

## แบบจำลองกักเก็บพลังงานชนิดเมทัลออกไซด์ในระบบจำหน่าย 22 kV

วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ\* ญัฐวุฒิ วงษ์แก้ว และ กิตติพันธ์ ประมายนต์

### บทคัดย่อ

ระบบการฉนวนและระบบป้องกันเป็นส่วนหนึ่งในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถช่วยส่งเสริมเสถียรภาพและค่าความเชื่อถือได้ของการส่งจ่ายให้ดียิ่งขึ้น ถ้าได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม กักเก็บพลังงานเป็นอุปกรณ์ป้องกันชนิดหนึ่งที่ใช้งานในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินที่เกิดจาก ฟาผ่า และสวิตชิง การศึกษาและสร้างแบบจำลองกักเก็บพลังงานชนิดเมทัลออกไซด์ในระบบจำหน่าย 22 kV ในโปรแกรม ATP-EMTP จากผลการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้เห็นถึงค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าร้อยละ 4.4 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์ผลกระทบจากกระแสรั่วไหล และเพื่อหาอายุการใช้งานของกักเก็บพลังงานชนิดเมทัลออกไซด์

**คำสำคัญ :** แบบจำลองกักเก็บพลังงาน, กระแสรั่วไหล, แรงดันเกินชั่วคราว

---

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: wichet\_thip@rmutl.ac.th รับเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2558 ตอบรับเมื่อ 16 ธันวาคม 2558

## Modeling of Metal Oxide Arresters in 22 kV Distribution System

Wichet Thipprasert<sup>\*</sup> Nattawoot Wongkeaw and Kittiphun Pramayun

### Abstract

Insulation and protection system as parts of high voltage system, they can improve stability and reliability of distribution system by correctly designing and using of proper equipment. Surge arresters have been used to protect distribution system of Provincial Electricity Authority (PEA) from lightning and switching surge. In this paper, a modeling of Metal Oxide Surge Arrester (MSA) in 22 kV distribution systems was designed using ATP-EMTP program. The simulation results were compared with experimental results of surge arrester sample model. The comparison results are indicated that the error percentage of leakage current less than 4.4 percentages. The proposed model can be used to analyze impact of leakage currents of in the distribution system. Moreover, it can be used to predict lifetime of Zinc Oxide surge arresters.

**Keywords:** Modeling of Surge Arrester, Leakage Current, Temporary Overvoltage

---

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai,  
Chiang Rai.

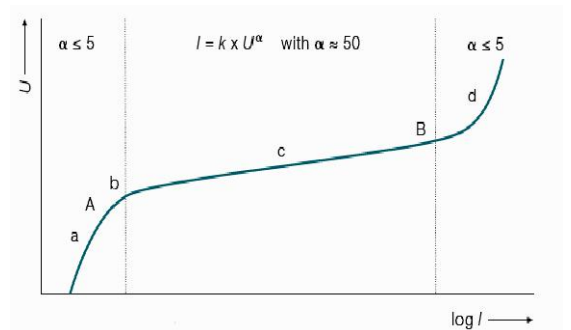
<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: wichet\_thipi@rmutl.ac.th Received 16 February 2015, Accepted 16 December 2015

**1. บทนำ**

ความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ ระบบการฉนวนก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถช่วยส่งเสริมเสถียรภาพของการส่งจ่ายให้ดียิ่งขึ้น ถ้าได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม กับฉนวนเป็นอุปกรณ์ป้องกันชนิดหนึ่งที่ใช้ในงานในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ทำหน้าที่ป้องกันเสิร์จที่เกิดจาก ฟาผ่า(Lightning Surge) หรือ สวิตชิงเสิร์จ (Switching Surge) และรวมถึงการเกิดแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage: TOV) คุณสมบัติการทำงานของกับดักเสิร์จจะประกอบด้วยค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะการใช้งานปกติจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance) แต่เมื่อมีกระแสเสิร์จเข้ามาในระบบเพิ่มมากขึ้นค่าอิมพีแดนซ์กลับลดลง (Low Impedance) เพื่อขจัดกระแสเสิร์จที่เข้ามาในระบบลงสู่พื้นดิน ฉะนั้นแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแส กับดักเสิร์จแยกออกเป็น 2 ชนิด แบบมีแกป (Gap-Silicon carbide : SiC) และไม่มีแกป (Gapless-Zinc Oxide : ZnO หรือ Metal Oxide Varistor (MOV) Arresters [1-2]

แบบจำลองของกับดักเสิร์จจะเป็นคุณลักษณะแรงดันและกระแส ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ตามรายละเอียดในรูปที่ 1 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันและกระแส (V-I Curve) ของ MOV จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในช่วงค่ากระแสต่ำๆ เมื่ออุณหภูมิรอบกับดักเสิร์จหรือพลังงานที่เข้ามายังกับดักเสิร์จมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของวา ล์วอิลีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นด้วยลักษณะนี้จะทำให้กระแสที่ไหลในวา ล์วอิลีเมนต์เพิ่ม

ขนาดขึ้นซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนที่มากพอสมควรทีเดียว ถ้าอุณหภูมิมีค่าเกินกว่าความสามารถทางความร้อนของวา ล์วอิลีเมนต์ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Thermal Runaway ขึ้นและจะทำให้กับดักเสิร์จเกิดความเสียหายได้ [3-7]



**รูปที่ 1** คุณลักษณะแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จชนิด เมทัลออกไซด์ [3]

IEEE Working Group 3.4.11 ในปี พ.ศ. 2514 ได้ทำการสร้างแบบจำลองของกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิมพัลส์และแรงดันของความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานและองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นของแรงดันคงเหลือ และได้นำเสนอแบบจำลองของกับดักเสิร์จขึ้น ในปี พ.ศ. 2535 แต่อย่างไรก็ตามในผลของการคำนวณแรงดันคงเหลือยังคงขาดความแม่นยำที่ค่ากระแสต่ำ [8]

P. Pinceti และ M. Giannetoni ได้ทำการสร้างแบบจำลองของกับดักเสิร์จที่มีลักษณะคล้ายแบบจำลองของกับดักเสิร์จของ IEEE แต่มีองค์ประกอบทางไฟฟ้าน้อยกว่าทำให้ง่ายต่อการคำนวณและได้กำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิมพัลส์และแรงดันของ

ความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่างจากแบบจำลองของกัปดักเสิร์จของ IEEE แต่ผลของแรงดันคงเหลือที่ได้จากการคำนวณที่ค่ากระแสต่ำยังคงไม่แม่นยำ [9]

F. Fernandez และ R. Diaz ได้ทำการสร้างแบบจำลองของกัปดักเสิร์จที่มีค่าองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่น้อยกว่าแบบจำลองของกัปดักเสิร์จของ IEEE และ Pinceti ส่งผลให้การคำนวณมีความรวดเร็วขึ้นและได้กำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิมพัลส์และแรงดันของความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสองตัวขึ้นมาเป็นค่าคงที่ ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองของกัปดักเสิร์จของ IEEE และ Pinceti แต่ให้ผลการคำนวณค่าแรงดันคงเหลือที่มีความแม่นยำสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในการคำนวณค่าแรงดันคงเหลือจากแบบจำลองของ Fernandez ยังพบปัญหาของเสถียรภาพเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง [10]

ในบทความวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองการทำงานของกัปดักเสิร์จในสภาวะการเกิดกระแสรั่วไหลต่ำ โดยการเปรียบเทียบจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ กับผลการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปจำลองและพยากรณ์การใช้งานของกัปดักเสิร์จในระบบจำหน่ายในสภาวะการณของการเกิดแรงดันเกินชั่วคราว

**2. คุณสมบัติและการทำงานของกัปดักเสิร์จ**

ดักเสิร์จฟ้าผ่าแบบซิลิคอนคาร์ไบด์ มีโครงสร้างประกอบด้วยช่องว่างอากาศต่ออนุกรมกับวาล์วอีลีเมนต์ (Valve Element) ซึ่งทำมาจากซิลิคอนคาร์ไบด์ ในสภาวะปกติจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นกระแสไม่ให้ไหล

ผ่านกัปดักเสิร์จลงดิน แต่เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้นและแรงดันเกินนี้มีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาว์นของช่องว่างอากาศ ก็จะเกิดการสปาร์กอเวอร์ขึ้น ทำให้กระแสเสิร์จไหลลงดินได้ การไหลของกระแสเสิร์จผ่านวาล์วอีลีเมนต์นี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันตกคร่อมกัปดักเสิร์จ ซึ่งเรียกแรงดันนี้ว่าแรงดันดีสชาร์จหรือ แรงดันคงค้าง

ลักษณะเส้นแรงดันและกระแสของกัปดักเสิร์จ โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ( $R_{non}$ ) ทั้งชนิด ZnO และ SiC ที่มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถนำมาเขียนอยู่ในรูปสมการคือ

$$I = kV^\alpha \tag{1}$$

เมื่อ  $\alpha$  คือค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุของ  $R_{non}$

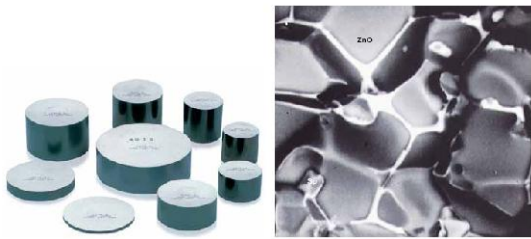
$$\alpha = 4-6 \text{ สำหรับ SiC}$$

$$\alpha = 20-50 \text{ สำหรับ ZnO}$$

$k$  คือค่าคงตัวขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของเกรน  $R_{non}$  ถ้าเกรนยิ่งเล็กความคงทนต่อแรงดันยิ่งสูงขึ้น ดังรูปที่ 2 [1] กัปดักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ หรือ ZnO จะใช้ค่า  $R_{non}$  ที่ทำด้วย ZnO มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกันบรรจุในกระบอกฉนวนดังรูปที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง ZnO จะเป็นตัวกำหนดขนาดของกระแส หรือพลังงานเสิร์จที่ยอมให้ผ่าน ส่วนความสูงจะเป็นตัวกำหนดแรงดัน [11, 13-14]

กัปดักเสิร์จแบบออกไซด์โลหะ เป็นกัปดักเสิร์จชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติดีกว่าแบบซิลิคอนคาร์ไบด์มาก โดยวาล์วอีลีเมนต์ของ ZnO ทำมาจากวัสดุที่เป็นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งก็คือซิงค์ออกไซด์ วัสดุชนิดนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่าซิลิคอนคาร์ไบด์มาก เนื่องจากกัปดัก

เล็รจแบบออกไซด์โลหะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงและมีความสูญเสียที่แรงดันปกติ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีช่องว่างอากาศมาต่ออนุกรมกับ โครงสร้างของกับดักเล็รจ วาล์วอีลีเมนต์จะคงทนต่อแรงดันในสภาวะปกติ



รูปที่ 2 โครงสร้างของกับดักเล็รจชนิด ZnO [1, 3]

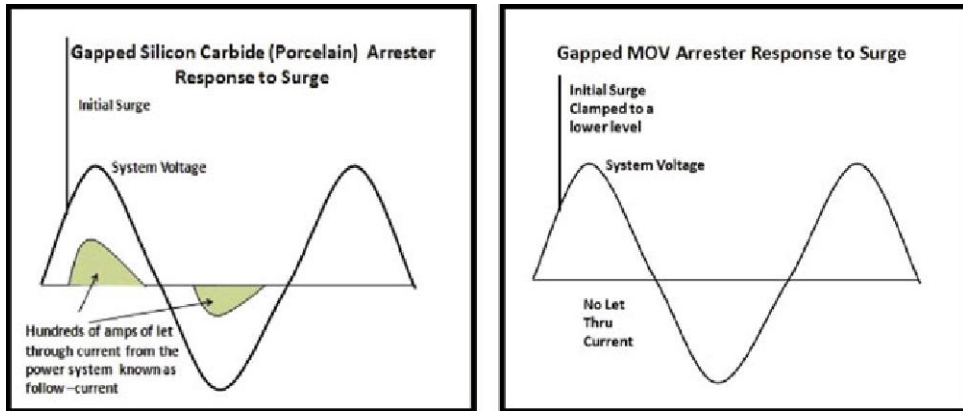
แต่จะนำกระแสจำนวนมากที่ระดับแรงดันค่าหนึ่ง และจะหยุดนำกระแสเมื่อระดับแรงดันลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันข้างต้น ช่องว่างอากาศจึงไม่มีความจำเป็นเพื่อที่จะใช้ในการแยกกับดักเล็รจออกจากดินเนื่องจาก วาล์วอีลีเมนต์จะยอมให้กระแสรั่วเพียงเล็กน้อยไหลผ่านได้ในสภาวะแรงดันปกติและช่องว่างอากาศก็ไม่จำเป็นในการนำมาใช้เพื่อขัดขวางการไหลของกระแสไหลตาม เพราะกระแสนี้จะไม่มีอยู่ในขณะที่แรงดันยังคงต่ำกว่าค่าแรงดันเริ่มนำกระแสในการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างซิลิคอนคาร์ไบด์กับออกไซด์โลหะจากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าที่ระดับกระแสในช่วงกระแสสูง (ช่วง d) คุณสมบัติของทั้งสองจะคล้ายคลึงกันแต่จะแตกต่างกันอย่างมากในช่วงค่ากระแสต่ำ (ช่วง a - c) ที่แรงดันระบบซิลิคอนคาร์ไบด์จะนำกระแสขนาดเป็นร้อยแอมป์ส่วนออกไซด์โลหะจะนำกระแสเพียงขนาด

เป็นมิลลิแอมป์เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีช่องว่างอากาศสำหรับต่ออนุกรมกับออกไซด์โลหะอย่างไรก็ตามข้อควรพิจารณาในการใช้กับดักเล็รจแบบออกไซด์โลหะก็คือความร้อน โดยรอบ ซึ่งพิจารณาจาก V-I Curve ในรูปที่ 1 ของออกไซด์โลหะจะเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในช่วงค่ากระแสต่ำ ๆ เมื่ออุณหภูมิรอบกับดักเล็รจหรือพลังงานที่เข้ามายังกับดักเล็รจมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อุณหภูมิของวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นด้วย ลักษณะนี้จะทำให้กระแสที่ไหลในวาล์วอีลีเมนต์เพิ่มขนาดขึ้นซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนขึ้น ถ้าอุณหภูมิมีค่าเกินกว่าความสามารถทางความร้อนของวาล์วอีลีเมนต์ก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเสียหายด้วยความร้อน (Thermal Runaway) ขึ้นและจะทำให้กับดักเล็รจเกิดความเสียหายได้ [3-7, 12]

### 3. สมรรถนะทางไฟฟ้าของกับดักเล็รจ

กับดักเล็รจแบบ MOV สามารถที่จะทำงานในการทำงานของกับดักเล็รจชนิด SiC กับ MOV ซึ่งกับดักเล็รจชนิด MOV จะมีคุณลักษณะการทำงานการป้องกันที่ดีกว่าลดปัญหาด้านผลกระทบจากสิ่งประอะเปื้อนและไม่มีกระแสไหลตาม เมื่อแรงดันเล็รจผ่านไป แล้วดังรูปที่ 3 [5-6, 11]

ช่วงเวลาจำกัดที่แรงดันความถี่กำลังซึ่งมีขนาดมากกว่าพิคัดแรงดันต่อเนื่องสูงสุดที่ความถี่กำลัง (Maximum Continuous Operating Voltage : MCOV) ขนาดของแรงดันเกินซึ่ง MOV สามารถที่จะทนอยู่ได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาซึ่งแรงดันเกินปรากฏอยู่ ดังรูปที่ 4



a)

b)

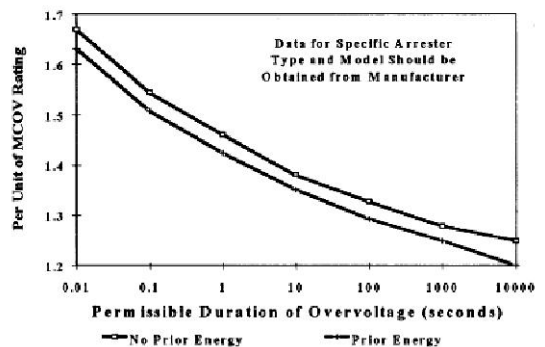
รูปที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะการทำงานของกัณฑ์ดักเสิร์จ a) SiC b) ZnO [11]

พิจารณาค่า TOV ของกัณฑ์ดักเสิร์จให้มีค่าที่เหมาะสม จะต้องทำการหาค่า TOV สูงสุดของระบบกำลังร่วมกับค่าเวลาสูงสุดซึ่งระบบจะต้องทำงานในสภาวะแรงดันที่ไม่ปกติสภาวะแรงดันที่ไม่ปกตินี้เป็นผลมาจากหลาย ๆ องค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ แรงดันเกินบนเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติในระหว่างการเกิดความผิดปกติแบบเฟสกับดิน, แรงดันเกินจากการสับสวิทช์ และเฟลอร์โรเรโซแนนซ์ เป็นต้น [12]

เมื่อกัณฑ์ดักเสิร์จแบบ MOV ได้รับพลังงาน จะทำให้วาล์วอีลีเมนต์ของกัณฑ์ดักเสิร์จดูดซับพลังงานซึ่งเป็นผลให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ วาล์วอีลีเมนต์จะมีความสมดุลระหว่างความร้อนที่สร้างขึ้น โดย วาล์วอีลีเมนต์และความร้อนซึ่งแพร่กระจายออกไปจากกัณฑ์ดักเสิร์จโดยการนำ การพาและการแผ่รังสี เป็นผลให้กัณฑ์ดักเสิร์จยังคงรักษาเสถียรภาพในการทำงานได้ แรงดันเกินคือเหตุการณ์ที่จะทำให้เสถียรภาพในการทำงานดังกล่าวเสียไปโดยที่จะทำให้อาลีเมนต์ดูดซับพลังงานในระดับที่สูงขึ้นภายในช่วงเวลา

แรงดันเกินยังอยู่ในระบบอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ วาล์วอีลีเมนต์ [1, 12]

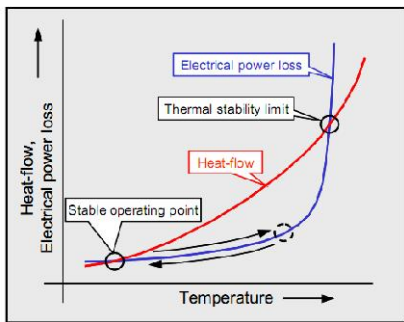
จากการดูดซับพลังงานมากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้กับกัณฑ์ดักเสิร์จเข้าไปอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า Thermal Runaway ซึ่งเป็นสภาวะที่ความร้อนที่สร้างขึ้นมีค่ามากกว่าความร้อนที่กระจายออกไปเป็นสาเหตุให้อาลีเมนต์ที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ค่าความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวของกัณฑ์ดักเสิร์จที่ไม่เคยโหลดและเคยโหลด [11]

ถ้าอุณหภูมิของวาล์วอีลีเมนต์มีค่าในระดับที่สูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับวาล์วอีลีเมนต์ได้และผลที่ตามมาคือเกิดการเบรคควาน์ทางไฟฟ้าขึ้นและการทำงานของกัปดักเล็รจ์ก็จะล้มเหลวถ้าความหนาแน่นของพลังงานมีค่าสูงพอหรือถ้าการกระจายดังรูปที่ 5 [11]

ความหนาแน่นของพลังงานภายในวาล์วอีลีเมนต์เป็นแบบ Non-Uniform จะเป็นสาเหตุให้เกิดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิและจะทำให้เกิดการแตกร้าวของวาล์วอีลีเมนต์หรือ เกิดการเจาะทะลุได้ เหตุการณ์ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าการเพิ่มขึ้นของแรงดันทั้งหมดของวาล์วอีลีเมนต์ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิด Thermal Runaway พลังงานที่กัปดักเล็รจ์สามารถที่จะดูดซับระหว่างการเกิดแรงดันเกิน โดยที่ไม่ทำให้กัปดักเล็รจ์เสียหายนั้นเรียกว่า “Energy Handling Capability” หรือ “Energy Withstand Capability” [1, 13-15]



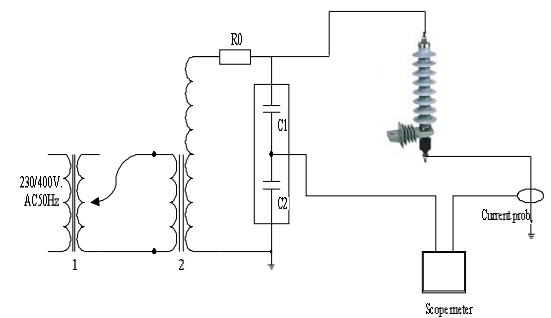
รูปที่ 5 เสถียรภาพทางความร้อนของกัปดักเล็รจ์ชนิด MOV [16]

ความสามารถนี้จะกำหนดอยู่ในหน่วย กิโลจูลต่อ กิโลโวลต์ของ MCOV หรือต่อกิโลโวลต์ของพิกัด

แรงดันทำงาน เนื่องจากว่า Energy Handling Capability ขึ้นอยู่กับรูปแบบของแรงดันเกินที่กำหนด (ขนาด, รูปร่างของคลื่น และช่วงเวลา) Energy Handling Capability ไม่สามารถที่จะกำหนดด้วยค่าค่าเดียว ความสามารถของกัปดักเล็รจ์ในการดูดซับพลังงานนั้น มีความสัมพันธ์กับคุณภาพและปริมาณของวัสดุที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างของวาล์วอีลีเมนต์ [17-20]

### 4. วิธีการทดสอบ

#### 4.1 วงจรการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



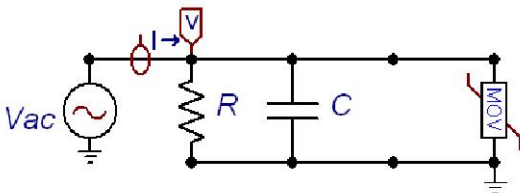
รูปที่ 6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

กัปดักเล็รจ์ที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นกัปดักเล็รจ์ชนิดเมทัลออกไซด์ ผลิตภัณฑ์ A เป็นกัปดักเล็รจ์ขนาดพิกัดแรงดันใช้งาน 21 kV, MCOV 17 kVrms ความสูง 251 mm โดยทำการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย และทดสอบตามวงจรในรูปที่ 6 หม้อแปลงกำลังขนาด 50 kV บันทึกราค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลโดยออสซิลโลสโคปผลิตภัณฑ์ของฟลิก (190B Scope

Meter Series: Fluke) และ the Agilent N2775A power supply and the N2780A/81A) กล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยผลิตภัณฑ์ของฟลัก Fluke Ti25 ทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ IEC 60507 และ IEC 60099-4 [21-22] ปรับระดับแรงดันใช้งานที่ 17.963 kVpeak ระยะเวลาการทดสอบนาน 4 ชั่วโมง บันทึกผลการทดสอบทุก ๆ ระยะเวลา 15 นาที ในรูปที่ 7 เป็นภาพถ่ายความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนเมื่อทำการทดสอบกับดักเสิร์จที่ระดับ 25 kVpeak นาน 4 ชั่วโมง เพื่อสังเกตอุณหภูมิที่ตัวกับดักเสิร์จ



รูปที่ 7 ภาพถ่ายความร้อนของกับดักเสิร์จทดสอบที่ระดับแรงดัน 25 kVpeak



รูปที่ 8 แบบจำลองกับดักเสิร์จ (Proposed Model)

#### 4.2 แบบจำลองกับดักเสิร์จ

แบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ที่นำเสนอ (Proposed Model) โดยการจำลองในโปรแกรม ATP-EMTP เป็นการจำลองการทำงานของกับดักเสิร์จในสภาวะการเกิดแรงดันเกิน TOV ในระบบจำหน่าย 22 kV ดังรูปที่ 8 ซึ่งในแบบจำลองจะประกอบด้วยค่าความต้านทานที่ต่อขนานกับแหล่งจ่ายไฟ คาปาซิเตอร์ และ R<sub>non</sub> หรือ MOV โดยปรับระดับแรงดันการทดสอบตามตารางที่ 1 ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ค่าความต้านทาน R หาได้จาก (2)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ

ระดับแรงดัน (kV) rms	กระแสรั่วไหล (mA)	อุณหภูมิกับดักเสิร์จ T <sub>2</sub> (°C)	อุณหภูมิห้อง T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub> (°C)
2.7	0.08	32.2	31.2	1
17	0.16	31.5	30	1.5
22.3	0.31	32.2	29	3.2
25	0.6	47.2	30	17.2
25.6	0.8	>52.7	31	21

ค่าคาปาซิเตอร์ C เสมือนเป็นสเตรย์คาปาซิเตอร์ของกับดักเสิร์จและต่อขนานกับ R<sub>non</sub> โดยความสัมพันธ์คุณลักษณะแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จจากบริษัทผู้ผลิต ตามรายละเอียดในรูปที่ 9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของค่าความต้านทาน

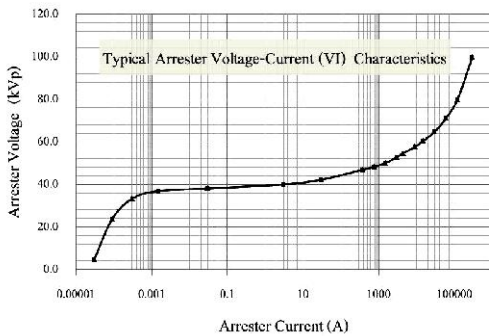
$$R = 0.0002 \times V^3 - 0.0073 \times V^2 + 0.1047 \times V - 0.467 \quad (2)$$



โดยที่

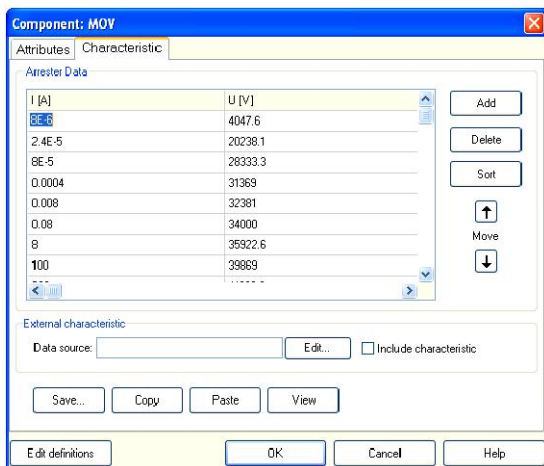
$R$  = ค่าความต้านทานสำหรับ โมเดลกับดักเสิร์จ หน่วย เมกะโอห์ม

$V$  = ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ หน่วย กิโลโวลต์ (kV)

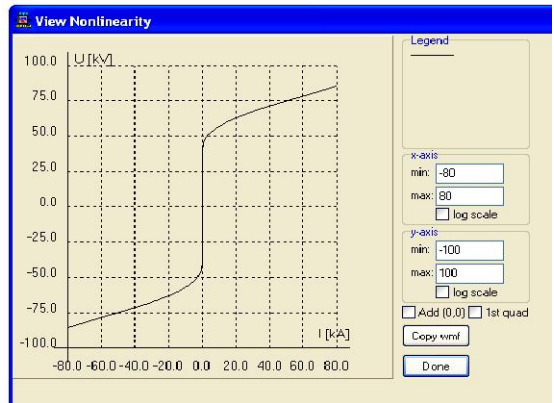


รูปที่ 9 คุณลักษณะแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จ จากบริษัทผู้ผลิต [23]

ค่าคาปาซิเตอร์ที่กำหนดมีค่า 4.75 nF [2] และ  $R_{non}$  พิจารณาจากกราฟคุณลักษณะของแรงดันและกระแสจากบริษัทผู้ผลิตดังแสดงในรูปที่ 9

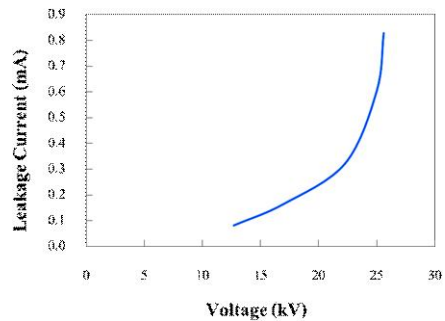


รูปที่ 10 แรงดันและกระแสของค่าความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับ MOV ใน ATP-EMTP

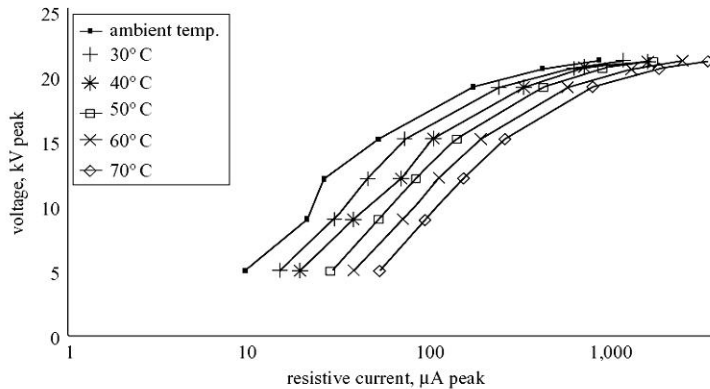


รูปที่ 11 คุณลักษณะแรงดันและกระแสของ MOV

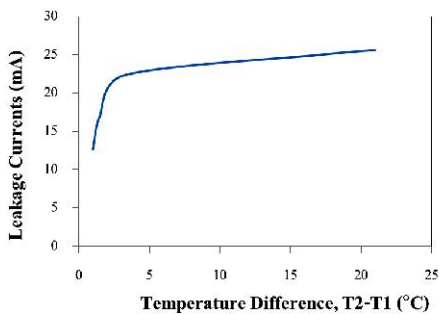
และทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงในโปรแกรมดังในรูปที่ 10 ตรวจสอบความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของ  $R_{non}$  ปรากฏตามรูปที่ 11



รูปที่ 12 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จที่ระดับแรงดัน 18 kVpeak



รูปที่ 14 คุณลักษณะแรงดันและกระแสกับดักเสิร์จเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [1]



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลและความแตกต่างของอุณหภูมิห้อง (T2) กับอุณหภูมิกับดักเสิร์จ (T1)

5. ผลการทดสอบ

5.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

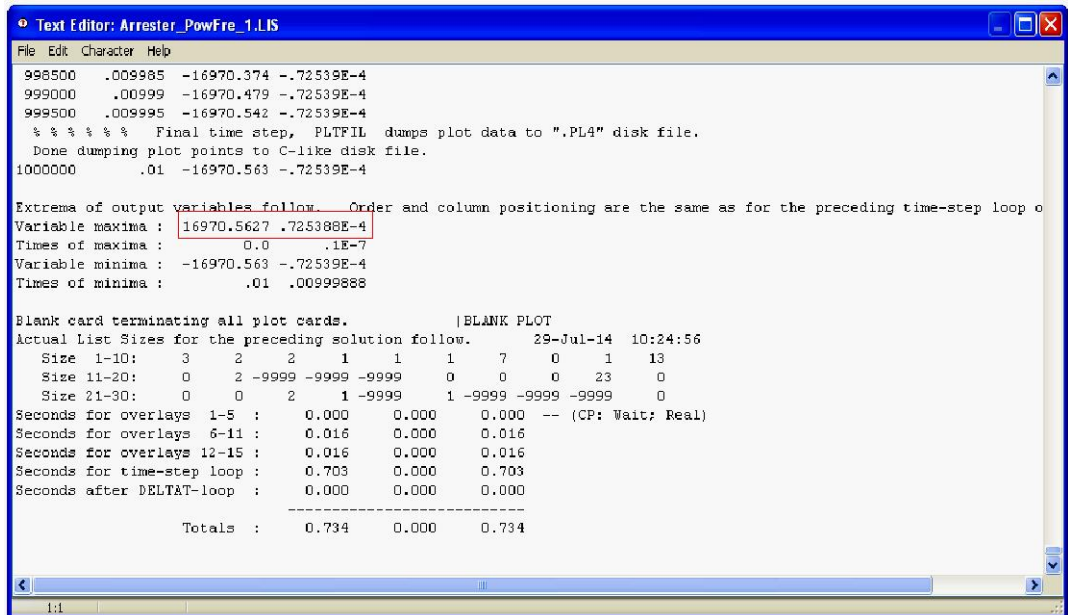
ผลการทดสอบกับดักเสิร์จผลิตภัณฑ์ A จะได้ความสัมพันธ์ค่ากระแสและค่าแรงดันของกับดักเสิร์จในรูปที่ 12 และ 13 กระแสรั่วไหลที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ในสภาวะปกติที่ระดับแรงดันใช้งาน 18 kVpeak

กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะในสภาวะช่วงเริ่มต้น ในรูปที่ 12 และความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลกับค่า

ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ห้องกับอุณหภูมิกับดักเสิร์จที่ปรากฏในรูปที่ 13 ประมาณ 1 mA แต่เมื่อระดับแรงดันที่สูงขึ้น กระแสรั่วไหลก็มีค่าสูงขึ้น และค่าอุณหภูมิมีค่าสูง โดยเสถียรภาพทางความร้อนของกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์เป็นผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิโดยรอบและความสามารถในการกระจายความร้อน (heat dissipation capability) ของกับดักเสิร์จเอง[1] ซึ่งค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลกระทบโดยตรงกับวาร์วอิลีเมนต์ ที่เกิดการดูดซับพลังงานที่มากเกินไปจนเป็นสาเหตุให้กับดักเสิร์จนำไปสู่สภาวะที่เรียกว่า Thermal Runaway [3-5, 14] ในรูปที่ 14 ความสามารถในการกระจายความร้อน  $Q$  ของกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์แสดงใน (3)

$$Q = C_T (T - T_a) \tag{3}$$

เมื่อ  $T$  คืออุณหภูมิที่วาร์วอิลีเมนต์  $T_a$  อุณหภูมิโดยรอบ และ  $C_T$  ตัวประกอบการกระจายความร้อน ซึ่งค่าความร้อนที่เกิดขึ้น  $P$  เป็นแรงดันไฟฟ้าและองค์ประกอบของวัสดุแสดงใน (4)



รูปที่ 15 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ระดับแรงดัน 12 kVpeak

$$P = Ae^{-\left(\frac{W_c}{kT}\right)} \tag{4}$$

เมื่อ  $W_c$  พลังงานกระตุ้น,  $k=0.86 \times 10^6 \text{ eV/K}$  (Boltzmann constant),  $T$  เป็นอุณหภูมิของวัสดุ และ  $A$  ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่จ่ายให้กับดักเสิร์จและขนาดของอาร์วอีลีเมนต์ [1]

**5.2 ผลการทดสอบแบบจำลอง**

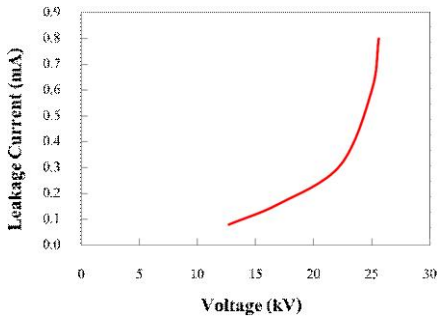
การทดสอบแบบจำลองโดยการกำหนดค่าแรงดันทดสอบที่ระดับแรงดันเท่ากับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการตามตารางที่ 1 ผลการทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบ 12 kVpeak รายละเอียดที่ปรากฏจะแสดงถึงค่าแรงดันและค่ากระแสสูงสุดการทำงานของแบบจำลอง (run program) ที่ระดับแรงดันตาม

ตารางที่ 1 ได้ค่าความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลกับระดับแรงดันทดสอบ แสดงดังในรูปที่ 15, 16 และตารางที่ 2

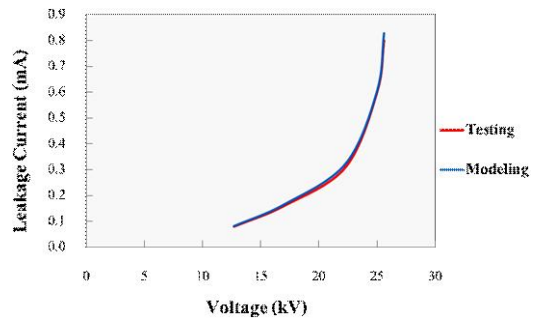
การทดสอบแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์เพื่อที่สามารถหาค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ที่ระดับแรงดันตามที่กำหนดในตารางที่ 1 ได้ค่าความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลกับระดับแรงดันทดสอบปรากฏในรูปที่ 16 ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของแรงดันและกระแสรั่วไหลเป็นไปตามค่าความสัมพันธ์ในรูปที่ 1

ซึ่งผลการเปรียบเทียบกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ผลิตภัณฑ์ A ในห้องปฏิบัติการและผลการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ของกระแสและระดับแรงดันทดสอบปรากฏดังตารางที่ 2 และรูปที่ 17 ค่ากระแสรั่วไหลที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการและที่ได้จากแบบจำลอง

มีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าร้อยละ 4.4 ของค่าที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 16 ผลการทดสอบในแบบจำลอง



รูปที่ 17 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบและจากแบบจำลอง

## 6. สรุปผล

ความสามารถในการกระจายของกับดักเสิร์จมีผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของกับดักเสิร์จในระบบไฟฟ้ากำลัง การเกิดการสูญเสียทางความร้อนของกับดักเสิร์จ หรือ Thermal runaway จนนำไปสู่การเกิดแตกฉนวนที่วาร์วลิเมนต์ เป็นผลกระทบที่เกิดจากความหนาแน่นของพลังงานที่สะสมในวาร์วลิเมนต์ที่สูงมากดังแสดงใน (3) และในรูปที่ 5 [1, 4]

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบและผลการจำลอง

ระดับแรงดัน (kV)rms	กระแสรั่วไหล จากการทดสอบ (mA)	กระแสรั่วไหล จากแบบจำลอง (mA)	ร้อยละ ค่าความผิดพลาด
12.7	0.08	0.0818	2.31
17	0.16	0.165	3.32
22.3	0.31	0.324	4.37
25	0.6	0.605	0.77
25.6	0.8	0.829	3.57

แบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ในระบบจำหน่าย 22 kV ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ได้ค่าความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าความสัมพันธ์ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าความผิดพลาดของค่ากระแสรั่วไหลจากผลการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 4.4 ของผลการทดสอบ ฉะนั้นแบบจำลองของกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์การทำงานของกับดักเสิร์จในระบบจำหน่าย 22 kV และยังสามารถทราบถึงค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับกับดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่มีค่าความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น การพยากรณ์ถึงอายุการใช้งานของกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์ได้ และยังเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าการทำงานของกับดักเสิร์จในกรณีการเกิดแรงดันเกินเสิร์จจากฟ้าผ่าแบบ multiple lightning impulse currents เป็นต้น

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Haddad and D. Warne, “Advances in High Voltage Engineering”, MPG Books Limited, Bodmin, Cornwall, UK, 2004.
- [2] S. Sangsaad, “High Voltage Engineering”, Chula Book Center, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2549. (in Thai)
- [3] M. Kobayashi, M. Mizuno, M. Hayashi and Y. Sughita, “Metal Oxide Surge Arrester”, IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-21(6), 1986, pp. 989 – 996.
- [4] M.V. Lat, “Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 102, 1983, pp. 2194-2202.
- [5] A.A. Shehab, “Design of Lightning Arresters for Electrical Power Systems Protection”, Power Engineering and Electrical Engineering 11, 2013, pp. 433-442.
- [6] V. Vita, A.D. Mitropoulou, L. Ekonomou, S. Panetsos and I.A. Stathopoulos, “Comparision of metal Oxide surge arresters circuit model and implementation on high voltage transmission lines of the Hellenic network” IET Generation, Transmission & Distribution 4, 2010, pp. 846-853.
- [7] C. Abhinay, K.M. Kiran and B. Ravikumar, “Investigation of Transient and Temporary Overvoltages in a Wind Farm”, the Power System Technology (POWERCON 2012) 2012, Auckland, New Zealand.
- [8] IEEE WG 3.4.11, “Modeling of metal oxide surge arrester”, IEEE Trans. on Power Del. 7, 1992, pp. 302-309.
- [9] P. Pinceti and M. Giannettoni, “A simplified model for zinc oxide surge arresters”, IEEE Trans. on Power Del. 14(2), 1999, pp. 393-398.
- [10] F. Fernandez and R. Diaz, “Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations”, IPST 2001 on Power System Transients, Rio De Janeiro: Brazil, 2001.
- [11] J.J. Woodworth, “Externally Gapped Line Arrester A Comprehensive Review”, Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, LA: USA, 2010.
- [12] C.A. Christodoulou, L. Ekonomoi, A.U. Mitropoulou, V. Vita and I.A. Stathopoulos, “Surge Arrester circuit Models review and their application to a Hellenic 150 kV Transmission line”, Simulation Modelling Practice and Theory 18, 2010, pp. 836-849.
- [13] IEEE Std. C62.11-2005, “IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)”, IEEE Power Engineering Society.
- [14] A.G. Kanashiro, M. Zanotti Jr, P.F. Obase and W.R. Bacega, “Diagnostic of Silicon Carbide Surge Arresters using Leakage Current Measurement”, IEEE Latin America Transactions 9, 2011, pp. 761-766.

- [15] V. Podporkin Georgij, Yu Enkin Evgeniy, S. Kalakutsky Evgeniy, E. Pilshikov Vladimir, and D. Sivaev Alexander, “Overhead Lines Lightning Protection by Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters”, IEEE Trans. On Power Del. 26, 2011, pp. 214-221.
- [16] V. Hinrichsen, “Metal Oxide Surge Arrester”, Available: <http://www.energy.siemens.com/nl/-pool/hq/powertransmission/high-voltageproducts-/surge-arresters-and limiters/-aboutus/arrester-book-1400107.pdf>, July 2001.
- [17] E.T. Wanderley Neto, E.G. da Costa, M.J.A. Maia, T.C.L. Galindo and A.H.S. Costa, “Electro-thermal Simulation of ZnO Arresters for Diagnosis Using Thermal Analysis”
- [18] C.A. Christodoulou, I.F. Gonos and I.A. Stathopoulos, “Estimation of the parameters of metal oxide gapless surge arrester equivalent circuit models using genetic algorithm”, Electric Power Systems Research 81, 2011, pp.1881–1886.
- [19] I.A. Metwally, “Measurement and calculation of surge-arrester residual voltages”, Measurement 44, 2011, pp.1945–1953.
- [20] C.A. Christodoulou, L. Ekonomou, A.D. Mitropoulou, V. Vita and I.A. Stathopoulos, “Surge arresters’ circuit models review and their application to a Hellenic 150 kV transmission line”, Simulation Modelling Practice and Theory 18, 2010, pp.836–849.
- [21] IEC Std. 60507-1975, “Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems”, International Electrotechnical Commission (IEC).
- [22] IEC Std. 60099-4, “Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”, International Electrotechnical Commission (IEC).
- [23] J. Woodworth, “Arrester Reference Voltage”, [Online] Available: [http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf\\_files/ArresterFacts\\_027\\_Arrester\\_Reference\\_Voltage.pdf](http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/ArresterFacts_027_Arrester_Reference_Voltage.pdf), June 2011.