK1	RK1 R RK1 R	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์
TRON fast-acting FUSE 0–600 A	250 V 600 V	JJN JJS	T	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดเล็ก
HI-CAP time-delay FUSE 15–600 A	600 V	JHC	*	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย มอเตอร์และหม้อแปลง
LIMITRON quick-acting FUSE 0–600 A	600 V	JKS	J	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์
ONE-TIME FUSE 0–600 A	250 V 600 V	NON NOS	H	10,000 A	วัตถุประสงค์ทั่วไป
SC FUSE 0–60 A	300 V	SC	G	100,000 A	วงจรย่อยทั่วไป

ตารางที่ 7.7 (ต่อ๗ พิกัดและการนำไปใช้งาน ฟิวส์แรงต่ำ 250 – 600 V

ชนิดฟิวส์ ระยะพิกัดกระแส	พิกัดแรงดัน V	สัญลักษณ์	มาตรฐาน U.L	พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ A	การนำไปใช้ป้องกัน
LIMITRON fast-acting FUSE 0-600 A	250 V 600 V	KTN KTN-RK1 KTS RTS-RK1	RK1 R RK1 R	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์
TRON fast-acting FUSE 0-600 A	250 V 600 V	JJN JJS	T	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดเล็ก
HI-CAP time-delay FUSE 15-600 A	600 V	JHC	*	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย มอเตอร์และหม้อแปลง
LIMITRON quick-acting FUSE 0-600 A	600 V	JKS	J	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์
ONE-TIME FUSE 0-600 A	250 V 600 V	NON NOS	H	10,000 A	วัตถุประสงค์ทั่วไป
SC FUSE 0-60 A	300 V	SC	G	100,000 A	วงจรย่อยทั่วไป

* ฟิวส์ JHC ระบุไว้ในมาตรฐานแคนนาเดียน (CSA)

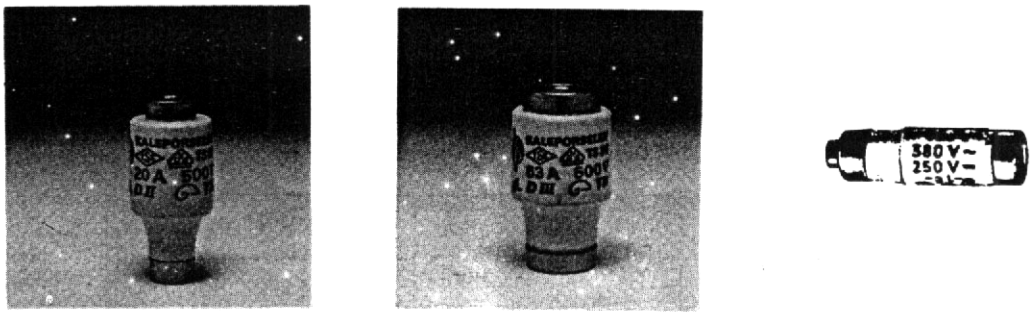
ชนิดฟิวส์ ระยะพิกัดกระแส	พิกัดแรงดัน V	สัญลักษณ์	มาตรฐาน U.L.	พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ A	การนำไปใช้ป้องกัน
HI-CAP time-delay FUSE 601–6000 A	600 V	KRP-C	L	200,000 A	สายเมน สายป้อน วงจรย่อยและมอเตอร์ขนาดใหญ่ ที่กระแสลัดวงจรสูง ๆ
LIMITRON fast-acting FUSE 601–6000 A	600 V	KTU	L	200,000 A	สายเมน สายป้อน วงจรย่อยและใช้ป้องกันร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์
FUSETRON dual-element FUSE 0–600 A	250 V 600 V	FRN FRN-RK5 R FRS FRS-RK5	RK5 R RK5 R	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ที่แนะนำใช้ป้องกันมอเตอร์ เครื่องเชื่อมและหม้อแปลง
LOW-PEAK dual-element FUSE 0–600 A	250 V 600 V	LPN LPN-RK5 LPS LPS-RK5	RK5 R RK5 R	200,000 A	สายเมน สายป้อน และวงจรย่อย ที่แนะนำใช้ป้องกันมอเตอร์ เครื่องเชื่อม และหม้อแปลง

* ฟิวส์ JHC ระบุไว้ในมาตรฐานแคนนาเดียน (CSA)

7.4 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ตามมาตรฐาน IEC 269 หรือ VDE 0636

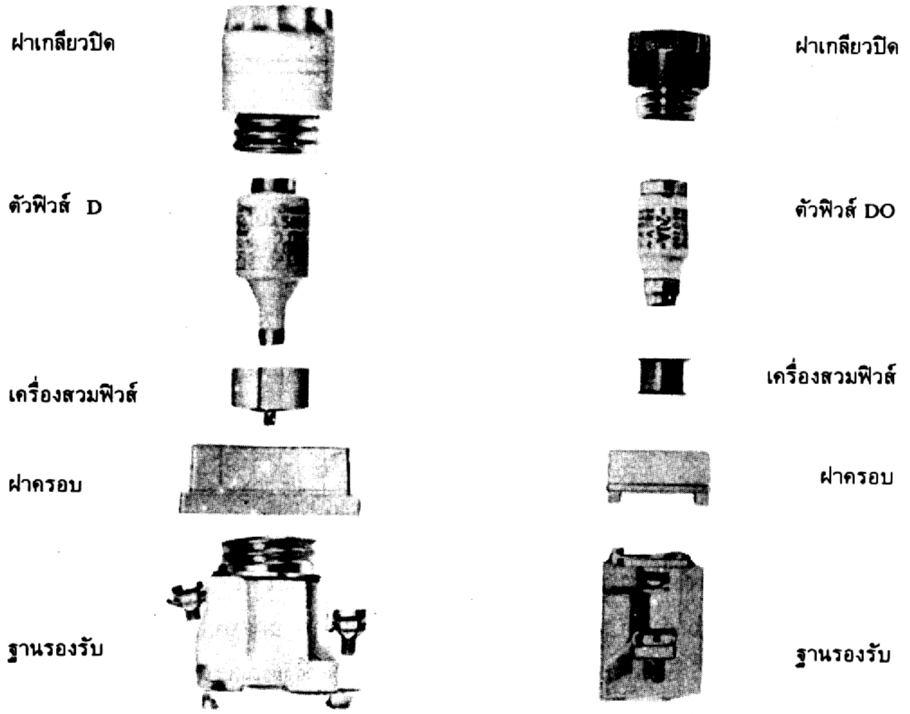
7.4.1 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท D (diazed) และ DO (neozed) ฟิวส์ประเภทนี้เป็นชนิดที่สับเปลี่ยนขนาดไม่ได้ ซึ่งหมายถึงฟิวส์ที่ออกแบบไว้ให้ใช้กับตัวฟิวส์ตามขนาดที่กำหนด และเป็นวิธีการที่จะทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถนำตัวฟิวส์ที่มีกระแสไฟฟ้าสูงกว่ามาใส่แทนโดยบังเอิญได้ สำหรับแรงดันที่กำหนด 500 VAC และกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไม่เกิน 200 A พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 70 kA ที่ 380 V นอกจากนี้ยังมีการแบ่งให้เลือกใช้เป็น 2 แบบด้วยกัน คือ ฟิวส์ทำงานไว และฟิวส์หน่วงเวลา ( ) ใช้กับโหลดมอเตอร์ดังรูปที่ 7.20 สำหรับรูปที่ 7.21 แสดงชิ้นส่วนประกอบการใช้ฟิวส์ D และ DO

โดยปกติทั่วไปฟิวส์ประเภท D และ DO ได้ถูกออกแบบไว้เป็นฟิวส์ชนิดจำกัดกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแสลัดวงจรมีค่าสูง ฟิวส์จะหลอมละลายและดับอาร์คภายในเวลา ¼ ไซเคิล



(ก) ฟิวส์ประเภท D แบบหน่วงเวลา (ข) ฟิวส์ประเภท DO

รูปที่ 7.20 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท D และ DO แบบหน่วงเวลา 16 A



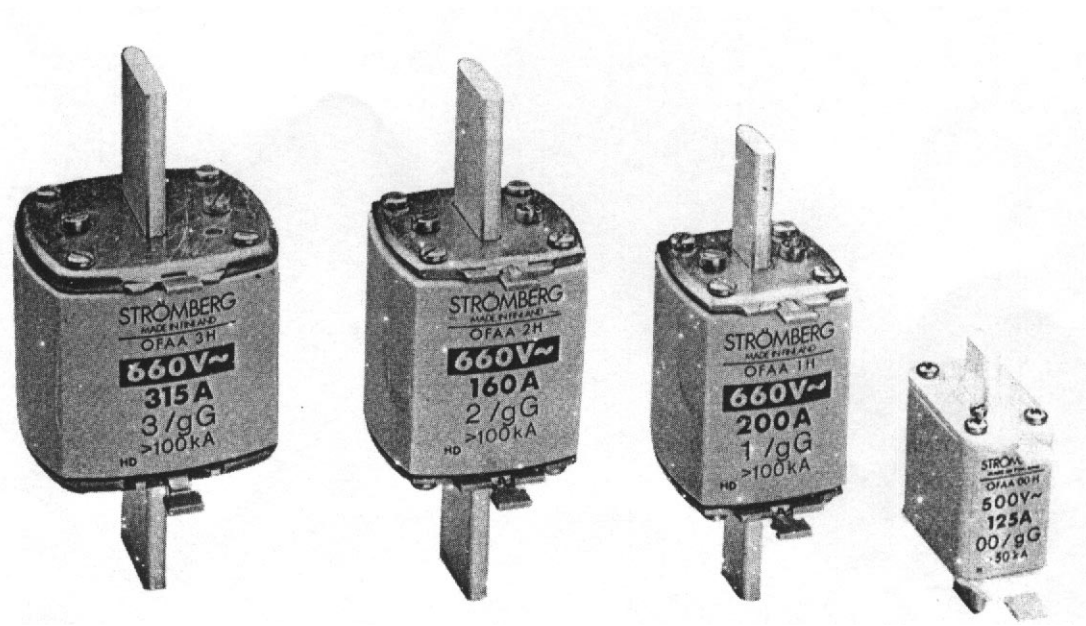
รูปที่ 7.21 รูปซ้ายมือแสดงชิ้นส่วนประกอบและใช้ฟิวส์ D และรูปขวามือแสดงชิ้นส่วนประกอบการใช้ฟิวส์ DO (มีขนาดเล็กกว่าฟิวส์ D ใช้ป้องกันกรณีที่ต้องการพื้นที่เล็กและกระทัดรัด)

สำหรับตัวฟิวส์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ แบ่งตามกระแสไฟฟ้าที่กำหนดออกเป็น 4 ชนิดด้วยกันดังตารางที่ 7.8

ฟิวส์ D		พิกัดกระแส A	รหัสสี	ฟิวส์ DO	
ชนิด	ระยะพิกัดกระแส A			ชนิด	ระยะพิกัดกระแส A
DII	2-25	2	ชมพู	DO1	2-16
		4	น้ำตาล		
		6	เขียว		
		10	แดง		
		16	เทา		
		20	น้ำเงิน	DO2	20-63
		25	เหลือง		
DIII	35-63	35	ดำ		
		50	ขาว		
		63	ทองแดง		
DIV H	80-100	80	เงิน	DO3	80-100
		100	แดง		
VDH	125-200	125	เหลือง	DO4	125-200
		160	ทองแดง		
		200	น้ำเงิน		

ตารางที่ 7.8 แสดงชนิด พิกัด ของฟิวส์ประเภท D และ DO

7.4.2 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท gL/gI ตามมาตรฐานของ IEC 269 เป็นชนิด gG หรือ gI และตามมาตรฐาน VDE 0636 เป็นชนิด gL ฟิวส์ประเภทนี้ได้ถูกออกแบบเป็นฟิวส์จำกัดกระแสที่มีค่าความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์กระแสลัดวงจรได้สูง ๆ (HRC) ซึ่งสามารถป้องกันได้ทั้งโหลดเกินและการลัดวงจร จึงนิยมใช้ป้องกันมอเตอร์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ป้องกันสวิตช์เกียร์ คอนแทกเตอร์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังรูปที่ 7.22 แสดงคาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท gG

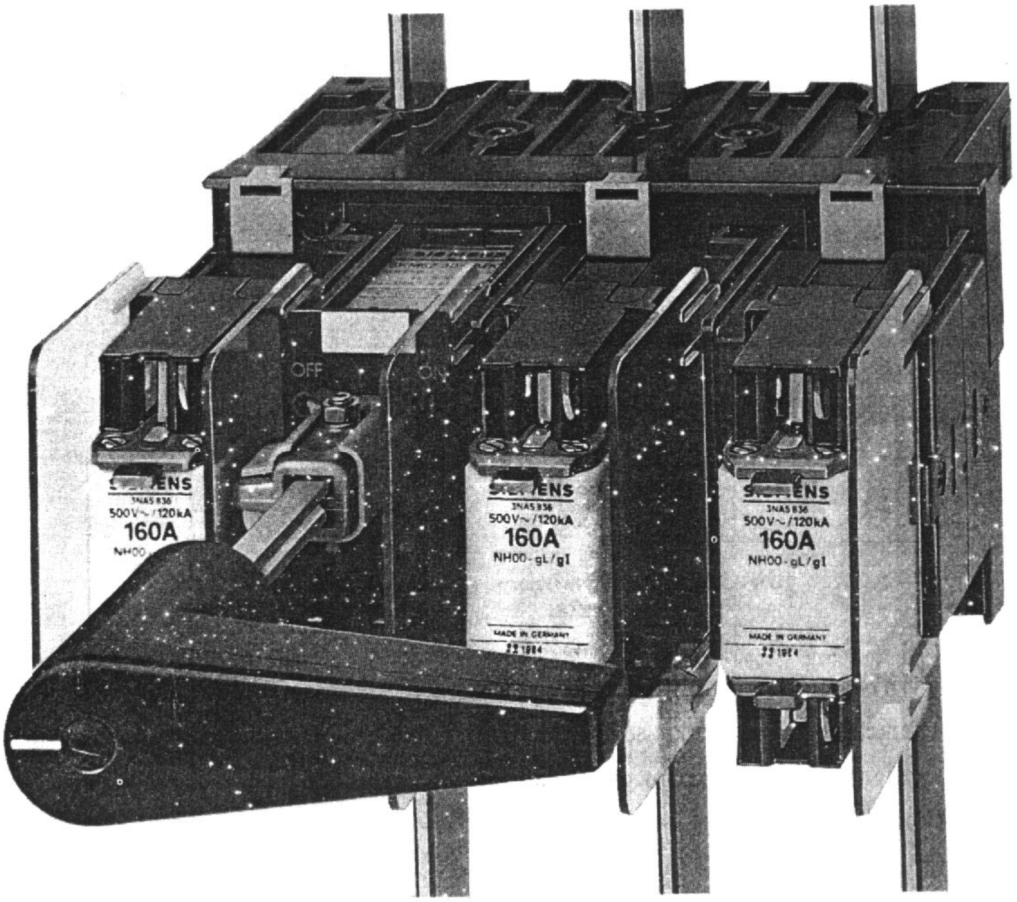


รูปที่ 7.22 คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท gG ขนาด 00, 1, 2 และ 3

คาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภทนี้มีพิกัดแรงดัน 500 VAC หรือ 660 VAC มีพิกัดกระแส 6 – 1250 A มีพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์มากกว่า 50 kA และมากกว่า 100 kA ดังตารางที่ 7.9 แสดงขนาดและพิกัดกระแสของคาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท gL/gI สำหรับรูปที่ 7.23 แสดงการใช้โหลดเบรคสวิตช์ร่วมกับคาร์ทริดจ์ฟิวส์ชนิด gL/gI

ตารางที่ 7.9 แสดงขนาดและพิกัดกระแสของคาร์ทริดจ์ฟิวส์ประเภท gL/gL

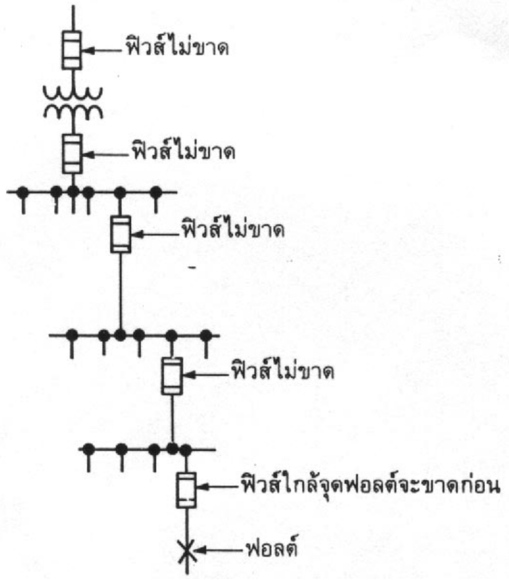
ขนาดฟิวส์	00	0	1	2	3	4/4a
พิกัดกระแส (A) พิกัดแรงดัน 500 VAC	6, 10, 16 20, 25, 35 50, 63, 80 100, 125, 160	25, 35, 50 63, 80 100, 125 160	50, 63, 80 100, 125 160, 200 250	80, 100, 125 160, 200, 250 315, 400	315, 400 500, 630	630, 800 1000, 1250
พิกัดกระแส (A) พิกัดแรงดัน 660 VAC	6–125	6–125	80–200	125–315	315–500	500–800



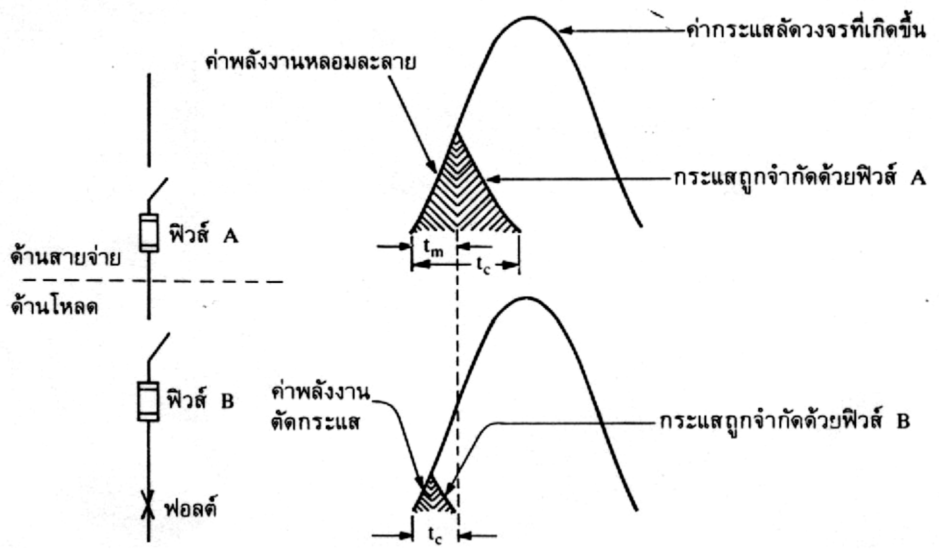
รูปที่ 7.23 การใช้โหลดเบรคสวิตช์ร่วมกับคาร์ทริดฟิวส์ประเภท gL/gI พิกัดกระแส 160 A พิกัดแรงดัน 500 VAC พิกัดกระแสลัดวงจร 120 kA

7.5 การพิจารณาเลือกใช้ฟิวส์

7.5.1 การจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกัน โดยปกติทั่วไปในขณะที่ระบบไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับอาคารพาณิชย์และโรงงานอุตสาหกรรม แต่ละส่วนจำเป็นต้องมีการป้องกัน การที่จะสามารถเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน เพื่อให้แยกวงจรไฟฟ้าที่มีฟอลต์ออกจากระบบ ณ จุดใกล้ฟอลต์ก่อน โดยไม่ทำให้อุปกรณ์ป้องกันส่วนอื่น ๆ ตัดวงจรไปด้วย ดังรูปที่ 7.24



รูปที่ 7.24 การเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน และสามารถตัดกระแสเฉพาะ ณ จุดฟอลต์



รูปที่ 7.25 การพิจารณาเลือกฟิวส์เมื่อเกิดฟอลต์ที่จุด B ต้องให้ฟิวส์ B ตัดวงจรก่อนที่ฟิวส์ A จะหลอมละลาย

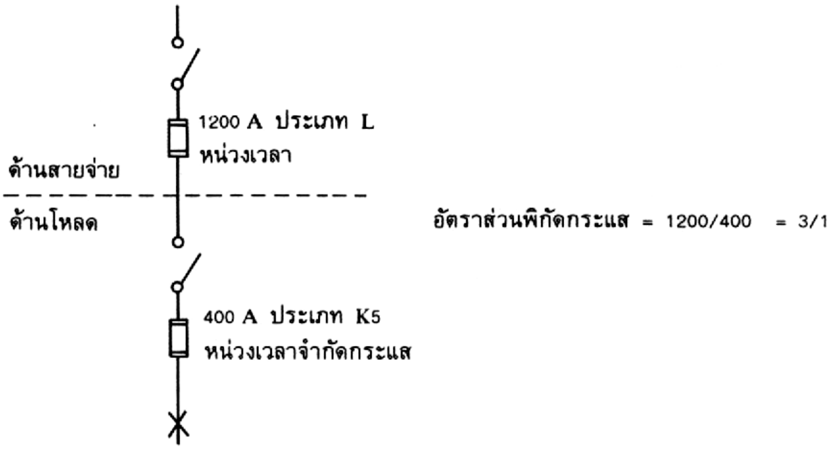
ตามรูปที่ 7.25 แสดงการจัดลำดับความสัมพันธ์ (coordinated) ของฟิวส์ ซึ่งค่า t_m หมายถึงระยะเวลาที่ฟิวส์หลอมละลาย ส่วนค่า t_c หมายถึงเวลาตั้งแต่เมื่อเริ่มเกิดกระแสเกินพิกัดในวงจรจนกระทั่งกระแสถูกตัดวงจรออกไป จึงมีค่าเท่ากับระยะเวลาที่ฟิวส์หลอมละลาย รวมกับระยะเวลาที่เริ่มอาร์คจนกระทั่งอาร์คดับ ก็คือช่วงเวลาตัดกระแส

7.5.2 การพิจารณาเลือกขนาดฟิวส์ด้วยตาราง ในตารางที่ 7.10 ได้แสดงค่าการใช้ฟิวส์แต่ละขนาดเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดด้านสายจ่ายต่อด้านโหลด โดยปกติค่าในตารางจะใช้ทั่ว ๆ ไป ไม่นำไปประยุกต์เข้ากับพิกัดกระแสต่ำ ๆ กับพิกัดกระแสสูง ๆ ทั้งหมด

ตัวอย่างการเลือกใช้ขนาดฟิวส์ในตารางที่ 7.10 แสดงในรูปที่ 7.26 โดยการเลือกฟิวส์ทางด้านสายจ่ายและด้านโหลดให้การจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันอัตราส่วน 3 ต่อ 1 คือด้านสายจ่ายใช้ฟิวส์ประเภท L ขนาด 1200 A หน่วงเวลา อาจเลือกใช้ฟิวส์ด้านโหลดประเภท K คือ K5 หน่วงเวลาจำกัดกระแส ขนาด 400 A

ตาราง 7.10 แสดงการพิจารณาการเลือกขนาดฟิวส์ด้วยตาราง

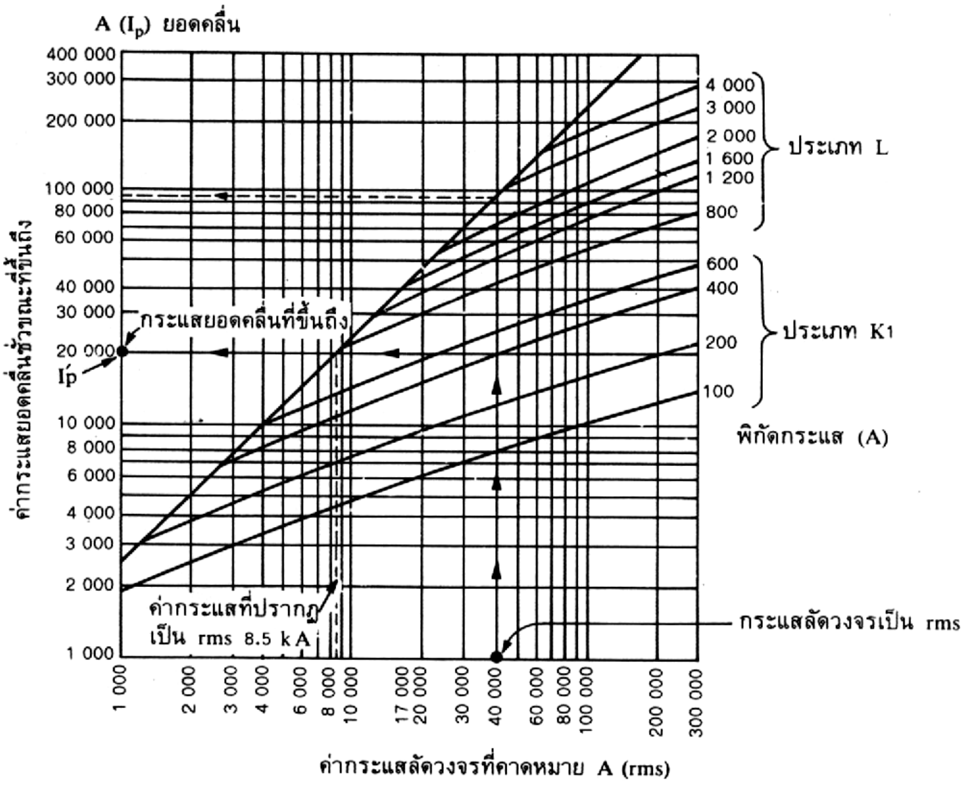
ด้านสายจ่าย	ด้านโหลด							
	Class L Time-Delay Fuse 601–6000 A	Class L Fuse 601–6000 A	Class K1 Fuse 0–600 A	Class J Fuse 0–600 A	Class K5 Time-Delay Fuse 0–600 A	Class K5 Time-Delay Current-Limiting Fuse 15–600 A	Class J Time-Delay Fuse 0–60 A	Class G Fuse
Class L Time-Delay Fuse 601–600 A	2:1	2:1	2:1	2:1	4:1	3:1	3:1	–
Class L Fuse 601–6000 A'	2:1	2:1	2:1	2:1	6:1	5:1	5:1	–
Class K1 Fuse 0–600 A			3:1	3:1	8:1	4:1	4:1	4:1
Class J Fuse 0–600 A			3:1	3:1	8:1	4:1	4:1	4:1
Class K5 Time-Delay Fuse 0–600 A			1.5:1	1.5:1	2:1	1.5:1	1.5:1	1.5:1
Class K5 Time Delay Current-Limiting Fuse 0–600 A			1.5:1	1.5:1	4:1	2:1	2:1	2:1
Class J Time-Delay Fuse 15-600 A			1.5:1	1.5:1	4:1	2:1	2:1	2:1



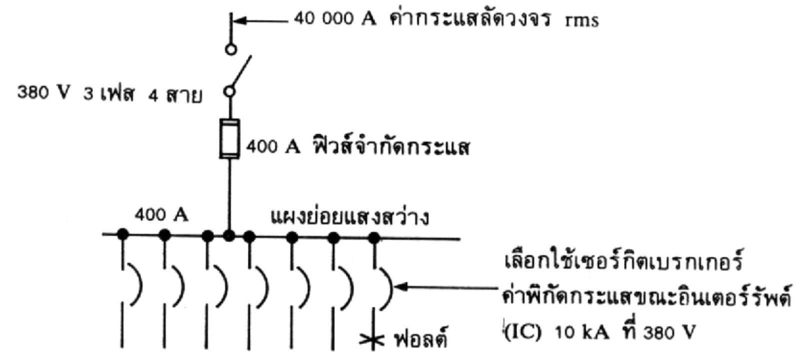
รูปที่ 7.26 การเลือกอัตราส่วนเพื่อการจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันของฟิวส์ตามตารางที่ 7.10

7.5 ประโยชน์การนำฟิวส์ไปใช้งาน

1. ใช้ฟิวส์เป็นตัวสำรองป้องกันเซอร์กิตเบรกเกอร์ การใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ร่วมกับฟิวส์จำกัดกระแสในกรณีที่ค่ากระแสลัดวงจรในระบบสูงกว่าค่าพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะเปรียบเทียบค่ากระแสลัดวงจรกับค่ากระแสยอดคลื่นชั่วขณะที่ขึ้นถึง ดังรูปที่ 7.27 ถ้าค่ากระแสลัดวงจร 40 kA (rms) ถ้าไม่ใช้ฟิวส์ป้องกันค่ากระแสยอดคลื่นชั่วขณะที่ขึ้นถึงจะมีค่า 95 kA (ยอดคลื่น) แต่ถ้าใส่ฟิวส์จำกัดกระแส 400 A ค่ากระแสยอดคลื่นชั่วขณะถึงจะลดลงเหลือ 20 kA (ยอดคลื่น) และค่ากระแสที่ปรากฏมีค่า 8.5 kA (rms) ถ้าต้องการใช้ฟิวส์เป็นตัวป้องกันเซอร์กิตเบรกเกอร์ดังรูปที่ 7.28 เมื่อเกิดฟอลต์ที่จุดฟอลต์สามารถเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีขนาดพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (IC) 10 kA ได้ แม้ว่าค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่า 40 kA rms เนื่องจากฟิวส์ 400 A จะขาดและตัดวงจรภายใน ¼ ไซเคิล ก่อนที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะระเบิด



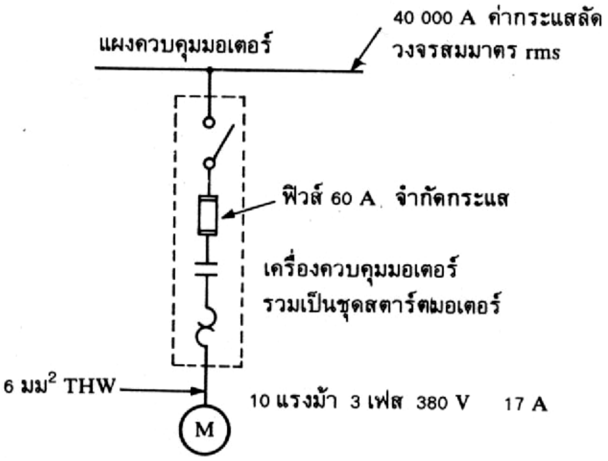
รูปที่ 7.27 ค่ากระแสยอดคลื่นที่ขึ้นถึงเทียบกับค่ากระแสลัดวงจรที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำกว่า 20 %



รูปที่ 7.28 การใช้ฟิวส์จำกัดกระแสเป็นตัวสำรองป้องกันเซอร์กิตเบรกเกอร์

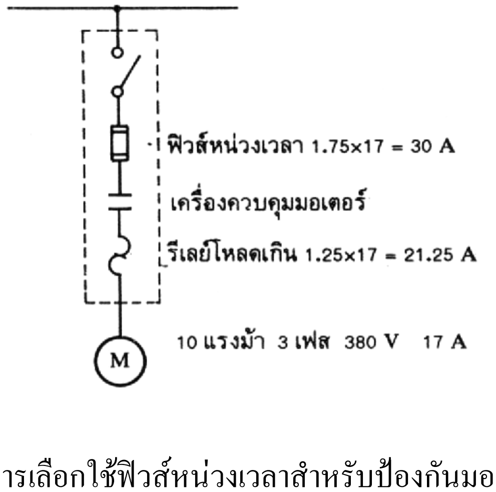
2. ใช้เป็นตัวป้องกันการลัดวงจรมอเตอร์ ตามมาตรฐานการทดลองของ UL มอเตอร์ขนาด 50 แรงม้า จะเลือกใช้ฟิวส์ขนาด 400 เปอร์เซ็นต์ของกระแสต่อเนื่องสูงสุด แต่ถ้าเลือกขนาดตาม NEC หรือ ว.ส.ท. ตามตารางที่ 7.1 การใช้เครื่องควบคุมมอเตอร์ร่วมกับฟิวส์จำกัดกระแสจะลดพลังงานความร้อนที่จะพุ่งขึ้นสูง และฟิวส์ยังทำหน้าที่เป็นตัวสำรองป้องกันให้กับชุดมอเตอร์สตาร์ทเตอร์ ตามรูปที่ 7.29 ถ้าเลือกใช้ฟิวส์ทำงานไวตามตารางที่ 7.1 ขนาดฟิวส์ป้องกันการ

ลัดวงจรมีค่า 300 เปอร์เซ็นต์ของกระแสโหลดเต็มที่ จึงมีค่า 3 x 17 เท่ากับ 51 A จึงเลือกฟิวส์ขนาด 60 A



รูปที่ 7.29 การใช้ฟิวส์ป้องกันการลัดวงจรสามารถเป็นตัวสำรองป้องกันให้กับชุดมอเตอร์สตาร์ตเตอร์ด้วย

3. ใช้เป็นเครื่องป้องกันการใช้เกินกำลังมอเตอร์ การเลือกใช้ฟิวส์หน่วงเวลาสำหรับป้องกันการใช้เกินกำลังของมอเตอร์ ต้องให้สอดคล้องกับมาตรฐานของ NEC หรือ ว.ส.ท. คือ 115 ถึง 125 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสโหลดเต็มที่ ส่วนเครื่องป้องกันการลัดวงจรถ้าเลือกใช้ฟิวส์หน่วงเวลาตามตารางที่ 7.1 คือ 175 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสโหลดเต็มที่ ดังรูปที่ 7.30



รูปที่ 7.30 การเลือกใช้ฟิวส์หน่วงเวลาสำหรับป้องกันมอเตอร์

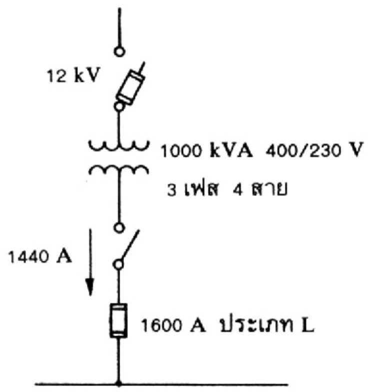
4. ใช้เป็นเครื่องป้องกันหม้อแปลง การป้องกันโหลดเกินของหม้อแปลงแรงต่ำไม่เกิน 600 V ขนาดฟิวส์แรงต่ำ 100 – 125 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสจ่ายออกเต็มที่

$$I = \frac{\text{kVA} \times 1000}{\sqrt{3} \times V} = \frac{1000 \times 1000}{1.732 \times 400}$$

$$= 1440 \quad A$$

ขนาดฟิวส์ไม่เกิน = 1440 x 1.25 = 1800 A

เลือกฟิวส์ขนาด 1600 A ดังรูปที่ 7.31 เป็นการเลือกขนาดฟิวส์ชนิดหน่วงเวลาประเภท L สำหรับหม้อแปลงประเภทแช่น้ำมัน อย่างไรก็ตามในการพิจารณาหม้อแปลงแบบแห้งจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่ากระแสพุ่งเข้า (inrush current) ซึ่งสูงถึง 20 - 25 เท่าของกระแสพิกัด ค่ากระแสพุ่งเข้าสามารถตรวจสอบง่าย ๆ โดยดูกราฟเวลาฟิวส์หลอมละลายที่ 0.1 วินาทีจากบริษัทผลิตฟิวส์ ซึ่งหมายถึงว่าการเลือกฟิวส์ป้องกันหม้อแปลงต้องให้มีระยะเวลาที่ฟิวส์หลอมละลายมากกว่าค่ากระแสพุ่งเข้าหม้อแปลงที่เวลา 0.1 วินาที ส่วนหม้อแปลงแช่น้ำมัน ค่ากระแสพุ่งเข้าประมาณ 12 เท่าของกระแสพิกัด ขนาดฟิวส์หน่วงเวลาจึงเลือกขนาด 100 – 125 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกระแสจ่ายออกเต็มที่ได้



รูปที่ 7.31 ขนาดฟิวส์แรงต่ำสำหรับป้องกันหม้อแปลงด้านแรงต่ำ

....

บทที่ 8
ฟิวส์แรงสูง
(High Voltage Fuse)

ฟิวส์แรงสูง (High Voltage Fuse) ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่จัดอยู่ในระบบแรงดันตั้งแต่ 600 V ขึ้นไป สามารถจำแนกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง
- เพาเวอร์ฟิวส์

8.1 ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง (Dropout Fuse Cutout)

ฟิวส์ตัดตอนแรงสูงหมายถึง อุปกรณ์ตัดตอนที่มีคุณสมบัติดังนี้

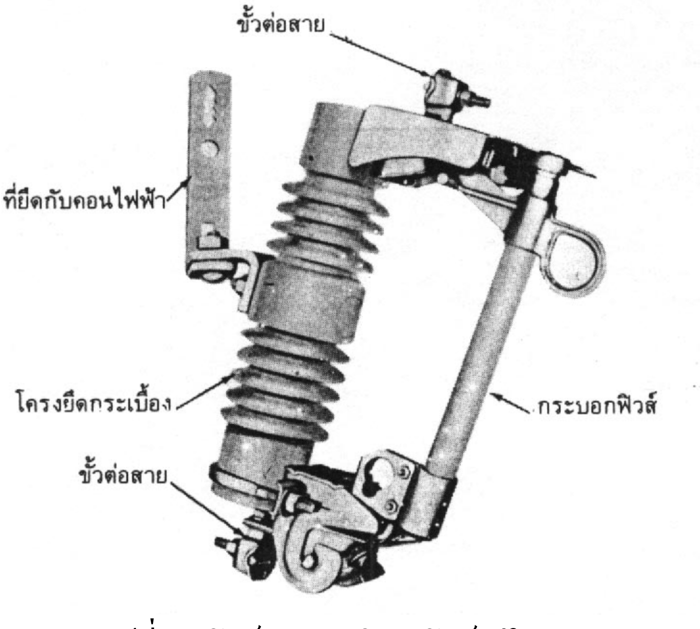
(ก) ต้องมีค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นฟ้าผ่า ซึ่งหมายถึงค่าสูงสุดของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน (BIL = Basic Impulse Insulation Level) ที่ฉนวนสามารถจะทนได้

(ข) ต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรง เหมาะสมที่จะติดตั้งกับเสาไฟฟ้าหรือคอนสายได้

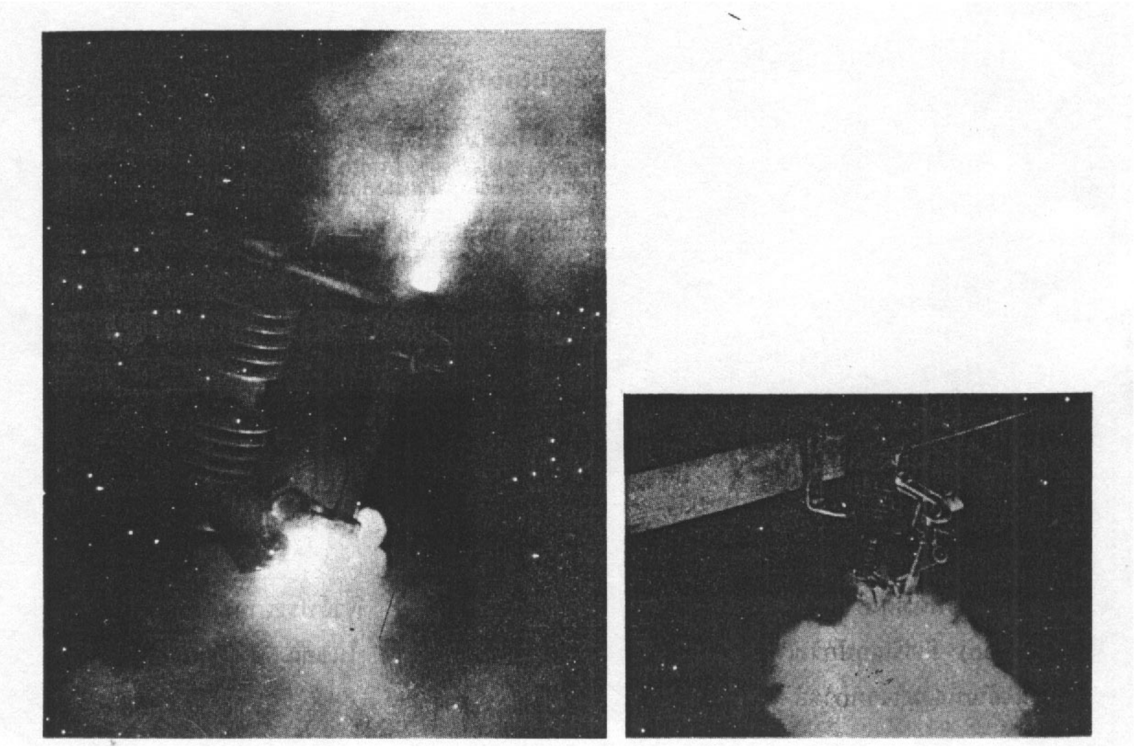
(ค) แรงดันใช้งาน (Operating Voltage) จะต้องเหมาะสมกับระบบแรงดันไฟฟ้าที่ใช้อยู่ เช่น 12 kV, 22 kV, 24 kV เป็นต้น

8.1.1 ชนิดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง ฟิวส์ตัดตอนแรงสูงแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอกและชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม ส่วนการเลือกใช้งานจะต้องพิจารณาสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก

1. ชนิดที่ตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก (Open Type) ดังรูปที่ 8.1 ฟิวส์ประเภทนี้เป็นเอ็กซ์แพนชั่น (Expansion) คือ เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่มีการพุ่งระบายของไฟและก๊าซ ในขณะที่ตัวฟิวส์หลอมขาด ออกจากกัน อันเนื่องมาจากการลัดวงจร ดังรูปที่ 8.2

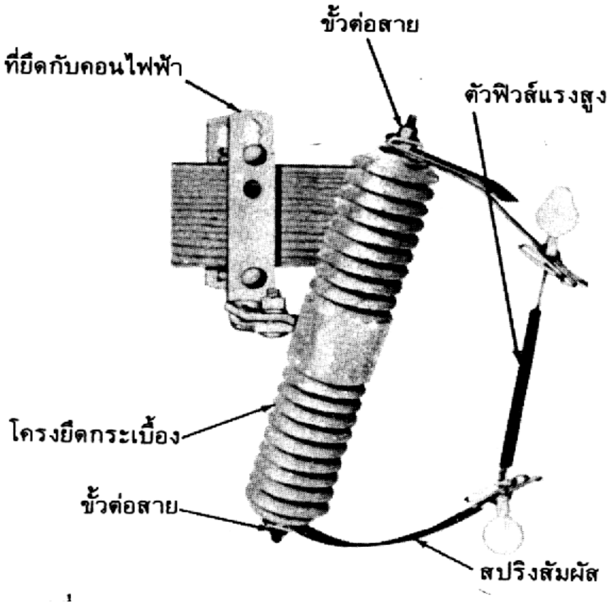


รูปที่ 8.1 ฟิวส์แรงสูงชนิดตัวฟิวส์อยู่ในกระบอก



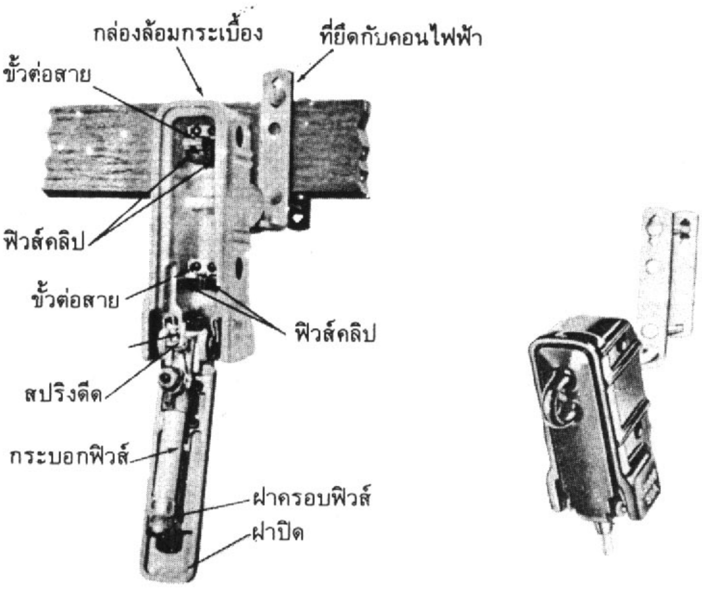
รูปที่ 8.2 การพุ่งของเปลวไฟและก๊าซของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงชนิดเอ็กซ์แพนชั่นในขณะที่ฟิวส์ขาดออกจากกัน

2. ชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอก (Open-Link Type) เป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชั่นเหมือนประเภทแรก เพียงแต่ตัวฟิวส์ (Fuse link) เป็นชนิดที่ไม่ได้บรรจุในกระบอกฟิวส์ ดังรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 ฟิวส์แรงสูงชนิดที่ตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอก

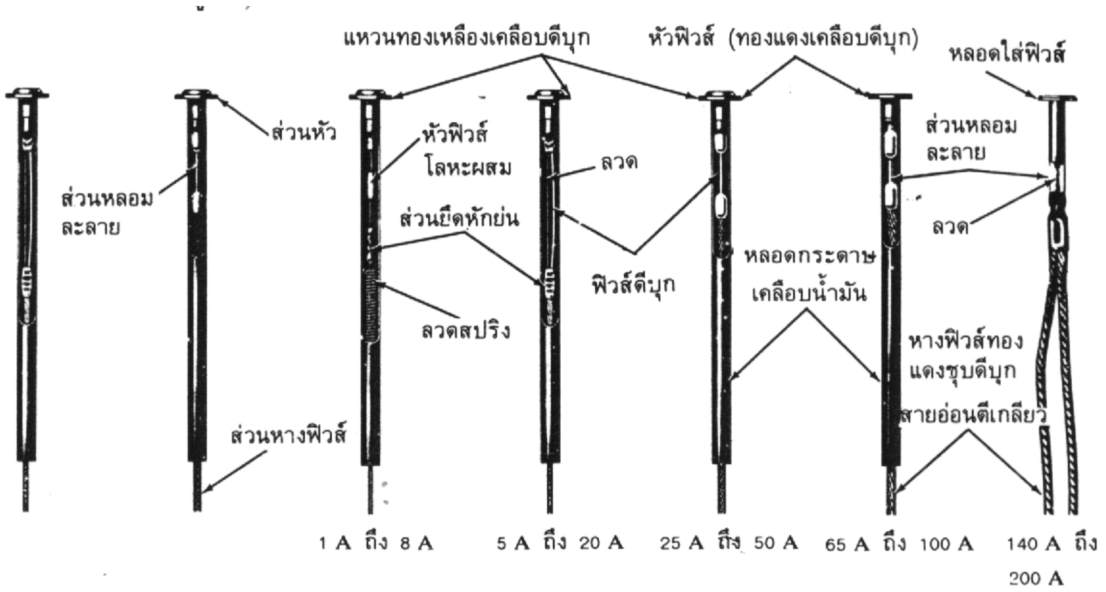
3. ชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม (enclosed Type) เป็นฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชั่นแตกต่างจากแบบแรก เพียงแต่กระบอกฟิวส์ขั้วต่อสายใส่บรรจุอยู่ในกล่องล้อมปิด ดังรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4 ฟิวส์แรงสูงชนิดที่อยู่ภายในสิ่งห่อหุ้ม

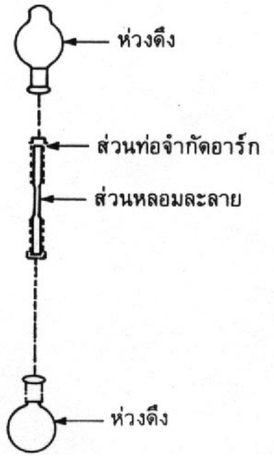
8.1.2 ตัวฟิวส์ลิงค์ (Fuse link) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ตัวฟิวส์ลิงค์ชนิดต้องใส่ในกระบอก และชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอก แต่ละชนิดมีพิกัดกระแสไม่เกิน 200 A

1. ตัวฟิวส์ลิงค์ชนิดต้องใส่ในกระบอก มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนหัว ส่วนหลอมละลาย และส่วนสายต่อ ดังรูปที่ 8.5



รูปที่ 8.5 ส่วนประกอบทั่วไปของตัวฟิวส์ลิงค์ และขนาดฟิวส์พิกัด 1 – 200 A

2. ตัวฟิวส์ชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอก มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนห่วงดึง ส่วนท่อจำกัด อาร์ค และส่วนหลอมละลาย ดังรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6 ส่วนประกอบของตัวฟิวส์ลิงค์ ชนิดที่ไม่ต้องใส่ในกระบอก ส่วนห่วงทั้งด้านบนและด้านล่าง ใช้สำหรับตะขอเกี่ยวในการถอดเปลี่ยนฟิวส์ โดยขณะปฏิบัติงานไม่ต้องดับไฟ

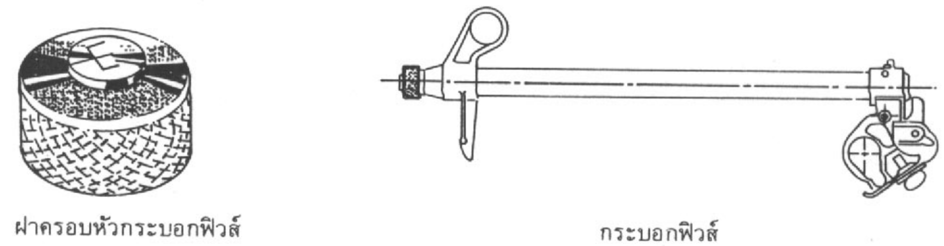
8.1.3 กระบอกสำหรับใช้ใส่ฟิวส์ลิงค์ (Fuse Holder) โดยทั่วไปตัวกระบอกจะทำด้วยใยแก้ว เพื่อให้เบาและมีความแข็งแรงพอที่จะทนแรงดันและประกายไฟ ดังรูปที่ 8.7

ขนาดของกระบอกกำหนดไว้ดังนี้

(ก) รูขนาด 5/16 นิ้ว สำหรับใช้กับตัวฟิวส์ ขนาด 1 – 50 A

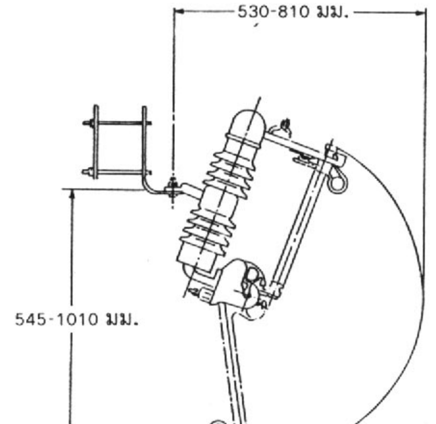
(ข) รูขนาด 7/16 นิ้ว สำหรับใช้กับตัวฟิวส์ ขนาด 60 – 100 A

(ค) รูขนาด 3/4 นิ้ว สำหรับใช้กับตัวฟิวส์ ขนาด 125 – 200



รูปที่ 8.7 ฝาครอบและกระบอกใส่ฟิวส์ลิงค์

8.1.4 ลักษณะการทำงานของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง เมื่อเกิดการลัดวงจรตัวฟิวส์จะหลอมละลายและเกิดการอาร์ค ความร้อนในรูปประกายไฟหรือเปลวไฟ ความดันและก๊าซที่เกิดขึ้นภายในกระบอกฟิวส์หรือสิ่งห่อหุ้มตัวฟิวส์ ก็จะขับดันออกสู่ภายนอกพร้อมกับขับส่วนของตัวฟิวส์ที่ขาดออกจากกันที่อยู่ส่วนล่าง ให้ห่างออกจากกันมากพอที่จะไม่เกิดอาร์คต่อไปได้ ส่วนของก๊าซและความร้อนที่ถูกขับออกมานั้น เป็นส่วนที่อาจทำให้อุปกรณ์และสายไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างและบนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการออกแบบติดตั้งฟิวส์ตัดตอนแรงสูงทั้งสามประเภทข้างต้น จะต้องคำนึงถึงภายหลังจากที่ตัวฟิวส์ขาดออกจากกันแล้ว ดังนี้



รูปที่ 8.8 เมื่อตัวฟิวส์หลอมละลายขาดออกจากกัน กระบอกใส่ฟิวส์จะตกห้อยลงมา

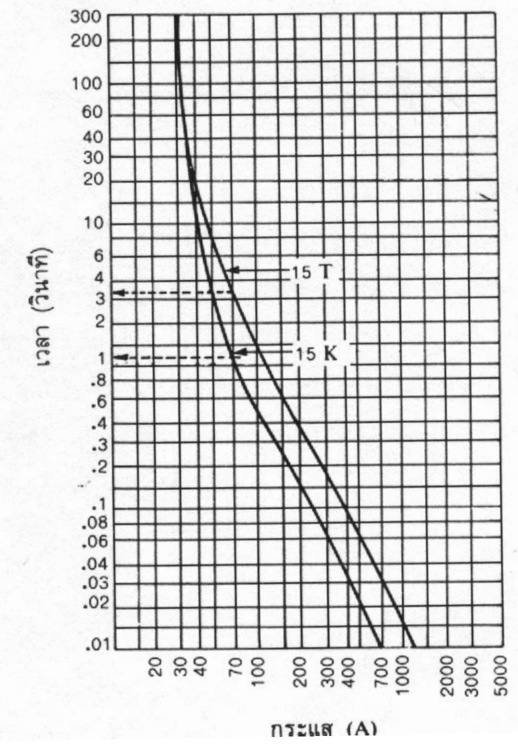
(ก) กระกอบใส่ฟิวส์ตามรูปที่ 8.8 ตกห้อยลงมา

(ข) ชนิดตัวฟิวส์ไม่ได้อยู่ในกระบอก ดังรูปที่ 8.6 ตัวฟิวส์ต้องแยกขาดหลุดออกมาจากกัน

(ค) ชนิดตัวฟิวส์อยู่ในสิ่งห่อหุ้ม ดังรูปที่ 8.4 ต้องตกห้อยลงมา

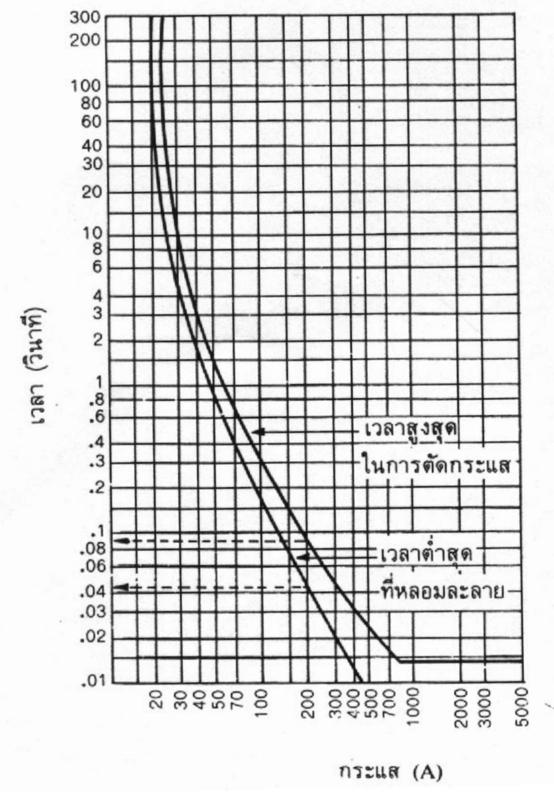
8.1.5 ความสัมพันธ์ของเวลาและกระแสของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกระแสของตัวฟิวส์แรงสูง จำเป็นต้องใช้ในการคัดเลือกขนาดที่เหมาะสม สำหรับป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า คาพาซิเตอร์ และสายใต้ดิน เป็นต้น

ตามมาตรฐานของ NEMA ตัวฟิวส์แรงสูงได้แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเร็ว (Fast) และชนิดช้า (slow) โดยใช้เครื่องหมาย K (kwick) และ T (tardy) ตามลำดับ ดังรูปที่ 8.9 ความแตกต่างของเส้นโค้งเวลาต่อกระแส



รูปที่ 8.9 เส้นโค้งของฟิวส์ชนิด K และ T เวลาหลอมละลายต่ำสุดที่พิกัดกระแสเดียวกัน เช่น ที่พิกัดกระแส 70 A ฟิวส์ ชนิด 15 K จะหลอมละลายในเวลา 1.2 วินาที ส่วนฟิวส์ชนิด 15 T จะหลอมละลายในเวลา 3.4 วินาที

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่หลอมละลายต่ำสุด (Minimum Melting Time) และเวลาสูงสุดในการตัดกระแสฟอลต์ (Maximum Clearing Fault Time) ดังรูปที่ 8.10



รูปที่ 8.10 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่หลอมละลายต่ำสุด และเวลาสูงสุดในการตัดกระแสฟอลต์ (fault) ของฟิวส์ 10 K ถ้ากระแสฟอลต์ 200 A ฟิวส์ 10 K จะหลอมละลายในเวลา 0.044 วินาที และเวลาสูงสุดในการตัดกระแสฟอลต์ 0.09

ขนาดพิกัดกระแสของตัวฟิวส์แรงสูงจะมีขนาด 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 65, 80, 100, 140, 200 A

8.1.6 การเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง โดยปกติฟิวส์ตัดตอนแรงสูง จะกำหนดค่าพิกัดแรงดันสูงสุด พิกัดแรงดันอิมพัลส์ (BIL) พิกัดกระแสต่อเนื่อง และพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ตามมาตรฐาน ANSI และ IEC ในตารางที่ 8.1

1. การเลือกพิกัดกระแสต่อเนื่อง ต้องเลือกให้พิกัดกระแสต่อเนื่องของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงมากกว่ากระแสต่อเนื่องของระบบ เช่น กระแสต่อเนื่อง 150 A ต้องเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง 200 A

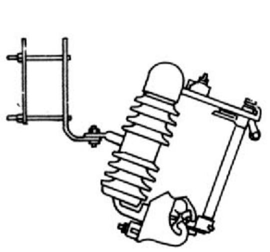
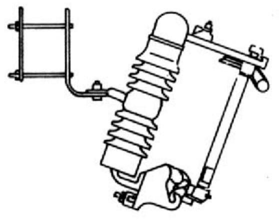
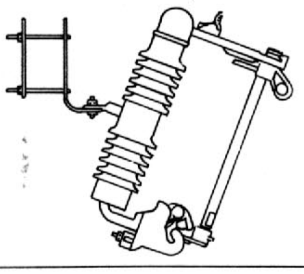
2. การเลือกแรงดันที่กำหนด โดยปกติต้องเลือกขนาดแรงดันที่กำหนดสูงสุดของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงให้มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันของระบบและมีกฎเกณฑ์ ดังนี้

(ก) ระบบไม่ต่อลงดิน (Unground System) แรงดันที่กำหนดสูงสุดของตัดตอนแรงสูงจะต้องเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันเฟสต่อเฟสของระบบ

(ข) ระบบต่อลงดิน (Ground System)

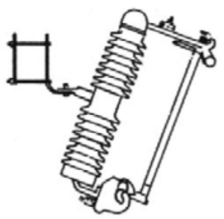
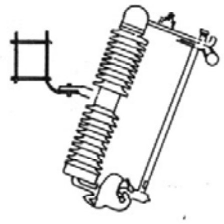
- เมื่อต่อสายแยกเฟสเดียว แรงดันที่กำหนดสูงสุดของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงต้องเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันเฟสต่อกราวด์ของระบบ

ตารางที่ 8.1 ขนาดพิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง

รูปร่าง	ขนาดพิกัดมาตรฐาน ANSI				
	แรงดัน		กระแส		
	สูงสุด kV	BIL kV	กระแสต่อเนื่อง A	กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (A)	
				อสมมาตร	สมมาตร
	15 (12)	95 (75)	100	5000	3500
			100	8000	5600
			100	1200	8000
			200	16000	10600
	15 (12)	95 (75)	100	16000	10600
	27 (24)	125 (125)	100	4000	3000
			100	8000	5600
			100	10000	71000
			100	12000	8000
	27 (24)	125 (125)	100	16000	10600
			200	12000	8000

(   ) ตัวเลขในวงเล็บคือมาตรฐาน IEC

ตารางที่ 8.1 (ต่อ) ขนาดพิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง

รูปร่าง	ขนาดพิกัดมาตรฐาน ANSI				
	แรงดัน		กระแส		
	สูงสุด kV	BIL kV	กระแสต่อเนื่อง A	กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (A)	
				สมมาตร	อสมมาตร
	38	150	100 200	8000	5000
	38 (36)	200 (170)	100 200	8000	5000

( ) ตัวเลขในวงเล็บคือมาตรฐาน IEC

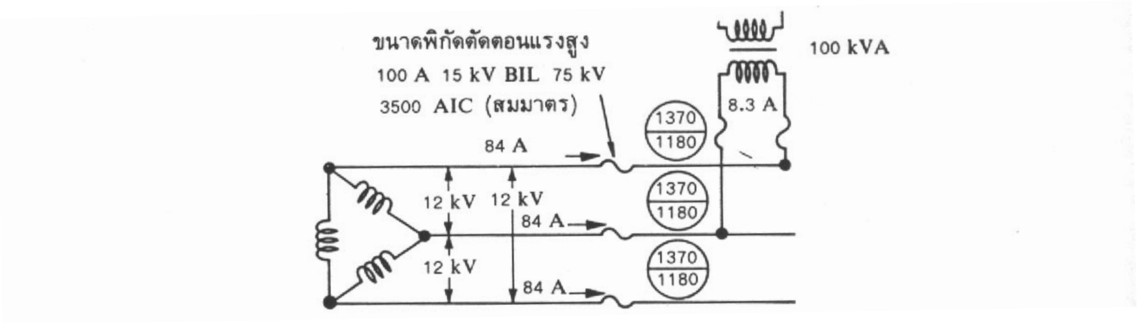
- สำหรับระบบ 3 เฟส แรงดันที่กำหนดสูงสุดของฟิวส์ตัดตอนแรงสูงต้องเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันเฟสต่อเฟสของระบบ ซึ่งอาจจะระบุพิกัดแรงดันเป็น 7.8/13.5 kV หรือ 15/27 kV ดังตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 พิกัดฟิวส์ตัดตอนแรงสูงต่ำสุดที่แนะนำให้ใช้ ตามมาตรฐาน ANSI

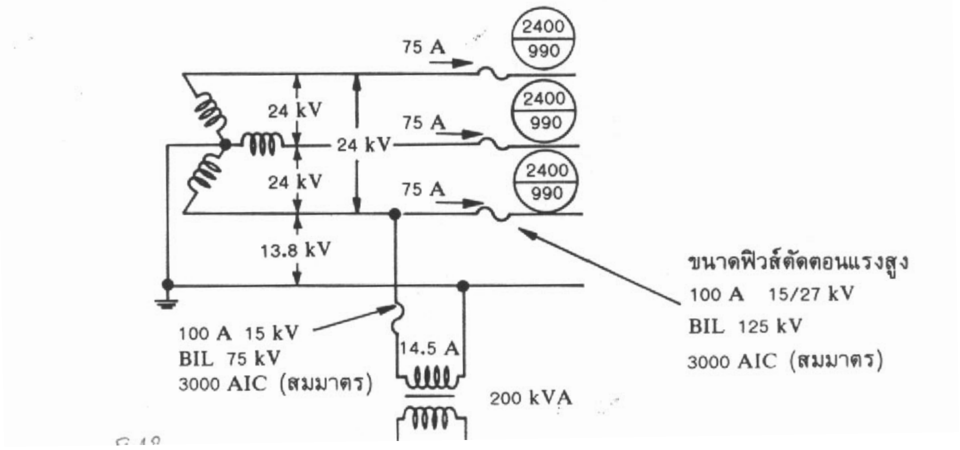
แรงดันระบุของระบบ (kV)	แรงดันที่กำหนดสูงสุด (kV)	
	เฟสต่อกราวด์	เฟสต่อเฟส
12 Δ	-	15
6.9/12 Y⏚	7.8	7.8/13.5
6.9/12 Y⏚	-	7.8/13.5
13.8/24 Y⏚	27	15/27
19/33 Y⏚	27	38

3. การเลือกขนาดระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน หรือค่า BIL การเลือกขนาดค่า BIL ของ ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง ให้กำหนดค่าตามมาตรฐาน IEC

4. การเลือกพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ การเลือกขนาดพิกัดกระแสตัดวงจรของฟิวส์ตัดตอนแรงสูง ต้องให้มากกว่าหรือเท่ากับค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดที่จุดลัดวงจรที่คำนวณได้ ดังรูปที่ 8.11 และในตารางที่ 8.1 แสดงข้อมูลในการเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง แรงดันที่กำหนด 12 kV พิกัดกระแสต่อเนื่อง 100 A BIL สูงสุด 75 kV พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 3500 A สมมาตร ส่วนการเลือกขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูงระบบวายต่อลงดิน Y ดังรูปที่ 8.12 จากตารางที่ 8.1 และ 8.2 ควรเลือกขนาดพิกัดแรงดันตัดตอน 15/27 kV พิกัดกระแสต่อเนื่อง 100 A ค่า BIL สูงสุด 125 kV พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 300 A สมมาตร ส่วนหม้อแปลงเฟสเดียวขนาด 200 kVA กระแสโหลด 14.5 A (200/13.8 = 14.5) เลือกใช้ขนาดฟิวส์ตัดตอนแรงสูง 15 kV พิกัดกระแสต่อเนื่อง 100 A พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 3000 A สมมาตร



รูปที่ 8.11 ขนาดแรงดันระบบ 12 kV ระบบเดลต้า กระแสโหลด 84 A ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 1370 A และต่ำสุด 1180 A เลือกใช้ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง 100 A 350 AIC (สมมาตร)



รูปที่ 8.12 ขนาดแรงดันระบบ 13.8/24 kV แบบวายต่อลงดิน กระแสโหลด 75 A ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุด 2400 A และต่ำสุด 990 A

8.1.7 การเลือกขนาดฟิวส์ลิงค์ (Fuse link) สิ่งสำคัญจำเป็นต้องรู้ คุณลักษณะของระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกัน ซึ่งมีข้อพิจารณาดังต่อไปนี้

(ก) กระแสโหลดเกินวงจรและกระแสลัดวงจรช่วงเวลาสั้น ๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้า

(ข) กระแสทรานเซียนต์ กระแสพุ่งเข้าสร้างแม่เหล็ก เสิร์จฟ้าผ่า กระแสพุ่งเข้าคาพาซิเตอร์

(ค) สามารถจัดให้ทำงานสัมพันธ์กับอุปกรณ์ชุดอื่น ๆ หรือกับฟิวส์ด้วยกันเอง

เมื่อฟิวส์จำนวน 2 ชุดหรือมากกว่า ชุดที่อยู่ใกล้ฟอลต์ของระบบมากที่สุดจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกัน (protecting device) ส่วนตัวที่อยู่ถัดขึ้นมาจะเป็นตัวป้องกันสำรอง (backup) ดังรูปที่ 8.13 ขนาดของฟิวส์ลิงค์ป้องกันต้องมีค่าไม่เกิน 75 เปอร์เซ็นต์ ของเวลาต่ำสุดที่หลอมละลาย (mimimum melting time) ของขนาดฟิวส์ลิงค์ตัวสำรอง ฉะนั้นฟิวส์ลิงค์ป้องกันจะต้องตัดกระแสฟอลต์เสียก่อนที่ฟิวส์ลิงค์ตัวสำรองจะหลอมละลายจนฟิวส์ขาด อย่างไรก็ตามกระแสโหลด จะต้องไม่เกินกว่าขีดความสามารถกระแสต่อเนื่องของฟิวส์ลิงค์ สำหรับค่ากระแสต่อเนื่องจะมีค่าประมาณ 150 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัดกระแสฟิวส์ลิงค์ ชนิด T และ K ดังตารางที่ 8.3

รูปที่ 8.13 หลักการทั่วไปของการป้องกัน

ตารางที่ 8.3 ขีดความสามารถรับกระแสต่อเนื่องของฟิวส์ลิงค์ ชนิด T และ K

พิกัดฟิวส์ลิงค์ ชนิด T และ K (A)	กระแสต่อเนื่อง (A)	พิกัดฟิวส์ลิงค์ ชนิด T และ K (A)	กระแสต่อเนื่อง (A)
6	9	40	60
8	12	50	75
10	15	65	95
12	18	80	120
15	23	100	150
20	30	140	190
25	38	200	200
30	45		

8.2 เพาเวอร์ฟิวส์ (Power Fuse)

ตามมาตรฐานของ ANSI เพาเวอร์ฟิวส์ต้องมีคุณลักษณะดังนี้

(ก) ต้องมีค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าระดับการฉนวนอิมพัลส์มูลฐาน (BIL) ได้

(ข) เหมาะสมสำหรับติดตั้งในสถานีจ่ายไฟฟ้าและสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

(ค) มีโครงสร้างที่ง่าย ๆ สามารถนำมาติดตั้งในสถานีจ่ายไฟฟ้าและสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

สำหรับเพาเวอร์ฟิวส์มีคุณลักษณะอื่น ๆ ที่แตกต่างจากฟิวส์ตัดตอนแรงสูง คือ สามารถเลือกขนาดพิกัดที่สูงกว่า ทั้งพิกัดแรงดัน พิกัดกระแส และพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้ได้ทั้งติดตั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร ดังนั้นเพาเวอร์ฟิวส์จึงเหมาะสมกับการใช้งานดังต่อไปนี้

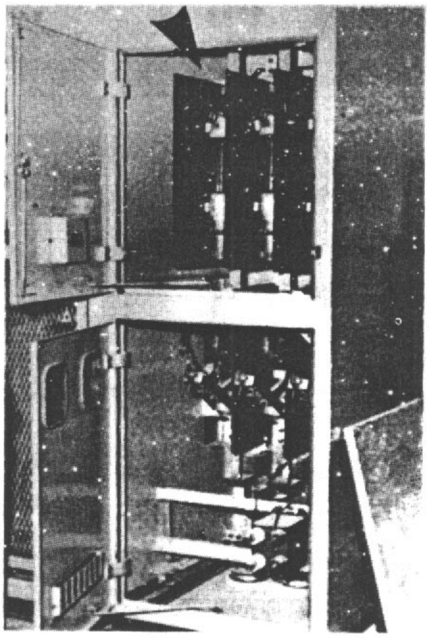
(ก) ใช้ทางวงจรด้านแรงสูง เพื่อใช้ป้องกันหม้อแปลงขนาดใหญ่

(ข) ใช้ป้องกันสายป้อนใต้ดินที่ต่อจากสถานีไฟฟ้าย่อย

(ค) ใช้ต่อในแผงสวิตช์ทำหน้าที่สับถ่ายโหลด

(ง) ใช้ป้องกันคาพาซิเตอร์

การใช้เพาเวอร์ฟิวส์ร่วมกับโหลดอินเตอร์รัพเตอร์สวิตช์เกียร์ (load interrupter switch gear) เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงสูงติดตั้งภายในอาคาร ดังรูปที่ 8.14



รูปที่ 8.14 การใช้เพาเวอร์ฟิวส์ (ลูกศรชี้) ร่วมกับโหลดอินเตอร์รัพเตอร์สวิตช์เกียร์

ตามมาตรฐานของ NEMA จัดเพาเวอร์ฟิวส์อยู่ในประเภท “E” ซึ่งตัวเลขที่อยู่ข้างหน้า E หมายถึงพิกัดกระแสใช้งานอย่างต่อเนื่อง เช่น 0.5 E, 1 E, 2 E, 3 E, 5 E, 7 E, 10 E, 15 E, 20 E, 25 E, 30 E, 40 E, 50 E, 65 E, 80 E, 100 E, 125 E, 150 E, 200 E, 300 E และ 400 E แอมแปร์

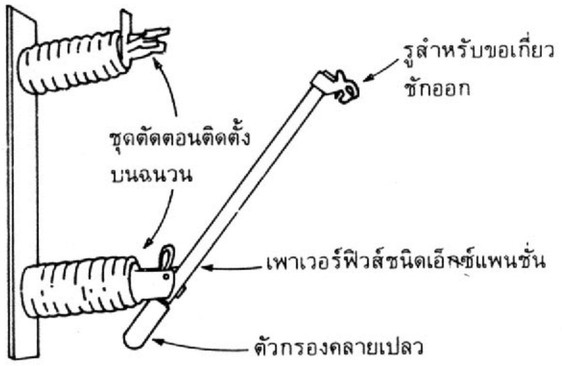
- เพาเวอร์ฟิวส์ขนาดตั้งแต่ 0.5 E - 100 E จะละลายภายในเวลา 300 วินาที เมื่อรับกระแส (rms) ระหว่าง 200 – 240% ของพิกัดกระแสใช้งานอย่างต่อเนื่อง

- เพาเวอร์ฟิวส์ขนาดตั้งแต่ 125 E - 400 E จะละลายภายในเวลา 600 วินาที เมื่อรับกระแส (rms) ระหว่าง 220 – 264% ของพิกัดกระแสใช้งานอย่างต่อเนื่อง

- กระแสที่มีค่าสูงกว่าดังกล่าวข้างต้น เวลาการละลายจะขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ละราย แต่อย่างไรก็ตามแต่ละช่วงเวลาผลต่างระหว่างค่ากระแสสูงสุดและต่ำสุดจะต้องไม่เกิน 20%

เพาเวอร์ฟิวส์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เอ็กซ์แพนชั่น และจำกัดกระแส

8.2.1 เพาเวอร์ฟิวส์เอ็กซ์แพนชั่น ฟิวส์ชนิดนี้มีลักษณะการทำงานเหมือนกับฟิวส์ตัดตอนแรงสูง และเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจึงแบ่งฟิวส์เอ็กซ์แพนชั่นออกเป็น 2 ประเภท



รูปที่ 8.15 เพาเวอร์ฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชั่น ร่วมกับสวิตช์ตัดตอนแรงสูงภายนอกอาคาร

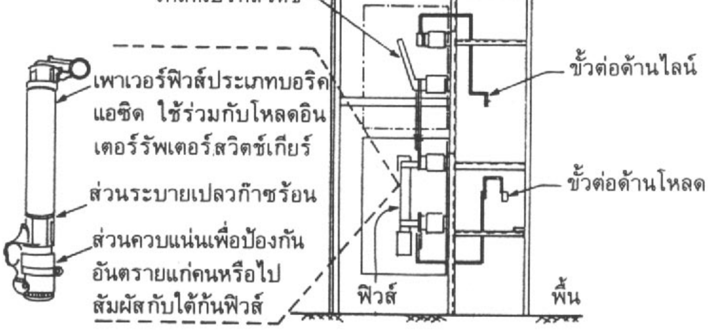
1. ประเภทเอ็กซ์แพนชั่น (expansion) เป็นชนิดที่กระบอกฟิวส์ทำด้วยใยแก้วและลักษณะการทำงานเช่นเดียวกันกับฟิวส์ตัดตอนแรงสูง เว้นเสียแต่เรื่องเสียง การกระจายของก๊าซและเปลวไฟที่กระจายไปตามความยาวของกระบอกฟิวส์ที่ใหญ่กว่าและแข็งแรงกว่า ดังรูปที่ 8.15 แสดงเพาเวอร์ฟิวส์ตัดตอนแรงสูง ฟิวส์ประเภทนี้มีข้อจำกัดสำหรับใช้ภายนอกอาคารอย่างเดียว โดยปกติจะใช้กับสถานีจ่ายไฟฟ้า สำหรับป้องกันหม้อแปลงขนาดเล็กถึงขนาดกลาง และใช้ป้องกันคาพาซิเตอร์ สำหรับอัตราพิกัดเพาเวอร์ฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชั่น ดังตารางที่ 8.4

ตารางที่ 8.4 อัตราพิกัดเพาเวอร์ฟิวส์ประเภทเอ็กซ์แพนชั่น สำหรับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยภายนอกอาคาร

แรงดันระบุ kV	กระแสต่อเนื่องสูงสุด A	ความสามารถขณะตัดวงจร	
		กระแสขณะอินเตอร์รัพต์	กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์
7.2	100, 200, 300, 400	13	162
14.1	100, 200, 300, 400	19	406
24.0	100, 200, 300, 400	19	785
34.5	100, 200, 300, 400	20	1174
46.0	100, 200, 300, 400	25	1988
69.0	100, 200, 300, 400	19	2350
115.0	100, 200	15	3110
138.0	100, 200	12	2980

2. ประเภทบอริคแอซิด (boric acid) เป็นชนิดที่กระบอกฟิวส์จะบรรจุด้วยบอริคแอซิด เพื่อทำหน้าที่ดับอาร์คในขณะเกิดกระแสลัดวงจร ผงของบอริคแอซิดที่บรรจุแน่นในกระบอกฟิวส์มีผลดังนี้

- สำหรับฟิวส์ขนาดเดียวกันแล้ว จะสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้สูงกว่า มีจุดหลอมละลายต่ำที่พิกัดกระแสลัดวงจร ทำให้มีอาร์คน้อย ลดการแตกตัวของก๊าซและเปลวไฟ
- ก๊าซที่เกิดจากบอริคแอซิดจะไม่ลุกไหม้ ทำให้ลดเปลวไฟป้องกันการวาบไฟ
- ลักษณะเด่นของบอริคแอซิดก็คือ สามารถควบคุมก๊าซที่กระจายเมื่อเกิดการอาร์ค ไอบอริคแอซิดสามารถควบแน่นเป็นของเหลวจากอุปกรณ์ระบายความร้อน สำหรับการใช้เพาเวอร์ฟิวส์ประเภทบอริคแอซิดนี้ จะมีใช้ทั้งภายนอกอาคารและภายในอาคาร์ ดังรูปที่ 8.16 ขนาดเพาเวอร์ฟิวส์ประเภทบริคแอซิด ดังในตารางที่ 8.5



รูปที่ 8.16 เพาเวอร์ฟฟิวส์ประเภทบอริคแอซิด ติดตั้งอยู่ในตู้โหลดอินเตอร์รัพเตอร์สวิตช์เกียร์ วางบนพื้นภายในอาคาร

ตารางที่ 8.5 อัตราพิกัดเพาเวอร์ฟิวส์ประเภทบอริคแอซิด สำหรับภายนอกและภายในอาคาร

แรงดันระบุ kV	กระแสต่อเนื่องสูงสุด A	ความสามารถขณะตัดวงจร	
		กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ KV (rms)	กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ MVA
7.2	200, 400, 720	26	325
14.4	200, 400, 720	30	620
24.0	200, 300	18	750
34.5	100, 200, 300	17	1000
46.0	100, 200, 300	31	2500
69.0	100, 200, 300	16	2000
115.0	100, 250	10	2000
138.0	100, 250	8	2000

8.2.2 เพาเวอร์ฟิวส์จำกัดกระแส **(current limiting Power Fuser)** ฟิวส์ชนิดนี้มีพิกัดตัดกระแสลัดวงจรสูง ๆ ได้ หรือเรียกว่า *ฟิวส์แรงสูง HRC* ลักษณะการทำงานและส่วนประกอบของฟิวส์แรงสูงชนิดจำกัดกระแส จะเหมือนกับฟิวส์จำกัดกระแสแรงต่ำ จุดเด่นของฟิวส์แรงสูงชนิดจำกัดกระแส คือ

- ขณะกระแสลัดวงจรจะไม่มีการอาร์คเนื่องจากก๊าซ ซึ่งพลังงานการอาร์คทั้งหมดจะถูกทรายดูดซึม ทำให้ลดความร้อนและลดความรุนแรงอันจะเกิดความเสียหายแก่ระบบไฟฟ้า ฟิวส์ HRC นี้สามารถใช้ในอาคาร โดยติดตั้งอยู่ในกล่องปิดล้อม มีขนาดเล็ก ไม่มีเสียง และไม่มีความร้อนจากก๊าซหรือเปลวไฟ

- ปฏิกิริยาฟิวส์นี้สามารถควบคุมให้กระแสไหลผ่านฟิวส์ต่ำขณะกระแสลัดวงจรในระบบกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้จะช่วยลดความเสียหายในวงจรไฟฟ้าขณะฟอลต์

- มีอัตราพิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์สูง สามารถนำไปใช้กับระบบจ่ายไฟฟ้าแรงดันระดับกลางและระดับสูงที่มีค่าพิกัดกระแสลัดวงจรสูง ๆ

ตามรูปที่ 8.17 แสดงฟิวส์แรงสูง HRC แรงดันที่กำหนด (U_N) 10/12 kV กระแสที่กำหนด (I_N) 40 A พิกัดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (I_a) 63 kA และกระแสตัดวงจรต่ำสุด (I_{min}) 120 A

รูปที่ 8.17 ฟิวส์แรงสูง HRC ชนิดจำกัดกระแส

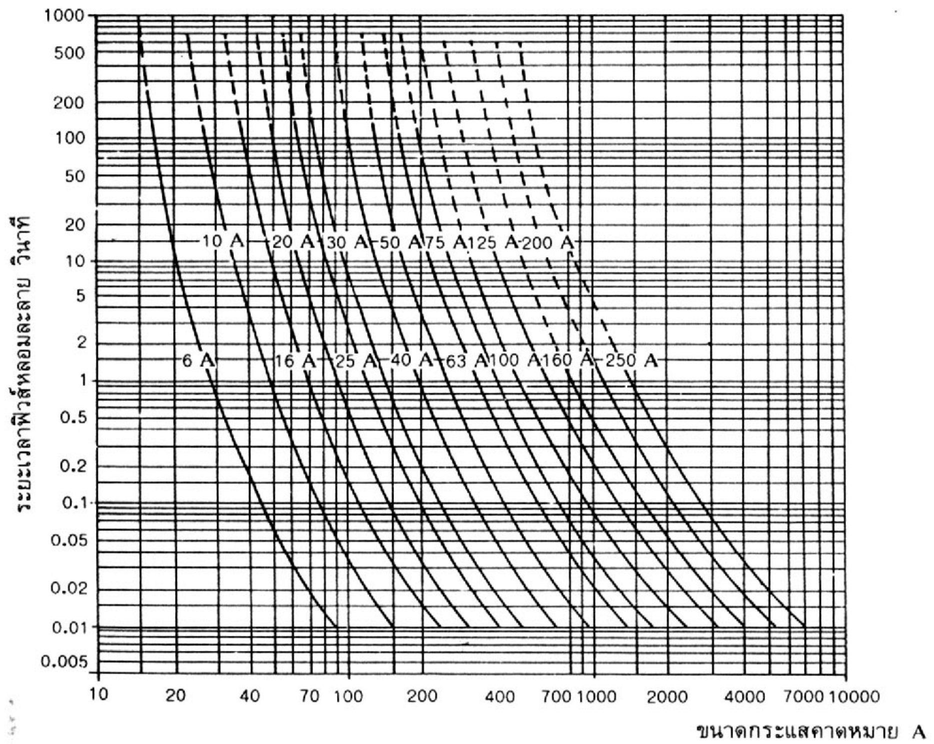
สำหรับตารางที่ 8.6 แสดงขนาดพิกัดฟิวส์แรงสูง HRC ชนิดจำกัดกระแส ส่วนรูปที่ 8.18 แสดงคุณลักษณะเส้นโค้งเวลา-กระแสของฟิวส์ HRC แรงสูง และรูปที่ 8.19 แสดงแผนภูมิกระแสยอดคลื่นที่ขึ้นถึงของฟิวส์ HRC แรงสูง ส่วนรูปที่ 8.20 แสดงการใช้ฟิวส์ HRC แรงสูง ขนาด 100 A 12 kV ร่วมกับโหลดเบรกสวิตซ์ 630 A 12 kV

ตารางที่ 8.6 แสดงพิกัดฟิวส์แรงสูง HRC ชนิดจำกัดกระแส ผลิตภัณฑ์ “SIEMENS”

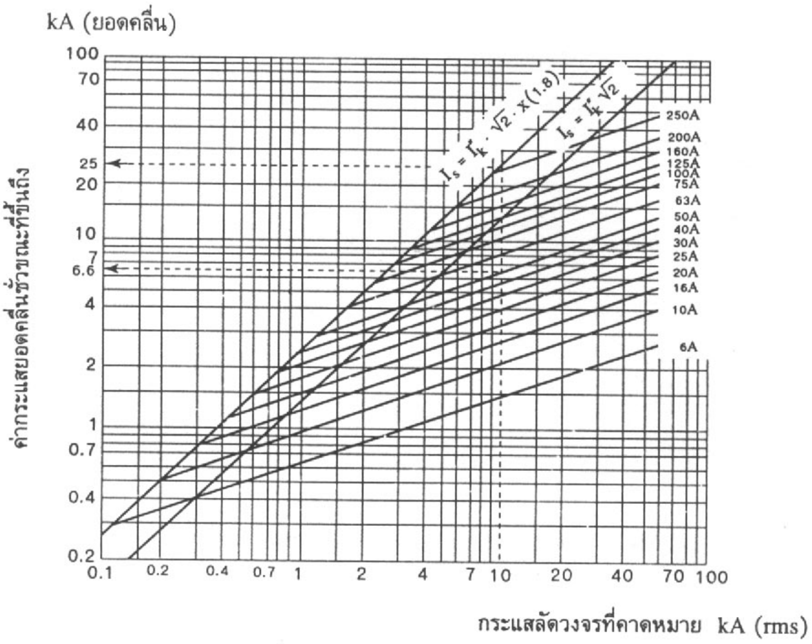
แรงดันที่กำหนด (U_N)		กระแสที่กำหนด	ความยาว	กระแสขณะอินเตอร์รัพต์	กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์		กระแสตัดวงจร
ต่ำสุด kV	สูงสุด kV	(I_N) A	mm	(I_a) kA (rms)	ต่ำสุด MVA	สูงสุด MVA	ต่ำสุด (I_{min}) A
3	3.6	6.3	192	80	400	500	15
		10					25
		16					40
		25					75
		40					120
		63					189
		100					300
		160	292	63	330	440	400
		200					500
		250					750

ตารางที่ 8.6 (ต่อ) แสดงพิกัดฟิวส์แรงสูง HRC ชนิดจำกัดกระแส ผลิตภัณฑ์ “SIEMENS”

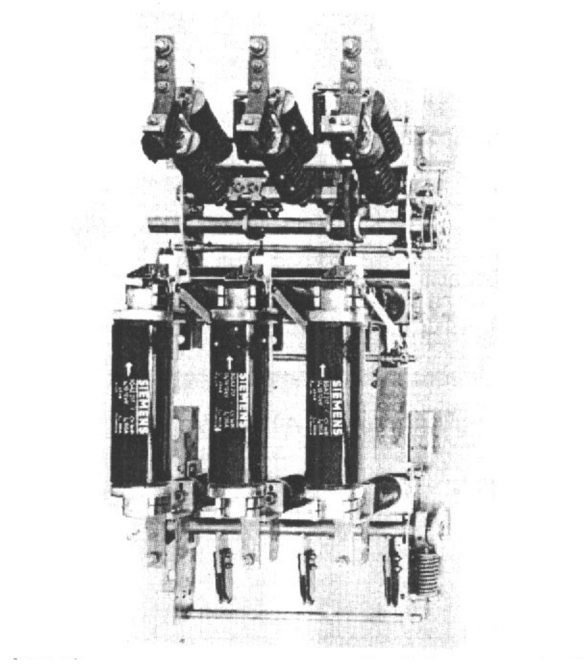
แรงดันที่กำหนด (U_N)		กระแสที่กำหนด	ความยาว	กระแสขณะอินเตอร์รัพต์	กำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์		กระแสตัดวงจร
ต่ำสุด kV	สูงสุด kV	(I_N) A	mm	(I_a) kA (rms)	ต่ำสุด MVA	สูงสุด MVA	ต่ำสุด (I_{min}) A
6	7.2	6.3 10 16 25 40 63 100	192	80	800	1000	15 25 56 62 120 189 300
		160 200 250 315	442	63	650	800	400 500 875 1260
10	12	6.3 10 16 25 40 63 100	292	63	1100	1300	15 25 40 75 120 189 300
20	24	6.3 10 16 25 40 63	442	40	1400	1600	15 25 40 75 120 189
30	36	6.3 10 16 25	537	31.5	1600	2000	15 25 40 75



รูปที่ 8.18 คุณลักษณะเส้นโค้งเวลา-กระแสของฟิวส์ HRC แรงสูง ชนิดจำกัดกระแส ผลิตภัณฑ์ “SIBA”



รูปที่ 8.19 แผนภูมิกระแสยอดคลื่นที่ขึ้นถึง ของฟิวส์ HRC แรงสูง ที่กระแสลัดวง จร 10 kA ถ้าไม่ใช้ฟิวส์ ค่ากระแสยอดคลื่นชั่วขณะที่ขึ้นถึงจะมีค่า 25 kA (ยอดคลื่น) แต่ถ้าใช้ฟิวส์ HRC แรงสูง 50 A ค่ากระแสยอดคลื่นชั่วขณะที่ขึ้นถึงจะลดลงเหลือ 6.6 kA (ยอดคลื่น)



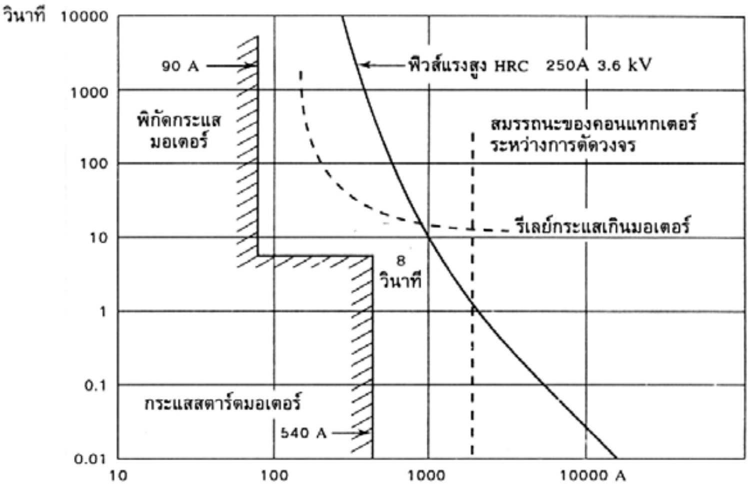
รูปที่ 8.20 การใช้ฟิวส์ HRC แรงสูง 100 A 12 kV ร่วมกับโหลดเบรกสวิตช์ 630 A 12 kV

1. การใช้เพาเวอร์ฟิวส์แรงสูงชนิดจำกัดกระแสป้องกันหม้อแปลง การเลือกขนาด HRC ฟิวส์สำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าด้านไฟฟ้าแรงสูง ต้องมีขนาดไม่เกิน 250 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัดด้านกำลังไฟฟ้าเข้า ถ้าไม่ตรงกับพิกัดมาตรฐานของตัวฟิวส์อนุญาตให้ใช้ขนาดฟิวส์ที่มีขนาดพิกัดสูงถัดไป ดังแสดงในตารางที่ 8.7

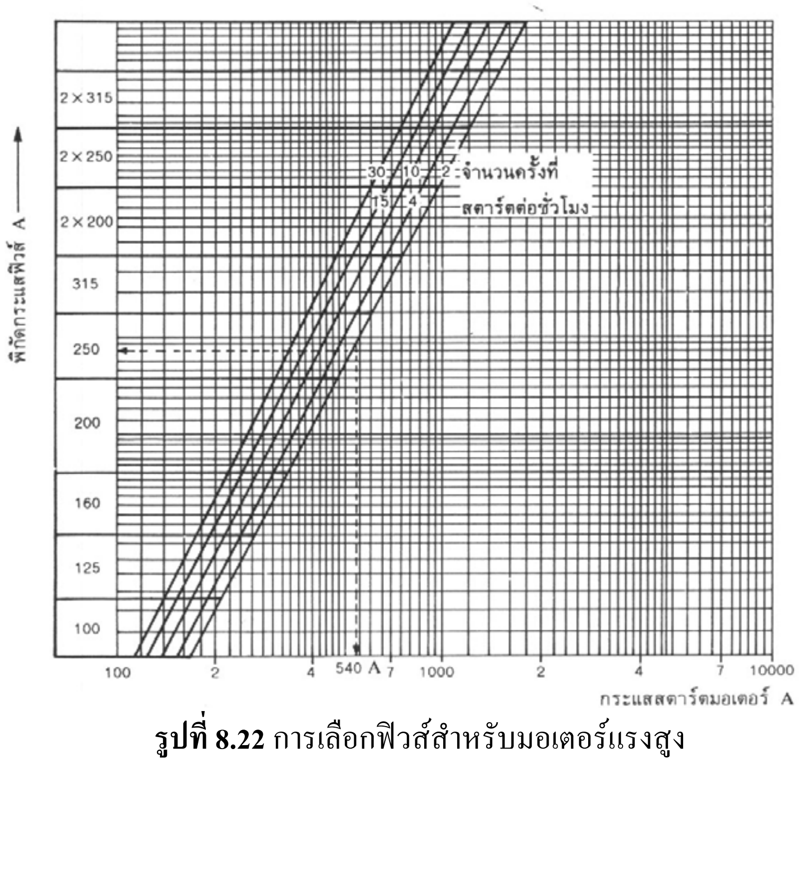
ตารางที่ 8.7 แสดงขนาดเพาเวอร์ฟิวส์แรงสูง HRC ชนิดจำกัดกระแส สำหรับป้องกันหม้อแปลงสามเฟส

หม้อแปลง kVA	10/12 kV		20/24 kV		30/36kV	
	ขนาดพิกัดกระแส HRC ฟิวส์					
	ต่ำสุด (A)	สูงสุด (A)	ต่ำสุด (A)	สูงสุด (A)	ต่ำสุด (A)	สูงสุด (A)
315	25	40	16	25	10	16
400	40	40	25	25	16	16
500	40	63	25	40	16	25
630	40	63	25	40	25	25
800	63	100	40	40	25	40
1000	63	100	40	63	25	40
1250	100	160	40	63	25	40
1600	100	200	63	100	40	63
2000	160	200	63	100	40	63

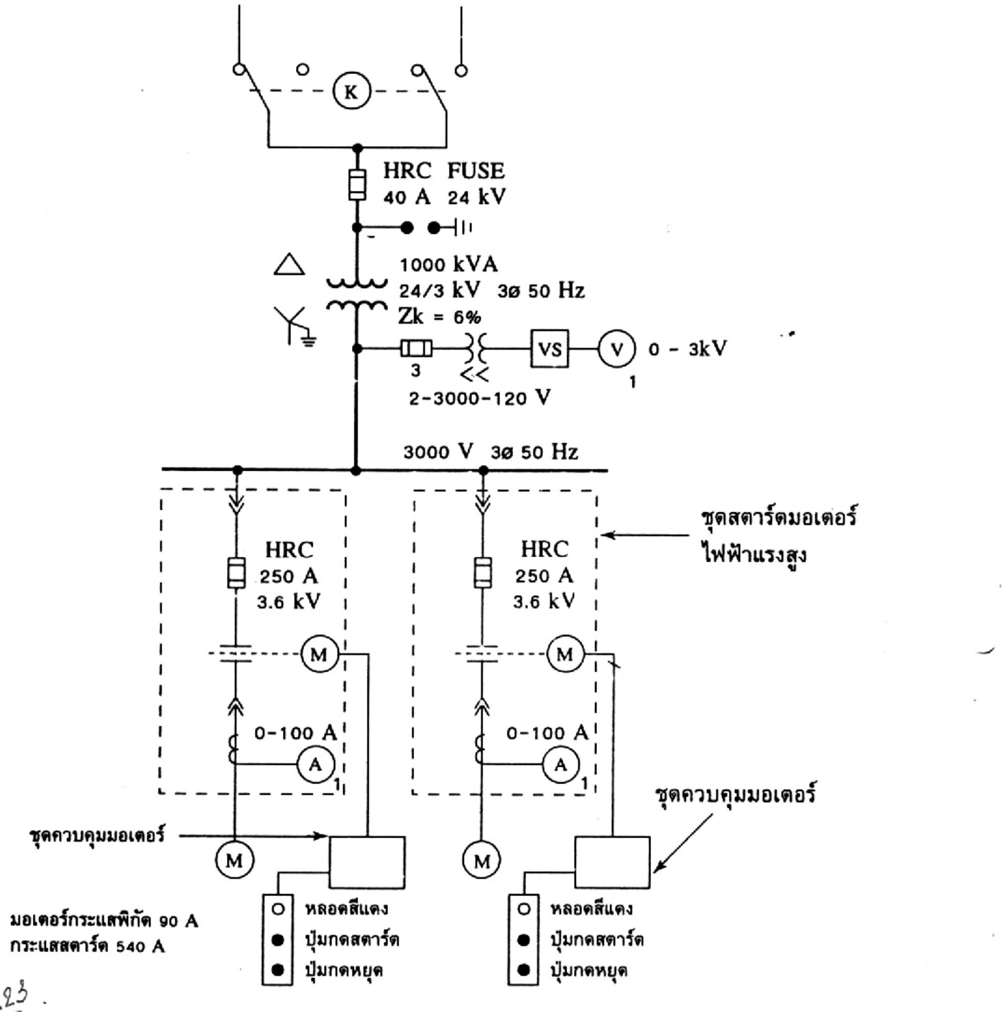
2. การใช้เพาเวอร์ฟิวส์กำจัดกระแสป้องกันมอเตอร์ สำหรับมอเตอร์แรงสูง โดยใช้ฟิวส์ป้องกันการกำหนดพิกัดกระแสฟิวส์ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสและระยะเวลาของกระแสสตาร์ต รวมทั้งความบ่อยครั้งในการสตาร์ต ดังรูปที่ 8.21 ส่วนรูปที่ 8.22 แสดงการเลือกฟิวส์สำหรับมอเตอร์ เช่น ถ้ามอเตอร์ที่พิกัดกระแส 90 A กระแสสตาร์ตมอเตอร์ 540 A จำนวน 2 ครั้ง ที่สตาร์ตต่อชั่วโมง ต้องใช้ฟิวส์ HRC ขนาด 250 A และแสดงไดอะแกรมเส้นเดียว ชุดสตาร์ตมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง ดังรูปที่ 8.23 เลือกใช้ฟิวส์แรงสูง HRC ขนาด 250 A 3.6 kV ส่วนการป้องกันหม้อแปลงขนาด 1000 kVA 24 kV ในตารางที่ 8.7 เลือกใช้ฟิวส์แรงสูง HRC ขนาด 40 A (สูงสุด 63 A) 24 kV



รูปที่ 8.21 การใช้เพาเวอร์ฟิวส์ชนิดจำกัดกระแสป้องกันมอเตอร์แรงสูง



รูปที่ 8.22 การเลือกฟิวส์สำหรับมอเตอร์แรงสูง



รูปที่ ~~4.30~~ 8.23 ไดอะแกรมเส้นเดียวชุดสตาร์ตมอเตอร์แรงสูง 3 kV กระแสพิกัดมอเตอร์ 90 A กระแสสตาร์ต 540 A จำนวน 2 ครั้งที่สตาร์ตต่อชั่วโมง จึงเลือกใช้ฟิวส์แรงสูง HRC ขนาด 250 A 3.6 kV

รูปที่ 8.23 ไดอะแกรมเส้นเดียวชุดสตาร์ตมอเตอร์แรงสูง 3 kV กระแสพิกัดมอเตอร์ 90 A 540 A จำนวน 2 ครั้ง ที่สตาร์ตต่อชั่วโมง จึงเลือกใช้ฟิวส์แรงสูง HRC ขนาด 250 A 3.6 kV

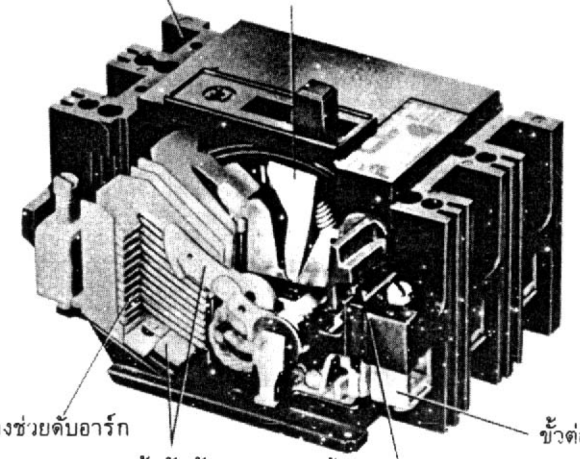
บทที่ 9
เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ
(Low Voltage Circuit Breaker)

การเลือกใช้ฟิวส์เป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันกระแสโหลดเกินหรือเนื่องจากกระแสลัดวงจรนั้น เกิดมีปัญหา เนื่องมาจากมอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม ค่ากระแสเริ่มเดินมีค่าสูง ฟิวส์มักจะขาด ทำให้ต้องสะสมฟิวส์ขนาดต่าง ๆ ไว้คอยเปลี่ยนฟิวส์บ่อย ๆ ครั้ง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ตัดตอนที่เรียกว่า *" เซอร์กิตเบรกเกอร์ "* อุปกรณ์ตัดตอนชนิดนี้ได้มีการปรับปรุงจนกระทั่งมีคุณสมบัติป้องกันกระแสโหลดเกินหรือกระแสลัดวงจรเท่าเทียมฟิวส์ได้ทุกกรณี ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คำว่า *เซอร์กิตเบรกเกอร์* นั้น ตามมาตรฐานของ NEMA ได้นิยามไว้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ให้ ON และ OFF โดยไม่อัตโนมัติ ขณะเดียวกันจะทริปเมื่อเกิดกระแสเกินได้โดยอัตโนมัติ โดยไม่เกิดความเสียหายต่อตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใต้อัตราพิกัดที่กำหนด

สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ (Low Voltage Circuit Breaker) หมายถึง เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่กำหนดแรงดันระบุไม่เกิน 600 V และตัวกลางที่ใช้ในการดับอาร์ก จะใช้อากาศเท่านั้น เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ โมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ และแอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์

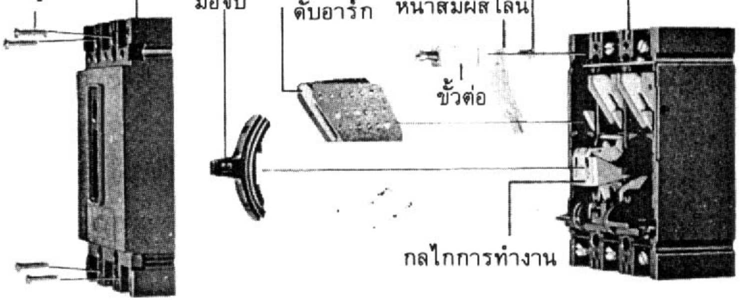
9.1 โมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์

โมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Molded Case Circuit Breaker) นั้น เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ ถูกบรรจุอยู่ภายในกล่องฉนวนที่ปิดมิดชิด เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้เริ่มมีใช้ในปีน พ.ศ. 2466 ได้ผลิตขึ้นมาใช้กับมอเตอร์โดยเฉพาะ เนื่องจากแต่ก่อนการใช้มอเตอร์ตามโรงงานอุตสาหกรรม ต้องมีการเปลี่ยนฟิวส์บ่อยครั้ง เพราะเมื่อเริ่มเดินมอเตอร์กระแสเริ่มเดินจะมีค่าสูง จึงทำให้ฟิวส์ขาดบ่อย แต่เมื่อใช้ฟิวส์ขนาดใหญ่ก็จะเป็นอันตรายต่อวงจรไฟฟ้าได้ สำหรับโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ นั้น ถูกออกแบบสำหรับป้องกันวงจรไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันสภาวะต่าง ๆ เช่น เกิดจากโหลดเกินหรือลัดวงจร ส่วนประกอบสำคัญของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้คือ โครงหล่อหุ้ม กลไกการทำงาน ตัวอาร์กและหน้าสัมผัส กลไกการปลดวงจรอัตโนมัติหรือการทริป ดังรูปที่ 9.1



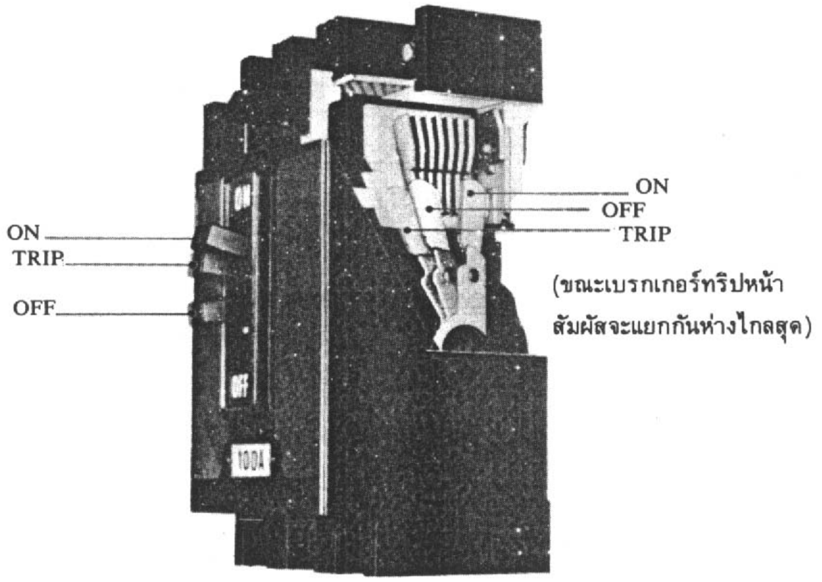
รูปที่ 9.1 ส่วนประกอบสำคัญต่าง ๆ ของโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์

9.1.1 โครงหล่อหุ้ม โครงหล่อหุ้มจะทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน มีหน้าที่ห่อหุ้มอุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ ของเบรกเกอร์ วัสดุที่ใช้ทำโครงหล่อหุ้มทำมาจากวัสดุโมลดาร์ต้า (moldarta) หรือแก้วโพลีเอสเตอร์ (glass polyester) ที่มีความคงทนของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) สูง ดังรูปที่ 9.2 แต่ละรุ่นและขนาดของโครงโมลด์เคสจะถูกออกแบบให้แตกต่างกันออกไป แต่ละรุ่นจะใช้ชื่อหรือจำแนกชนิดของโครงโมลด์เคส เพื่อบอกคุณสมบัติและขีดความสามารถของเซอร์กิตเบรกเกอร์รุ่นนั้น ๆ เช่น มีคุณสมบัติทนแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่พิกัดแรงดัน (rated voltage) พิกัดกระแสทริป(ampere trip) พิกัดกระแสเฟรม (ampere frame) และพิกัดความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์(interrupting capacity)

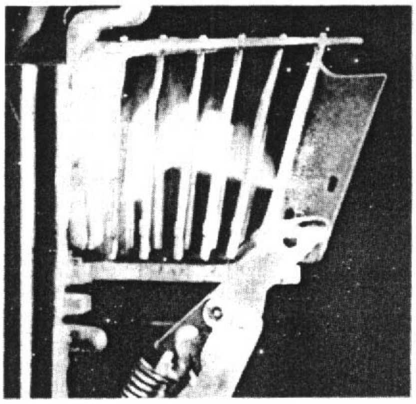


รูปที่ 9.2 โครงโมลด์เคสและชิ้นส่วนประกอบภายใน

9.1.2 กลไกการทำงาน กลไกการทำงานใช้เพื่อทำการออน (ON) และ (OFF) วงจรไฟฟ้า สลักไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นชนิดสับเร็ว (quick make) และปลดเร็ว (quick break) ความเร็ว หน้าสัมผัสที่ใช้ ON หรือ OFF นั้นไม่ขึ้นอยู่กับมือจับ เซอร์กิตเบรกเกอร์จึงทริปอัตโนมัติอย่างอิสระ (free trip) หมายถึงเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทริปได้เองกรณีที่มือยังจับคันโยกอยู่ที่ตำแหน่ง “ ON ”อยู่ก็ตาม ตัวชี้บอกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์อยู่ในตำแหน่ง “ON” หรือ “OFF” ให้โยกมือจับไปยังตำแหน่ง “ON” หรือ “OFF” แต่ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ทริป (trip) มือจับจะเลื่อนมาอยู่ตรงกลางระหว่างอักษรทั้งสอง ดังรูปที่ 9.3 ขณะที่เบรกเกอร์ “trip” แล้ว ต้องทำการปรับ (reset) กลไก โดยโยกมือจับไปที่ตำแหน่ง “OFF” หลังจากนั้นจึงผลักไปที่ตำแหน่ง “ON” หน้าสัมผัสจึงสับต่อวงจรไฟฟ้าตามปกติ

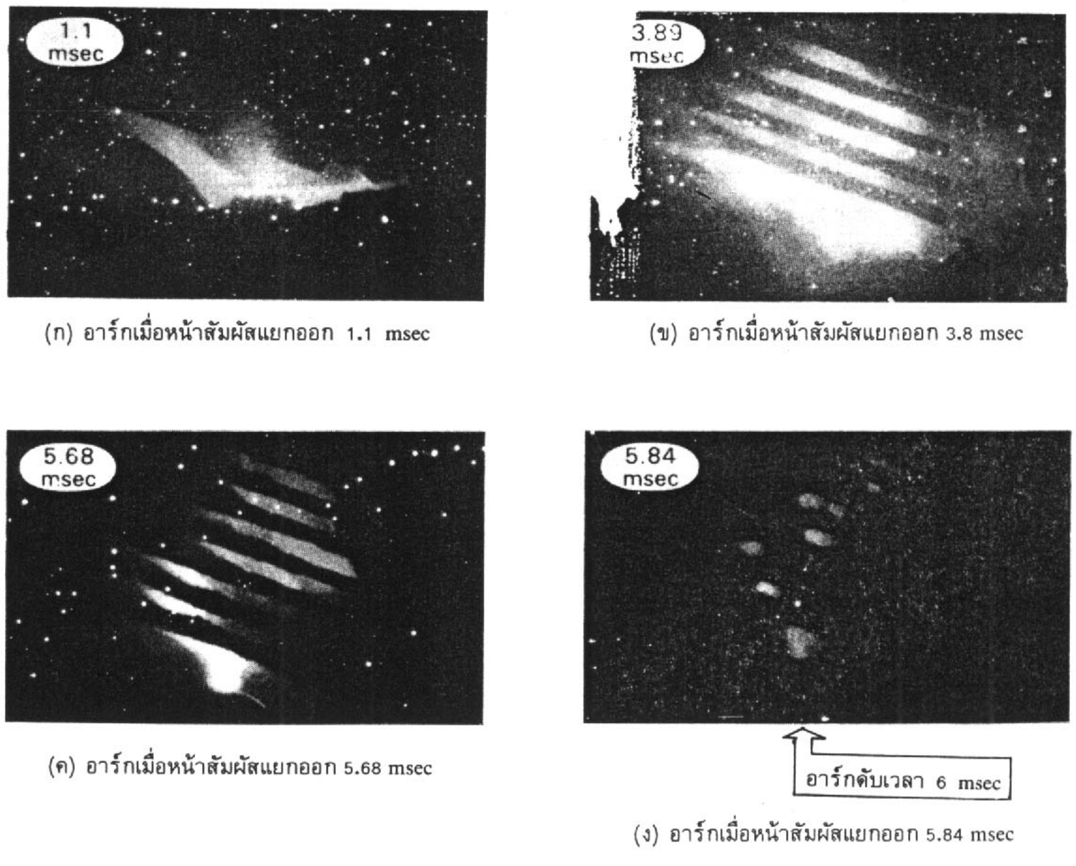


รูปที่ 9.3 เบรกเกอร์เมื่อมือจับอยู่ตำแหน่ง ON, OFF หรือ TRIP



รูปที่ 9.4 การดับอาร์กด้วยอากาศโดยใช้เครื่องช่วยดับอาร์ก

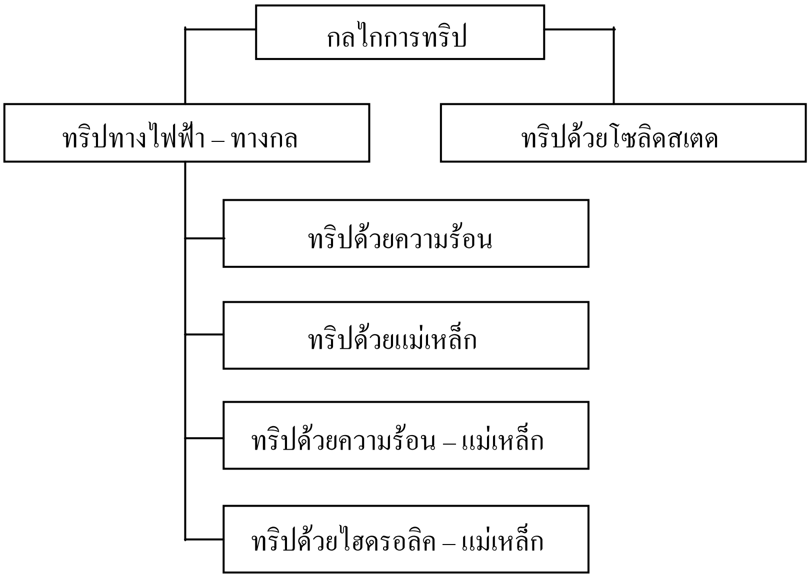
9.1.3 ตัวดับอาร์ก (arc extinguishers) ขณะเกิดกระแสลัดวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริป หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ขณะกำลังเลื่อนแยกออกจากกันจะเกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง จึงจำเป็นต้องมีตัวดับอาร์กโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง เครื่องช่วยดับอาร์กจะทำด้วยแผ่นตะแกรงเหล็กซ้อนแยกกันโดยยึดขั้นด้วยฉนวน ในขณะที่หน้าสัมผัสแยกออกจะเกิดอาร์ก อาร์กที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามแม่เหล็กบนแผ่นตะแกรงเหล็ก ทำให้อาร์กที่เกิดขึ้นถูกดึงเข้าไปในตะแกรงเหล็กอาร์กก็จะถูกแยกออกเป็นอาร์กเล็ก ๆ ภายในตะแกรงเหล็ก อาร์กก็จะดับได้เร็วขึ้นดังรูปที่ 9.4 และ 9.5แต่ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถดับอาร์กได้ การระเบิดเสียหายก็จะเกิดทันที ฉะนั้นจึงต้องเลือกความสามารถตัดกระแส หรือ ขนาดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ของเบรกเกอร์ไม่ต่ำกว่ากระแสลัดวงจรทั้งนี้เพื่อให้เบรกเกอร์มีความสามารถในการขัดจังหวะการไหล (interrupt) ของกระแสฟอลต์ โดยเปลวอาร์กดับลงก่อนที่เบรกเกอร์จะระเบิดนั่นเอง



รูปที่ 9.5 การเกิดอาร์กเมื่อหนังสัมผัสแยกออกจนกระทั่งอาร์กดับ

9.2 กลไกการทริป

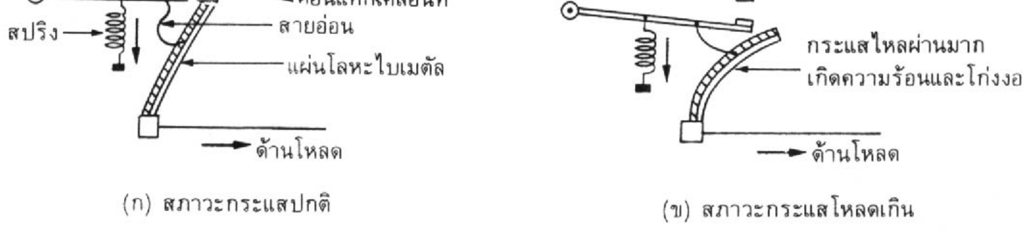
กลไกการทริป (Tripping Unit) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ทริปทางไฟฟ้า - ทางกล และทริปด้วยโซลิดสเตต ดังรูปที่ 9.6 โดยที่ชุดกลไกการทริปจะถูกสร้างและบรรจุอยู่ภายในเบรกเกอร์



รูปที่ 9.6 กลไกการทริปของโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์

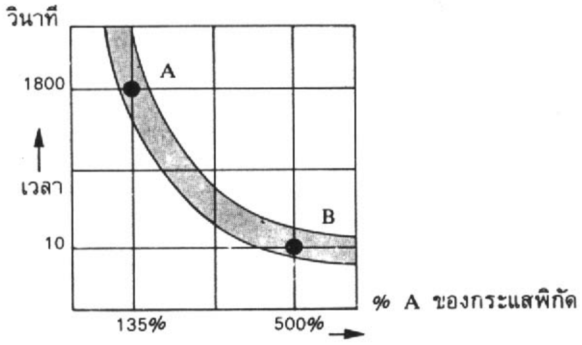
9.2.1 ทริปทางไฟฟ้า – ทางกล (electro – mechanical trip) การทริปทางไฟฟ้า – ทางกล ยังสามารถแบ่งได้อีก 4 ประเภทคือ

1. ทริปด้วยความร้อน (thermal trip) ชุดอุปกรณ์ทริปด้วยความร้อนประกอบด้วยโลหะแผ่นไบเมตัล (bimetal) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อน แผ่นโลหะไบเมตัลซึ่งทำด้วยโลหะ 2 แผ่นต่างชนิดกันที่นำมาประสานเข้าด้วยกัน เมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นโดยที่อัตราการขยายตัวของโลหะทั้งสองไม่เท่ากัน เป็นสาเหตุทำให้แผ่นไบเมตัลโก่งงอขึ้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสความร้อน (I^2R) ไหลผ่านจนกระทั่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดกระแสไฟฟ้าออกจากวงจร ดังรูปที่ 9.7



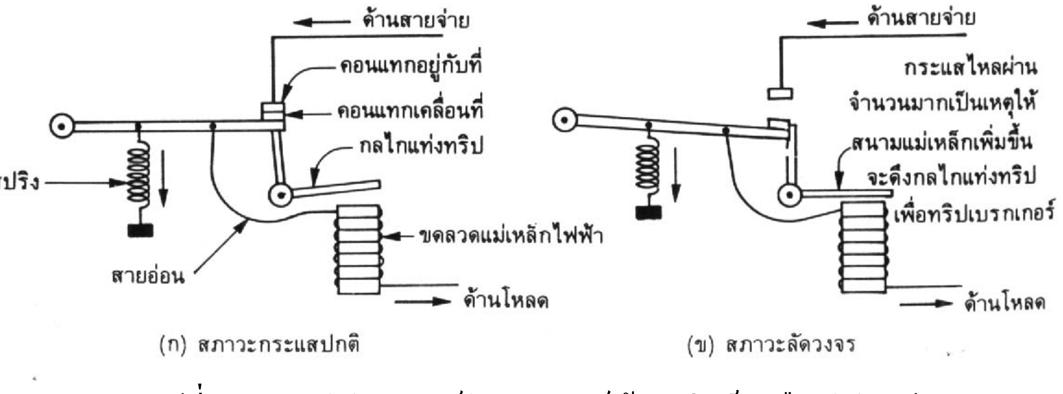
รูปที่ 9.7 การทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยความร้อน

อย่างไรก็ตามชุดทริปแผ่นไบเมตัลจะตอบสนองต่อเวลาและกระแส ซึ่งมันจะยอมหน่วงเวลา (Time Delay) ให้นานกรณีโหลดเกินเล็กน้อย ขณะเดียวกันมันจะทริปในเวลาอันสั้นในสภาวะโหลดเกินมาก ในลักษณะเช่นนี้เราเรียกว่า เวลาผกผัน *(Inverse Time Delay)* ดังนั้นชุดทริปด้วยความร้อนจึงเหมาะสำหรับป้องกันโหลดเกิน ดังรูปที่ 9.8 สำหรับการปรับตั้งชุดทริปด้วยความร้อนอาจปรับตั้งตายตัวมาจากโรงงานผู้ผลิต หรืออาจเป็นแบบที่สามารถเลือกย่านปรับตั้งได้



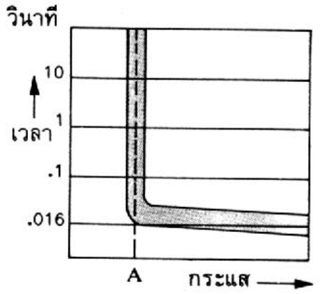
รูปที่ 9.8 เส้นโค้งเวลาและกระแสต่อการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์เวลาผกผัน เช่น ถ้ากระแสพิกัด 100 A ถ้าให้กระแสโหลดเกิน 135% ของกระแสพิกัดจะทริปในเวลา 1800 วินาที แต่ถ้าให้กระแสโหลดเกิน 500% ของกระแสพิกัดจะทริปในเวลา 10 วินาที

2. ทริปด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Trip) อุปกรณ์ชุดทริปด้วยแม่เหล็กจะใช้แม่เหล็กไฟฟ้าโดยขดลวดจะต่ออันดับกับกระแสโหลด เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรกระแสจะไหลผ่านขดลวดเพื่อสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าให้ดูดแผ่นชุดทริป ในลักษณะเช่นนี้เราเรียกว่า *ทริปด้วยแม่เหล็ก* หรือ *(Instantaneous Trip)* ดังรูปที่ 9.9 สำหรับชุดทริปด้วยแม่เหล็กอย่างเดียวจึงเหมาะสำหรับป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit Protection)

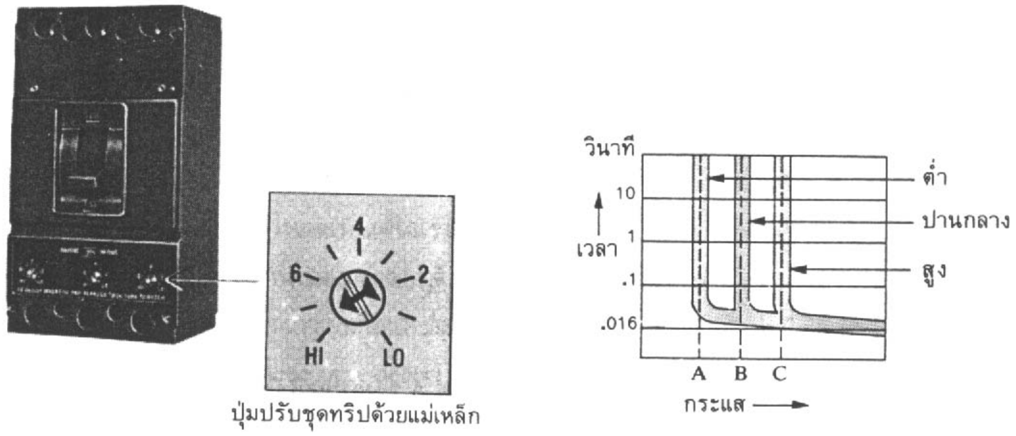


รูปที่ 9.9 การทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ด้วยแม่เหล็กหรือทริปทันที

เวลาที่ใช้ในการทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปด้วยแม่เหล็ก ตั้งแต่ลัดวงจรจนกระทั่งทริปรวมกับเวลาที่เกิดอาร์กจนกระทั่งดับ จะใช้เวลาน้อยกว่า 0.016 วินาที ดังรูปที่ 9.10 สำหรับชุดทริปด้วยแม่เหล็กนี้อาจจะสร้างทั้งชนิดปรับตั้งไม่ได้และชนิดปรับตั้งได้ ชนิดปรับตั้งได้จะมีปุ่มสำหรับปรับการทริปที่กระแสต่าง ๆ กันในแต่ละเฟส โดยสามารถปรับตั้งได้ตั้งแต่ค่ากระแสต่ำ (LO) จะกระทั่งถึงค่ากระแสสูง (HI) ดังรูปที่ 9.11 ซึ่งการปรับตั้งดังกล่าวนี้เป็นการปรับตั้งระยะห่างของขั้วแม่เหล็ก เมื่อปรับตั้งชุดทริปด้วยแม่เหล็กไปยังตำแหน่งต่ำ (LO) เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปก็ต่อเมื่อค่ากระแสลัดวงจรมาถึงหรือเกินกว่าจุด A ในขณะเดียวกันถ้าปรับตั้งปุ่มชุดทริปด้วยแม่เหล็กไปยังตำแหน่งกึ่งกลาง เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปก็ต่อเมื่อค่ากระแสลัดวงจรมาถึงหรือเกินกว่าจุด B อย่างไรก็ตามถ้าปรับตั้งปุ่มทริปด้วยแม่เหล็กไปยังตำแหน่งสูง (HI) เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปก็ต่อเมื่อค่ากระแสลัดวงจรมาถึงหรือเกินกว่าจุด C

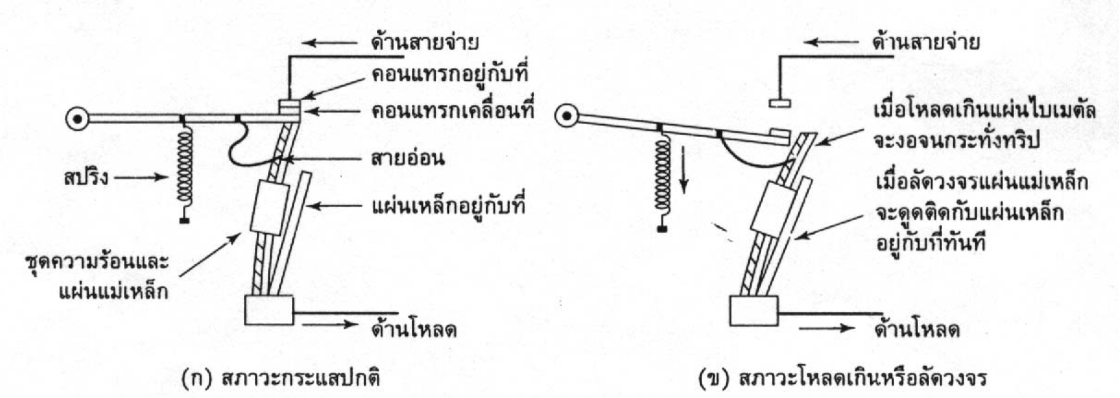


รูปที่ 9.10 แสดงทริปด้วยแม่เหล็กปรับตั้งไม่ได้ จะทริปจนกระแสมีค่าเท่ากับหรือเกินกว่าจุด A

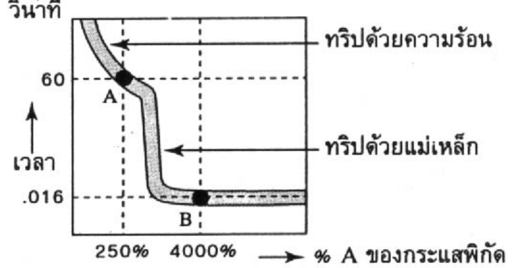


รูปที่ 9.11 ชุดทริปด้วยแม่เหล็กชนิดปรับตั้งได้ เช่น เบรกเกอร์ 100 A ถ้าปรับตั้งไว้ที่ 4 เบรกเกอร์จะทริปในเวลา 0.016 วินาที เมื่อกระแสเกินเป็น 400 A (100 x 4 A)

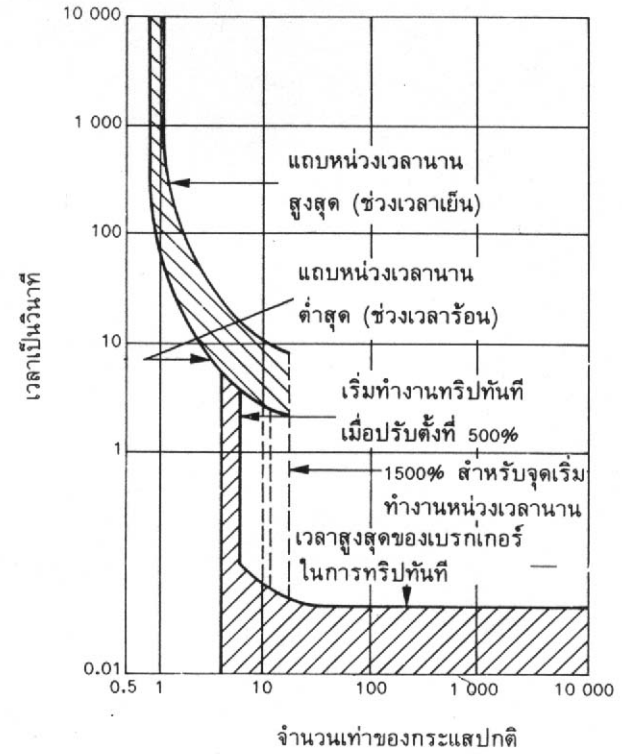
3. ทริปด้วยความร้อน – แม่เหล็ก (thermal - magnetic trip) ชุดอุปกรณ์ทริปนี้ใช้หลักการทริปด้วยความร้อนและแม่เหล็กรวมกัน จึงเหมาะสำหรับป้องกันโหลดเกินและการลัดวงจรในเวลาเดียวกัน ดังรูปที่ 9.12 สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดทริปด้วยความร้อน – แม่เหล็กนี้ ในสภาวะโหลดเกินไม่รุนแรง ชุดทริปด้วยความร้อนจะทำงาน แต่ถ้าโหลดเกินอย่างรุนแรงหรือลัดวงจร ชุดทริปด้วยแม่เหล็กจะทำงานได้ดีกว่าชุดทริปด้วยความร้อน ดังรูปที่ 9.13 จุด A และจุด B บนเส้นโค้งของการทริปด้วยความร้อน – แม่เหล็ก ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 100 A ถ้าโหลดเกิน 250 % ในเวลา 60 วินาที ชุดทริปความร้อนจากแผ่นโมเมตัลจะโก่งงอจนกระทั่งเซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปอย่างไรก็ตามถ้ากระแสเพิ่มขึ้นเป็น 4,000 เปอร์เซ็นต์ (40 เท่า) ชุดทริปแม่เหล็กไฟฟ้าจะดึงแท่งปลดให้ทริปและตัดวงจรไฟฟ้าในเวลา 0.016 วินาที รูปที่ 9.14 แสดงเส้นโค้งเวลาและกระแสของทริปด้วยความร้อน – แม่เหล็กของเซอร์กิตเบรกเกอร์ผลิตภัณฑ์หนึ่ง



รูปที่ 9.12 การทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ ทริปด้วยความร้อน – แม่เหล็ก



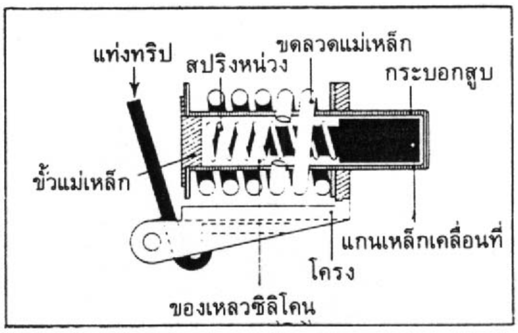
รูปที่ 9.13 เส้นโค้งเวลาและกระแสการทริปด้วยความร้อน – แม่เหล็กของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 100 A ถ้าโหลดเกิน 250 % คือ 2.5 x 100 เท่ากับ 250 A เบรกเกอร์จะทริปในเวลา 60 วินาที แต่ถ้ากระแสเพิ่มขึ้นเป็น 4000% คือ 40 x 100 เท่ากับ 4000 A เบรกเกอร์จะทริปในเวลา 0.016 วินาที



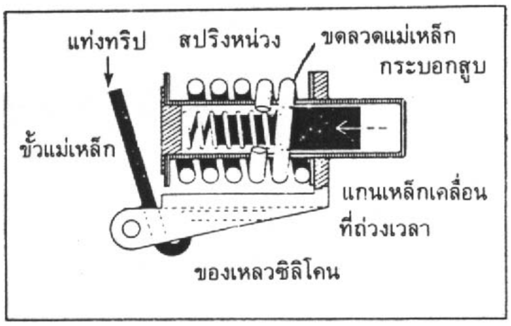
รูปที่ 9.14 เส้นโค้งเวลาและกระแสการทริปด้วยความร้อน – แม่เหล็ก หน่วงเวลานาน และทริปทันที

4. ทริปด้วยไฮดรอลิค - แม่เหล็ก (hydraulic magnetic trip) ชุดทริปด้วยไฮดรอลิคแม่เหล็กจะทำงาน เมื่อกระแสโหลดไหลผ่านขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ที่พันอยู่รอบกระบอกสูบภายในกระบอกสูบจะประกอบด้วยสปริง แกนเหล็กเคลื่อนที่ และของเหลว ในขณะที่กระแสโหลดต่ำหรือพิกัดกระแสปกติ สนามแม่เหล็กมีแรงไม่เพียงพอที่จะดึงแกนเหล็ก จึงทำให้แกนเหล็กเคลื่อนที่ยังอยู่ที่ปลายกระบอกสูบ ดังรูปที่ 9.15 สำหรับกรณีที่โหลดเกิน เส้นแรงแม่เหล็กจะมากขึ้นเพียงพอที่จะดึงแกนเหล็กเคลื่อนที่เข้าหาขดลวด เพื่อลดความต้านทานในวงจรแม่เหล็ก ย่อมเป็นการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ของเหลวซิลิโคนในกระบอกสูบจะหน่วงการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กเคลื่อนที่ ลักษณะเช่นนี้เป็นการหน่วงเวลา (time delay) หรือเวลาผกผัน (inverse time delay) ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับขนาดกระแสโหลดเกิน ดังรูปที่ 9.16 (ก) สำหรับรูปที่ 9.16 (ข) เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นถึงค่าหนึ่งแท่งทริปจะถูกดูดเข้าหาขั้วแม่เหล็ก เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะทริป สำหรับในกรณีที่โหลดเกินอย่างรุนแรงหรือลัดวงจร กระแสจะประมาณ 10 เท่าของกระแสปกติ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวด มีค่ามากเพียงพอที่จะดึงแท่งทริปเข้าหาขั้วแม่เหล็ก

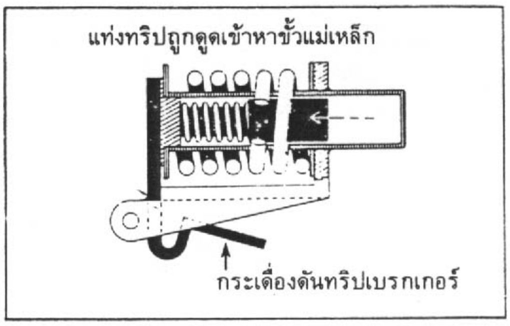
ก็จะทำการทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยไม่มีการหน่วงเวลา ซึ่งลักษณะเช่นนี้ก็คือทริปทันที (Instantaneous trip) ดังรูปที่ 9.17



รูปที่ 9.15 ส่วนประกอบและการทริปด้วยไฮดรอลิค – แม่เหล็ก จะไม่ทริปในขณะที่กระแสโหลดต่ำหรือพิกัดกระแสปกติ แกนเหล็กเคลื่อนที่ยังคงอยู่ที่ปลายกระบอกสูบ

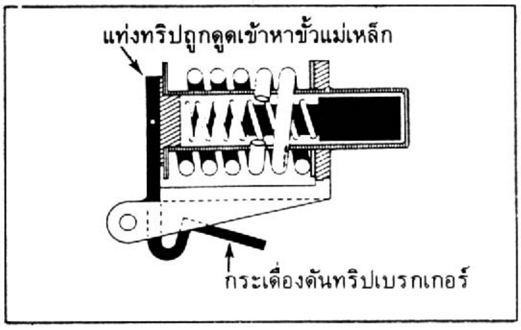


(ก) ของเหลวในกระบอกสูบ หน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กเคลื่อนที่

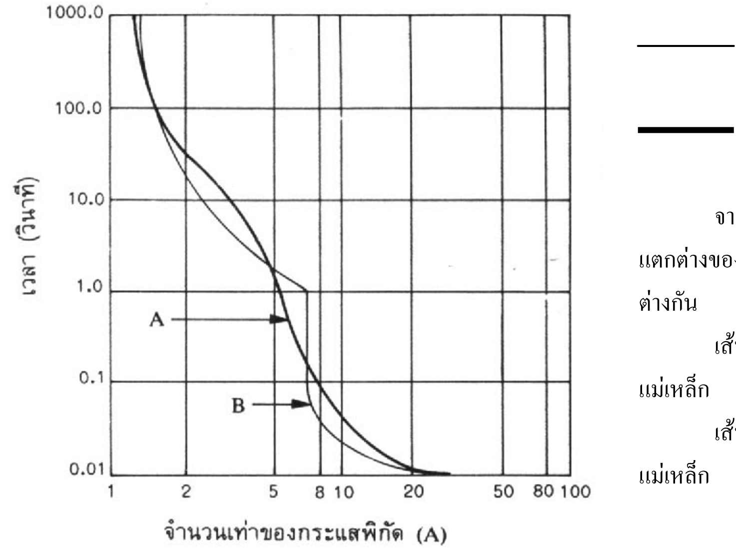


(ข) สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นแท่งทริปจะถูกดูดเข้าหาขั้วแม่เหล็กทำให้เบรกเกอร์ทริป

รูปที่ 9.16 แสดงการหน่วงเวลาหรือเวลาผกผันของการทริปด้วยไฮดรอลิค – แม่เหล็กในสภาวะโหลดเกิน



รูปที่ 9.17 การทริปทันทีของอุปกรณ์ชุดทริปไฮดรอลิค – แม่เหล็กในกรณีที่โหลดเกินอย่างรุนแรงหรือลัดวงจร



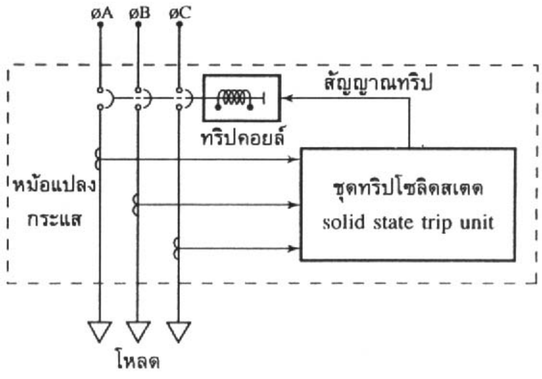
จากรูปที่ 9.18 แสดงให้เห็นความแตกต่างของเบรกเกอร์ที่มีกลไกการทริปแตกต่างกัน

เส้นโค้ง A – เป็นชนิดไฮดรอลิค – แม่เหล็ก

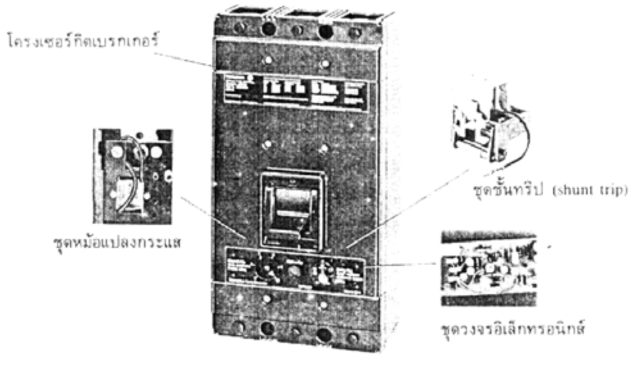
เส้นโค้ง B – เป็นชนิดความร้อน - แม่เหล็ก

รูปที่ 9.18 การเปรียบเทียบเส้นโค้งเวลาและกระแสของชุดทริปไฮดรอลิค–แม่เหล็กและชุดทริปความร้อน-แม่ เหล็ก

9.2.2 ทริปด้วยโซลิดสเตต (solid state trip) ในปัจจุบันอิเล็กทรอนิกส์ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วจนสามารถสร้างแผงวงจรให้มีขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ดี เมื่อมีการปรับตั้งค่ากระแสทริปไว้ที่ค่าใดจะให้ความแม่นยำสูง โดยเฉพาะเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดใหญ่ๆ มักจะนำอิเล็กทรอ -นิกส์ขนาดเล็กที่เรียกว่า *ไมโครโปรเซสเซอร์ (microprocessor)* มาควบคุมการทริปของเซอร์กิตเบรก-เกอร์ ทำให้สามารถปรับตั้งและตรวจจับค่าของกระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นได้โดยตรง จึงทำให้สามารถปรับตั้งเลื่อนค่าการทำงานย่านต่าง ๆ ได้มาก ทำให้มีความคล่องตัวในการใช้งานสูง สำหรับชิ้นส่วนการทริปด้วยโซลิดสเตต ดังรูปที่ 9.19 ชั้นส่วนการทริปประกอบด้วยหม้อแปลงกระแสแต่ละเฟส เพื่อลดขนาดกระแสลงป้อนเข้าไปยังชุดทริปโซลิดสเตต โดยใช้ค่ากระแสที่วัดได้ และเปรียบเทียบกับค่ากระแสที่กำหนด เมื่อสูงถึงค่ากระแสที่กำหนด ชุดทริปโซลิดสเตตก็จะส่งสัญญาณไปทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์

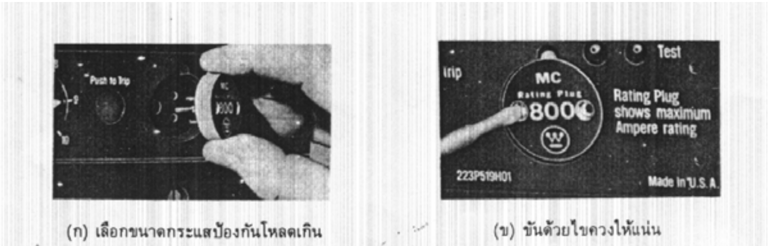


รูปที่ 9.19 (ก) บล๊อกไดอะแกรมของเบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิดสเตต



รูปที่ 9.19 (ข) ชิ้นส่วนการทริปเบรกเกอร์ด้วยโซลิดสเตต

1. การป้องกันโหลดเกิน (เวลาผกผัน) การป้องกันโหลดเกินของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิดสเตต ทุกยี่ห้อคล้ายกันจะแตกต่างกันที่การปรับตั้งและปุ่มปรับตั้งเท่านั้น เช่น ถ้าเลือกขนาดพิกัดกระแสต่อเนื่อง 800 A แบบปลั๊กเสียบที่ต้องการแทนตัวเดิม แล้วขันสกรูยึดให้แน่น ดังรูปที่ 9.20 สำหรับการเปลี่ยนขนาดพิกัดกระแสต่อเนื่องแบบปลั๊กเสียบเข้ามีขนาดให้เลือกใช้ดังตารางที่ 9.1 ในทำนองเดียวกัน ปลั๊กแบบเสียบเข้านี้มีทั้งแบบที่สามารถปรับอัตรากระแสต่อเนื่องได้ด้วย และสามารถปรับตั้งได้ตั้งแต่ 70-100% ของพิกัดกระแสต่อเนื่องขนาดปลั๊กเสียบนั้น ๆ ดังรูปที่ 9.12 ถ้าเลือกใช้ขนาดกระแสปลั๊กเสียบ 600 A ถ้าปรับตั้งที่ 70% เบรกเกอร์จะทริปเมื่อกระแสโหลดต่อเนื่องเกินกว่า 600x0.7 เท่ากับ 420 A ถ้าปรับตั้งที่ 85% เบรกเกอร์จะทริปเมื่อกระแสโหลดต่อเนื่องเกินกว่า 600x0.85 เท่ากับ 510 A ในทำนองเดียวกันถ้าปรับตั้งที่ 100% เบรกเกอร์จะทริปเมื่อกระแสโหลดต่อเนื่องเกินกว่า 600 A ดังรูปที่ 9.22

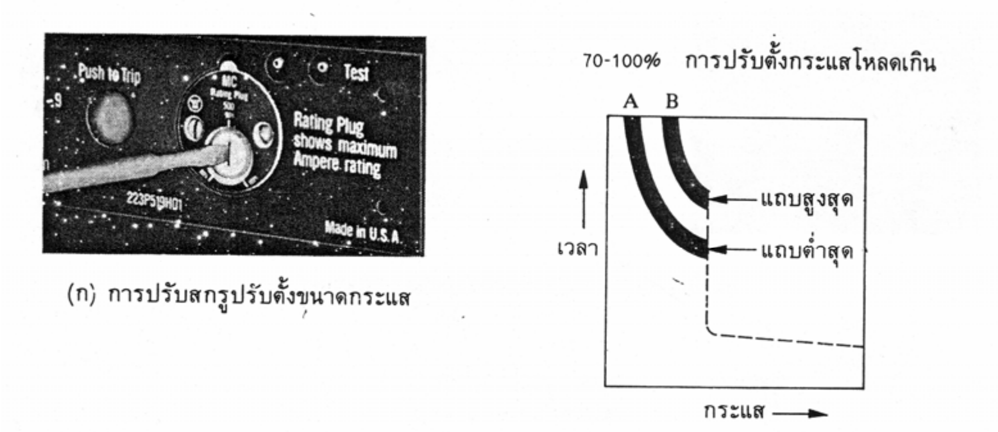


(ก) เลือกขนาดกระแสป้องกันโหลดเกินให้ทริปที่ 800 A แทนตัวเดิม (ข) ขันด้วยไขควงให้แน่น

รูปที่ 9.20 ขนาดพิกัดกระแสต่อเนื่องแบบปลั๊กเสียบขนาด 800A ที่ต้องการเสียบเข้าแทนตัวเดิมและขันสกรูยึดให้แน่น

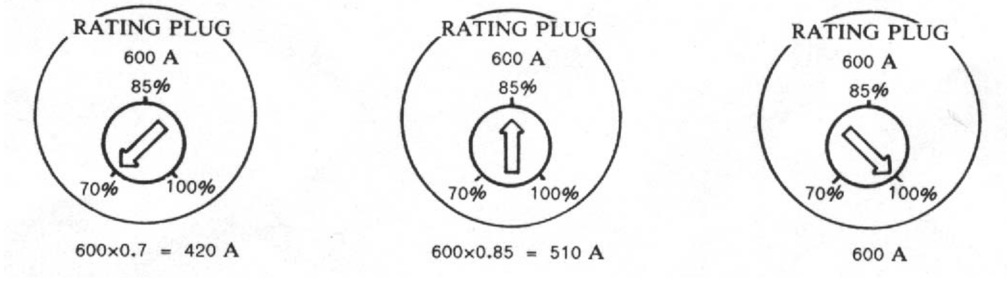
ตารางที่ 9.1 ขนาดพิกัดกระแสต่อเนื่องแบบปลั๊กเสียบเข้า

พิกัดกระแสเฟรม (AF)	พิกัดกระแสปลั๊กเสียบ (A)
800	400, 500, 600, 700, 800
1200	600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200
2000	800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000
2500	1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2500
3000	1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2500, 3000



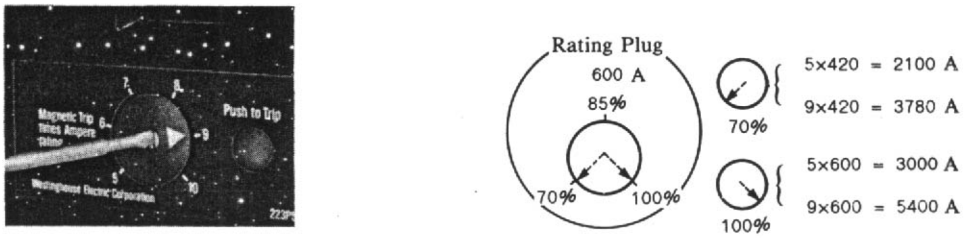
(ก) การปรับสกรูปรับตั้งขนาดกระแส (ข) การปรับตั้งย่านการป้องกันโหลดเกิน

รูปที่ 9.21 การปรับตั้งพิกัดกระแสต่อเนื่อง 70-100% ของขนาดกระแสปลั๊กเสียบ

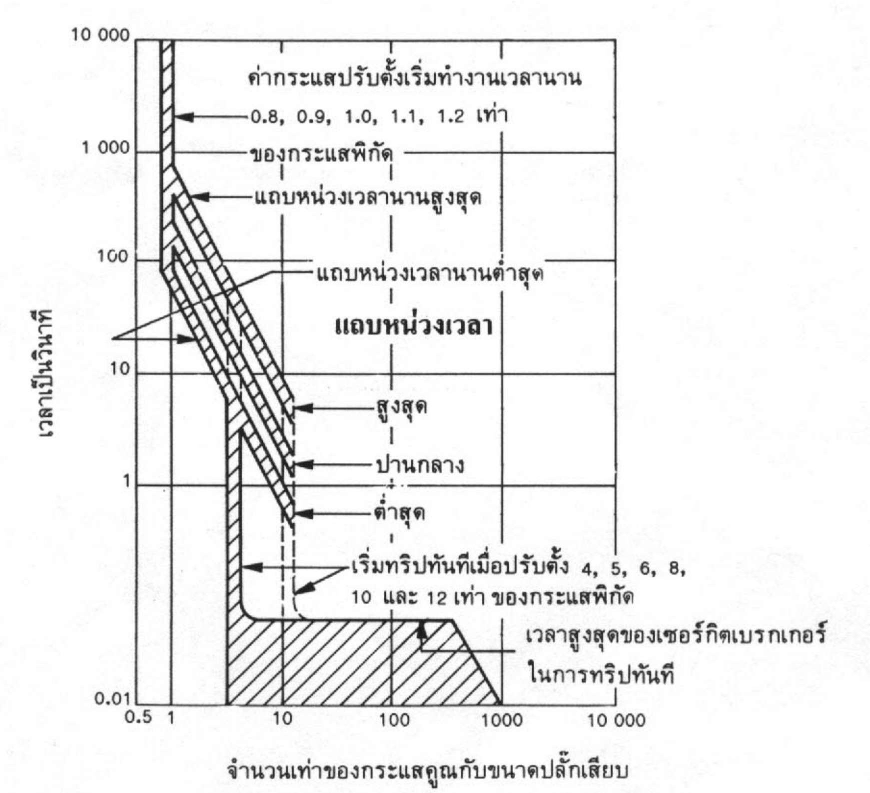


รูปที่ 9.22 การปรับตั้งการป้องกันโหลดเกิน 70-100% ของพิกัดกระแสต่อเนื่องขนาดปลั๊กเสียบ

2. การป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit Protection) การป้องกันการลัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิตสเตต ปุ่มปรับตั้งชุดทริปทันที ทั้ง 3 เฟส จะมีเพียงปุ่มเดียวโดยใช้ไขควงปรับตั้งนำตัวเลขหน้าปุ่มปรับตั้งคูณตัวพิกัดกระแสต่อเนื่องขนาดปลั๊กก็คือ พิกัดกระแสที่เบรกเกอร์จะทริป เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือกระแสโหลดเกินมาก ๆ เช่น ถ้าเลือกเบรกเกอร์พิกัดกระแสเฟรม 800 A และเลือกพิกัดกระแสต่อเนื่องของปลั๊กเสียบขนาด 600 A ถ้าปรับตั้งที่ 70 % และปรับตั้งปุ่มชุดทริปทันที (ป้องกันการลัดวงจร) ไว้ที่เลข 9 เบรกเกอร์จะทริปเมื่อเกิดลัดวงจรที่กระแสเกินกว่า 9x420 A เท่ากับ 3780 A ในทำนองเดียวกันถ้าปรับตั้งพิกัดกระแส 100% ของขนาดพิกัดเสียบปลั๊ก เบรกเกอร์จะทริปเมื่อเกิดลัดวงจรที่กระแสเกินกว่า 9%600 เท่ากับ 5400 A ดังรูปที่ 9.23 ส่วนรูปที่ 9.24 แสดงเส้นโค้งเวลาและกระแสสามารถปรับค่ากระแสปรับตั้งเริ่มทำงานเวลานาน 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 และ 1.2 เท่าของกระแสพิกัดการปรับตั้งแถบหน่วงเวลานานสุงสุด และแถบเวลานานต่ำสุดนั้นทำงานได้เชิงเส้น(Linear) กว่าทริปด้วยความร้อน ส่วนการป้องกันการลัดวงจรจะปรับตั้งชุดเริ่มทริปทันที เมื่อปรับตั้ง4, 5, 6, 8, 10 และ 12 เท่าของกระแสพิกัด จะใช้เวลาสุงสุดในการทริป 0.016 วินาที



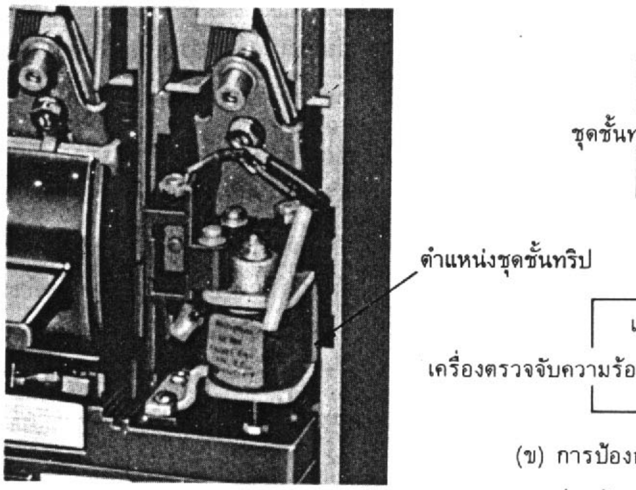
รูปที่ 9.23 การปรับตั้งการป้องกันการลัดวงจร



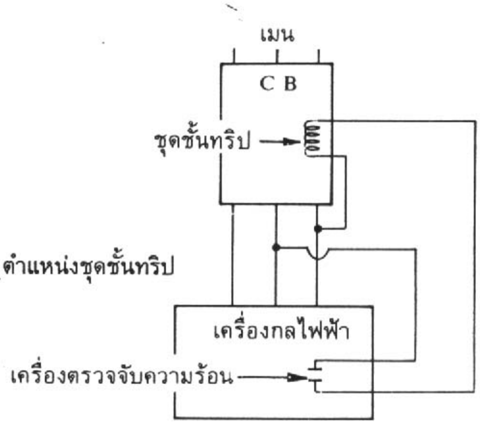
รูปที่ 9.24 เส้นโค้งกระแส – เวลาของเบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิดสเตต

9.2.3 อุปกรณ์ประกอบ เบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ที่ได้ปรียบกว่าฟิวส์ คือสามารถนำไปใช้งานได้อีกภายหลังจากเบรกเกอร์ทริป นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบที่จะช่วยให้การทำงานของเบรกเกอร์สามารถทำงานได้กว้างขวางมากขึ้น ได้แก่ ชุดทริปแรงดันต่ำเกิน สวิตช์เตือนภัย อุปกรณ์ประสานกลไก สวิตช์ช่วย ชุดการทำงานด้วยมอเตอร์และตัวล๊อคมือจับ

1. ชุดชั้นทริป (shunt trip) เป็นอุปกรณ์ช่วยทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ด้วยไฟฟ้าเมื่ออยู่ห่างไกลจากตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ ชุดชั้นทริปนี้เป็นขดลวดแม่เหล็กติดอยู่ภายในเบรกเกอร์ ดังนั้นจึงต้องมีไฟฟ้าจ่ายให้กับขดลวดชุดชั้นทริป อาจเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำ ๆ จนกระทั่งสูงถึง 250 VDC หรือเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต่ำ ๆ จนถึง 600 VAC ดังรูปที่ 9.25 เมื่อขดลวดชั้นได้รับพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์ควบคุมปุ่มกดระยะไกล กระเดื่องก็จะไปดันแผ่นแท่งทริปเพื่อทริปเบรกเกอร์ เมื่อเบรกเกอร์ทริปแล้วจะให้ ON ใหม่ ต้องใช้มือดันที่มือจับเบรกเกอร์จึงจะ ON ใหม่ได้ สำหรับ ตัวอย่างของการใช้ชั้นทริปเพื่อป้องกันการลัดวงจรลงดินนั้นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน (ground fault protection) หรือ GFP ต่ออยู่กับชั้นทริป เมื่อเกิดลัดวงจรรั่วลงดิน จะมีกระแสไหลในตัวตรวจจับ (monitor) ผ่านไปยังอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน GFP ไปยังชั้นทริปเพื่อทริปเบรกเกอร์ ดังรูปที่ 9.26

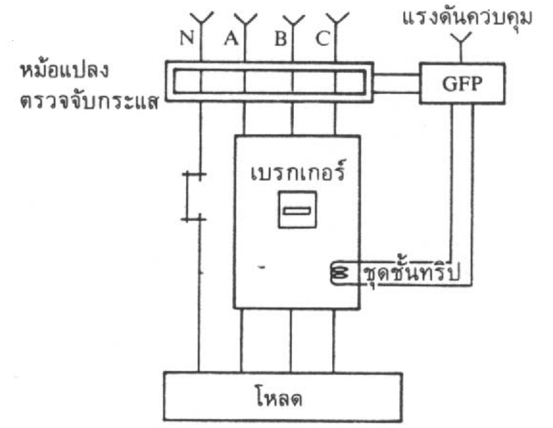


(ก) ตำแหน่งชุดชั้นทริป



(ข) การป้องกันเครื่องกลไฟฟ้าเพื่อทริปเบรกเกอร์ ร่วมกับเครื่องตรวจจับความร้อน

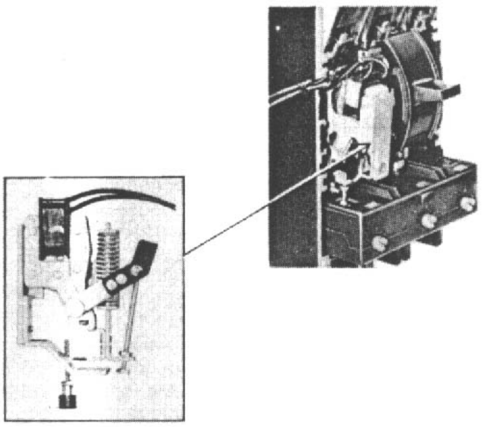
รูปที่ 9.25 ชุดชั้นทริปและการทำงาน



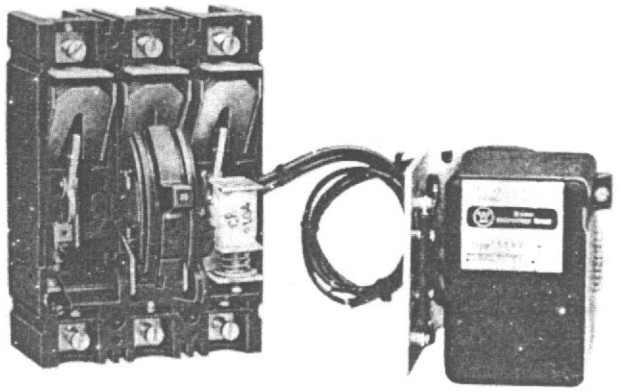
รูปที่ 9.26 ระบบการป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินด้วยชั้นทริป

2. ชุดทริปแรงดันต่ำเกิน (Under Voltage Trip) ชิ้นส่วนชุดทริปนี้จะติดตั้งอยู่ภายในเบรกเกอร์จะทริปเมื่อแหล่งจ่ายไฟตกต่ำลงกว่าระดับที่ต้องการ ส่วนชุดทริปนี้จะมี 2 แบบคือ แบบทางไฟฟ้า-ทางกล ดังรูปที่ 9.27 และแบบโซลิดเตตดังรูปที่ 9.28 สำหรับชุดทริปแรงดันต่ำเกินแบบทางไฟฟ้า-ทางกล จะอาศัยสปริงและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าภายในเบรกเกอร์ ถ้าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 40-60% ของแรงดันปกติ ขดลวดแม่เหล็กจะไปง้างสปริงให้ไปทริปเบรกเกอร์ และจะไม่

สามารถสับเบรกเกอร์ให้อยู่ในตำแหน่ง ON ใหม่ได้ จนกว่าแรงดันจะสูงกว่า 80% ของแรงดันปกติ ส่วนชุดทริปแรงดันต่ำเกินแบบโซลิดสเตตประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าแบบใช้พลังงานต่ำติดตั้งอยู่ภายในเบรกเกอร์ โดยมีชุดโซลิดสเตตอยู่ภายนอกทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่มีความแม่นยำมาก ถ้าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 53% ของแรงดันปกติ ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าไปทริปเบรกเกอร์ และเบรกเกอร์จะ ON ใหม่เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 75 + 5% ข้อได้เปรียบของชุดทริปแรงดันต่ำเกินแบบโซลิดสเตต คือทำงานได้ปลอดภัย แน่นอน และไม่เปลืองพลังงานในการทริปเบรกเกอร์



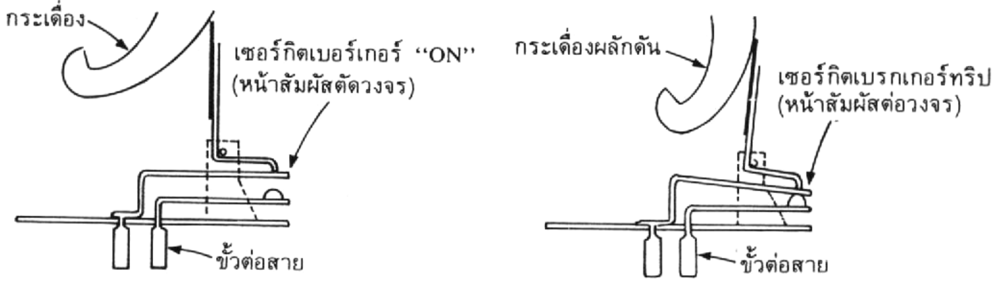
รูปที่ 9.27 ชุดทริปแรงดันต่ำเกินแบบทางไฟฟ้า-ทางกล



รูปที่ 9.28 ชุดทริปแรงดันต่ำเกินแบบโซลิดสเตต

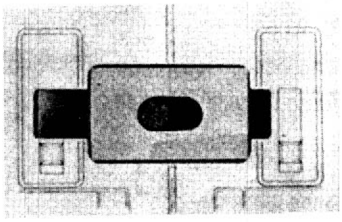
3. สวิตช์เตือนภัย (Alarm Switch) สวิตช์ช่วยเตือนภัยนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อเบรกเกอร์มีการ ทริปเบรกเกอร์เองโดยอัตโนมัติเท่านั้น และจะไม่ทำงานเมื่อเบรกเกอร์ถูกทำให้ “OFF” เอง เมื่อเบรกเกอร์ทริปโดยอัตโนมัติเนื่องจากสภาวะโหลดเกิน ลัดวงจร หรือถูกสั่งให้ทริปด้วยชุดชั้นทริป

หน้าสัมผัสของสวิตช์เตือนภัยปกติเปิดวงจรไฟฟ้าอยู่ ก็จะทำให้หน้าสัมผัสถูกปิดวงจร ทำให้ส่งสัญญาณไปยังหลอดไฟสีแดงหรือกระดิ่งเตือนภัยดังรูปที่ 9.29

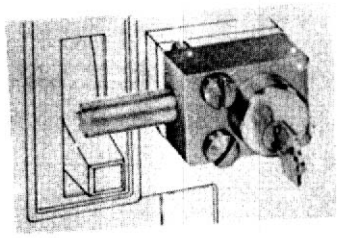


รูปที่ 9.29 สวิตท์เตือนภัย

4. อุปกรณ์ประสานด้วยกลไก (Mechanical Interlock) ลักษณะอุปกรณ์ประสานด้วยกลไกจะทำหน้าที่เป็นตัวล็อคประสานกันระหว่างเซอร์กิตเบรกเกอร์สองตัว เพื่อว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวหนึ่ง "ON" อยู่ อีกตัวหนึ่งต้อง " OFF " เท่านั้น ดังรูปที่ 9.30



(ก) แบบแท่งโลหะเลื่อน จะติดตั้งอยู่ระหว่างเบรกเกอร์ทั้งสอง เมื่อแท่งโลหะเลื่อนมาอยู่ที่เบรกเกอร์ข้างหนึ่ง คันโยกเบรกเกอร์จะอยู่ที่ตำแหน่ง "OFF" ส่วนเบรกเกอร์อีกด้านหนึ่งสามารถ "ON" ได้

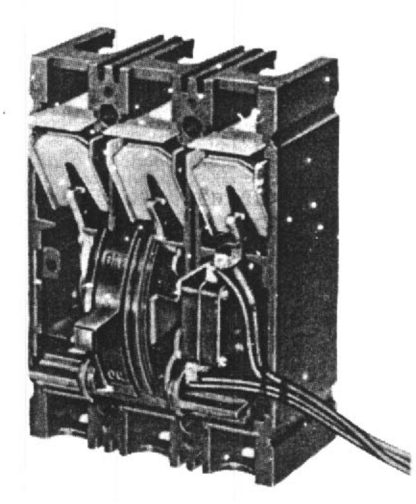


(ข) แบบใช้กุญแจล็อค แบบนี้จะล็อคให้เบรกเกอร์อยู่ในตำแหน่ง "OFF" เท่านั้น เพื่อป้องกันมิให้ผู้อื่นมาทำการ "ON" ขณะซ่อมแซมบำรุงรักษา

รูปที่ 9.30 อุปกรณ์ประสานตัวด้วยกลไกล (Mechanical Interlock)

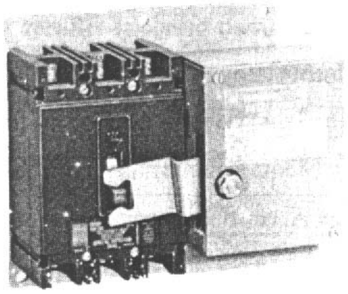
5. สวิตช์ช่วย สวิตช่วยนี้มีให้เลือกทั้งหน้าสัมผัสปกติเปิด (normally open) และหน้าสัมผัสปกติปิด (normally close) หน้าสัมผัสนี้จะติดตั้งอยู่ในเบรกเกอร์ ถ้าเลือกหน้าสัมผัสทั้งสองชนิด เช่น หน้าสัมผัส A เป็นปกติเปิดเมื่อเบรกเกอร์ " OFF " หรือทริป และหน้าสัมผัส B เป็นปกติปิดขณะที่เบรกเกอร์ "OFF" หรือทริป ดังรูปที่ 9.31 ประโยชน์ในการใช้งานเช่นสามารถต่อเข้ากับไพล็อคแลมป์ เพื่อชี้แสดงให้เห็นว่าหลอดไฟสีแดงสว่าง แสดงว่าตอนนี้เบรกเกอร์ยังคง

“ON“ อยู่แต่ถ้าหลอดไฟแสงสีเขียวสว่างแสดงว่าเบรกเกอร์ตอนนี้ “OFF” อยู่ หรือสามารถนำไปควบคุมการทำงานของระบบควบคุมส่วนอื่น ๆ

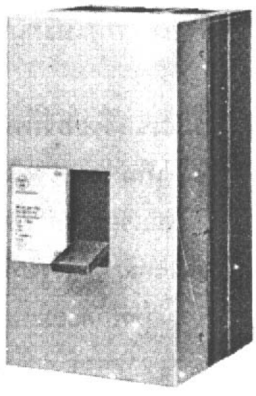


รูปที่ 9.31 สวิตช์ช่วย (Auxiliary Switch)

6. ชุดการทำงานด้วยมอเตอร์ (Motor Operator) เป็นการใช้มอเตอร์เป็นตัวขับด้ามจับของเบรกเกอร์ให้ “ON” หรือ “OFF” จากระยะไกลโดยใช้ปุ่มกด ดังรูปที่ 9.32



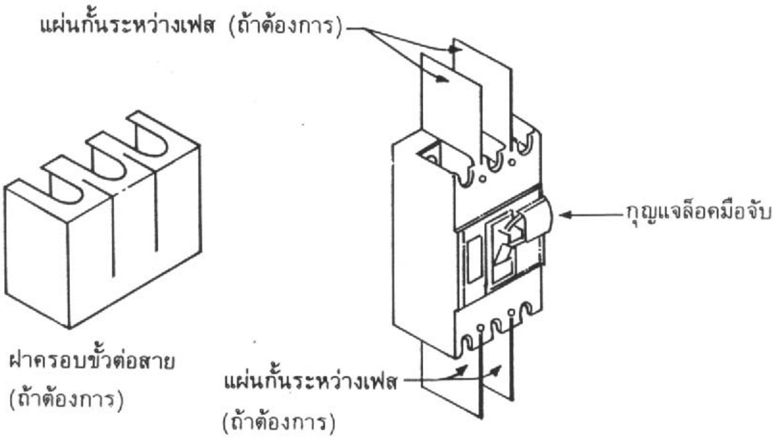
(ก) มอเตอร์ติดด้านข้าง



(ข) มอเตอร์ติดด้านหน้า

รูปที่ 9.32 ชุดการทำงานด้วยมอเตอร์

7. ตัวเลือกมือจับ (Handle Lock) มีไว้เพื่อป้องกันการสับเบรกเกอร์โดยอุบัติเหตุ ตัวล็อคมือจับนี้จะไม่มีผลต่อการทริปของเบรกเกอร์ แต่ถ้าต้องการจะสับเบรกเกอร์ต้องไขกุญแจปลดล๊อคเสียก่อน ดังรูปที่ 9.33

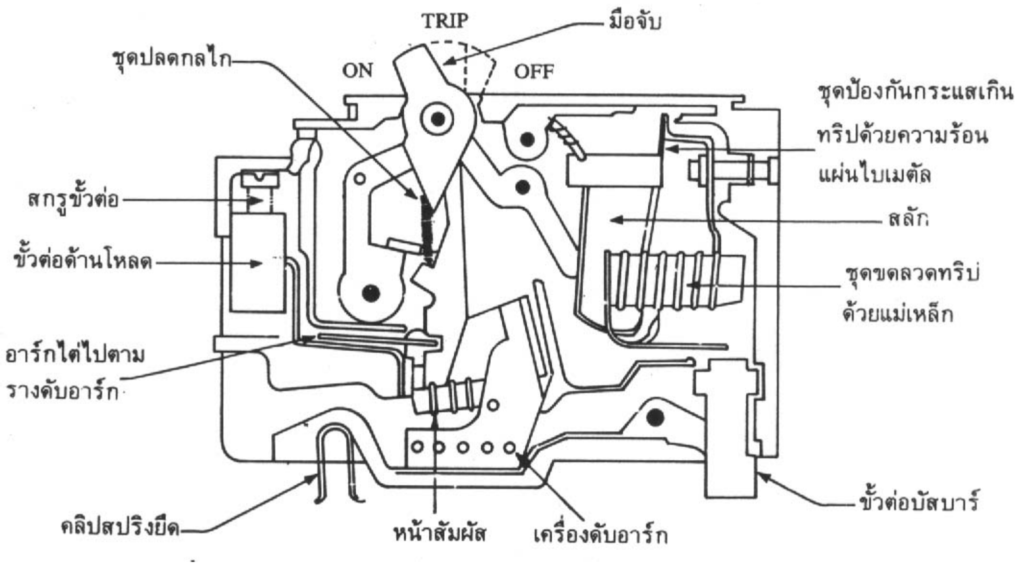


รูปที่ 9.33 การล็อคมือจับของเบรกเกอร์

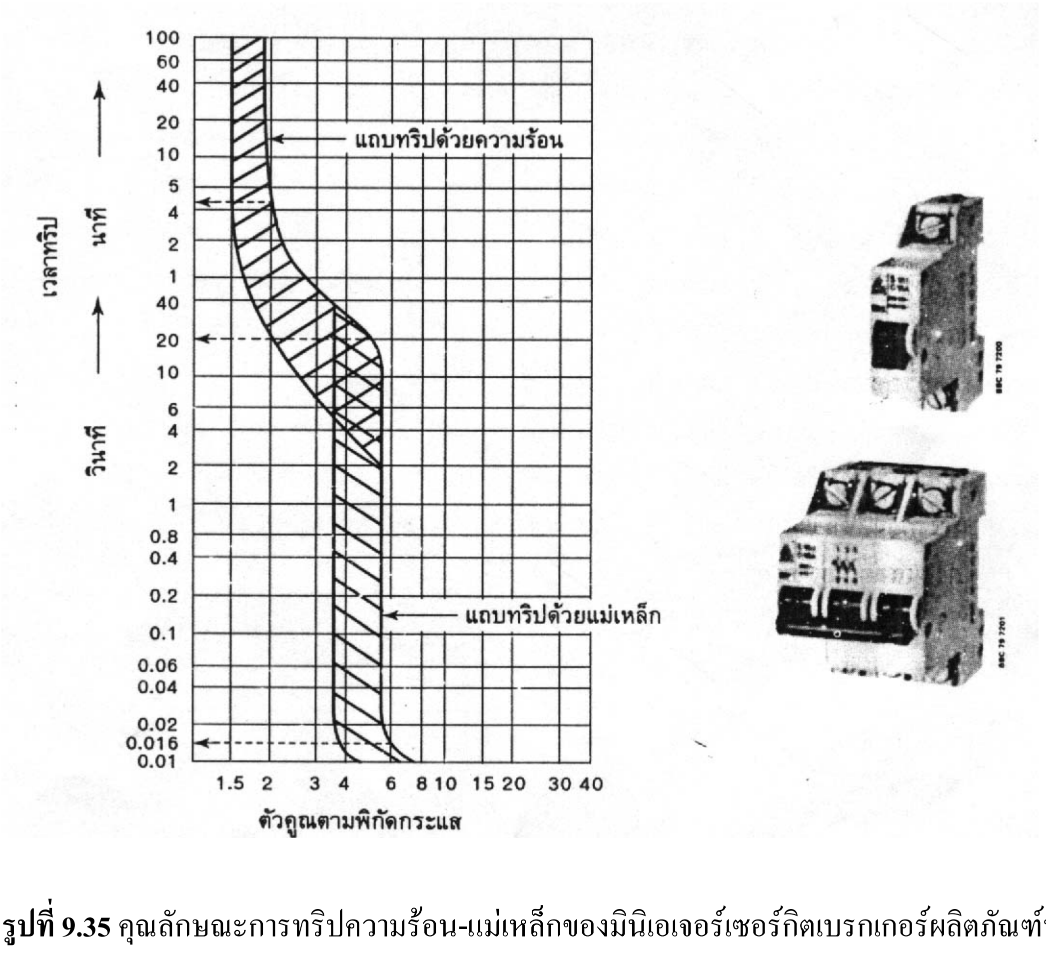
9.3 ประเภทเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงต่ำตามลักษณะกระแสใช้งาน

ประเภทเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามลักษณะกระแสใช้งานแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือมินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ โมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแส ขณะอินเตอร์รัพต์สูง เซอร์กิตเบรกเกอร์จำกัดกระแส และมอเตอร์เซอร์กิต เบรกเกอร์

9.3.1 มินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (miniature circuit breaker) เป็นเบรกเกอร์ขนาดเล็กที่มีพิกัดกระแสทริปไม่เกิน 100 A ใช้งานสำหรับวงจรย่อยทั่วไปคือแสงสว่างและเต้ารับเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยปกติมินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น จะมีกลไกลการทริปประเภททริปด้วยความร้อนหรือทริปด้วยความร้อน-แม่เหล็ก ดังรูปที่ 9.34 และแสดงเส้นโค้งคุณลักษณะการทริปดังรูปที่ 9.35 โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์มีขนาดพิกัดแอมแปร์ทริป 16, 20 และ 25A เช่นถ้าเลือกขนาดพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์ 20A เมื่อโหลดเกินเป็น 2 เท่าของขนาดพิกัดเบรกเกอร์คือ 2x20 A = 40A เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปในเวลาต่ำสุด 20 วินาทีหรือนานที่สุด 4.2 นาที แต่ถ้าโหลดเกินหรือลัดวงจรเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นเป็น 3.8 ถึง 6 เท่าของขนาดพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะทริปในเวลา 0.016 วินาที ส่วนตารางที่ 9.2 แสดงขนาดพิกัดของมินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับโหลดเซ็นเตอร์



รูปที่ 9.34 รูปตัดของมินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปด้วยความร้อน-แม่เหล็ก



รูปที่ 9.35 คุณลักษณะการทริปความร้อน-แม่เหล็กของมินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ผลิตภัณฑ์หนึ่ง

ตารางที่ 9.2 ขนาดพิกัดของมินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ สำหรับโหลดเซนต์เตอร์

พิกัดกระแสเฟรม (AF) ตามมาตรฐาน		พิกัดกระแสทริป (AT) ที่ 40°C	กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (IC) เป็น kA (สมมาตร)	
ANSI	DIN, IEC		220/240 V	380/415 V
100	45	10, 15, 16, 20, 25, 32, 45	5, 6	3, 5, 6
	100	10, 15, 16, 20, 25, 32, 40 45, 50, 63, 70, 80, 100	5, 6, 8, 10 (22, 50, 70, 100)	3, 5, 6, 8, 10 (22, 35, 50)

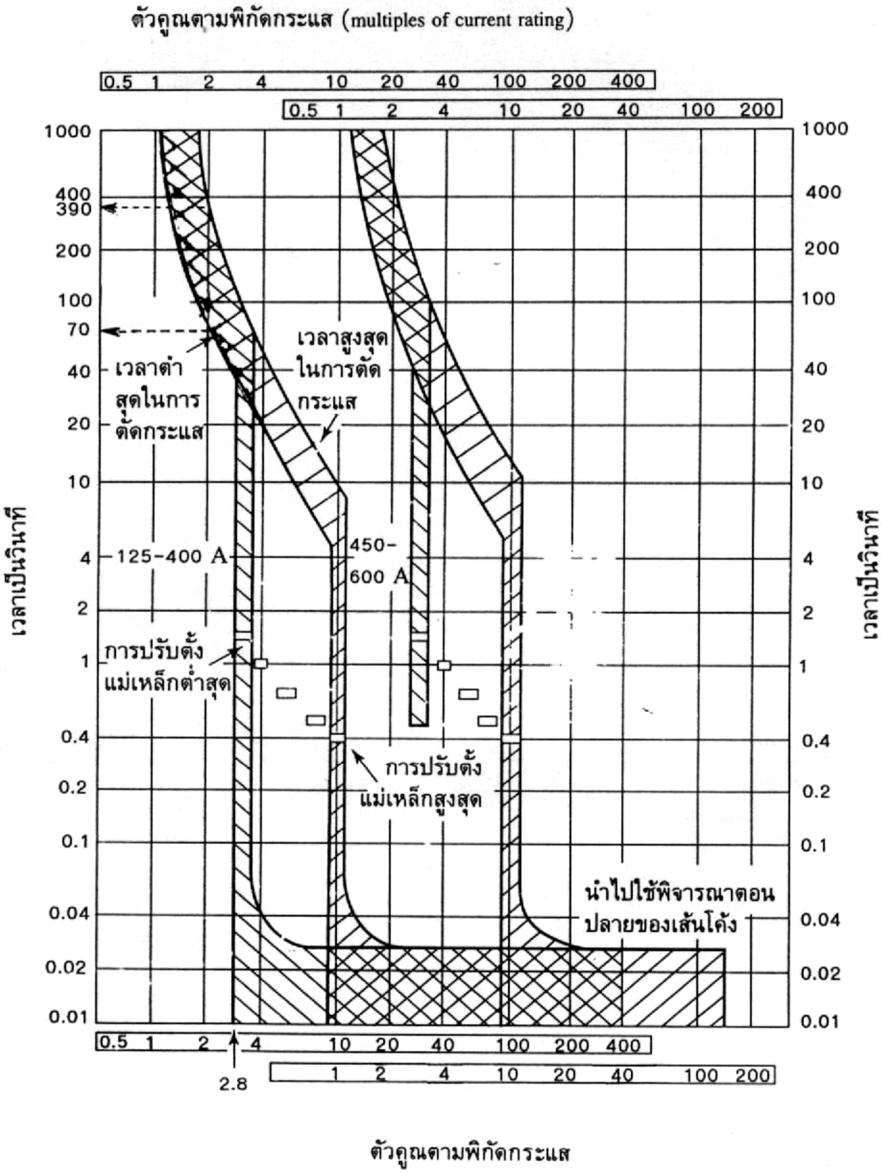
ตัวเลขใน ( ) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสขณะอินเตอร์รัพต์สูง

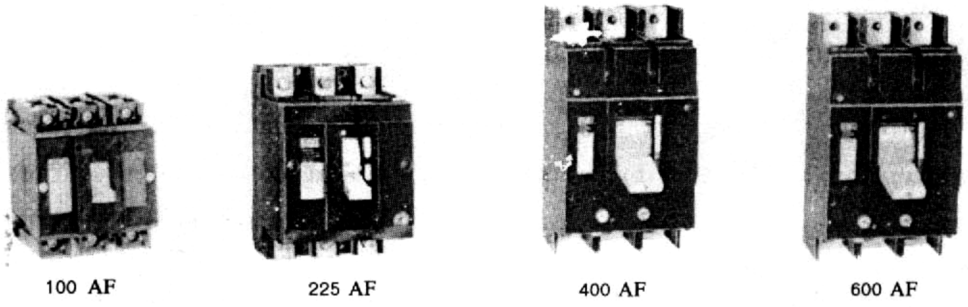
9.3.2 โมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยปกติจะเรียกเซอร์กิตเบรกเกอร์เฉย ๆ มีพิกัดตั้งแต่ 15 A ถึง 1250 A ดังตารางที่ 9.3 แสดงขนาดพิกัดของโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ ส่วนเส้นโค้งรูปที่ 9.36 แสดงโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดกระแสเฟรม 600 A ขนาดกระแสทริปย่านปรับตั้ง 125 – 600A เบรกเกอร์จะใช้เวลาต่ำสุดในการตัดกระแส 70 วินาที และใช้เวลาสูงสุดในการตัดกระแส 390 วินาที ถ้าปรับตั้งชุดทริปด้วยแม่เหล็กไว้ต่ำสุด ในสภาวะลัดวงจรเมื่อกระแสลัดวงจร 2.8 เท่าของพิกัดกระแส คือ 2.8 x 400 A เท่ากับ 1120 A เบรกเกอร์จะใช้เวลาต่ำสุดในการตัดกระแส 0.01 วินาที ถ้าปรับตั้งชุดทริปด้วยแม่เหล็กไว้สูงสุด ในสภาวะลัดวงจรเมื่อกระแสลัดวงจรเป็น 10 เท่าของพิกัดกระแส คือ 10 x 400 A เท่ากับ 4000 A เบรกเกอร์จะใช้เวลาต่ำสุดในการตัดกระแส 0.01 วินาทีเช่นกัน โดยปกติมินิเอเจอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์และโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถรับกระแสได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ของกระแสต่อเนื่องที่อุณหภูมิแวดล้อม 40 C (บางผลิตภัณฑ์ 20C)แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 40 C ความสามารถในการรับกระแสต่อเนื่องจะลดลง ดังตารางที่ 9.4

ตารางที่ 9.3 ขนาดพิกัดของโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์

พิกัดกระแสเฟรม (AF)	พิกัดกระแสทริป (AT) ที่ 40 C			กระแสขณะอินเตอร์รัพต์เป็น kA (สมมาตร)	
	ชนิดปรับตั้งชุดทริปไม่ได้ (A)	ชนิดปรับตั้งชุดทริปได้ (A)			
		ปรับตั้งชุดทริปความร้อน	ปรับตั้งชุดทริปแม่เหล็ก	220/240 V	380/415 V
100	15,20,30,40,50,60,80,100	-	-	10,22,30	7.5,10,14
125		11-125 A	-		22(50)
150	125,150	-	-	15,85	22
160		16-160 A	-		25,(43,50)
200		125-200 A	-		30
225	125,150,175,200,225	125-225 A	600-2250 A	15,18	10
250	150,175,200,225,250	160-250 A	800-2500 A		35,(50)
400	250,300,350,400	125-400 A	1250-4000 A	30	22,35,(50)
600	500,600	125-600 A	1250-6000 A	30	22
630		300-630 A	2000-6300 A		35,45,(50)
800	500,600,700,800	320-800 A	800-8000 A		50,65,(70)
1000	700,800,1000	400-1000 A	1000-10000 A		50,(70)
1200	800,1000,1200	500-1200 A	1200-12000 A		35,65,(70)
1250		500-1250 A	1250-12500 A		50,65,(70)

ตัวเลขใน ( ) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสขณะอินเตอร์รัพต์สูง





รูปที่ 9.36 เส้นโค้งเวลา กระแสของโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดกระแสเฟรม 600A

ตารางที่ 9.4 ความสามารถการรับกระแสต่อเนื่องตามอุณหภูมิแวดล้อมของมินิเอเจอร์และโมลด์เคสเซอร์กิตเบรกเกอร์

พิกัดกระแสทริป AT	กระแสทริป (A) ตามอุณหภูมิแวดล้อม			พิกัดกระแสทริป AT	กระแสทริป (A) ตามอุณหภูมิแวดล้อม		
	40°C	50°C	60°C		40°C	50°C	60°C
10	10	9	8.1	125	125	117	109
15	15	13.8	12.5	150	150	140	130
16	16	15	14	175	175	163	152
20	20	18.4	16.8	200	200	190	180
25	25	23.1	21	225	225	214	202
32	32	29.2	26.5	250	250	233	215
40	40	37.5	35	350	350	325	300
45	45	41.6	37.7	400	400	375	340
50	50	46	41.8	500	500	470	435
60	60	56	52	600	600	562	524
63	63	59	55	630	630	590	550
70	70	66	61	800	800	770	735
80	80	75	73	1000	1000	950	880
100	100	94	91	1250	1250	1150	1050

อุณหภูมิแวดล้อมที่สูงเกิน 40 C เป็นสาเหตุให้เซอร์กิตเบรกเกอร์รับกระแสโหลดต่อเนื่องได้ไม่เกิน 80% ของพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่น เบรกเกอร์ขนาด 100 A จะสามารถป้องกันระบบแสงสว่างโหลดต่อเนื่องได้ไม่เกิน 80 A (0.8 x 100) ส่วนขนาดสายต้องสามารถรับกระแสได้ไม่น้อยกว่าพิกัดเบรกเกอร์คือไม่น้อยกว่า 100 A เบรกเกอร์บางรุ่นตั้งแต่ 225 AF ขึ้นไป ถ้าระบุว่าเบรกเกอร์นั้นสามารถรับกระแสได้ 100% ของกระแสต่อเนื่องก็สามารถใช้รับโหลดได้เต็มที่ 100% ได้เช่นกัน

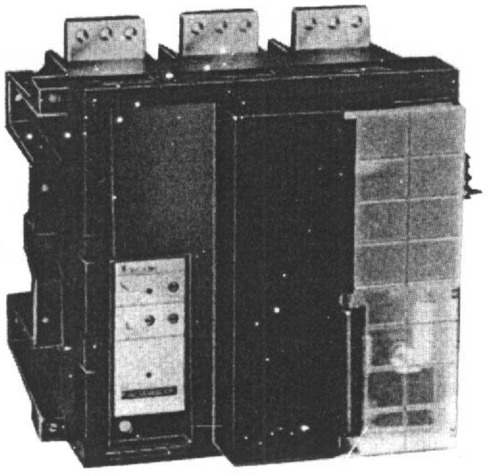
9.3.3 เพาเวอร์เซอ์กิตเบรกเกอร์ (power circuit breaker) เบรกเกอร์ประเภทนี้จะสร้างตั้งแต่ขนาด 1000 A ขึ้นไป และในปัจจุบันนี้ชุดทริปจะถูกสร้างให้เป็นชนิดที่ทริปด้วยโซลิดสเตต ข้อดีของเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับการนำไปใช้งานได้แก่:-

(ก) เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์บางรุ่นสามารถรับกระแสได้ 100 เปอร์เซ็นต์ของกระแสต่อเนื่องที่อุณหภูมิแวดล้อมตั้งแต่ 40 C ขึ้นไป หรือบางผลิตภัณฑ์อาจสร้างได้ 100 เปอร์เซ็นต์ของกระแสต่อเนื่องที่อุณหภูมิแวดล้อม –20 C ถึง 65 C เช่น โหลดต่อเนื่อง 2000 A สามารถเลือกใช้เบรกเกอร์ขนาด 2000 A

(ข) สามารถปรับตั้งย่านพิกัดต่าง ๆ คือ พิกัดกระแสเริ่มทำงาน แถบปรับตั้งหน่วงเวลานานเริ่มทำงานช่วงเวลาสั้น แถบปรับตั้งหน่วงเวลาสั้น เริ่มทำงานทันที เริ่มทำงานกระแสไฟรั่วลงดินและแถบปรับตั้งกระแสไฟรั่วลงดินหน่วงเวลา

(ค) อุปกรณ์ถูกออกแบบให้สามารถถอดบำรุงรักษาซ่อมแซมได้

ส่วนรูปที่ 9.37 เป็นเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ผลิตภัณฑ์หนึ่งและแสดงขนาดพิกัดดังตารางที่ 9.5 ส่วนรูปที่ 9.38 เป็นเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิดสเตต ประจุพลังงาน (Store Energy-SE) ด้วยมอเตอร์อีกผลิตภัณฑ์หนึ่ง สามารถปรับตั้งได้ทั้งเริ่มทำงานช่วงเวลาสั้น (Stort Time Pickup) เริ่มทำงานทันที (Instantaneous Pickup) และเริ่มทำงานกระแสไฟรั่วลงดิน (Ground Fault Pickup) ดังรูปที่ 9.39 ส่วนรูปที่ 9.40 แสดงเส้นโค้งการเปลี่ยนขนาดพิกัดกระแสต่อเนื่องแบบปลั๊กเสียบเข้าพิกัดกระแส 2500 A หรือ 3000 A สำหรับการปรับตั้งพิกัดกระแสต่อเนื่องย่านอื่น ๆ สามารถปรับตั้งพิกัดกระแส “AMPERE RATING “ ที่ระดับย่านพิกัดกระแสเป็น 0.5 ถึง 1 เท่าของขนาดกระแสปลั๊กเสียบ เช่น ถ้าเลือกกระแสปลั๊กเสียบ 3000 A เมื่อปรับตั้ง “AMPER RATING”ไว้ที่ 0.8 เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปเมื่อกระแสต่อเนื่องเกินกว่า 0.8 x 3000 A = 2400 A ดังรูปที่ 9.41การปรับตั้งให้เริ่มทำงานหน่วงเวลานานนั้นจะต้องปรับตั้งแถบย่านการหน่วงเวลานาน (long time delay band) ดังรูปที่ 9.42 ประกอบด้วยการปรับตั้งแถบการหน่วงเวลา 4 แถบ โดยแถบที่ 1 ใช้เวลาในการทริปต่ำสุด ส่วนแถบที่ 4 ใช้เวลาในการทริปสูงสุด

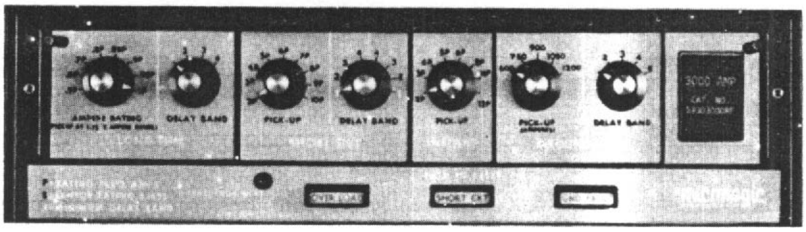


รูปที่ 9.37 เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ผลิตภัณฑ์ “MERLIN GERIN”

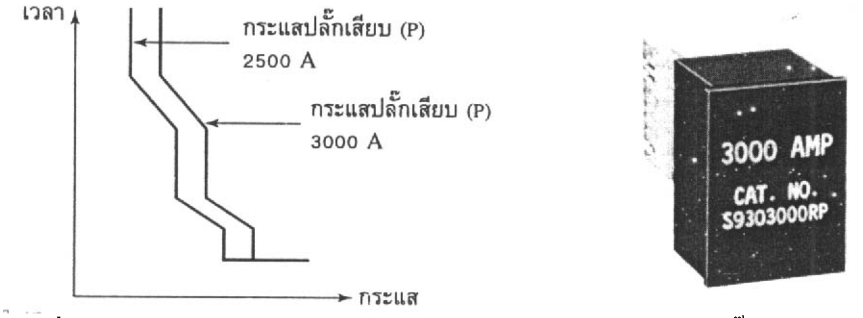
ตารางที่ 9.5 ของพิกัดของเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์

พิกัดกระแสเฟรม (AF)	ย่านการปรับตั้งกระแสทริป (A) ที่ 40°C		กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (IC) เป็น kA (สมมาตร) ที่ 380/415 V
	หน่วงเวลานาน	หน่วงเวลาสั้นและทริปทันที	
1250	0.5, 0.6, 0.7, 0.8 - 0.9 และ 1 เท่าของกระแสพิกัด	2, 4, 6, 8, 10 และ 12 เท่าของกระแสพิกัด	70, 100
1600			70, 100
2000			70, 100
2500			70, 100
3000			70, 100

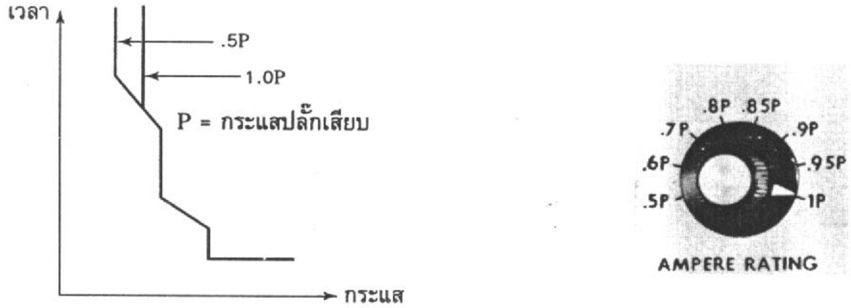
รูปที่ 9.38 เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิดสเตต ชนิดชักออก (draw-out type) ประจุพลังงานด้วยมอเตอร์ “SQUARE D”



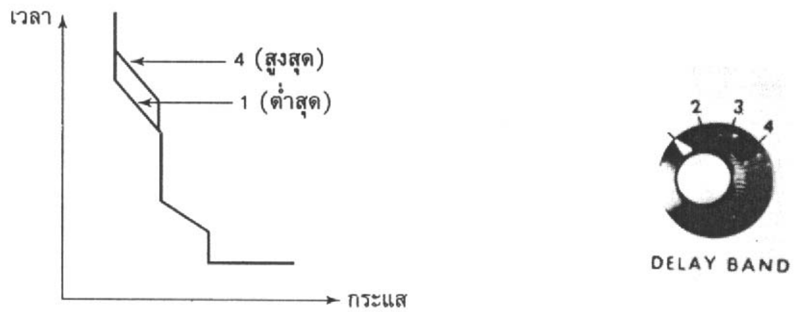
รูปที่ 9.39 เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิคสเตต สามารถปรับตั้งเริ่มทำงานหน่วงเวลานาน เริ่มทำงานช่วงเวลาสั้น เริ่มทำงานทันทีและเริ่มทำงานกระแสไฟรั่วลงดิน



รูปที่ 9.40 เส้นโค้งการเปลี่ยนขนาดพิกัดกระแสต่อเนื่องแบบปลั๊กเสียบเข้า พิกัดกระแส 2500A หรือ 3000A

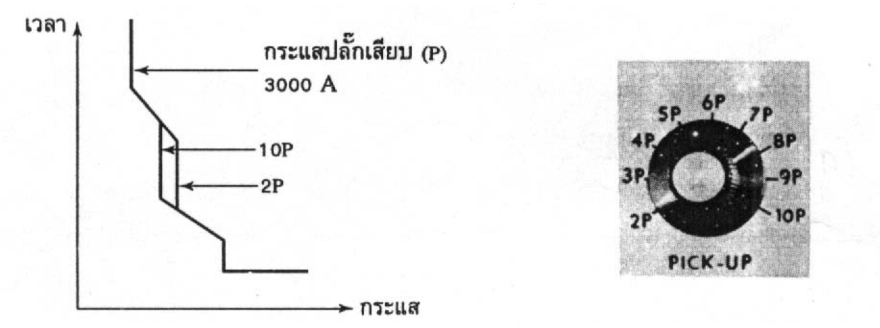


รูปที่ 9.41 ขนาดการปรับตั้งกระแสต่อเนื่อง 0.5 เท่าของขนาดกระแสปลั๊กเสียบ จนถึง 1 เท่าของขนาดกระแสปลั๊กเสียบ

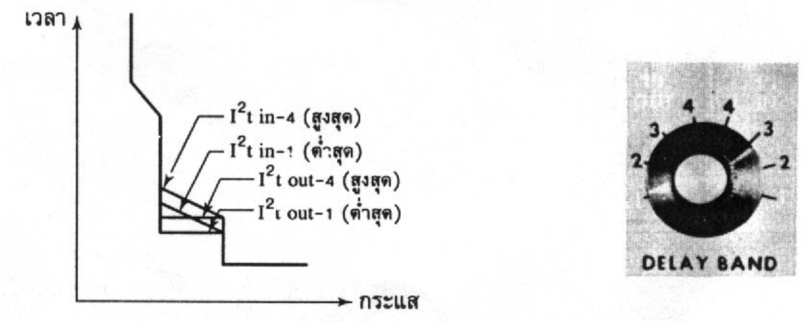


รูปที่ 9.42 แสดงการปรับตั้งหน่วงเวลานาน ในรูปที่ 5.43 ถ้าค่ากระแสโหลดสูงกว่าพิกัดกระแสขนาดปลั๊กเสียบ 1.5 เท่าถ้าปรับตั้ง “DELAY BAND” ไว้ที่แถบที่ 1, 2, 3, หรือ 4 จะใช้เวลาในการทริป 70, 140, 300 หรือ 570 วินาทีตามลำดับ

สำหรับการปรับตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มทำงานช่วงเวลาสั้น (short time pickup) นั้น ดังรูปที่ 9.43 สามารถปรับระดับย่านพิกัดการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 2 เท่าถึง 10 เท่าของขนาดกระแสปลั๊กเสียบ เช่น ถ้าปรับตั้งไว้ที่ 5 เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปเมื่อค่าพิกัดกระแสเกินกว่า 5x3000 A เท่ากับ 1500 A การหน่วงเวลาสั้น การปรับตั้งค่ากระแสเริ่มทำงานทริปหน่วงเวลาสั้นจำเป็นตั้งแถบการหน่วงเวลาสั้น (short time delay band) ดังรูปที่ 9.44 การปรับตั้งแถบย่านการหน่วงเวลาสั้นจะแปรผันตามค่ากระแสเกินและเวลา แถบการหน่วงเวลานี้สามารถเลือกแถบลาดเอียงหน่วงเวลา (I2t in) หรือแถบไม่ลาดเอียงหน่วงเวลา (I^2t out)

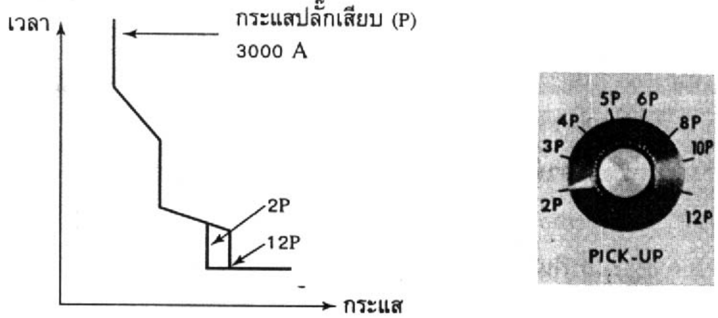


รูปที่ 9.43 การปรับตั้งค่ากระแสเริ่มทำงานช่วงเวลาสั้น 2 เท่าถึง 10 เท่าของขนาดกระแสปลั๊กเสียบ



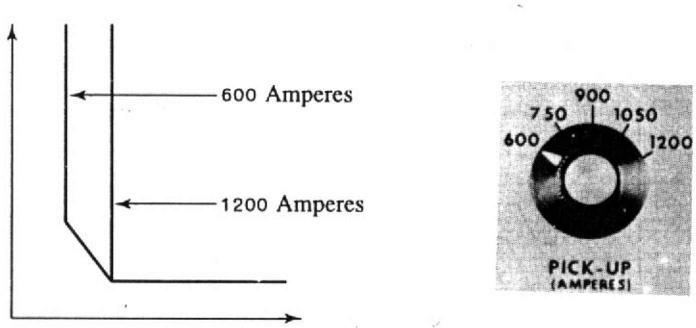
รูปที่ 9.44 แถบย่านการปรับตั้งการหน่วงเวลาสั้น ในรูปที่ 9.43 ถ้าค่ากระแสโหลดสูงกว่าพิกัดกระแสขนาดปลั๊กเสียบ 1.75 ถึง 12 เท่า ที่แถบไม่ลาดเอียงหน่วงเวลา (I^2t out) ดังนั้นแถบที่ 1,2,3 หรือ 4 จะใช้เวลาในการทริป 0.09, 0.15, 0.26 และ 0.5 วินาที ตามลำดับ

การปรับตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มทำงานทันที (instantaneous pickup) มีย่านการปรับตั้ง 2 เท่าถึง 12 เท่าของขนาดกระแสปลั๊กเสียบดังรูปที่ 9.45 เช่น ถ้าปรับตั้งไว้ที่ 12 เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทริปทันที เมื่อกระแสสูงถึง 12 x 3000 = 36000 A ในเวลา 0.016 วินาที

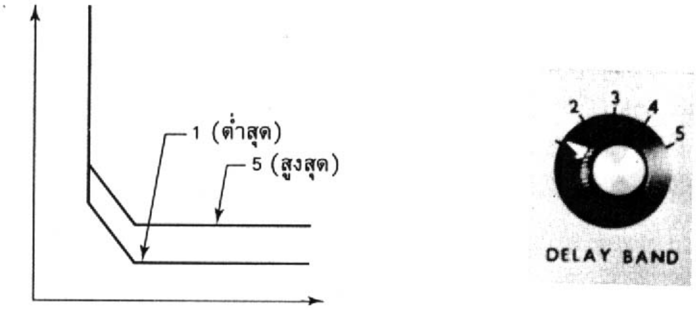


รูปที่ 9.45 ย่านการปรับเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มทำงานทันที (instantaneous pickup) เมื่อกระแสสูงถึงค่าที่ตั้งไว้เบรกเกอร์จะทริปทันทีโดยไม่หน่วงเวลา

การปรับตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มทำงานกระแสไฟรั่วลงดิน (Ground Fault Pickup) การปรับตั้งการทริปของเซอร์กิตเบรกเกอร์เมื่อกระแสไฟรั่วลงดิน ที่ย่าน 600, 750, 900, 1050 และ 1200 A ดังรูปที่ 9.46 ส่วนรูปที่ 9.47 แสดงแถบย่านการปรับตั้งกระแสไฟรั่วลงดินหน่วงเวลา (ground fault delay band) ทั้งหมด 5 แถบโดยแถบที่ 1 จะใช้เวลาในการทริปเมื่อไฟรั่วลงดินต่ำสุด ส่วนแถบที่ 5 จะใช้เวลาในการทริปเมื่อไฟรั่วลงดินสูงสุด



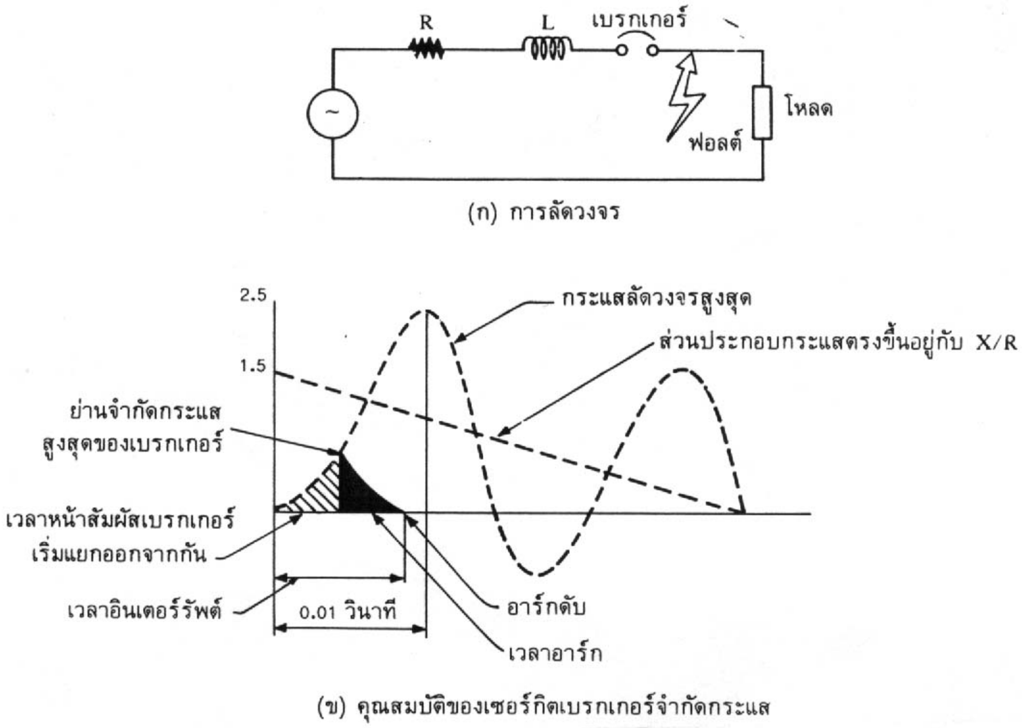
รูปที่ 9.46 ค่ากระแสการปรับตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มทำงานทริปกระแสไฟรั่วลงดิน (ground fault pickup)



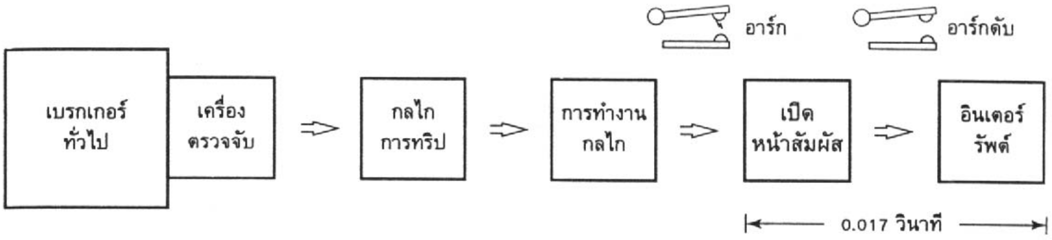
รูปที่ 9.47 แถบย่านการปรับตั้งกระแสไฟรั่วลงดินหน่วงเวลา

9.3.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์ความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์สูง (high interrupting capacity circuit breaker) หรือเรียกว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์ความสามารถตัดกระแสสูง เบรกเกอร์ประเภทนี้จะมีขนาดเท่ากับเบรกเกอร์มาตรฐานทั่ว ๆ ไป เพียงแต่ว่าได้ถูกออกแบบพิเศษให้มีความสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้สูง ๆ ส่วนอุปกรณ์การทริปนั้นมีทั้งทริปทางไฟฟ้า-ทางกล หรือทริปด้วยโซลิดสเตตเหมือนเบรกเกอร์ทั่ว ๆ ไป ดังตารางที่ 9.2 และตารางที่ 9.3 ค่าในวงเล็บเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสขณะอินเตอร์รัพต์สูง

9.3.5 เซอร์กิตเบรกเกอร์จำกัดกระแส (Current Limiting Circuit Breakers) ความสามารถอินเตอร์รัพต์ หรือความสามารถกระแสลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นตามความต้องการของโหลด เนื่องจากโหลดยิ่งมากก็จะต้องใช้แหล่งจ่ายและหม้อแปลงขนาดใหญ่ ฉะนั้นความสามารถในการดินเตอร์รัพต์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงเป็นกฎเกณฑ์สำคัญในการเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกัน ในขณะเดียวกันเบรกเกอร์ขนาดเล็ก ๆ แต่ต้องการให้มีความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์ในวงจรที่มีกระแสลัดวงจรสูง ๆ นั้นทำไม่ได้ มีวิธีการเดียวที่จะใช้เบรกเกอร์ที่มีความสามารถขณะอินเตอร์รัพต์ต่ำ ๆ ได้โดย "เทคนิคการจำกัดกระแส" โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จำกัดกระแสจะถูกออกแบบให้ตัดวงจรไฟฟ้าอย่างรวดเร็วภายในช่วงไซเคิลแรก ก่อนที่กระแสจะพุ่งขึ้นถึงสูงสุดที่ลัดวงจรดังรูปที่ 9.48 เบรกเกอร์ทั่วไปเมื่อเกิดการลัดวงจร หน้าสัมผัสของเบรกเกอร์จะถูกสั่งให้แยกออกจากกันอย่างรวดเร็ว อาร์กและการดับอาร์กใช้เวลาประมาณ 0.017 วินาที ดังรูปที่ 9.49

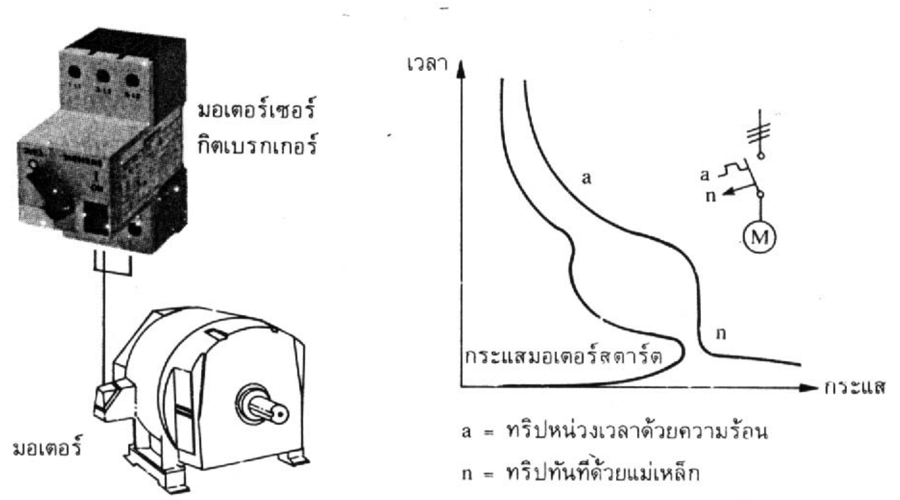


รูปที่ 9.48 การลัดวงจรและการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์จำกัดกระแส



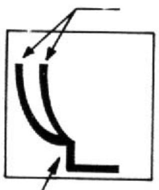
รูปที่ 5.49 ความสามารถการอินเตอร์รัพต์เบรกเกอร์ทั่วไป

9.3.6 มอเตอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (motor circuit breaker) เซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภทนี้ได้ถูกออกแบบไว้ สำหรับโหลดที่มีกระแสพุ่งเข้าสูง ๆ ในช่วงเวลาสตาร์ต เช่น มอเตอร์ดังรูปที่ 9.49 อุปกรณ์การทริปอาจเป็นประเภทที่ทริปด้วยความร้อน-แม่เหล็ก หรือแม่เหล็กอย่างเดียว การปรับตั้งหน่วงกระแสเกิน ให้สามารถทริปตามพิกัดกระแสของมอเตอร์ และสามารถปรับตั้งให้ทริปทันทีโดยการปรับตั้งปุ่มปรับตั้งทริปด้วยแม่เหล็ก หรือเป็นชนิดที่ไม่สามารถปรับตั้งการทริปทันทีดังตารางที่ 9.6 มอเตอรเซอร์กิตเบรกเกอร์จะถูกออกแบบให้ตัดกระแสฟอลต์ที่ระดับต่ำสุดของขดลวดมอเตอร์ ก่อนที่กระแสฟอลต์จะขยายเพิ่มในระดับสูงจนทำให้มอเตอร์เสียหาย



รูปที่ 9.49 มอเตอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์

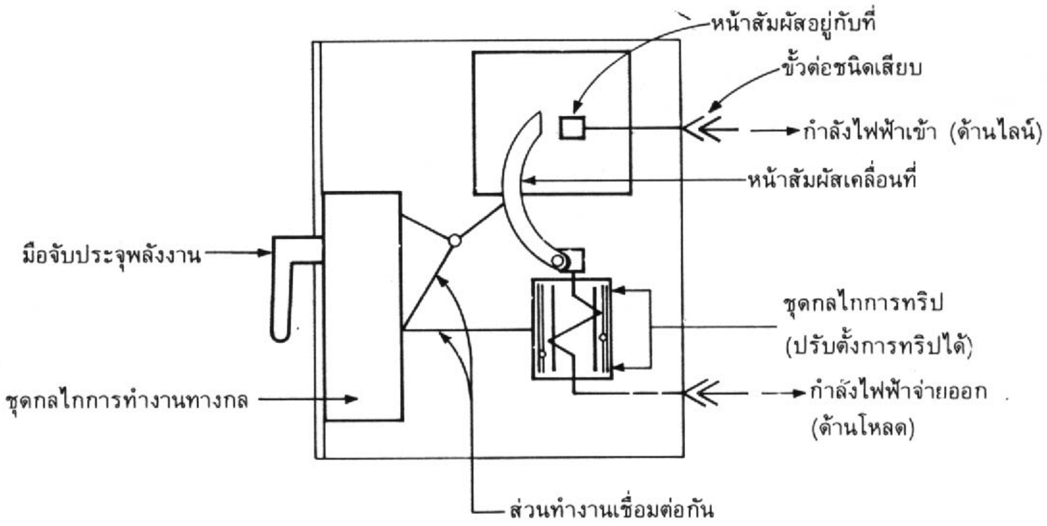
ตารางที่ 9.6 มอเตอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ผลิตภัณฑ์หนึ่ง

ลักษณะการทริป	พิกัดกระแสต่อเนื่อง (A)	ย่านการปรับตั้งกระแส (A)		กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (IC) เป็น kA (สมมาตร) ที่ 380/415 V
		ทริปกระแสเกินด้วยความร้อน	ทริปทันทีด้วยแม่เหล็ก	
ย่านปรับตั้งทริปด้วยความร้อน  ทริปทันทีด้วยแม่เหล็ก	1.6	1–1.6	19	18, 30, 50, 100
	2.5	1.6–2.5	30	
	4	2.5–4	48	
	6.3	4–6.3	75	
	10	6.3–10	120	
	12.5	8–12.5	150	
	16	10–16	192	
	20	12.5–20	240	
	25	16–25	300	
	32	22–32	380	

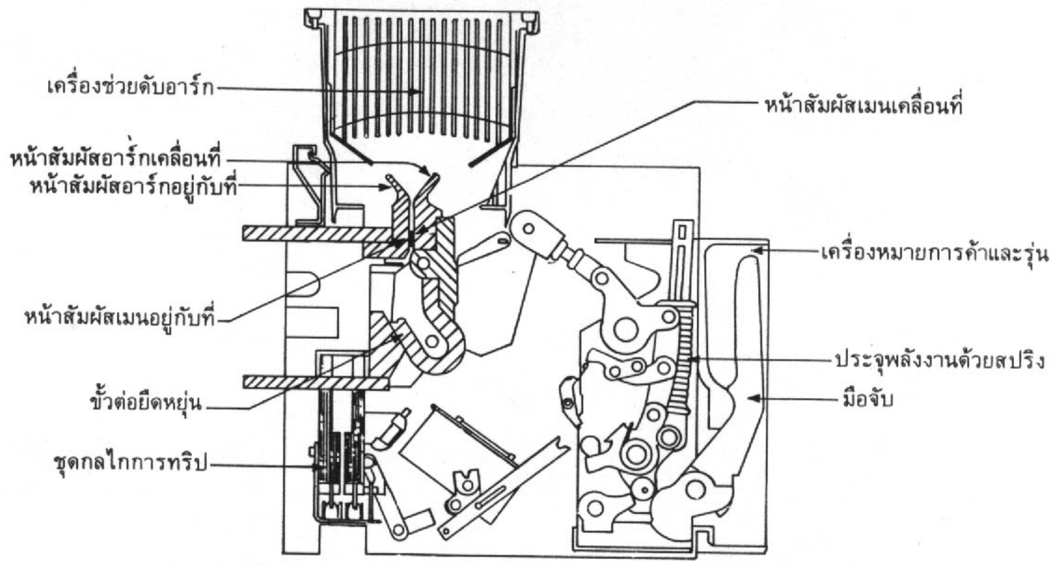
9.4 แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์

แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (air circuit breaker) หรือเรียกชื่อสั้น ๆ ว่า “ACB” โดยทั่วไปจะประกอบด้วยชุดกลไกการทำงานทางกล หน้าสัมผัส ตัวอินเตอร์รัพต์เตอร์ (ใช้อากาศเป็นตัวกลางดับอาร์ก) และชุดกลไกการทริปรวมอยู่ในตัวเบรกเกอร์ ชุดกลไกการทริปกระแสเกินจะต่ออันดับกันทางด้านโหลดของเบรกเกอร์ ซึ่งชุดทริปจะถูกออกแบบให้มีความแม่นยำในทางทริปสูงซึ่ง

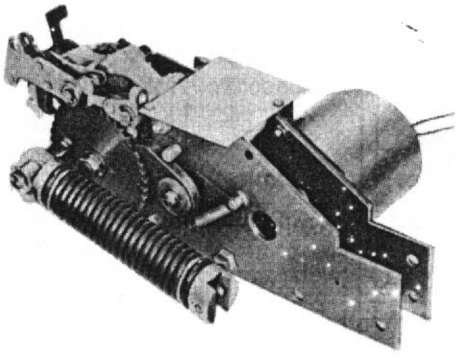
สามารถปรับตั้งได้ทั้งหน่วงเวลานาน หน่วงเวลาสั้น ทริปทันทีและทริปกระแสไฟรั่วลงดินเพื่อให้สอดคล้องและถูกต้องตามคุณสมบัติของโหลดในระบบดังรูปที่ 9.50 อย่างไรก็ตามชุดกลไกการทำงานทางกลจะมีอยู่หลายแบบ ถ้าชุดกลไกการทำงานทางกลทำงานไม่อัตโนมัติ ที่มีจับจะต้องโยกเพื่อประจุพลังงานด้วยสปริงเสียก่อน จึงจะสามารถทำให้หน้าสัมผัสของเบรกเกอร์ OFF หรือ OPEN และ ON หรือ CLOSE อย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 9.51 ส่วนชุดกลไกการทำงานทางกลแบบอัตโนมัติจะทำงานด้วยไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์หมุนขันประจุพลังงานของสปริงในขณะ ON และ TRIP (เมื่อเบรกเกอร์ TRIP มอเตอร์จะหมุนขันประจุพลังงานสปริงเพื่อสำหรับ ON เมื่อเบรกเกอร์ ON แล้ว มอเตอร์จะหมหุนขับประจำพลังงานสปริงอีก สำหรับใช้ในการ TRIP) ดังรูปที่ 9.52 ในขณะที่เบรกเกอร์ ON, OFF, TRIP หรือประจุพลังงาน(CHARGE) จะมีเครื่องหมายชี้แสดงให้เห็นอยู่หน้าแอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์



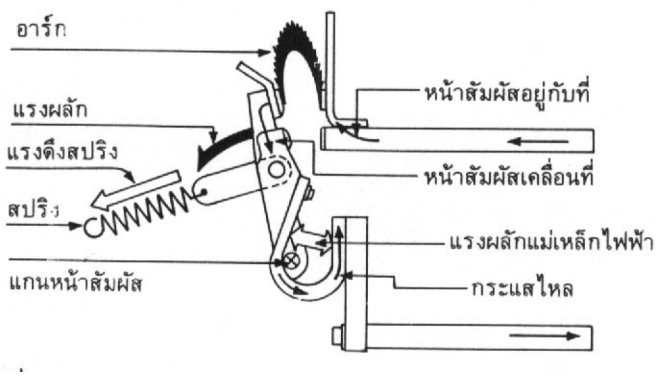
รูปที่ 9.50 โครงสร้างของแอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 9.51 โครงสร้างภายในของแอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 9.52 ประจุพลังงานสปริงด้วยมอเตอร์



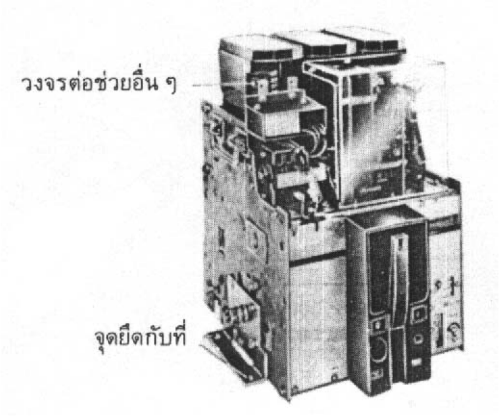
รูปที่ 9.53 กระแสจำนวนมากไหลผ่านทางเดียวกันเกิดแรงผลัก

สำหรับกลไกการทริปนั้นมีให้เลือกใช้ได้ทั้งทริปทางไฟฟ้า – ทางกลหรือทริปด้วยโซลิคสเตต เนื่องจากชุดกลไกทริปต่ออันดับโดยตรงทางด้านโหลดหรือต่อผ่านหม้อแปลงกระแสในกรณีที่เบรกเกอร์ทริปด้วยโซลิคสเตต ซึ่งสามารถปรับตั้งพิกัดกระแสทริปได้ตามความต้องการ ในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรทางด้านโหลด ผลของกระแสลัดวงจรที่ไหลจำนวนมากเป็นสาเหตุให้เกิดแรงผลักแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขั้วต่อยืดหยุ่น เนื่องจากกระแสไหลทางเดียวกันเกิดแรงผลักดันดังรูปที่ 9.53 ทำให้หน้าสัมผัสถูกแยกโดยรวดเร็ว กระแสลัดวงจรจึงถูกจำกัดกระแสให้อินเตอร์รัพต์และดับอาร์กลงในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นแอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ตามลักษณะการสร้างแล้วเหมาะสำหรับป้องกันสายเมนหรือสายป้อนใหญ่ ๆ เนื่องจากสามารถรับกระแสโหลดและขนาดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์สูง ๆ แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์จะมีผลิตให้เลือกใช้ตั้งแต่ขนาด 630 AF จนถึง 6300 AF ดังตารางที่ 9.7

ตารางที่ 9.7 ขนาดพิกัดของแอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์

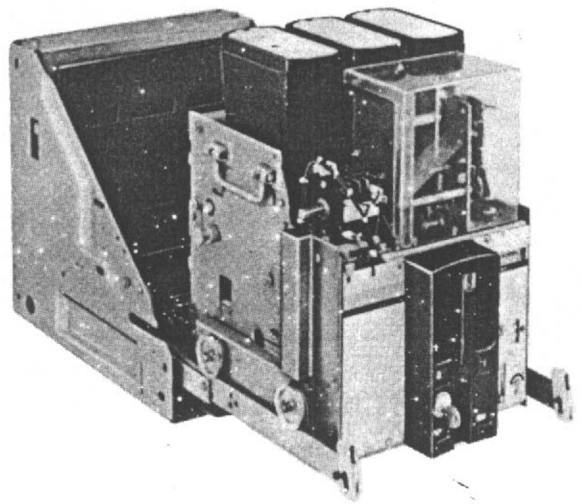
พิกัดกระแสเฟรม AF	ย่านการปรับตั้งกระแสทริป (A) ที่ 40°C			กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (IC)* เป็น kA (สมมาตร) ที่ 380/415 V
	หน่วงเวลานาน	หน่วงเวลาสั้นและทริปทันที	กระแสไฟรั่วลงดิน	
630	0.5, 0.6, 0.7 0.8, 0.9 หรือ 1 เท่าของพิกัดกระแส	2, 4, 6, 8 หรือ 10 เท่าของพิกัดกระแส	0.2, 0.3, 0.4 หรือ 0.5 เท่าของกระแสพิกัด	30, 35, 55
1000				45, 50, 55
1250				50, 55
1600				50, 65, 100
2000				50, 65, 70, 100
2500				50, 65, 70, 100
3150, 3200				50, 65, 100
4000				100, 120
5000				100, 120
6300				100, 120

*ขนาดกระแสขณะอินเตอร์รัพต์หรือความสามารถขณะตัดกระแส (breaking capacity)



รูปที่ 9.54 แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดติดกับที่ (fixed type)

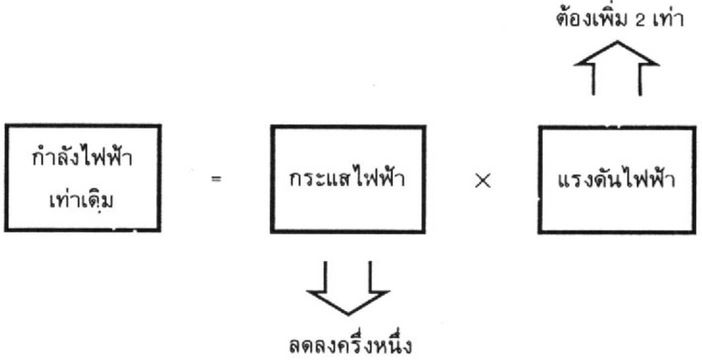
ในขณะเดียวกันการติดตั้งแอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์มีให้เลือกซื้อทั้งชนิดติดกับที่ดังรูปที่ 9.54และชนิดชักออก หรือดรอเอาต์ (Draw - Out) ดังรูปที่ 9.55 ซึ่งสามารถชักออกจากตู้รางยึด ทั้งนี้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการซ่อมบำรุงรักษา ในขณะเดียวกันสามารถเลื่อนกับเข้าไปใหม่ให้เชื่อมต่อกับปลั๊กเสียบหลังเบรกเกอร์ เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 9.55 แอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดชักออก (Draw – Out Type) “MERLIN GERIN”

บทที่ 10
เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง
(High Voltage Power Circuit Breaker)

ในขณะที่ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุก ๆ วัน ทำให้การส่งกำลังไฟฟ้าเป็นปริมาณมาก ๆ ในระยะทางไกล ๆ ก็เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งสูงขึ้นตามไปด้วย วิธีที่จะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งได้ก็โดยการลดกระแสไฟฟ้า แต่ถ้าต้องการส่งกำลังไฟฟ้าเท่าเดิมก็ต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นดังรูปที่ 10.1 ฉะนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำไฟฟ้าแรงสูงมาใช้ สำหรับระดับแรงดันไฟฟ้าในประเทศไทย มีหน่วยงานที่ทำการส่งและจำหน่ายดังนี้



รูปที่ 10.1 ความจำเป็นการนำไฟฟ้าแรงสูงมาใช้

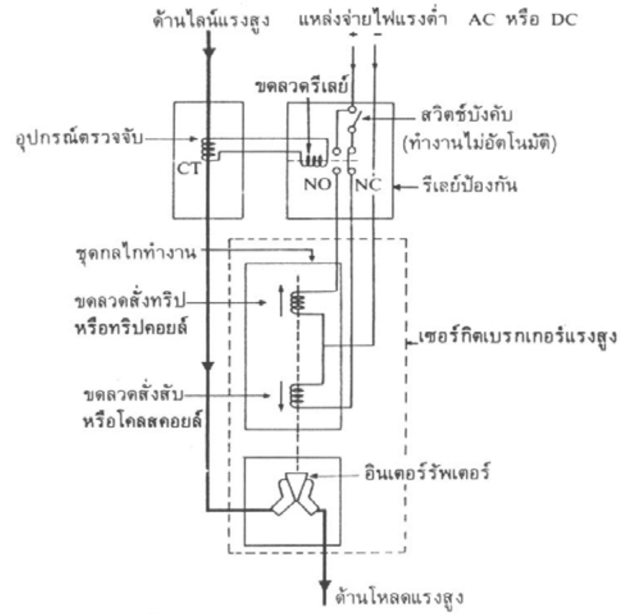
(ก) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จัดส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 500 kV, 230 kV, 115 kV และ 69 kV

(ข) การไฟฟ้านครหลวง จัดจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 230 kV, 115 kV, 69 kV, 24 kV และ 12 kV

(ค) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จัดจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 33 kV, 22 kV และ 11 kV

แต่อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบกันดีว่าไฟฟ้าแรงสูงนั้นยิ่งสูงมากเท่าใดก็ยิ่งมีอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินสูงมากเท่านั้น การปลดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบในขณะที่มีกระแสจำนวนมากไหลอยู่จะมีเปลวอาร์กเกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง ความรุนแรงของอาร์กจะขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลในวงจร ถ้าใช้สวิตช์ธรรมดาปลดวงจรแล้วความร้อนที่เกิดจากอาร์กจะทำให้ขาสวิตช์ หรือหน้าสัมผัสไหม้เสียหาย อีกทั้งอาจเป็นอันตรายแก่บุคคลที่ปลดสวิตช์นั้นได้ ฉะนั้นถ้าต้องการปลดวงจรในลักษณะเช่นนี้ต้องเลือกอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า*เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง* มาใช้แทน ทั้งนี้เพราะเซอร์กิจเบรกเกอร์มีชิ้นส่วนประกอบขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อทำการดับอาร์กไปในเวลาสั้นที่สุด นอกจากการใช้เบรกเกอร์เพื่อปลดหรือสับในสภาพระบบไฟฟ้าปกติแล้ว ประโยชน์อันสำคัญยิ่งก็คือการทริปเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้า กระแสฟอลต์จะมีค่าสูงเป็นหลายเท่าตัวของกระแสใช้งานปกติ อาร์กก็ยิ่งรุนแรงมากขึ้น ในขณะเดียวกัน การที่เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงจะทริปได้ จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์อื่นประกอบให้เบรกเกอร์ทำงานอย่างอัตโนมัติ อีกทั้งเมื่อฟอลต์ผ่านพ้นไปแล้ว เบรกเกอร์จะถูกสั่งให้สับซ้ำ (Reclose) เข้าไปใหม่เช่นกัน เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อไปตามเดิม สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงนั้นเป็นเบรกเกอร์ที่กำหนดแรงดันระบุตั้งแต่ 1000 V ขึ้นไป

การใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงเพื่อป้องกันระบบไฟฟ้าจะสำเร็จได้นั้น ต้องอาศัยอุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบและร่วมประสานงานกัน 4 อย่างคือ อุปกรณ์ตรวจจับ รีเลย์ป้องกัน กลไกการทำงาน และอินเตอร์รัพเตอร์ ดังรูปที่ 10.2



รูปที่ 10.2 อุปกรณ์ใช้ร่วมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

(ก) อุปกรณ์ตรวจจับ ได้แก่หม้อแปลงกระแส ซึ่งทำหน้าที่คล้ายยามระวังเหตุ เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นในระบบ แล้วส่งสัญญาณบอกเหตุมายังรีเลย์ป้องกัน

(ข) รีเลย์ป้องกันเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับ พร้อมกับสั่งการไปยังกลไกการทำงาน เพื่อให้ทริปเบรกเกอร์ หรือสั่งเบรกเกอร์สับซ้ำ ตามแต่ชนิดของรีเลยนั้น ๆ เช่น รีเลย์กระแสเกิน รีเลย์ชนิดสับซ้ำ หรือรีเลย์อื่น ๆ

(ค) ชุดกลไกทำงาน เป็นกลไกกำกับการทำงานของเบรกเกอร์ได้แก่ขดลวดสั่งทริป (tripping coil) และขดลวดสั่งสับ (closing coil) ชุดกลไกทำงานจะส่งแรงไปปลดหรือสับหน้าสัมผัสของเบรกเกอร์ตามคำสั่งของรีเลย์

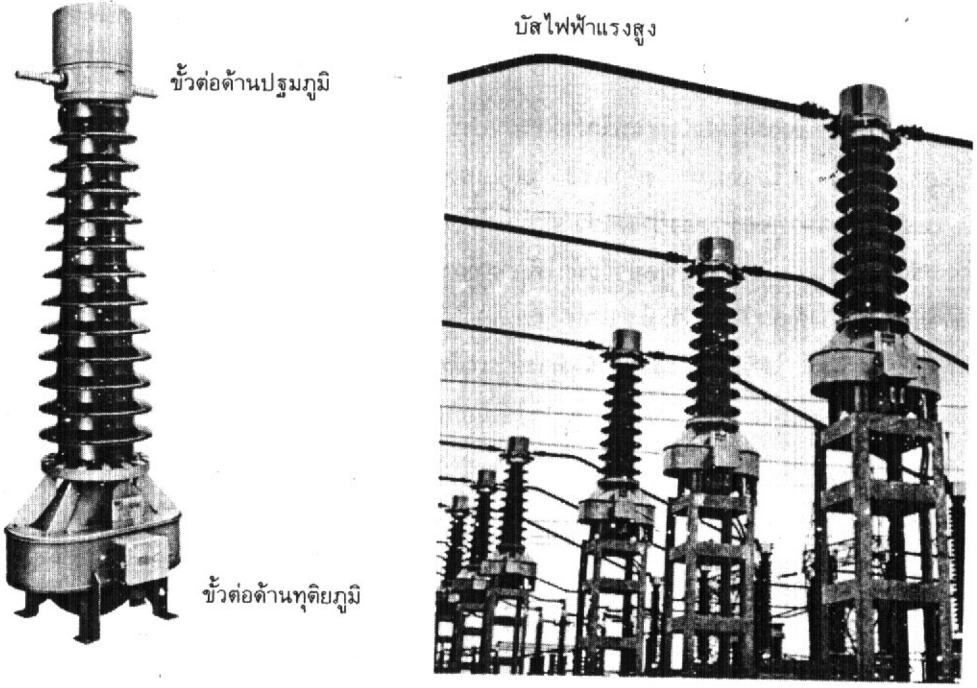
(ง) อินเตอร์รัพเตอร์หรือตัวตัดกระแส ชิ้นส่วนนี้ได้แก่หน้าสัมผัสของเบรกเกอร์ จะถูกสั่งให้แยกจากกัน ทำให้เกิดอาร์ก และทำหน้าที่ควบคุมการดับอาร์ก (Arc Extinguisher)

เมื่อไรก็ตามถ้าระบบไฟฟ้าเกิดผิดปกติ เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะถูกสั่งให้ทริปด้วยรีเลย์ ในขณะเดียวกันเซอร์กิตเบรกเกอร์อาจสั่งให้สับต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบไม่อัตโนมัติ (Manual Operated) หรือสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สับต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ ด้วยรีเลย์สับซ้ำอัตโนมัติ (Auto Recloser Relay)

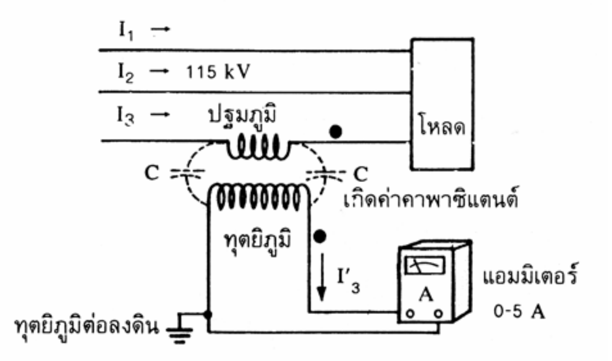
อุปกรณ์ร่วมประสานการทำงานกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ มีรูปแบบการทำงานคล้าย ๆ กับการปฏิบัติงานของหน่วยดับเพลิง กล่าวคือ เมื่อยามระวังเหตุบนหอคอย (เปรียบเหมือนอุปกรณ์ตรวจจับ) เห็นเพลิงไหม้ขึ้น ณ ที่ใด ก็จะแจ้งเหตุลงมายังผู้บังคับการ (เปรียบเหมือนรีเลย์) ผู้บังคับการก็จะสั่งรถดับเพลิง (เปรียบเหมือนชุดกลไกทำงาน) ออกไปยังที่เกิดเหตุ เมื่อถึงที่เกิดเหตุแล้ว เจ้าหน้าที่ดับเพลิง (เปรียบเหมือนอินเตอร์รัพเตอร์) ก็จะเข้าไปตัดต้นเหตุไฟไหม (เปรียบเหมือนแยกหน้าสัมผัส) พร้อมกับฉีดน้ำเพื่อดับไฟ (เปรียบเหมือนการดับอาร์ก) ให้ดับโดยเร็วที่สุด

10.1 อุปกรณ์ตรวจจับ

10.1.1 หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า CT ใช้สำหรับลดค่ากระแสไฟฟ้าจากจำนวนมากให้ลดลงมาเหลือน้อย ๆ ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งานของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น รีเลย์ มิเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ โดยปกติ CT จะมีอัตราส่วนกระแส 50/5 A, 75/5 A, 100/5 A, 150/5 A, 200/5 A, 250/5 A, 300/5 A, 400/5 A, 500/5 A, 600/5 A, 800/5 A, 900/5 A, 1000/5 A, 1200/5 A, 1500/5 A, 1600/5 A, 2000/5 A, 3000/5 A, 4000/5 A และ 5000/5 A ดังรูปที่ 10.3 โดยปกติขั้วต่อด้านปฐมภูมิมักจะกำหนดขั้วเป็น K และ L หรือ P_1 และ P_2 ส่วนขั้วต่อทางด้านทุติยภูมิก็จะกำหนดขั้วเป็น k และ l หรือ s_1 และ s_2 ตามลำดับ ส่วนสภาพขั้ว (Polarity) จะเป็นเครื่องหมายแสดงความสัมพันธ์ของทิศทางการไหลของกระแสทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลง

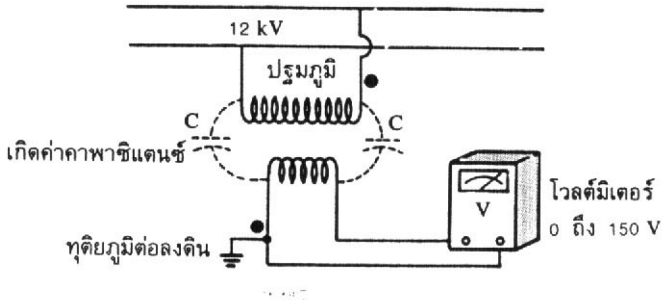


(ก) CT ชนิดที่ใช้ภายนอกอาคารในระบบ 115 kV



รูปที่ 10.3 CT ชนิดภายนอกอาคารและการต่อ

10.1.2 หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า **PT** ขดลวดด้านปฐมภูมิจะต่อเข้ากับไลน์แรงสูง ส่วนขดลวดทุติยภูมิจะต่อเข้ากับเครื่องวัดหรือรีเลย์ดังรูปที่ 10.4



(ก) การต่อ PT ในระบบแรงดัน 12 kV

รูปที่ 10.4 หม้อแปลงแรงดัน

10.2 รีเลย์ป้องกัน

ระบบไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีการป้องกันที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีความน่าเชื่อถือ การเลือกใช้รีเลย์ป้องกันที่เหมาะสมและเชื่อถือได้ ย่อมเป็นวิธีหนึ่งที่จะลดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า และยังลดเวลาในการซ่อมแซมระบบไฟฟ้า ฉะนั้นหน้าที่สำคัญของรีเลย์ป้องกันได้แก่ :-

1. ตรวจจับสภาวะฟอลต์ของระบบไฟฟ้าแล้วส่งสัญญาณไปทริปเบรกเกอร์ ให้แยกส่วนของระบบไฟฟ้าที่กำลังผิดปกติออกหรือส่งสัญญาณเตือน

2. บอกตำแหน่งและชนิดของสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้นอกจากจะช่วยให้การซ่อมแซมรวดเร็วขึ้นแล้ว ยังใช้เปรียบเทียบการสังเกตการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน และการบันทึกรายงานของออสซิลโลกราฟ เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของการป้องกันฟอลต์และคุณลักษณะของตัวรีเลย์เอง

เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ร่วมกับรีเลย์ป้องกัน จะติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่สามารถสั่งทริป เพื่อแยกวงจรไฟฟ้าออกจากเครื่องกำเนิด หม้อแปลง บัส สายส่ง หรืออื่น ๆ ออกจากระบบในส่วนที่เกิดฟอลต์ โดยที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องมีขนาดที่เหมาะสมและสามารถทนกระแสสูงสุดชั่วขณะที่กำลังลัดวงจรได้ แผ่นป้ายชื่อบนเซอร์กิตเบรกเกอร์แต่ละตัวจะแสดงค่าพิกัดดังต่อไปนี้

(ก) พิกัดกระแสต่อเนื่อง

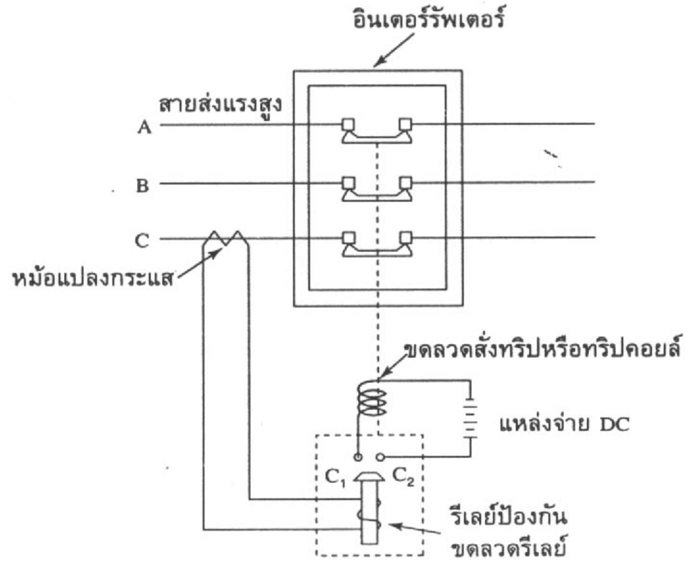
(ข) กระแสขณะอินเตอร์รัพต์สูงสุด

(ค) พิกัดแรงดันสูงสุด

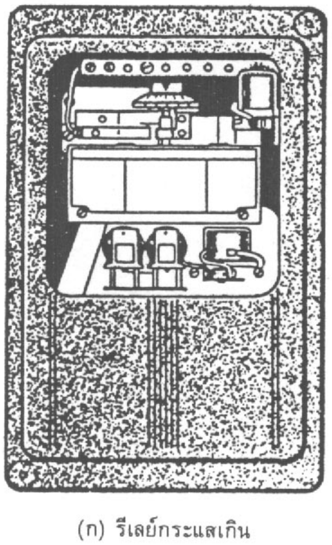
(ง) พิกัดเวลาอินเตอร์รัพต์ ปกติจะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 8 ไซเกิล

การทริปเบรกเกอร์นั้นจะอาศัยรีเลย์ป้องกัน ดังรูปที่ 10.5 ขดลวดสั่งทริปขั้วหนึ่งจะต่ออยู่กับแหล่งจ่าย DC ถ้าเกิดฟอลต์ด้านสายส่งแรงสูง กระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสก็จะสูงขึ้น ทำให้หน้าสัมผัส C_1 และ C_2 ของรีเลย์ป้องกันปิด ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายอื่น ๆ จะจ่ายให้กับขดลวดสั่งทริป ดึงหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้ปลดวงจรไฟฟ้า

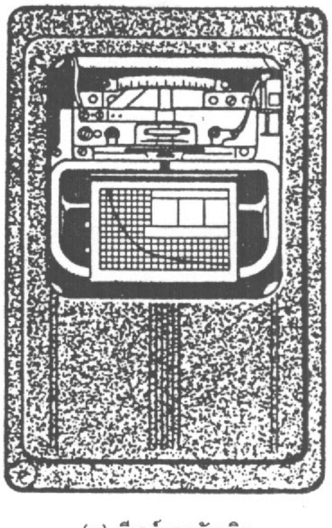
สำหรับรีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้าอันได้แก่รีเลย์กระแสเกิน รีเลย์แรงดันเกิน หรือรีเลย์อื่น ๆ ดังรูปที่ 10.6



รูปที่ 10.5 วงจรพื้นฐานการสั่งทริปเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงเพียงเฟสเดียว



(ก) รีเลย์กระแสเกิน



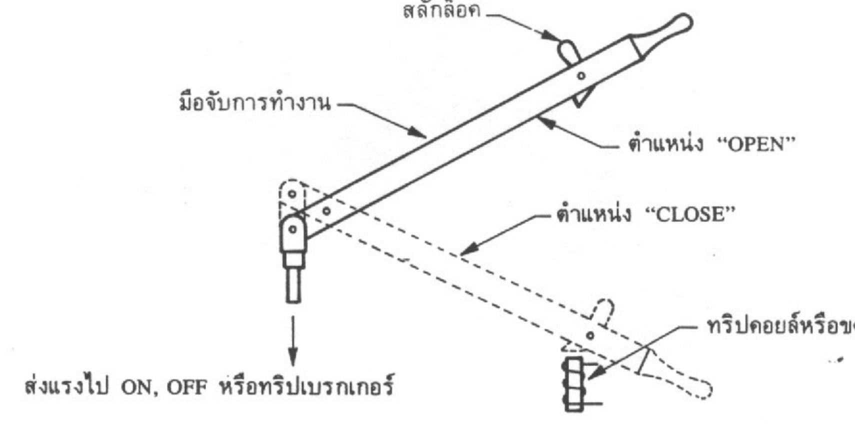
(ข) รีเลย์แรงดันเกิน

รูปที่ 10.6 รีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้า ติดตั้งอยู่ภายในห้องควบคุมไฟฟ้า

10.3 ชุดกลไกทำงาน

ชุดกลไกทำงาน (Operating Mechanism) เป็นกลไกกำกับการทำงานของอินเตอร์รัพเตอร์ (Interrupter) หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นกลไกกำกับการทำงานของการปิดเปิดหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ชุดกลไกทำงานที่ใช้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภทต่าง ๆ ทั่วไป แบ่งลักษณะการทำงานออกเป็น 6 ชนิด คือ

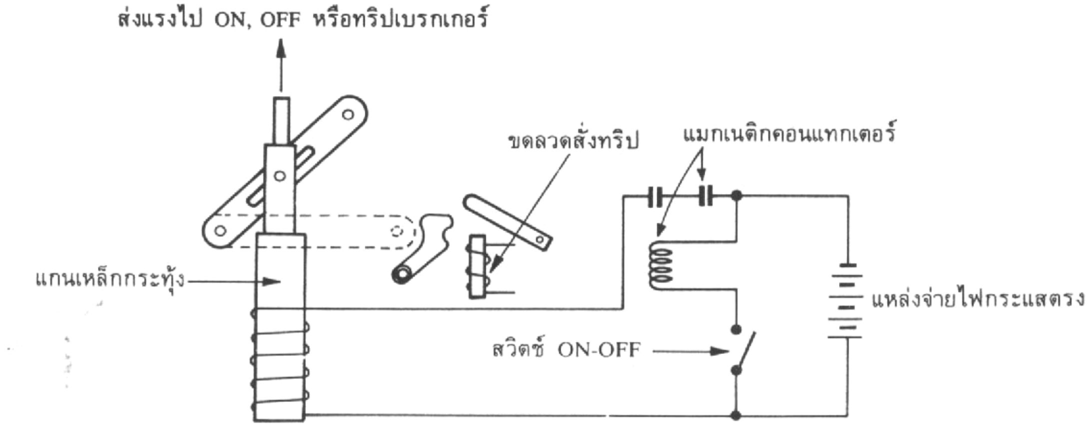
10.3.1 การทำงานด้วยมือ (Manual Operation) เป็นชนิดง่ายและราคาถูกกว่าชนิดอื่น ๆ ทั้งหมด โดยปกติทั่วไปจะใช้กับเบรกเกอร์ขนาดเล็กที่มีพิกัดแรงดัน พิกัดกระแสอินเตอร์รัพต์ และพิกัดกำลังไฟฟ้าอินเตอร์รัพต์ไม่สูงนัก ซึ่งโดยทั่วไปจะจำกัดไว้ไม่เกิน 15 MVA (22 kA) และ 2.4 KV สำหรับกลไกการทำงานด้วยมือมีหลักการทำงานดังรูปที่ 10.1 ประกอบด้วยสลักล็อคสำหรับล็อคมือจับในขณะสับเบรกเกอร์ และมีทริปคอยล์ ในขณะที่เกิดโหลดเกินหรือฟอลต์ทริปคอยล์จะถูกจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแกนของทริปคอยล์จะไปดันล็อคที่เกี่ยวกับสลักล็อคให้หลุด เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะทริป เมื่อแก้ไขข้อขัดข้องเรียบร้อยแล้ว การสับเซอร์กิตเบรกเกอร์ซ้ำ (reclose) กับเข้าไปใหม่ก็ทำได้ด้วยมืออีก อย่างไรก็ตามมือจับการทำงานอาจดัดแปลงให้เชื่อมต่อทางกล เป็นปุ่มกดสวิตช์ ON หรือ OFF ทั้งนี้ก็เพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์มีรูปร่างกะทัดรัดขึ้น



รูปที่ 10.7 ชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยมือ

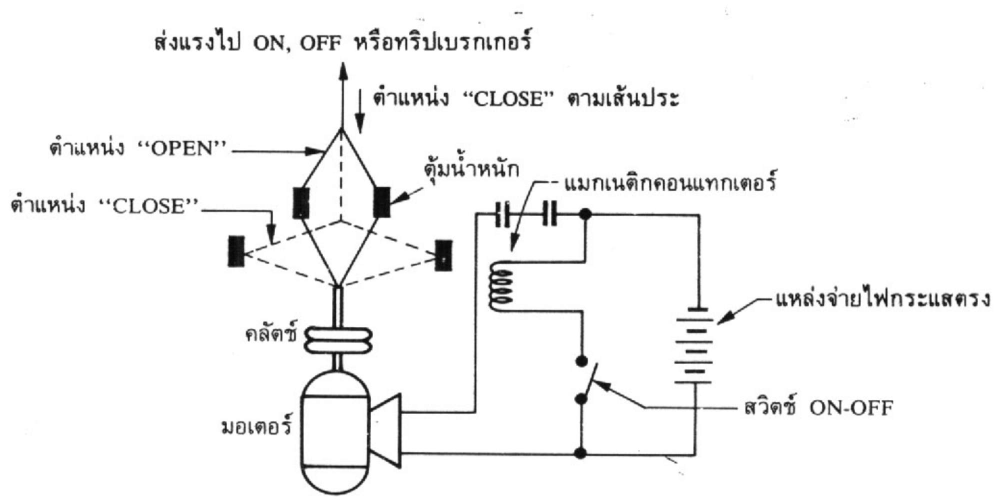
10.3.2 การทำงานด้วยโซลีนอยด์ (Solinoid Operation) ใช้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาดใหญ่ ชุดกลไกทำงานชนิดนี้อาศัยกำลังแม่เหล็กของขดลวดหรือโซลีนอยด์มาดึงแกนเหล็กกระทุ้งซึ่งเชื่อมโยงกับกลไก ไปทำการสับหน้าสัมผัสให้ปิดวงจร การทำงานด้วยโซลีนอยด์นี้มีความสะดวกอีกประการหนึ่งก็คือ สามารถลากสายควบคุมออกไปไกล ๆ โดยการติดสวิตช์เมื่อต้องการ **ON – OFF** เพื่อให้ทำงานระยะไกล (Remote Operation) ได้ แต่ต้องติดตั้งสวิตช์ช่วยอื่น ๆ ร่วมด้วย ทั้งนี้เพื่อให้รู้ว่า

เบรกเกอร์อยู่ในตำแหน่งสับหรือปลดอยู่ นอกจากนี้จะต้องติดตั้งรีเลย์ทริปอิสระ (Trip Free Relay) อีกชุดหนึ่ง เพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทริปได้ในขณะที่ขดลวดสั่งสับ (closing coil) ถูกจ่ายไฟฟ้า เช่นในกรณีที่สับเบรกเกอร์เข้าไปแล้วเกิดมีฟอลต์ขึ้น โซลีนอยด์จะทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจะกินไฟมาก ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีแบตเตอรี่กำลังสูง ๆ ไว้ประจำ อีกทั้งการเดินสายไฟจากแบตเตอรี่มายังโซลีนอยด์ก็มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น โดยปกติความเร็วชุดกลไกทำงานด้วยโซลีนอยด์ จะใช้เวลาในการสับ (Close) เบรกเกอร์ประมาณ 0.8 วินาที จึงไม่เหมาะสำหรับงานที่ต้องการสับเบรกเกอร์ด้วยความเร็วสูงดังรูปที่ 10.8



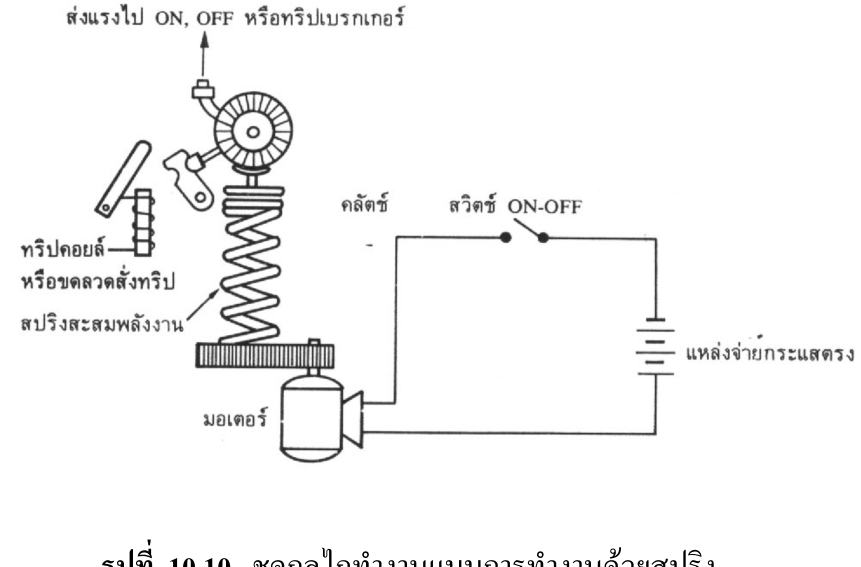
รูปที่ 10.8 ชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยโซลีนอยด์

10.3.3 การทำงานด้วยมอเตอร์ ดังรูปที่ 10.9 จะใช้มอเตอร์หมุนตุ้มน้ำหนักให้เกิดแรงเหวี่ยงขึ้น ขณะเกิดแรงเหวี่ยงนั้นแกนของตุ้มน้ำหนัก ซึ่งเชื่อมต่อกับก้านกลไกของเบรกเกอร์ จะถูกดึงลงมาข้างล่างทำให้หน้าสัมผัสของเบรกเกอร์ปิด ส่วนชุดการทริปอิศระนั้นทำงานโดยกลไกชุดอื่นต่างหากจากชุดกลไกทำงาน สำหรับชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยมอเตอร์ ขณะทำงานจะกินกระแสมากพอ ๆ กับแบบการทำงานด้วยโซลีนอยด์ และความเร็วในการทำงานก็เท่า ๆ กับแบบโซลีนอยด์



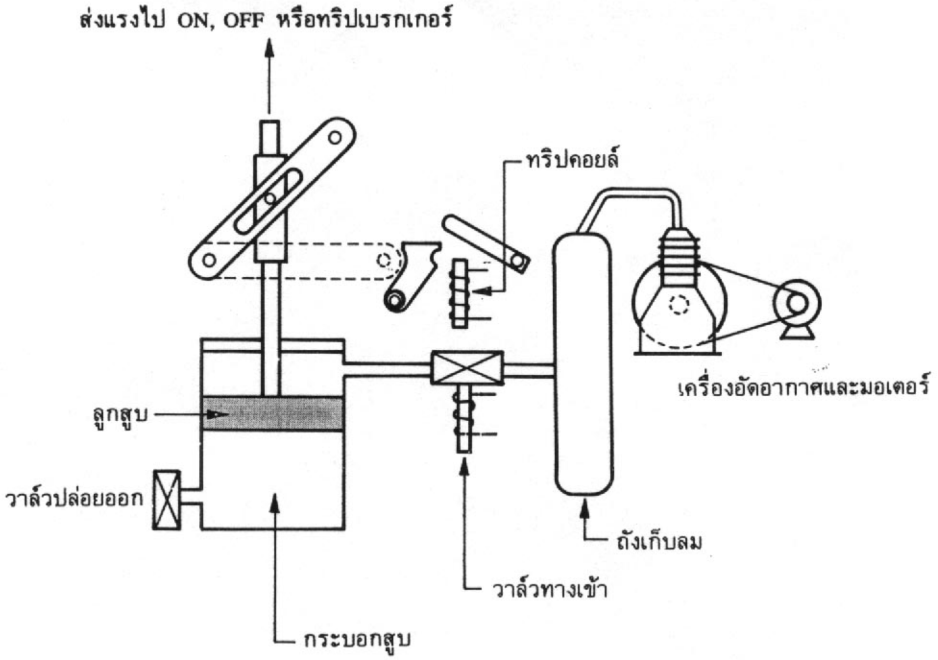
รูปที่ 10.9 ชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยมอเตอร์

10.3.4 การทำงานด้วยสปริง (Spring Operation) ดังรูปที่ 10.10 แบบนี้อาศัยการอัดกำลังให้กับสปริงโดยการไขลานด้วยมือหรือขับด้วยมอเตอร์ เมื่อสปริงถูกอัดกำลังจนเต็มแล้วจะสามารถสั่งสับหรือทริปเบรกเกอร์ได้ แต่ถ้าสปริงถูกอัดกำลังไม่เพียงพอก็ไม่สามารถสั่งสับเบรกเกอร์ได้ คุณลักษณะของชุดกลไกทำงานนี้ จะใช้เวลาในการสั่งสับเบรกเกอร์ได้รวดเร็วมาก คือภายในเวลา 0.1 วินาที ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้กับงานที่ต้องการสับเบรกเกอร์ซ้ำโดยอัตโนมัติด้วยความเร็วสูง และยังมีข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือ ใช้แรงในการขับสปริงไม่มากนัก จึงใช้มอเตอร์ขับตัวเล็ก กินกระแสไฟฟ้าน้อย แต่จะมีข้อเสียอยู่ที่ว่าไม่สามารถทำการทริปอิสระ (Free Trip) ได้ การนำไปใช้งานจึงอยู่ในวงจำกัด



รูปที่ 10.10 ชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยสปริง

10.3.5 การทำงานด้วยนิวแมติก (Pneumatic Operation) สำหรับการทำงานด้วยนิวแมติกนี้จะใช้กำลังลมอัดให้ชุดกลไกทำงาน จึงเหมาะสมที่จะใช้กับเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงทุกประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เพราะเซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภทนี้ก็ใช้กำลังลมอัดในการดับอาร์กอยู่แล้ว หลักการทำงานด้วยนิวแมติกคือการเปิดวาล์ว ปล่อยลมเข้าไปดันลูกสูบดังรูปที่ 10.11 ซึ่งก้านสูบจะต่อเชื่อมโยงไปยังหน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อลูกสูบถูกดันโดยลมอัดทำให้เคลื่อนตัว ก้านสูบก็จะส่งแรงไปทริปเบรกเกอร์ตามต้องการ สำหรับลมอัดจากเครื่องอัดอากาศในกรณีที่เป็นแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ก็มักใช้ชุดเดียวกับที่ใช้ในการดับอาร์กนั่นเอง และในกรณีนี้จะใช้ความดัน 120 – 350 ปอนด์/ตารางนิ้ว แต่ถ้าเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภทอื่น จะต้องติดตั้งเครื่องอัดอากาศต่างหากโดยเฉพาะ ก็อาจใช้ความดันต่ำกว่านี้ได้ ชุดกลไกทำงานแบบทำงานด้วยนิวแมติกสามารถทริปได้รวดเร็วมากคือประมาณ 0.05 ถึง 0.12 วินาที นอกจากนี้ยังสามารถทริปได้เป็นอิสระและสามารถควบคุมการทำงานได้ดี



รูปที่ 10.11 ชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยนิวแมติก

10.3.6 การทำงานด้วยไฮดรอลิก (Hydraulic Operation) ดังรูป 10.12 จะใช้กำลังน้ำมันอัดล้วน ๆ หรือใช้ประกอบร่วมกับกำลังลมอัด มีปั๊มไฮดรอลิกอัดน้ำมันให้มีความดัน 4000 ปอนด์/ตารางนิ้ว แล้วให้น้ำมันนี้ไปอัดอากาศหรือก๊าซไนโตรเจนที่อยู่ในถังเก็บก๊าซ (Accumulator) อีกต่อหนึ่ง

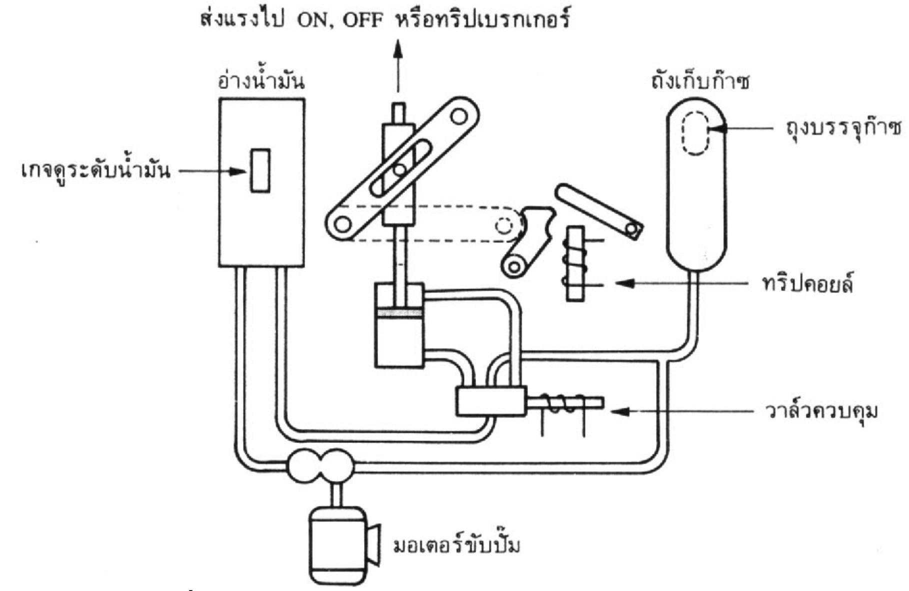
จากถังเก็บก๊าซจะมีสายน้ำมันต่อไปยังกลไกการสับหน้าสัมผัสของเบรกเกอร์ เมื่อวาล์วควบคุมเปิดอากาศหรือก๊าซไนโตรเจนที่อยู่ในถังเก็บก๊าซ ก็จะอัดน้ำมันให้ไปดันกลไกให้ทำการสับเบรกเกอร์ ส่วนการที่เบรกเกอร์จะทริปอิสระนั้น จำเป็นต้องใช้ชุดทางกลต่างหากเข้าช่วย ชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยไฮดรอลิกดีกว่าแบบอื่นคือ

(ก) เนื่องจากใช้น้ำมันมีความดันสูง ฉะนั้นท่อน้ำมันจึงใช้ขนาดเล็กได้ไม่เกะกะเหมือนกับท่อลมในแบบนิวแมติก

(ข) ถ้าไฟฟ้าขัดข้องไม่สามารถเดินปั๊มไฮดรอลิกได้ ก็อาจใช้การอัดด้วยสูบมือ

(ค) ในการตรวจตราชิ้นส่วนภายในหรือภายนอก หรือในการตรวจสอบการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่ต้องการให้เซอร์กิตเบรกเกอร์สับหรือปลดช้า ๆ ก็อาจทำได้โดยค่อย ๆ ปล่อยน้ำมันที่วาล์ว การเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเบรกเกอร์ก็จะเป็นไปอย่างช้า ๆ

(ง) ทำงานได้รวดเร็วกว่าชุดกลไกทำงานแบบอื่น ๆ

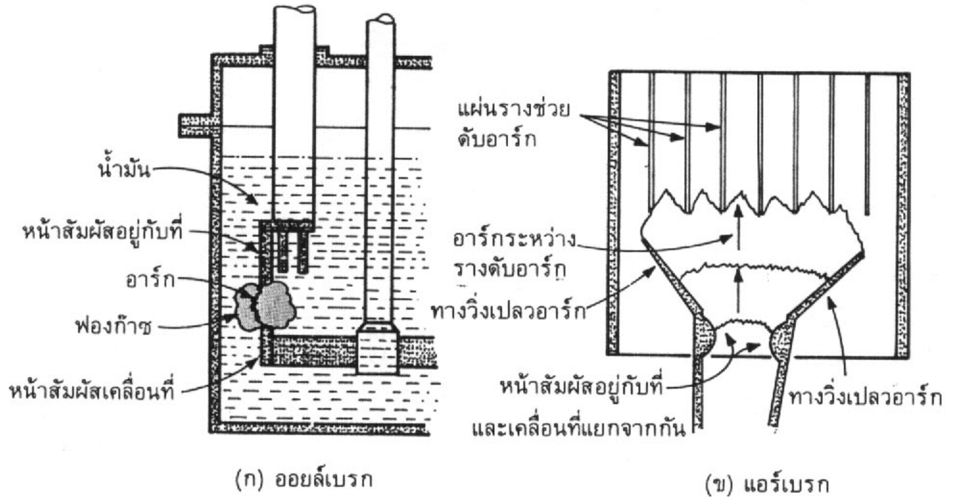


รูปที่ 10.12 ชุดกลไกทำงานแบบการทำงานด้วยไฮดรอลิก

10.4 อินเตอร์รัพเตอร์

10.4.1 กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (Interrupting Current) หรือกระแสขณะตัดวงจร ในเมื่อที่ระบบไฟฟ้าเกิดสภาวะโหลดเกินหรือลัดวงจร รีเลย์จะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริป ในขณะที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์กำลังแยกออกจากกัน จะทำให้เกิดเปลวอาร์กกระโดดข้ามช่องระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองข้างดังรูปที่ 10.13 ความรุนแรงของอาร์กจะขึ้นอยู่กับกระแสฟอลต์มากน้อยเพียงใด

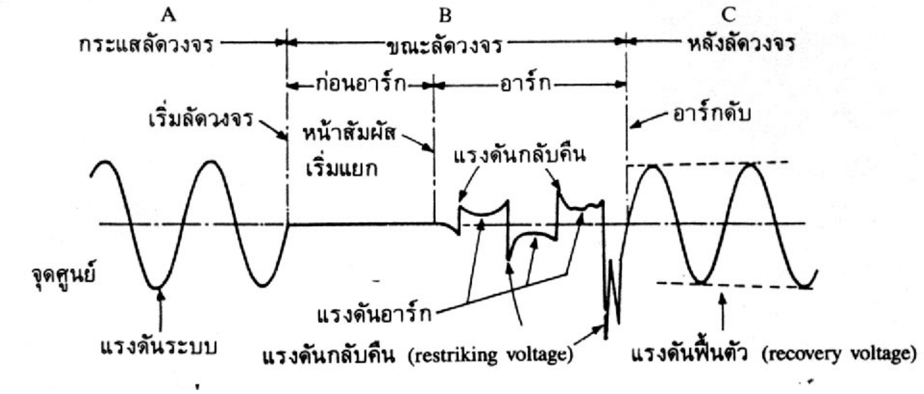
ในขณะที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์เริ่มแยกออกจากกัน ความต้านทานหน้าสัมผัสทั้งสองจะเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอันเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าสูญเสีย **(I^2R)** อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นผลทำให้อิเล็กตรอนอิสระและไอออนถูกดึงหลุดออกจากหน้าสัมผัสทั้งสอง ทำให้เกิดไอออนไนซ์ระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหน้าสัมผัสต่อไปได้ และจะเกิดประกายไฟระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองเรียกว่า*อาร์ก* อาร์กที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอออน อิเล็กตรอน และส่วนผสมของก๊าซ ทำให้มีความร้อนสูงประมาณ 5000 - 8000 K เรียกว่า *พลาสม่า (Plasma)* และจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทำให้อาร์กยิ่งเดินได้สะดวกและเพิ่มความรุนแรงมากขึ้น เซอร์กิตเบรกเกอร์จึงต้องได้รับการออกแบบให้สามารถดับอาร์กได้รวดเร็วภายในเวลาไม่เกิน 8 ไซเคิลหรือ 0.16 วินาทีหลังจากลัดวงจร แต่ถ้าเซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถดับอาร์กในเวลาที่กำหนดได้ การระเบิดเสียหายจะเกิดขึ้นทันที ฉะนั้นเซอร์กิตเบรกเกอร์จะต้องมีอุปกรณ์ตัวหนึ่งเรียกว่า *อินเตอร์รัพเตอร์ (Interrupter)* หรือตัวตัดการไหลของกระแสซึ่งจะมีหน้าที่คือ เมื่อหน้าสัมผัสแยกทั้งสองข้างออกจากกันก็จะขัดจังหวะการไหลของกระแสซึ่งหมายถึงทำให้เปลวอาร์กนั้นดับลงนั่นเอง



รูปที่ 10.13 เกิดเปลวอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองข้างของเซอร์กิตเบรกเกอร์

10.4.2 การดับอาร์ก วิธีดับอาร์กมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน และแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างกระแสตรงและกระแสสลับ การดับอาร์กไฟฟ้ากระแสสลับนั้นง่ายกว่ากระแสตรง เพราะกระแสสลับจะผ่านศูนย์สองครั้งในหนึ่งไซเคิล ดังรูป 10.14 ส่วนกระแสตรงนั้นจะคงที่ตลอดเวลา คือไม่มีกระแสไหลลงสู่ศูนย์ ฉะนั้นการดับอาร์กสำหรับกระแสตรงนั้น จึงต้องพยายามลดกระแสให้ลดต่ำลงที่สุด โดยการเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าให้สูงขึ้น โดยการทำให้อาร์กมีระยะความยาวมากขึ้น สำหรับการตัดกระแส

อาร์กของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับนั้น คือต้องป้องกันไม่ให้กระแสไหลได้อีกในขณะที่ผ่านศูนย์ไป และต้องทำให้อัตราการคืนสภาพของความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) นั้นสูงกว่าแรงดันฟื้นตัวของระบบ (System Recovery Voltage) การดับอาร์กจึงจะสำเร็จได้ แต่ถ้ากระแสลดลงผ่านศูนย์แล้วอาร์กยังดับไม่สำเร็จ ก็จะทำให้แรงดันของอาร์กสูงขึ้นทันทีเรียกว่า *แรงดันกลับคืน (Restriking Voltage)* อาร์กก็จะเกิดขึ้นซ้ำอีก ปรากฏการณ์นี้ไม่มีผลดีต่อการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังนั้นจึงต้องพยายามที่จะจำกัดแรงดันฟื้นตัวให้ต่ำ ๆ เอาไว้ การต่อลงดินของระบบสายส่ง การติดตั้งล่อฟ้า เพื่อให้ระดับแรงดันวาบไปตามผิวต่ำกว่าระดับการฉนวน (Insulation Level) ของเบรกเกอร์ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะจำกัดค่าแรงดันฟื้นตัวได้



รูปที่ 10.14 แรงดันก่อนลัดวงจร ขณะลัดวงจร และหลังลัดวงจร

สำหรับเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง การที่จะออกแบบเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้มีความคงทนของไดอิเล็กตริกระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองกลับเข้าสู่สภาพการเป็นฉนวนโดยเร็ว มักเพิ่มตัวกลางในการดับอาร์ก โดยมีการสร้างอินเตอร์รัพต์เตอร์สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1. แอร์เบรกอินเตอร์รัพเตอร์
2. แอร์บลาสต์อินเตอร์รัพเตอร์
3. ออยล์อินเตอร์รัพเตอร์
4. แวคคิวอัมอินเตอร์รัพเตอร์
5. ก๊าซ $\mathbf{SF_6}$ อินเตอร์รัพเตอร์

10.5 การแบ่งชนิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงตามพิกัดแรงดันไฟฟ้า

เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงจำแนกตามพิกัดแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

1. **เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงปานกลาง (Medium Voltage Circuit Breaker)** คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับตั้งแต่ 1.5 kV – 3.4 kV

2. **เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง (High Voltage Circuit Breaker)** คือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับวงจรไฟฟ้ากกระแสสลับตังแต่ 34.5 kV ขึ้นไป

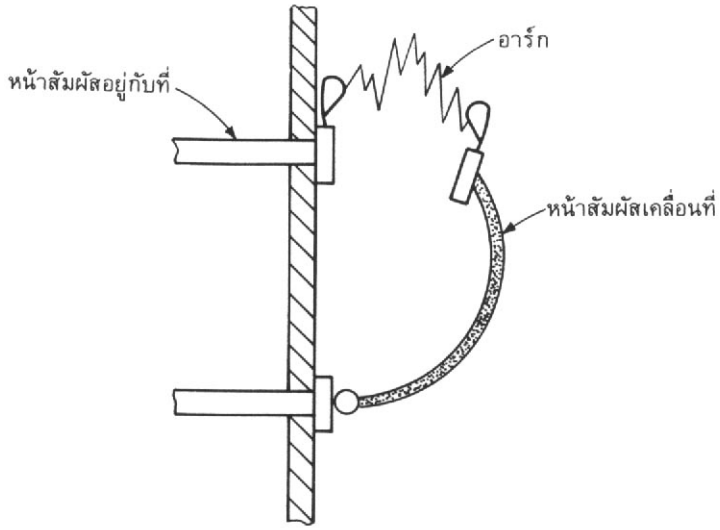
อนึ่ง เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้กับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับตั้งแต่ 1.5 kV ขึ้นไป คือเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงปานกลางและเซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง จะเรียกรวม ๆ ว่า “เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง” *(High Voltage Power Circuit Breaker)*

10.6 ประเภทของเพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง

เพาเวอร์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูงนั้น จะเรียกชื่อประเภทตามตัวกลางที่ใช้ในการดับอาร์กอันได้แก่แอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์ แอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ แวคคิวอัมเซอร์กิตเบรกเกอร์ และก๊าซเซอร์กิตเบรกเกอร์

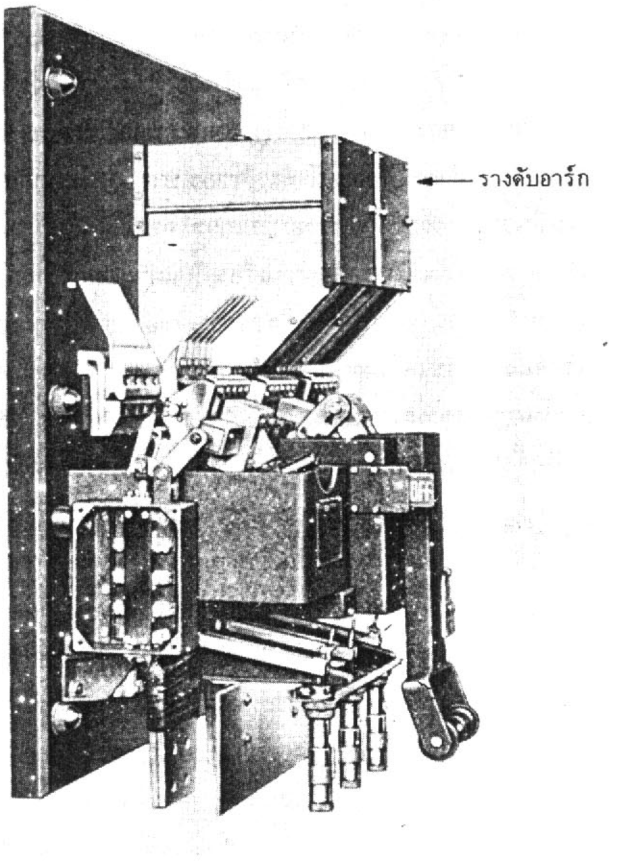
10.6.1 แอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Air Break Circuit Breaker) ตัวตัดการไหลของกระแสหรืออินเตอร์รัพเตอร์ จะใช้อากาศธรรมชาติเป็นตัวกลางในการดับอาร์ก ซึ่งเป็นหลักการที่ง่ายที่สุด ในขณะที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกออกจากกันก็จะมีอาร์กเกิดขึ้น อากาศบริเวณโดยรอบอาร์กจะร้อนและลอยตัวขึ้นข้างบน พร้อม ๆ กับอากาศเย็นที่อยู่ใกล้ ๆ บริเวณนั้นก็จะเข้ามาแทนที่และดับอาร์กไปในตัว ส่วนความยาวของอาร์กจะมากน้อยอย่างไรนั้น ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันระหว่างหน้าสัมผัสในขณะขัดจังหวะการไหลของกระแส เบรกเกอร์ที่ใช้อากาศเป็นอินเตอร์รัพเตอร์ ควรเป็นแบบเปิด (Open Type) ดังรูปที่ 10.15 ทั้งนี้เพื่อให้อากาศร้อนได้ลอยตัวขึ้นโดยอิสระ แต่หากถ้าเป็นอินเตอร์รัพเตอร์แบบในกล่องหุ้ม (Enclosed Ttype) ด้วยแล้ว การดับอาร์กด้วยวิธีดังกล่าวจะไม่ได้ผล จะต้องติดตั้งอุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเติม เช่น รางดับอาร์ก (Arc Chute) แผ่นแยกอาร์ก (Arc Barrier) และขั้วทางเดินอาร์ก (Arc Runner) เป็นต้น ดังรูปที่ 10.6 เมื่อหน้าสัมผัสของเบรกเกอร์แยกออก จะเกิดอาร์กและอาร์กก็จะเกาะไต่ไปตามขั้วทางเดินอาร์ก และขยายตัวออกไปเกาะไต่ตามแผ่นแยกอาร์ก ทำให้ลำอาร์กใหญ่ ๆ ถูกแยกออกเป็นอาร์กเล็ก ๆ พร้อมกันนี้ก็จะคายความร้อนกับแผ่นแยกอาร์ก ทำให้ลำอาร์กเย็นตัวลงและดับได้โดยง่ายและรวดเร็ว สำหรับการดับอาร์กด้วยวิธีธรรมชาติของแอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันและกระแสไม่สูงนัก ในการติดตั้งแอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์จะติดตั้งอยู่ในตู้สวิตช์เกียร์ (Switch Gear) ดังรูปที่ 10.17 อย่างไรก็ตาม ถ้าระบบไฟฟ้าที่มี

แรงดันไฟฟ้าและกระแสสูง ๆ เปลวอาร์กก็จะใหญ่และรุนแรงเป็นเงาตามตัว ซึ่งจะทำให้การดับอาร์กอาจมีปัญหา ฉะนั้นจึงมีการเพิ่มเติมขดลวดเป่าดับอาร์ก (Blow-Out Coil) ดังรูปที่ 10.18 ขดลวดเป่าดับอาร์กจะสร้างสนามแม่เหล็กให้เกิดขึ้นตามทิศทางการเดินของกระแส จะช่วยผลักดันให้ลำอาร์กใหญ่ ๆ ถูกแบ่งแยกออกไปจากหน้าสัมผัสหลัก ให้พุ่งเข้าไปหาแผ่นแยกอาร์กทางด้านบนแทน แผ่นแยกอาร์กก็จะแยกอาร์กออกเป็นลำอาร์กย่อย ๆ จนทำให้อาร์กดับในที่สุด ซึ่งอาจเรียกเบรกเกอร์ชนิดนี้ว่า *"แอร์แมกเนติกเซอร์กิตเบรกเกอร์"* ซึ่งจะมีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 2.4, 4.6, 7.2 และ 13.8 kV พิกัดกระแสใช้งานต่อเนื่องตั้งแต่ 1200 ถึง 1300 A

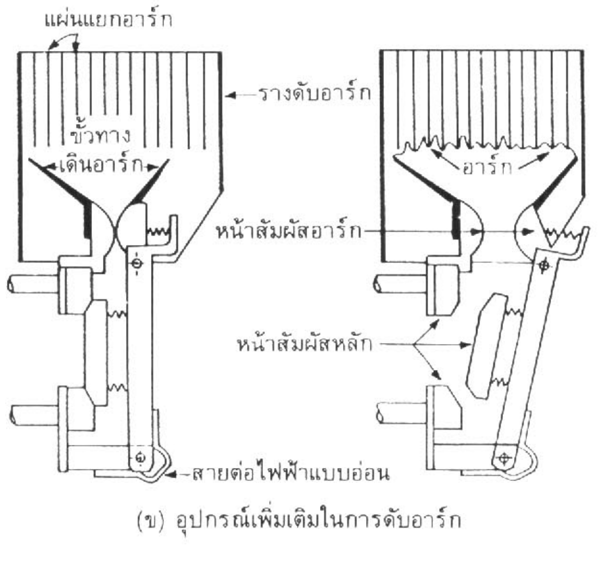


รูปที่ 10.15 แอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบเปิด

รูปที่ 10.16 แอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบในกล่องหุ้ม

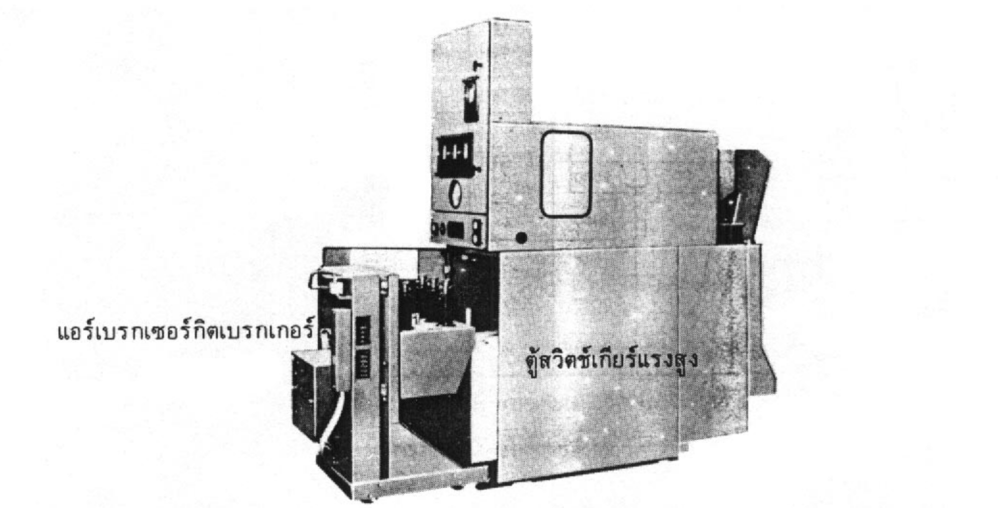


(ก) แอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์ถอดรางดับอาร์กด้านซ้ายมือให้เห็น

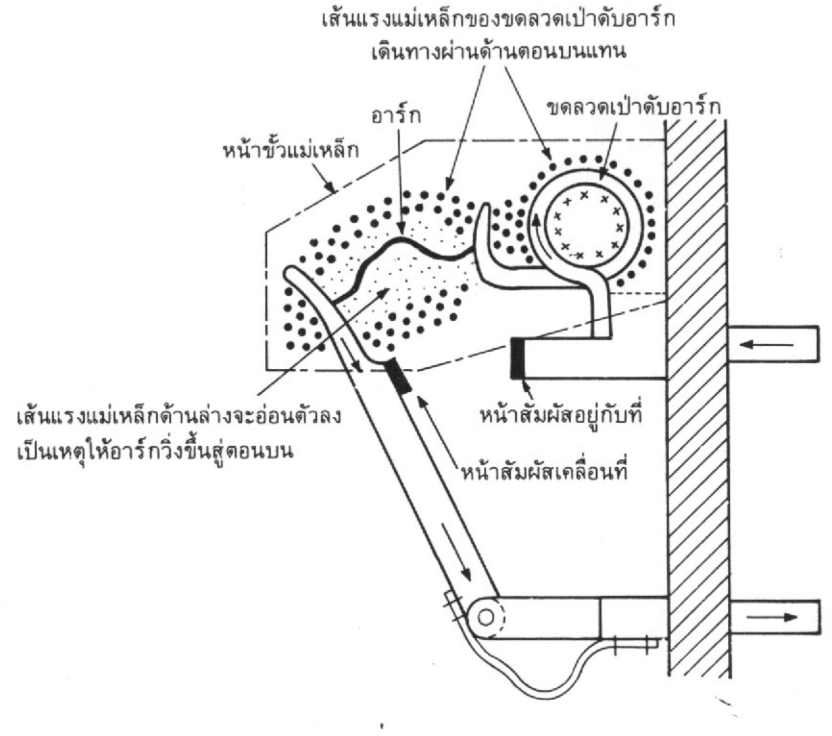


(ข) อุปกรณ์เพิ่มเติมในการดับอาร์ก

รูปที่ 10.16 แอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบในกล่องหุ้ม

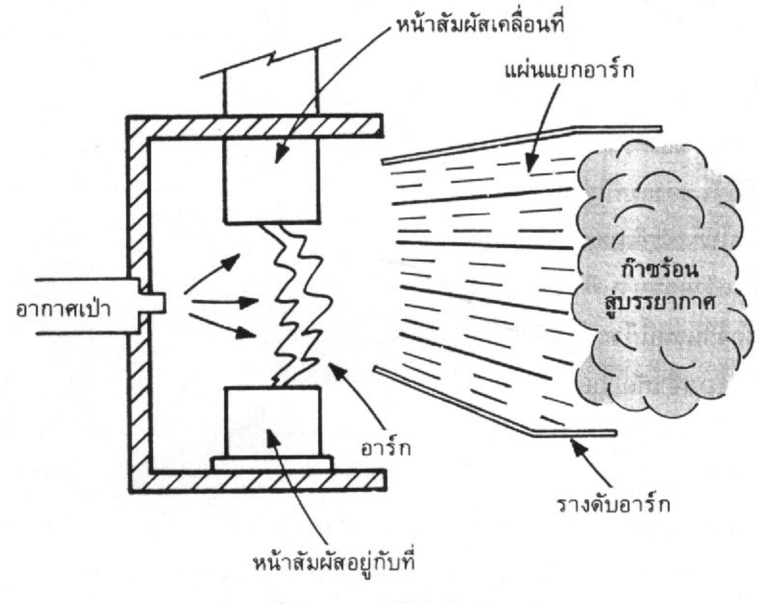


รูปที่ 10.17 แอร์เบรกเซอร์กิตเบรกเกอร์ติดตั้งในตู้สวิตช์เกียร์แรงสูงแบบชักออก (Draw-Out Type)



รูปที่ 10.18 แอร์แมกเนติกเซอร์กิตเบรกเกอร์

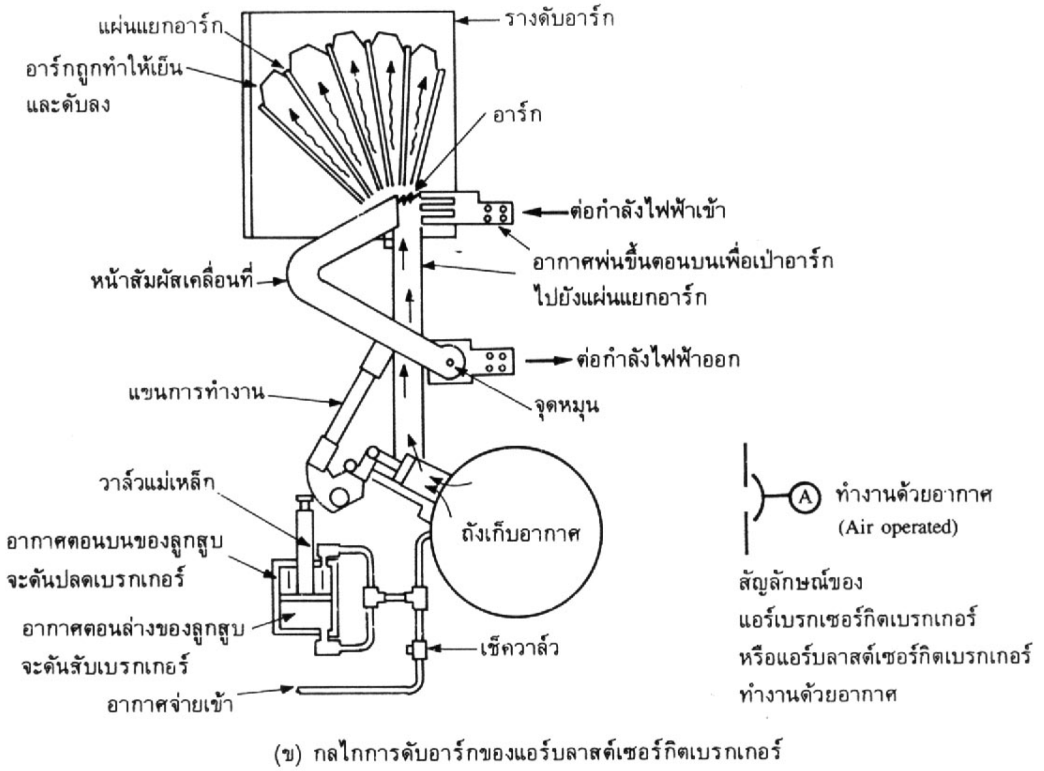
10.6.2 แอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Air Blast Circuit Breaker) หรือเรียกว่า **ABB** เซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภทนี้จะใช้กำลังลมอัดไปเป่าอาร์กให้ดับ เช่นเดียวกับที่เราใช้ปากเป่าเทียนให้ดับ ดังรูปที่ 10.20 ความดันของลมที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 100 ถึง 250 ปอนด์/ตารางนิ้ว และสามารถสั่งสับเบรกเกอร์ได้รวดเร็วมาก แต่ในขณะที่เบรกเกอร์ทริป กลไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะไปเปิดลิ้นลมพ่นผ่านหน้าสัมผัสทั้งสอง พร้อมทั้งเป่าอาร์กไปที่รางดับอาร์กและแผ่นแยกอาร์ก ซึ่งอาร์กจะถูกทำให้เย็นและดับลงอย่างรวดเร็ว แล้วลมอัดจำนวนนี้ก็จะถูกพ่นออกไปสู่ภายนอกบรรยากาศ สำหรับแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบเก่านี้ ลมอัดจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะในถังเก็บอากาศเท่านั้น ในขณะ **ON** เบรกเกอร์จะไม่มีการปล่อยอากาศออกมา แต่ถ้าเบรกเกอร์ทริปหรือ **OFF** เบรกเกอร์ ถังเก็บอากาศจะถูกเปิดให้ปล่อยลมพ่นผ่านหน้าสัมผัสเพื่อดับอาร์ก จากกรรมวิธีเช่นนี้ภายหลังพบว่าไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติหลายประการ เช่น การที่ปล่อยลมอัดแรงสูงเข้าไปทันทีทันใดอย่างกะทันหัน ย่อมก่อให้เกิดแรงทางกลแก่ฉนวน และชิ้นส่วนภายในอาจชำรุดเสียหาย นอกจากนั้นการสั่นสะเทือนที่หน้าสัมผัสจะไปรบกวนความสามารถขณะตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ แอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ปัจจุบันจะเป็นระบบอัดความดันอยู่ในอินเตอร์รัพเตอร์อย่างถาวร ดังรูปที่ 10.21 วาล์วพ่นอากาศจะอยู่ตอนบนของตัวอินเตอร์รัพเตอร์ อากาศจะถูกอัดจากถังอัดอากาศผ่านท่อภายในเสาฉนวนแนวตั้งไปสู่อินเตอร์รัพเตอร์จนเต็ม และมีความดันที่คงที่ พร้อมที่จะพ่นอากาศออกทางวาล์วพ่นอากาศ เมื่อได้รับสัญญาณทริป ทำให้สลักถูกปลด



(ก) การใช้อากาศเป่าให้อาร์กดับ

รูปที่ 10.19 ส่วนประกอบและกลไกการทำงานของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์

หน้าสัมผัสแต่ละข้างจะถูกแยกออกจากกันเป็นอิสระด้วยแรงกลหรือนิวแมติก เมื่อทริปวาล์วเปิด วาล์วพ่นอากาศจะเปิด อากาศความดันสูงจากถังเก็บอากาศจะวิ่งผ่านหน้าสัมผัสเพื่อดับอาร์ก และพ่นออกสู่อากาศจึงจะปิด เซอร์กิตเบรกเกอร์ก็จะถูกบรรจุอากาศจนเต็มอย่างเดิม อย่างไรก็ตาม เมนอินเตอร์รัพเตอร์

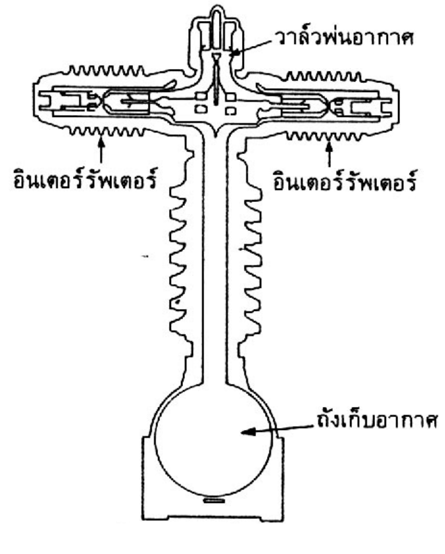


(ข) กลไกการดับอาร์กของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์

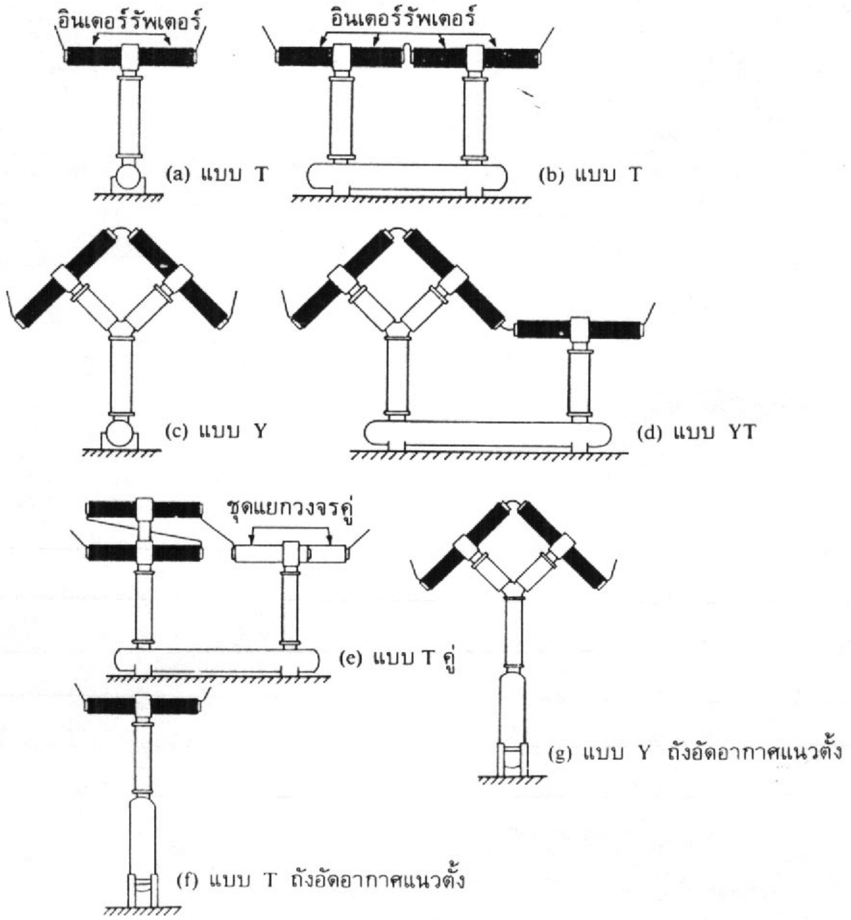
รูปที่ 10.20 ส่วนประกอบและกลไกการทำงานของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์

สามารถสับซ้ำได้ภายหลังจากการอินเตอร์รัพต์และอาร์กดับลงอย่างสมบูรณ์ โครงสร้างของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงสูง อาจเป็นชนิดมีอินเตอร์รัพเตอร์หลายชุดบนเสาฉนวนเดี่ยว การจัดอินเตอร์รัพเตอร์อาจมี 2, 4, 6 หรืออื่น ๆ แต่โดยทั่วไปที่พบเห็นมักจะมี 2 อินเตอร์รัพเตอร์บนเสาฉนวนเดี่ยวตัว “T” ส่วนการจัดเป็น 4 อินเตอร์รัพเตอร์จะจัดเป็น 2 ชุด ปลายต่อชนกันบนเสาฉนวนรองรับ “Y” หรืออาจวางจัดอินเตอร์รัพเตอร์รูปแบบอื่น ๆ ดังรูปที่ 10.22 ส่วนรูปที่ 10.23 แสดงรูปตัดขวางของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์รูปแบบอินเตอร์รัพเตอร์เป็นตัว T ในขณะที่เบรกเกอร์ถูกสับต่อวงจรอยู่ อินเตอร์รัพเตอร์ความต้านทานจะปลดวงจรอยู่ ทำให้ความต้านทางเปิดวงจร แต่ถ้าเบรกเกอร์ทริปสลักไกทริปจะเปิดหน้าสัมผัสของเมนอินเตอร์รัพเตอร์ที่ยังปิดอยู่ แท่งดึงกลไกจะดึงผ่านรูเสาฉนวนภายใต้แรงสปริงไปเปิดทริปวาล์ว อากาศจะดันลูกสูบเปิดวาล์วพ่นอากาศ H โดยอากาศนี้จะถูกเปิดให้ผ่านท่อ K และ

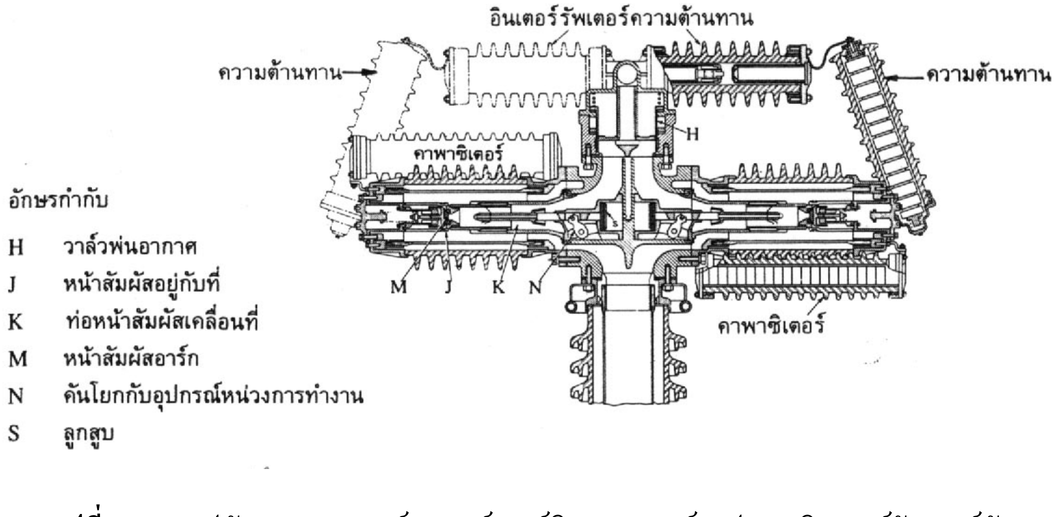
ด้านหลังของลูกสูบ S ความแตกต่างของความดันอากาศเป็นเหตุให้ลูกสูบเคลื่อนที่ ท่อและหน้าสัมผัสจะถอยหลัง หน้าสัมผัสเคลื่อนที่จะแยกออกจากหน้าสัมผัสอยู่กับที่ J ก่อน หลังจากนั้นหน้าสัมผัสอาร์ก M จึงจะแยกออกจากกัน ในเวลาเดียวกันอินเตอร์รัพเตอร์ความต้านทานก็จะถูกสับเข้าไป เมื่อหน้าสัมผัสอาร์กแยกออกจากหน้าสัมผัสอยู่กับที่จะเกิดอาร์ก และอาร์กจะถูกตัดให้ขาดด้วยการพ่นอากาศผ่านหัวฉีดสู่บรรยากาศที่วาล์วพ่นอากาศ จนกระทั่งอาร์กดับลง หลังจากนั้นอินเตอร์รัพเตอร์ความต้านทานจะเปิดออกด้วยแรงสปริง ทั้งนี้เพื่อตัดกระแสไหลผ่านความต้านทาน ในเวลาเดียวกันเมื่อลูกสูบ S เคลื่อนที่เป็นเหตุให้คันโยก N เคลื่อนที่หน่วงแรงสปริงให้ปรับตั้งทริปวาล์วใหม่ วาล์วพ่นอากาศก็จะถูกปิดภายใต้แรงดันสปริง ส่วนรูปที่ 10.24 แสดงรูปตัดขวางของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดเสาเดี่ยวรูปแบบอินเตอร์รัพเตอร์ตัว T ส่วนรูปที่ 10.25 แสดงแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 330 kV 10000 MVA ของโรงไฟฟ้าเขื่อนไนเกอร์ (Niger Dum) ที่ไนจีเรีย ส่วนรูปที่ 10.26 แสดงแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 400 kV 2000 MVA นำมาทดสอบในห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง



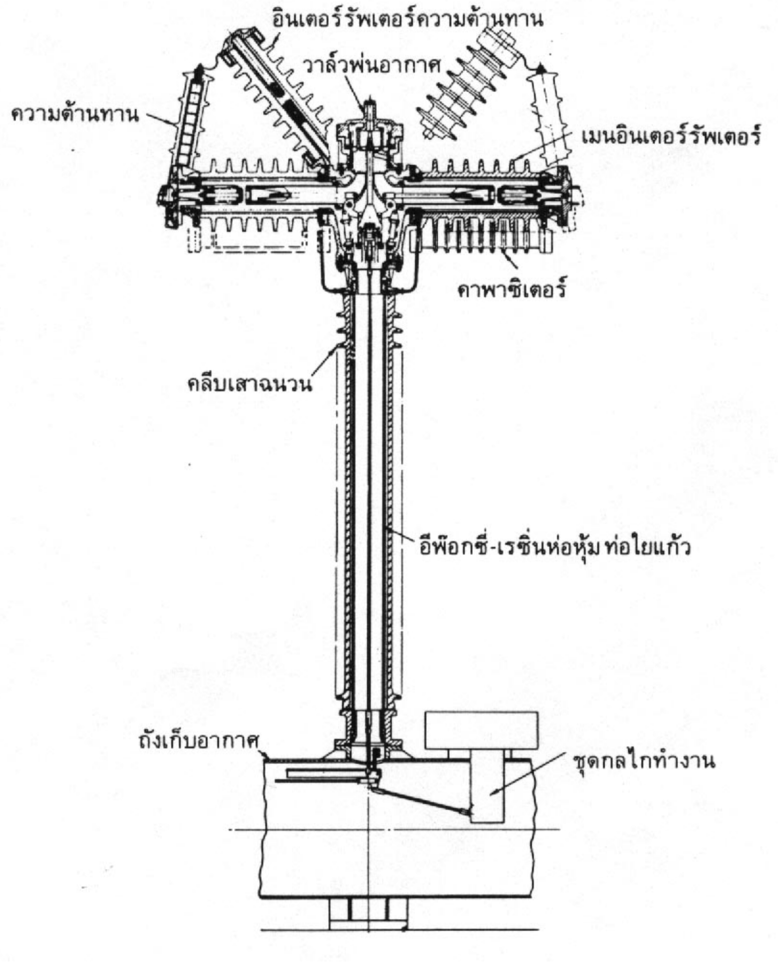
รูปที่ 10.21 แอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ระบบอัดความดันอยู่ในอินเตอร์รัพเตอร์



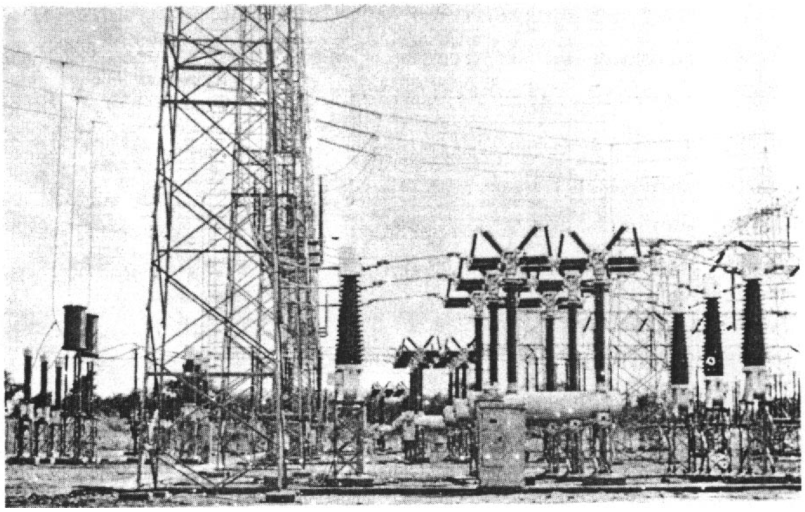
รูปที่ 10.22 การจัดรูปแบบอินเตอร์รัพเตอร์ของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์



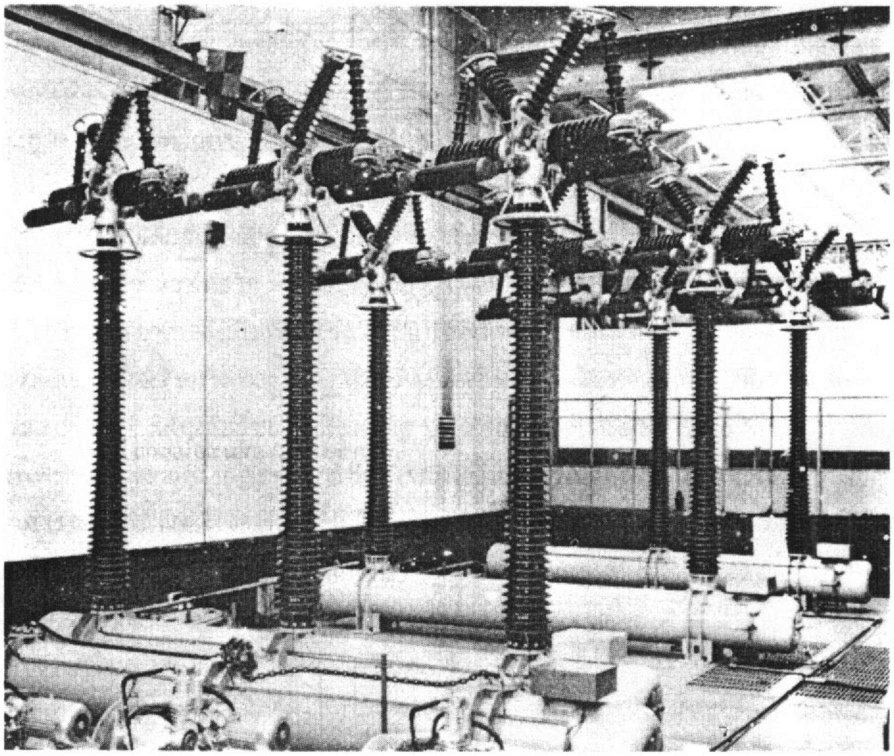
รูปที่ 10.23 รูปตัดขวางของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ รูปแบบอินเตอร์รัพเตอร์ตัว T



รูปที่ 10.24 รูปตัดขวางของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์บนเสาเดี่ยว อินเตอร์รัพเตอร์ตัว T



รูปที่ 10.25 แอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 330 kV 10000 MVA ของโรงงานไฟฟ้าเขื่อนไนเกอร์ที่ไนจีเรีย



รูปที่ 10.26 แอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 400 kV 20000 MVA ถูกนำมาทดสอบในห้องทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

ข้อดี ของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) ไม่มีอันตรายจากการระเบิดหรือเกิดไฟไหม้ จึงสามารถติดตั้งทั้งภายในและภายนอกอาคาร

(ข) การทำงานมีความเร็วสูง จึงเหมาะใช้สำหรับการสับซ้ำรวดเร็ว

(ค) สามารถจัดให้อินเตอร์รัพเตอร์ต่ออนุกรม เพื่อใช้กับแรงดันและความสามารถอินเตอร์รัพต์สูง ๆ ได้

(ง) มีน้ำหนักเบา

ข้อเสีย ของแอร์บลาสต์เซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) การทำงานมีเสียงดัง

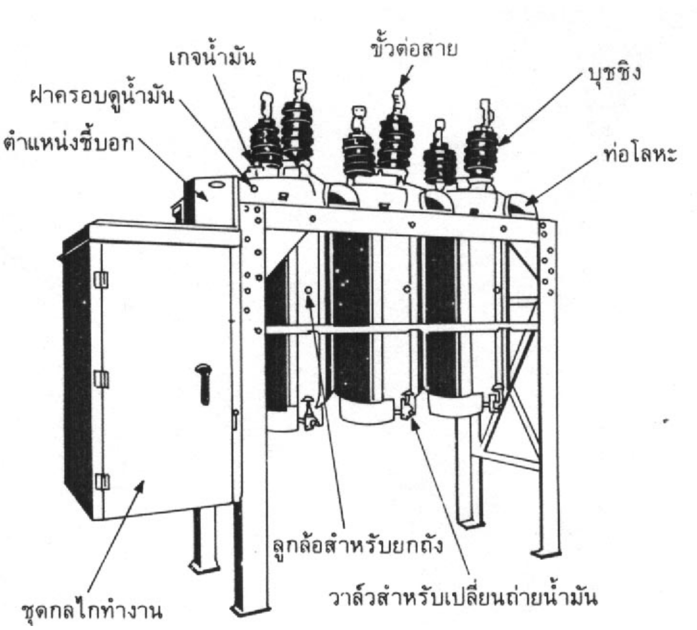
(ข) มีโอกาสที่ลมจะรั่ว

(ค) การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศมีความยุ่งยาก

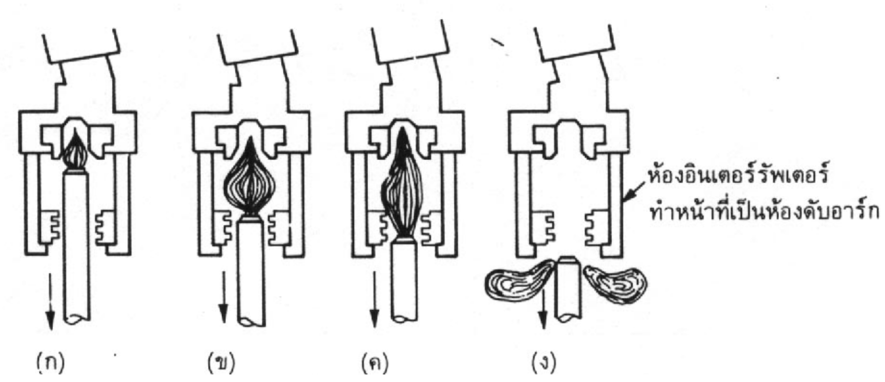
(ง) มีราคาแพงกว่าออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์

10.6.3 ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Oil Circuit Breaker) หรือเรียกว่า **OCB** เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ดับอาร์กโดยอาศัยน้ำมัน เป็นแบบที่เก่าแก่ที่สุด แต่ยังใช้กันอยู่ในปัจจุบันอย่างแพร่หลาย ดังรูปที่ 10.27 และสามารถใช้กับระดับแรงดันสูงถึง 420 kV ตัวอินเตอร์รัพเตอร์จะถูกจุ่มอยู่ในถังบรรจุน้ำมันในรูปที่ 10.28 แสดงวิธีการดับอาร์กเป็นขั้น ๆ ภายในห้องอินเตอร์รัพเตอร์ของออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เช่นรูปที่ 10.28 (ก) เป็นสภาพในขณะที่หน้าสัมผัสเริ่มแยกจากกันและเกิดเปลวอาร์กแลบขึ้น ความร้อนจากอาร์กจะเผาน้ำมันในบริเวรรอบ ๆ อาร์ก ทำให้น้ำมันระเหย แตกตัวเป็นคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนปริมาณหนึ่งที่มีความดันสูง ซึ่งพยายามจะกดพลังอำนาจของอาร์กไว้ พร้อม ๆ กันนั้นก็ทำการลดจำนวนไอออน (Deionize) ในเส้นทางเดินของลำอาร์ก และอาร์กก็จะอ่อนตัวลง เมื่อปลายหน้าสัมผัสเลื่อนมาจนถึงปากทางด้านในของห้องดับอาร์ก ดังรูปที่ 10.28 (ข) ก๊าซไฮโดรเจนในห้องดับอาร์กจะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้น้ำมันมีความดันสูงขึ้น การลดจำนวนไอออนอย่างมาก ทำให้อาร์กอ่อนกำลังลง และอาร์กก็จะดับลงในเวลาที่ปลายหน้าสัมผัสเลื่อนลงมาอยู่ในปากทางข้างนอกของห้องดับอาร์กพอดีดังรูปที่ 10.28 (ค) ส่วนรูปที่ 10.28 (ง) ก๊าซไฮโดรเจนภายในห้องดับอาร์กจะถูกดันออกมาข้างนอก แล้วน้ำมันก็จะไหลเข้าไปแทนที่

จากหลักการดับอาร์กของออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ จะเห็นว่ายิ่งอาร์กมีมากและรุนแรงเท่าใด การเกิดก๊าซไฮโดรเจนความดันสูงในน้ำมันก็จะมีเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นซึ่งมีปริมาณถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 40 เปอร์เซ็นต์เป็นพวกก๊าซไฮโดรคาร์บอนและไอน้ำมัน ทำให้มีคุณสมบัติในการลดจำนวนไอออนอย่างรวดเร็ว อาร์กก็จะดับสนิทโดยรวดเร็วเช่นเดียวกัน เท่ากับว่าเป็นการเพิ่มก๊าซไฮโดรเจนในน้ำมันให้มีมากขึ้น จึงเป็นการลดความเป็นฉนวนของน้ำมันลง เข้าตำราที่ว่ายิ่งมีความใหญ่โตเท่าใด ความใหญ่โตจะกลับมาฆ่าตนเองเร็วขึ้นเท่านั้น โดยเหตุนี้การกำหนดค่าพิกัดเวลาอินเตอร์รัพต์ของออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์อย่างต่ำสุดจะพิจารณาที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของกระแสอินเตอร์รัพต์สูงสุดเป็นหลัก



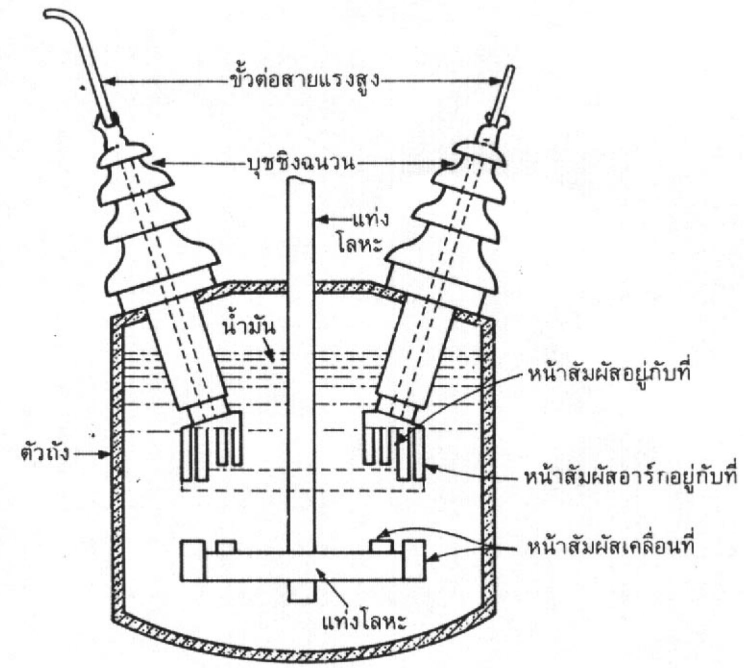
รูปที่ 10.27 รูปแบบของออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์



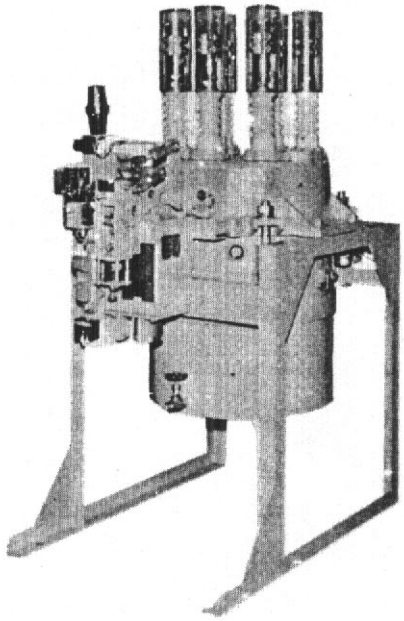
รูปที่ 10.28 ขั้นตอนการดับอาร์กภายในห้องอินเตอร์รัพเตอร์

ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่ใช้งานทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ และมินิมัมออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์

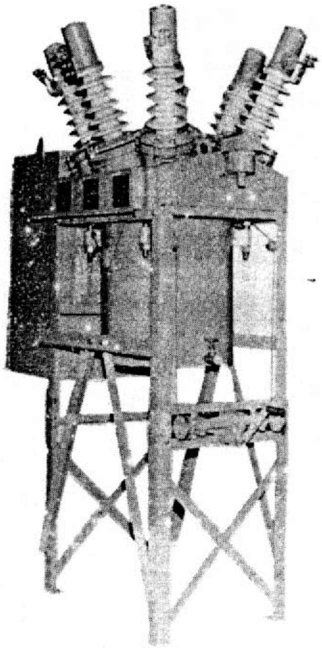
1. บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Bulk Oil Circuit Breaker) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดที่ใช้น้ำมันมาก อินเตอร์รัพเตอร์ของเซอร์กิตเบรกเกอร์อยู่ภายในถังเหล็กใหญ่บรรจุน้ำมันอยู่เต็มดังรูปที่ 10.29 จึงมีชื่อเรียกว่า *แบบตัวถังไม่มีไฟ (Dead Tank)* จะมีขนาดแรงดันไม่เกิน 36 kV บางครั้งอาจสร้างถึง 132 kV พิกัดกำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ 1000 MVA จะใช้ถังใหญ่ใบเดียวทั้ง 3 เฟส จึงเรียกว่า *เบรกเกอร์ถังเดี่ยว (Single Tank)* มีให้เลือกใช้ทั้งชนิดติดตั้งภายในอาคารดังรูปที่ 10.30 และชนิดติดตั้งภายนอกอาคาร ดังรูปที่ 10.31 แต่ถ้าต้องการแรงดันไฟฟ้าและพิกัดกระแสอินเตอร์รัพต์สูงกว่านี้มักจะเป็นถังละเฟส เป็น 3 ถังด้วยกันดังรูปที่ 10.32 นอกจากนี้บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ยังมีอีกแบบหนึ่งคือ แบบตัวถังมีไฟ (Live Tank) คือส่วนที่บรรจุน้ำมันเป็นกระบอกเหล็กขนาดย่อม ๆ หน้าสัมผัสยืดหยุ่น (Flexible Contact) ติดอยู่ภายในที่ก้นกระบอกทางด้านล่าง หน้าสัมผัสตัวบนเป็นก้านยาวเลื่อนขึ้นเลื่อนลงอยู่ภายในกระบอก ขณะที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ถูกสั่งให้ **ON** หน้าสัมผัสอันบนจะเลื่อนลงมาสัมผัสแน่นกับหน้าสัมผัสอันล่างเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ด้านใต้ถังจะมีฉนวนรองรับยึดติดกับโครง ฉะนั้น บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีชื่อว่า แบบตัวถังมีไฟ จะแตกต่างไปจากแบบตัวถังไม่มีไฟ ทั้งนี้เพราะตัวถังไม่มีกระแสไหลผ่าน เนื่องจากมีน้ำมันเป็นฉนวนกั้น



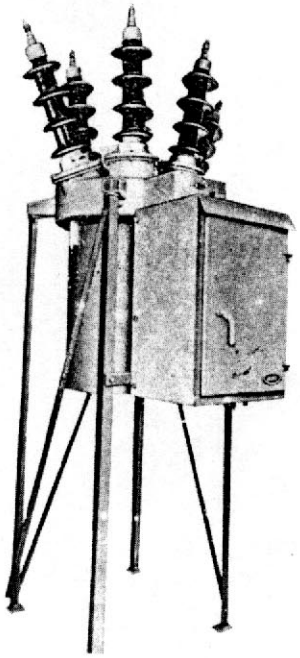
รูปที่ 10.29 บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์



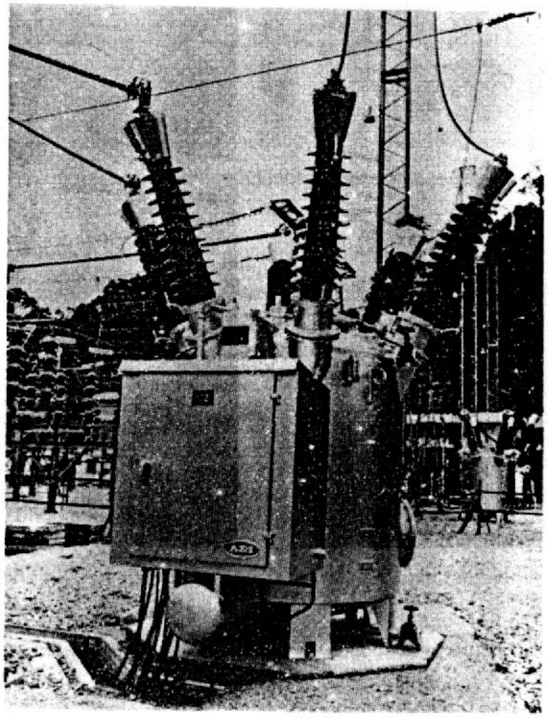
รูปที่ 10.30 บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดถังเดี่ยว ขนาด 12 kV 400 – 800 Z 16/25 kA ติดตั้งภายในอาคาร



(ก) ขนาด 24 kV 600–1200 A 12.5 kA

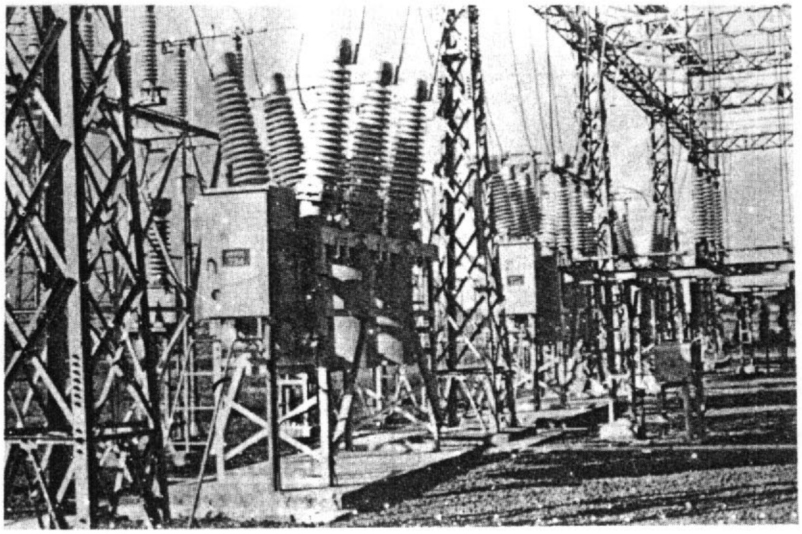


(ข) ขนาด 33 kV 600-2000 A 16 kA

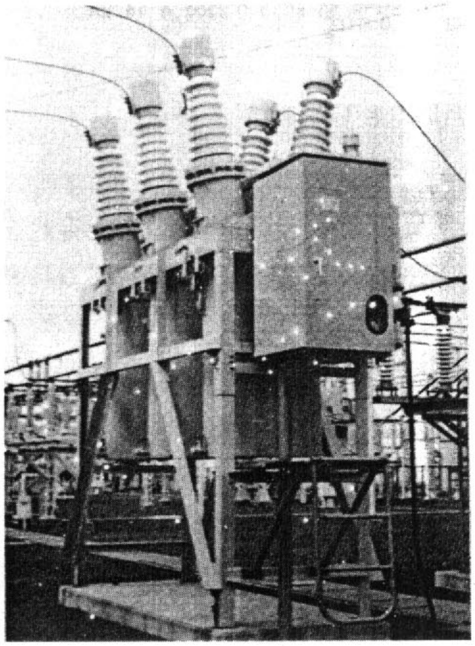


(ค) ขนาด 110/132 kV 1200 A 120 kA

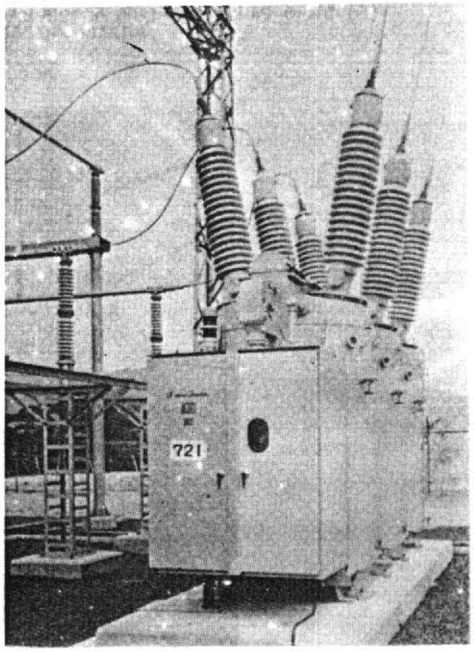
รูปที่ 10.31 บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดถังเดี่ยวติดตั้งภายนอกอาคาร



(ก) ขนาด 84 kV 600-1200 A 12.5/20/25 kA



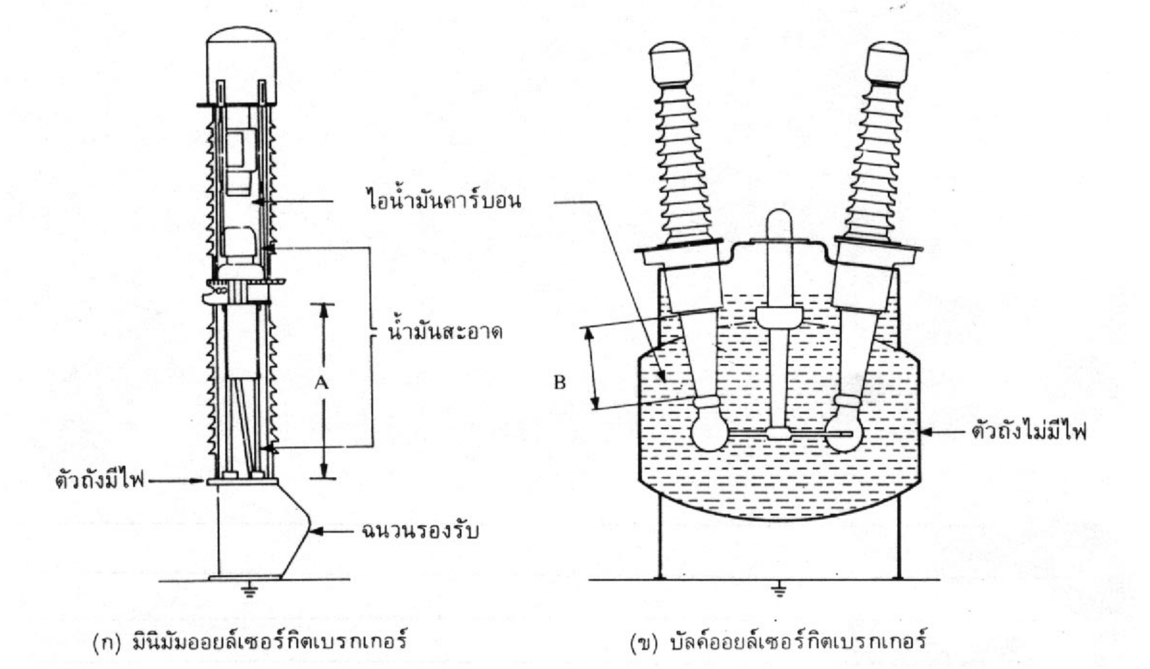
(ข) ขนาด 72 kV 800-2000 A 25/31.5 kA



(ค) ขนาด 120 kV 1200-2000 A 25 kA

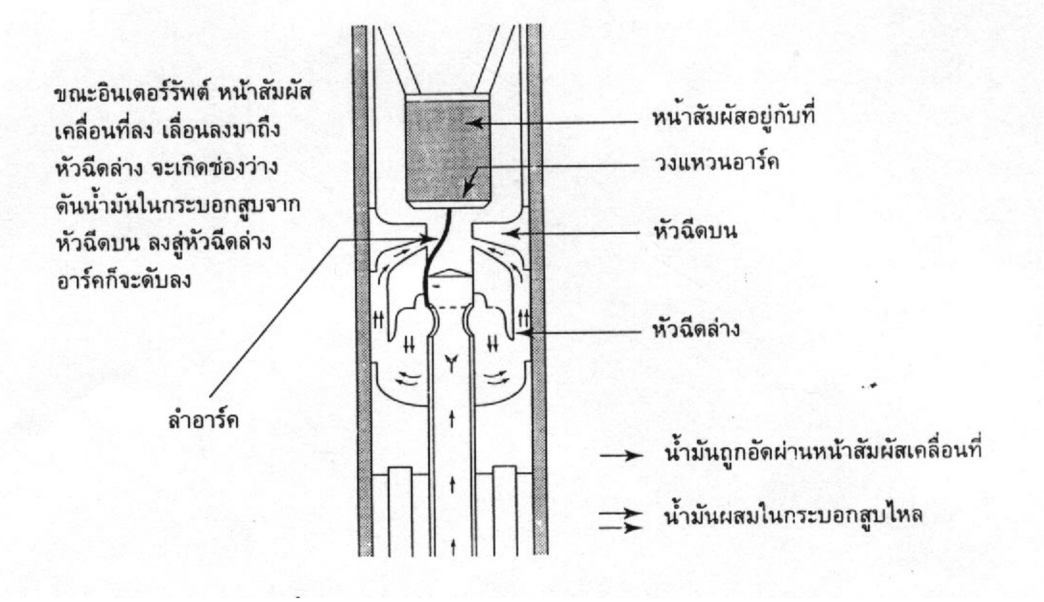
รูปที่ 10.32 บัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ ชนิด 3 ถัง ติดตั้งภายนอกอาคาร

2. มินิมัมออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Minimum Oil Circuit Breaker) เป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้น้ำมันน้อย และเป็นแบบตัวถังมีไฟ ดังรูปที่ 10.33 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดนี้จะใช้น้ำมัน 1 ใน 10 เท่า ของบัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าเทียบกับดินที่ A (ผ่านน้ำมันสะอาด) ดังรูปที่ 10.33 (ก) และที่ B (ผ่านไอน้ำมันคาร์บอน) ดังรูปที่ 10.33 (ข) สำหรับในการดับอาร์กนั้น โดยอาศัยการพ่นน้ำมัน จากลูกสูบทำงานด้วยสปริง อัดน้ำมันให้ฉีดอย่างแรง การตัดกระแสอาร์กจึงเป็นไปโดยฉับพลันทันที ดังรูปที่ 10.34 ฉะนั้นค่ากระแสขณะอินเตอร์รัพต์ไม่ว่าจะมากหรือน้อย ก็สามารถตัดกระแสอาร์กในเวลาสั้น ๆ เช่นกัน



รูปที่ 10.33 เปรียบเทียบมินิมัมออยล์และบัลค์ออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์

พิกัดแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานของมินิมัมออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน ANSI จะมีผลิตตั้งแต่พิกัดแรงดัน 2.5, 4.16, 7.2, 13.8, 14.4, 34.5, 46 และ 69 kV จะมีสูงกว่านี้จนกระทั่งถึง 420 kV ส่วนตามมาตรฐาน IEC จะมีผลิตตั้งแต่ 60 kV ถึง 150 kV มีพิกัดกำลังไฟฟ้าขณะอินเตอร์รัพต์ 2500 ถึง 5000 MVA มินิมัมออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดที่ติดตั้งภายในอาคารจะมีผลิตตั้งแต่แรงดัน 6 kV ถึง 36 kV



รูปที่ 10.34 การทำงานของมินิมัมออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์

ข้อดี ของออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) สร้างง่าย มีกลไกประกอบไม่จุกจิก

(ข) ไม่ต้องมีระบบอัดอากาศ

(ค) น้ำมันเป็นฉนวนที่ดีกว่าอากาศ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการดับอาร์ก ดังรูปที่ 6.49 แสดงการเปรียบเทียบเวลาขณะอินเตอร์รัพต์สูงสุดของเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบต่าง ๆ

ข้อเสีย ของออยล์เซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) ต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันใหม่ เมื่อน้ำมันสกปรกหรือคุณภาพต่ำลง

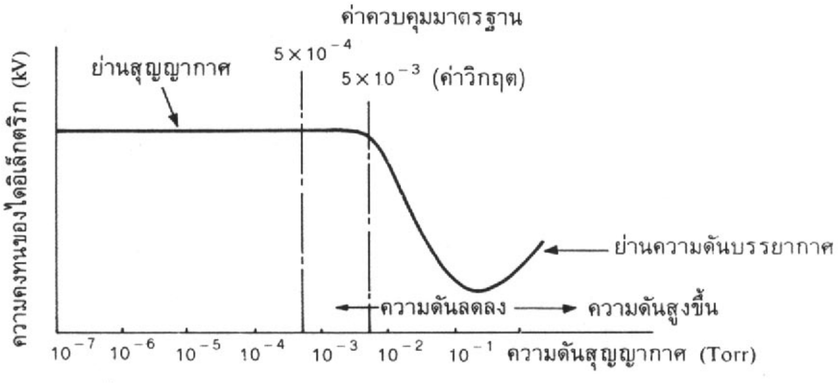
(ข) ต้องมีการตรวจสอบเป็นประจำ

(ค) เซอร์กิตเบรกเกอร์มีน้ำหนักมาก

(ง) น้ำมันเป็นอันตรายต่อการเกิดอัคคีภัย

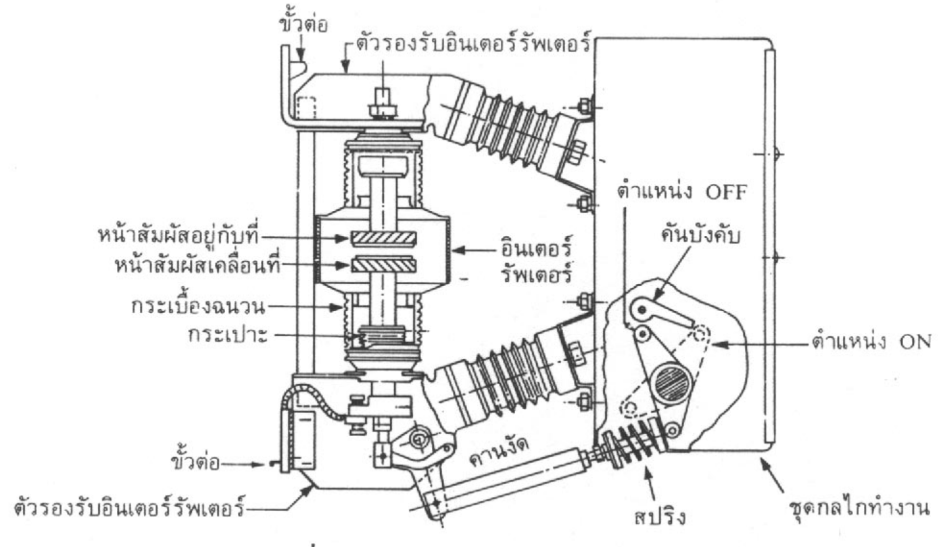
10.6.4 แวคคิวอัมเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Vacuum Circuit Breaker) หรือเรียกว่า VCB ในขณะที่หน้าสัมผัสของเซอร์กิตเบรกเกอร์แยกออกจากกัน จะเกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสทั้ง 2 ข้าง อาร์กที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอออน อิเล็กตรอน และส่วนผสมของก๊าซที่ทำให้มีความร้อนสูง 10 ถึง 15000 K เรียกว่า *พลาสม่า* และมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จึงต้องทำการดับอาร์กให้ได้ภายในเวลาที่กำหนด เราสามารถดับอาร์กได้ด้วยสาเหตุดังต่อไปนี้

1. ลดอุณหภูมิของพลาสม่าให้ลงอย่างรวดเร็ว เช่น ถ้าอุณหภูมิของพลาสม่าที่ 12000 K ให้ดับอาร์กภายในลูกคลื่นไซเคิลแรก (1/50 = 0.02 วินาที) อุณหภูมิของพลาสม่าต้องทำให้ลดลงที่อัตราเร็ว 1 พันล้านองศาเคลวินในเวลา 1 วินาที

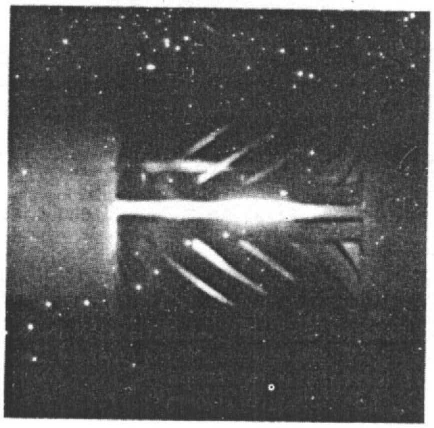


รูปที่ 10.35 ค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกที่ระดับความดันต่าง ๆ

2. ลดความดัน จากรูปที่ 10.35 แสดงให้เห็นค่าความคงทนของไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) ของอากาศจะมีค่าสูงที่ความดันสูง เนื่องจากโมเลกุลของอากาศอยู่อย่างหนาแน่น การเกิดไอออนยาก อาร์กจึงผ่านไปได้น้อย ในขณะเดียวกันถ้าลดความดันให้ต่ำ ๆ 10^{-4} Torr (1 Torr เท่ากับ 1 บรรยากาศ หรือ 760 mmHg) ความคงทนของไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูงเช่นกัน โมเลกุลของอากาศเหลือน้อยมาก อาร์กก็จะเกิดขึ้นได้ยากเช่นกัน ฉะนั้นความดันต่ำมาก ๆ การเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown) ของตัวกลางระหว่างหน้าสัมผัสจะยิ่งเกิดยากขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าความดันของพลาสม่าจะถูกลดลงที่ความดัน 10^{-4} Torr ก็จะยังคงมีไอออนไนซ์อะตอมและอิเล็กตรอนอิสระอยู่บ้าง ด้วยเหตุนี้ความดันของลำพลาสม่าจะถูกลดให้ต่ำลง จนกระทั่งอิเล็กตรอนอิสระและไอออนที่เหลืออยู่ระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสองจะไม่เป็นสื่อไฟฟ้า สิ่งเหล่านี้เป็นเหตุผลที่จะสร้างเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีตัวอินเตอร์รัพเตอร์ถูกบรรจุอยู่ในสุญญากาศ ดังรูปที่ 10.36 แสดงส่วนประกอบของแวคคิวอัมเซอร์กิตเบรกเกอร์ ส่วนรูปที่ 10.37 แสดงการเกิดอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสทั้ง 2 ข้าง ที่กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 25 kV เมื่อกระแสสลับลดลงผ่านศูนย์ในครึ่งไซเคิลแรก (10 ms) อาร์กจะลดความรุนแรงลง หลังจากนั้นความคงทนของไดอิเล็กตริกก็จะคืนสภาพสูงขึ้นโดยรวดเร็ว ก็จะทำให้อาร์กดับลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน



รูปที่ 10.36 ส่วนประกอบของแวคคิวอัมเซอร์กิตเบรกเกอร์



รูปที่ 10.37 การเกิดอาร์กที่กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ 25 kA

ข้อดี ของแวคคิวอัมเซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) ค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกของสุญญากาศจะมีค่าสูงกว่าตัวกลางดับอาร์กอื่น ๆ

(ข) ระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัส สามารถทำให้แคบกว่าปกติได้ จึงทำให้แวคคิวอัมอินเตอร์รัพเตอร์สามารถที่จะสับหรือปลดวงจรได้รวดเร็วกว่าอินเตอร์รัพเตอร์แบบอื่น ๆ ระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสของแวคคิวอัมเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยทั่วไปจะประมาณ ¼ นิ้ว ถึง ¾ นิ้ว ประกอบกับชุดกลไกที่กำกับการเคลื่อนที่หน้าสัมผัสไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีน้ำหนักเบา

(ค) อินเตอร์รัพเตอร์ เป็นแบบที่ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษา ทั้งนี้เพราะหน้าสัมผัสบรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศที่ปิดแน่น ไม่มีสิ่งสกปรกเกิดขึ้นหรือเข้าไปได้ อีกทั้งยังไม่มีผลกระทบกระเทือนจากอุณหภูมิภายนอก ส่วนอายุการใช้งานก็ยาวนานทัดเทียมกับเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอื่น ๆ

(ง) โครงสร้างของแวคคิวอัมอินเตอร์รัพเตอร์ มีรูปร่างเล็กกะทัดรัด มีน้ำหนักเบา สามารถนำไปติดตั้งในที่จำกัดได้

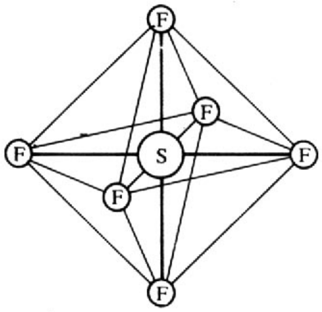
ข้อเสีย ของแวคคิวอัมเซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) เทคนิคการผลิตค่อนข้างจะละเอียดอ่อน

(ข) โลหะที่จะนำมาทำหน้าสัมผัสต้องเป็นพวกโลหะผสมที่มีคุณสมบัติพิเศษ

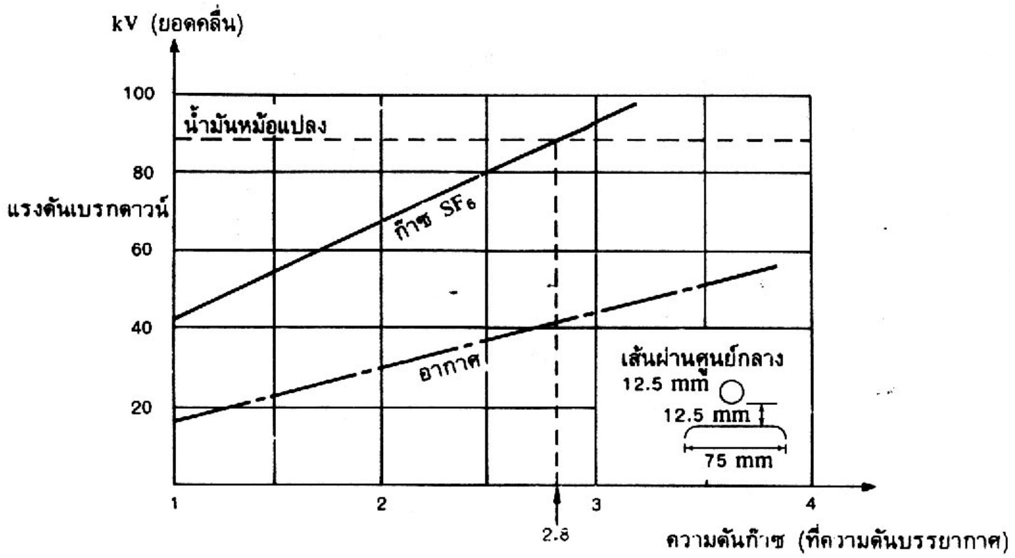
(ค) ยังไม่สามารถสร้างให้มีขนาดแรงดันสูง ๆ ได้

10.6.5 ก๊าซ SF_6 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Gas SF_6 Circuit Breaker) ก๊าซ SF_6 เป็นสารประกอบของโพลีอะตอมมิคโมเลกุลของกำมะถันและฟลูออรีน (Sulphur Hexafluoride) ดังรูปที่ 10.38 เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และจะคงสภาพเดิม แม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500^{o} C ภายในภาชนะที่ปิดมิดชิดปราศจากออกซิเจนและความชื้น



รูปที่ 10.38 โมเลกุลของก๊าซ SF_6

ก๊าซ SF_6 มีความหนาแน่นหนักประมาณ 5 เท่าของอากาศ จึงนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมากที่สุด จึงทำให้ก๊าซ SF_6 มีค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกสูงกว่าอากาศ ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น เนื่องจากก๊าซ SF_6 มีค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกที่ความดัน 2.8 เท่าที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ (760 mmHg) หรืออัดก๊าซ SF_6 ประมาณ 3 บาร์ (1 บาร์ = 750 mmHg) จะมีความคงทนของไดอิเล็กตริกเท่า ๆ กับน้ำมัน ดังรูปที่ 10.39 จะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ 88 kV (ยอดคลื่น)



รูปที่ 10.39 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 เทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง

คุณสมบัติพิเศษของก๊าซ SF_6 ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ก๊าซ SF_6 มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชัน (Ionization Coefficient) ต่ำมากเมื่อเทียบกับอากาศ ก๊าซที่มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันต่ำ ย่อมหมายถึงอัตราการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนอิสระในก๊าซนั้นต่ำ นั่นคือค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF_6 จะมีค่าสูง ทั้งนี้เพราะว่าโมเลกุลของก๊าซ SF_6 มีคุณสมบัติจับตัวอิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่อยู่ในสนามไฟได้ กล่าวคืออิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการไอออไนเซชันจะไปเกาะอยู่บนโมเลกุลที่เป็นกลาง ทำให้โมเลกุลของก๊าซกลายเป็นไอออนลบ จึงเรียกว่า SF_6 เป็นก๊าซไฟฟ้าลบ (Electronegative Gas) ไอออนลบจะมีน้ำหนักเท่า ๆ กับไอออนบวก ซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันจากการชนของไอออนลบได้ จึงเท่ากับว่าอัตราการเกิดหรือเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนอิสระถูกหน่วงหรือชะลอให้ช้าลง ฉะนั้นการเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุลกลายเป็นไอออนลบนี้จะเป็นตัวสำคัญที่ทำให้ก๊าซ SF_6 มีค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกมีค่าสูง อาร์กจึงดับลงอย่างรวดเร็ว ที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือก๊าซ SF_6 จะแตกตัวที่อุณหภูมิ 2000 K มีสภาพนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนที่ดี จึงทำให้แรงดันคร่อมอาร์กต่ำ พลังงานที่เปลี่ยนเป็นความร้อนจึงต่ำ ลำอาร์กที่อุณหภูมิสูงเกิดแตกตัวเป็นลำแคบ ๆ ล้อมรอบด้วยก๊าซอุณหภูมิต่ำ ปริมาณความร้อนจากลำอาร์กจะถูกถ่ายทอดออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้สภาพของอาร์กกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้รวดเร็วภายหลังจากกระแสลดลงฝ่ายศูนย์ ที่สำคัญอาร์กก็ยังไม่สามารถเปลี่ยนสภาพของก๊าซ SF_6 ได้ จึงทำให้ก๊าซ SF_6 สามารถใช้ได้นาย แม้กระแสลัดวงจรสูง ๆ และปริมาณก๊าซก็ใช้ไม่มาก ปัจจุบันก๊าซ SF_6 เซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถใช้กับแรงสูงถึง 800 kV ในอนาคตอันใกล้นี้อาจสร้างให้ใช้กับแรงดัน 1000 – 1500 kV

ข้อดี ของก๊าซ SF_6 เซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) มีความสามารถในการอินเตอร์รัพต์สูง เนื่องจากก๊าซ SF_6 ทนต่อกระแสขณะอินเตอร์รัพต์ได้ดีเยี่ยม เมื่อมีสาเหตุการผิดปกติเช่นการลัดวงจร

(ข) แรงดันไฟฟ้าคร่อมอาร์กต่ำ ทำให้สภาพของอาร์กกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้เร็ว (ค) ในการทำงานมีเสียงดังน้อย ซึ่งจะใช้ความดันก๊าซ SF_6 น้อย ๆ ในการดับอาร์ก

(ง) ก๊าซ SF_6 เป็นก๊าซเฉื่อย จึงไม่ทำปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) หรือปฏิกิริยาเคมีใด ๆ

(จ) มีความปลอดภัยสูง เพราะก๊าซ SF_6 ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ จึงไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และไม่ต้องกังวลเรื่องเพลิงไหม้

ข้อเสีย ของก๊าซ SF_6 เซอร์กิตเบรกเกอร์

(ก) ถ้าก๊าซ SF_6 มีความชื้น จะทำให้เกิดกรดไฮโดรฟลูออริค จะเกิดการกัดกร่อนผิวโลหะ

(ง) การรั่วซึมของก๊าซต้องมีอุปกรณ์ป้องกันเป็นอย่างดี ถ้าความดันของก๊าซลดลงความเป็นฉนวนก็จะลดลงตามไปด้วย

(จ) ต้องมีอุปกรณ์เตือนก๊าซรั่ว

(ฉ) ถึงระยะเวลาหนึ่งจำเป็นต้องตรวจสอบสภาพหน้าสัมผัส

....

บทที่ 11
รีเลย์ป้องกัน
(Protective Relay)

เซอร์กิตเบรกเกอร์นอกจากจะใช้สำหรับ OFF และ ON ในขณะที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาพปกติแล้ว นอกจากนี้ยังสามารถตัด (Trip) โดยอัตโนมัติในขณะที่ระบบไฟฟ้าผิดปกติ การ OFF หรือ ON ในขณะที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาพปกตินั้น สามารถใช้คนไป OFF หรือ ON เบรกเกอร์เมื่อใดก็ได้ตามความต้องการ แต่ในขณะที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาพผิดปกติเช่นเกิดฟอลต์ในระบบจำเป็นต้องตัดวงจรไฟฟ้าออกจากระบบด้วยความเร็วสูง ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ในขณะเดียวกันในระบบไฟฟ้าแรงสูง ความเร็วที่ใช้ในการตัดวงจรประมาณ 0.03- 0.08 วินาที ความเร็วในการตัดวงจรขนาดนี้ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์มาควบคุมและค้นหาสภาพความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ แล้วสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัด (Trip) ด้วยความเร็วสูงโดยอัตโนมัติ เราเรียกตัวควบคุมชนิดนี้ว่า รีเลย์ป้องกัน

11.1 หลักการเบื้องต้นของรีเลย์ป้องกัน

รีเลย์ที่ใช้ป้องกันระบบไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

11.1.1 รีเลย์หลัก (Primary Relay) เป็นรีเลย์ที่ใช้ป้องกันในเขตป้องกัน โดยปกติการป้องกันจะแบ่งเขตป้องกันไว้เฉพาะ เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นภายในเขตป้องกัน รีเลย์หลักจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทุกตัวในเขตป้องกันนั้นทริป เขตป้องกันของรีเลย์หลักจะจัดแบ่งให้คาบเกี่ยวกัน (Overlap) เพื่อป้องกันมิให้มีจุดบอดขึ้นในระบบป้องกัน รีเลย์หลักที่ทำงานถูกต้องจะสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานน้อยที่สุด โดยจะสั่งให้ทริปเฉพาะส่วนที่เกิดฟอลต์ขึ้นเท่านั้น

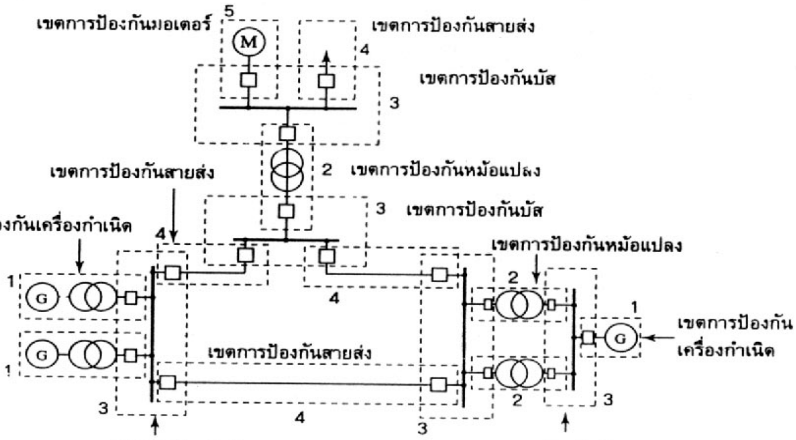
11.1.2 รีเลย์ทำงานสำรอง (Back-Up Relay) จะใช้ป้องกันแทนรีเลย์หลัก กรณีที่รีเลย์หลักไม่ทำงาน ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากไม่ได้จ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรสั่งทริปหรือกลไกของเซอร์กิตเบรกเกอร์ขัดข้องเป็นต้น เวลาการทำงานของรีเลย์ทำงานสำรองจะช้ากว่ารีเลย์หลัก ส่วนตำแหน่งที่ติดตั้งของรีเลย์ทำงานสำรองจะอยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อยต่าง ๆ หรืออยู่ไกลจากรีเลย์หลัก ถ้าเป็นไปได้มักจะให้รีเลย์ทำงานสำรองนี้อยู่คนละตำแหน่งกับรีเลย์หลัก คืออยู่ต่างสถานีไฟฟ้าย่อยกัน และการสั่งทริปเบรกเกอร์ด้วยรีเลย์ทำงานสำรองนี้ อาจจะทำให้ส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับจุดที่เกิดฟอลต์ถูกสั่งให้ทริปเบรกเกอร์ไปด้วย นอกจากนี้หน้าที่ของรีเลย์ทำงานสำรองอีกอย่างหนึ่งก็คือ ทำหน้าที่เป็นรีเลย์หลักในกรณีที่มีการซ่อมแซมหรือบำรุงรักษารีเลย์หลัก

11.2 เขตของการป้องกัน

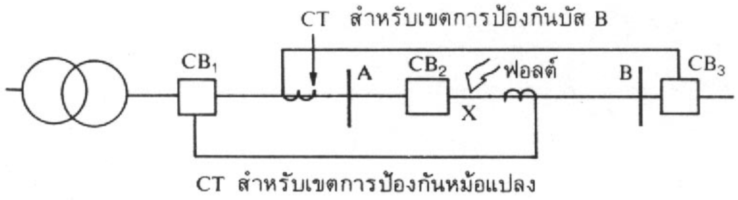
เขตของการป้องกัน (Zone of Protection) ระบบการป้องกันผลิตไฟฟ้า ระบบส่งและการจ่ายไฟฟ้านั้น จะมีเขตรับผิดชอบในการป้องกันเมื่อมีฟอลต์เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ โดยแต่ละส่วนนั้นจะทำหน้าที่ป้องกันอย่างเหมาะสม ในการป้องกันระบบไฟฟ้าจะแบ่งเขตป้องกันตามชนิดของอุปกรณ์ได้แก่

1. เขตการป้องกันเครื่องกำเนิด
2. เขตการป้องกันหม้อแปลง
3. เขตการป้องกันบัส
4. เขตการป้องกันสายส่งหรือสายจำหน่าย
5. เขตการป้องกันมอเตอร์

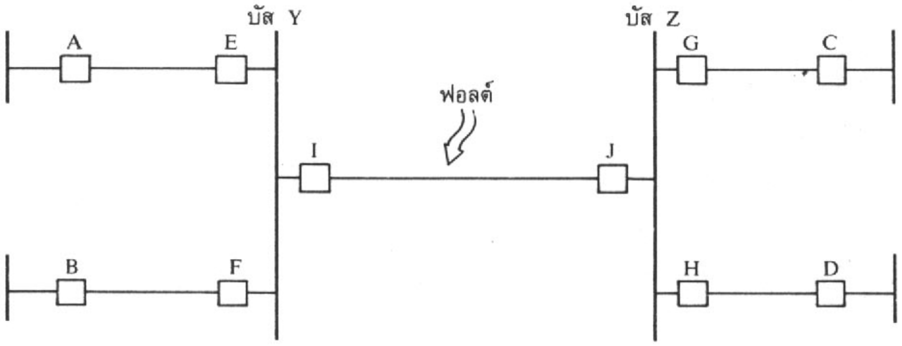
ในรูปที่ 11.1 แสดงเขตการป้องกันระบบไฟฟ้า เขตการป้องกันที่ 1 จะคาบเกี่ยวกับเขตการป้องกันที่ 3 และเขตการป้องกันที่ 3 จะคาบเกี่ยวกับเขตการป้องกันที่ 4 การทำเขตการป้องกันให้คาบเกี่ยวให้เหลื่อมล้ำกัน จะทำได้โดยให้แต่ละเขตสลับเขตการป้องกันดังรูปที่ 11.2 (ก) ถ้าเกิดฟอลต์ที่จุด X เซอร์กิตเบรกเกอร์ CB_2 และ CB_3 จะทริป ส่วนรูปที่ 11.2 (ข) แสดงตัวอย่างของรีเลย์ทำงานสำรองป้องกันสาย IJ โดยที่รีเลย์ทำงานสำรองจะติดตั้งไว้เพื่อสั่ง ให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ A, B, C และ D นั้นทริปเมื่อเกิดฟอลต์ในช่วง IJ แต่ถ้าเบรกเกอร์ I เกิดไม่ทำงาน เบรกเกอร์ A, B และ J จะทริป เบรกเกอร์ A และ B จะรวมอยู่ในอุปกรณ์ของรีเลย์ทำงานสำรอง และรีเลย์ทำงานสำรองของเบรกเกอร์ A, B และ J จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันของรีเลย์ทำงานสำรอง และรีเลย์ทำงานสำรองของเบรกเกอร์ A, B และ J จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันสำรองกรณีที่เกิดฟอลต์ที่บัส Y ด้วย แต่ถ้าเกิดฟอลต์ในช่วง BF เบรกเกอร์ BF เกิดไม่ทำงาน ดังนั้นเบรกเกอร์ A และ J จะทำหน้าที่เป็นรีเลย์ทำงานสำรอง



รูปที่ 11.1 การแบ่งเขตการป้องกันสำหรับรีเลย์หลัก



(ก) เขตการป้องกันที่ให้คาบเกี่ยวกันสำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์ CB_2



(ข) การป้องกันด้วยรีเลย์ทำงานสำรอง

รูปที่ 11.2

11.3 ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของรีเลย์ป้องกัน

1. ความไว (Sensitivity) รีเลย์จะต้องมีความไวพอที่จะรู้ถึงความผิดปกติซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในระบบไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะใดก็ตาม เพื่อให้สามารถทำงานได้แน่นอนเมื่อถึงเวลาจำเป็นที่ต้องทำงาน

2. ความเชื่อถือ (Reliability) รีเลย์ต้องทำงานได้ถูกต้องตามคุณสมบัติและขอบเขตที่กำหนดให้ทำงาน และหลีกเลี่ยงการทำงานที่ไม่จำเป็น

3. ความง่าย (Simplicity) รีเลย์ต้องมีโครงสร้างง่ายในการติดตั้ง ในการถอดเข้าออกเพื่อการบำรุงรักษา และง่ายในการตรวจสอบความถูกต้อง

4. ความสามารถแยกแยะ (Selectivity) รีเลย์จะต้องแยกแยะได้ว่า ในสภาวะใดที่ต้องทำงานทันที หรือในสภาวะใดที่ไม่ต้องทำงาน หรือต้องทำงานตามเวลาที่หน่วงไว้

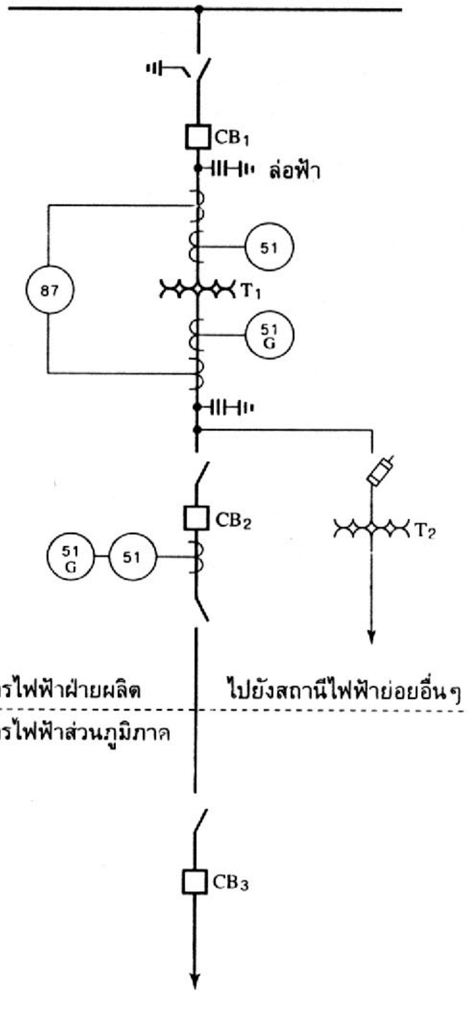
5. ความเร็ว (Speed) รีเลย์ต้องทำงานโดยรวดเร็ว เพื่อให้มีการตัดตอนส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เพื่อช่วยลดความเสียหายอันจะเกิดขึ้น

6. ความประหยัด (Economy) ควรเลือกรีเลย์ป้องกันให้ถูกสุด แต่สามารถให้การป้องกันที่สมบูรณ์

11.4 การนำรีเลย์ป้องกันไปใช้งาน

การนำรีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้าไปใช้งานต้องทราบข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ไดอะแกรมเส้นเดียว (Single Line Diagram) ซึ่งแสดงถึงระบบทั้งหมดที่ต้องการป้องกันไดอะแกรมเส้นเดียวนี้จะแสดงรายละเอียดตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดและการต่อขดลวดหม้อแปลง ตำแหน่งของเซอร์กิตเบรกเกอร์ การจัดบัส การจัดและขนาดสายส่งหรือสายจำหน่ายตลอดจนแรงดันและความถี่ ดังรูปที่ 11.3



51 – รีเลย์กระแสเกินของเฟส

51G – รีเลย์กระแสเกินไฟรั่วลงดิน

87 – รีเลย์แบบผลต่าง

รูปที่ 11.3 ไดอะแกรมเส้นเดียว ใช้รีเลย์ป้องกันระบบไฟฟ้า

2. การป้องกันระบบไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่ ต้องรู้ถึงระบบการป้องกันเดิมรวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า และวิธีดำเนินการในการปฏิบัติเดิมที่มีอยู่ และแนวโน้มการขยายการป้องกันในอนาคต เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการดัดแปลงแก้ไขเพิ่มเติม ให้ระบบป้องกันใหม่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

3. **ระดับการป้องกันและความสามารถการทำงานของระบบ** ระบบการป้องกันที่เหมาะสมอาจใช้รีเลย์แบบทำงานด้วยความเร็วสูง ปานกลาง หรือความเร็วต่ำ หรือต้องการให้มี การสั่งสับซ้ำทันทีหรือไม่

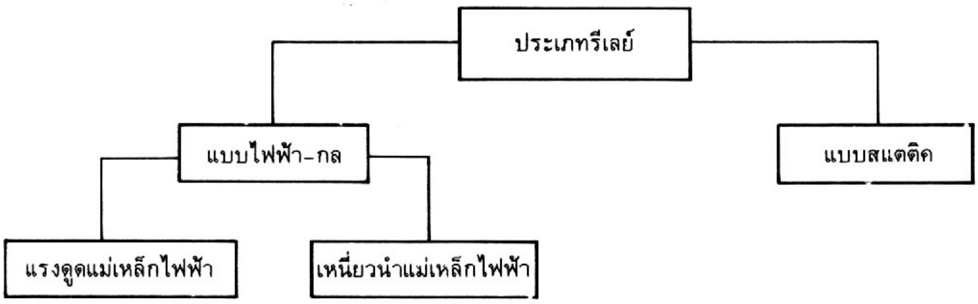
4. ศึกษาเกี่ยวกับฟอลต์ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ การเกิดฟอลต์อาจเป็นสามเฟสฟอลต์ หรือฟอลต์ไม่สมมาตร ทั้งนี้เพื่อหาวิธีป้องกันที่ดีที่สุดสำหรับฟอลต์ทุกแบบ

5. โหลดสูงสุดและข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับ ข้อมูลเกี่ยวกับโหลดสูงสุด อัตราส่วนและการต่อ CT หรือ PT ทั้งนี้เพื่อจะนำไปใช้กับรีเลย์ป้องกันได้อย่างเหมาะสม

6. อิมพีแดนซ์ของสายและของหม้อแปลง

11.5 ประเภทของรีเลย์ป้องกัน

โดยปกติรีเลย์ป้องกันแบบออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ รีเลย์แบบไฟฟ้า – กล และรีเลย์แบบสแตติค ดังรูปที่ 11.4

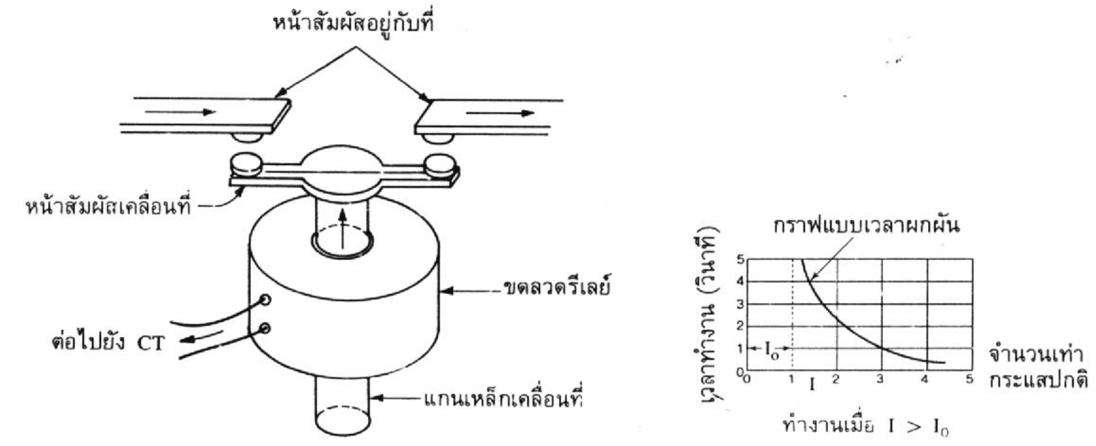


รูปที่ 11.4 ประเภทของรีเลย์ป้องกัน

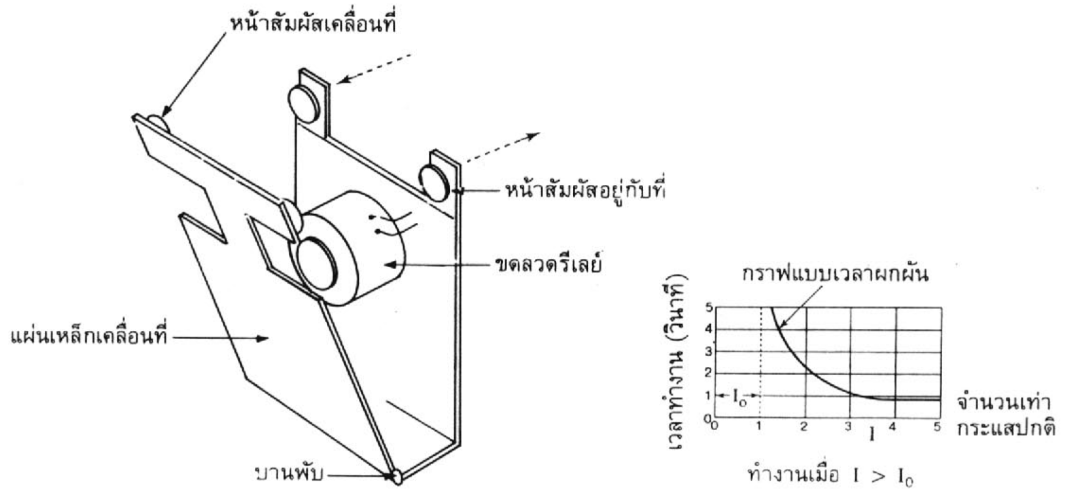
11.5.1 รีเลย์แบบไฟฟ้า – กล (Electromechanical Relay) รีเลย์ชนิดนี้จะมีหน้าสัมผัสอยู่กับที่รอรับอยู่ และมีหน้าสัมผัสเคลื่อนที่ เคลื่อนไปปิดหรือเปิดวงจรไฟฟ้าหนึ่งวงจรหรือมากกว่าตามลักษณะการทำงานของรีเลย์ชนิดนี้มักแบ่งออกเป็น ๒ แบบใหญ่ ๆ คือ

1. รีเลย์แบบแรงดูดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Attraction) รีเลย์แบบนี้โดยมากจะประกอบด้วยแกนเหล็กซึ่งมีขดลวดพันอยู่ ทำให้เกิดแรงดูดแม่เหล็กไฟฟ้าดูดแกนเหล็ก

หรือแผ่นเหล็กให้เคลื่อนที่ขดลวดที่พันอยู่สามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ รีเลย์แบบนี้อาจสร้างเป็นชนิดแกนเหล็กเคลื่อนที่ (Plunger Type) ดังรูปที่ 11.5 (ก) เป็นรีเลย์ที่มีความเร็วสูงจึงสามารถทำงานได้ทันที หรือเรียกว่าทริปทันที (Instantaneous Trip) เนื่องจากระยะทางที่หน้าสัมผัสของรีเลย์มีระยะสั้นจึงใช้เวลาในการทำงานน้อย และระยะเวลาในการทำงานของรีเลย์ยัง



(ก) ชนิดแกนเหล็กเคลื่อนที่ พร้อมทั้งแสดงเส้นโค้งกระแสและเวลาทำงาน

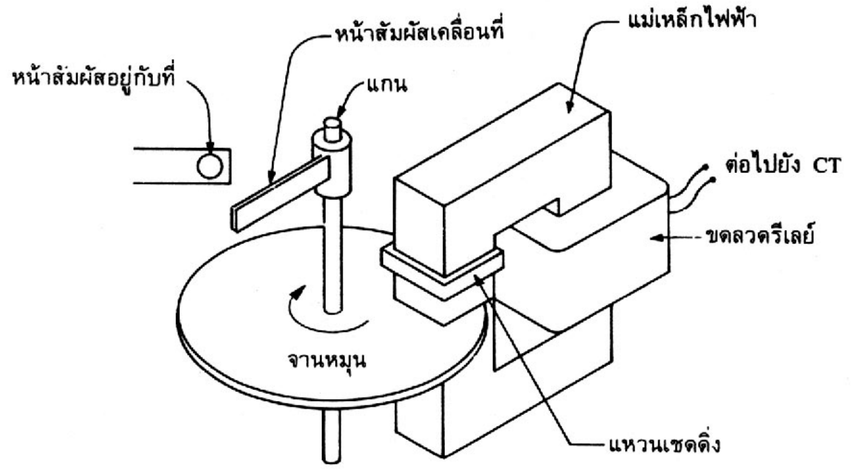


(ข) ชนิดบานพับ พร้อมทั้งแสดงเส้นโค้งกระแสและเวลาทำงาน

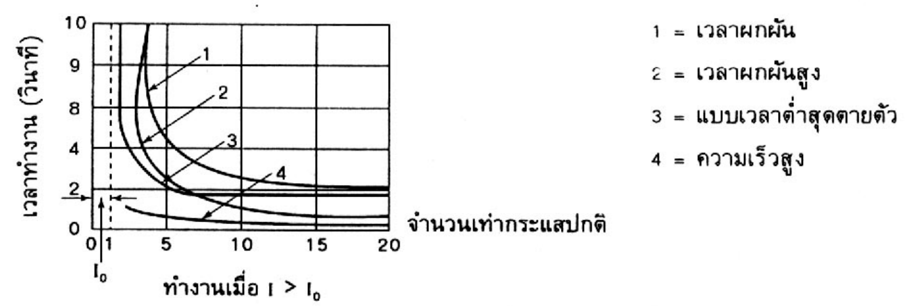
ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่ไหลผ่านขดลวด โดยที่ค่ากระแสต่ำรีเลย์จะใช้เวลาในการทำงานมากกว่าที่ค่ากระแสสูง เส้นโค้งลักษณะเช่นนี้เรียกว่าแบบเวลาผกผัน (Inverse Time) ส่วนรูปที่ 11.5 (ข) เป็นชนิดบานพับ (Hinged Armature Type) รีเลย์ชนิดบานพับนี้สามารถทำงานทริปได้ทันทีเหมือนกับชนิดแกนเหล็กเคลื่อนที่

รูปที่ 11.5 รีเลย์แบบแรงดูดแม่เหล็กไฟฟ้า

2. รีเลย์แบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) รีเลย์แบบนี้ จะใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงบิดหมุนที่โรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะการทำงานเหมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยปกติจะมีการสร้างเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) ดังรูปที่ 11.6 (ก) ส่วนรูปที่ 11.6 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและเวลาของรีเลย์ชนิดนี้ จะทำงานเป็นแบบเวลาผกผัน คือถ้ากระแสต่ำ รีเลย์จะใช้เวลาในการทำงานนาน แต่ถ้ากระแสมาก รีเลย์จะใช้เวลาในการทำงานน้อย รีเลย์ชนิดนี้จะนำไปใช้กับรีเลย์กระแสเกินแบบเวลาผกผัน รีเลย์กำลัง (Power Relay) และรีเลย์แบบมีทิศทาง (Directional Relay) ส่วนรีเลย์ชนิดถ้วยเหนี่ยวนำ (Induction Cup) ดังรูปที่ 11.7 รีเลย์แบบนี้ถ้วยมีน้ำหนักเบา จึงสามารถทำงานได้ทันทีที่รับสัญญาณ จึงนำไปใช้กับรีเลย์แบบมีทิศทาง และรีเลย์แบบระยะทาง (Distance Relay)

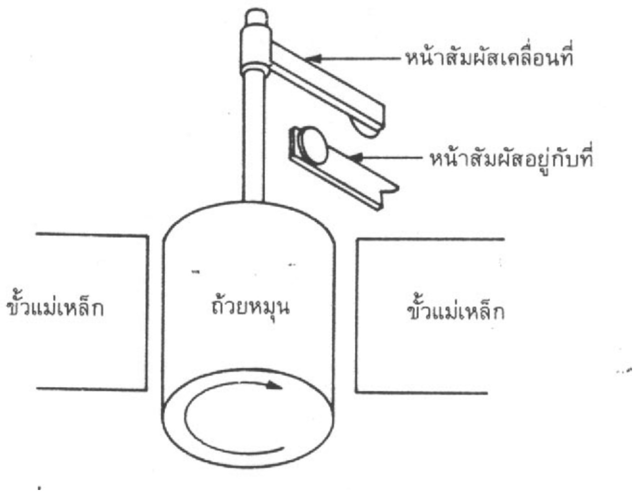


(ก) ชนิดจานเหนี่ยวนำ



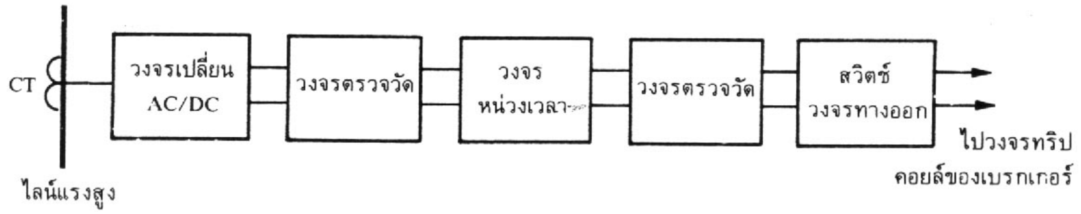
(ข) เส้นโค้งแสดงเวลาและกระแสแบบผกผัน

รูปที่ 11.6 รีเลย์แบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดจานเหนี่ยวนำ



รูปที่ 11.7 รีเลย์แบบเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดถ้วยเหนี่ยวนำ

11.5.2 สแตติครีเลย์ (Static Relay) โดยทั่วไปรีเลย์แบบสแตติคจะเป็นรีเลย์ที่ใช้ส่วนประกอบของโซลิคสเตตหรือสารกึ่งตัวนำ โดยมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะเส้นโค้งเช่นเดียวกับ รีเลย์แบบไฟฟ้า – กล เพียงแต่ว่าแตกต่างกันที่มีความไวสูง ความคลาดเคลื่อนต่ำ และกินไฟน้อย (เบอร์เดนต่ำ) ดังรูปที่ 11.8 แสดงแผนภาพการทำงานของรีเลย์กระแสเกินเวลาแบบสแตติค



รูปที่ 11.8 แผนภาพการทำงานของรีเลย์กระแสเกินเวลาแบบสแตติค

11.6 รหัสอุปกรณ์รีเลย์ป้องกันตามมาตรฐาน ANSI

รหัสรีเลย์ที่ใช้ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 11.1 และรูปที่ 11.9 แสดงรีเลย์ป้องกันชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 11.1 รหัสรีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน ANSI

รหัสรีเลย์ (ANSI)	**ข้อกำหนดและหน้าที่การทำงาน**
2	รีเลย์เริ่มทำงานหน่วงเวลา (Time Delay Starting) หรือรีเลย์สั่งสับ (Closing Relay) หน่วงเวลาก่อนหรือหลังจากที่จุดอื่น ๆ ทำงาน หรือเป็นอุปกรณ์เพื่อควบคุมการปิดเปิดวงจร
3	รีเลย์ตรวจสอบ (Checking) เป็นรีเลย์ที่ทำงานที่มีผลกับตำแหน่งของอุปกรณ์ และยอมให้ทำงานตามลำดับตามสภาพแต่ละวัตถุประสงค์
21	รีเลย์แบบระยะทาง (Distance Relay) เป็นรีเลย์ป้องกันประเภทหนึ่ง ที่ทำงานโดยตอบสนองต่อระยะทางในวงจรไฟฟ้า ระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า
25	การซิงโครไนซ์ (Synchronizing) หรือรีเลย์ตรวจสอบสภาวะซิงโครไนซ์ (Synchronism—Check Relay) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ทำงานภายใต้วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 2 วงจร เพื่อให้ความถี่ มุมเฟส หรือแรงดันโดยยอมให้สามารถขนานกันได้ทั้ง 2 วงจร
27	รีเลย์แรงดันต่ำเกิน (Under Voltage Relay) เป็นรีเลย์ชนิดหนึ่ง ซึ่งจะทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัดที่กำหนดไว้
30	รีเลย์แจ้งเหตุ (Enunciator Relay) เป็นอุปกรณ์ปรับตั้งไม่อัตโนมัติ อุปกรณ์ป้องกันจะมีแต่ละหน้าที่แสดงให้เห็น อาจจัดรีเลย์นี้ทำหน้าที่เพื่อการเปิดค้าง
32	รีเลย์กำลังแบบมีทิศทาง (Directional Power Relay) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ตรวจจับเมื่อกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับทิศทาง
37	รีเลย์กระแสต่ำเกิน (Under Current Relay) หรือรีเลย์กำลังไฟฟ้าต่ำเกิน (Under Power Relay) เป็นรีเลย์ชนิดหนึ่ง จะทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าลดต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้
40	รีเลย์ขดลวดสนาม (Field Relay) เป็นรีเลย์ที่มีหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติของกระแสขดลวดสนามเครื่องจักรกลไฟฟ้า
44	รีเลย์การเริ่มเดินตามลำดับหน่วย (Unit Sequence Starting Relay) เป็นรีเลย์ที่มีหน้าที่เริ่มเดินหน่วยอื่น ๆ ถัดไป

ตารางที่ 11.1 (ต่อ) รหัสรีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน ANSI

รหัสรีเลย์ (ANSI)	ข้อกำหนดและหน้าที่การทำงาน
46	รีเลย์แบบกลับเฟส (Reverse Phase) หรือรีเลย์กระแสสมดุลในเฟส (Phase-Balance Current Relay) เป็นรีเลย์มีหน้าที่ตรวจจับกระแสหลายเฟส เมื่อมีการจัดเรียงเฟสสลับกันหรือเรียงเฟสผิดกัน
47	รีเลย์แรงดันลำดับเฟส (Phase Sequence Voltage Relay) เป็นรีเลย์ที่มีหน้าที่ตรวจจับค่าแรงดันหลายเฟสที่เรียงตามลำดับตามค่าที่กำหนดไว้
48	รีเลย์ลำดับไม่สมบูรณ์ (Incomplete Sequence Relay) เป็นรีเลย์อุปกรณ์ไฟฟ้ากลับทางหมุน หรือหยุดการทำงานเมื่อเฟสลำดับไม่สมบูรณ์ โดยอาจมีสัญญาณเตือนบอกเหตุ
49	รีเลย์ความร้อนเครื่องกลไฟฟ้า (Machine Thermal Relay) เป็นรีเลย์ทำหน้าที่ตรวจจับอุณหภูมิของอาร์เมเจอร์ หรือขดลวดอื่น ๆ รีเลย์นี้จะทำงานเมื่ออุณหภูมิเกินค่าที่กำหนด
50	รีเลย์กระแสเกินชนิดทำงานทันที (Instantaneous Over Current Relay) เป็นรีเลย์ที่ทำงานทันทีเมื่อกระแสเกิน หรือเกิดฟอลต์ในระบบไฟฟ้า
51	รีเลย์กระแสสลับกระแสเกิน – เวลา (AC Circuit Breaker) เป็นรีเลย์ที่ทำงานเวลาตายตัวหรือหน่วงเวลา ซึ่งค่ากระแสเวลาจะทำงานเป็นสัดส่วนผกผันกัน และจะทำงานเมื่อกระแสสลับในวงจรเกินกว่าค่าที่กำหนด
52	เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสสลับ (AC Circuit Breaker) เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่สับและ ตัดกระแสเมื่อเกิดฟอลต์แก่วงจรไฟฟ้ากำลัง ส่วน 52_a เป็นหน้าสัมผัสเปิดช่วยและ 52_b เป็นหน้าสัมผัสปิดช่วย
55	เพาเวอร์แฟกเตอร์รีเลย์ (Power Factor Relay) เป็นรีเลย์ที่จะทำงานเมื่อวงจรไฟฟ้ามีเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้
59	รีเลย์แรงดันเกิน (Over Voltage Relay) เป็นรีเลย์ที่จะทำงานเมื่อแรงดันเกินกว่าค่าที่กำหนด
64	รีเลย์ป้องกันไฟรั่วลงดิน (Ground Protective Relay) รีเลย์นี้จะทำงานเมื่อฉนวนของเครื่องกลไฟฟ้า หม้อแปลงหรืออื่น ๆ บกพร่อง มีกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านโครงโลหะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลงสู่ดิน

ตารางที่ 11.1 (ต่อ) รหัสรีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน ANSI

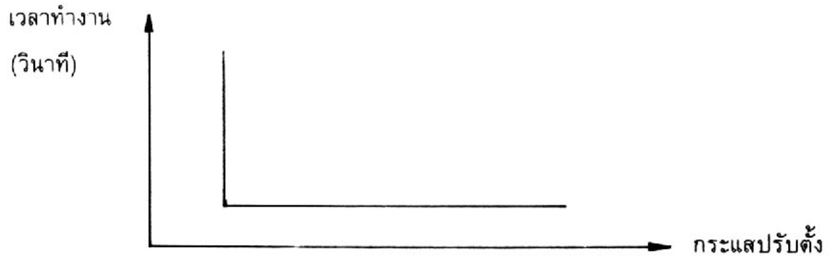
รหัสรีเลย์ (ANSI)	ข้อกำหนดและหน้าที่การทำงาน
67	รีเลย์กระแสสลับกระแสเกินแบบมีทิศทาง (AC directional Over Current Relay) เป็น รีเลย์ตรวจรับกระแสเกิน ในทิศทางการไหลของกระแสที่กำหนด
68	รีเลย์กั้น (Blocking Relay) เป็นรีเลย์ที่ส่งสัญญาณกีดกั้นการทริปที่เกิดจากฟอลต์ภายนอกของสายส่งภายใต้สภาวะที่กำหนด
74	รีเลย์สัญญาณเตือน (Alarm Relay) รีเลย์นี้เทียบได้กับการแจ้งเหตุ เช่นใช้ทำงานหรือทำให้มองเห็น หรือได้ยินเสียงเตือน
79	รีเลย์กระแสสลับชนิดสับซ้ำ (AC Reclosing Relay) เป็นรีเลย์ที่ควบคุมให้สับซ้ำโดยอัตโนมัติ และเปิดค้างเพื่อตัดวงจรไฟฟ้า
81	รีเลย์ความถี่ (Frequency Relay) รีเลย์นี้จะทำงานเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากความถี่ที่กำหนด
85	รีเลย์คลื่นพาห์หรือสายสื่อสารตอบสนองเครื่องรับ (Carrier or Pilot Wire Receive Relay) เป็นรีเลย์ตรวจจับฟอลต์ระหว่างสถานีได้ โดยใช้การติดต่อสื่อสารระหว่างรีเลย์
86	รีเลย์เพื่อการเปิดค้าง (Locking-Out Relay) เป็นรีเลย์ที่ใช้ไฟฟ้า ทำงานไม่อัตโนมัติหรือใช้ไฟฟ้าปรับตั้งซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมการหยุดใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อเกิดสภาวะไม่ปกติ
87	รีเลย์ป้องกันแบบผลต่าง (Differential Protective Relay) เป็นรีเลย์ป้องกันโดยวิธีเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้า เป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแส ๒ จำนวนมาเปรียบเทียบกัน
92	รีเลย์แรงดันและกำลังไฟฟ้าแบบมีทิศทาง (Voltage and Power directional Relay) เป็นรีเลย์ที่ยินยอมหรือเกิดจากการต่อวงจร 2 วงจร เมื่อแรงดันมีความแตกต่างเกินค่าในทิศทางที่กำหนด และเป็นเหตุให้วงจรทั้ง 2 ถูกปลดออกจากกันเมื่อกำลังไฟฟ้าเกินค่ากว่าทิศทางอีกด้านหนึ่ง
94	รีเลย์การทริปหรือทริปได้อิสระ (Tripping or Trip Free Relay) เป็นรีเลย์ที่ทำหน้าที่ ทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์คอนแทคคาพาซิเตอร์ หรือทริปอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ หรือ ป้องกันวงจรการตัดกระแสให้เปิดวงจรอย่างอัตโนมัติ

11.7 รีเลย์กระแสเกิน

11.7.1 ชนิดของรีเลย์กระแสเกิน (Over Current Relay) เป็นรีเลย์ที่ทำงานเมื่อมีกระแสเกินค่าที่กำหนด ซึ่งเกิดขึ้นในส่วนที่ต้องการป้องกัน และสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานดังนี้

1. รีเลย์กระแสเกินชนิดทำงานทันที (Instantaneous Over Current Relay) รีเลย์จะทำงานทันทีเมื่อกระแสเข้ารีเลย์เท่ากับหรือสูงกว่ากระแสเริ่มทำงาน (Pickup Current) รีเลย์ชนิดนี้อาจเป็นแบบแรงดูดแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 11.5 หรือแบบสแตติค หรือรูปที่ 11.10 ที่เส้นโค้งชนิด D

2. รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาตายตัว (Definite Time Over Current Relay) เป็นรีเลย์ที่จะทำงานในช่วงเวลาคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อกระแสเข้ารีเลย์มีค่าเท่ากับหรือเกินกว่ากระแสเริ่มทำงาน ถึงแม้ว่าจะมีค่ากระแสเกินมากกว่าค่ากระแสเริ่มทำงานก็ตาม รีเลย์ก็ยังคงทำงานในช่วงเวลาที่กำหนด ดังรูปที่ 11.9

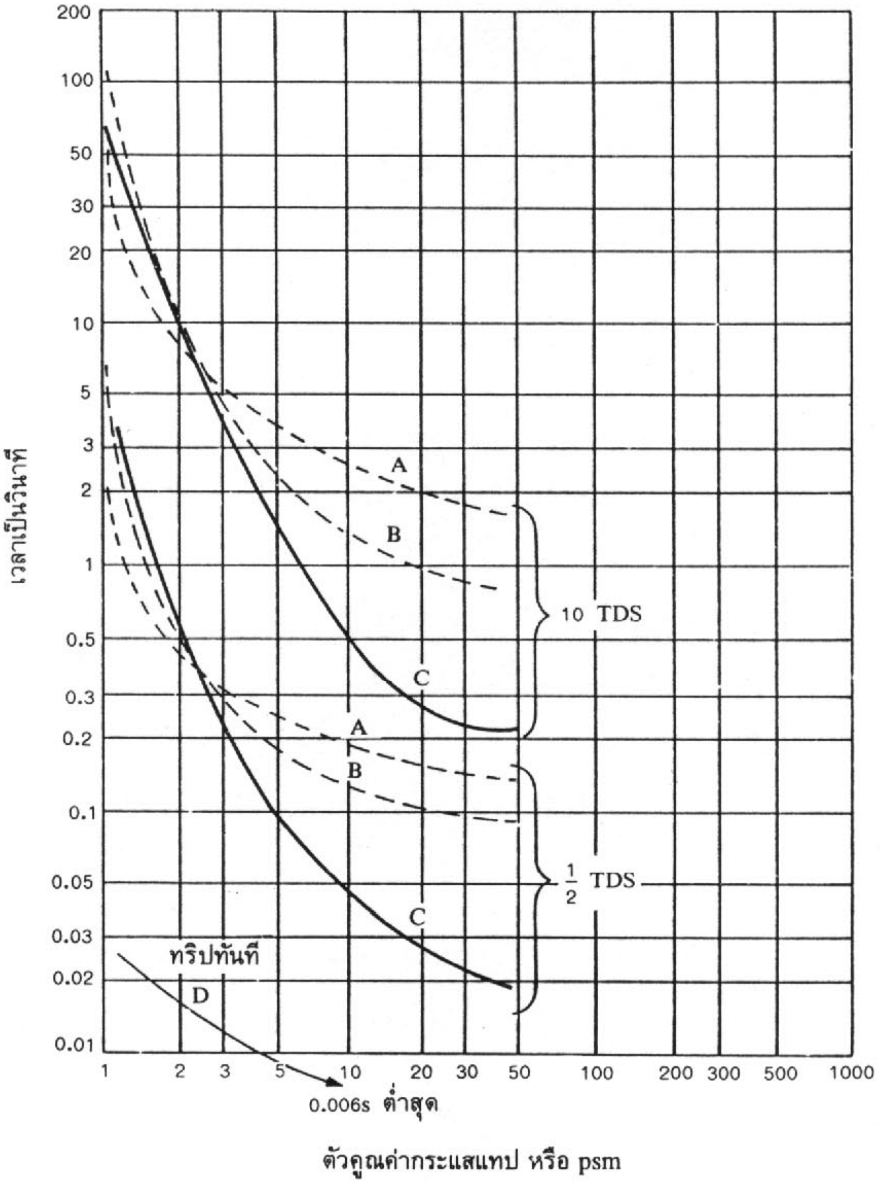


รูปที่ 11.9 แสดงเวลา – กระแสของรีเลย์กระแสเกินแบบเวลาตายตัว

3. รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาผกผัน (Inverse Time Over Current Relay) รีเลย์ชนิดนี้เวลาที่ใช้ในการทำงานจะเป็นส่วนกลับกับค่ากระแส กล่าวคือ กระแสยิ่งสูงรีเลย์จะใช้เวลาทำงาน ยิ่งสั้น และถ้ากระแสต่ำรีเลย์จะใช้เวลาทำงานนาน การออกแบบรีเลย์ให้มีคุณสมบัติของเวลาผกผัน มีอยู่หลายชนิดเช่นเวลาผกผัน เวลาผกผันมาก เวลาผกผันมากสุด ดังรูปที่ 11.6

ในรูปที่ 11.10 เป็นเส้นโค้งแสดงการเปรียบเทียบเวลา – กระแสของรีเลย์กระแสเกิน เส้นโค้งเวลาผกผัน A เวลาผกผันมาก B เวลาผกผันมากสุด C เวลาการทำงานของรีเลย์สามารถปรับตั้งเวลาสูงสุดหรือต่ำสุดได้โดยการปรับตั้งหน้าปัดตั้งเวลา นอกจากนี้รีเลย์ยังแสดงเส้นโค้งชนิดทำงานทันที D

4. รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาผกผันตายตัวต่ำสุด (Inverse Definite Minimum Time Over Current Relay) หรือ **IDMT** เป็นรีเลย์ที่มีลักษณะเวลากับกระแสเป็นแบบผสมระหว่างเวลาผกผันกับเวลาตายตัวดังรูปที่ 11.11



A = เวลาผกผัน (inverse)

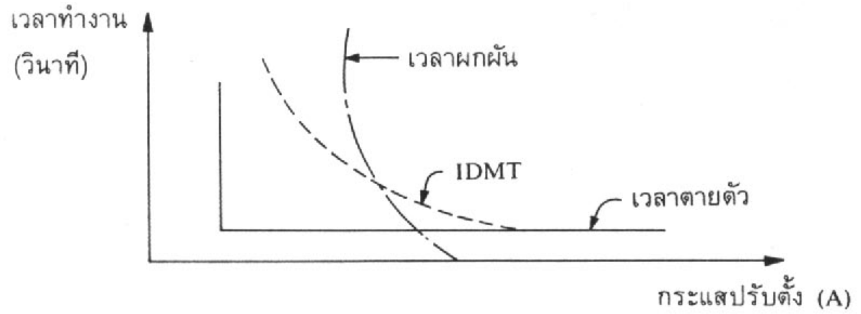
B = เวลาผกผันมาก (very inverse)

C = เวลาผกผันมากสุด (extremely inverse)

D = ทริปทันที (instantaneous trip)

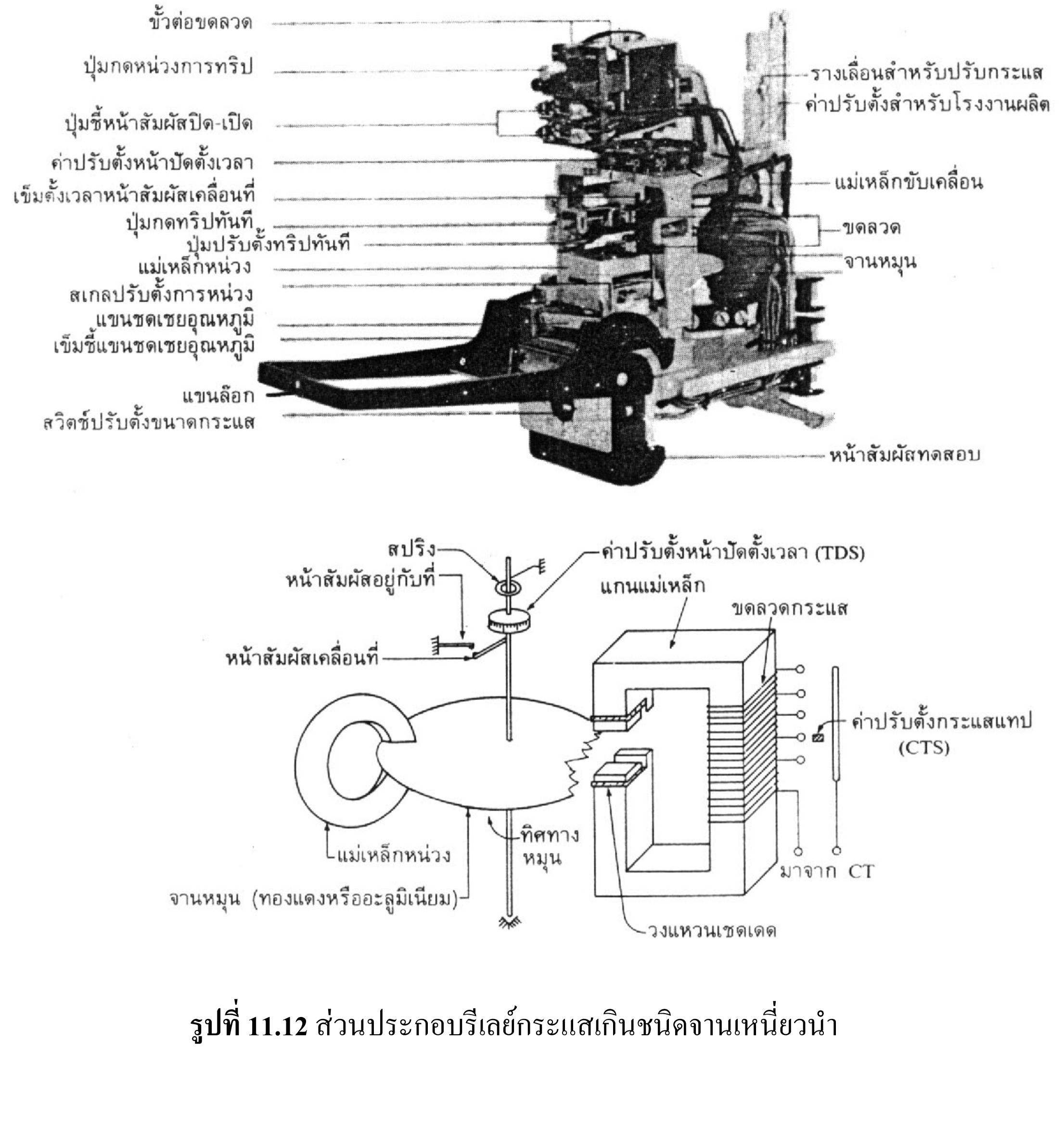
TDS = ค่าปรับตั้งหน้าปัดตั้งเวลา (time dial setting)

รูปที่ 11.10 เส้นโค้งแสดงเวลา – กระแส รีเลย์กระแสเกินแบบเวลาผกผัน



รูปที่ 11.11 เส้นโค้งเวลา – กระแสรีเลย์กระแสเกินแบบ IDMT

11.7.2 ค่าปรับตั้งรีเลย์กระแสเกิน รูปที่ 11.12 แสดงส่วนประกอบของรีเลย์กระแสเกินชนิดจานเหนี่ยวนำ สามารถปรับตั้งการทำงานของรีเลย์ดังนี้



รูปที่ 11.12 ส่วนประกอบรีเลย์กระแสเกินชนิดจานเหนี่ยวนำ

1. ค่าปรับตั้งหน้าปัดตั้งเวลา (Time Dial Setting : TDS) หรือตัวคูณค่าปรับตั้งเวลา (Time Multiplier Setting : TMS) เป็นการปรับตั้งระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสเคลื่อนที่กับหน้าสัมผัสอยู่กับที่จะกำหนดหรือปรับตั้งที่หน้าปัดตั้งเวลา ค่าปรับตั้งหน้าปัดตั้งเวลาจะควบคุมให้หน้าสัมผัส ทั้งสองอยู่ใกล้หรืออยู่ห่าง ทั้งนี้ก็เพื่อให้เวลาการทำงานของรีเลย์เร็วหรือช้าได้ตามต้องการ ค่าปรับตั้งหน้าปัดตั้งเวลาตามมาตรฐานสหรัฐอเมริกาจะเริ่มต้นจาก 1/2 ถึง 11 ส่วนมาตรฐานอังกฤษจะ เริ่มต้นจาก 0.1 ถึง 1 การปรับตั้งตัวเลขหน้าปัดตั้งเวลานั้น ถ้าปรับตั้งตัวเลขยิ่งสูง เวลาการทำงานของรีเลย์ก็ยิ่งนาน

2. ตัวคูณค่ากระแสแทป (Multiples of Tap Value Current) เป็นค่ากระแสจริงที่ทำให้รีเลย์เริ่มทำงานด้วยตัวคูณเป็นร้อยละของกระแสที่กำหนด ซึ่งเรียกว่าตัวคูณค่าปรับตั้งปลั๊ก (plug Setting Multiplier หรือ PSM) ส่วนค่าปรับตั้งกระแสแทป (Current Tap Setting) หรือ CTS จะมีตัวเลขให้เลือกกระแสแทป หมายถึง การปรับตั้งให้ค่ากระแสเริ่มทำงานต่ำสุด (Minimum Pickup) พอดีที่ให้จานหมุน ตลอดจนกระทั่งหน้าสัมผัสปิด (Contact Close) รีเลย์กระแสเกินโดยทั่วไปจะกำหนดกระแสตามขนาด CT เช่นทางด้านทุติยภูมิคือ 1 A หรือ 5 A เช่นถ้าเลือกกระแสที่กำหนด 5 A เมื่อปรับตั้งกระแสแทปไว้ที่ 150% ของกระแส CT ด้าน 5 A เท่ากับ 150% 5 เท่ากับ 7.5 A หรืออาจกล่าวได้ว่า

$$PSM = \frac{\text{กระแสฟอลต์}}{\text{ค่าปรับตั้งกระแสแทป(CTS) x อัตราส่วน CT}} \quad \text{หรือ} \quad = \frac{\text{กระแสฟอลต์ไหลผ่านรีเลย์}}{\text{ค่าปรับตั้งกระแสแทป (CTS)}}$$

เช่นถ้าเกิดฟอลต์ 6,000 A เมื่อเลือกใช้ CT ขนาด 500 / 5 A ต้องการปรับตั้งกระแสแทป 200 % ของขนาด CT

$$\text{ค่าปรับตั้งกระแสแทป (CTS)} = 200\,\% \times 5\ \text{A} = \frac{200 \times 5}{100} = 10\ \text{A}$$

$$PSM = \frac{6{,}000}{10 \times 500 / 5} = 6$$

$$\text{หรือ}\quad PSM = \frac{\text{กระแสฟอลต์ไหลผ่านรีเลย์}}{\text{ค่าปรับตั้งกระแสแทป (CTS)}} = \frac{6{,}000}{10 \times 500 / 5}$$

$$= 6$$

สำหรับรีเลย์กระแสเกินทั่วไปจะมีย่านกระแสไหลผ่านรีเลย์ดังตารางที่ 11.2 การที่รีเลย์มีค่ากระแสแทปไว้ให้เลือกหลายค่า ก็เพื่อความสะดวกต่อการเลือกค่ากระแสให้พอเหมาะกับอัตราส่วนของหม้อแปลงกระแส

ตารางที่ 11.2 ย่านปรับตั้งกระแสไหลผ่านรีเลย์กระแสเกิน

ย่านปรับตั้ง (A)	ค่าปรับตั้งกระแสแทป (CTS) เป็น A
0.5-2.5 (หรือ 0.5 –2)	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5
1.5 – 6 (หรือ 2-6)	1.5. 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6
4-16 (หรือ 4-12)	4, 6, 7, 8, 10, 12, 16

11.8 การจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันด้วยรีเลย์กระแสเกิน

การจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกัน (Protection Coordination) เป็นการจัดอุปกรณ์การป้องกันตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป ต้องมีการจัดให้รีเลย์ทำงานตามลำดับเวลา โดยต้องมีระยะห่างของเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันแต่ละชุด มากพอที่จะไม่ทำให้อุปกรณ์ป้องกันทุกชุดทำงานพร้อมกัน ซึ่งเรียกว่า ช่วงเผื่อเวลา (Grading Margin)

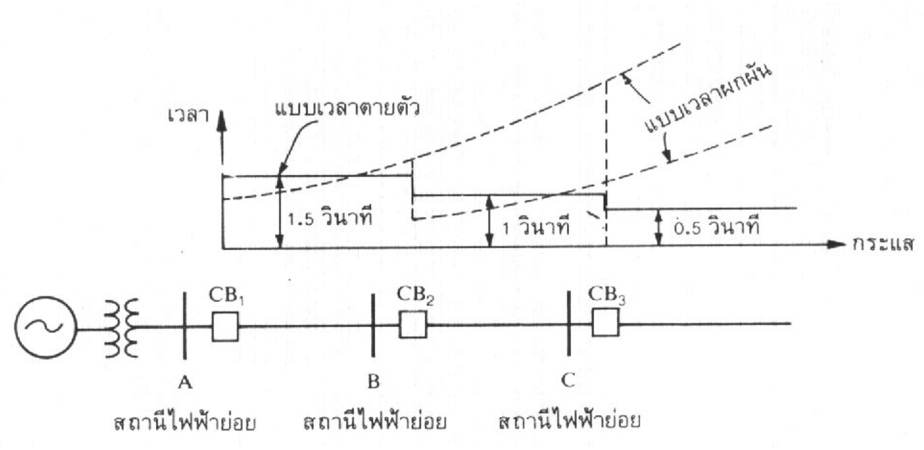
11.8.1 ระยะเวลาการจัดลำดับความสัมพันธ์ของรีเลย์ ระยะห่างของเวลาอุปกรณ์ป้องกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

1. เวลาเบรกเกอร์ทำงาน จะใช้เวลาประมาณ 0.12 วินาทีหรือประมาณ 6 ไซเคิล เป็นเวลาที่รีเลย์ปิดหน้าสัมผัสเพื่อสั่งทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์

2. เวลาทำงานเกิน (Overtravel Time) ของรีเลย์ เป็นเวลาที่รีเลย์ใช้ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เนื่องจากแรงเฉื่อยของส่วนเคลื่อนที่ หลังจากที่แรงกระตุ้นได้หมดไป เวลาการทำงานเกินของรีเลย์ประมาณ 0.05 ถึง 0.1 วินาที

3. ความคลาดเคลื่อน (Error) ความคลาดเคลื่อนในการทำงานของรีเลย์อาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิ ความถี่ หรืออายุการใช้งาน

4. เวลาเผื่อเพื่อความปลอดภัย (Safety Margin Time) เป็นระยะเวลาที่เพิ่มเข้าไปเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ป้องกันสามารถจัดลำดับเวลาการทำงานประสานกันได้แน่ ช่วงเวลาเผื่อที่กำหนดประมาณ 0.1 วินาที สำหรับช่วงการลำดับเวลาการทำงานนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการ ทริปเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดของรีเลย์ ตลอดจนความแม่นยำของหม้อแปลงกระแส โดยปกติช่วงการลำดับเวลาการทำงานประมาณ 0.4 ถึง 0.5 วินาที ดังรูปที่ 11.13



รูปที่ 11.13 การจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันแบบเวลาตายตัวและแบบเวลาผกผันตายตัวต่ำสุด (IDMT)

11.8.2 การคำนวณหาค่าปรับตั้งรีเลย์กระแสเกิน การปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินนั้น จำเป็นต้องคำนวณค่าต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าเช่นกระแสโหลด และกระแสฟอลต์สูงสุดที่เกิดขึ้น โดยมีหลักการพิจารณาดังนี้

1. รีเลย์กระแสเกินของเฟส (Phase Over Current Relay) จะกำหนดค่ากระแสเริ่มทำงานต่ำสุด (Minimum Pickup Current) อย่างน้อย 2 เท่าของกระแสโหลดเต็มที่และโดยปกติทั่วไป ไม่ควรต่ำกว่า 1.25 เท่า แต่ไม่เกิน 2.5 เท่า

2. รีเลย์กระแสเกินไฟรั่วลงดิน (Over Current Ground Relay) จะกำหนดค่ากระแส เริ่มทำงานต่ำสุด 30% ของกระแสโหลดเต็มที่

3. พิกัดกระแสโหลด

4. ปรับตั้งค่ากระแสแทป (CTS) พิจารณาตามค่ากระแสเริ่มทำงานต่ำสุด

CTS $\geq$ 2 เท่าของกระแสโหลดเต็มที่

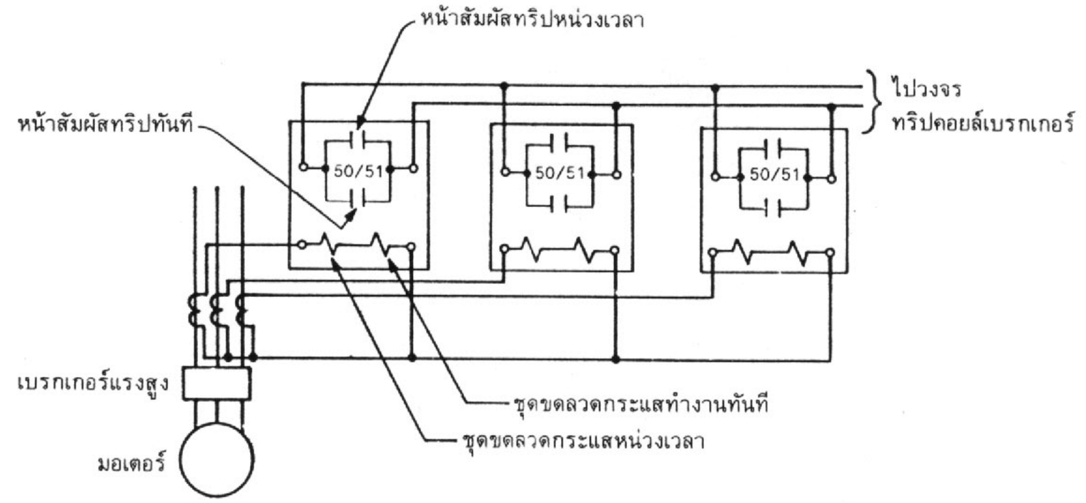
หรือ CTS $\geq$ 1/3 เท่าของกระแสฟอลต์ต่ำสุด

5. พิกัดของรีเลย์กระแสเกินเป็น 1 A หรือ 5 A ถ้าพิกัดของรีเลย์กระแสเกินเท่ากับ 5 A อัตราส่วนของหม้อแปลงกระแสด้านทุติยภูมิต้องเป็น 5 A เสมอ

11.9 การเลือกใช้รีเลย์เพื่อการป้องกัน

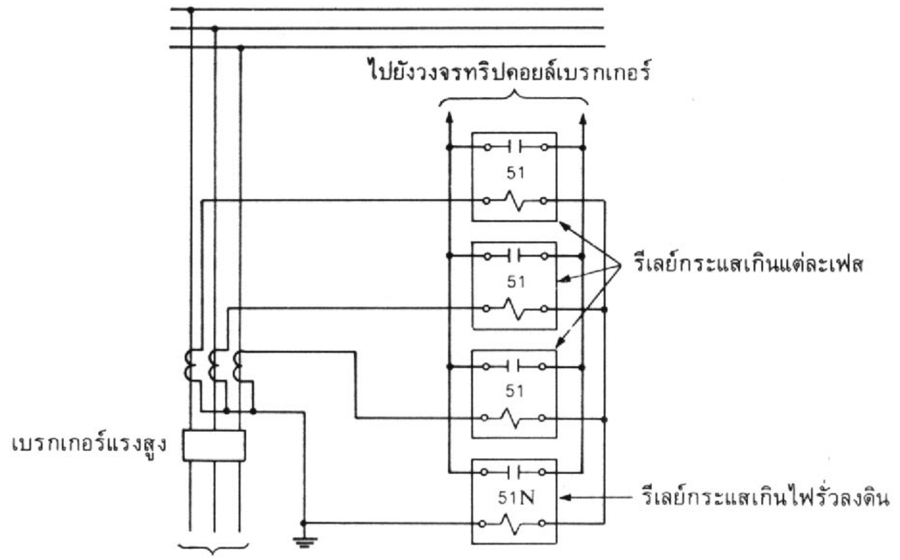
11.9.1 การป้องกันโหลดเกินของมอเตอร์ จะประกอบด้วยรีเลย์กระแสเกินชนิดหน่วงเวลานานและชนิดทำงานทันที ดังรูปที่ 11.14 รีเลย์กระแสเกินชนิดหน่วงเวลานานมีไว้ป้องกันมอเตอร์สตาร์ต โดยการปรับตั้งเวลาให้นานกว่ากระแสสตาร์ตมอเตอร์ และรีเลย์จะสั่งให้เบรกเกอร์ทริปก็ต่อเมื่อกระแสสตาร์ตมอเตอร์ไม่สามารถลดลงในเวลาที่กำหนด ซึ่งหมายถึงมอเตอร์นั้นโหลด

เกิน ส่วนรีเลย์ชนิดทำงานทันที จะปรับตั้งค่าให้สูงกว่ากระแสสูงสุดของกระแสสตาร์ตมอเตอร์ ทั้งนี้เพื่อให้รีเลย์สั่งทริปเบรกเกอร์ทันทีในกรณีที่ลัดวงจร หรือเกิดโหลดเกินสูงกะทันหัน



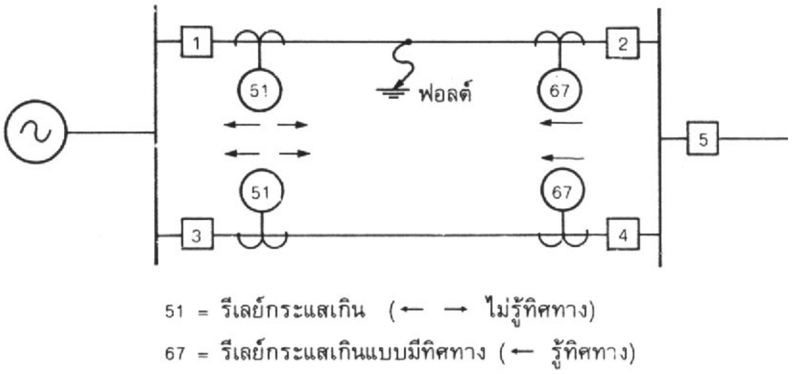
รูปที่ 11.14 การใช้รีเลย์กระแสเกินป้องกันมอเตอร์

11.9.2 การป้องกันไฟรั่วลงดิน การป้องกันกระแสเกินไฟรั่วลงดิน จะใช้หลักการเช่นเดียวกันกับการป้องกันกระแสเกินของเฟส การใช้รีเลย์เกินไฟรั่วลงดินร่วมกับรีเลย์กระแสเกินของเฟส ดังรูปที่ 11.15

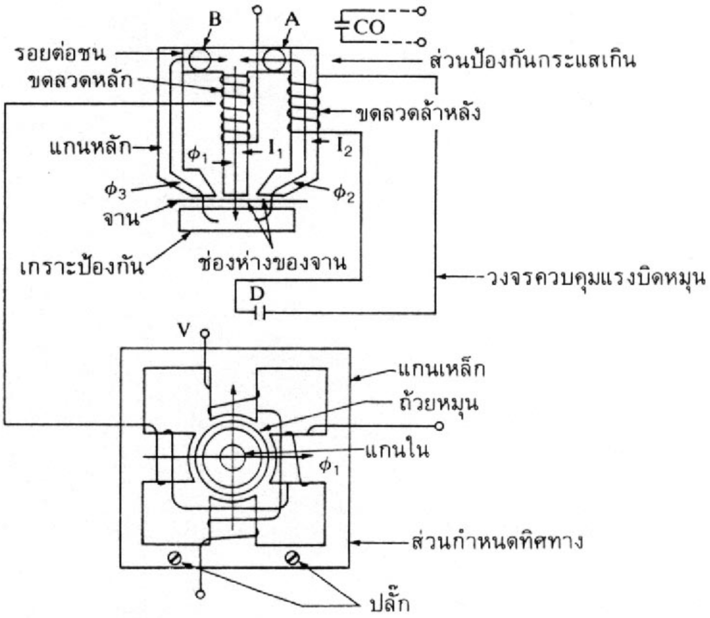


รูปที่ 11.15 การใช้รีเลย์กระแสเกินไฟรั่วลงดินร่วมกับรีเลย์กระแสเกินของเฟส

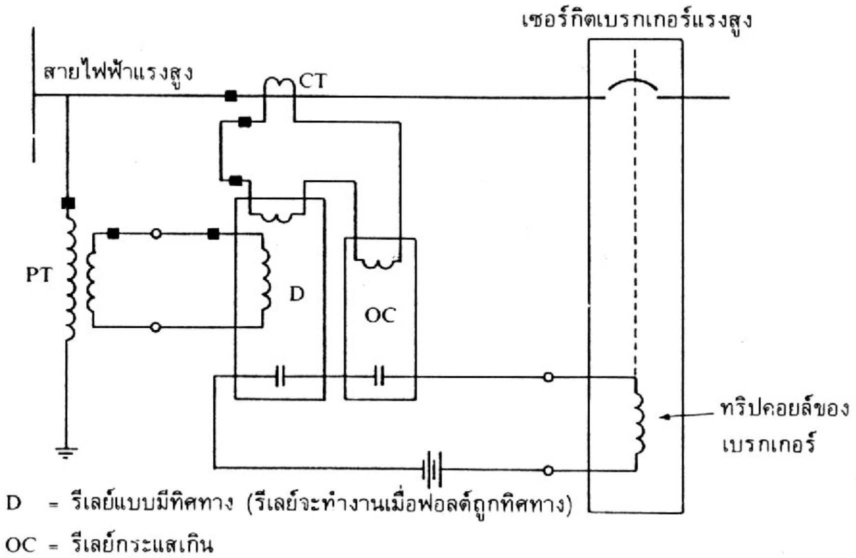
11.9.3 รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง (directional Over Current Relay) ในกรณีที่กระแสลัดวงจรสามารถไหลผ่านตัวรีเลย์ได้ทั้งสองทาง รีเลย์กระแสเกินธรรมดาจะไม่สามารถแยกแยะได้ว่า การลัดวงจรอยู่ที่ไหน และอาจทำงานผิดพลาดได้ง่าย จึงจำเป็นต้องมีรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางดังรูปที่ 11.16 รีเลย์ประเภทนี้มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนกำหนดทิศทางและส่วนป้องกันกระแสเกิน ดังรูปที่ 11.17 ส่วนป้องกันกระแสเกินจะสั่งทริปเมื่อทิศทางของกระแสลัดวงจรอยู่ในทิศทางที่กำหนด ถ้าเกิดฟอลต์ไม่ถูกต้องตามทิศทาง ส่วนป้องกันกระแสเกินก็จะไม่ทำงานรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง จะมีขดลวดแรงดัน ซึ่งรับแรงดันจากหม้อแปลงแรงดัน (PT) ส่วนอีกชุดหนึ่งเป็นขดลวดกระแสซึ่งรับกระแสโดยผ่านจากหม้อแปลงกระแส (CT) ดังรูปที่ 11.18



รูปที่ 11.16 การใช้รีเลย์กระแสเกินร่วมกับรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง

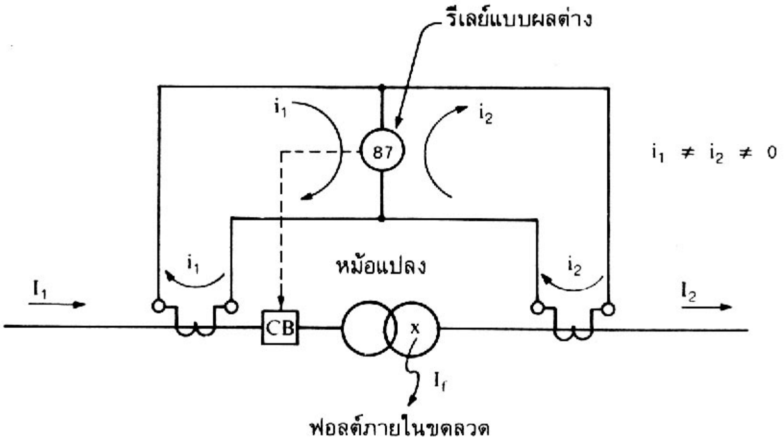


รูปที่ 11.17 ชุดควบคุมรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง



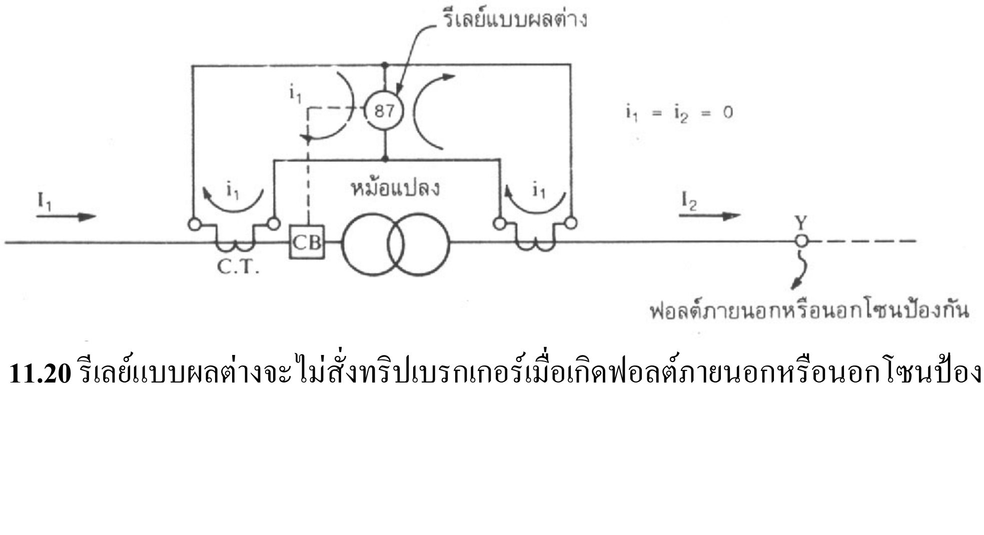
รูปที่ 11.18 แสดงการต่อรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางเพียงเฟสเดียว

11.9.4 รีเลย์แบบผลต่างป้องกันหม้อแปลง (Transformer Differential Relay) หม้อแปลงไฟฟ้าถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบการจ่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานประกอบการขนาดใหญ่ มีการใช้หม้อแปลงขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก เมื่อใดก็ตามที่มีเหตุขัดข้องกับหม้อแปลงจนทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงัก แต่ถ้าเรามีระบบป้องกันหม้อแปลงที่ดีพอ สามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงขณะใช้งาน จะเป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า ก่อนที่ความเสียหายจะรุนแรง การป้องกันหม้อแปลงที่มีความเชื่อถือได้และมีความเร็วสูงคือการใช้ รีเลย์แบบผลต่างป้องกันหม้อแปลง เป็นตัวจับความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลง เช่น ผิดปกติจากขดลวดหรือรั่วลงดิน จนเป็นสาเหตุทำให้เกิดลัดวงจรในหม้อแปลง แต่รีเลย์แบบผลต่างนี้ จะมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการป้องกันหม้อแปลงด้วยวิธีนี้จะใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ ๆ เท่านั้น



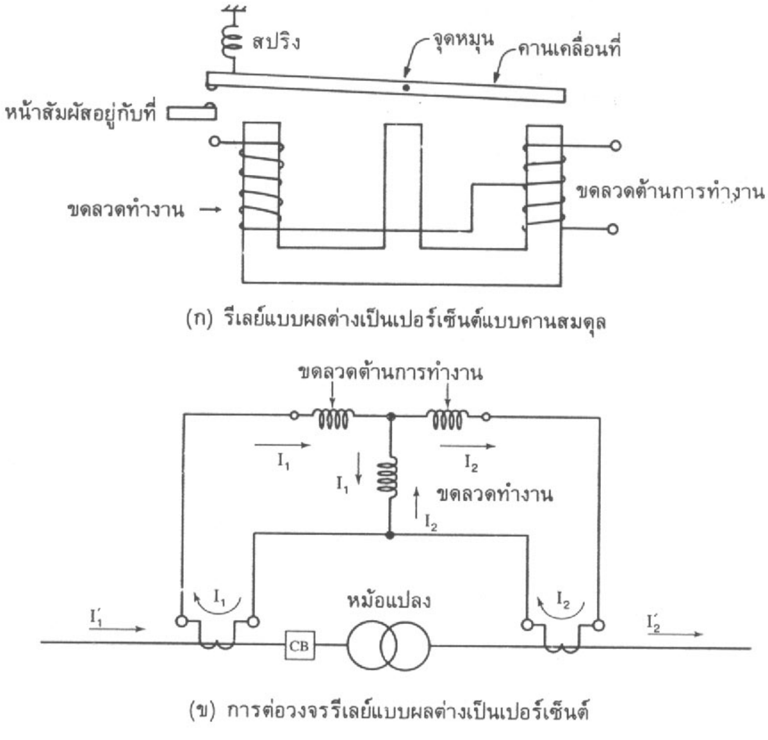
รูปที่ 11.19 รีเลย์แบบผลต่างจะสั่งทริปเบรกเกอร์เมื่อเกิดฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลง

1. รีเลย์แบบผลต่าง (Differential Relay) เป็นรีเลย์ที่ทำงานเมื่อมีผลต่างทางเวกเตอร์ของปริมาณทางไฟฟ้าที่เหมือนกันตั้งแต่ 2 ค่าขึ้นไปเกินปริมาณที่ตั้งเอาไว้ รีเลย์ชนิดนี้มีหลายรูปแบบซึ่งแตกต่างกันออกไป ส่วนใหญ่รีเลย์แบบผลต่างจะเป็นชนิดทำงานด้วยกระแสผลต่างดังรูปที่ 11.19 เมื่อเกิดฟอลต์ภายในขดลวดหม้อแปลงที่จุด X ถ้ากระแสของ CT ทั้งสองไม่เท่ากัน ผลต่างทางเวกเตอร์ของกระแสทั้งสองจะเท่า $i_1 - i_2$ ถ้าผลต่างของกระแสสูงกว่าค่ากระแสเริ่มทำงาน รีเลย์ก็จะสั่งทริปเบรกเกอร์ทันที แต่ถ้าขดลวดภายในหม้อแปลงไม่เกิดฟอลต์ ผลต่างของกระแสในรีเลย์จะเป็นศูนย์ ($i_1 - i_2 = 0$) ซึ่งจะไม่มีกระแสไหลผ่านรีเลย์แบบผลต่าง ฉะนั้นในสภาวะที่หม้อแปลงปกติ รีเลย์แบบผลต่างจะไม่ทำงาน รีเลย์แบบผลต่างจึงถูกนำมาใช้ป้องกันหม้อแปลงอันเกิดจากขดลวดลัดวงจรระหว่างเฟส หรือลัดวงจรลงดิน หรือลัดวงจรระหว่างขดลวด อย่างไรก็ตามถ้าเกิดฟอลต์ภายนอกขอบเขตของการป้องกันที่จุด Y กระแสทางทุติยภูมิของ CT ($i_1 = i_2$) ผลต่างจากเวกเตอร์ของกระแสจะเท่ากับศูนย์ รีเลย์แบบผลต่างก็จะไม่ทำงานเช่นกันดังรูปที่ 11.20



รูปที่ 11.20 รีเลย์แบบผลต่างจะไม่สั่งทริปเบรกเกอร์เมื่อเกิดฟอลต์ภายนอกหรือนอกโซนป้องกัน

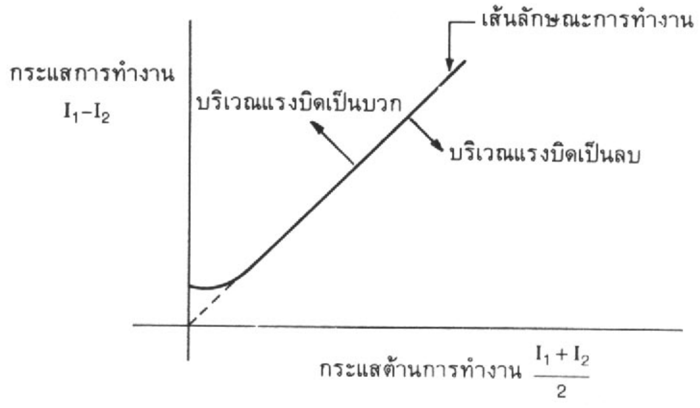
2. รีเลย์แบบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage Differential Relay) รีเลย์ชนิดนี้จะเป็นแบบคานสมดุล (Balance Beam) ประกอบด้วยขดลวดที่มีแทปกลางเรียกว่า ขวดลวดต้านการทำงาน (Restraining Coil) และขดลวดทำงาน (Operating Coil) ดังรูปที่ 11.21 กระแสไหลผ่านขดลวดทำงานจะเป็นสัดส่วนกับกระแส $I_1 - I_2$ และกระแสที่ไหลในขดลวดต้านการทำงานจะเทียบเป็นสัดส่วน กับกระแส $(I_1 - I_2)$ /2 (เนื่องจากขดลวดทำงานอยู่กึ่งกลางของขดลวดต้านการทำงาน) ลักษณะเช่นนี้มีผลต่างของกระแสจะทำให้รีเลย์ทำงาน โดยเปลี่ยนแปลงไปตามผลของขดลวดต้านการทำงาน หรือพูดอีกนัยหนึ่งคืออัตราส่วนระหว่างผลต่างกระแสที่ผ่านขดลวดทำงานกับกระแสเฉลี่ยที่ไหลในขดลวดต้านการทำงาน ถ้าคิดเทียบกันเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วจะมีเปอร์เซ็นต์คงที่ตลอด ด้วยเหตุนี้เอง รีเลย์ชนิดนี้จึงถูกตั้งชื่อว่า รีเลย์แบบผลต่างมีการถ่วงเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage-Bias Differential Relay) มีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 11.22 แรงบิดที่เกิดจากขวดลวดทำงานจะสร้างแรงไปปิดหน้าสัมผัส ส่วนขดลวดต้านการทำงานจะสร้างแรงต้านการปิดหน้าสัมผัส ดังนั้นถ้าแรงทำงานมากกว่าแรง ต้านทาน รีเลย์จึงจะทำงานสั่งทริปเบรกเกอร์ได้ กล่าวคือถ้ากระแสทำงาน $(I_1 - I_2)$ ต้องสูงกว่าเปอร์เซ็นต์ที่ปรับตั้งไว้รีเลย์จึงจะทำงานสั่งทริปเบรกเกอร์ได้ รีเลย์แบบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์จะทำงานทันทีโดยไม่มีการหน่วงเวลา มีความเร็วในการทำงานสูง จึงนิยมใช้ป้องกันหม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์



(ก) รีเลย์แบบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์แบบคานสมดุล

(ข) การต่อวงจรรีเลย์แบบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์

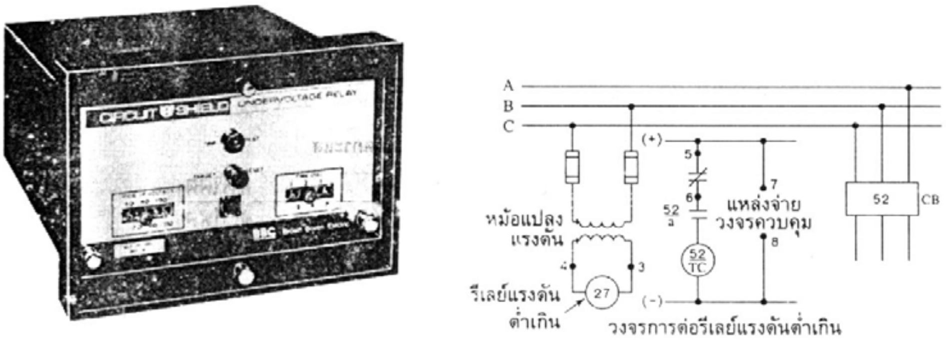
รูปที่ 11.21 รีเลย์แบบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์



รูปที่ 11.22 ลักษณะการทำงานของรีเลย์แบบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์

11.9.5 รีเลย์ตอบสนองแรงดัน (Voltage Relay) รีเลย์ชนิดนี้มีใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ และกระแสรั่วลงดิน โครงสร้างของรีเลย์ตอบสนองแรงดันเหมือนกับรีเลย์กระแสเกิน จะแตกต่างกันก็ที่มีขดลวดแรงดันรับสัญญาณจากหม้อแปลงแรงดัน (PT) คุณลักษณะของรีเลย์ชนิดเวลาผกผันเหมือนรีเลย์กระแสเกิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. รีเลย์แรงดันต่ำเกิน (UnderVoltage Relay) จะใช้สำหรับป้องกันมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์กำลังรับโหลด มอเตอร์จะดึงกระแสจากระบบจ่ายไฟมากขึ้น ถ้าแรงดันของระบบตกลง รีเลย์แรงดันต่ำเกิน จะสั่งทริปเบรกเกอร์ตัดมอเตอร์ออกจากระบบก่อนที่กระแสจะเพิ่มขึ้นมากจนถึงระดับที่มอเตอร์เกิดความร้อนสูง จนทำให้มอบเตอร์เสียหายได้ ถ้ามอเตอร์สตาร์ตขณะแรงดันตกอยู่นั้นจะทำให้ช่วงเวลาสตาร์ตของมอเตอร์ยืดนานออกไปอีก ซึ่งบางทีแรงดันยิ่งตกมากในช่วงกระแสพุ่งเข้า (Motor Inrush Current) ดังนั้นรีเลย์แรงดันต่ำเกินไปจึงป้องกันไม่ให้มีการสตาร์ตมอเตอร์ในขณะที่แรงดันตก ดังรูปที่ 11.23



รูปที่ 11.23 รีเลย์แรงดันต่ำเกิน

2. รีเลย์แรงดันเกิน (Over Voltage Relay) ใช้ป้องกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สภาวะแรงดันเกินอาจเกิดจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอัตโนมัติขัดข้อง หรือโหลดหลุดออกไปจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การที่แรงดันสูงเกินสภาวะปกติก็จะทำให้เกิดอันตรายต่อฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้ารวมทั้งตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเอง

บทที่ 12
การป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน
(Ground – Fault Protection)

ไฟฟ้าที่มนุษย์สร้างขึ้นจัดว่าเป็นสิ่งที่ดีมีคุณประโยชน์มากมายนานับประการ แต่ถ้าหากมีการป้องกันไม่ถูกต้องหรือไม่ดีพอ ย่อมจะให้โทษอย่างมหันต์แก่ชีวิตและทรัพย์สิน จากการสำรวจข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นของผู้ใช้กระแสไฟฟ้านั้นเกิดจากสาเหตุดังนี้

(ก) ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งอุปกรณ์ เช่น ฉนวนของสายไฟอาจเสียหายไม่มีการตรวจสอบให้ถูกต้องภายหลังการติดตั้ง

(ข) การเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ได้มาตรฐาน จะพิจารณาเฉพาะราคาและความสวยงามแต่มองข้ามถึงคุณภาพและอายุตลอดการใช้งาน

(ค) การกำหนดขนาดของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ เซอร์กิตเบรกเกอร์ และสายไฟฟ้ามีขนาดไม่เหมาะสม

(ง) เครื่องใช้ไฟฟ้าตลอดจนสายไฟฟ้าอาจเสื่อม ชำรุด ขาดการดูแลรักษา เช่น ฉนวนของสายไฟฟ้าถูกสัตว์กัด

(จ) เกิดความพลั้งเผลอหรือรู้เท่าไม่ถึงการณ์ รวมไปถึงความซุกซนของเด็ก มีโอกาสไปจับต้องกระแสไฟฟ้า ฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั่วไป จะไม่ตัดวงจรไฟฟ้า ถ้ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายไม่สูงพอที่เบรกเกอร์จะตัดได้ แต่ขนาดกระแสดังกล่าวอาจทำให้เสียชีวิตได้

ความบกพร่องที่เกิดจากทุก ๆ สาเหตุนั้นเกิดจากกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน แทบทั้งสิ้นกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน จะมีสาเหตุมาจากฉนวนเบรกดาวน์ (Breakdown) ซึ่งแยกสาเหตุไว้ 3 ประการ คือ

(ก) ฉนวนเสื่อมคุณภาพเนื่องจากความชื้น ความสกปรก สารที่ทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพ เป็นต้น

(ข) ความเสียหายทางกลเกิดจากเจาะทะลุ (Puncture)

(ค) เกิดแรงดันเกินชั่วครู่ (Transient Over Voltage) คล่อมฉนวน

12.1 การต่อลงดิน

วัตถุประสงค์ของการต่อลงดินโดยทั่วไปอาจกล่าวได้รวม ๆ ดังนี้

1. **ต่อลงดินเพื่อให้สิ่งที่ต่อลงดินมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับดิน** ไม่ว่าส่วนนั้นจะมีไฟฟ้าหรือไม่มีก็ตาม จะต่อลงดินด้วยตัวนำไฟฟ้า เช่นตัวถังหรือโครงโลหะห่อหุ้มอุปกรณ์ไฟฟ้า ถ้าฉนวนเกิดชำรุดส่วนที่มีไฟฟ้าจะไปสัมผัสกับตัวถังโลหะ เรียกว่า เกิดไฟรั่ว ย่อมทำให้ตัวถังอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ตู้เย็น

หม้อหุงข้าว เตาอบ เตารีด มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าดิน เมื่อคนไปสัมผัสเข้ากับตัวถังโลหะก็จะเกิดกระแสไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน เป็นการเกิดอันตรายในลักษณะที่เรียกว่าถูกไฟดูด แต่ถ้าตัวถังโลหะมีการต่อลงดิน หากใครบังเอิญไปสัมผัสกับตัวถังโลหะ การเกิดถูกไฟดูดย่อมไม่เกิดขึ้น การต่อตัวถังโลหะลงดินนอกจากจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับดินแล้ว ยังทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน เช่น ฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะเกิดกระแสลัดวงจรลงสู่ดินนั่นเอง

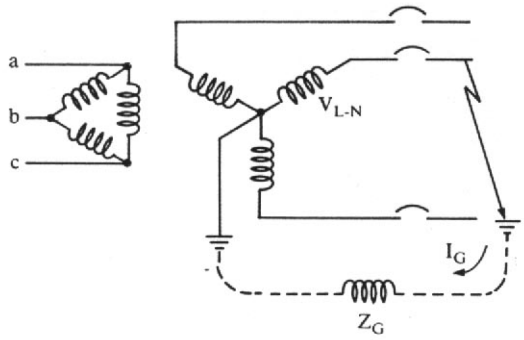
2. **ต่อลงดินเพื่อให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินทำงาน** เมื่อเกิดลัดวงจรลงสู่ดิน จะขจัดส่วนที่บกพร่องที่ลัดวงจรลงสู่ดินออกไป ส่วนอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการลัดวงจรลงสู่ดินก็ยังใช้งานได้ต่อไป

3. **ต่อลงดินเพื่อป้องกันแรงดันเกิน** ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าอาจเกิดแรงดันเกินได้จากสาเหตุหลายประการ เช่น เกิดจากฟ้าผ่าหรือสวิตชิงเสิร์จ

4. **การต่อลงดินเพื่อคลายประจุ** การต่อลงดินลักษณะเช่นนี้เป็นการทำทางให้คลายประจุลงสู่ดินได้โดยสะดวก และไม่เกิดผลเสียหายจากการคลายประจุ เช่น เคเบิลแรงสูงหลังจากใช้งานแล้วยังคงมีประจุค้างอยู่ จะเป็นอันตรายแก่ผู้ที่บังเอิญไปสัมผัสเข้า เมื่อมีการต่อลงดินก็จะเป็นทางระบายประจุดังกล่าวลงสู่ดิน

12.1.1 **การต่อลงดินของระบบ (system Grounding)** การต่อลงดินของระบบมีวัตถุประสงค์ก็เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทำงานเมื่อเกิดลัดวงจรลงสู่ดิน และทำหน้าที่ป้องกันอันตรายจากแรงดันเกินในระบบ การต่อลงดินของระบบจึงเป็นการต่อลงดินแบบเจตนา โดยปกติที่จุดศูนย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงต้องต่อลงดิน ระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์จะมีการต่อลงดินของระบบ 3 แบบคือ

1. ต่อลงดินโดยตรง (Solid Grounding) เป็นการต่อจุดศูนย์ (Neutral) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหม้อแปลงสู่ดินโดยตรง ไม่มีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มเติมในสายต่อลงดิน ดังรูปที่ 12.1 ระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์ ใช้ได้ทั้งระบบแรงดันสูงกว่า 600 v และแรงดันต่ำกว่า 600 v โดยทั่วไปจะรับไฟฟ้าจากการไฟฟ้าของทางการ ซึ่งจะเป็นระบบที่มีการต่อลงดินโดยตรงที่หม้อแปลง ทั้งนี้เพื่อป้องกันแรงดันเกินและกระแสไฟรั่วลงดิน กระแสงไฟรั่วลงดินนี้จะไหลผ่านรีเลย์ป้องกันไฟฟ้ารัวลงดินเพื่อสั่งทริปเบรกเกอร์ ข้อเสียของการต่อลงดินโดยตรงก็คือกระแสรั่วลงดินจะสูงมาก อาจมีการทำลายอย่างรวดเร็วจากกระแสอาร์กลงดิน



$$I_G = \frac{3V_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_G}$$

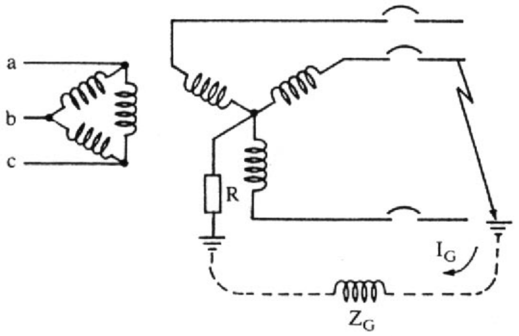
$$\approx \frac{V_{L-N}}{Z_1 + Z_G}$$

I_G (สูงสุด) $\approx \dfrac{V_{L-N}}{Z_1} \approx I_{3\phi}$ ฟอลต์

I_G (ต่ำสุด) จะต่ำมาก ๆ ถ้าไม่มีกระแสไฟรั่วลงดิน

รูปที่ 12.1 ต่อลงดินโดยตรง เพื่อให้รีเลย์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินสั่งทริปเบรกเกอร์

2. **ต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำ (Low Resistance Grounding)** ดังรูปที่ 12.2 การต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำนั้นคล้าย ๆ กับการต่อลงดินโดยตรง ความต้านทาน R จะทำหน้าที่จำกัดกระแสรั่วลงดิน ขนาดของกระแสไฟรั่วลงดินจะเพียงพอที่จะทำให้รีเลย์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินทำงาน ซึ่งสามารถที่จะตรวจจับและตัดกระแสไฟรั่วลงดินได้ โดยมากจะทำใช้กับระบบแรงดัน 2.4 kv ถึง 13.8 kv ที่โหลดมอเตอร์ต่อตรงอยู่ ทั้งนี้ขนาดความต้านทานจะขึ้นอยู่กับชนิดของรีเลย์และจำนวนของขดลวดมอเตอร์



$$I_G \approx \frac{V_{L-N}}{R}$$

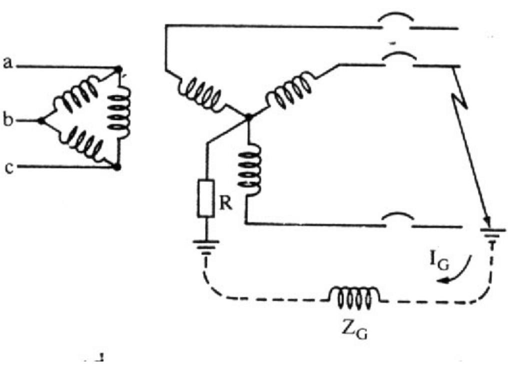
ถ้า $I_G = 600$ A; ดังนั้น

$$R = \frac{2400}{600} = 4\ \Omega$$

สำหรับระบบ 4.16/2.4 kV

รูปที่ 12.2 ต่อลงดินผ่านความต้านทานต่ำ เพื่อให้รีเลย์ป้องกันไฟรั่วลงดินสั่งทริปเบรกเกอร์

3. ต่อลงดินผ่านความต้านทานสูง (High Resistance Grounding) ดังรูปที่ 12.3 การต่อลงดินผ่านความต้านทานสูง จะจำกัดกระแสไฟรั่วลงดินให้มีค่าต่ำ ๆ กระแสรั่วลงดินจะต้องมีขนาดเพียงพอที่จะควบคุมให้รีเลย์ทำงาน การใส่ความต้านทานสูงจะใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการหยุดกระบวนการผลิต แต่รีเลย์ต้องมีความไวสูง



$$I_G \approx \frac{V_{L-N}}{R}$$

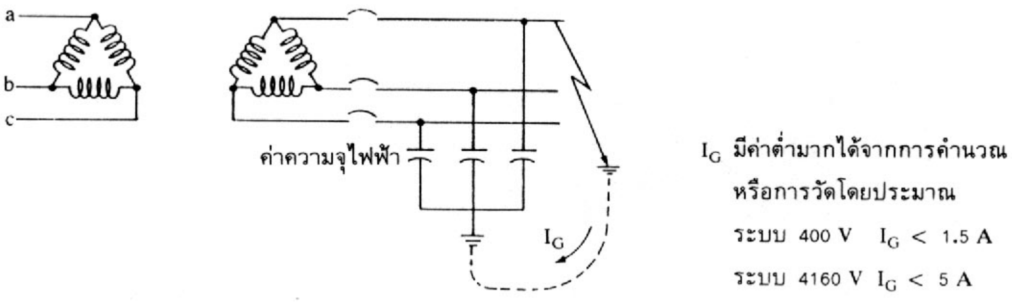
ถ้า $I_G \approx 5-10$ A; ดังนั้น

$$R = \frac{220}{I_G} \approx 22-44\ \Omega$$

สำหรับระบบ 380/220 V

รูปที่ 12.3 ต่อลงดินผ่านความต้านทานสูง เพื่อให้รีเลย์ป้องกันไฟรั่วลงดินสั่งทริปหรือเตือนภัย

12.1.2 **ระบบไม่ต่อลงดิน (UnGrounded System)** ดังรูปที่ 12.4 เป็นระบบหรือวงจรหรืออุปกรณ์ที่ไม่มีการต่อลงดินโดยเจตนา จะมีเส้นทางที่เกี่ยวโยงกับดินก็เพียงทางผ่านของอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก หรือไม่ก็เป็นทางผ่านค่าความจุไฟฟ้า ในกรณีที่ไม่มีการฟอลต์ลงสู่ดิน เมื่อโหลดอยู่ในสภาวะสมดุล จะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับดิน ค่าความจุไฟฟ้าที่กระจายแต่ละเฟสกับดินจะมีค่าเท่า ๆ กัน ข้อดีของระบบนี้ก็คือระบบไฟฟ้ายังสามารถจ่ายไฟต่อไปได้แม้ว่าจะมีการฟอลต์ลงดินเส้นเดียว การรบกวนต่อระบบสื่อสารจะลดลงเนื่องจากไม่มีกระแสลำดับศูนย์ไหล (Zero Sequence Current) แต่มีข้อเสียก็คือแรงดันไฟฟ้าในระบบอาจสูงเกินและจะทำอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงเกินอาจเป็นปัญหาจากการเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับดิน หรือเกิดจากฟ้าผ่า รีเลย์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน ต้องมีความไวเพียงพอที่จะแสดงการเกิดฟอลต์ขึ้นในวงจรได้



รูปที่ 12.4 ระบบไม่ต่อลงดิน ใช้ตรวจจับเพื่อจะเตือนภัย เมื่อบัสรั่วลงดิน

การป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน เป็นการป้องกันกระแสรั่วจากระบบไฟฟ้าผ่านตัวกลางที่ไม่พึงประสงค์ไหลลงสู่ดิน มีการป้องกันด้วยกัน 2 วิธีคือ การป้องกันอันตรายต่อบุคคล และการป้องกันอุปกรณ์กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านอวัยวะได้ทุกส่วน โดยทั่วไปอุบัติเหตุของคนที่ถูกไฟฟ้าดูด

12.2 ป้องกันอันตรายต่อบุคคลเนื่องจากกระแสไฟรั่วลงดิน

เกิดจากการใช้มือจับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ชำรุดหรือสายไฟที่ฉนวนถูกทำลาย กระแสไฟฟ้าจะไหลจากมือผ่านแขน ทรวงอก เอว ช่วงขา และสู่ปลายเท้าลงสู่ดิน ในทำนองเดียวกันกับอุบัติเหตุในลักษณะอื่น ๆ เส้นทางการไหลของกระแสจะผ่านอวัยวะของร่างกายแตกต่างกันออกไป โอกาสที่ทำให้เสียชีวิตได้มากที่สุดก็คือการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านกล้ามเนื้อทรวงอก หัวใจและศีรษะ สำหรับอวัยวะอื่น ๆ ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านนานเกินไป มันจะทำลายอวัยวะส่วนนั้น เพราะจะเกิดปฏิกิริยาทั้งทางกล้ามเนื้อและโลหิต กล้ามเนื้อจะเกร็งไหม้ อวัยวะส่วนนั้นจะกลายเป็นสีดำและในที่สุดก็ต้องตัดทิ้งอย่างน่าเสียหาย ฉะนั้นเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านร่างกายลงสู่ดิน จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน ที่เรียกว่า *เครื่องป้องกันไฟดูด* ซึ่งมีชื่อเรียกหลายอย่างได้แก่

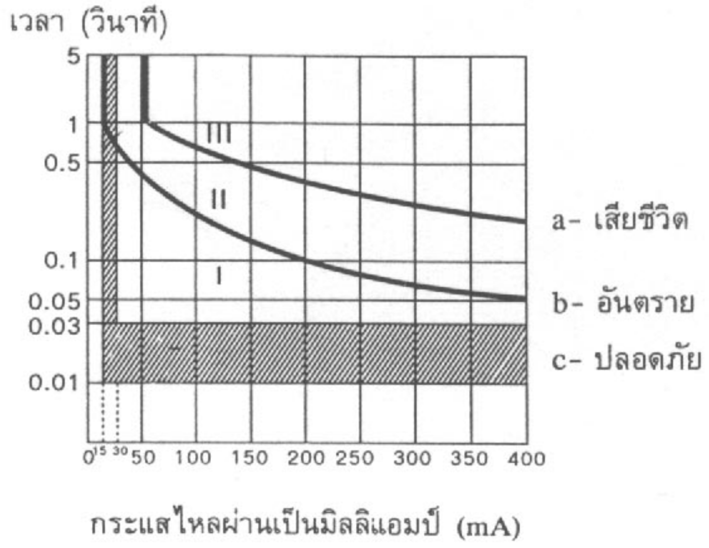
(ก) เครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดิน (Ground Fault Circuit – Interrupter) หรือ GFCI

(ข) เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสไฟรั่วลงดิน (Earth Leakage Circuit Breaker) หรือ ELCB

(ค) เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสตกค้าง (Residual Current Circuit Breaker) หรือ RCCB

เซอร์กิตเบรกเกอร์เหล่านี้จะมีความไวต่อการตัดวงจรสูงมาก เนื่องจากจุประสงค์ต้องการไว้ป้องกันกรณีเกิดไฟรั่วผ่านตัวคนลงสู่ดิน ขนาดของกระแสไฟรั่วและช่วงเวลาตั้งแต่การตัดวงจรไฟฟ้าจะมีความสำคัญต่อชีวิตเป็นอย่างมาก ขนาดของกระแสที่จะเป็นอันตรายมีค่า 20 mA (0.02 A) ขึ้นไปจะทำให้ไม่สามารถปล่อยมือออกได้ และจะเสียชีวิตในเวลา 2 – 3 นาที ดังนั้นถ้าเรามีอุปกรณ์ที่สามารถตัดวงจรไฟฟ้าออกได้ทันเวลาก็จะไม่เป็นอันตราย ตามมาตรฐาน IEC 479 นั้น กำหนดว่าขีดจำกัดที่ปลอดภัยของคนจะมีขนาดกระแสสูงสุด 30 mA (0.03 A) ไหลผ่านตัวคนนานไม่เกิน 0.5

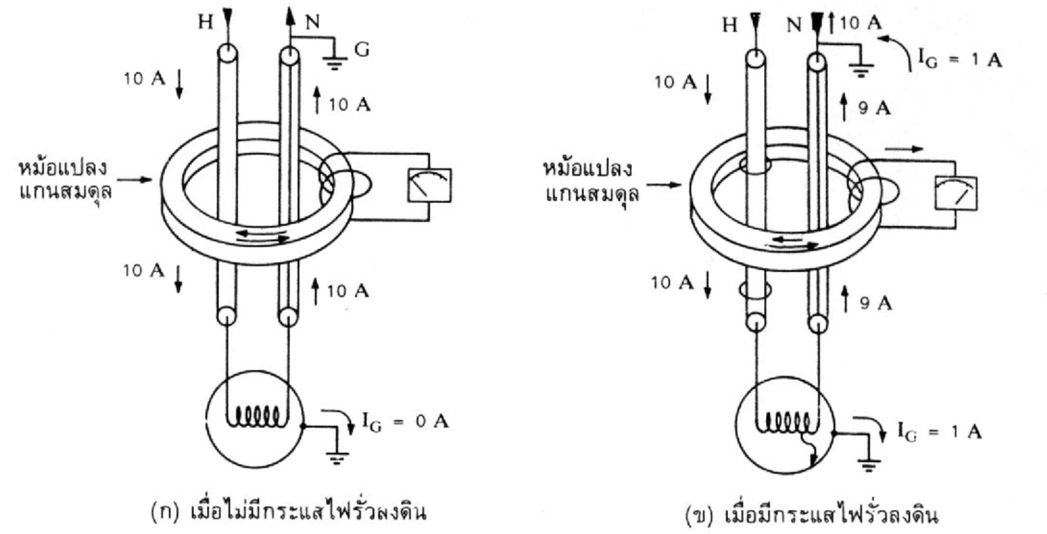
วินาที ดังนั้น GFCI จึงออกแบบไว้ 2 ขนาด คือให้ตัดที่ 10 mA (0.01 A) หรือ 30 mA (0.03 A) และมีความไวในการตัดกระแสไฟรั่วภายในระยะเวลา 0.01 – 0.03 วินาที (10 – 30 ms) เท่านั้น ดังรูปที่ 12.5 ช่วงของเส้นแรเงาจะอยู่ในเขตปลอดภัย I ส่วนเขตอันตรายและทำให้เสียชีวิตได้ทันทีนั้นอยู่ในเขต II และ III ตามลำดับ เส้นโค้งเวลาและกระแสที่ไหลผ่านเป็นมิลลิแอมป์นี้ นับว่ามีประโยชน์อย่างมากต่อการเลือกซื้อเครื่อง GFCI ซึ่งต้องให้มีช่วงการทำงานอยู่ในเขตปลอดภัยเท่านั้นจึงจะใช้ได้



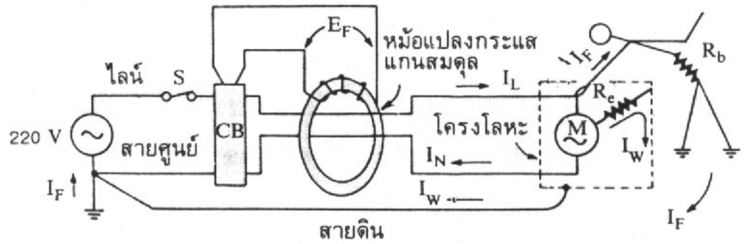
รูปที่ 12.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกระแสที่ไหลผ่านร่างกายเป็นมิลลิแอมป์

12.2.1 หลักการทำงานของ GFCI ตามรูปที่ 12.6 แสดงการทำงานของหม้อแปลงกระแสแกนสมดุล (Core Balance) รูปที่ 12.6 (ก) เมื่อไม่มีกระแสไฟรั่วลงดิน กระแสในสายไลน์และกระแสในสายศูนย์จะมีค่าเท่ากัน คือ 10 A แต่ทิศทางการไหลของกระแสตรงกันข้ามกัน คือ จะหักล้างกันหมด ทำให้ไม่มีการเหนี่ยวนำในขดลวดค้นหากระแสรั่ว (Search Coil) จึงไม่มีกระแสไหล ส่วนรูปที่ 12.6 (ข) ถ้ามีกระแสไฟรั่วลงดิน 1 A ทำให้กระแสในสายไลน์และสายศูนย์ไหลไม่เท่ากัน ผลต่างของกระแสทั้งสองจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่หม้อแปลงกระแสแกนสมดุล จะมีกระแสไหลในขดลวดค้นหากระแสรั่ว กระแสจำนวนดังกล่าวจะส่งสัญญาณไฟสั่งทริปเซอรึกิตเบรกเกอร์ต่อไปดังรูปที่ 12.7 กระแสรั่วลงดิน I_F เกิดจากการไปสัมผัสถูกกับขั้วต่อมอเตอร์ หรืออาจเกิดจากฉนวนของมอเตอร์เสื่อมแตะกับโครงมอเตอร์ เกิดกระแส I_W ไหลผ่านทางสายดิน กระแสไฟรั่วดังกล่าวจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน E_F แล้วจึงส่งสัญญาณไปทริปเบรกเกอร์ (CB) เครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดิน (GFCI) ตามผลิตภัณฑ์ของสหรัฐอเมริกาในท้องตลาดมักเรียกว่า *เบรกเกอร์หางหมู* ดังรูปที่ 12.8 ส่วนรูปที่ 12.9 แสดงวงจรการต่อเบรกเกอร์หางหมู รูปที่ 12.10 แสดงการต่อเบรกเกอร์ทั่วไปและเบรกเกอร์ชนิดเครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดิน (GFCI) ส่วนเครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดินชนิด 3 เฟส หม้อแปลงกระแสแกนสมดุลจะคล้องสายไฟทั้งเฟส A, เฟส B, เฟส C และรวมทั้ง

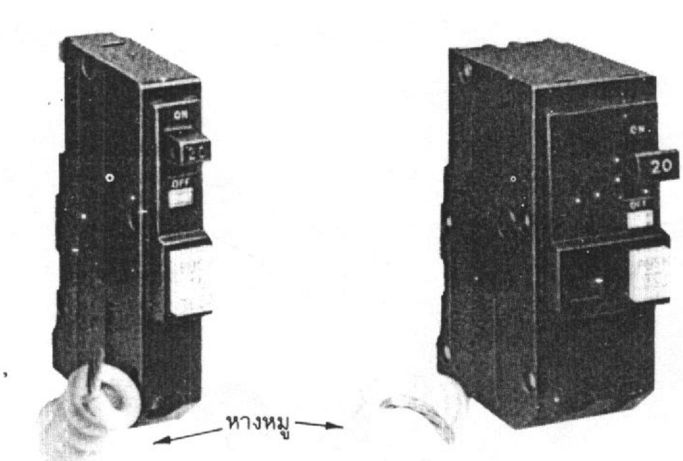
สายศูนย์เข้าด้วยกัน ถ้าไม่มีกระแสรั่วไหลผลรวมของกระแสในเฟสและในสายศูนย์จะมีค่าเป็นศูนย์ (รวมกันทางเวกเตอร์) ดังรูปที่ 12.11



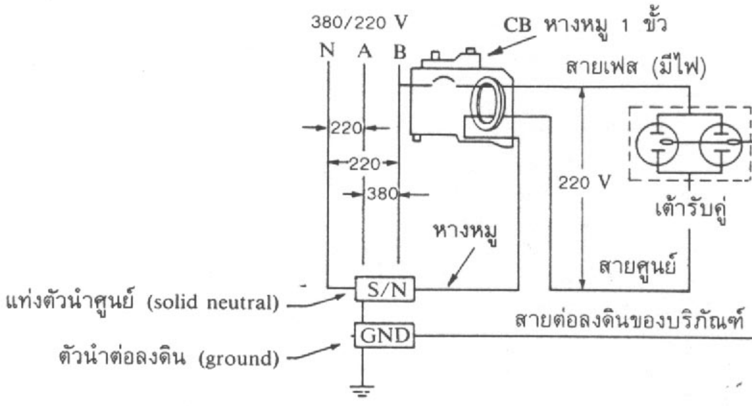
รูปที่ 12.6 แสดงการทำงานของหม้อแปลงกระแสแกนสมดุล



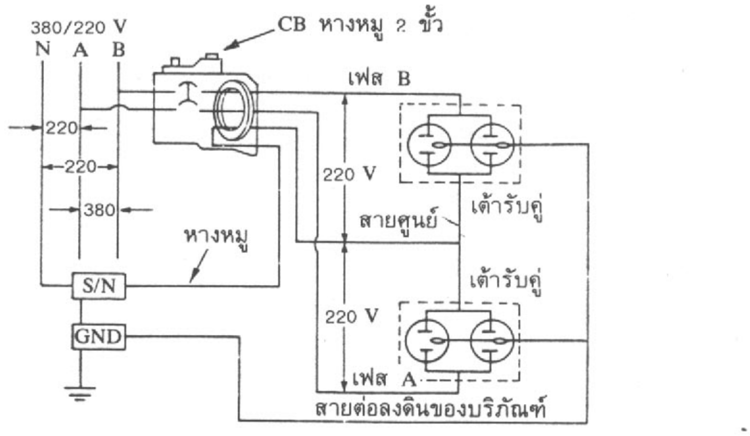
รูปที่ 12.7 เครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดิน จะสั่งทริปเบรกเกอร์เมื่อกระแสรั่วภายนอก



รูปที่ 12.8 เบรกเกอร์หางหมู

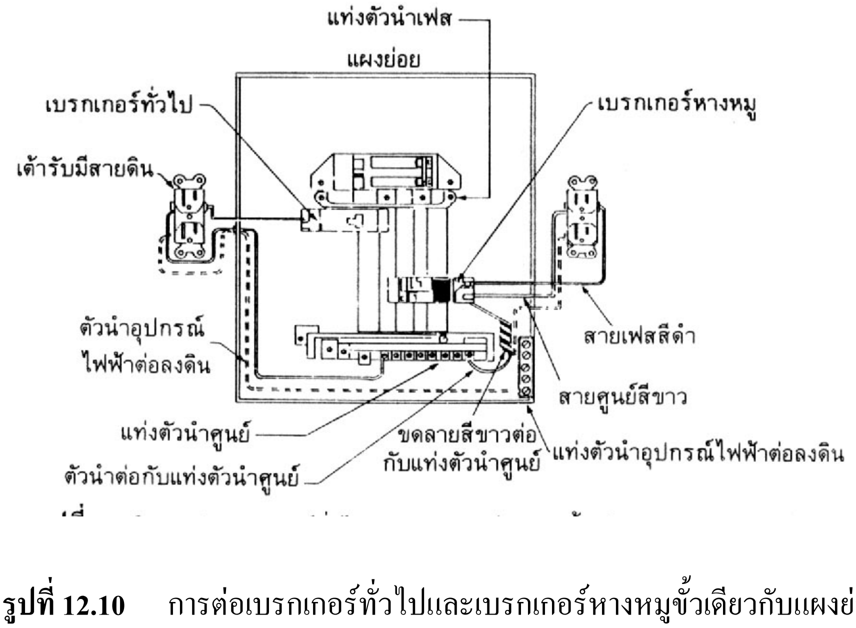


(ก) การต่อเบรกเกอร์หางหมูขั้วเดียวป้องกันเต้ารับคู่วงจรเดียว

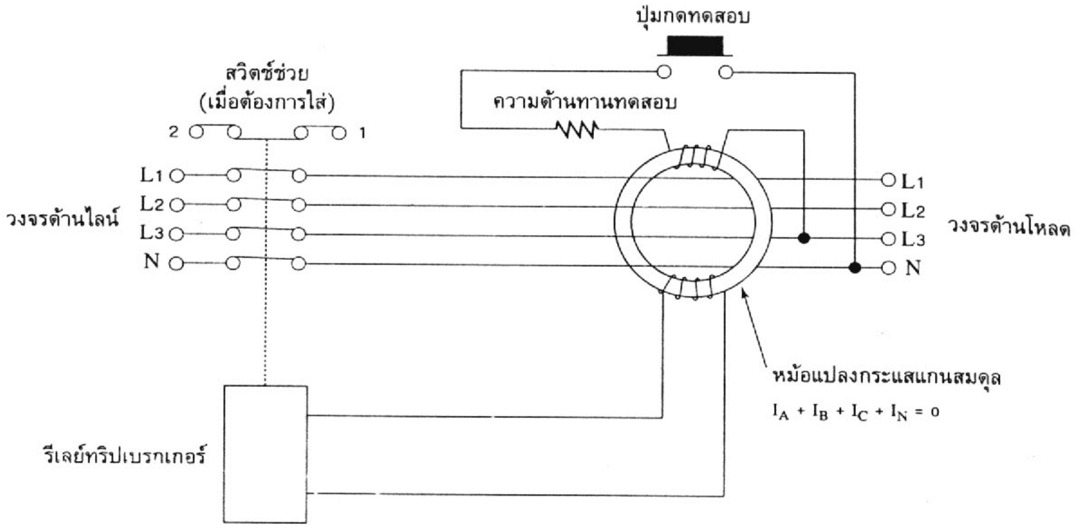


(ข) การต่อเบรกเกอร์หางหมูสองขั้วป้องกันเต้ารับคู่สองวงจร

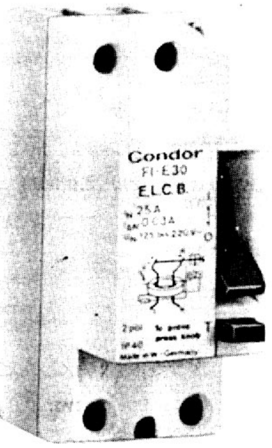
รูปที่ 12.9 การต่อเบรกเกอร์หางหมูขั้วเดียวและสองขั้ว



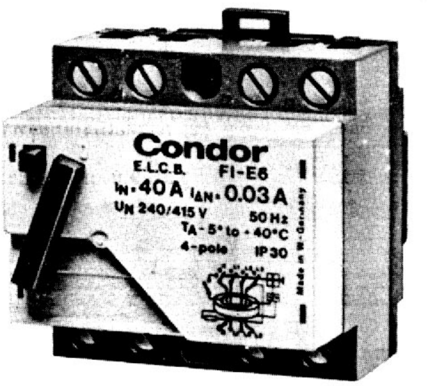
รูปที่ 12.10 การต่อเบรกเกอร์ทั่วไปและเบรกเกอร์หางหมูขั้วเดียวกับแผงย่อย



รูปที่ 12.11 เครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดินชนิด 3 เฟส 4 สาย



(ก) ELCB ชนิด 2 ขั้ว เฟสเดียว 2 สาย กระแสทริป 16 A, 25 A, 40 A



(ข) ELCB ชนิด 4 ขั้ว 3 เฟส 4 สาย กระแสทริป มีขนาด 25 A, 40 A, 63 A และ 80 A

รูปที่ 12.12 เซอรกิตเบรกเกอร์กระแสไฟรั่วลงดิน ตัดวงจรเมื่อกระแสรั่วลงดิน 30 mA ผลิตภัณฑ์หนึ่ง เวลากับการตัดน้อยกว่า 0.03 วินาที (30 ms)

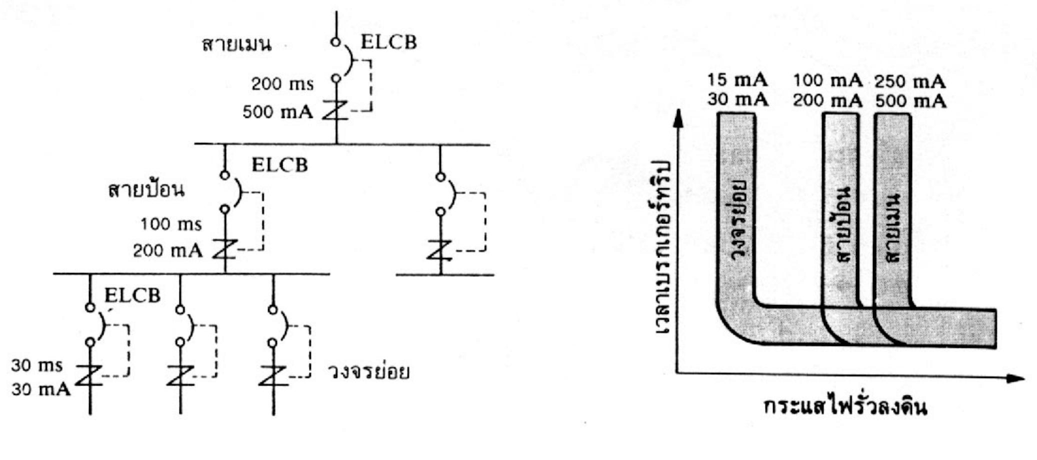
สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสไฟรั่วลงดิน (ELCB) ตามผลิตภัณฑ์ของยุโรปหรือญี่ปุ่น จะไม่มีหางหมู ดังรูปที่ 12.12 และมีขนาดให้เลือกใช้ดังตารางที่ 12.1 การจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันระหว่างสายเมน สายป้อนและวงจรย่อย เพื่อไม่ให้ตัดพร้อมกันเมื่อฟอลต์ลงดินที่วงจรย่อย ควรเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสไฟรั่วลงดิน โดยที่เลือกพิกัดกระแสไฟรั่วลงดินสำหรับวงจร

ย่อย 15 ถึง 30 mA เวลาการตัด 30 ms สายป้อน 100 ถึง 200 mA เวลาการตัด 100 ms และสายเมน 250 ถึง 500 mA เวลาการตัด 200 ms ดังรูปที่ 12.13

ตารางที่ 12.1 ขนาดพิกัดเซอร์กิตเบรกเกอร์กระแสไฟรั่วลงดิน (ELCB)

ขั้ว	พิกัดกระแสเฟรม (AF)	พิกัดกระแสทริป (AT)	พิกัดกระแสไฟรั่วลงดิน* (mA)	กระแสขณะอินเตอร์รัพต์ (IC) เป็น (kA) สมมาตร	
				220 V	380 V
2	30	10,15,20,30	15,30,100,200,300,500	1.5,3	-
	50	10,15,20,30,40,50	15,30,100,200,300,500	3,5	2.5
	100	50,60,75,100	30,100/200	10	5,7.5,5,10,14
3	50	10,15,20,30,40,50	15,30,100,200,300,500	3,5	2.5
	100	50,60,75,100	30,100/200,200/500	10	5,7.5,10,14
	225	125,150,175,200,225		18,42	10,25
	400	250,300,350,400		35,42,85	22,25,42
	600	500,600		42,85	30,42
	800	700,800		42,85	30,42
	1000	1000	200/500	85	50
4	100	25,30,40,50,60,63,75,80,100	30,100,300,500	-	3,10,14,25,42
	225	125,150,175,200,225	30,100/200/500	-	10,25,42
	400	250,300,350,400	30,100/200/500	-	25,42

* เวลาการตัดบางขนาดอาจเป็น 30 ms , 100 ms, 200 ms, 300 ms , หรืออาจเป็นแบบปรับตั้งค่าได้



รูปที่ 12.13 การเลือกขนาดพิกัดกระแสไฟรั่งลงดิน เพื่อการจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกัน

ส่วนเครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดิน ที่เป็นผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ ก็มีอยู่หลายผลิตภัณฑ์เช่นกัน สามารถปรับตั้งกระแสรั่วลงดินตั้งแต่ 5 mA , 10 mA, 15 mA, 25 mA และตัดในเวลาไม่เกิน 0.03 วินาที (30ms) นอกจากนี้ยังมีปุ่มปรับอีกย่านหนึ่ง คือ โดยตรง (direct) ถ้าปรับที่ปุ่มโดยตรงเมื่อเกิดกระแสรั่งลงดินแบรกเกอร์จะไม่ตัด เบรกเกอร์จะตัดในกรณีที่ไฟลัดวงจรหรือโหลดเกินเท่านั้น ดังรูปที่ 12.14

รูปที่ 12.14 เครื่องตัดวงจรเมื่อกระแสไฟรั่วลงดิน ผลิตภัณฑ์หนึ่งภายในประเทศ

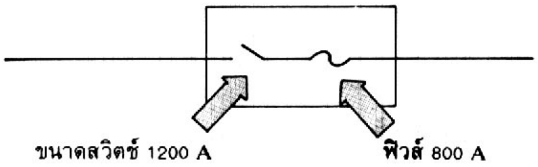
12.2.2 การพิจารณานำเครื่องป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินไปใช้งาน เนื่องจาก GFCI หรือ ELCB นี้มาความไวต่อกระแสสูง ดังนั้นจึงควรระวังในการติดตั้ง เนื่องจากหม้อแปลงตรวจจับกระแสรั่วลงดินอาจได้รับกระแสเหนี่ยวนำจากสายไฟฟ้าชุดอื่น ๆ ที่อยู่ข่างเครียง อาจทำให้เบรกเกอร์ทริปได้โดยที่กระแสไม่ได้รั่ว อีกประกาหนึ่งก็คือวงจรไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้ว ในสภาวะระปกติอาจมีกระแสรั่งไหลผ่านทางฉนวนได้บ้างเล็กน้อย วงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่จะมีวงจรอยู่จำนวนมาก และยิ่งในวันที่มีฝนตก อากาศชื้น ผลรวมของกระแสรั่วทั้งหมดอาจสูงมากพอที่จะทริปเบรกเกอร์ ELCB ได้ย่อมทำให้เกิดความรำคาญในการใช้ไฟได้ ดั้งนั้นจึงควรพิจารณาติดตั้ง GFCI หรือ ELCB เฉพาะวงจรที่อาจเกิดอันตรายต่อบุคคลได้เท่านั้น เช่น เต้ารับ เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป วงจรไฟฟ้าสำหรับห้องน้ำ ไฟสนาม เป็นต้น

12.3 การป้องกันอุปกรณ์เนื่องจากกระแสไฟรั่วลงดิน

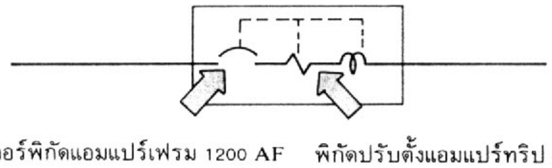
การป้องกันอุปกรณ์เนื่องจากกระแสไฟรั่วลงดิน (Ground Fault Protection of Equipment) มักมีอุปกรณ์ห้องกันที่เรียกว่าเครื่องป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน (Ground-Fault Protective) หรือ GFP ใน

วงจรที่มีกระแสสูง ๆ นั้น กระแสรั่วไหลลงดินบางครั้งก็ไม่ได้ไปเพิ่มกระแสโหลดปกติให้สูงเกินกว่าที่เบรกเกอร์จะทริปได้ ฉะนั้นจำเป็นต้องมี GFP ติดตั้งไว้ แต่จะทำงานที่กระแสไฟรั่วลงดินสูงกว่าชนิดป้องกันอันตรายต่อบุคคล ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 230-95 ระบุว่าการป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินของ อุปกรณ์ ระบบสายเมน 3 เฟส 4 สาย สายศูนย์ต่อลงดินโดยตรง แรงดันระบุ 380 V แต่ไม่เกิน 600 V ต้องติดตั้ง GFP ที่เมนสวิตช์ที่มีพิกัดกระแสตั้งแต่ 1000 A ขึ้นไปดังรูปที่ 12.5 ส่วนการปรับตั้งระบบป้องกันกระแสไฟรั่วลงดิน ต้องทำให้เครื่องปลดวงจรปลดตัวนำที่ไม่ต่อลงดิน ในขณะที่มีกระแสไฟรั่วลงดินตั้งแต่ 3000 A ขึ้นไป ให้มีการหน่วงเวลาไว้สูงสุดไม่เกิน 1 วินาที ดังรูปที่ 12.6

ข้อบังคับการติดตั้งและปรับตั้ง GFP นี้ จะไม่บังคับกับกระบวนการอุตสาหกรรมแบบต่อเนื่อง ซึ่งการหยุดการทำงานอย่างไม่เป็นไปตามลำดับ จะทำให้เกิดความเสียหายเพิ่มขึ้น และจะไม่บังคับกับเครื่องสูบน้ำดับเพลิง

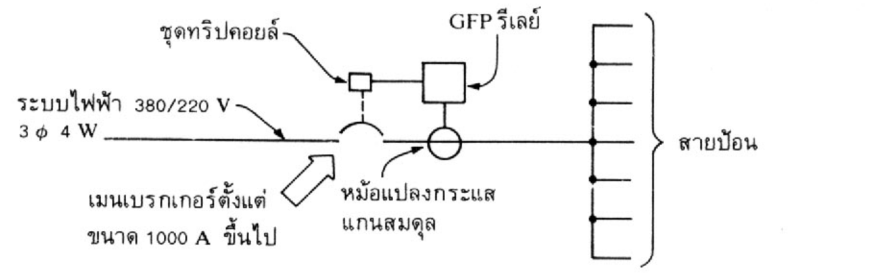


(ก) ถ้าใช้ฟิวส์ 800 A กับเมนสวิตช์ขนาด 1200 A **ต้องติดตั้ง GFP** เนื่องจากอาจเลือกใช้ขนาดฟิวส์เกินกว่า 1000 A ได้ ซึ่งสามารถเสียบเข้ากับขั้วรับฟิวส์ได้

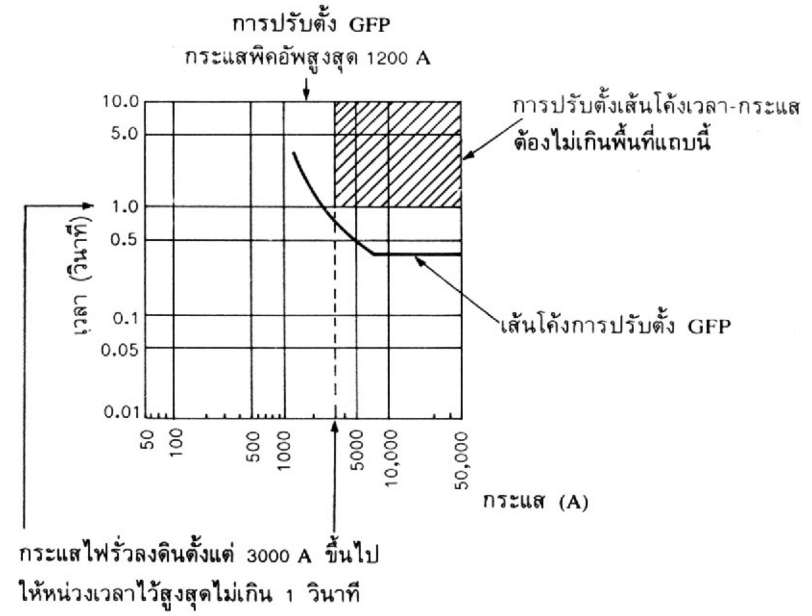


(ข) ต้องติดตั้ง GFP เนื่องจากเบรกเกอร์สามารถปรับตั้งพิกัดแอมแปร์ทริปให้สูงกว่า 1000 A

รูปที่ 12.15 เมนสวิตช์พิกัดกระแส 1000 A ขึ้นไป ต้องติดตั้ง GFP



(ก) เมนเบรกเกอร์ตั้งแต่ 1000 A ขึ้นไป ต้องติดตั้ง GFP

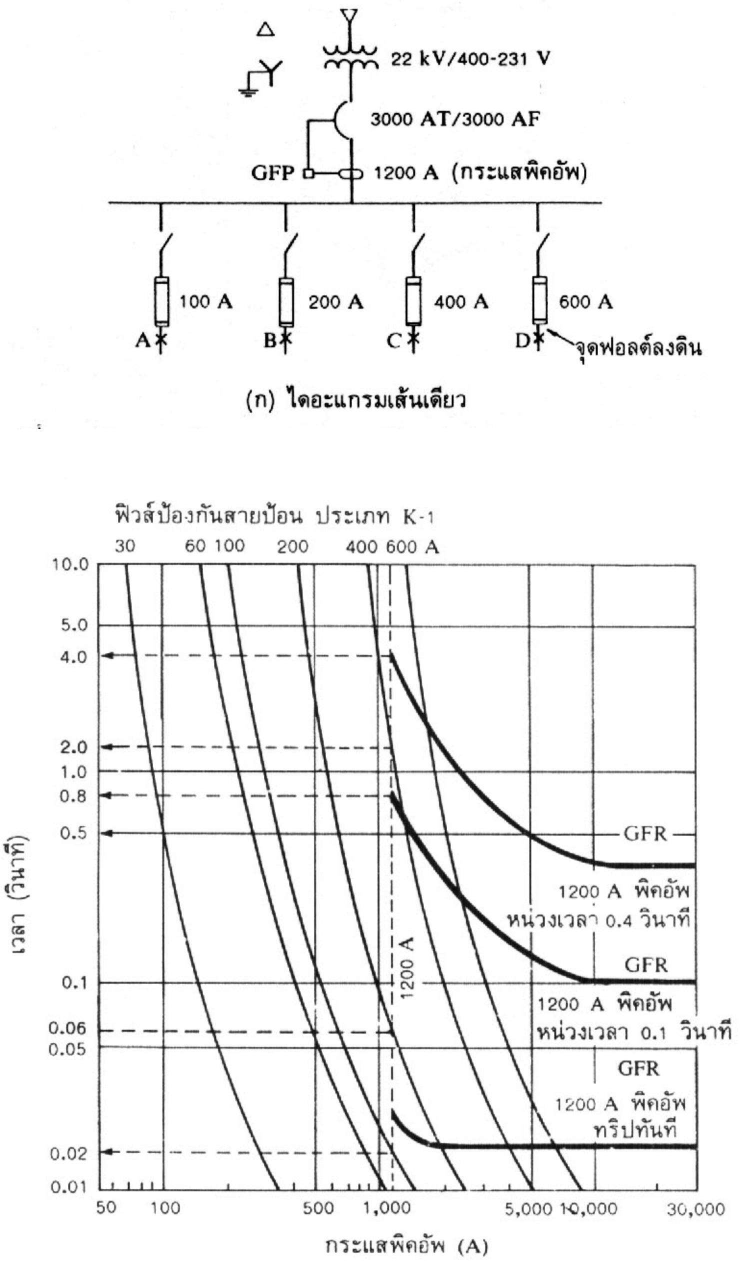


(ข) การปรับตั้ง GFP ต้องไม่เกิน 1200 A

รูปที่ 12.16 การติดตั้ง และปรับตั้ง GFP

12.4 การติดตั้ง GFP ร่วมกันฟิวส์

การติดตั้ง GFP ร่วมกับฟิวส์ ดังรูปที่ 12.17 เมื่อปรับตั้ง GFP ให้กระแสพิคอัพที่ 1200 A สมมุติว่าถ้าเกิดกระแสไฟรั่วลงดิน 1200 A ที่จุด A, B, C หรือ D ฟิวส์ 100 A จะขาดในเวลา 2.0 วินาที ส่วนที่จุด D ฟิวส์ 600 A จะไม่ขาด แต่ GFP จะสั่งตัดเบรกเกอร์ตัวเมนก่อน ทำให้ฟิวส์ 600 A ไม่สามารถจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันกับ GFP ได้ แต่ถ้าปรับตั้ง GFP ให้หน่วงเวลา 0.1 วินาที ฟิวส์ 100 A และ 200 A จะมีการจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกัน ส่วนฟิวส์ 400 A และ 600 A นั้น GFP จะสั่งให้ตัดเบรกเกอร์ตัวเมนก่อน จึงไม่สามารถจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันได้



(ก) ไดอะแกรมเส้นเดียว

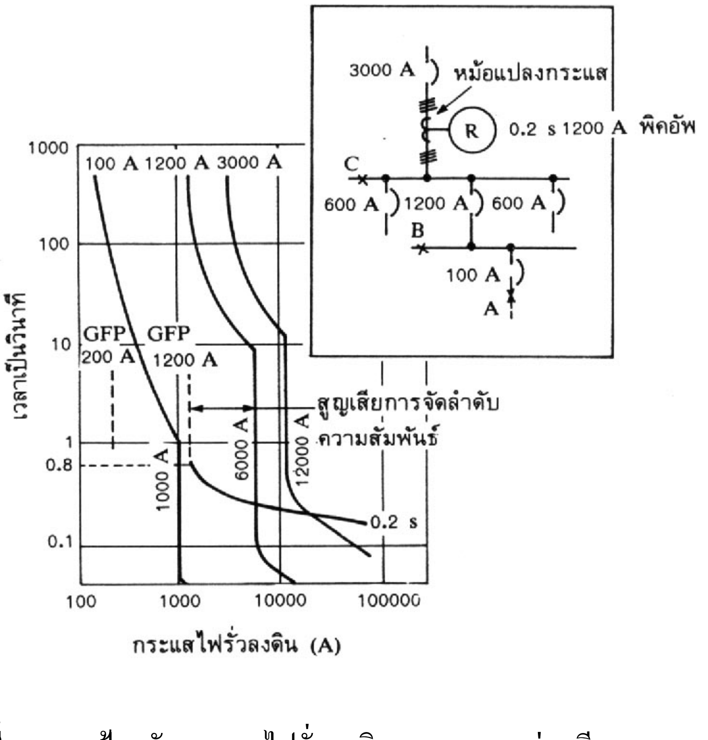
(ข) เส้นโค้งของฟิวส์และ GFP ปรับตั้งกระแสพิคอัพ 1200 A

รูปที่ 12.17 การติดตั้ง GFP ร่วมกับฟิวส์ ให้จัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกัน

12.5 รูปแบบการป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินและการนำไปใช้

การพิจารณานำอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินไปใช้งาน ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลง ควรมี GFP ป้องกัน และเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวเมนควรอยู่ใกล้กับหม้อแปลง ทั้งนี้เพื่อป้องกันกระแสฟอลต์ลงดินระหว่างเมนเบรกเกอร์กับหม้อแปลง รูปแบบการป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินพิจารณา 2 รูปแบบง่าย ๆ คือ แบบเครื่องป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินที่เมนอย่างเดียวและแบบเครื่องป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินที่เมนและสายป้อน

1. ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินที่เมนอย่างเดียว ดังรูปที่ 12.18 เมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ขนาด 3000 A มีอุปกรณ์การทริปหน่วงเวลานานและหน่วงเวลาสั้น ส่วนสายป้อน 1200 A มีอุปกรณ์การทริปหน่วงเวลานานและทริปทันที วงจรย่อยประกอบด้วยอุปกรณ์การทริปด้วยความร้อนและทริปทันที มีอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินที่เมนโดยตั้งเวลาหน่วงไว้ที่ 0.2 วินาที หรือ 10 ไซเกิล สามารถจัดลำดับความสัมพันธ์ทั้งหมดโดยการปรับตั้งเบรกเกอร์ 1200 A และ 100 A เฉพาะการทริปทันทีเท่านั้น



รูปที่ 12.18 ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินเฉพาะเมนอย่างเดียว

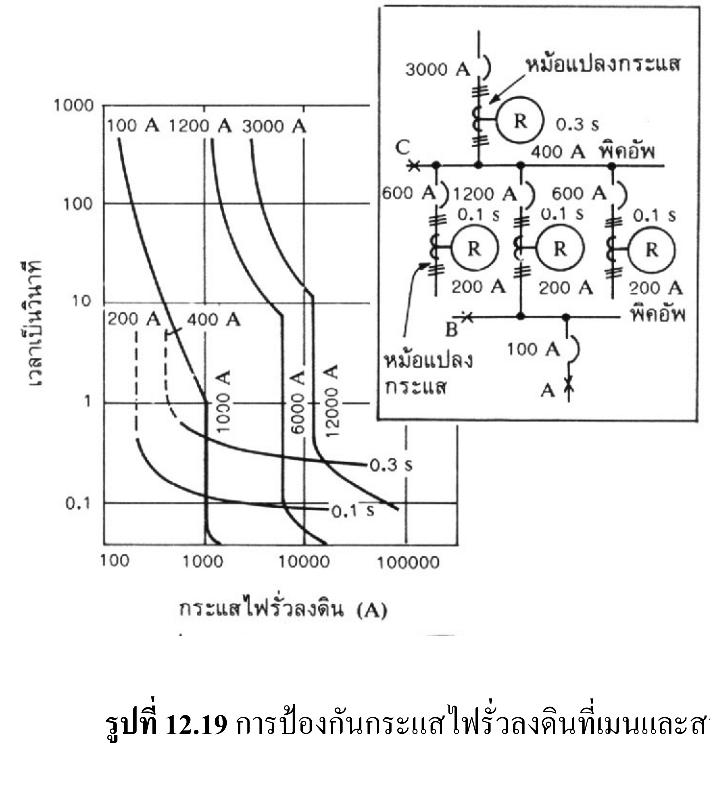
สำหรับเบรกเกอร์ 1200 A ป้องกันสายป้อน ถ้าต้องการให้การจัดลำดับความสัมพันธ์ทั้งหมด ต้องตั้งรีเลย์กระแสไฟรั่วลงดินใหม่กระแสพิคอัพตั้งแต่ 6000 A ขึ้นไป แต่พลังงานจากอาร์กจะอยู่ในระดับความเสียหายรุนแรง คือ 480 kW – s ((6000 x 100 x 0.8) / 1000) ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินไป การป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินที่ดีควรมีกระแสพิคอัพ 200 A แต่ก็สูญเสียการจัดลำดับความสัมพันธ์ ดังนี้

(ก) ถ้ากระแสไฟรั่วลงดินที่ A จะสูญเสียการจัดลำดับความสัมพันธ์ระหว่าง 200 – 1000 A

(ข) ถ้ากระแสไฟรั่วลงดินที่ B จะสูญเสียการจัดลำดับความสัมพันธ์ระหว่าง 200 – 6000 A

ดังนั้นไม่ว่าจะเกิดกระแสไฟรั่วลงดินเกิน 200 A ที่วงจรย่อยหรือสายป้อนใด ๆ ก็จะเกิดทริปที่เมนตลอด จึงเป็นการทริปแบบรบกวนการทำงาน ทางที่ดีเพื่อให้พบกันคนละครึ่งทาง ควรปรับตั้งรีเลย์กระแสไฟรั่วลงดินให้กระแสพิคอัพต่ำสุด 1200 A พลังงานจากอาร์กจะรุนแรงขึ้นแต่ก็ยังอยู่ในย่านที่รับได้ ส่วนการสูญเสียการจัดลำดับความสัมพันธ์อยู่ระหว่าง 1200 – 6000 A เท่านั้น

2. ป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินที่เมนและสายป้อน ดังรูปที่ 12.19 เบรกเกอร์สายป้อน 600 A และ 1200 A จะมีรีเลย์กระแสไฟรั่วลงดินปรับตั้งค่ากระแสพิคอัพ 200 A และหน่วงเวลา 0.1 วินาที ส่วนเบรกเกอร์สายเมนขนาด 3000 A ปรับตั้งค่ากระแสไฟรั่วลงดินที่กระแสพิคอัพ 400 A และหน่วงเวลา 0.3 วินาที เมื่อเกิดฟอลต์ลงดินที่สายป้อน เบรกเกอร์สายป้อนจะทริปก่อนเบรกเกอร์ตัวเมนเสมอ จึงสามารถจัดลำดับความสัมพันธ์การป้องกันได้ ยกเว้นที่จุด A ถ้าเกิดฟอลต์ลงดินเส้นเดียว 200 A เบรกเกอร์สายป้อน 1200 A จะทริปก่อนเบรกเกอร์วงจรย่อย 100 A แต่ถ้าฟอลต์ลงดินเส้นเดียวมากกว่าหรือเท่ากับ 1000 A เบรกเกอร์ 100 A ก็จะทริปก่อนเบรกเกอร์ 1200 A แบบนี้จึงเป็นที่นิยมค่อนข้างมาก



รูปที่ 12.19 การป้องกันกระแสไฟรั่วลงดินที่เมนและสายป้อน