

## บทที่ 3 power circuit breaker

### power circuit breaker

power circuit breaker คือ อุปกรณ์ที่ใช้ตัดกระแส load หรือ กระแสที่มีค่าสูงที่เกิดจากการลัดวงจรได้ในเวลาที่เหมาะสมและทันเวลาก่อนที่จะเกิดผลเสียหายตามมาจนเป็นอันตรายกับคน หรือ อุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียง อุปกรณ์นี้จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในสถานี

#### 3.1 หน้าที่และการใช้งาน

circuit breaker เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กลไกเคลื่อนที่ตัดต่อวงจรไฟฟ้า (mechanical switching device) สามารถต่อ (making) และให้กระแสไหลผ่าน (carrying) ในเวลาที่กำหนด และ ตัดกระแส (breaking) ในขณะที่เกิดสิ่งผิดปกติ เช่น เกิดลัดวงจร ฉะนั้นจึงกำหนดหน้าที่ของ circuit breaker ในสภาพที่กระแสที่ไหลผ่านทั้งในขณะที่ระบบมีสภาพปกติและเกิดผิดปกติ

การทำงานของ circuit breaker ในขณะระบบมีลัดวงจรเกิดขึ้น เป็นหน้าที่หลัก แม้ว่าตลอดอายุการใช้งานจริงอาจจะทำหน้าที่หลักนี้น้อยครั้ง และกระแสลัดวงจรที่ตัดอาจจะไม่เท่ากับ rated breaking current แต่อย่างไรก็ตาม breaker ก็ต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถ

breaker รุ่นใหม่ๆ จะมีคุณภาพที่ดีขึ้น เมื่อทำงานจะไม่ก่อให้เกิดปัญหา หรือเกิดน้อยที่สุดกับระบบ หรือไม่ทำให้อุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงเกิดความเสียหาย วงจรที่ใช้งานเป็นหลักในระบบต้องการ breaker ที่ทำงานเร็ว (high speed) ไม่ทำให้เกิด over voltage สูงเกินไป และสามารถทำงานได้หลายครั้งอย่างมั่นใจ

เนื้อหาในนี้จะกล่าวเฉพาะ AC breaker ไม่รวมถึง DC breaker

#### 3.2 arcing

##### 3.2.1 การเกิด arc

arc เป็น conductor ชนิดหนึ่งซึ่งลำของ arc สร้างขึ้นด้วยก๊าซที่แตกตัว มีอุณหภูมิสูง (hot ionized gas) จึงมีสภาพเป็นตัวนำ กระแสที่ไหลผ่าน arc มีความสัมพันธ์กับแรงดันระหว่างปลายทั้งสองของ arc

contact ของ breaker เป็นโลหะ และแช่อยู่ในฉนวน เช่น insulating oil , SF<sub>6</sub> gas, หรืออากาศ ฉนวน หรือ medium นี้จะไม่นำกระแสที่อุณหภูมิปกติ ฉะนั้นในสภาพ open จึงไม่มีกระแสไหลผ่าน ในขณะที่ breaker อยู่ในสภาพ close กระแสจะไหลผ่าน breaker ทางโลหะของ contact ที่ต่อกันอยู่

ถ้าพิจารณาขณะที่มีกระแสไหลผ่าน และ contact เริ่มเคลื่อนที่จากกันเมื่อได้รับคำสั่งให้ open จะมีค่า resistance เพิ่มขึ้น มีแรงดันตกคร่อมประมาณ 2-3 volt เมื่อเริ่มแยกออกจนมีระยะห่างเล็กน้อย (gap) แรงดันคร่อม gap จะเพิ่มสูงขึ้นมาก เกิด electric field gradient ระหว่าง gap สูงจน electron สามารถหลุดออกจาก contact วิ่งผ่าน gap ไปสู่อีกด้าน ช่วงนี้มีเวลาเป็น microsecond เป็นจุดเริ่มต้นของ arc

### 3.2.1.1 การพัฒนาของ arc

ขณะที่เริ่มเกิด arc ขึ้น จะทำให้ฉนวนหรือ medium มีความร้อนเพิ่มขึ้น และแตกตัว (ionize) ถ้ากระแสที่ไหลมีปริมาณสูงมากจะทำให้ฉนวนมีความร้อนสูงมาก ซึ่งทำให้เกิดการแตกตัวอย่างรวดเร็ว ถ้าฉนวนเป็นน้ำมัน จะแตกตัวเป็น hydrogen gas และมี ion ของ gas ปริมาณมาก ในบริเวณที่ arc ผ่าน ในห้องที่เกิด arc (arcing chamber) จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วย thermal conductivity ของฉนวน ความดันสูงที่เกิดขึ้น และการไหลของก๊าซ (flow) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้นอาจสูงถึง 20,000 °C

ใน oil circuit breaker ความร้อนจาก arc จะทำให้น้ำมันเดือด และแตกตัวเป็นก๊าซ ดังนั้น arc จึงประกอบด้วย hydrogen gas, carbon, copper vapor ส่วนใน air circuit breaker จะประกอบด้วย nitrogen, oxygen, copper vapor และใน SF<sub>6</sub> circuit breaker ประกอบด้วยก๊าซที่แตกตัวของ SF<sub>6</sub> ซึ่งประกอบด้วย SF<sub>5</sub>, SF<sub>4</sub>, SF<sub>3</sub>, SF<sub>2</sub>, SF และ SF, F<sub>2</sub> และ copper vapor ฉะนั้น arc จึงถูกสร้างขึ้นจากองค์ประกอบของก๊าซ

### 3.2.1.2 การดับของ arc

การดับ arc ให้ได้ จำเป็นต้องทำลายก๊าซที่เป็นตัวนำโดยการทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว จะทำให้กระบวนการสร้าง ion และ conductivity ลดลงจน ion กระจายออก ไม่สามารถรวมกันได้ หรือถูกแทนที่ด้วยฉนวน medium ที่อยู่รอบนอกที่ไม่ร้อนมาก ในการ open breaker จะมีการเคลื่อนที่ของ contact แยกจากกันทำให้ arc ที่เกิดขึ้นนั้นยาวออก และจะรักษาอุณหภูมิไว้ พลังงานที่จุดนั้นจะสูงขึ้น การดับ arc จะใช้หลักการลดและดึงเอาพลังงานนั้นออกจาก arc

กระแสประกอบขึ้นด้วยการเคลื่อนที่ของ free electron จำนวนมากในตัวนำ จะพบว่าใน arc มี free electron ที่ถูกสร้างขึ้นด้วย ionization process และรักษาระดับอุณหภูมิโดยการปล่อยพลังงานออกมา ในระบบ AC system กระแสจะเพิ่มและลดลงทุก 10 มิลลิวินาที และที่จังหวะเป็นศูนย์จะไม่มี free electron ไหล ทำให้มีพลังงานเกิดขึ้นน้อยมาก ที่ตำแหน่งกระแสมีค่าใกล้เคียงก่อน และหลังศูนย์จึงสำคัญมาก ถ้าทำให้บริเวณนั้นเกิดการสูญเสียพลังงานมาก arc ก็ดับได้ จึงออกแบบ breaker ในขณะที่ open ให้มี arc เกิดขึ้น แล้วควบคุม arc และดับ arc ที่ตำแหน่งกระแสเป็นศูนย์ เท่ากับกระแสหลุดไหล

วิธีการดับ arc คือ ยืด arc ให้ยาวขึ้นอย่างรวดเร็ว ฉีดก๊าซที่นำความร้อนได้ดีและเย็นไปตามความยาวของ arc เพื่อลดอุณหภูมิของ arc การทำให้ก๊าซที่อยู่ในห้องดับ arc (arcing chamber) มีความดันสูงจะไหลผ่านช่องแคบๆ บีบ arc ให้แคบลง แกนของ arc มีอุณหภูมิสูงขึ้น temperature gradient จะเพิ่มตามแนวขวางของ arc สามารถระบายความร้อนออกจาก arc ได้

### 3.2.1.3 การตัดกระแสลัดวงจร

ในปัจจุบัน breaker ชนิดน้ำมันแบบ bulk oil และ breaker ชนิด air blast แทบจะไม่มีใช้งานอีกแล้ว breaker ชนิดน้ำมันแบบ minimum oil ก็มีใช้น้อยลง breaker ชนิดก๊าซ SF<sub>6</sub> มีการใช้

งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น

### 3.2.1.1.1 oil break circuit breaker

oil circuit breaker ใช้น้ำมัน mineral oil เรียกว่า insulating oil เป็นฉนวน ผลิตจาก petroleum แบ่งเป็นสองแบบ คือแบบ bulk oil type ใช้น้ำมันมากใส่ในห้องดับ arc (arcing chamber) แต่ไว้ในถังเหล็กเรียกว่า dead tank type และแบบ minimum oil type ใช้น้ำมันน้อยใส่ใน arcing chamber แต่ไว้ใน porcelain ตั้งอยู่บน support insulator เรียกว่า live tank type

ในปัจจุบันแทบไม่มีการผลิต oil circuit breaker เพื่อใช้ในระดับแรงดันสูงกว่า 69 kV

arc เกิดใน arcing chamber ที่เป็น insulated pressure chamber ในขณะที่ contact เริ่มเคลื่อนที่จากกัน น้ำมันในห้องดับ arc ยังมีอุณหภูมิและความดันปกติ เมื่อเริ่มมี gap จะเกิด arc และ ความร้อนที่ทำให้ น้ำมันบริเวณนั้นแตกตัว (vaporize) เกิดความดันขึ้นในห้องดับ arc เมื่อ contact ที่เคลื่อนที่จะเปิดช่องระบายด้านข้างในห้อง ช่องระบายจะวางเรียงตัวตามแนวที่ contact เคลื่อนที่ ช่องระบายจะทำหน้าที่ระบายความดัน ทำให้เกิด cross blast ของก๊าซ และน้ำมัน มีผลคือ จะนำเอาพลังงานออกจาก arc และบังคับให้บางส่วนของ arc ยาวขึ้นเข้าไปในช่องระบาย arc ก็ยาวขึ้น ในกรณีที่ minimum oil breaker ตัดกระแสสูงที่แรงดันสูง จะมีการออกแบบให้มีลักษณะเป็น oil pump ในขณะที่ contact เคลื่อนที่จากกัน ฉีดน้ำมันเข้าไปใน chamber เพื่อเร่งระบายความร้อนออกจาก arc

bulk oil breaker จะมี contact และ chamber หนึ่ง หรือ สองชุดต่อ phase และอาจจะอยู่ในถังเดียวกันโดยมี แผ่นกั้น (barrier) ระหว่าง phase หรือแยกถังออกเป็นแต่ละ phase ก็ได้

minimum oil breaker อาจใช้ interrupter unit มาต่ออนุกรมกันภายนอก เพื่อให้แต่ละ chamber แบ่งแรงดันเท่าๆ กัน

contact ที่ใช้ต่อ หรือแยกวงจร จะมีส่วนที่อยู่กับที่ เรียกว่า fixed contact และส่วนที่เคลื่อนที่ เรียกว่า moving contact ส่วนที่เป็น fixed contact จะมีส่วนปลายเป็นทองแดงที่เป็นขี้ขึ้นๆ ประกอบกันเป็นก้อนมีรูอยู่ตรงกลางเพื่อให้ moving contact เสียบเข้าได้ และส่วนที่เป็นทองแดงขี้ขึ้นๆ นี้จะถูกรัดอยู่ที่ตรงส่วนปลายของ moving contact ปลายของขี้ทองแดงบางขี้ขึ้นจะยาวกว่า และทำด้วย copper tungsten alloy ทำหน้าที่เป็น arcing contact เพื่อตัด arc (breaking) ตอนที่กระแสจะดับขณะ open และจะต่อกระแส (making) ก่อนขี้ขึ้นอื่นตอน close ส่วน moving contact จะมีปลายที่เป็น alloy เช่นเดียวกัน เพื่อให้สึกกร่อนจาก arc น้อย เวลาที่ใช้ในการดับกระแส (interrupting time) จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$30 \text{ ms opening time} + 25 \text{ ms arcing time} = 55 \text{ ms}$  ประมาณ 3 cycles

### 3.2.1.1.2 gas blast circuit breaker

หลักการดับ arc ของ gas blast breaker คือ การดึงเอาพลังงานออกจาก arc ด้วยการให้ gas ไม่มีการทำให้ arc เปลี่ยนรูปร่าง หรือทำให้ยาวขึ้นเช่นเดียวกับ oil breaker

การ cooling จะใช้วิธีฉีดพ่น gas ไปตามแนวแกนของ arc ทำให้ล้อม arc ที่มีอุณหภูมิสูงไว้ ด้วย gas ที่เย็นกว่า และวงเวียนผิวของ arc ความเร็วของ ionized gas ที่ร้อน และประกอบเป็น arc จะเร็วกว่า cooling gas ที่ไหลผ่านผิว ทำให้ระบายความร้อนได้ดี ประกอบกับ arc เริ่มเกิดขึ้นใน กระบอกที่ทำหน้าที่เหมือนหัวฉีดเรียกว่า nozzle ทำให้มี ความเร็วของ gas พ่นออกไปตามลำของ arc ส่วนที่สำคัญของ gas blast breaker คือ ฉนวน gas หรือ media ที่เป็นตัวระบายความร้อน ทั้งปริมาณ และความดันของ gas ที่ฉีดพ่น arc และ ชนิดของ contact และ nozzle

gas blast แบ่งเป็นชนิด dead tank และ live tank เช่นเดียวกับ oil type และมีฉนวนที่ใช้ สองชนิดคือ อากาศ (air) และ SF<sub>6</sub> gas และใช้ interrupter มาต่อกันเพื่อเพิ่ม breaking capacity

ในปัจจุบัน air blast breaker ไม่มีการผลิตเพื่อใช้กับแรงดันสูงๆ แล้ว การทำงานจะใช้ อากาศเป็นฉนวน ซึ่งหาได้ทั่วไป อัดให้มีความดันสูง อาจสูงถึงระดับ 30 kg/cm<sup>2</sup> ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนของ interrupting chamber, support column, tank ต้องออกแบบให้ทนความดันสูง หลักการทำงาน คือระบายหรือปล่อยให้ฉนวนอากาศออกมาภายนอก ฉะนั้นระบบ valve จึงเป็นส่วนสำคัญต่อเวลาตัดกระแส มี interrupting time ต่ำกว่าหนึ่ง cycle (20 ms) และสามารถตัด กระแสสูงได้ เช่น air blast breaker สำหรับ 11-15 kV generator

SF<sub>6</sub> breaker เป็น breaker ที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ใช้ SF<sub>6</sub> gas ที่มีคุณสมบัติเป็น ฉนวนที่ดีกว่าอากาศ สารที่เกิดขึ้นหลังการตัด/ดับ arc คือ ผงของ metallic fluoride มีความเป็น ฉนวนและไม่เป็นอันตรายในขณะที่แห้ง แต่เมื่อได้รับความชื้นจะสามารถกัดกร่อน metal part ได้

SF<sub>6</sub> gas ไม่มีตามธรรมชาติ เป็นก๊าซที่ต้องสังเคราะห์ขึ้น มีราคาแพง เนื่องจากมีผลต่อ บรรยากาศ จึงไม่ควรปล่อยออกสู่ภายนอก การออกแบบจึงเป็นแบบปิดไม่เหมือน air breaker

SF<sub>6</sub> gas หนักกว่าอากาศเป็นก๊าซที่สามารถ de-ionize และกลับสภาพเดิมได้เร็ว และส่วน ที่เกิดขึ้น คือ ผงของ metallic fluoride ก็ไม่ฟุ้งกระจาย ไม่ทำให้ความเป็นฉนวนของก๊าซลดลง

การออกแบบโดยใช้ 'puffer' มีลักษณะเป็นกระบอก cylinder หุ้ม moving contact บาง ส่วนขณะที่อยู่ในตำแหน่ง close ฉะนั้นขณะที่ moving contact เคลื่อนที่ ก๊าซจะถูกอัด และจะ ปล่อยก๊าซที่มีความดันสูงออกไปรอบ arc ขณะที่ contact หลุดออกจาก puffer ด้วยวิธีนี้การเคลื่อน ที่ของ contact จะสร้างความดันสูงขึ้นเองโดยไม่ต้องอาศัยกลไกอื่น

puffer ทำด้วย teflon ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ทนทานต่อความร้อน ทำให้สามารถออกแบบให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางได้เล็กพอขนาดให้ moving contact วิ่งเข้าออก ทำให้ปิดช่องไม่ให้ก๊าซ ออกไปก่อนที่ moving contact จะหลุดออกจาก puffer เรียกว่า clogging effect ของ nozzle

ก๊าซที่มีความดันสูงที่เกิดขึ้นใน cylinder จะขับออกภายนอกได้เพราะขณะที่ arc ยึดยาว ออกไปตามการเคลื่อนที่ของ contact นั้น เส้นผ่าศูนย์กลางของ arc จะเล็กลงจนถึงเวลาใน sine wave ที่กระแสเป็นศูนย์ ทำให้หน่วงเวลากการปล่อยก๊าซออกไปภายนอก cylinder และถูกจังหวะ ช่วงเวลาที่ถูกหน่วงไว้นี้ขึ้นกับปริมาณกระแสของ arc เช่น ตอนกระแสต่ำ จะเกิดกระบวนการที่ไม่

รุนแรง จะไม่เกิด current chopping

SF<sub>6</sub> gas breaker มี interrupting time ประมาณ 2-3 cycles

air blast breaker มี interrupting time ประมาณ 1-2 cycles

### 3.2.1.1.3 vacuum breaker

vacuum breaker มี insulating media ที่มี strength ที่สูงมากจนอาจพูดได้ว่ามีค่าเท่ากับ infinity arc ที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจาก breaker อื่นๆ ส่วนที่เป็น contact ประกอบด้วย contact สองชิ้นบรรจุอยู่ในส่วนที่ห่อหุ้มที่ปิดไม่ให้อากาศเข้าภายในได้ ภายใน chamber จะมีสภาพเป็นสุญญากาศ (vacuum) ขณะที่ open จะมี arc เกิดขึ้น และ arc จะรักษาสภาพอยู่ได้ด้วยไอของโลหะ (metallic vapor) ที่เกิดจากด้านที่เป็น cathode ไอของโลหะจะกระจายใน vacuum และ condense ที่ shield ที่อยู่รอบข้าง ขณะที่กระแสเป็นศูนย์ไอโลหะจะ condense ได้มากทำให้มีสภาพกลับมาเป็น vacuum

ในช่วงแรก arc จะกระจายกันเป็นหลายจุดบน cathode คือมี arc เกิดขึ้นหลาย arc ที่ขนานกัน จุด arc บน cathode (cathode spot) หรือจุดที่เกิด emission จะผลักดันแต่ arc column จะเข้าหากันเนื่องจาก magnetic field เมื่อกระแสเพิ่มขึ้น จะมี arc เกิดขึ้นหลาย arc เกิด magnetic field สูงขึ้น มีผลทำให้ arc path เสียไป และเกิดการปะทะกัน หรือชนกันของ particle อย่างรุนแรง เกิด high voltage gradient ที่หน้า anode จนเกิด ionization ของ anode และเกิด metal vapor กระแสจะหนาแน่นในบริเวณที่มี vapor หนาแน่น ตรงจุดที่ anode เกิด vaporize นี้ จะมีความร้อนสูงมาก เป็นจุดเล็กๆ ทำให้เกิดการ emission อย่างมากมาย และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไม่หยุด arc จะพยายามเคลื่อนมารวมกันไม่เหมือนกับช่วงเริ่มแรก

arc จะดับขณะที่กระแสผ่านศูนย์ ถ้าเกิด arc เล็กๆ หลาย column จะดีกว่า เกิด arc ใหญ่ column เดียวเพราะ arc ใหญ่ column เดียว จะเกิดจุดที่ร้อนมากเกินไปตรง arc spot ที่บริเวณผิวหน้า contact จนเกิด emission ขึ้นสูงมากอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้เกิด restriking หรือ หลังจาก arc ดับไปแล้วจะเกิด arc ขึ้นอีกไม่สามารถดับได้

การออกแบบให้ จุด arc เคลื่อนที่บนหน้า contact โดยใช้ magnetic field เป็นการป้องกันไม่ให้ arc ที่เกิดขึ้นหลายๆ arc มารวมตัวกัน หรือสามารถทำให้จุด arc ที่รวมตัวกันแล้วสามารถเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วบนหน้า contact ก็จะทำให้ไม่เกิดความร้อนสูงมากที่จุดเดียว และทำให้สามารถดับ arc ได้

การออกแบบผิวหน้าของ contact ให้เป็น slot สามารถสร้าง magnetic field ให้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของ contact ได้

ปัญหาหนึ่งของ vacuum breaker คือ contact ทั้งสองละลายติดกัน หรือ เรียกว่า contact welding วิธีแก้ไขคือเลือกโลหะที่ใช้ทำ contact ให้เป็นชนิดที่มี high conductivity แต่มีความสามารถที่จะ weld ติดกันยาก เช่น copper bismuth , chromium เป็นต้น

อีกปัญหาหนึ่งคือ โลหะที่ใช้ทำ contact อาจมีก๊าซผสมอยู่ด้วย จึงเกิดก๊าซขึ้นขณะโลหะละลายเนื่องจาก arc วิธีแก้ไข คือ ใช้ gas-free copper

หลักการออกแบบ vacuum interrupter ไม่ซับซ้อน ส่วนของ contact จะมีส่วนปลายที่ทำจากโลหะ และมีรูปร่างดังกล่าว ในตำแหน่ง close จะเคลื่อนที่มาชนอัดกันที่หน้าสัมผัส ส่วนปลายที่สัมผัสมีลักษณะใหญ่กว่าแกน (butt contact) บรรจุอยู่ใน vacuum chamber สามารถนำ interrupter มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้เหมาะสมกับแรงดัน มี interrupting time ต่ำกว่า 15 ms

### 3.3 circuit breaker mechanism

- spring type

  - close ด้วย spring
  - open ด้วย spring

- pneumatic type

  - close ด้วย pneumatic
  - open ด้วย spring

  - close ด้วย spring
  - open ด้วย pneumatic

- hydraulic type

  - close ด้วย hydraulic
  - open ด้วย hydraulic

spring mechanism เป็นกลไกที่มีพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อน contact มาจากพลังงานที่ถูกสะสมอยู่ใน spring

motor ทำหน้าที่อัด spring ให้มีพลังงานสะสมไว้ ใน breaker รุ่นแรกๆ จะใช้เป็น open spring และใช้ pneumatic mechanism สำหรับ close เป็นส่วนใหญ่ แต่ระยะหลังมีการพัฒนาให้ใช้ spring ได้ทั้ง close และ open ตาม duty ที่ต้องการ

pneumatic mechanism พลังงานที่ใช้ขับเคลื่อน contact มาจากพลังงานของลมที่มีความดันสูง ใช้ compressor อัดลมให้มีความดันสูงประมาณ 20 bar เก็บไว้ในถังที่มีขนาดสามารถใช้ในการ close-open ได้อย่างต่อเนื่อง 4-5 ครั้ง ทุกครั้งที่สั่ง close พลังงานที่ใช้จะไปขับเคลื่อน contact และ charge ส่วนของ spring ให้มีพลังงานพร้อม open มีข้อเสียคือ มีเสียงดังขณะ open และ เมื่อเกิดลมรั่ว compressor จะต้องทำงานหนัก

hydraulic mechanism พลังงานที่ใช้ขับเคลื่อน contact มาจากพลังงานของก๊าซ nitrogen ที่มีความดันสูงเรียกว่า accumulator สร้างความดันโดยใช้ pump อัดน้ำมัน hydraulic เพื่อไปสร้างความดันให้ accumulator เกิดความดันสูงมากถึง 40-50 bar ทำให้มีพลังงานที่เก็บสะสมไว้มากกว่า spring mechanism มีข้อเสีย คือน้ำมันรั่ว pump ต้องทำงานหนัก ถ้ารั่วมากอาจไม่สามารถรักษาสภาพ close ไว้ได้ เนื่องจากส่วนใหญ่จะต่อ driving rod ตรงกับ mechanism ไม่มีชิ้นส่วนของกลไกที่ใช้เกี่ยวกันไว้ (latch) เพื่อให้อยู่ในตำแหน่ง close

### 3.4 switching duty

#### 3.4.1 closing and latching duty ขณะที่มีสายส่งเกิดลัดวงจรอยู่ (permanent fault) เช่น

สายขาดตกลงดิน ต้นไม้ล้มพาดสายหรือ line insulator เกิดชำรุดเสียหาย จะมีกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นในเวลาที่ยังวงจรไฟฟ้าเริ่มต่อ (electrically close) หรือเริ่มมี arc เกิดขึ้นระหว่าง contact ขณะ close operation ถ้าการลัดวงจรเกิดขึ้นเป็นชนิด single phase to ground fault และ ถ้าสั่ง close breaker ในขณะที่ลัดวงจรยังคงอยู่วงจรจะเริ่มต่อกันที่ phase ที่เกิดลัดวงจร ขณะที่แรงดันเป็นศูนย์ตาม sinusoidal cycle จะเกิดกระแสที่มีคลื่นลูกแรกของ sine wave มี peak สูงที่สุด (first asymmetrical peak) อาจมีค่าใกล้เคียงเท่าของ symmetrical peak การ close จึงต้องอาศัยแรงที่จะทำให้กลไกสามารถ close และ latch กันได้ พร้อมกับสามารถที่จะ open ด้วยเมื่อ protective relay สั่งงานได้อีกครั้งด้วยเวลา interrupting time ปกติที่กำหนด หรือสามารถอยู่ในตำแหน่ง close ได้โดยมีกระแสลัดวงจรที่สูงสุดไหลผ่านจนกระทั่ง breaker ตัวอื่น open

ในขณะนั้นอาจเกิดปัญหาขึ้นได้สองลักษณะ คือ

- ปัญหาจากแรงตรงกันข้ามกับแรงกลที่ขับเคลื่อน driving rod ให้ contact close
- ปัญหาจาก arc ที่เกิดขึ้นขณะ close มีปริมาณกระแสลัดวงจรสูง

แรงที่เกิดจากการชักนำ (induce) ของ magnetic field เป็นสัดส่วนกับกระแสยกกำลังสอง และ แรงดูดกันหรือบีบรัด (attractive force) ที่เกิดขึ้นกับชุด contact finger ที่มีการจัดเรียงขนานกันจะบีบรัด fixed contact แรงบีบรัดที่เกิดขึ้นตรงจุดสัมผัสจะเป็น repulsive force คือแรงจะมีลักษณะที่ contact finger ของ fixed contact จะบีบรัดกับ contact rod ของ moving contact และกลายเป็นจังหวะตามแรงที่เกิดขึ้น การทำงานของ mechanism ตอน close จึงต้องมีแรงพอที่จะขับเคลื่อน moving contact หรือชนะแรงที่เกิดจากกระแสและรวมถึงแรงต้าน และ inertia ของส่วนที่กำลังเคลื่อนที่

การออกแบบ mechanism ให้มี close operation สามารถ close ได้สมบูรณ์ในขณะที่มีกระแสลัดวงจรไหล อาจมีพลังงานเหลืออยู่มากเกินไปในขณะที่มีกระแสปกติ หรือในเวลาที่ไม่มีการไหลผ่านเลย จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพื่อทำหน้าที่ช่วยรับพลังงานส่วนเกินที่เหลือนี้ เพื่อป้องกัน contact เสียหาย หรือเกิดอาการที่ contact เด้งเข้า-ออก (bounce)

ในเวลา close จะเกิด arc ขึ้นระหว่าง moving และ fixed contact ก่อนที่ contact จะสัมผัสแตะกันจริงเสมอ เรียกว่า pre-strike และ arc ยังเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เกิด contact bounce หน้าสัมผัสของ contact จะถูก arc ทำลาย ถ้า arc เกิดขึ้นระหว่างช่องเล็กๆ จะทำลายผิวหน้าสัมผัสของ contact ได้มาก เพราะเกิด high potential gradient ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของโลหะ ฉะนั้น pre-strike และ contact bounce จึงทำให้เกิด local heating จน โลหะของ contact เกิดเชื่อมต้อ (weld) กันตรงจุดที่สัมผัสได้ ซึ่งจะมีผลมากใน vacuum circuit breaker ที่มีหน้าสัมผัสเป็น butt contact

**3.4.2 current carrying capability** การออกแบบ contact ต้องมีความเหมาะสมที่จะรับกระแส rated normal current ที่ไหลผ่านเป็นเวลานานๆ โดยที่อุณหภูมิสูงต้องไม่สูงเกินค่ากำหนด

และสามารถรับกระแสลัดวงจรพิกัด (rated short circuit current) ได้ในเวลาที่กำหนด หนึ่ง หรือ สามวินาทีตามมาตรฐาน (maximum temperature rise) โดยไม่ทำให้เกิดความผิดปกติที่หน้าสัมผัส และพร้อมจะ open และ close กลับเข้าใช้งานต่อเนื่องไปได้อีก

สิ่งที่จะทำให้ความสามารถในการรับกระแสต่ำลง คือ หน้า contact เกิดสกปรก มีรอยทำให้สูญเสียจุดสัมผัส point to point contact ลดลง ใน oil breaker จะเกิดสารที่น้ำมันเปลี่ยนสภาพโดยความร้อน มีลักษณะเหนียวมีสีน้ำตาลดำ (เรียกว่า tar) จับที่หน้าสัมผัสเป็น film แข็ง สารนี้จะทำให้ contact resistance เพิ่มขึ้นและเกิดความร้อนบริเวณจุดที่ contact ต่อสัมผัสกัน

### 3.5 circuit interruption

ในการใช้งานทั่วไป breaker ต้องมีความสามารถทำ switching operation ได้แก่ close, open, และ fault interruption เป็นต้น

3.5.1 fault interruption หรือ fault clearing คุณสมบัติของ breaker ทุกตัวต้องสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้เท่ากับ short circuit rating ที่ระบุไว้ ถ้าไม่มีการระบุความสามารถนี้ไว้ อุปกรณ์ที่ใช้ตัดต่อวงจรนั้นจะเป็น load break switch หรือ circuit switcher หรือ isolator

กระแสขณะเกิดลัดวงจรอาจมี dc offset เนื่องจาก short circuit impedance ที่เป็นตัว limit ค่ากระแสลัดวงจรมีลักษณะเป็น reactance และมุมของแรงดันขณะเกิดลัดวงจรไม่ใช่ที่  $90^\circ$  เสมอไป ในช่วงแรกกระแสจะมีส่วนที่เป็น dc รวมอยู่กับกระแสส่วนที่มีความถี่ระบบ และส่วนที่เป็น dc จะลดลงในลักษณะ exponential ตามค่า time constant ของ impedance วงจร กระแสจะลดลงจนถึงส่วน dc component เป็นศูนย์ กระแสที่เหลือจะมีความถี่ระบบ เรียกว่า symmetrical component

กรณีเกิดลัดวงจรที่มุมแรงดันมีองศาเป็นศูนย์ จะได้ค่า peak แรกของกระแสลัดวงจรสูงที่สุด เรียกช่วงแรกส่วนที่มีแรงดัน dc นี้ว่า asymmetrical component กระแส peak แรกอาจสูงใกล้เคียงกับสองเท่าของ symmetrical component

3.5.2 terminal short circuit กรณีตัดกระแสลัดวงจรชนิด three phase ungrounded fault จะมี transient restriking voltage สูงสุด คือ ถ้า phase แรกสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้แล้ว (first pole to clear) โดยที่อีกสอง phase ยังไม่สามารถดับ arc ได้ แรงดันที่คร่อม contact ที่ open สำเร็จแล้วจะมีค่าเท่ากับ  $1.5 \sqrt{2} V_p$  (peak) มีความถี่ระบบ รวมกับความถี่ของ natural frequency หรือ transient response ของระบบ แรงดัน restriking transient voltage มีแรงดันตรง peak ของ recovery voltage นี้อาจสูงถึงสองเท่าของ power frequency recovery voltage

หลังจากตัดกระแสลัดวงจรกรณี three phase grounded fault อาจมี recovery voltage คร่อม contact สูงกว่า line to ground voltage ได้

กรณีระบบเป็น effectively ground คือ ระบบที่มี zero sequence impedance  $\leq 3$  เท่า



ของ positive sequence impedance แรงดันคร่อม contact ของ phase แรกที่ clear ได้ในขณะที่ อีกสอง phase ยังคงมีลัดวงจรอยู่ จะเกิดแรงดันประมาณ 1.3 เท่าของแรงดัน line to ground เรียก ว่า first pole to clear factor = 1.3

**3.5.3 breaking small inductive current** ตามที่อธิบายแล้วว่า arc จะดับขณะที่กระแส เป็นศูนย์ใน sinusoidal wave ฉะนั้นหากกระแสหยุดไหลอย่างทันทีทันใดก่อนมีค่าเป็นศูนย์ (current chopping) ถ้ากระแสเปลี่ยนทันทีทันใดนั้นมีค่าเท่ากับ 'I' จะมีพลังงานเท่ากับ  $L \cdot I^2$  เก็บ ไว้ใน inductor ที่มีค่า inductance : 'L' พลังงานนี้จะถ่ายเทไปมากับ stray capacitance ของ inductor เกิด transient over voltage คร่อมระหว่าง contact ขึ้นได้ อาจมีค่าสูงจนเกิด restrike หรือเกิด arc ขึ้นอีก หรือเกิด external flashover ขึ้น breaker ก็จะไม่สามารถดับ arc ได้ ส่วนใหญ่ จะเกิดกับ breaker ชนิด air blast breaker และ vacuum breaker ที่มีกระบวนการดับ arc ไม่ขึ้น กับปริมาณกระแส จึงมี shunt resistor คร่อม contact ของ air blast breaker ไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด over voltage ระหว่าง contact สูงเกินไปในขณะ open

**3.5.4 breaking small capacitive current** หลังจากตัดวงจรสายส่งยาวๆ และ cable ออกแล้วจะยังคงมีแรงดันปรากฏเหลืออยู่เนื่องจาก trap charge ดังนั้นทุกๆ ครั้ง cycle ขั้วหรือ polarity ของ trap charge ด้านสายส่งจะตรงกันข้ามกับ polarity ของแรงดันระบบ ทำให้แรงดัน คร่อม contact ของ breaker มีค่าเป็นสองเท่าของแรงดันระบบเทียบกับดิน (phase to ground) อาจส่งผลให้เกิด restrike ได้ การแก้ไขถ้าเป็น air blast breaker จะใช้ shunt resistor ต่อคร่อม contact เพื่อ discharge ประจุค้างในสายส่งหรือ cable แต่ถ้าเป็น SF<sub>6</sub> breaker จะมี insulation performance ดีกว่า สามารถออกแบบ interrupting chamber ทำงานในขณะ open ให้เหมาะสม ไม่เกิด restrike เรียกว่า restrike free breaker ไม่จำเป็นต้องใช้ resistor ต่อคร่อม

**3.5.5 short line fault** ขณะที่เกิดลัดวงจร (fault) ตรงจุดที่ห่างจาก breaker เป็นระยะทาง ประมาณหนึ่งกิโลเมตร (kilometric fault) ขณะตัดวงจรจะเกิด recovery voltage คร่อม contact ของ breaker แรงดันนี้มีความถี่เป็น สองความถี่ คือ ความถี่ระบบ 50Hz (source frequency) และ ความถี่ของคลื่นสะท้อนกลับมาจากสายส่งที่เกิดลัดวงจร (reflected wave) ขนาดของ recovery voltage อาจไม่สูงมากนัก แต่แรงดันสะท้อนกลับจะมีอัตราการเพิ่มสูงมาก (high rate of rise) อาจ เป็นอันตรายกับ breaker ประเภท air blast

**3.5.6 out of phase switching** ขณะก่อน close แรงดันคร่อมที่ปลาย contact ทั้งสองด้าน (ขณะที่ breaker อยู่ในตำแหน่ง open) อาจมีมุมทางไฟฟ้า (electrical angle) ต่างกัน กรณีที่สูงที่สุดคือขณะทำการ synchronize ระบบกับ generator จะมีมุมต่างกับ 180 ° เกิด out of phase มี แรงดันเป็นสองเท่าคร่อมที่ contact ถ้าขณะกำลัง open breaker มีแรงดันคร่อม contact สองเท่า และเกิด arc จะมีกระแสต่ำกว่ากระแสลัดวงจร และถ้าความเร็วของ contact ที่เคลื่อนที่ออกจาก กันเร็วพอที่ทำให้ชนวนกลับคืนสภาพได้เร็วจะสามารถ open ได้สำเร็จโดยไม่เกิด restrike

ใน breaker รุ่นใหม่ๆ ส่วนใหญ่จะไม่มีปัญหาเรื่องนี้ กรณี breaker ที่ใช้งานในสถานีที่มีโรงจักรต่อเชื่อม ควรเลือกใช้ breaker ของ generator เป็นแบบ double interrupter มากกว่า single interrupter เพราะต้องใช้ synchronize กับระบบ จะทนแรงดันสองเท่าได้ดีกว่า

**3.5.7 evolving fault** ในขณะที่ breaker ตัดกระแสที่มีปริมาณน้อยในช่วงแรก หลังจาก contact เริ่มจากกันเกิดกระแสเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ยังดับ arc ไม่สำเร็จ ถ้าออกแบบใช้พลังงานเพื่อดับ arc ของ interrupter ให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ arc สร้างขึ้น จะทำให้ interrupter เสียหายได้ เพราะพลังงานที่สร้างขึ้นเพื่อดับ arc จะถูกสร้างขึ้นในช่วงแรกขณะที่ contact ยังอยู่ใน interrupting chamber ถ้าช่วงแรกกระแสต่ำจะไม่เพียงพอที่จะดับ arc ของกระแสสูงที่เกิดขึ้นภายหลังได้ และถ้าเกิดขณะที่ contact เกือบหลุดออกจาก chamber จะไม่สามารถดับ arc ได้เลย ตัวอย่างที่มีการดับ arc ในลักษณะ ดังกล่าว

- การดับ small inductive current ถ้าเกิด current chopping จะเกิดแรงดัน voltage สูงคร่อม contact (over voltage) อาจทำให้เกิด flashover กลายเป็น fault เกิดขึ้นที่ภายนอกอุปกรณ์ ถ้ากระแสเกิด chop ในขณะที่ contact เริ่มหลุดจาก puffer แล้ว ความดันภายใน puffer จะไม่สูงพอที่จะดับกระแสที่สูงขึ้นภายหลังได้ สามารถป้องกันได้ด้วยติดตั้ง surge arrester ไว้ใกล้อุปกรณ์
- breaker สองตัวขนานกันทำงาน open พร้อมกัน ถ้ากระแสไหลผ่านแต่ละตัวไม่เท่ากัน breaker ตัวที่กระแสผ่านมากจะดับ arc ได้ก่อน ตัวที่เหลือที่มีกระแสน้อยกว่าในช่วงแรก กระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพราะกระแสจากตัวแรกจะกลับมาไหลผ่านรวมด้วย

**3.5.8 capacitor และ reactor switching** ในอดีตจะใช้ breaker ที่มี pre-insertion resistor เพื่อป้องกัน inrush current แต่ในปัจจุบันสามารถควบคุมมุมของแรงดันด้วย point on wave relay ในขณะที่ contact เริ่มต่อกันทางไฟฟ้าด้วยเกิด prestrike หรือเรียกว่า electrical connection กรณี capacitor ควรสั่ง close ในขณะที่เกิด electrical connection ขณะที่แรงดันเป็นศูนย์หรือก่อนศูนย์เล็กน้อย ส่วน inductor ควรสั่ง close ให้เกิด electrical connection ในขณะที่แรงดันเป็น peak หรือก่อน peak เล็กน้อย

**3.5.9 initial transient recovery voltage** คือ แรงดันที่เกิดขึ้นหลังจาก breaker ได้ interrupt กระแสลัดวงจรในช่วงแรก ในช่วงต้นหลังกระแสหยุดไหลถ้าฉนวนระหว่าง contact ที่ถูกทำลายไปกลับมาสมบูรณ์ หรือมี rate of rise of dielectric strength เร็วกว่า rate of rise of recovery voltage (สภาพฉนวนคืนกลับมาดีด้วยอัตราเร็วกว่าแรงดันคร่อม contact ที่เกิดขึ้น) กระแสก็สามารถหยุดไหลได้ แรงดันที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็น high frequency over voltage ผสมกับ system frequency สาเหตุที่มีความถี่สูงเพราะ capacitance ของ bus bar ด้าน source ที่อยู่ใกล้ๆ breaker มีค่าต่ำ ทำให้มี natural frequency สูง ปัญหานี้จะเกิดกับ SF<sub>6</sub> breaker สามารถ

แก้ไขโดยการต่อ capacitor ระหว่าง line กับ ground ไว้ที่ด้าน source เพื่อลด oscillation frequency

**3.6 การทำงานของ multi-interrupter** คือการนำเอา interrupter มาต่ออนุกรมกัน และมักจะติดตั้ง grading capacitor คร่อม interrupter ไว้เพื่อให้แรงดันที่ตกคร่อมแต่ละ interrupter ใกล้เคียงกัน ทั้งแรงดันปกติและแรงดัน recovery voltage โอกาสเกิด restrike น้อยลง breaker มี performance ดีขึ้น

## ภาคผนวก บทที่ 3

### การเลือก interrupting capacity rating ของ circuit breaker

ผู้ออกแบบจะออกแบบระบบให้มี reliability และ safety ซึ่งต้องมี criteria การออกแบบ และรวมถึงการเลือก rated ของอุปกรณ์ และอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม สิ่งสำคัญที่เกี่ยวข้องคือ การคำนวณ AC system short circuit current เพื่อใช้เลือกพิกัดของอุปกรณ์ต่างๆ

เมื่อมีการขยายระบบ generation และ transmission จะพบว่า fault level มีค่าเพิ่มสูงขึ้น การพิจารณาว่า equipment rating เก่าที่ใช้งานอยู่ หรือการเลือก equipment ใหม่เพื่อติดตั้งเพิ่ม เข้าในระบบ เริ่มประสบปัญหามากขึ้น เช่น การเลือก circuit breaker rating ที่เหมาะสม

#### system short circuit current

1. source of short circuit current สิ่งสำคัญในการคำนวณหา short circuit current คือ ลักษณะแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจร (short circuit current source) และ impedance characteristic ของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่เกี่ยวข้อง จะเห็นว่าในระบบจะมีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจรได้ คือ generator, synchronous motor, และ induction motor แหล่งจ่ายกระแสเหล่านี้จะผลิตกระแสลัดวงจรไหลสู่จุดที่เกิดลัดวงจร (fault)

1.1 generator ในขณะที่เริ่มเกิดลัดวงจร generator จะยังคงรักษาสภาพแรงดันที่สร้าง ขึ้นเนื่องจากมี field excitation และ prime mover ยังคงขับตัวให้ generator หมุนด้วยรอบเท่าเดิม จากแรงดันนี้จะสร้างกระแสลัดวงจรที่มีขนาดสูง โดยมี impedance ของ generator และของวงจร ที่ต่อเชื่อมระหว่าง generator ไปยังจุดที่เกิดลัดวงจร เป็น parameter ในวงจร

1.2 synchronous motor โครงสร้างเหมือนกับ generator คือมี field ที่เกิดจาก DC current และ stator winding ที่มี AC current ไหล เมื่อ stator winding รับกระแสจาก AC line ที่ ต่อเข้า และเปลี่ยน electrical energy เป็น mechanical energy

ในขณะที่เกิด short circuit แรงดันของ AC line ลดลง motor จะหยุดจ่าย mechanical energy ไปที่ load และรอบหมุนจะลดลง ในช่วงนี้ inertia ของ load และ rotor ของ motor จะยังคง หมุน motor ต่อไป ทำให้มีสภาพเหมือน generator และจ่ายกระแสไปที่จุด fault กระแสจะไหลอยู่ หลาย cycle โดยมีปริมาณที่ขึ้นอยู่กับ impedance ของ motor และของ line ที่ต่อเชื่อมไปยังจุด fault

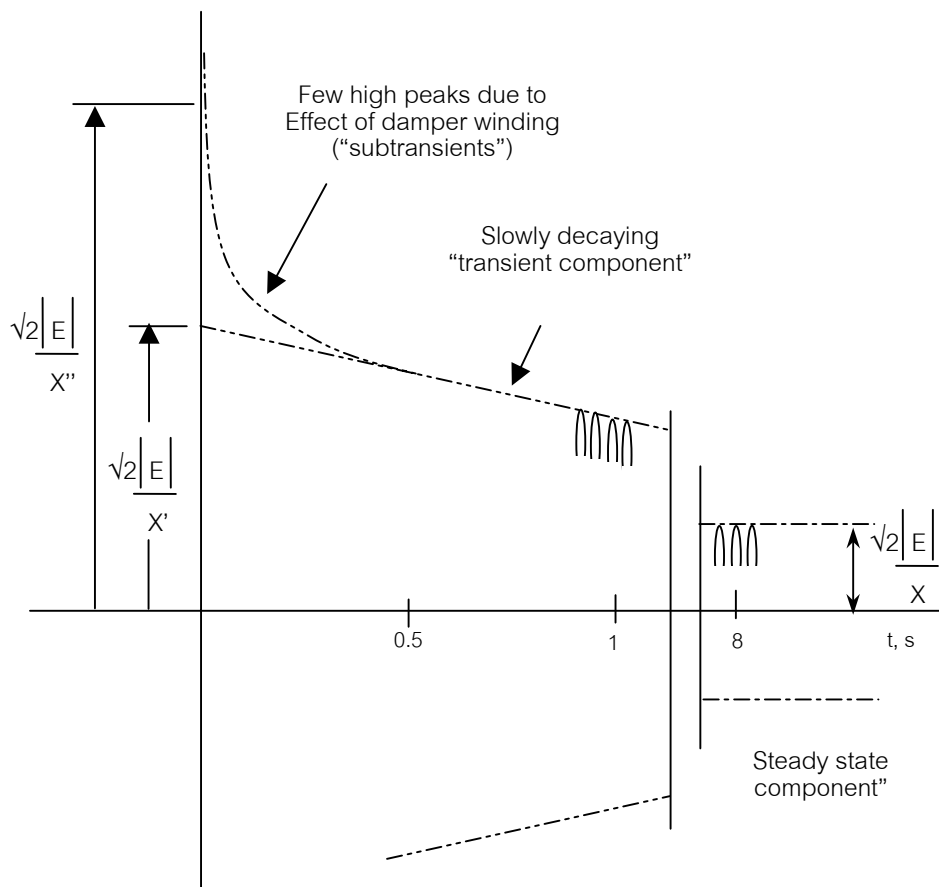
1.3 induction motor เนื่องจากมี inertia ของ load และ rotor ของ induction motor เช่นเดียวกับ synchronous motor แต่ต่างกันว่า induction motor ไม่มี DC field winding แต่มี field ที่สร้างขึ้นที่ stator จาก source ที่ต่อเข้าที่ motor และมี rotor flux ในขณะที่ใช้งานปกติ เมื่อแรงดัน ลดลงเนื่องจาก short circuit อย่างรวดเร็ว แต่ flux ใน rotor จะลดลงอย่างรวดเร็วไม่ได้ และด้วย inertia จากการที่ rotor ยังหมุนอยู่ ทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ขดลวดของ stator และสร้างกระแสไหล

ไปยังจุด fault จนกว่า flux ใน rotor จะลดลงจนเป็นศูนย์ โดยทั่วไป induction motor จะสร้างกระแสลัดวงจรได้ประมาณ 4-5 cycle กระแสส่วนนี้จะมีผลกับ momentary current ของ circuit breaker

## 2. rotating machine reactance

impedance ของ rotating machine จะมีลักษณะเปลี่ยนค่าไปตามเวลา ไม่เหมือนกับ impedance ของหม้อแปลงที่คงที่ รอบหมุนจะคงเท่าเดิมอยู่ชั่วขณะหนึ่งหลังจากเกิด fault เนื่องจากยังมี field excitation voltage และเวลาต่อมา reactance ของ machine จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้กระแสในช่วงแรกมีค่าสูงสุดและค่อยๆ ลดต่ำลง จะบอกค่า reactance ดังนี้ ตามรูป 1

- subtransient reactance  $X''$  เป็น reactance ของ stator winding ในช่วงเริ่มต้นหลังเกิด fault กระแสจะไหลอยู่ในช่วง 2-3 cycle แรก
- transient reactance  $X'$  ใช้ในการหาค่ากระแสในช่วงที่ต่อจาก subtransient reactance จะมีค่าอยู่ในช่วงครึ่งวินาทีหรืออนานกว่านั้นขึ้นอยู่กับ machine
- synchronous reactance  $X$  เป็น reactance ช่วงที่เกิดสภาพ steady state condition จะเกิดขึ้นในช่วงหลังจากเกิด short circuit หลายวินาทีผ่านไป จึงไม่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสลัดวงจร

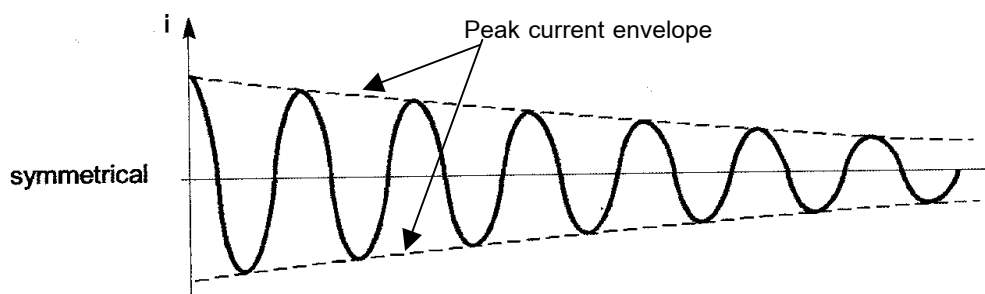


รูปที่ 1 Transient short circuit current of synchronous machine.

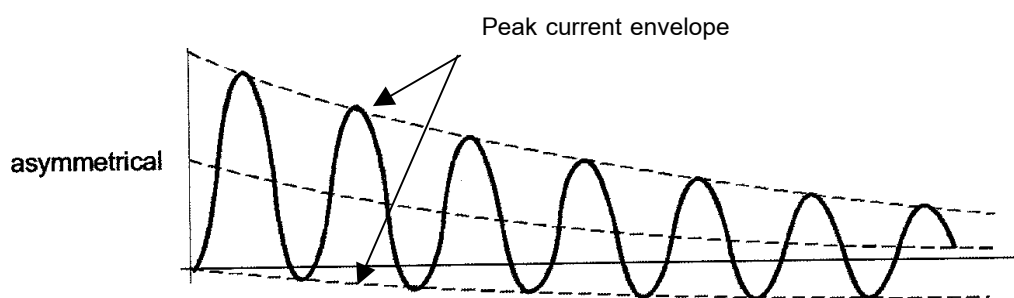
generator และ synchronous motor จะมีลักษณะของ reactance ทั้งสามแบบ แต่ decay time หรือ period ของแต่ละช่วงไม่เท่ากัน ส่วน induction motor จะมีเฉพาะ subtransient reactance เพราะไม่มี field coil

### 3. symmetrical และ asymmetrical current

symmetrical และ asymmetrical เป็นคำที่ใช้อธิบายรูปร่างของรูปคลื่น AC current wave ที่เทียบกับรอบแกนศูนย์ ถ้า envelopes ( เส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่าง peak แต่ละลูก) ของ peak ของกระแสมีลักษณะเหมือนกันทั้งด้านบนและล่างหรือมี symmetry รอบแกนศูนย์ เรียกว่า symmetrical current ดังรูปที่ 2 ถ้า envelopes ไม่ symmetry กับแกนศูนย์ เรียกว่า asymmetrical current ส่วนใหญ่ short circuit current จะเป็น asymmetrical ที่มีค่าสูงในช่วง 2-3 cycle แรก และจะลดต่ำลงเรื่อยๆ จนเป็น symmetrical ดังเช่นรูปที่ 3



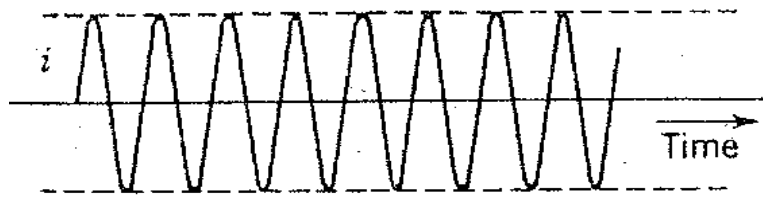
รูปที่ 2 Symmetrical short circuit current



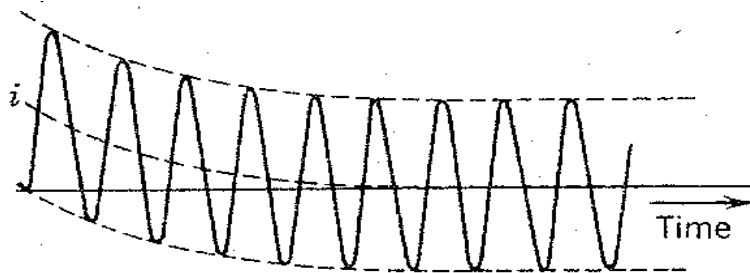
รูปที่ 3 Asymmetrical short circuit current

เหตุที่ short circuit current เป็น asymmetrical เพราะ impedance ส่วนใหญ่ในวงจร short circuit จะมีค่า reactance มากกว่าค่า resistance ซึ่ง ratio :  $X/R$  จะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่า maximum ของ peak

- ถ้า short circuit เกิดขึ้นตรงเวลาขณะที่ voltage wave เป็น peak กระแสจะเริ่มจากศูนย์ และจะมีรูปร่างเป็น sine wave มี rate of change สูงสุด ( ซึ่งจะสอดคล้องกับขณะแรงดันเป็น peak) และมี symmetry กับแกนศูนย์ ดังรูปที่ 4
- ถ้า short circuit เกิดขึ้นตรงเวลาที่ voltage wave มีค่าเป็นศูนย์ ขณะนั้นกระแสต้องมีเป็น peak หรือมี rate of change เป็นศูนย์ด้วย (current wave จะต้อง lag ประมาณ  $90^\circ$  จาก voltage wave) จึงเป็นไปได้ที่ current wave จะเกิดขึ้นเป็น peak ทันที ทำให้เกิดมี DC component ผสมกับ sine wave กระแสที่เกิดขึ้นจึงไม่ symmetry กับแกนศูนย์ ดังรูปที่ 5

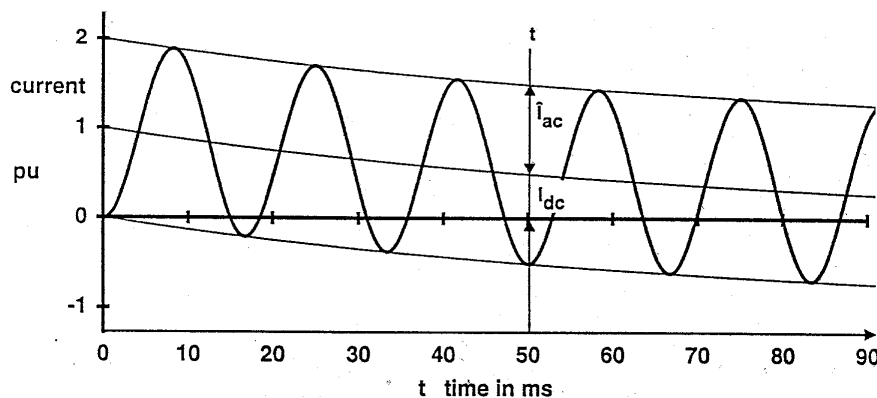


รูปที่ 4 Short circuit occurred at peak voltage , Current symmetrical



รูปที่ 5 Short circuit occurred at zero voltage , Current peak asymmetrical

#### 4. DC component ของ asymmetrical short circuit current



รูปที่ 6 Components of asymmetrical short circuit current

asymmetrical short circuit current wave form สามารถอธิบายด้วย component 2 ชนิด ดังรูปที่ 6 คือ

- symmetrical current ที่มีลักษณะเป็น sine wave และ
- DC component ที่มีอัตราลดลงเป็น function ของ reactance และ resistance ที่ทั่วไป จะลดลงจนเป็นศูนย์ประมาณ 6-10 cycle

## 5. การคำนวณ short circuit currents

การคำนวณ asymmetrical current อย่างละเอียด และถูกต้องเป็นวิธีที่ยุ่งยาก จึงมักจะคำนวณอย่างง่ายเพื่อจะได้ใช้เป็นข้อมูลในการเลือก equipment rating และ protective device

basic equation: ค่า symmetrical short circuit current : I

$$I = E/Z$$

E คือ system driving point voltage

Z คือ system impedance ในวงจร short circuit

การคำนวณจะให้ generator ทั้งหมดที่มีอยู่ในระบบต่อเข้าใช้งาน และกำหนดค่า generator impedance ที่เป็นส่วนหนึ่งของ system impedance ในสูตร basic equation มีค่าเท่ากับ impedance ในช่วง subtransient ค่าที่คำนวณได้กำหนดให้เป็นค่า symmetrical short circuit current ไว้เทียบกับ interrupting rating ของ breaker

## 6. ความหมายของ circuit breaker rating

ทั่วไป circuit breaker ต้องสามารถตัดกระแสลัดวงจรสูงสุดที่มีโอกาสไหลผ่าน

high voltage breaker จะมี rated interrupting time ประมาณ 3-5 cycle มี current rating กำหนดไว้ 2 ชนิดคือ

- momentary current rating
- interrupting current rating (หรือ breaking current rating)

breaker ต้องสามารถทน mechanical stress ที่เกิดขึ้นขณะเกิด short circuit และสามารถตัดกระแสลัดวงจรที่มีขนาดค่อยๆ ต่ำลง หรือเรียกว่า decay ลงขณะตัด (interrupt)

**momentary peak current rating** (หรือ closing and latching current rating หรือ short circuit making current rating) จะพิจารณาค่าคลื่นลูกแรกของกระแส short circuit ที่เป็นค่า asymmetrical peak สูงสุดของ peak แรก ที่ breaker ต้องทน mechanical stress ที่จะเกิดขึ้นได้ขณะ close on fault ค่าทั่วไปตาม IEC std. จะใช้ factor เท่ากับ 2.5 คูณ AC component เหตุผลที่ใช้ 2.5 เพราะ peak making current มีค่าเท่ากับ

$$\text{initial symmetrical rms current} \times 2 \times \sqrt{2} \times 0.9$$

(0.9 คือ factor ที่เกิดขึ้นเพราะ peak แรกเกิดขึ้นขณะที่มี DC component ลดลงแล้ว)

$$\text{initial symmetrical rms current} \times 2.55 \quad \text{IEC จึงกำหนดให้ใช้ตัวเลข 2.5}$$



interrupting current rating เป็นค่า symmetrical short circuit current วัตขณะที่ arcing contact แยกจากกัน(contact parting time)

asymmetrical interrupting current rating เป็นค่า asymmetrical short circuit current (symmetrical + dc component ) วัตขณะที่ arcing contact แยกจากกัน

ตาม IEC std. จะกำหนดค่า rms value ของค่า AC component  $I_{ac}$  คือ symmetrical interrupting rating และ percentage DC component  $(I_{dc} \times 100) / I_{ac}$

ตาม ANSI std. จะกำหนดค่า rms value และ curve เพื่อหาค่า factor ไปใช้คำนวณหาค่า asymmetrical

breaker จะสามารถตัดกระแสลัดวงจรได้เท่ากับ rated short circuit interrupting / breaking current ซึ่งประกอบด้วย AC component และ percentage DC component เท่าที่กำหนดไว้

interrupting rating ทั่วไปสามารถเลือกค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ระบุเป็น AC component ใช้งาน เช่น 20, 25, 31.5, 40, 50, 63 kA ตามตารางรูปที่ 7

short time current rating จะบอกเป็นค่า symmetrical ampere ที่ breaker สามารถทนความร้อนที่เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ ได้ในหนึ่งหรือสามวินาที จะเป็นค่าเดียวกับ interrupting current

Voltage Rating			
Normal / Maximum	kV	22 / 25.8	33 / 38
Rate Voltage Range Factor K		1	1
Insulation Level			
Low Frequency Withstand(Dry),rms	kV	60	80
Impulse Withstand(BIL),Crest	kV	150	200
Current Ratings			
Rated Continuous	A	1600	1600
Rated Short Circuit Current at Max. kV	kA	25	25
Closing and Latching Capability,Crest	kA	68	68
Rated Interrupting Time	cycle	5	5
Rated Duty Cycle		CO + 15s + CO	
Type of Tripping		Three pole	
Creepage Distance	mm/kv	>= 15 or 25	
Surge Absorber Capacitor		PEALine	

Voltage Rating							
Normal / Maximum	kV	69/72.5	115/121		230/242		525/550
Rate Voltage Range Factor K		1	1		1		1
Insulation Level							
Low Frequency Withstand(Dry),rms	kV	160	260		425		860
Impulse Withstand(BIL),Crest	kV	350	550		900		1550
Current Ratings							
Rated Continuous	A	3000/4000	1200/2000	2000	2000	2000/3000/4000	4000
Rated Short Circuit Current at Max. kV	kA	40	31.5	40	40	50	50
Closing and Latching Capability, Crest	kA	108	85	108	108	135	135
Rated Interrupting Time	cycle	5	3	3	3	3	2
Rated Duty Cycle		O + 0 s + CO + 15s + CO					
Type of Tripping		Single Pole and/or Three pole					
Creepage Distance	mm/kv	>= 15 or 25					
Surge Absorber Capacitor		no					

รูปที่ 7 ตัวอย่าง Standard rating short circuit current ที่ EGAT เลือกใช้

## 7. หลักการเลือก circuit breaker rating

การออกแบบต้องคำนึงถึง safety ของคนที่ทำงานในสถานีหรือผู้ที่อาศัยอยู่รอบๆ สถานี และ ต้องไม่ทำให้อุปกรณ์เกิดเสียหาย จึงกำหนดให้ equipment short circuit rating หรือ interrupting rating ให้มีค่าเท่ากับหรือสูงกว่า maximum short circuit current ที่ไหลผ่าน ซึ่งจะเรียกว่า ‘ available short circuit current ‘ โดยใช้ค่ากระแสของ symmetrical short circuit current ที่คำนวณจาก basic equation มาเป็นตัวกำหนดการเลือก rating การคำนวณจะใช้ subtransient reactance  $X''$  ของ synchronous generator และ transient reactance  $X'$  ของ synchronous motor โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลจาก induction motor

การใช้ค่า symmetrical short circuit current ที่คำนวณได้เป็นตัวกำหนดการเลือก rating ของ breaker จะให้ margin อยู่แล้ว เพราะใช้ค่าของ peak แรกที่เป็น rms มาเป็น interrupting current ซึ่งจะเกิดขึ้นห่างออกไป 1-2 cycle ในขณะที่ contact เริ่มแยกจากกัน

ส่วนค่า DC component จะมีรวมอยู่ด้วยในขณะที่ breaker เริ่มต้น interruption

ความสามารถของ breaker ซึ่งในแต่ละมาตรฐาน จะมีการ verify ในการทดสอบ breaker แบบ type test อยู่แล้ว และแต่ละ มาตรฐานจะคำนึงถึง ขนาดและ ความเหมาะสมของ parameter ของระบบ ในทางปฏิบัติจะมีบางอย่างที่มีผลกับกระแสลัดวงจร

- ขณะใช้งานจริงอาจไม่ได้เดินเครื่องทุกโรง แต่จะไม่ทำให้สถานีที่มี fault level สูงจากการคำนวณตามสูตร มีค่า fault level ที่เกิดขึ้นจริงลดต่ำลงไปมาก (จะใกล้เคียงกับค่าที่เดินทุกโรง)
- breaker ที่อยู่ใกล้ power plant จะมี margin น้อยกว่า breaker ที่อยู่ไกลออกไป
- ในการคำนวณ symmetrical short circuit current ในแต่ละแห่งจะเป็นค่าของ bus fault
- breaker ของ line ที่ feed fault current น้อยที่สุดกรณีเกิด fault ในสถานี จะมีโอกาส interrupt กระแสมากที่สุดเมื่อเกิด fault ใกล้เคียง สถานีใน line นั้น กระแสที่ผ่าน line breaker ตัวนั้นจะเท่ากับ bus fault current ลบด้วยกระแสที่ไหลมาจากสถานีที่อยู่อีกด้าน

parallel clearing ของ gas circuit breaker ชนิด puffer type ต้องคำนึงถึงกระแสที่แต่ละตัว interrupt ต้องไม่ต่างกันมาก หากต่างกันมาก เช่น 10% และ 90% จำเป็นต้อง de-rating ลง และกำหนดให้ใช้เพียง 80% ของ rated interrupting current

#### 8. การพิจารณากรณี short circuit current ที่คำนวณได้มีค่าเท่าหรือเกิน breaker rating

ขณะใช้งานบางสถานีอาจมี fault level สูงเกินกว่า breaker rating จำเป็นต้องพิจารณาเปลี่ยน rating ให้เหมาะสม การพิจารณาเปลี่ยนควรเลือกเฉพาะ breaker ที่ต้องตัดกระแสสูงเกิน rating ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนทุกตัว หรือพิจารณาใส่ series reactor เพื่อ limit กระแส

ข้อแนะนำเพื่อการพิจารณา

- bay ที่ไม่ได้ feed fault (ขณะเกิด bus fault) กรณีเกิด fault ใกล้เคียง สถานีใน circuit ที่ต่อออกจาก bay นี้ จะมี short circuit current ใกล้เคียงกับ bus fault current เช่น bay ของ capacitor bank, transformer ที่จ่าย load ให้ กฟน. และ กฟภ. ถ้า bus arrangement เป็น breaker and a half scheme อาจ open breaker ตัวกลางไว้และเมื่อเกิด fault ให้ trip signal สั่ง bus differential ทำงานเพื่อช่วยลด หรือ ตัดกระแสขณะ interruption ได้ หรือป้องกัน interruption failure
- bay ที่ feed fault น้อยที่สุด (ขณะเกิด bus fault) ให้สำรวจกระแสแต่ละ line (circuit) ขณะเกิด fault ใน line นั้นตำแหน่งใกล้สถานี จะพบว่า bay ที่ feed bus fault current ต่ำ จะมีกระแสผ่านสูง ให้พิจารณาเฉพาะ ที่ใกล้ หรือเกิน 90 % breaker rating หรือพิจารณาใส่ series reactor เฉพาะใน line นั้น

#### series reactor เพื่อ limit กระแส

230 kV system 40 kA : short circuit inductance เท่ากับ 10.57 mH

ใส่ series reactor ขนาด 1.0 mH จะลดลงได้ประมาณ 10%

115 kV system 40 kA : short circuit inductance เท่ากับ 5.28 mH

ใส่ series reactor ขนาด 0.6 mH จะลดลงได้ประมาณ 10%