สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

กับดักแรงดันเกิน

กับดักแรงดันเกินเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดแรงดันเกิน ขณะที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันปกติกับดักแรงดันเกินจะมีความต้านทานสูงมากทำให้มีกระแสรั่วไหลผ่านน้อย แต่ทันทีที่เกิดแรงดันเสิร์จความต้านทานของกับดักแรงดันเกินจะลดลง ส่งผลให้กระแสส่วนเกินจากการเกิดแรงดันเสิร์จไหลผ่านกับดักแรงดันเกินลงสู่ดินช่วยป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

2.1 การเลือกใช้งานกับดักแรงดันเกิน

ในการเลือกใช้งานกับดักแรงดันเกินให้เหมาะสม จำเป็นที่จะต้องพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

2.1.1 แรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Uc : Continuous Operating Voltage)

แรงดันใช้งานต่อเนื่อง คือระดับแรงดันต่อเนื่องค่ามากที่สุดที่กับดักแรงดันเกินสามารถรับได้ ค่า Uc ของกับดักแรงดันเกินในขณะใช้งานจริงอาจจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้จากผู้ผลิตเนื่องมาจากอายุการใช้งาน อุณหภูมิขณะใช้งาน และคราบสกปรกที่ติดที่กับดักแรงดันเกิน

ค่ายอดของ Uc จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่ามากที่สุดของระดับแรงดันของระบบไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้าทั่วไปค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของแรงดันจะเป็น 1.05 เท่าของค่ายอดของแรงดันของระบบไฟฟ้าเนื่องมากจากผลของฮาร์มอนิก

2.1.2 แรงดันพิกัด (Ur : Rated Voltage)

แรงดันพิกัด คือ แรงดันค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้เมื่อจ่ายให้กับดักแรงดันเกิน มาตรฐาน IEC-60099-5 กำหนดให้กับดักแรงดันเกินต้องสามารถทำงานได้ถูกต้องที่ระดับแรงดันพิกัดเป็นเวลา 10 วินาที

การเลือกแรงดันพิกัดของกับดักแรงดันเกินต้องทำการพิจารณาแรงดันเกินชั่วขณะ (Ut : Temporary Overvoltage) ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

แรงดันเกินชั่วขณะอาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

- ความผิดพร่องลงดิน

เป็นสาเหตุหลักของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ ระยะเวลาของการเกิดแรงดันเกินจะขึ้นกับชนิดของความผิดพร่องและการป้องกันของระบบไฟฟ้า

- การปลดโหลด

การปลดโหลดออกจากระบบไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงดันเกินได้ ในระบบทั่วไปแรงดันเกินที่เกิดจากการปลดโหลดจะมีค่าไม่เกิน 1.5 p.u.

ค่าแรงดันพิกัดของกับดักแรงดันเกิน (Ur) จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเกินชั่วขณะ (Ut) ที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

2.1.3 ความสามารถในการรับพลังงาน

กับดักแรงดันเกินจะต้องสามารถทนรับพลังงานที่อาจเกิดขึ้นจากการเกิดแรงดันเกินด้วยสาเหตุต่างๆดังนี้

- การสับสายส่ง

$$W = 2Ups(Ue - Ups)\frac{Tw}{Z} \qquad (2.1)$$

โดยที่ W คือ พลังงานที่เกิดขึ้น

Ups คือ ระดับการป้องกันอิมพัลส์แบบสวิตชิงของกับดักแรงดันเกิน

Ue คือ ขนาดของแรงดันเกิน

T คือ เวลาที่แรงดันเคลื่อนไปตามสายส่ง

Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

- การสับตัวเก็บประจุหรือสายเคเบิล

$$W = \frac{1}{2}C\left[(3Uo)^2 - \left(\sqrt{2}Ur\right)^2\right] \qquad (2.2)$$

โดยที่ C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุหรือสายเคเบิล

Uo คือ ค่ายอดของแรงดันเฟส

Ur คือ ค่าประสิทธิผลของแรงดันพิกัดของกับดักแรงดันเกิน

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ฟ้าผ่า

$$W = \left[2Uf - NUpl\left(1 + \ln\left(2\frac{Uf}{Upl}\right)\right) \right] \frac{UplTl}{Z} \qquad (2.3)$$

โดยที่ ln คือ ล็อกการิธึมธรรมชาติ

Upl คือ ระดับการป้องกันอิมพัลส์ฟ้าผ่าของกับดักแรงดันเกิน

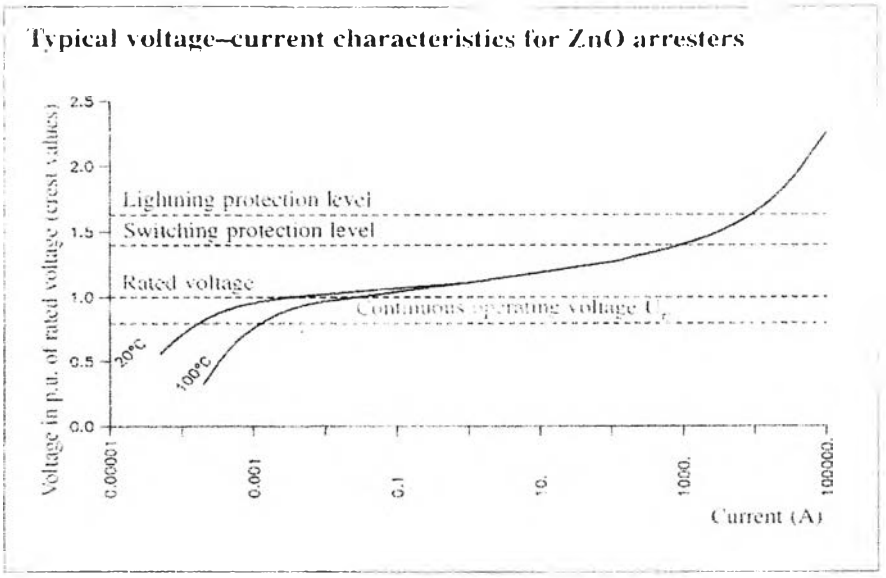
Uf คือ แรงดันวาบไฟค่าลบ(negative flashover voltage)
ที่เกิดบริเวณฉนวนของสายส่ง

Z คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

N คือ จำนวนสายส่งที่ต่อกับกับดักแรงดันเกิน

Tl = $3*10^{-4}$ s

รูปที่ 2.1 แสดงรูปทั่วไปของลักษณะกระแส-แรงดันของกับดักแรงดันเกิน

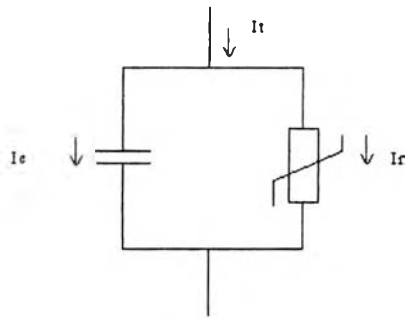


รูปที่ 2.1 ลักษณะกระแส-แรงดันของกับดักแรงดันเกิน

โดยทั่วไประบบไฟฟ้าที่นำกับดักแรงดันเกินไปต่อใช้งานจะมีระดับแรงดันต่ำกว่า Uc เล็กน้อย ขณะที่กับดักแรงดันเกินทำงานในย่าน Operating Volatage กระแสรั่วที่ไหลผ่านกับดักแรงดันเกินจะมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อแรงดันของระบบไฟฟ้ามีค่ามากกว่า Ur (U/Ur > 1) กระแสรั่วที่ไหลผ่านกับดักแรงดันเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า

2.2 การตรวจสภาพของกับดักแรงดันเกิน

กระแสรั่วรวม (It : total leakage current) ที่ไหลผ่านกับดักแรงดันเกินสามารถแบ่งได้ 2 ส่วนคือกระแสรั่วเชิงความต้านทาน (Ir : resistive leakage current) และกระแสรั่วเชิงความจุ (Ic : capacitive leakage current) สามารถเขียนวงจรสมมูลของกับดักแรงดันเกินได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของกับดักแรงดันเกิน

2.2.1 กระแสรั่วเชิงความจุ

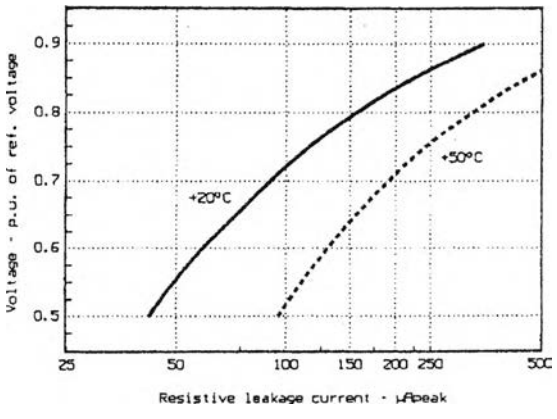
เป็นกระแสที่เกิดจากความจุไฟฟ้าสเตรย์ (stray capacitance) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.2 mA ถึง 3 mA ที่ระดับแรงดันใช้งานปกติ

กระแสรั่วเชิงความจุจะไม่เปลี่ยนตามระยะเวลาการใช้งาน จึงไม่สามารถวัดกระแสรั่วเชิงความจุเพื่อตรวจสภาพของกับดักแรงดันเกินได้

2.2.2 กระแสรั่วเชิงความต้านทาน

เป็นกระแสจริงที่ไหลผ่านกับดักแรงดันเกิน กระแสรั่วเชิงความต้านทานสามารถบ่งชี้ถึงสภาพของกับดักแรงดันเกินได้ โดยทั่วไปกระแสรั่วเชิงความต้านทานจะมีค่าประมาณ 5% ถึง 20% ของกระแสรั่วเชิงความจุ ตามมาตรฐาน IEC-60099-5 กระแสรั่วเชิงความต้านทานไม่ควรมีค่าเกิน 600 μ A นอกจากนี้การใช้งานกับดักแรงดันเกินที่อุณหภูมิสูงและคราบสกปรกที่ติดอยู่ที่กับดักแรงดันเกิน อาจทำให้ค่ากระแสรั่วเชิงความต้านทานที่วัดได้มีค่าสูงกว่าปกติได้

รูป 2.3 แสดงตัวอย่างผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสรั่วเชิงความต้านทานที่ระดับแรงดันต่างๆ



รูปที่ 2.3 กระแสรั่วเชิงความต้านทานที่อุณหภูมิต่างกัน

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าที่ระดับแรงดันเดียวกัน กับดักแรงดันเกินที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะมีค่ากระแสรั่วเชิงความต้านทานมากกว่ากับดักแรงดันเกินที่ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้ค่าของกระแสรั่วเชิงความต้านทานที่วัดที่อุณหภูมิต่างกันเพื่อให้สามารถทำการเปรียบเทียบกันได้

กระแสรั่วเชิงความต้านทาน ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงสภาพของกับดักแรงดันเกินไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงวิธีการที่สามารถแยกกระแสรั่วเชิงความต้านทานออกจากกระแสรั่วรวมที่ไหลผ่านกับดักแรงดัน

2.3 การจำแนกวิธีการหาค่ากระแสรั่วเชิงความต้านทาน [1]

มาตรฐาน IEC-60099-5 จำแนกวิธีการหากระแสรั่วเชิงความต้านทานของกับดักแรงดันเกินดังต่อไปนี้

2.3.1 การหากระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยตรง

การหากระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยตรงสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 วิธีย่อยขึ้นกับกระบวนการในการหากระแสรั่วเชิงความต้านทานจากกระแสรั่วรวม

2.3.1.1 การใช้แรงดันเป็นฐาน

2.3.1.2 การหาค่ากระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยใช้แรงดันของระบบไฟฟ้า

2.3.1.3 การหาค่ากระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยไม่ใช้แรงดันของระบบไฟฟ้า

2.3.1.4 การหาค่ากระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยการพิจารณากระแส 3 เฟส

2.3.2 การหากระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยอ้อม

2.3.2.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 ของกระแสรั่วรวม

2.3.2.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 ของกระแสรั่วรวม พร้อมทั้งชดเชยส่วนประกอบฮาร์มอนิกในแรงดันของระบบไฟฟ้า

2.3.2.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบมูลฐานของกระแสรั่วรวม

2.3.3 การหาค่าพลังงานสูญเสียโดยตรง (Direct determination of the power losses.)

2.4 การหากระแสรั่วเชิงความต้านทาน

วิธีการหากระแสรั่วเชิงความต้านทานที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จัดอยู่ในหัวข้อที่ 2.3.1.2 ซึ่งเป็นการหากระแสรั่วเชิงความต้านทานโดยจำเป็นต้องใช้แรงดันที่ป้อนเข้าสู่กับดักแรงดันเกินประกอบการคำนวณ

2.4.1 COMPENSATION METHOD [2]

การหากระแสรั่วเชิงความต้านทานวิธี COMPENSATION METHOD ใช้หลักการคือผลการอินทิเกรตของผลคูณระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกิน ซึ่งถูกเลื่อนเฟสไปข้างหน้า 90 องศา (Vsf) กับกระแสรั่วเชิงความต้านทาน (Ir) ในหนึ่งคาบมีค่าเป็นศูนย์

$$\int [\, Vsf * (It - (G * Vsf)) \,] \, dt = 0 \qquad (2.4)$$

Vsf คือ แรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกินซึ่งถูกเลื่อนเฟสไปข้างหน้า 90 องศา

It คือ กระแสรั่วรวมที่ไหลผ่านกับดักแรงดันเกิน

หาค่า G ที่ทำให้สมการที่ 2.4 เป็นจริง แล้วนำค่า G ที่ได้ไปคำนวณหากระแสรั่วเชิงความต้านทานดังสมการที่ 2.5

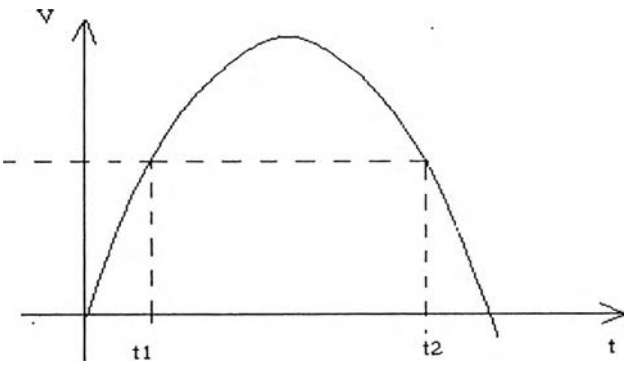
$$Ir = It - (G * Vsf) \qquad (2.5)$$

2.4.2 POINT–ON-WAVE METHOD [3]

จากวงจรสมมูลของกับดักแรงดันเกิน ในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.6

$$Ir = Ic - C\frac{dV}{dt} \tag{2.6}$$

กำหนดให้ t1 และ t2 เป็นเวลาขณะใดๆที่แรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกินมีค่าเท่ากันดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เวลา t1 และ t2 ซึ่งเป็นเวลาที่แรงดันตกคร่อมกับดักแรงดันเกินมีค่าเท่ากัน

กระแสรั่วเชิงความต้านทานจะมีเฟสตรงกับแรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกิน และที่เวลา t1 และ t2 ซึ่ง V(t1) = V(t2) จะทำให้ Ir(t1) = Ir(t2)

เขียนสมการของกระแสรั่วเชิงความต้านทานที่เวลา t1 และ t2

$$Ir(t1) = It(t1) - C\frac{dV(t1)}{dt} \tag{2.7}$$

$$Ir(t2) = It(t2) - C\frac{dV(t2)}{dt} \tag{2.8}$$

นำสมการที่ 2.8 ลบออกจากสมการที่ 2.7 จะได้ค่า C ดังสมการ 2.9

$$C = \frac{It(t1) - It(t2)}{\frac{dV(t1)}{dt} - \frac{dV(t2)}{dt}} \tag{2.9}$$

นำสมการที่ 2.7 บวกกับสมการที่ 2.8 ได้สมการที่ 2.10

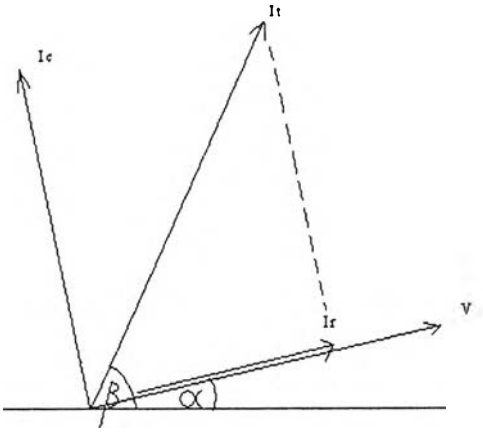
$$Ir(t1) = Ir(t2) = \frac{It(t1) + It(t2)}{2} - \frac{C}{2}\left(\frac{dV(t1)}{dt} + \frac{dV(t2)}{dt}\right) \qquad (2.10)$$

แทนค่า C ในสมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.10 จะได้สมการสำหรับคำนวณหากระแสรั่วเชิงความต้านทานดังสมการที่ 2.11

$$Ir(t1) = Ir(t2) = \frac{It(t1) + It(t2)}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{It(t1) - It(t2)}{\frac{dV(t1)}{dt} - \frac{dV(t2)}{dt}}\right)\left(\frac{dV(t1)}{dt} + \frac{dV(t2)}{dt}\right) \qquad (2.11)$$

2.4.3 HARMONIC ANALYSIS METHOD [4]

วงจรสมมูลในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2

กระแสรั่วเชิงความต้านทานคือภาพฉาย (projection) ของกระแสรั่วรวมลงบนระนาบเดียวกันกับแรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกิน เนื่องจากกระแสรั่วรวมที่ไหลผ่านกับดักแรงดันเกินมีส่วนประกอบฮาร์มอนิก ดังนั้นกระแสรั่วเชิงความต้านทานสามารถหาได้จากผลรวมของภาพฉายของทุกๆส่วนประกอบฮาร์มอนิกของกระแสรั่วรวม ที่ฉายลงบนระนาบเดียวกับส่วนประกอบฮาร์มอนิกของแรงดัน

นำแรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกิน และกระแสรั่วรวมที่ไหลผ่านกับดักแรงดันเกิน มาแยกส่วนประกอบฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$V = V_0 + \sum [V_{km} * \sin (k\omega t + \alpha_k)] \quad ; k = 1 \text{ ถึง } \infty \qquad (2.11)$$

$$It = I_0 + \sum [I_{km} * \sin (k\omega t + \beta_k)] \quad ; k = 1 \text{ ถึง } \infty \qquad (2.12)$$

โดย V_0 คือ ส่วนประกอบกระแสตรงของแรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกิน

I_0 คือ ส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วรวม

V_{km} คือ ค่ายอดของฮาร์มอนิกที่ k ของแรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกิน

I_{km} คือ ค่ายอดของฮาร์มอนิกที่ k ของกระแสรั่วรวม

α_k คือ มุมเฟสของฮาร์มอนิกที่ k ของแรงดันที่ตกคร่อมกับดักแรงดันเกิน

β_k คือ มุมเฟสของฮาร์มอนิกที่ k ของกระแสรั่วรวม

สามารถหาค่ากระแสรั่วเชิงความต้านทานได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Ir = I_0 + \sum [I_{Rk} * \sin (k\omega t + \alpha_k)] \quad ; k = 1 \text{ ถึง } \infty \qquad (2.13)$$

$$I_{Rk} = I_{km} * \cos (\beta_k - \alpha_k) \qquad (2.14)$$

แทนค่า I_{Rk} ในสมการที่ 2.14 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้สมการที่ใช้คำนวณหากระแสรั่วเชิงความต้านทานดังสมการที่ 2.15

$$Ir = I_0 + \sum [I_{km} * \cos (\beta_k - \alpha_k) * \sin (k\omega t)] \quad ; k = 1 \text{ ถึง } \infty \qquad (2.15)$$