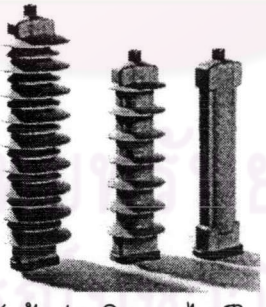
บทที่ 3

กับดักฟ้าผ่าและความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราว

3.1 บทนำทั่วไป

กับดักฟ้าผ่า (lightning arrester) หรือกับดักเสิร์จดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินได้ทั้งที่เป็นแรงดันเกินสวิตชิ่ง และแรงดันเกินฟ้าผ่า ใช้สำหรับป้องกันอุปกรณ์สำคัญและมีราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า สายเคเบิลใต้ดิน เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอ็กเตอร์ หรืออุปกรณ์ทั้งหลายในสถานีไฟฟ้า กับดักฟ้าผ่ามีคุณลักษณะเป็นความต้านทานไม่เชิงเส้น โดยที่ระดับแรงดันใช้งานปกติความต้านทานจะมีค่าสูง และลดลงเมื่อแรงดันมีค่าสูงขึ้นหรือเกิดแรงดันเกิน ซึ่งอาจแบ่งประเภทของกับดักเสิร์จตามลักษณะโครงสร้างภายในได้เป็น 2 ชนิดคือ กับดักเสิร์จชนิด SiC และชนิด ZnO แต่ในปัจจุบันนิยมใช้ชนิด ZnO โดยเฉพาะในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะสามารถควบคุมให้ระดับของแรงดันป้องกันที่กระแส 10 kA มีแรงดันคงค้าง (residual voltage) ระดับ 2.0–3.0 p.u. และกับดักฟ้าผ่าชนิดนี้ยังมีความไวต่อผลกระทบของความเปรอะเปื้อนภายนอกน้อยเมื่อเทียบกับชนิด SiC ซึ่งกระแสรั่วตามผิวฉนวนภายนอกจะมีผลต่อแรงดันกระจาย และทำให้อุณหภูมิของบล็อกกับดักฟ้าผ่าเพิ่มขึ้น และทำลายกับดักฟ้าผ่าได้ นอกจากนี้ที่แรงดันใช้งานปกติ กระแสรั่วผ่านตัวต้านทานของกับดักฟ้าผ่ายังมีค่าต่ำไม่ถึงหนึ่งมิลลิแอมป์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีสปาร์กแกปเหมือนกับดักฟ้าผ่าชนิด SiC



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน [12]

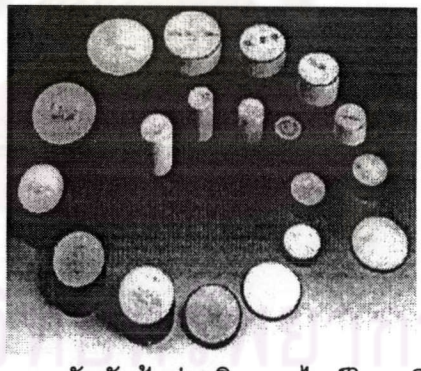
แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากกับดักฟ้าผ่าไม่ได้ออกแบบมาให้มีความสามารถคงทนในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราว (temporary overvoltage) เช่น แรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ หรือการผิดพร่องลงดิน เป็นต้น ทำให้แรงดันเกินชั่วคราวที่มีขนาดสูงเกินกว่าพิกัด MCOV และเกิดขึ้นเป็นระยะเวลานาน ก็อาจทำให้กับดักฟ้าผ่าได้รับความเสียหายจากการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน (thermal runaway) และเกิดการระเบิดหรือได้รับความเสียหายได้

3.2 กับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ [12, 13, 14, 15]

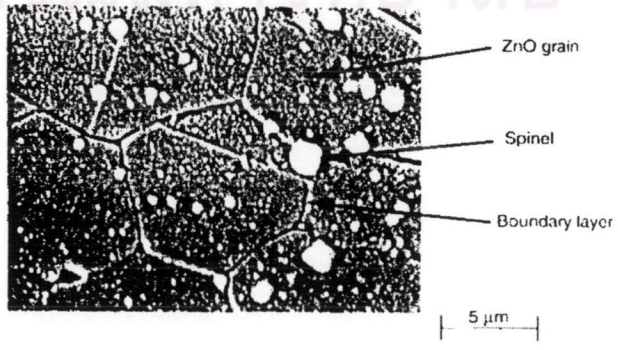
กับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ หรือชนิดไม่มีสปาร์กแกปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ค้นพบขึ้นใหม่ (บริษัท Matsushita Electric Industrial Co. in Japan ปี ค.ศ. 1968) เริ่มต้นใช้ป้องกันแรงดันเกินกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์เล็กๆ จากนั้นมีการพัฒนาเทคโนโลยีจนทำให้มีขนาดใหญ่ คุณภาพ และเสถียรภาพในการทำงานสูงขึ้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ในเวลาต่อมา

3.2.1 โครงสร้างของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ

ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักฟ้าผ่าจะทำด้วยออกไซค์โลหะได้แก Zine Oxide (ZnO) เป็นวัสดุหลักในรูปของอนุภาคผสมด้วยสารเจืออกไซด์ของ Bi_2O_3, CoO, MnO, Sb_2O_3 และ CrO_3 สารเจือที่เป็นผลเหล่านี้ใส่ผสมเพิ่มเติมแล้วอัดกดเป็นแผ่นบล็อกกลมดังแสดงในรูปที่ 3.2 ด้วยแรงอัดประมาณ 30-50 Mpa แล้วเผาที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 1,200°C หลังจากการเผาแล้วอนุภาคของ ZnO จะมีขนาดประมาณ 5-10 μm สิ่งเจือที่เติมเข้าไปจะทำให้ระดับพลังงานเปลี่ยน ดังนั้นคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และการฉนวนเปลี่ยนไปด้วย ออกไซค์เหล่านี้เป็นฉนวนจะเคลือบอนุภาคนำไฟฟ้าของ ZnO เป็นฟิล์มบางๆ หนาประมาณ 0.1 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างบล็อกของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะที่ถูกอัดกดให้กลม [12]

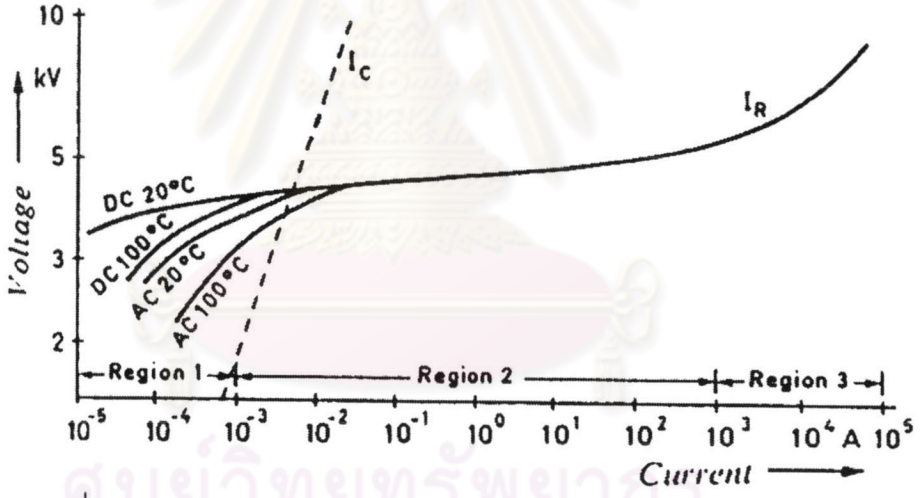


รูปที่ 3.3 อนุภาคของสารออกไซด์ผสมที่ทำเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น [14]

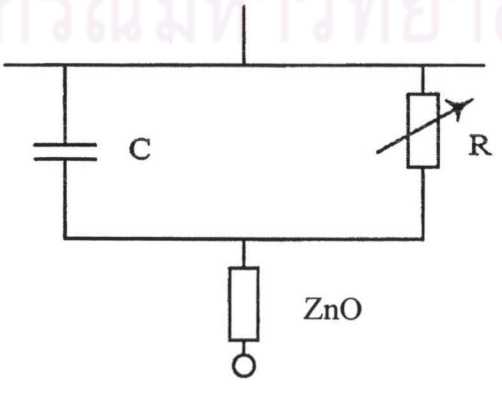
การเคลือบด้วยฟิล์มบางๆ ของสารฉนวนออกไซด์ที่สำคัญได้แก่ Bi_2O_3 จะทำให้ได้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันไฟฟ้า ตามสมการที่ 3.1

$$I = kV^{\alpha} \tag{3.1}$$

ค่าคงตัวของ α มีค่าประมาณ 25 – 30 ซึ่งมีกราฟความสัมพันธ์ของ V และ I ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยสาร ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะน้อย ในขณะที่สารเคลือบภายนอก ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง 10^{10} Ω-cm และมีค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์สูงประมาณ 500 – 1,000 จึงมีคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ C ฉะนั้นแผ่นบล็อกความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักฟ้าผ่าชนิดโลหะออกไซด์จึงแทนได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงดัน – กระแสไฟฟ้าของ ZnO [14]



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของแผ่นบล็อกสารออกไซด์โลหะของกับดักฟ้าผ่า [15]

3.2.2 คุณลักษณะทั่วไปของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ

ลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังต่อไปนี้

Region 1 (MCOV Region)

เป็นบริเวณที่มีกระแสไหลน้อยกว่า 1 mA เนื่องจากสารเคลือบชั้นรอบๆ ผลึกของ ZnO จะมีความต้านทานจำเพาะสูง ทำให้ที่ระดับแรงดันต่ำๆ จึงมีกระแสไหลผ่านกับดักฟ้าผ่ามีค่าน้อยมาก โดยส่วนใหญ่เป็นกระแสเชิงความจุ (capacitive current, I_C) มากกว่ากระแสความต้านทาน (resistive current, I_R) แต่ขนาดของกระแสความต้านทานที่ไหลผ่านบล็อกของกับดักฟ้าผ่าจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิของกับดักฟ้าผ่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.4

Region 2 (TOV and Switching Surge Region)

เป็นบริเวณที่มีกระแสไหลประมาณ 1 mA ถึง 1,000 หรือ 2,000 A เมื่อแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหักโค้ง (knee point) โดยปริมาณของกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และไม่มีผลกระทบของอุณหภูมิในบริเวณนี้ เป็นผลให้กระแสความต้านทานมีค่ามากกว่ากระแสคาร์ปาซิทีฟ

Region 3 (Lightning Region)

ถ้าแรงดันมีค่าเพิ่มมากจะทำให้กระแสมีค่าสูงมากเนื่องจากส่งผลต่อความต้านทานของผลึก หรือเกรนของ ZnO อย่างมาก ซึ่งเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะโค้งขึ้นและมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น และมีปริมาณกระแสตั้งแต่ 1 ถึง 100 kA โดยแสดงถึงคุณลักษณะของความต้านทานโดยสมบูรณ์

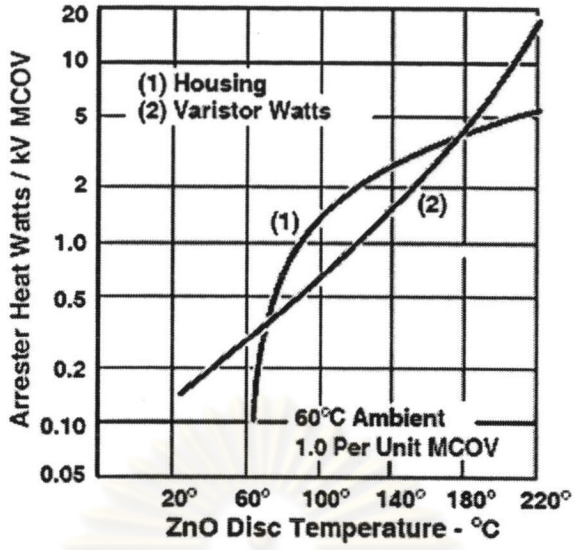
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่า [6, 13, 16, 17]

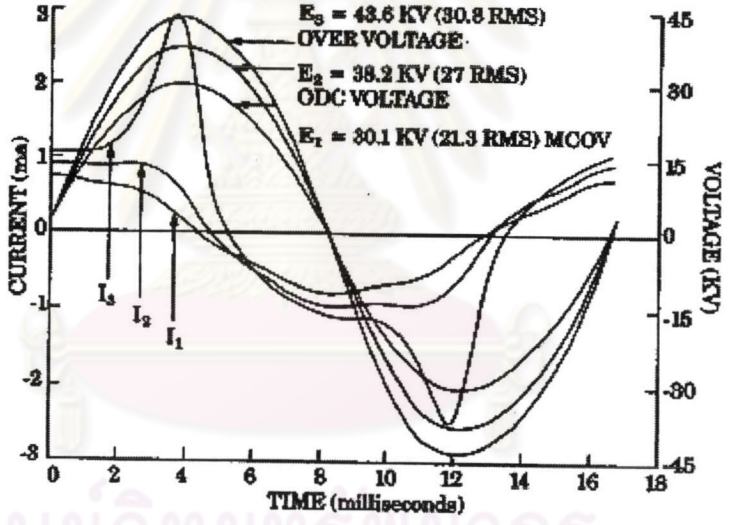
แรงดันเกินชั่วคราวเกิดขึ้นบ่อยครั้งในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น แรงดันเกินจากปรากฏการณ์เฟอร์แรนติ และเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งมีความหน่วงในวงจรน้อย หรือ การเกิดผิดพร่องลงดินทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วคราวในเฟสที่ไม่เกิดผิดพร่อง โดยเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาหลายร้อยมิลลิวินาที (ms) หรือมากกว่านั้น [18] แรงดันเกินชั่วคราวทำให้เกิดปัญหาขึ้นกับกับดักฟ้าผ่าชนิดมีสปาร์กแกป เนื่องจากถ้าแรงดันเกินมีค่าสูงพอที่ทำให้เกิดการสปาร์กผ่านแกป และบล็อกตัวต้านทานไม่เชิงเส้นของ SiC เนื่องจากกับดักฟ้าผ่าชนิดนี้ไม่สามารถตัดกระแสไหลตามได้ (following current) จึงอาจทำให้กับดักฟ้าผ่าถูกทำลายได้

สำหรับกับดักฟ้าผ่าชนิด ZnO หรือ กับดักฟ้าผ่าชนิดโลหะออกไซด์ซึ่งสามารถทำงานได้ทุกๆ จุดทำงานของคุณลักษณะ V – I ทำให้กับดักฟ้าผ่าชนิดนี้ต้องอยู่ภายใต้ระดับแรงดันปกติตลอดเวลา เพราะกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าทำให้เกิดการกระจายพลังงาน และเป็นผลให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่ากับดักฟ้าผ่าจะทำงานอยู่ใน Region 1 แต่ด้วยคุณลักษณะของกับดักฟ้าผ่าใน Region นี้จึงมีแนวโน้มที่กระแสอาจสูงขึ้นถ้าอุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้น ซึ่งเสี่ยงกับการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน (thermal runaway) ถ้าไม่สามารถระบายความร้อนสู่ภายนอกได้ทัน และนำไปสู่การเกิดความเสียหายของกับดักฟ้าผ่า โดยขนาดแรงดันต่อเนื่องสูงสุดที่ตกคร่อมกับดักฟ้าผ่าควรมีค่าต่ำกว่าพิกัด MCOV (maximum continuous rms. operating voltage) ซึ่งเป็นพิกัดที่สำคัญมากของกับดักฟ้าผ่า โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันพิกัดประมาณ 15 – 30%

สำหรับความสามารถในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่าควรอยู่ในขีดจำกัดที่ทางผู้ผลิตกำหนดไว้ รูปที่ 3.6 แสดงกราฟของกำลังไฟฟ้าที่ กับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะประเภท station class (porcelain housing) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm^2 ได้รับต่อ 1 p.u. ของพิกัด MCOV (2) และกราฟของกำลังงานจากความร้อนที่กับดักฟ้าผ่าระบายออก (1) ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ และมีอุณหภูมิแวดล้อมเท่ากับ 60° C จากรูปจุดตัดล่างของกราฟทั้งสองเส้นแสดงจุดทำงานที่มีเสถียรภาพของกำลังงานความร้อนที่เข้าและออกตัวกับดักฟ้าผ่า ส่วนจุดตัดบนแสดงจุดที่เริ่มเกิดการเสียเสถียรภาพทางความร้อน (thermal runaway) ของกับดักฟ้าผ่า โดยกลไกลการเกิดความเสียหายของกับดักฟ้าผ่าสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของรูปคลื่นแรงดัน และกระแสของกับดักฟ้าผ่าขนาด 27 kV ชนิดติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ขณะรองรับแรงดันต่อเนื่องสามระดับ ดังนี้



รูปที่ 3.6 คุณลักษณะทางความร้อนของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ ประเภท station class (porcelain housing) [16]



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของกับดักฟ้าผ่าขนาด 27 kV [17]

1) E_1 (Normal operating voltage, MCOV)

เมื่อกับดักฟ้าผ่ารับแรงดัน E_1 จะมีรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่าคือ I_1 ซึ่งมีเฟสตรงกันข้ามกับแรงดัน E_1 เนื่องจากกระแสประกอบด้วยกระแสคาร์ปาซิทีฟเป็นส่วนใหญ่ โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือกำลังไฟฟ้าที่กระจายออกมานั้นมีค่าน้อยมากซึ่งอาจไม่พิจารณาก็ได้

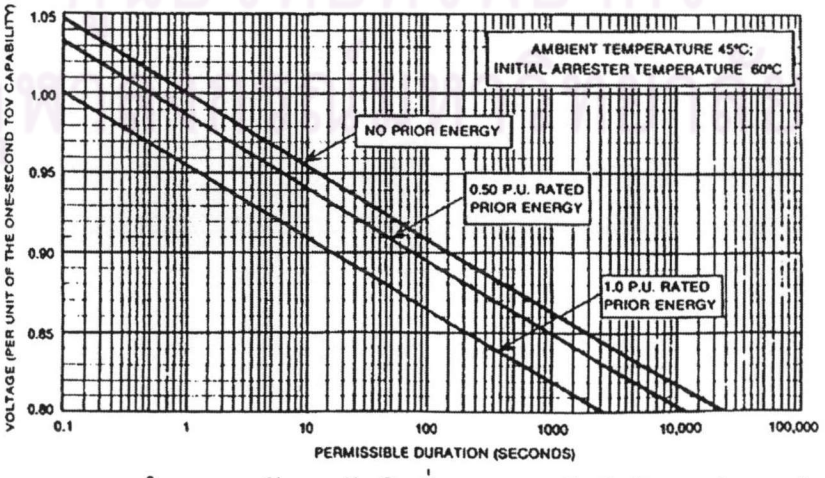
2) E_2 (Arrester rated voltage)

เมื่อแรงดันเพิ่มมาที่ระดับแรงดัน E_2 ทำให้องค์ประกอบกระแสความต้านทานมีขนาดเพิ่มขึ้นดังรูป I_2 ซึ่งเป็นผลให้กับดักฟ้าผ่ามีปริมาณความร้อน และอุณหภูมิภายในสูงขึ้น ถ้ากับดักฟ้าผ่าต้องรองรับแรงดันนี้เป็นระยะเวลานาน หรืออุณหภูมิภายถูกเร่งให้สูงขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแวดล้อมภายนอก หรือพลังงานจากการแรงดันเกินชั่วครู่ (transients overvoltage) ทำให้กระแส I_2 จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น I_3 หรือความต้านทานภายในของกับดักฟ้าผ่าลดลง ซึ่งเริ่มเข้าสู่สภาวะการสูญเสียเสถียรภาพทางความร้อน (Instability or thermal runaway)

3) E_3 (Overvoltage)

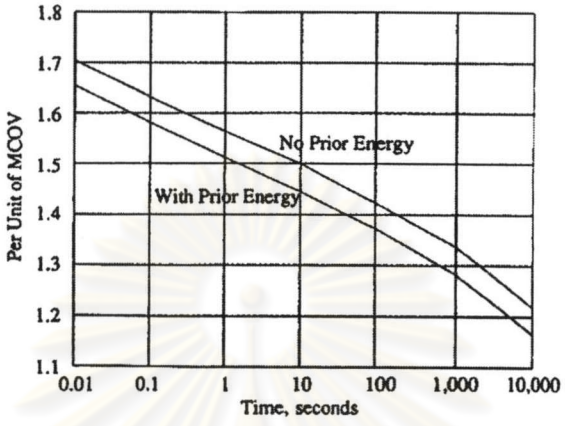
สำหรับภายใต้สภาวะแวดล้อมปกติ กระแส I_3 สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าแรงดันตกคร่อมกับดักฟ้าผ่ามีค่าสูงเกินกว่าขนาดแรงดันพิกัด เช่น ที่ขนาดแรงดันเกินต่อเนื่อง E_3 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบกระแสความต้านทานมีค่าสูงมาก โดยกำลังงานสูญเสีย และความสามารถในการระบายความร้อนจะมีความสำคัญในสภาวะที่ต้องรองรับแรงดันเกินชั่วคราวนี้

สำหรับระยะเวลาที่กับดักฟ้าผ่าสามารถคงทนต่อได้ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้น อุณหภูมิภายนอก และปริมาณพลังงานที่กับดักฟ้าผ่าได้รับจากแรงดันเกินก่อนหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าการที่กับดักฟ้าผ่าได้รับพลังงานจากแรงดันเกินสวิตชิ่ง หรือแรงดันเกินชั่วคราวก่อนหน้านั้นมีผลทำให้ความสามารถในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่าลดลงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 3.8 ความสามารถในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่าชนิดออกไซด์โลหะ [6]

โดยทั่วไปความสามารถในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEEE C62.22-1991 [18] จะแสดงเป็นความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเวลาในช่วง 0.02 - 10,000 วินาที และแสดงผลเป็นรูปกราฟในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.01 - 10,000 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างของกราฟความสามารถในการรับแรงดันเกินชั่วคราว ของกับดักฟ้าผ่าชนิด station class [13]

กราฟความสามารถในการรับแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่าสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 3.2

$$\frac{TOV_C}{MCOV} = AT^{-B} \qquad (3.2)$$

เมื่อ TOV_C เป็นความสามารถในการรับแรงดันเกินชั่วคราว, A และ B เป็นค่าคงที่ และ T เป็นเวลาในหน่วยวินาที และแบ่งกราฟออกเป็นสองช่วงดังนี้

1) $0.01\,s \leq t \leq 100\,s$
2) $100\,s < t \leq 10{,}000\,s$

ค่าของ A และ B (No prior energy) ได้มาจากข้อมูลการทดสอบของบริษัทผู้ผลิต ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 3.1 โดยค่า A1 และ B1 นำมาใช้กับช่วงแรก ส่วน A2 และ B2 นั้นใช้กับเวลาในช่วงที่สอง ซึ่ง A1 คือ ความสามารถในการรับแรงดันเกินภายในช่วงเวลา 1 วินาที สำหรับที่เวลามากกว่า 100 วินาที คุณลักษณะของกับดักฟ้าผ่าจะขึ้นความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของกับดักฟ้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการออกแบบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวของกับดักฟ้าผ่า
ชนิดออกไซด์โลหะ ประเภทติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ของบริษัท Ohio Brass [13]

Type : Design	MCOV ratings, kV	SI energy, kJ/MCOV	A1, kV/MCOV	B1	A2, kV/MCOV	B2	Ratio	TOV_{10} /MCOV
HD, PDV100	2.55-29	2.2	1.567	0.0216	1.608	0.0284	0.981	1.463
ND, PDV65	2.55-24.4	1.4	1.567	0.0216	1.608	0.0284	0.981	1.463
RP, PVR	2.55-29	3.4	1.458	0.0213	1.407	0.0131	0.955	1.326

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ B สามารถคำนวณได้จากการกำหนดให้ค่า α ของกับดักฟ้าผ่าเป็นค่าคงที่ และพลังงานที่กับดักฟ้าผ่าระบายออกจะมีค่าตามสมการที่ 3.3

$$W = kE_dI_AT \tag{3.3}$$

เมื่อ E_d และ I_A เป็นแรงดันและกระแสขณะกับดักฟ้าผ่าทำงาน, T เป็นเวลาทั้งหมดที่ทำงาน และ k เป็นค่าคงที่ โดยนำคุณลักษณะ V-I ของกับดักฟ้าผ่าในสมการที่ 3.4 แทนค่าลงในกระแส I_A ในสมการที่ 3.3 ได้สมการพลังงานตามสมการที่ 3.5

$$I_A = k_1E_d^{\alpha} \tag{3.4}$$

$$W = k_3TE_d^{1+\alpha} \tag{3.5}$$

ดังนั้นในช่วงแรกเวลาตั้งแต่ 0.01 – 100 วินาที จะได้ว่า

$$\frac{TOV_C}{MCOV} = (A_1)T^{(-\frac{1}{1+\alpha})} = (A_1)T^{-B_1} \tag{3.6}$$

จากสมการที่ 3.6 ถ้า α มีค่าเท่ากับ 50 จะได้ว่า $B_1 = 0.02$ สำหรับค่า Ratio ในตารางแสดงถึงอัตราส่วนของความสามารถในการรับแรงดันเกินชั่วคราวกรณี with prior energy ต่อกรณี no prior energy และ TOV_{10}/MCOV คือความสามารถในการรองรับแรงดันเกินชั่วคราวกรณี with prior energy ที่เวลา 10 วินาที ตามมาตราฐาน IEC 99-4 [19]

แรงดันเกินชั่วคราวจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์บางกรณีอาจมีขนาดสูงเกินกว่า 4.0 p.u. แต่หากมีกับดักฟ้าผ่าติดตั้งเพื่อป้องกันแรงดันเสิร์จกับสายเคเบิลใต้ดิน เสมือนกับการต่อทางไฟฟ้าแบบขนานกับตัวเก็บประจุ (C) โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับดักฟ้าผ่า หรือสายเคเบิลใต้ดินขณะเกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ต้องไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กของหม้อแปลง (transformer magnetizing inductance) ซึ่งอิมพีแดนซ์สมมูลมีค่าสูง (high equivalent impedance) เสมือนเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบอ่อน (weak source) ทำให้กระแสดีสชาร์จของกับดักฟ้าผ่าจึงมีค่าไม่สูงมาก เหมือนกับการต่อจากแหล่งจากแบบแข็ง (stiff source) หรือมีค่าอิมพีแดนซ์สมมูลต่ำ และแรงดันถูกควบคุมไว้ที่บริเวณจุดหักโค้ง (knee point) ของกราฟ V-I แต่กับดักฟ้าผ่าก็อาจได้รับความเสียหายได้หากเกิดขึ้นนานเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยขึ้นอยู่กับการระบายความร้อนของกับดักฟ้าผ่า และอุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นการพิจารณาความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวจากปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ โดยใช้ TOV capability curve ที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่พิกัดอาจทำให้เกิดความผิดพลาดมาก เนื่องจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์มีค่าอิมพีแดนซ์ค่าสูง และมีรูปคลื่นแรงดันแบบพัลส์ยอดแหลม (spiked waveshape) [20, 21]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย