

สมรรถนะทางไฟฟ้าของกัปกัดเล็รจชนิดพอร์ชเลนในระบบจำหน่าย 22 kV ภายใต้สภาวะ สิ่งเประอะเปื้อน

Electrical Performance of Porcelain Surge Arrester in 22 kV Distribution System under Polluted Conditions

วิเชษฐ ทัพย์ประเสริฐ^{1*} และ เสรี เลิศขมภู¹

^{1*}ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย 57120 E-mail: wichet_thip@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ - การปรับปรุงควมมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้ ของระบบด้วยอุปกรณ์ป้องกันจำนวนมาก รวมทั้งฉนวน รีเลย์และกัปกัดเล็รจ กัปกัดเล็รจเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันแรงดันเกินที่เกิดจากเล็รจฟ้าผ่าหรือสวิตชิ่งเล็รจของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในบทความนี้เป็นกรนำเสนอบทแบบจำลองกัปกัดเล็รจโดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะทางไฟฟ้าของกัปกัดเล็รจในระบบจำหน่าย 22 kV ภายใต้สภาวะสิ่งเประอะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 60507 จากผลการทดสอบที่ระดับแรงดันใช้งาน (12.7 kVrms) มีกระแสรั่วไหลที่น้อยกว่า 5 มิลลิแอมแปร์ ที่ระดับค่าความหนาแน่นของสิ่งเประอะเปื้อนที่สะสมตัวกับกัปกัดเล็รจ 0.47 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแบบจำลองสามารถจำลองกรทำงานของกัปกัดเล็รจโดยมีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าร้อยละ 5 ที่ระดับค่าความหนาแน่นของสิ่งเประอะเปื้อนที่สะสมตัวกับกัปกัดเล็รจ 0.47 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสรั่วไหลจากผลกระทบบของสิ่งเประอะเปื้อนที่บริเวณผิวของกัปกัดเล็รจ นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลในการนำไปใช้ในการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ของการใช้งาน พื้นที่ที่มีสภาพละอองเกลือปริมาณสูงความเร็วลมสูงและมีความชื้นสูง

คำสำคัญ - กัปกัดฟ้าผ่า, กระแสรั่วไหล, สิ่งเประอะเปื้อน

Abstract - Stability and reliability of distribution system are able to be improved by many protective devices including insulators, relay and surge arrester (SA). SA is used for protection of lightning and switching surge in Provincial Electricity Authority (PEA). This paper presents SA model by comparing test results to investigation of 22 kV distribution SA electrical performances under

pollution conditions according to IEC 60507. The experimental results of leakage currents less than 5 mA at Equivalent Salt Deposit Density (ESDD) 0.47 mg/cm² at nominal voltage. And the models can predict the operation of the metal oxide SAs in the system with error of less than 5% at ESDD = 0.47 mg/cm². This data will be useful to be guideline for solving problems and reducing power loss from leakage current on the surface of SAs as a result of surface dirt and pollution. Moreover, it will be useful to select or design suitable SAs for using in places with salt conditions, high rainfall, high wind speeds and high humidity

Keywords - Lightning Arrester, Leakage Current, Pollutions.

1. บทนำ

ความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ ระบบการฉนวนก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถช่วยส่งเสริมเสถียรภาพของการส่งจ่ายให้ดียิ่งขึ้น ถ้าได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม กัปกัดเล็รจเป็นอุปกรณ์ป้องกันชนิดหนึ่งที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ทำหน้าที่ป้องกันเล็รจที่เกิดจากเล็รจฟ้าผ่า(Lightning Surge) และสวิตชิ่งเล็รจ(Switching Surge) คุณสมบัติกรทำงานของกัปกัดเล็รจจะประกอบด้วยค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Resistance) ในสภาวะกรใช้งานปกติจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance) แต่เมื่อมีกระแสเล็รจเข้ามาในระบบเพิ่มมากขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลง (Low Impedance) เพื่อขจัดกระแสเล็รจที่เข้ามาในระบบลงสู่พื้นดิน ฉะนั้นแรงดันตกคร่อมกัปกัดเล็รจจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่

เป็นเชิงเส้นกับกระแส กับดักเล็กรังแยกออกเป็น 2 ชนิด แบบมีแกป (gap-silicon carbide : SiC) และไม่มีแกป (gapless-zinc oxide: ZnO หรือ metal oxide varistor: MOV arresters) [1]

การวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการทำงานที่ผิดพลาดของกับดักเล็กรัง จะมีค่าความผิดพลาดของกับดักเล็กรังโดยแยกออกเป็นสาเหตุ ดังนี้ [1]

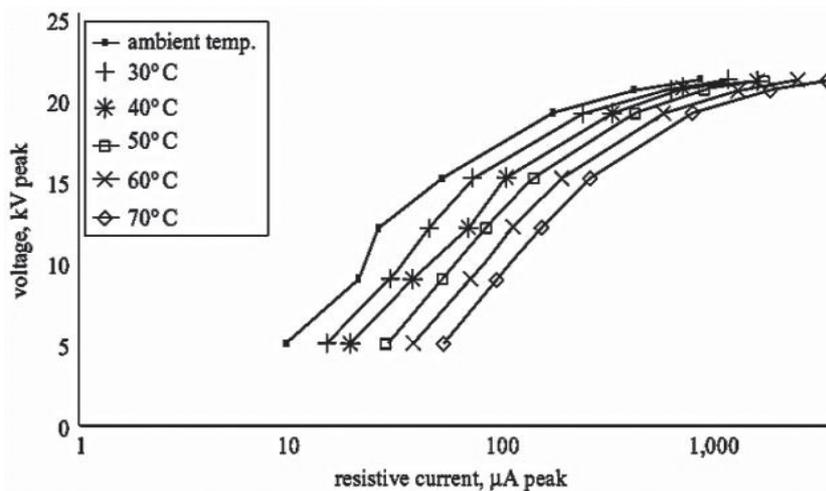
- | | |
|----------------------------|-------|
| 1. ความชื้นที่ซึมซับเข้าไป | 85.6% |
| 2. เล็กรัง | 5.9% |
| 3. คราบสกปรก | 4.5 % |
| 4. นำไปใช้ในทางที่ผิด | 2.5 % |
| 5. ไม่ทราบสาเหตุ | 1.5% |

สำหรับค่าความผิดพลาดที่ค่อนข้างน้อย ๆ หรือไม่ทราบสาเหตุ น่าจะมาจากการเปลี่ยนแปลงของระบบ เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุหลักแล้วแบ่งออกเป็นสาเหตุหลักๆ ได้เป็น 3 กรณี คือ 1) ความชื้นและความสกปรกต่าง ๆ 2) แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ 3) แรงดันเกินที่เกิดขึ้นนอกระบบ สิ่งประอะเปื้อนที่สะสมบนผิวกับดักเล็กรัง เช่นสิ่งประอะเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำทะเล ฝุ่นละออง หรือสารเคมีจากงานเกษตรกรรม สิ่งประอะเปื้อนดังกล่าวนี้มีการสะสมที่บริเวณผิวของกับดักเล็กรัง และมีความชื้นในระดับที่เหมาะสม ทำให้เกิดการพัฒนามเป็นชั้นฟิล์มความนำ การก่อรูปแบบเป็นชั้นฟิล์มความนำนั้น นำไปสู่การทำให้ส่งผลให้กับกับดักเล็กรังมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลให้ มีค่าสูงตามไปด้วย [2]

การทดสอบภายใต้สภาวะประอะเปื้อนทดสอบตามมาตรฐาน IEC, IEEE หรือ ANSI [3-5] โดยเป็นการทดสอบกับดักเล็กรัง ภายใต้สภาวะประอะเปื้อนไอเกลือ (Salt Fog Test) นั้น ได้มีการพัฒนาและดำเนินการทดสอบโดยความร่วมมือของประเทศ อังกฤษ ฝรั่งเศสและอิตาลี เนื่องจากมีสายส่งแรงสูงติดตั้งอยู่

บริเวณชายฝั่งทะเลเป็นจำนวนมากในการทดสอบจะใช้กับดักเล็กรังสะอาดพันด้วยสารละลายเกลือด้วยระยะห่างที่กำหนด ขณะเดียวกับการป้อนแรงดันการทดสอบคงที่ตามระดับแรงดันการใช้งานจริง ระดับความประอะเปื้อนจะพิจารณาจากปริมาณของเกลือที่มีในสารละลายผลการทดสอบ [6]

แบบจำลองของกับดักเล็กรังจะเป็นคุณลักษณะแรงดันและกระแส ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ตามรายละเอียดดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ค่ากระแสและแรงดันของกับดักเล็กรังชนิด MOV ในช่วงแรกจะเป็นการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในช่วงค่ากระแสต่ำๆ เมื่ออุณหภูมิรอบกับดักเล็กรังหรือพลังงานที่เข้ามาอยู่กับกับดักเล็กรังมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มขึ้นสูงขึ้นด้วย ลักษณะนี้จะทำให้กระแสที่ไหลในวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มขึ้นขนาดขึ้นซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนที่มากพอสมควรทีเดียว ถ้าอุณหภูมิมีค่าเกินกว่าความสามารถทางความร้อนของวาล์วอีลีเมนต์ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Thermal Runaway ขึ้นและจะทำให้กับดักเล็กรังเกิดความเสียหายได้ [7] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการทดสอบกับกับดักเล็กรังชนิดเทอร์ชเลนเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล และอุณหภูมิที่ระดับแรงดันใช้งานปกติของกับดักเล็กรังเนื่องจากสิ่งประอะเปื้อนภายใต้สภาวะไอเกลือ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60099-5 และ IEC 60507 [4,8]. และสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบการทำงานของกับดักเล็กรังจากการทดสอบ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาและลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟฟ้ารั่วไหล ในการทำความสะอาดอุปกรณ์ของระบบจำหน่ายหรือระยะเวลาการเปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า



รูปที่ 1 ผลของอุณหภูมิกับคุณลักษณะแรงดันและกระแสของกับดักเล็กรังชนิดเมทัลออกไซด์ [7]

2. กัปเดตักเสิร์จ

กัปเดตักเสิร์จ (Surge Arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่าและแรงดันเกินเสิร์จสวิตชิง ใช้ป้องกันอุปกรณ์สำคัญและราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้ารีแอ็กเตอร์ หรืออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นต้น กัปเดตักเสิร์จจะต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันคือ ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับกราวด์

กัปเดตักเสิร์จจะประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Resistors: R_{non}) กัปเดตักเสิร์จที่ใช้ป้องกันในระบบจำหน่ายโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

2.1 ประเภทมีช่องว่างอากาศ

ประเภทมีช่องว่างอากาศ (Gap Type, Passive Gap, Active Gap) คือกัปเดตักเสิร์จชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) จะมี สปราร์กแกป ต่ออนุกรมกับความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 2 สปราร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันพิคคของกัปเดตักเสิร์จทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้กระแสไหลผ่านลงดินในขณะที่ใช้แรงดันปกติอันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันเกินเสิร์จสปราร์กแกปจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้ เกิดเบรกดาวนผ่านแกป แรงดันที่กัปเดตักเสิร์จเกิดเบรกดาวนเรียกว่าแรงดันสปราร์กผ่าน (Sparkover Voltage) เมื่อเกิดสปราร์กผ่านแล้วแรงดันที่คร่อมกัปเดตักเสิร์จจะลดลง จะเป็นแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกัปเดตักเสิร์จเรียกว่าแรงดันคงค้าง (Residual Voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ[1]

2.2 ประเภทไม่มีช่องว่างอากาศ

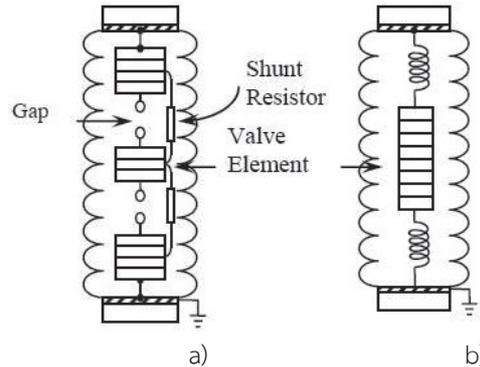
ประเภทไม่มีช่องว่างอากาศ (Gapless Type) แสดงในรูปที่ 2 คือกัปเดตักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ (Metal Oxide: MO) หรือออกไซด์สังกะสี (Zinc Oxide: ZnO) ใช้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นทำจากซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกัน บรรจุในกระบอกฉนวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งซิงค์ออกไซด์เป็นตัวกำหนดขนาดกระแสหรือพลังงานเสิร์จที่ยอมให้ผ่าน ส่วนความสูง h เป็นตัวกำหนดแรงดัน[1] ดังแสดงในรูปที่ 3 a) สาร ZnO มีความต้านทานจำเพาะน้อย แต่สารเคลือบรอบนอก ZnO ดังรูปที่ 3 b) จะมีความต้านทานจำเพาะสูงถึง 10^{10} และมี [1] และโครงสร้างหุ้มติดตั้งของกัปเดตักชนิดออกไซด์โลหะนี้มักทำจากพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 3 c) ข้อได้เปรียบกว่าชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ คือสามารถกำจัดกระแสตาม (Follow Current) ดังแสดงในรูปที่ 4 ที่เกิดขึ้นหลักจากกระแสอิมพัลส์ (Impulse Current) ได้ดีกว่าอีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและทนทานต่อสภาวะ

แวดล้อมดีกว่าประกอบด้วย Non – Linear Resistor ซึ่งเป็นออกไซด์โลหะที่ทำมาจากซิงค์ ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO)

กัปเดตักเสิร์จสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE [9] ได้ 3 ประเภทดังนี้

1) กัปเดตักเสิร์จแรงดันระบบจำหน่าย ใช้สำหรับระบบจำหน่ายสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ แบบใช้งานหนัก ใช้งานปกติ และใช้งานเบา

2) กัปเดตักเสิร์จสำหรับระบบแรงดันสูงและแรงดันสูงพิเศษ ใช้สำหรับในระบบระหว่าง HV และระบบ EHV



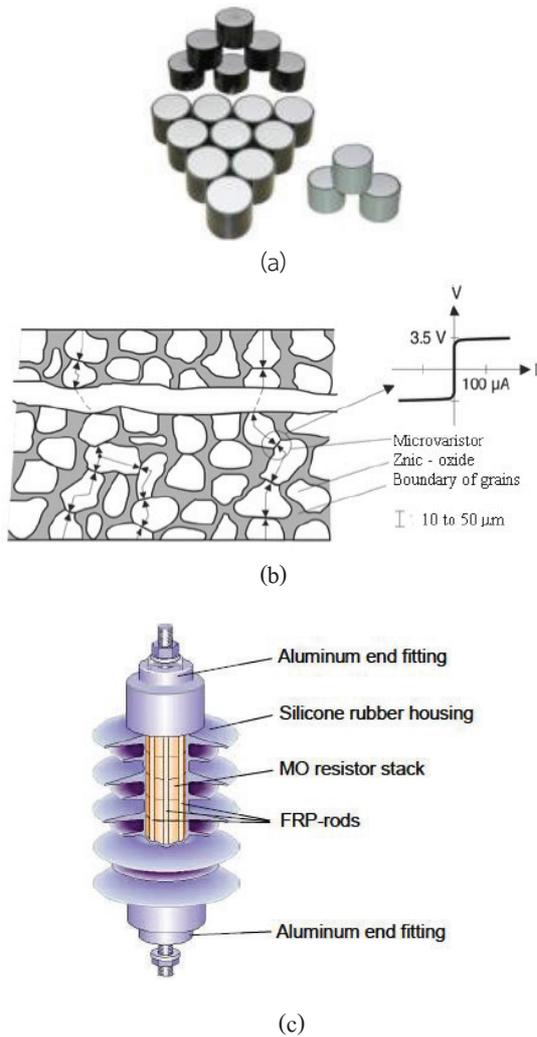
รูปที่ 2 ประเภทของกัปเดตักเสิร์จ a) ชนิดมีช่องว่างอากาศ(SiC) และ b) ไม่มีช่องว่างอากาศ (MO) [9]

3) กัปเดตักเสิร์จสำหรับสถานีไฟฟ้าในระบบแรงดันสูงและแรงดันสูงพิเศษใช้สำหรับระบบ HV และ EHV

3. การทำงานกัปเดตักเสิร์จ

การเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง SiC กับ MOV จากรูปที่ 5 นั้น จะเห็นได้ว่าที่ระดับกระแสในช่วง 1000 A ขึ้นไป คุณสมบัติของทั้งสองจะคล้ายคลึงกันแต่จะแตกต่างกันอย่างมากในช่วงค่ากระแสต่ำๆ ที่แรงดันระบบ SiC จะนำกระแสขนาดเป็นร้อยแอมแปร์ส่วน MOV จะนำกระแสเพียงขนาดเป็นมิลลิแอมแปร์เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ก็จะเห็นว่าความจำเป็นในการใช้ช่องว่างอากาศสำหรับต่ออนุกรมกับ MOV นั้นแทบจะไม่มีเลย ข้อควรพิจารณาในการใช้กัปเดตักเสิร์จแบบ MOV คือเรื่องของความร้อนโดยรอบซึ่งจะสังเกตได้จากรูปที่ 5 V-I Curve ของ MOV จะเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในช่วงค่ากระแสต่ำๆ เมื่ออุณหภูมิรอบกัปเดตักเสิร์จหรือพลังงานที่เข้ามายังกัปเดตักเสิร์จมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นด้วย ลักษณะนี้จะทำให้กระแสที่ไหลในวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มขนาดขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนที่มากพอสมควรทีเดียว ถ้าอุณหภูมิมีค่าเกินกว่าความสามารถทางความร้อนของวาล์วอีลีเมนต์ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า

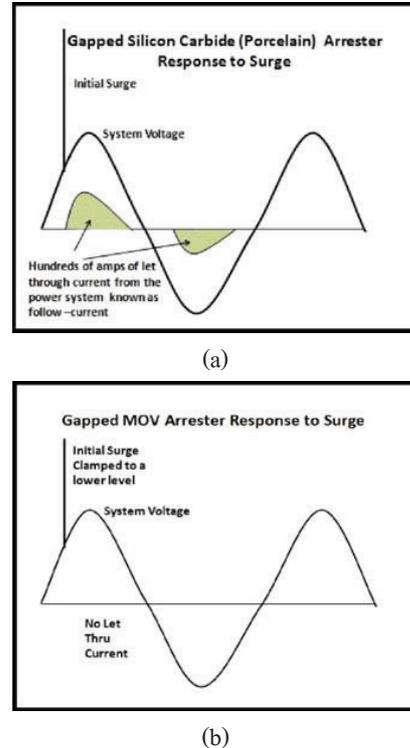
Thermal Runaway ขึ้นและจะทำให้กับดักเล็กรเกิด ความเสียหายได้ [6,10]



รูปที่ 3 โครงสร้างของกับดักเล็กรชนิด ZnO [9-10]

การเกิดดีสชาร์จบางส่วน เมื่อบริเวณพื้นผิวของกับดักเล็กรที่มีการสะสมของคราบสิ่งสกปรกและสิ่งเจือปนต่าง ๆ เปรอะเปื้อน เหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบโดยจะเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นจากละอองน้ำ หมอก หรือฝนที่ตกเบา ๆ จึงทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ที่เปียกและกลายเป็นคราบสกปรกที่เกาะอยู่ตามผิวของกับดักเล็กร สิ่งเประเปื้อนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นบนของกับดักเล็กร ดังนั้นกระแสจึงสามารถไหลผ่านไบบนผิวนวนของกับดักเล็กรจะหว่างด้านที่ต่อกับแหล่งจ่ายแรงสูงและด้านที่ต่อดินเรียกว่ากระแสรั่ว เมื่อสิ่งเประเปื้อนสะสมอยู่เป็นปริมาณมากจึงทำให้ค่าความต้านทานต่ำลงเป็นสาเหตุให้กระแสรั่วที่เกิดขึ้นบนผิวของกับดักเล็กรมีค่าสูงขึ้น เมื่อของกับดักเล็กรสูญเสียความชื้นเนื่องจากความร้อนของกระแสรั่ว ซึ่งทำให้เกิดแถบแห้งเล็ก ๆ ในหลายพื้นที่ การไหลของ

กระแสรั่วจึงถูกขัดขวางส่งผลให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีค่าความต้านทานที่สูงมาก เมื่อพื้นที่แถบแห้งเล็ก ๆ มีความเครียดทางไฟฟ้าสูงขึ้น บริเวณพื้นที่ดังกล่าวจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเรียกว่าปรากฏการณ์ไอออไนเซชัน (Ionization)

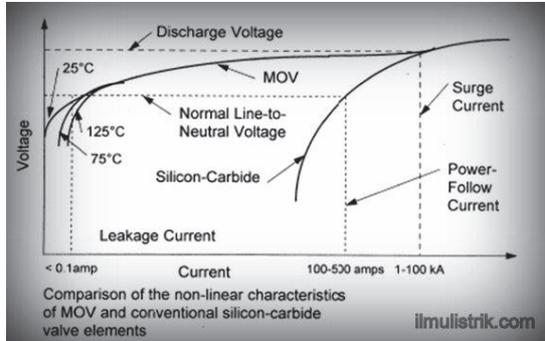


รูปที่ 4 เปรียบเทียบลักษณะการทำงานของกับดักเล็กร a) SiC b) ZnO [10]

ทำให้อากาศกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อพลังงานสะสมมีมากพอจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงของประกายไฟขึ้นที่บริเวณแถบแห้งที่กระจายตัวอยู่บนผิวนวน เรียกว่าการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD) เมื่อดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นบนผิวของกับดักเล็กรเชื่อมต่อกันจะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว (Flashover) ตกคร่อมตลอดผิวของกับดักเล็กร ส่งผลให้พื้นที่บริเวณนั้นมีความร้อนสูงขึ้นตามระดับความรุนแรงของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนและวาบไฟตามผิวจนทำให้ผิวของกับดักเล็กรไม่สามารถทนได้ จึงเกิดเป็นร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟ (Tracking) การเกิดร่องผิวเสื่อมสภาพจากวาบไฟมีส่วนประกอบของคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการขยายตัวของวาบไฟตามผิว เนื่องจากคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า [7,9-10]

ประสิทธิภาพการทำงานของ กับดักเล็กรโลหะออกไซด์ภายใต้สภาวะสิ่งเประเปื้อนต้องคำนึงถึงมิติด้านที่แตกต่างกันคือความแข็งแรงของฉนวนกันความร้อนภายนอกคือผลกระทบของการไอออไนเซชัน ภายในที่สามารถส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน

ของวาริสเตอร์ ความเครียดความร้อนในส่วนที่ใช้งานภายใน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลตามลักษณะการทำงานของ กับดักเล็กรังซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับ พลังงานของกับดักเล็กรังและอาจนำไปเป็นเงื่อนไขในการทำงาน ของกับดักเล็กรัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่จะเกิดความร้อน ความเครียด ในกับดักเล็กรังภายใต้สภาวะสิ่งประอะเปื้อน



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวาล์วอีลีเมนต์ที่ทำจาก SiC และ MOV [9]

คุณลักษณะของแรงดันและกระแสกับดักเล็กรัง โดยพิจารณา จากค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งชนิด ZnO และ SiC ที่มี ลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถนำมาเขียนอยู่ในรูปสมการคือ

$$I = kU^\alpha \quad (1)$$

เมื่อ α คือค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของ R_{non}

$\alpha = 4-6$ สำหรับ SiC

$\alpha = 20-50$ สำหรับ ZnO

k คือค่าคงตัวขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของเกรน R_{non}

ถ้าเกรนยิ่งเล็กความคงทนต่อแรงดันยิ่งสูงขึ้น [1]

พลังงานที่กับดักเล็กรังดูดซับได้ระหว่างเกิดแรงดันเกินโดยไม่ เกิดความเสียหาย เรียกว่า “ความสามารถในการรับพลังงาน (Energy handling capability หรือ Energy withstand capability)” ซึ่งอยู่ในเทอมกิโลจูลต่อกิโลโวลต์ (kJ/kV) ที่แรงดัน ทำงาน ต่อเนื่องสูงสุด (Maximum Continuous Operating Voltage: MCOV)

ตารางที่ 1 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของกับดักเล็กรังผลิตภัณฑ์ต่างๆ

| ผลิตภัณฑ์ | พิกัดแรงดัน (กิโลโวลต์) | กระแสดีเอสอาร์เอม (กิโลแอมแปร์) | พลังงาน (กิโลจูลต่อกิโลโวลต์) | ผู้ผลิต |
|-----------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------|
| LAZ-P21 | 21 | 5 | 1.4 ที่พิกัดแรงดัน | PRECISE |
| LAZ-P24-1 | 24 | 10 | 3.1 ที่พิกัดแรงดัน | PRECISE |
| 3ES2 D-E | 156 | 20 | 10 ที่พิกัดแรงดัน | SEIMENS |
| 3ES5-H | 444 | 20 | 13 ที่พิกัดแรงดัน | SEIMENS |
| RVLQD | 3 - 198 | 10 | 4.5 ที่พิกัดแรงดัน | TOSHIBA |

หรือที่แรงดันพิกัด (Duty cycle) เพราะพลังงานที่กับดักเล็กรังดูดซับขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และ ช่วงเวลาของแรงดันเกินที่เกิดขึ้น ซึ่งบริษัทผู้ผลิตจำเป็นต้องให้ข้อมูลการดูดซับพลังงานของกับดักเล็กรังดังแสดงในตารางที่ 1 แต่ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสำหรับการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการดูดซับพลังงานของกับดักเล็กรัง พลังงานที่กับดักเล็กรังดูดซับสามารถประมาณได้โดยใช้สมการที่ 2 [9]

$$J = \frac{D_L E_A I_A}{v} \quad (2)$$

เมื่อ

J คือ พลังงานที่กับดักเล็กรังดูดซับ (กิโลจูล)

E_A คือ แรงดันดีเอสอาร์เอม (กิโลโวลต์)

I_A คือ กระแสดีเอสอาร์เอม (กิโลแอมแปร์)

D_L คือ ความยาวของสาย (กิโลเมตร)

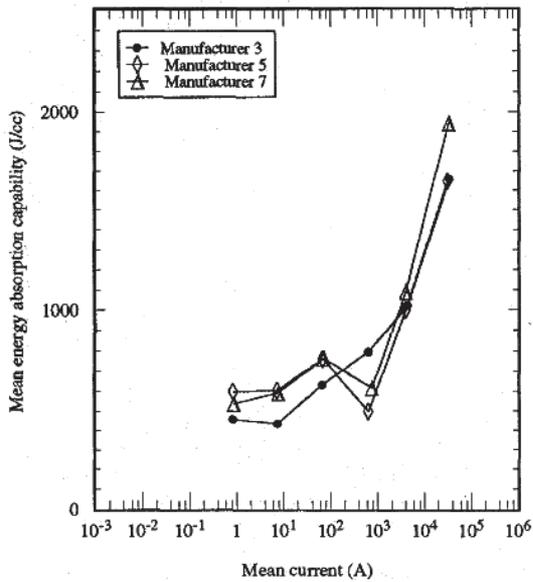
v คือ ความเร็วแสง 300 กิโลเมตร/มิลลิวินาที

และพบว่ากับดักเล็กรังที่ทดสอบตามมาตรฐาน IEEE, IEC และ CAN/CSA-C กระแสทดสอบจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0008 - 35 กิโลแอมแปร์ (ค่ายอด) ซึ่งมีค่าพลังงานของกระแสทดสอบตาม ตารางที่ 2 และรูปที่ 6 [11]

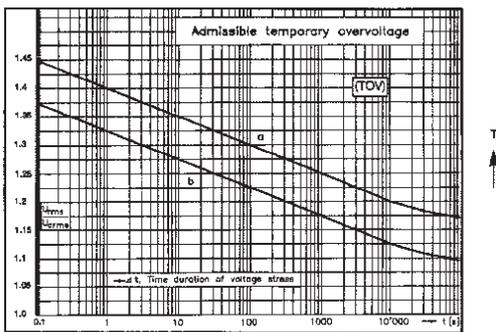
4. สมรรถนะทางไฟฟ้าของกับดักเล็กรัง

กับดักเล็กรังแบบ MOV สามารถที่จะทำงานในช่วงเวลาจำกัดที่แรงดันความถี่กำลังซึ่งมีขนาดมากกว่าพิกัดแรงดันต่อเนื่องสูงสุดที่ความถี่กำลัง ขนาดของแรงดันเกินซึ่ง MOV สามารถที่จะทนอยู่ได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาซึ่งแรงดันเกินปรากฏอยู่ ดังรูปที่ 7 พิจารณา ค่า TOV ของกับดักเล็กรังให้มีค่าที่เหมาะสม จะต้องทำการหาค่า TOV สูงสุดของระบบกำลังร่วมกับค่าเวลาสูงสุดซึ่งระบบจะต้องทำงานในสภาวะแรงดันที่ไม่ปกติสภาวะแรงดันที่ไม่ปกตินี้เป็นผลมาจากหลาย ๆ องค์ประกอบซึ่งได้แก่ แรงดันเกินบนเฟสที่ไม่เกิดฟอลต์ในระหว่างการเกิดฟอลต์แบบเฟสกับดิน แรงดันเกินการ

สัปสวิดซ์ และเฟอโรโรเซอแมนซ์ เป็นต้น เพื่อความปลอดภัยในการออกแบบ ควรเลือกใช้เส้นกราฟ b ในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเฉลี่ยกับความสามารถในการดูดซับพลังงานเฉลี่ยของกัปกัดเล็กร [11]



รูปที่ 7 ความคงทน T (TOV factor) ในเทอมเวลาของ TOV [1]
 a) สำหรับกัปกัดที่ไม่มีเคย์โหลด (for arrester without preload)
 b) สำหรับกัปกัดที่มีเคย์โหลด (for arrester with preload)

เพราะกัปกัดเล็กรโดยทั่วไปจะผ่านการดิสชาร์จมาบ้างแล้ว [1] เมื่อกัปกัดเล็กรแบบ MOV ได้รับพลังงานเข้ามา จะทำให้วาล์วอีลีเมนต์ของกัปกัดเล็กรดูดซับพลังงานซึ่งเป็นผลให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติวาล์วอีลีเมนต์จะมีความสมดุลระหว่างความร้อนที่สร้างขึ้นโดย วาล์วอีลีเมนต์และความร้อนซึ่งแพร่กระจายออกไปจากกัปกัดเล็กร โดยการนำ การพา และการแผ่รังสี เป็นผลให้กัปกัดเล็กรยังคงรักษาเสถียรภาพในการทำงานได้แรงดันเกินคือเหตุการณ์ที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพในการทำงานดังกล่าวเสียไปโดยที่ จะทำให้วาล์ว อีลีเมนต์ดูดซับพลังงานในระดับที่สูงขึ้นภายในช่วงเวลาที่ยังอยู่ในระบบอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ วาล์วอีลีเมนต์ความหนาแน่นของพลังงาน

ภายในวาล์วอีลีเมนต์เป็นแบบ Non-Uniform จะเป็นสาเหตุให้เกิดเกรเดียนต์ (Gradient) ของอุณหภูมิและจะทำให้เกิดการแตกตัวของวาล์วอีลีเมนต์หรือเกิดการเจาะทะลุได้ เหตุการณ์ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าการเพิ่มขึ้นของแรงดันทั้งหมดของวาล์วอีลีเมนต์ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด Thermal Runaway พลังงานที่กัปกัดเล็กรสามารถที่จะดูดซับระหว่างการเกิดแรงดันเกินโดยที่ไม่ทำให้กัปกัดเล็กรเสียหายนั้นเรียกว่า “Energy Handling Capability” หรือ “Energy Withstand Capability” ความสามารถนี้จะกำหนดอยู่ในหน่วย กิโลจูลต่อกิโลวัตต์ของ MCOV หรือต่อกิโลวัตต์ของพิกัดแรงดันทำงาน เนื่องจากว่า Energy Handling Capability ขึ้นอยู่กับรูปแบบของแรงดันเกินที่กำหนด (ขนาด รูปร่างของคลื่น และช่วงเวลา) Energy Handling Capability ไม่สามารถที่จะกำหนดด้วยค่าเดียว ความสามารถของกัปกัดเล็กรในการดูดซับพลังงานนั้นมีความสัมพันธ์กับคุณภาพและปริมาณของวัสดุที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างของวาล์วอีลีเมนต์แสดงในรูปที่ 8 [12]

ตารางที่ 2 พลังงานของกระแสทดสอบ [11]

| กระแสทดสอบ (กิโลแอมแปร์ (ค่ายอด)) | ค่าเฉลี่ยของพลังงาน (จูล/ลูกบาศก์เซนติเมตร) |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|
| 0.0008 (ต่ำสุด) | 400 – 600 |
| 35 (สูงสุด) | 1600 – 2000 |

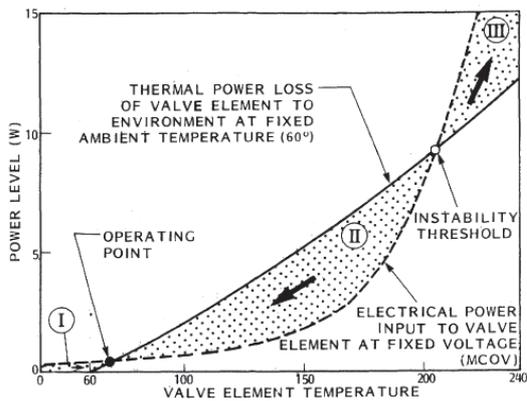
จากการดูดซับพลังงานมากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้กัปกัดเล็กรเข้าไปอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า Thermal Runaway ซึ่งเป็นสภาวะที่ความร้อนที่สร้างขึ้นมีค่ามากกว่าความร้อนที่กระจายออกไปเป็นสาเหตุให้วาล์วอีลีเมนต์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิของวาล์วอีลีเมนต์มีค่าในระดับที่สูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับวาล์วอีลีเมนต์ได้และผลที่ตามมาคือเกิดการเบรกดาวน์ทางไฟฟ้าขึ้นและการทำงานของกัปกัดเล็กรก็จะล้มเหลวถ้าความหนาแน่นของพลังงานมีค่าสูงพอหรือถ้าการกระจายเสถียรภาพทางความร้อนของซิงค์ออกไซด์ เป็นผลกระทบจากอุณหภูมิและความสามารถในการระบายความร้อน ความเสื่อมโทรมของแรงกระตุ้นและอายุที่จะได้รับเสถียรภาพทางความร้อน การกระจายพลังงานไฟฟ้าในองค์ประกอบจะต้องสมดุลกับความร้อนออกไปยังสภาพแวดล้อม เมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นกระแสรั่วไหลยังคงมีการเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหล อุณหภูมิที่เกินระดับอุณหภูมิ MOV ความต้านทานภายในของกัปกัดเล็กรเริ่มย่อยอ่อนและอุปกรณ์เปิดเมื่อแรงดันไฟฟ้าจะลดลง

5. การหาค่าความหนาแน่นสะสมเทียบเท่าสิ่งเปรอะเปื้อน (EQUIVALENT SALT DEPOSIT DENSITY: ESDD)

5.1 การคำนวณหาค่าระดับความเปรอะเปื้อน

วิธีการที่ใช้วัดระดับสิ่งเปรอะเปื้อนโดยวิธีหาค่า ESDD จะแบ่งสิ่งเปรอะเปื้อนออกเป็น 2 ชนิด คือสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำได้ และสิ่งเปรอะเปื้อนที่ละลายน้ำไม่ได้ สารละลายที่เป็นสิ่งเปรอะเปื้อนที่นำมาจากผิวกับดักเสิร์จและคำนวณค่าเทียบเท่ากับจำนวนของเกลือ (NaCl) ที่มีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับขั้นตอนการเก็บสิ่งเปรอะเปื้อน โดยนำน้ำกลั่นที่จำนวนที่แน่นอนใส่ลงไปใน Beaker นำสิ่งเปรอะเปื้อนจากผิวกับดักเสิร์จโดยการเขย่าด้วยฝ่าที่ดูดความชื้นหรือใช้แปรงนำผ้าที่ใช้เช็ดผิวกับดักเสิร์จใส่ใน Beaker ดังแสดงตามรูปที่ 9

สิ่งเปรอะเปื้อนจะถูกทำให้ละลายในน้ำโดยการเขย่าและปิดฝ้าที่ใช้เช็ดผิวในน้ำที่ Beaker การเขย่าผิวกับดักเสิร์จจะถูกกระทำซ้ำจนกระทั่งไม่เหลือสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวกับดักเสิร์จจำนวนน้ำกลั่นที่จะใช้ขึ้นอยู่กับพื้นผิวและระดับสิ่งเปรอะเปื้อน โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 100 - 500 ซีซี แต่อาจจะใช้ ถึง 1000 - 2000 ซีซี ในกรณีของสิ่งเปรอะเปื้อนมีขนาดใหญ่เป็นชนิดละลายน้ำได้น้อยปกติแล้วค่าความนำทางไฟฟ้าของน้ำกลั่นจะน้อยกว่า 5 $\mu\text{s}/\text{cm}$



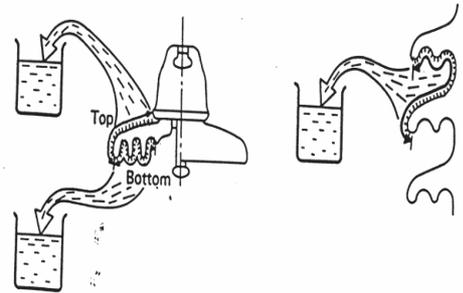
รูปที่ 8 การประเมินสมรรถนะของกับดักเสิร์จในสภาวะคงตัวโดยใช้คุณลักษณะทางความร้อน [12]

ตารางที่ 3 ค่าความเปรอะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 60507 [8]

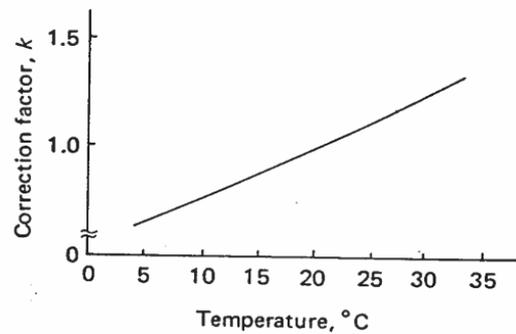
| ค่า ESDD mg/cm^2 | ระดับความรุนแรงของสิ่งเปรอะเปื้อน |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 0-0.03 | สะอาด หรือน้อยมาก |
| 0.03-0.06 | เล็กน้อย |
| 0.06-0.1 | ปานกลาง |
| >0.1 | รุนแรง |

ถ้าความนำทางไฟฟ้าของน้ำกลั่นสูง ก็จะใช้ตัวประกอบแก้ไขสำหรับความนำไฟฟ้าเริ่มต้นของน้ำ การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD สามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับระดับความต้องการ

ความถูกต้องของค่า ESDD แต่วิธีที่นิยมมี 2 วิธีคือ การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD โดยวิธีความสัมพันธ์ตาม Correction factor (k) และการคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD ตามมาตรฐาน IEC [12]



รูปที่ 9 วิธีการล้างลูกถ้วยเพื่อหาค่าสิ่งเปรอะเปื้อน [13]



รูปที่ 10 แพคเตอร์การแก้ไขอุณหภูมิของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ [13]

5.1.1 การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD โดยวิธีความสัมพันธ์ตาม Correction factor (k)

เมื่อทำการวัดความนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำที่มีส่วนผสมของสิ่งเปรอะเปื้อน การวัดความนำไฟฟ้าของน้ำจะต้องเป็นความนำไฟฟ้าที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสโดยความสัมพันธ์ตาม Correction factor (k)

$$\sigma_{20} = \frac{\sigma_t}{k} \tag{3}$$

เมื่อ ค่า k คือ ตัวประกอบแก้ไขตามรูปที่ 10 หรือสามารถคำนวณได้จากสมการ(4) [13]

$$k = \left(\frac{1}{1.046} \right) \left(1 + 0.0226(t-18) + 0.000084(t-18)^2 \right) \tag{4}$$

เมื่อ

σ_{20} = ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

σ_t = ค่าความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิ t องศาเซลเซียส ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

t = อุณหภูมิของสารละลาย (องศาเซลเซียส)

5.1.2 การคำนวณและวิเคราะห์หาค่า ESDD ตาม IEC 60507[8]

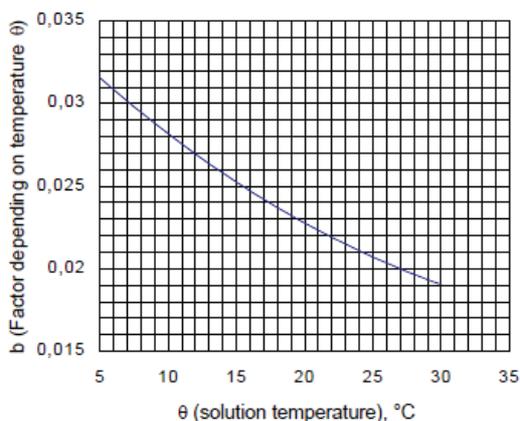
$$\sigma_{20} = \sigma_t [1 - b(t - 20)] \quad (5)$$

และค่า factor b หาค่าได้จากรูปที่ 11 หรือหาค่าได้จากสมการ (6)

ตารางที่ 4 ค่าตัวประกอบแก้ไขที่ใช้ในการหาค่า ความนำไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่อุณหภูมิต่าง ๆ [8]

| θ (องศา) | σ |
|------------------|----------|
| 5 | 0.03156 |
| 10 | 0.02817 |
| 20 | 0.02277 |
| 30 | 0.01905 |

หมายเหตุ ในกรณีที่ค่าอุณหภูมิของสารละลายไม่ได้ระบุไว้ในตารางแต่ค่าอุณหภูมิดังกล่าวยังอยู่ในช่วง 5 องศาเซลเซียสถึง 30 องศาเซลเซียสค่าตัวประกอบแก้ไข σ สามารถหาได้โดยวิธีการประมาณในช่วง (Interpolation)



รูปที่ 11 ค่าโดยประมาณในการหาค่าตัวประกอบ b (factor b) [13]

$$b = -3.200 \times 10^{-8} t^3 + 1.032 \times 10^{-5} t^2 - 8.272 \times 10^{-4} t + 3.544 \times 10^{-2} \quad (6)$$

5.1.3 หาค่าความเค็ม (Salinity: S_a (kg/cm³)) สมการ (7) [8]

$$S_a = (5.7 \times \sigma_{20S/m})^{1.03} = (5.7 \times \sigma_{20 \mu S/cm} \times 10^{-4})^{1.03} \quad (7)$$

5.1.4 คำนวณหาค่า ESDD ที่ผิวกับดักเสิร์จตามสมการ [8]

$$ESDD = \frac{S_a \times V}{A} \quad (8)$$

เมื่อ

ESDD = Equivalent Salt Deposit Density (mg/cm²)

V = ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ (cm³)

S_a = ความเข้มข้นของสารละลายเปอร์อะซิออนเทียบเท่าเกลือ (kg/m³ = mg/cm³)

A = พื้นที่ผิวของกับดักเสิร์จที่พิจารณา (cm²)

6. การทดสอบและผลการทดสอบ

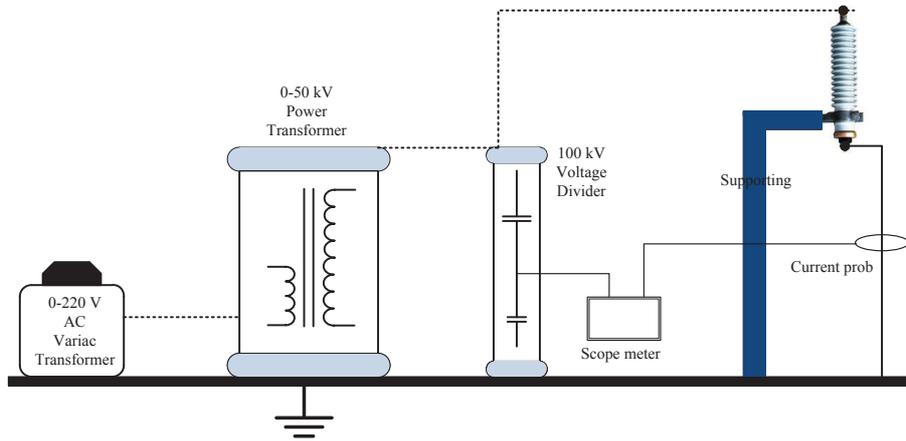
6.1 การทดสอบ

กับดักเสิร์จชนิดพอร์ซเลน แบบเมทัลลอคัทซ์ ที่ใช้ในระบบจำหน่าย 21 kV 17 kV(MCOV) รายละเอียดแสดงตารางที่ 5 การหาพื้นที่ผิวของกับดักเสิร์จเพื่อหาค่าความหนาแน่นสะสมเทียบเท่าสิ่งเปอร์อะซิออนโดยใช้โปรแกรม Solid works ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวของกับดักเสิร์จ

ตารางที่ 5 ข้อมูลของกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A

| Arrester type (10kA) | Rated voltage (kV) | MCOV (kV) | High (cm) | Diameter (cm) |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|---------------|
| ผลิตภัณฑ์ A | 21 | 17.0 | 45 | 8 |

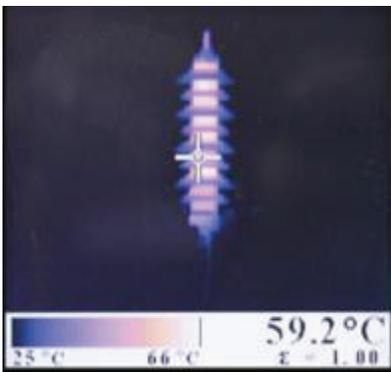
กับดักเสิร์จที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นกับดักเสิร์จชนิดเมทัลลอคัทซ์ ผลิตภัณฑ์ A เป็นกับดักเสิร์จขนาดพิกัดขนาดพิกัดแรงดันใช้งาน 21 kV 17 kVrms (MCOV) ความสูง 251 mm โดยทำการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง อาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย และทำการทดสอบในวงจรตามรูปที่ 12 หม้อแปลงกำลังขนาด 50 kV บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลโดยออสซิลโลสโคปผลิตภัณฑ์ของฟลู๊ก (190B Scope Meter Series: Fluke) และ the Agilent N2775A power supply



รูปที่ 12 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

and the N2780A/81A) และทำการถ่ายภาพความร้อนด้วยผลิตภัณฑ์ของฟลูค Fluke Ti25 ทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ IEC 60507 และ IEC 60099-4 ปรับระดับแรงดันใช้งาน 17.96 kVpeak ระยะเวลาการทดสอบนาน 4 ชั่วโมงบันทึกผลการทดสอบทุก ๆ ระยะเวลา 15 นาที อุณหภูมิห้องขณะทำการทดสอบ 32.6 องศาเซลเซียส ความชื้นความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 58 และที่ความดันบรรยากาศ 976 mbar ในรูปที่ 13 เป็นภาพถ่ายความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนเมื่อทำการทดสอบกับดักเสิร์จแรงดันใช้งาน 17.96 kVpeak

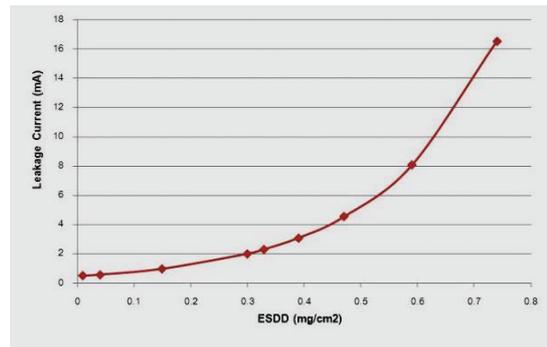
จากผลการทดสอบกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A ตามตารางที่ 6 และได้กราฟความสัมพันธ์ค่ากระแสและค่าแรงดันของกับดักเสิร์จในสภาวะช่วงเริ่มต้น (TOV) ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 ภาพถ่ายความร้อนของกับดักเสิร์จ ทดสอบที่ระดับแรงดัน 18 kV

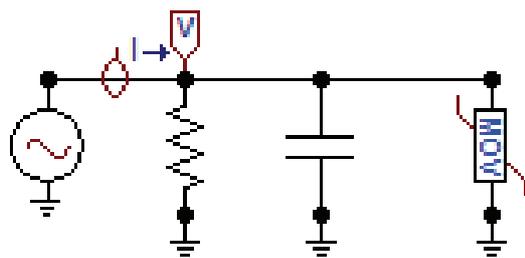
6.2 แบบจำลองกับดักเสิร์จภายใต้สภาวะสิ่งประอะเปื้อน

แบบจำลองกับดักเสิร์จแสดงในรูปที่ 14 ที่อ้างอิงตามข้อเสนอแนะจาก IEEE [14]



รูปที่ 14 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A เป็นกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์แบบพอร์ซเลนในสภาวะสิ่งประอะเปื้อน

และแบบจำลองของพินเซติ (Pinceti model) [15] ในแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ในระบบจำหน่าย 22 kV ในสภาวะ TOV ที่นำเสนอเป็นการจำลองโปรแกรม ATP-EMTP ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า ค่าความต้านทาน ค่าคาปาซิเตอร์ และ เมทัลออกไซด์วาริสเตอร์ MOV TYPE 92 โดยที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่กำลัง (50 Hz)



รูปที่ 15 แบบจำลองกับดักเสิร์จ

```

C:\PROGRA~1\ATP\tools\runATP.exe
Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same
as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : 12700.  .300367E-3
Times of maxima : 0.0  .1E-5
Variable minima : 12078.4178  -.00555745
Times of minima : .1E-2  .1E-2

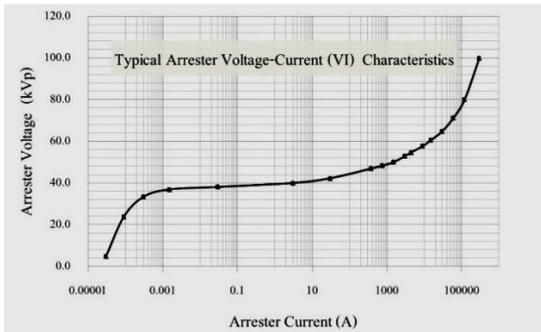
Blank card terminating all plot cards.
Actual List Sizes for the preceding solution follow. 05-May-15 22:26:30
Size 1-10: 3 2 2 1 1 7 0 1 15
Size 11-20: 0 2 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
Size 21-30: 0 0 2 1 -9999 1 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.016 0.000 0.016 -- <CP: Wait; Real>
Seconds for overlays 6-11 : 0.016 0.000 0.016
Seconds for overlays 12-15 : 0.000 0.000 0.000
Seconds for time-step loop : 0.016 0.000 0.016
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
-----
Totals : 0.047 0.000 0.047

ATP Finished at 22:26:30 on Tuesday, 05 May 2015
Total Execution Time was 0.06 cpu seconds

Hit any key to close this window.

```

รูปที่ 17 ผลการจำลองแบบจำลองกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A 12.7 kVrms มีค่ากระแสรั่วไหล 0.308 mA.



รูปที่ 16 คุณสมบัติแรงดันและกระแสของกัสดักเสิร์จจากบริษัทผู้ผลิต [16]

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการที่ระดับแรงดัน 12.7 kVrms

| ESDD (mg/cm ²) | I (mA) |
|----------------------------|--------|
| 0.01 | 0.21 |
| 0.04 | 1.04 |
| 0.15 | 1.20 |
| 0.30 | 1.64 |
| 0.33 | 2.58 |
| 0.39 | 4.63 |
| 0.47 | 5.04 |
| 0.59 | 6.23 |
| 0.74 | 14.85 |

ขนาดแรงดันทดสอบเป็นกิโลโวลต์ ค่าคาปาซิเตอร์ของแบบจำลองที่ความจุ 4.75 nF [1] ซึ่งในลักษณะการติดตั้งใช้งานจริงกับดักเสิร์จในสภาวะปกติเสมือนเป็นคาปาซิเตอร์เมทัลลอล็อกซ์ควาสิเตอร์ MOV TYPE 92 เป็นคุณลักษณะค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของกัสดักเสิร์จจากบริษัทผู้ผลิตอ้างอิงตามรูปที่ 16

โดยกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงที่ระดับแรงดันใช้งาน 17.96 kVpeak (ในระบบ 22 kV_{L-L}) ดังรูปที่ 16 และ 17 ค่าความต้านทานที่ต่อขนานกับคาปาซิเตอร์และเมทัลลอล็อกซ์ควาสิเตอร์เป็นค่าความต้านทานที่ต้านการไหลของกระแสในสภาวะของ TOV ซึ่งหาได้ตามตารางที่ 7 โดยที่ค่ากระแส (I) ขึ้นอยู่กับค่า ESDD ตามสมการที่ (9)

$$I = 0.468 \times e^{4.831 \times ESDD} \quad (\text{mA}) \quad (9)$$

6.3 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบกับดักเสิร์จชนิดพอร์ซเลนในระบบจำหน่ายภายใต้สภาวะสิ่งเปื้อนในห้องปฏิบัติการได้แสดงดังในรูปที่ 13 และรูปที่ 14 จากรูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น และในรูปที่ 14 เป็นผลกระทบจากสิ่งเปื้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น ในขณะที่เดียวกันกระแสรั่วไหลที่เพิ่มขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

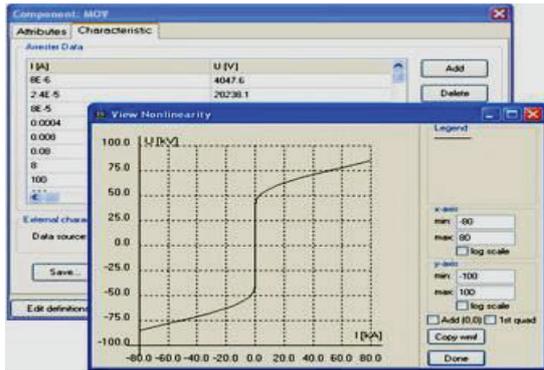
ในสภาวะปกติที่ระดับแรงดันใช้งาน 17.96 kVpeak กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในสภาวะช่วงเริ่มต้น ในรูปที่ 14 ที่ระดับค่าความเปื้อนต่ำ ๆ ประมาณ 1 mA แต่เมื่อระดับค่าความเปื้อนมากขึ้นกระแสรั่วไหลก็มีค่าสูงขึ้นและค่าอุณหภูมิมีค่าสูง โดยเสถียรภาพทางความร้อนของกัสดักเสิร์จชนิดเมทัลลอล็อกซ์เป็นผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิโดยรอบและความสามารถในการกระจายความร้อน (heat dissipation capability) ของกัสดักเสิร์จเอง [1] ซึ่งค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลกระทบโดยตรงกับวาร์วอิลีเมนต์ ที่เกิดการดูดซับพลังงานที่มากเกินไปจนเป็นสาเหตุให้กับดักเสิร์จนำไปสู่สภาวะที่เรียกว่า Thermal Runaway [1-2,7] ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปที่ 1 ความสามารถในการกระจายความร้อนของกัสดักเสิร์จชนิดเมทัลลอล็อกซ์แสดงใน (10)

$$Q = C_T(T - T_a) \quad (10)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิที่วาร์วีสเต็มท์, T_a อุณหภูมิโดยรอบ และ C_T ตัวประกอบการกระจายความร้อน ซึ่งค่าความร้อนที่เกิดขึ้น P เป็นแรงดันไฟฟ้าและองค์ประกอบของวัสดุ แสดงใน (11)

$$P = Ae^{-\left(\frac{W_c}{kT}\right)} \quad (11)$$

เมื่อ W_c พลังงานกระตุ้น, $k=0.86 \times 10 \text{ eV/K}$ (Boltzmann constant), T เป็นอุณหภูมิของวัสดุ และ A ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่จ่ายให้กับดักเสิร์จและขนาดของวาร์วีสเต็มท์ [7]



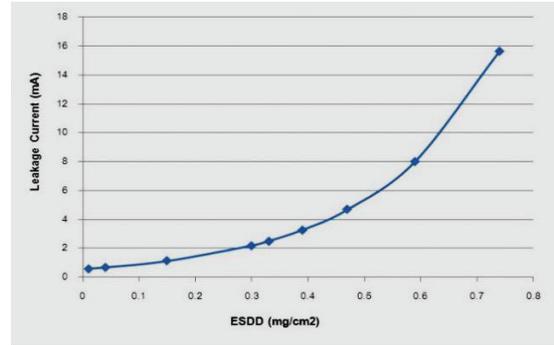
รูปที่ 18 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเมทัลออกไซด์วาริสเตอร์(MOV)

6.4 ผลการทดสอบแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลองตามในรูปที่ 15 โดยการกำหนดค่าแรงดันทดสอบที่ระดับแรงดันใช้งาน 17.96 kVpeak และทำการปรับค่าความต้านทานในแบบจำลองตามตารางที่ 7 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเมทัลออกไซด์วาริสเตอร์(MOV) โดยการอ้างอิงจากรูปที่ 16 เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ MOV จะแสดงค่าตามที่ปรากฏในรูปที่ 18 และในรูปที่ 17 เป็นผลการทำงานของแบบจำลองในโปรแกรม ATP-EMTP ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองในโปรแกรม ATP-EMTP ได้กราฟความสัมพันธ์ของการทดสอบแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์แบบพอร์ชเลนในสภาวะสิ่งเปราะเปื้อนแสดงในรูปที่ 19 ซึ่งจะมีค่ากระแสไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีระดับค่าความเปราะเปื้อนที่สูงขึ้นที่เป็นไปตามผลการทดสอบกับดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ

6.5 ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบ

ผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองซึ่งแสดงในรูปที่ 20

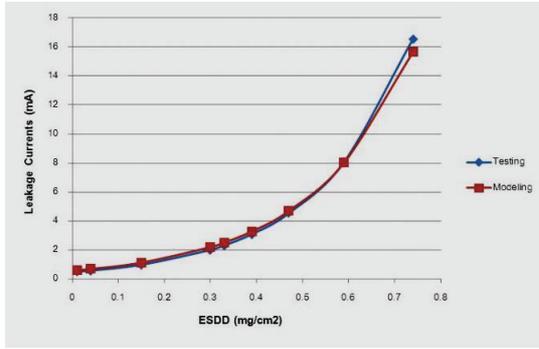


รูปที่ 19 ผลการจำลองแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์แบบพอร์ชเลนในสภาวะสิ่งเปราะเปื้อน

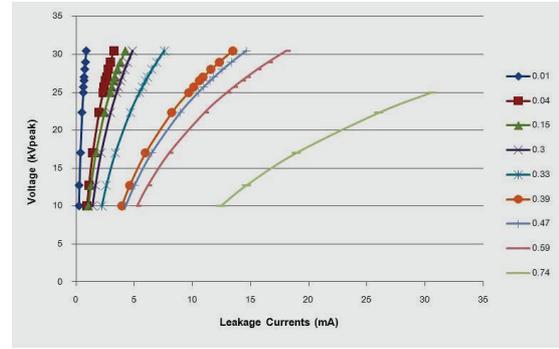
ตารางที่ 7 การคำนวณหาค่าความต้านทาน R ในแบบจำลองกับดักเสิร์จ (V = 12.7 kVrms)

| ESDD (mg/cm2) | I (mA) | $R = \frac{V}{I}$; (MΩ) |
|---------------|--------|--------------------------|
| 0.01 | 0.21 | 60.476 |
| 0.04 | 1.04 | 12.212 |
| 0.15 | 1.20 | 10.583 |
| 0.30 | 1.64 | 7.744 |
| 0.33 | 2.58 | 4.922 |
| 0.39 | 4.63 | 2.743 |
| 0.47 | 5.04 | 2.52 |
| 0.59 | 6.23 | 2.04 |
| 0.74 | 14.85 | 0.855 |

จะมีค่าความผิดพลาดของแบบจำลองสูงสุดไม่เกินร้อยละ 5 ที่ระดับค่า ESDD = 0.47 mg/cm2 เมื่อเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในรูปที่ 20 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์แบบพอร์ชเลนในแต่ละสภาวะสิ่งเปราะเปื้อน ที่เป็นความสัมพันธ์ของค่ากระแสไหลกลับแรงดันใช้งานของกับดักเสิร์จ จากรูปที่ 21 หากนำกับดักเสิร์จไปใช้ในบริเวณพื้นที่ที่มีสิ่งเปราะเปื้อนสูงๆ เช่น ESDD = 0.7 mg/cm2 และที่ระดับแรงดันสูงสุด 20 kVpeak จะมีระดับค่าของกระแสไหลสูงถึง 20 mA



รูปที่ 20 เปรียบเทียบผลการทดสอบและแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์แบบพอร์ซเลนในสภาวะสิ่งเปรอะเปื้อน



รูปที่ 21 ผลการทดสอบแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์แบบพอร์ซเลนในแต่ละสภาวะสิ่งเปรอะเปื้อน

6. การวิเคราะห์และสรุป

ความสามารถในการกระจายของกักดักเสิร์จมีผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของกักดักเสิร์จในระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดการสูญเสียทางความร้อนของกักดักเสิร์จ หรือ Thermal runaway จนนำไปสู่การเกิดแตกร้าที่วาร์วอิลิเมนต์เป็นผลกระทบที่เกิดจากความหนาแน่นของพลังงานที่สะสมในวาร์วอิลิเมนต์ที่สูงมากดังแสดงใน (11) และในรูปที่ 1 [1,8] การพิจารณาถึงสมรรถนะทางไฟฟ้าของกักดักเสิร์จชนิดพอร์ซเลนในระบบจำหน่ายภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อน โดยการทดสอบและสร้างแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ในระบบจำหน่าย 22 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อให้ได้ค่าความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีความสัมพันธ์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยมีค่าความผิดพลาดของค่ากระแสรั่วไหลจากผลการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 ของผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ฉะนั้นแบบจำลองของกักดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์การทำงานของกักดักเสิร์จในระบบจำหน่าย 22 kV ภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อนและยังสามารถทราบถึงค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับกักดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่มีค่าความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น การพยากรณ์ถึงอายุการใช้งานของกักดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ภายใต้สภาวะสิ่งเปรอะเปื้อนได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Sangsaad, *High Voltage Engineering*, Chula Book Center, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2549. (in thai)
- [2] วงศ์พันธ์ ทัศนากูร. การวิเคราะห์การติดตั้งกักดักเสิร์จและการต่อลงดินของซีลด์ของสายเคเบิลใต้ดิน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์(วิศวกรรมไฟฟ้า). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2546.
- [3] Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, IEC Std. 60099-4, Dec.2001.
- [4] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกักดักเสิร์จ เล่มที่ 4 :กักดักเสิร์จออกไซด์โลหะไม่มีช่องว่างสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ, มอก. 2366-2551, กุมภาพันธ์ 2551.
- [5] *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, IEEE Standard C62.22-1997, 1997.
- [6] อุดมศักดิ์ มัลย์วงศ์ และวินัย พุกกะวัน. "การศึกษาค่าความเปรอะเปื้อนของลูกถ้วยที่ก่อให้เกิดความไวตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบสายเปลือย". วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 73 ปีที่ 23 สิงหาคม - ตุลาคม 2553.
- [7] A. Haddad and D. Warne, *Advances in High Voltage Engineering*, MPG Books Limited, Bodmin, Cornwall, UK, 2004.
- [8] *IEC Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems*, IEC Standard 60507-1975, 1975.
- [9] Powerqualityworld (2011, May.20). The Protective Device against Transients. [Online] Available: <http://www.powerqualityworld.com>
- [10] J.J. Woodworth, "Externally Gapped Line Arrester A Comprehensive Review", Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, LA, USA, 2010.

- [11] K. G. Ringler Peter Kirkby C. C. Ervent M. Q. Lat and T. A. Malkiewicz, "The Energy Absorption Capability and Time to Failure of Varistors used in Station Class Metal Oxide Surge Arresters", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, January 1997.
- [12] M.V. Lat, "Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. PAS-102, No. 7, July 1983.
- [13] NGK Insulators, LTD. "Technical Guide", Cat. No. 20, December 1996.
- [14] IEEE Working Group 3.4.1, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 7 No.1, January 1992.
- [15] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999.
- [16] J. Woodworth. (2011, June). Arrester Reference Voltage. [Online] Available: http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/ArresterFacts_027_Arrester_Reference_Voltage.pdf



8. ประวัติ

Wichet Thipprasert was born in Chiang Rai, Thailand. He is currently a Lecturer in Department of Electrical Engineering, the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai (RMUTL), Chiang Rai, Thailand. His main research interests include Arrester Modeling, Development of Mathematical Model of porcelain Insulators Under Polluted Conditions, Electrical Performance of Porcelain Surge Arrester in 22 kV Distribution System under Contaminated Conditions and Leakage Currents of Zinc Oxide Surge Arresters in 22 kV Distribution System Using Thermal Image Camera.